



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

**A OCUPAÇÃO DA ORLA DA BAÍA DA RIBEIRA E SEUS IMPACTOS
SOBRE A HIDRODINÂMICA LOCAL. UMA INVESTIGAÇÃO ATRAVÉS DE
MODELAGEM NÚMERICA**

Por

TAOAN SILVA FRANKLIN

Dissertação de Mestrado

Submetida em satisfação parcial dos requisitos para o

MESTRE EM CIÊNCIAS

GEOLOGIA COSTEIRA E SEDIMENTAR

ao

Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Geologia

Câmara de Ensino de Pós-Graduação e Pesquisa

da

Universidade Federal da Bahia

Orientador: Dr. Guilherme Camargo Lessa

Comissão examinadora:

Prof. Dr. Carlos Augusto França Schettini (UFC)

Prof. Dr. Mauro Cirano (UFBA)

Salvador - Ba

Maio de 2009

FRANKLIN, TAOAN SILVA

A ocupação da orla da Baía da Ribeira e seus impactos sobre a hidrodinâmica local. Uma investigação através de modelagem numérica – Salvador-Ba, 117p., (Universidade Federal da Bahia – Instituto de Geociências – Pós-Graduação em Geologia. Mestrado em Geologia Costeira e Sedimentar, 2009).

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Bahia.

1. Modelagem hidrodinâmica
2. Alterações morfológicas
3. Impactos na circulação de água

RESUMO

A região da Baía da Ribeira abriga cerca de 6% da população do município de Salvador, sendo considerada uma das áreas da cidade com o maior grau de degradação urbana e ambiental. Ao longo dos últimos 50 anos, a ocupação intensa e desordenada desta região avançou sobre os manguezais e áreas de intermaré, implicando numa redução de aproximadamente 43% do espelho d'água original da baía e a destruição quase completa das áreas de mangue. Este trabalho investiga, através de modelagem numérica, o impacto das alterações históricas do contorno e morfologia do fundo da Baía da Ribeira sobre a circulação de água. Os resultados indicam que a redução das dimensões originais da baía afetou significativamente a hidrodinâmica local. Entre 1959 e 2007 houve uma redução da ordem de 45% do prisma de maré, que se refletiu numa redução de mesma ordem de grandeza da magnitude das velocidades de corrente na boca da baía e no padrão da circulação residual. O tempo de renovação das águas da baía diminuiu entre 1959 e 2007, devido à redução significativa do volume da baía, o que por sua vez, favoreceu uma renovação mais rápida do volume de água presente no corpo da baía.

ABSTRACT

Baía da Ribeira is a 3.2 km² indentation of Baía de Todos os Santos where about 6% of the population of the city of Salvador resides. The bay is considered the most degraded coastal region within the city limits, as a result of a long history of urbanization and industrialization. During the last fifty years, widespread reclamation of mangroves and tidal flat areas resulted in a reduction of 43% of the bay area. With the aid of a 2D simulation model, the impacts of the morphological changes upon the water circulation were assessed. The results show that significant changes might have occurred as a result of smaller bay areas. Between 1959 and 2007 there was a 45% reduction on the tidal prism, resulting in decreasing tidal current velocities at bay mouth. The residence time was reduced between 1959 e 2007 due so large reduction on bay volume. This large reduction induced more fast renovation on water volume present in this water body.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador e grande amigo, Dr. Guilherme Camargo Lessa, por ter me guiado com verdadeira dedicação pelos caminhos da ciência e me proporcionado a realização deste trabalho. Sou sinceramente grato aos meus pais, familiares e todos os amigos que de alguma forma me fortaleceram ao longo da minha caminhada em rumo ao conhecimento.

Também gostaria de agradecer ao Programa de Pós-Graduação em Geologia/UFBA e ao CNPq pela oportunidade concedida e pelo financiamento de meus estudos.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO CONCEITUAL.....	5
2.1 CIRCULAÇÃO ESTUARINA.....	5
2.1.1 PROPAGAÇÃO DA MARÉ EM AMBIENTES ESTUARINOS.....	7
2.1.2 CORRENTES DE MARÉ EM AMBIENTES ESTUARINOS.....	8
2.2 QUALIDADE E CAPACIDADE DE RENOVAÇÃO DAS ÁGUAS ESTUARINAS.....	9
3 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DA ÁREA DE ESTUDO.....	14
3.1 MORFOLOGIA E DISTRIBUIÇÃO SEDIMENTAR.....	14
3.2 CLIMA.....	16
3.3 CONTRIBUIÇÃO FLUVIAL.....	17
3.4 CONDIÇÕES DE SANEAMENTO AMBIENTAL.....	19
3.5 CIRCULAÇÃO DE ÁGUA (ESTUDOS PRÉVIOS).....	20
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
4.1 MAPEAMENTO DA EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA.....	21
4.2 BATIMETRIA.....	21
4.3 AQUISIÇÃO DE DADOS DE CAMPO PARA VALIDAÇÃO DO MODELO E CARACTERIZAÇÃO DA CIRCULAÇÃO ESTUARINA.....	23
4.4 MODELAGEM HIDRODINÂMICA.....	26
5 RESULTADOS.....	31
5.1 ALTERAÇÕES MORFOLÓGICAS DA BAÍA DA RIBEIRA.....	31
5.2 CARACTERIZAÇÃO DA HIDRODINÂMICA ESTUARINA ATUAL E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO.....	35
5.2.1 MARÉS.....	36
5.2.2 CORRENTES E DESCARGAS.....	38
5.2.3 PERFIS VERTICAIS DE SALINIDADE E TEMPERATURA.....	46
5.2.4 SÍNTESE DA CARACTERIZAÇÃO DA HIDRODINÂMICA E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO.....	48
5.3 ANÁLISE DOS DIFERENTES CENÁRIOS MODELADOS.....	50
5.3.1 MARÉS.....	53
5.3.2 CORRENTES E VAZÕES PARA SIMULAÇÕES SEM VENTOS.....	54
5.3.4 CORRENTES EM 2007 SOB EFEITO DE VENTOS.....	61

5.3.5 CAPACIDADE DE RENOVAÇÃO DAS ÁGUAS PARA SIMULAÇÕES SEM VENTO	64
5.3.6 CAPACIDADE DE RENOVAÇÃO DAS ÁGUAS PARA SIMULAÇÕES COM VENTO.....	66
6 DISCUSSÃO.....	70
7 CONCLUSÃO	75
REFERÊNCIAS	76
ANEXOS	82
ANEXO 1 – Análise e sensibilidade do modelo.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Densidade demográfica do Brasil (IBGE, 2000).	2
Figura 2: Baía da ribeira, mapa de localização. O mapa menor indica a posição da Baía da Ribeira no interior da Baía de Todos os Santos (BTS).....	3
Figura 3: Padrões de circulação estuarina segundo (PRITCHARD, 1952). De cima para baixo: (A) Altamente Estratificado (cunha salina), (B) Parcialmente Misturado e (C) Bem Misturado.	6
Figura 4: Distorção típica da onda de maré em águas rasas. Com frentes mais verticalizadas e costas mais suaves.....	8
Figura 5: Mapa de distribuição textural dos sedimentos da Baía da Ribeira: sedimentos finos (lama levemente cascalhosa e lama arenosa levemente cascalhosa) , sedimentos de textura intermediária (lama cascalhosa, areia lamosa levemente cascalhosa e areia cascalho-lamosa), sedimentos grosseiros (areia levemente cascalhosa e areia cascalhosa). Adaptado de Vilas Boas & Nascimento (1979).....	15
Figura 6: Rosa dos ventos para o período de verão e inverno de 1999, em Mar Grande, onde a direção indicada mostra de onde vem o vento (CRA, 2000 b).	17
Figura 7: Localização da Barragem do Rio do Cobre e sua desembocadura na Baía da Ribeira (Google, 2007).	18
Figura 8: Esquema de aproximação batimétrica das áreas de estirâncio (áreas de mangue ou planícies de maré). Estão indicados pelos perfis AB e CD os gradientes batimétricos aplicados do mangue para o micro canal de maré e a zona de sub-maré na baía, respectivamente.	23
Figura 9: Localização das estações de monitoramento na Baía da Ribeira.....	25
Figura 10: Série de maré utilizada como condição de contorno dos modelos, correspondendo ao período de 01 a 29 de março de 2006.....	29
Figura 11: Rosas dos ventos utilizados nas simulações para os períodos de inverno (esquerda) e verão (direita). Os dados foram obtidos das séries de ventos medidas em Mar Grande (CRA, 2000). A direção indicada mostra de onde vem o vento.....	30
Figura 12: Espelhos d'água da Baía da Ribeira em diferentes épocas. Na legenda estão indicadas em km ² as áreas dos respectivos cenários.....	32
Figura 13: Modelo batimétrico da Ribeira no cenário de 1959. A linha tracejada indica a posição do zero batimétrico.	33

Figura 14: Modelo batimétrico da Ribeira no cenário de 1980. A linha tracejada indica a posição do zero batimétrico.	34
Figura 15: Modelo batimétrico da Ribeira no cenário de 2007. A linha tracejada indica a posição do zero batimétrico.	35
Figura 16: Séries das marés observadas no Porto de Salvador e na Baía da Ribeira em abril de 2005. Em vermelho esta o sinal, da mesma maré, simulada pelo modelo hidrodinâmico. As elevações de baixa-mar na Baía da Ribeira foram registradas incorretamente pelo marógrafo devido à empoçamentos ocorridos próximo à baixa-mar.	37
Figura 17: Ajuste linear entre as marés simuladas e observadas na Baía da Ribeira em 08 a 10/04/2005. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.	37
Figura 18: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 08 a 10/04/2005.....	37
Figura 19: Local de monitoramento de fluxo na boca da Baía da Ribeira. O sentido positivo do fluxo está indicado pela seta preta.	38
Figura 20: Vazões observadas e simuladas em 08/04/2005. No eixo vertical secundário está plotada a maré do porto de Salvador, indicando o sentido das vazões. .	39
Figura 21: Campo de correntes ($m s^{-1}$) do perfil transversal do canal na boca da Baía da Ribeira (Figura 19), para o ciclo de maré monitorado em 8/04/2005. O perfil batimétrico da seção (linha preta grossa) tem origem na margem esquerda do canal monitorado.....	40
Figura 22: Ajuste linear entre as vazões simuladas e observadas na Baía da Ribeira em 08/04/2005. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.....	40
Figura 23: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 08/04/2005.....	41
Figura 24: Vazões observadas e simuladas na Baía da Ribeira em 28/09/2006. No eixo vertical secundário está plotada a maré do porto de Salvador, indicando o sentido das vazões.	42
Figura 25: Campo de correntes ($m s^{-1}$) do perfil transversal do canal na boca da Baía da Ribeira (Figura 19), para o ciclo de maré monitorado em 28/09/2006. O perfil batimétrico da seção (linha preta grossa) tem origem na margem esquerda do canal monitorado.....	42

Figura 26: Ajuste linear entre as vazões simuladas e observadas na Baía da Ribeira em 28/09/2006. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.....	43
Figura 27: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 28/09/2006.....	43
Figura 28: Velocidades das correntes observadas vs simuladas na Baía da Ribeira em 29/08/2008.....	44
Figura 29: Perfil de velocidades residuais ao longo da coluna d'água (média do ciclo monitorado), observado na Baía da Ribeira em 29/08/2008.	45
Figura 30: Ajuste linear entre as velocidades das correntes simuladas e observadas na Baía da Ribeira em 29/08/2008. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.	45
Figura 31: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 29/08/2008.....	46
Figura 32: Perfis verticais de salinidade monitorados na boca da Baía da Ribeira ao longo de um ciclo de maré. Os dados representam os valores médios de salinidade ao longo da profundidade adimensional para cada período de monitoramento. O valor do desvio padrão da média está indicado pelas linhas horizontais.	47
Figura 33: Perfis verticais de temperatura monitorados na boca da Baía da Ribeira ao longo de um ciclo de maré. Os dados representam os valores médios de salinidade ao longo da profundidade adimensional para cada período de monitoramento. O valor do desvio padrão da média está indicado pelas linhas horizontais.	48
Figura 34: Malhas de elementos finitos utilizadas na construção dos cenários modelados da Baía da Ribeira.	51
Figura 35: Posição das estações de controle (pontos numerados) utilizados para a comparação entre características hidrodinâmicas dos diferentes cenários simulados. O perfil transversal localizado na boca da baía indica a transversal do canal onde foram extraídos os dados de vazão para a comparação entre os diferentes cenários.	52
Figura 36: Séries de maré computadas pelo modelo hidrodinâmico na estação 6 para os diferentes cenários observados.....	53
Figura 37: Perfis transversais na boca da Baía da Ribeira (Figura 35). A posição da estação de controle nº 2, está indicada pelo ponto em vermelho.	54
Figura 38: Velocidades de corrente máximas a cada 6h para cada período de maré enchente ou vazante, extraídas na boca da Baía da Ribeira (estação nº 2, Figura 35). A	

magnitude das velocidades de corrente corresponde à direção preferencial do fluxo no ponto monitoramento.....	56
Figura 39: Série de maré e vazões simuladas, extraídas na seção de monitoramento na saída da baía (Figura 35). Verifica-se uma redução na magnitude das descargas partindo dos cenários pretéritos para o mais recente.	57
Figura 40: Velocidades das correntes residuais eulerianas (média de 2 ciclos consecutivos de maré de sizígia).	59
Figura 41: Velocidades das correntes residuais eulerianas (média de 2 ciclos consecutivos de maré de quadratura).	60
Figura 42: Magnitude das correntes máximas (em intervalos de 6h) para cada período de maré enchente ou vazante. Cada gráfico indica o efeito das diferentes condições de ventos (verão, inverno e sem ventos) sobre as velocidades de correntes máximas de enchente e vazante no cenário de 2007. As séries referem-se à componente das velocidades na direção principal do fluxo na saída da Baía da Ribeira.	61
Figura 43: Velocidades de correntes residuais eulerianas (média de um dois ciclos consecutivos de maré de sizígia) para o cenário de 2007 sob diferentes condições de vento.....	63
Figura 44: Curvas de renovação das águas na Baía da Ribeira, mostrando o percentual de renovação das águas da baía ao longo de 28 dias de simulação. Os diferentes pontos observados referem-se às estações de monitoramento indicadas anteriormente na Figura 35.	64
Figura 45: Tempo de renovação em dias, para 100% de renovação das águas na Baía da Ribeira.....	65
Figura 46: Tempos de renovação em dias, para 63% de renovação das águas na Baía da Ribeira.....	66
Figura 47: Curvas de renovação das águas na Baía da Ribeira, mostrando o percentual de renovação das águas da baía, ao longo de 28 dias de simulação, para as diferentes condições de ventos. Os diferentes pontos observados referem-se às estações de monitoramento indicadas anteriormente na Figura 49.	67
Figura 48:Tempo de renovação em dias, para 100% de renovação das águas na Baía da Ribeira, sob efeito de ventos de verão e inverno.	68
Figura 49: Tempo de renovação em dias, para 63% de renovação das águas na Baía da Ribeira, sob efeito de ventos de verão e inverno.	69

Figura 51: Sinal da maré para diferentes valores de viscosidade turbulenta E (Pa s^{-1}).....	82
Figura 52: Magnitude das correntes para diferentes valores de viscosidade turbulenta E (Pa s^{-1}).....	83
Figura 53: Magnitude das vazões para diferentes valores de viscosidade turbulenta E (Pa s^{-1}).	83
Figura 54: Sinal da maré para diferentes valores de rugosidade de Manning (n) das áreas de submaré.....	84
Figura 55: Magnitude das correntes para diferentes valores de rugosidade de Manning (n) das áreas de submaré.....	84
Figura 56: Magnitude das correntes para diferentes valores de rugosidade de Manning (n) das áreas de submaré.....	85
Figura 57: Sinal da maré para diferentes valores de rugosidade de Manning (n) das áreas de intermaré.	85
Figura 58: Magnitude das correntes para diferentes valores de rugosidade de Manning (n) das áreas de intermaré.....	86
Figura 59: Magnitude das vazões para diferentes valores de rugosidade de Manning (n) das áreas de intermaré.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Normais Climatológicas (1961 a 1990)	16
Tabela 2: Listagem dos monitoramentos e equipamentos utilizados.....	25
Tabela 3: Dimensões da Baía da Ribeira nos cenários estudados.....	31
Tabela 4: Prismas de maré (10^6 m^3) para os diferentes cenários processados pelo modelo hidrodinâmico.	54

1 INTRODUÇÃO

As regiões costeiras, com sua grande diversidade de recursos naturais e facilidades de transporte, são bastante atraentes à ocupação humana e propiciam o crescimento de grandes centros urbanos nas áreas litorâneas. Atualmente, a zona costeira abriga 45% da população humana mundial e 75% das cidades com mais de 10 milhões de pessoas (CROSSLAND et al., 2005)

Baías e estuários sempre foram locais propícios ao desenvolvimento de núcleos urbanos, dada a sua possibilidade de defesa, facilidade de aportagem e abundância de recursos naturais. A urbanização excessiva de suas margens causa, na maioria das vezes, uma série de efeitos deletérios, relacionados ao desmatamento, ao aterro do estirâncio, à pesca predatória, ao despejo de resíduos domésticos e industriais, às dragagens, dentre outras. Os efeitos dessas atividades são observados na perda dos mangues, nas alterações da morfologia natural e da hidrodinâmica, na poluição das águas e leito submarino, na redução da produtividade pesqueira e nas limitações quanto à navegação e usos recreativos (JIANG et al., 2001).

Aterros e modificações da geometria dos estuários podem provocar distorções na onda de maré e reduções do prisma de maré, o que conseqüentemente reduz a velocidade das correntes (GONG et al., 2008; PENDON et al., 1998; TÖNIS et al., 2002; VAN DER WAL et al., 2002). Correntes mais fracas favorecem o assoreamento que, por sua vez, reduz ainda mais a magnitude das correntes, criando um mecanismo de retro-alimentação positivo que acaba por gerar crescente dificuldade de renovação das águas estuarinas (WOLANSKI et al., 2001; WANG et al., 2002). O assoreamento, tende ainda a gerar uma distorção da onda de maré que, por promover fluxos mais vigorosos na enchente, tende a dificultar a exportação da carga detrítica presente no leito ou em suspensão (WOLANSKI et al., 2001; WANG et al., 2002).

A pressão populacional ao longo da costa brasileira (Figura 1) fez com que 13 das nossas 20 maiores cidades estejam localizadas a menos de 50 km da costa. Importantes centros urbanos, como Salvador, no estado da Bahia, situam-se ao redor de baías e estuários, locais de circulação restrita e sujeitos à degradação ambiental devido à ocupação humana não planejada. Dragagens e aterros das margens estuarinas, assim como a invasão das áreas de estirâncio, são bastante comuns. As alterações na morfologia original geralmente tendem a reduzir o espelho d'água e limitar o uso destas áreas para fins pesqueiros, recreativos, turísticos e de navegação. Além disso, a emissão

de dejetos urbanos e industriais gera a acumulação de resíduos sólidos e a perda da qualidade de água. Tais problemas têm chamado progressivamente mais a atenção da sociedade, e se tornado social e cientificamente mais relevantes.

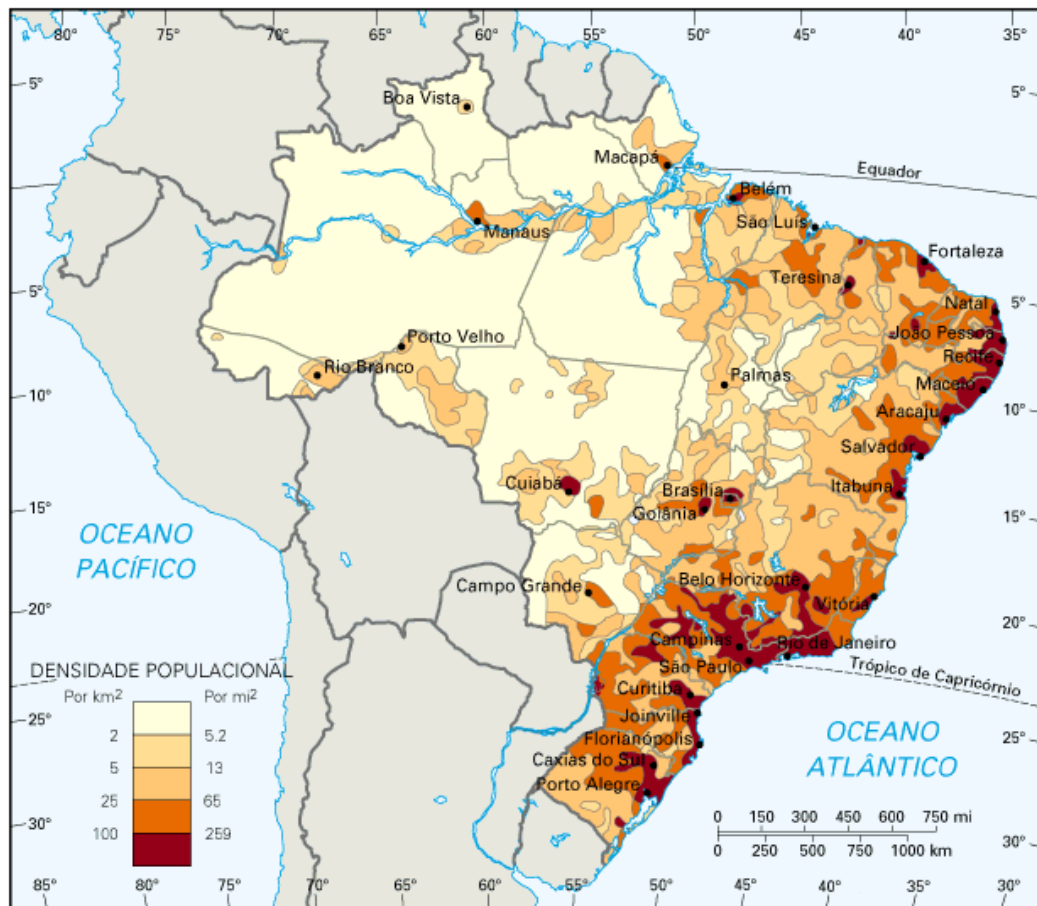


Figura 1: Densidade demográfica do Brasil (IBGE, 2000).

Na Baía de Todos os Santos o processo de aterro de suas margens foi relativamente pequeno, dada a sua grande extensão. Porém, em determinadas reentrâncias como a Baía da Ribeira (Figura 2), o processo de ocupação foi caótico e significativo, resultando em severa degradação do ambiente aquático (CONDER, 2005).

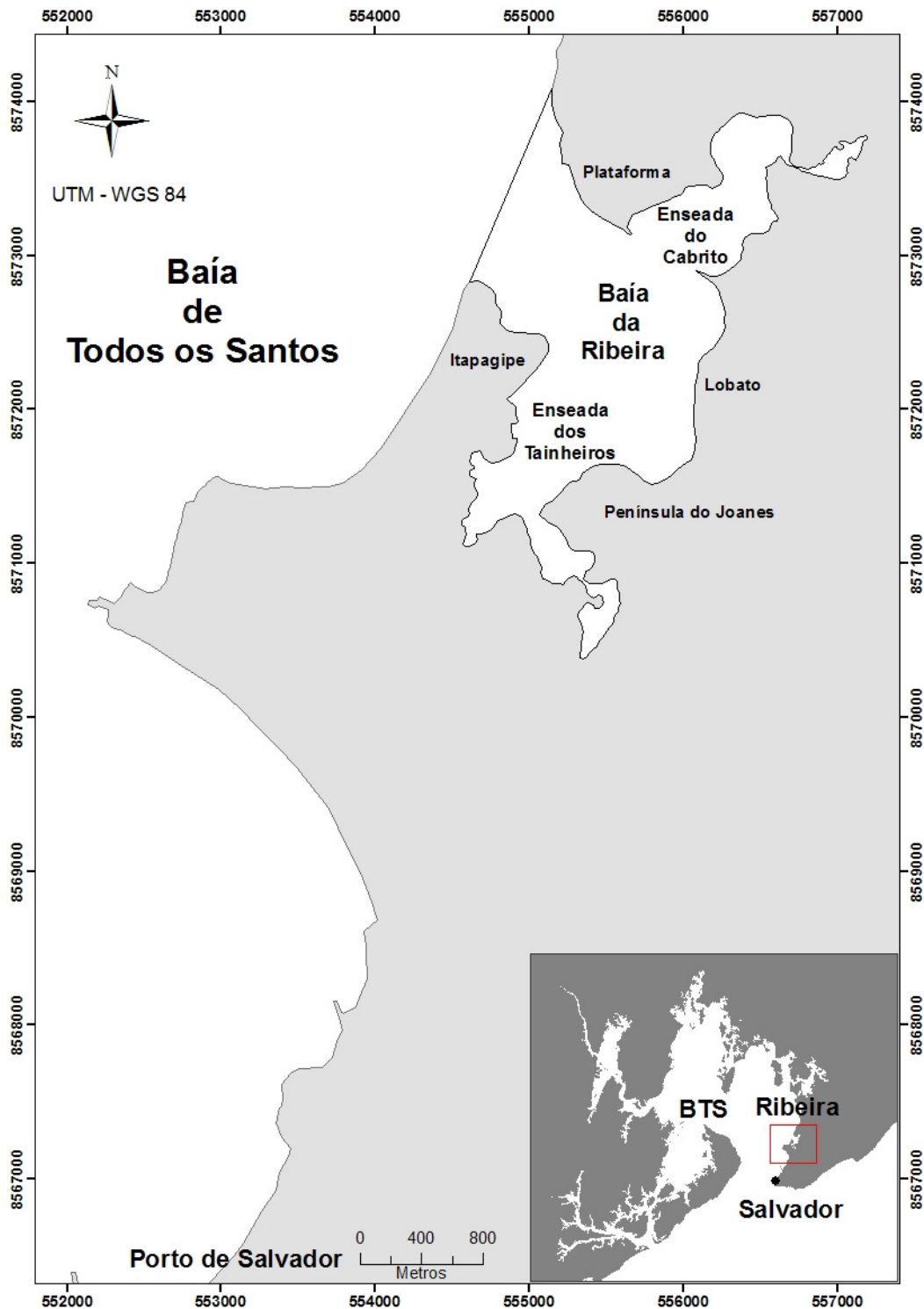


Figura 2: Baía da ribeira, mapa de localização. O mapa menor indica a posição da Baía da Ribeira no interior da Baía de Todos os Santos (BTS).

De acordo com a (CONDER, 2005), a região que margeia a Baía da Ribeira abriga cerca de 6% da população do município de Salvador, e é considerada a área da cidade com o maior grau de degradação urbana e ambiental, apresentando altos níveis de

contaminação bacteriológica e de metais pesados (CRA, 2001). Ao longo dos séculos XIX e XX, a ocupação urbana intensa e desordenada desta região não só tomou toda terra firme como também avançou sobre os manguezais e áreas de intermaré, onde foram implantadas milhares de palafitas, nas quais a população convive num ambiente crítico em termos sanitários (CONDER, 2005). A região da Ribeira era uma localidade vantajosa devida sua proximidade do centro de Salvador e pelo seu baixo valor comercial (os terrenos não eram "terra" firme), não havendo desta forma resistência às invasões. Livres de despesas com aluguel e transporte, além de fácil acesso aos frutos do mar para complementação da renda, os novos ocupantes da área superavam muitas das desvantagens da vida sobre as palafitas (CONDER, 2005). No entanto, a falta de ordenamento na ocupação desse território implicou em uma redução de aproximadamente 50% do espelho d'água original e a destruição quase completa das áreas de mangue.

Atualmente está em andamento o programa Ribeira Azul (CONDER, 2005) que visa melhorar as condições de salubridade ambiental nesta e área erradicar as palafitas, através de obras de saneamento e infra-estrutura. O programa trouxe melhorias significativas para a população, mas ainda há sérios problemas de salubridade ambiental na área que deverão ser resolvidos até o final do projeto. Um importante fato a ser observado, é que o próprio programa Ribeira Azul realizou uma série de aterros nas margens da Baía da Ribeira, de forma a "assentar", ou melhor, erradicar as palafitas. Esse tipo de solução acabou por reduzir ainda mais o espelho d'água da baía.

Com o objetivo de contribuir para uma melhor compreensão do escoamento d'água na Baía da Ribeira e auxiliar na obtenção de respostas aos problemas de salubridade ambiental do seu corpo d'água, este trabalho objetiva: i) investigar, através de modelagem numérica, o efeito da expansão urbana, ocorrida entre 1959 e 2007, sobre escoamento hidráulico da baía, avaliando os impactos sobre a capacidade de renovação das suas águas, e ii) oferecer uma ferramenta de auxílio à tomada de decisões e assessoramento ao gerenciamento ambiental da orla litorânea de Salvador.

2 REVISÃO CONCEITUAL

2.1 CIRCULAÇÃO ESTUARINA

As definições e conceitos existentes na literatura, sobre estuários, são conflituosos devido à existência de diferentes áreas do conhecimento com interesse científico nesse tipo de ambiente. Definições geológicas/geomorfológicas entram em conflito com definições oceanográficas, que por sua vez contradizem definições biológicas e políticas (ELLIOTT & MCLUSKY, 2002). Um estuário, no contexto deste trabalho, é entendido como um ambiente com circulação caracteristicamente estuarina, ou seja, uma região de transição entre corpos d'água continentais e marinhos. Desta forma, gradientes de pressão barotrópico e baroclínico podem ocorrer, atuando no deslocamento e mistura das massas d'água costeira e fluvial.

O gradiente barotrópico de pressão, gerado pelas variações do nível d'água associadas às marés e à descarga fluvial, acarreta na circulação barotrópica. O gradiente promovido pela maré representa a principal forçante da circulação estuarina barotrópica (a própria palavra estuário tem origem do Latim "aestuarium" que significa maré), com oscilação semi-diurna na costa brasileira. A descarga fluvial sempre gera gradientes de pressão orientados para jusante, sendo regulada pelos ciclos sazonais das chuvas e operação das barragens fluviais, quando existentes.

O gradiente baroclínico de pressão é gerado pelas diferenças longitudinais de densidade, associadas à progressiva diluição da água salgada estuário adentro, podendo ser em direção oposta no caso de estuários inversos (KJERFVE, 1989). Apesar da força das correntes de densidade ser aproximadamente uma ordem de grandeza menor que a força das correntes de maré, o transporte resultante da mesma tende a ser mais significativo a longo prazo (MIRANDA et al., 2002).

A estratificação vertical da coluna d'água, devido a diferenças de densidade entre a água continental e salobra, é quebrada parcial ou completamente pela mistura das massas d'água, ocasionada pela turbulência do fluxo. Desta forma, os estuários podem ser classificados como estratificados, parcialmente misturados e bem misturados (PRITCHARD, 1952). Estes padrões de mistura indicam o grau de influência das forçantes barotrópicas e baroclínicas, podendo ocorrer em diferentes momentos num mesmo estuário. Pritchard (1952) define da seguinte forma estes três tipos de mistura (Figura 3):

- **A - Cunha salina:** típico de estuários dominados pela ação fluvial. A água doce em razão de sua menor densidade, tende a se manter na superfície, movendo-se em direção ao oceano. Como a água de origem marinha possui maior densidade, essa acaba penetrando no interior do estuário pelo fundo, apresentando uma diferença acentuada no perfil vertical de salinidade;

- **B - Parcialmente misturado:** típico de ambientes em que a influencia fluvial e de maré são comparáveis, de forma que o aumento de salinidade se dá de maneira gradual tanto na vertical quanto na horizontal;

- **C - Bem misturado:** típico de ambientes dominados pela ação das marés. Neste caso, a salinidade é homogênea na vertical, ou seja, observando-se apenas o gradiente longitudinal de salinidade.

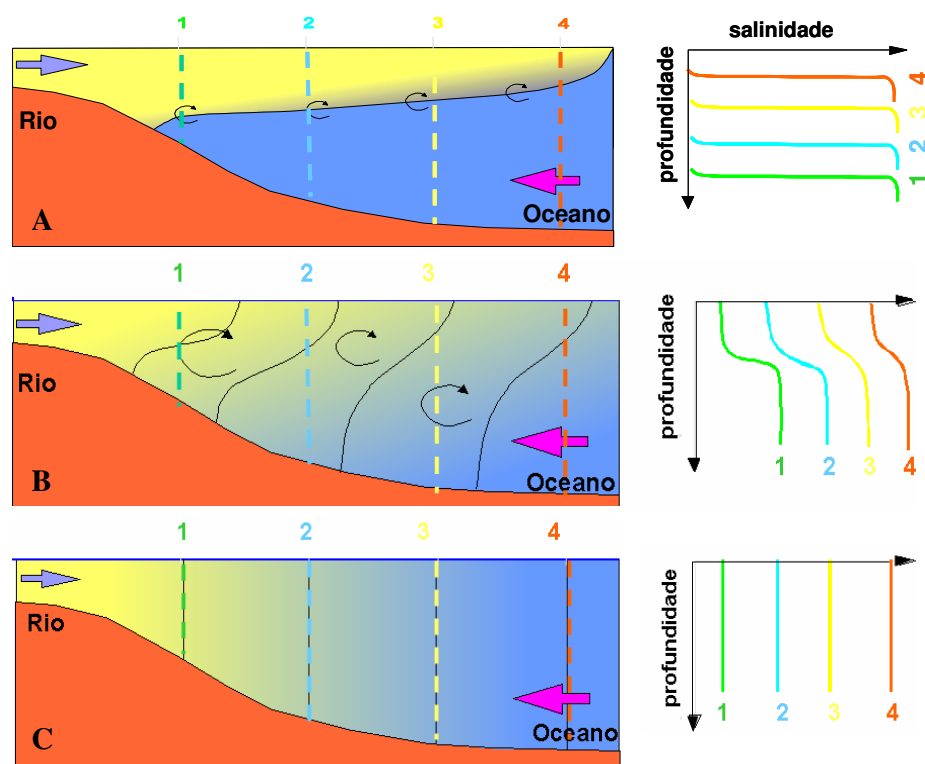


Figura 3: Padrões de circulação estuarina segundo (PRITCHARD, 1952). De cima para baixo: (A) Altamente Estratificado (cunha salina), (B) Parcialmente Misturado e (C) Bem Misturado.

Quando diferenças de densidade são persistentes entre os extremos superior e inferior do estuário, especialmente em estuários parcialmente misturados, uma fraca porém, persistente circulação baroclínica, subjacente à circulação barotrópica, é

estabelecida, sendo denominada de circulação gravitacional. Em estuários bem misturados e com gradiente longitudinal de densidade desprezível, a existência de uma assimetria nas correntes de maré também induz correntes residuais unidirecionais (em direção ao interior ou exterior do corpo d'água), em um modo de circulação denominado por bombeamento de maré.

2.1.1 PROPAGAÇÃO DA MARÉ EM AMBIENTES ESTUARINOS

A onda de maré, ao se propagar em direção ao continente, sofre distorções resultantes das baixas profundidades e estreitamento dos canais de penetração da maré o que, pelo princípio de conservação do volume, pode elevar a amplitude da maré (MASSELINK & HUGHES, 2003). No entanto, é importante observar que o atrito com o fundo e margens controla a transferência de energia e, conseqüentemente, o alcance da maré continente adentro (LeFloch, 1961).

A equação de uma onda longa se propagando em águas rasas pode ser expressa por

$$c = \sqrt{g(\bar{h} \pm a)}$$

onde c é a celeridade ou velocidade da onda, g é a aceleração da gravidade, \bar{h} é a profundidade média do canal e a é a amplitude da onda com sinal positivo para maré alta e negativo para maré baixa (MASSELINK & HUGHES, 2003). Essa equação mostra que a velocidade da onda é reduzida à medida que as profundidades diminuem, fazendo com que a crista da onda se movimente mais rápido que a sua base. Isso gera uma forma de onda distorcida com uma face verticalizada enquanto as costas da onda adquirem uma inclinação mais suave e alongada (Figura 4).

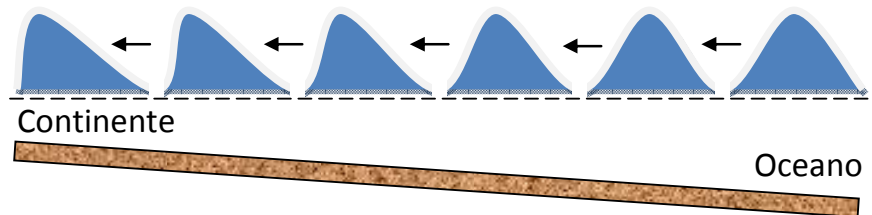


Figura 4: Distorção típica da onda de maré em águas rasas. Com frentes mais verticalizadas e costas mais suaves.

Distorções na onda de maré podem gerar tempos de enchente mais curtos ou mais longos que os tempos de vazante, provocando um fenômeno conhecido como assimetria de maré (DRONKERS, 1986). A assimetria ou distorção da onda de maré depende da interação desta com a morfologia estuarina em diferentes fases do período da maré. A diferença de velocidade de propagação entre a crista e a base da onda, devido ao atrito com o fundo dos canais, gera uma onda com tempo de subida mais curto que o tempo de vazante (AUBREY, 1985). No entanto, a existência de extensas áreas intermareais provoca um espalhamento lateral da água sobre essas planícies, gerando um retardo e conseqüente amortecimento nos picos de preamar (DRONKERS, 1986). Durante a maré vazante, o volume armazenado nas áreas intermareais é rapidamente drenado pelos canais de maré gerando um rápido fluxo de vazante. A intensidade desse efeito está relacionada à diferença entre o volume de água presente nos canais principais e o volume de água armazenado nas planícies de maré, sendo, portanto, maior nas situações de maré de sizígia, onde a área alagada é maior. Outro fator que acentua essa distorção na onda de maré é a existência de vegetação de mangue associada às planícies de maré, que aumenta a resistência ao escoamento.

2.1.2 CORRENTES DE MARÉ EM AMBIENTES ESTUARINOS

A assimetria de maré pode promover o domínio de correntes de enchente ou de vazante na circulação estuarina. As correntes de maré dependem do gradiente horizontal do nível d'água gerado pela maré e da morfologia da região de escoamento. Estuários com canais de maré profundos e grandes áreas intermareais geram correntes mais intensas na vazante, enquanto estuários com canais rasos e pouca área de inundação tendem a gerar fluxos de enchente mais intensos (DRONKERS, 1986).

Em estuários rasos e/ou com pouca extensão das planícies de maré, as maiores intensidades das correntes geralmente ocorrem na maré de enchente. A média vetorial das correntes após vários ciclos de maré (correntes residuais) têm uma séria implicação no tempo de residência de materiais dispostos em estuários (KJERFVE, 1989), podendo controlar a tendência de exportação ou importação dos mesmos no interior do corpo d'água (MASSELINK & HUGHES, 2003).

2.2 QUALIDADE E CAPACIDADE DE RENOVAÇÃO DAS ÁGUAS ESTUARINAS

Os processos de transporte e de mistura de constituintes em ambientes estuarinos são afetados pelas oscilações de maré, pela vazão de água doce, por estratificações de densidade e pelo vento, os quais geram processos advectivos e difusivos. Esses processos podem ser definidos da seguinte forma (FISCHER, 1979):

- Advecção: transporte de um constituinte pela corrente líquida, resultante da ação da maré, descargas fluviais, ventos e gradientes de densidade;
- Difusão molecular: espalhamento do constituinte pelo movimento aleatório molecular das partículas no fluido resultante de gradientes de concentração;
- Difusão turbulenta: espalhamento do constituinte devido ao movimento aleatório das partículas promovido pelo movimento turbulento no fluido.

A capacidade de mistura, renovação e autodepuração das águas, em qualquer corpo aquático, não é infinita e depende da interação de fatores morfológicos, meteorológicos, físico-químicos, biológicos e antrópicos, os quais interagem de forma complexa (ZIMMERMAN, 1976; VELZ, 1984; KJERFVE, 1989; McCUTHEON & FRECH, 1989; LUNG, 1993; CHAPRA, 1997; OLIVEIRA & BAPTISTA, 1997; CUNHA, 2004). Entretanto, pode ser afirmado que a qualidade das águas de um estuário está diretamente ligada com a sua capacidade de trocas com o oceano, promovidas pela circulação de maré, fluxo fluvial e o campo de ventos (KJERFVE, 1989). Em locais de pequeno aporte fluvial, a circulação é estabelecida pelas variações do nível d'água resultantes da maré. Esta, por sua vez, está condicionada à morfologia e batimetria do estuário, as quais controlam o campo de correntes (KJERFVE, 1989; WHITEHOUSE et al., 2000). Ainda, quanto maior a exposição do espelho d'água à influência do vento, maior será a

importância da energia eólica no processo de mistura, especialmente nas camadas mais superficiais da coluna d'água (GEYER, 1997).

Uma variedade de termos tendo sido empregada para descrever escalas de tempo associadas ao transporte e remoção de materiais em estuários, como por exemplo, tempo de residência (“*residence time*”), tempo de descarga (“*flushing time*”), idade (“*age*”) e tempo de transito (“*transit time*”). Seus usos e definições são geralmente inconsistentes e algumas vezes imprecisos. No entanto, a compreensão dessas escalas é especialmente importante para se estimar a capacidade de retenção de nutrientes ou contaminantes e a capacidade de renovação da massa d'água estuarina.

A seguir será apresentada uma pequena discussão sobre as principais definições referentes a Tempo de descarga, Tempo de descarga local, Idade, Tempo de residência e Tempo de transito.

- **Tempo de descarga** (*Flushing Time*): é o tempo que um determinado corpo d'água gasta para descarregar completamente seu volume de água original.

Um método clássico para determinação do tempo de descarga em ambientes estuarinos é dado por Dyer (1973), como:

$$T_f = \frac{VT}{(1-b)P}$$

onde, T é o período da maré, P é o prisma de maré, V é o volume do corpo d'água (ao nível médio do mar). O prisma de maré equivale ao volume de água que pode entrar ou sair do corpo d'água durante um período de maré enchente ou vazante, respectivamente. Uma forma prática de se calcular o prisma de maré é através da integração das descargas monitoradas na embocadura do corpo d'água em um período de maré enchente ou vazante. Outra maneira de se calcular o prisma é multiplicando o nível d'água médio pela área do espelho d'água. O fator de retorno de fluxo b (variando de 0 a 1) relacionado à fração de água que, após ser expelida pelas correntes de vazante, pode retornar ao corpo d'água com a maré de enchente. A variável b é um valor empírico resultante do fato de que não é possível calcular esse volume de retorno baseado apenas na geometria do corpo d'água.

Várias limitações devem ser consideradas nesse método, como: i) o sistema precisa ser bem misturado, ii) deve haver pouco aporte de água doce comparado com o fluxo de maré, e, iii) o corpo d'água externo (receptor) deve ser capaz de assimilar toda

água ejetada, de forma que a água que entra seja mais limpa que a água que sai (SANFORD et al., 1992). Este modelo tende a subestimar o tempo de renovação das águas, justamente por considerar o sistema bem misturado e não levar em conta as armadilhas de fluxo resultantes de morfologias irregulares (DYER, 1973; SANFORD et al., 1992).

- **Tempo de descarga local:** uma metodologia diferente para estimar a capacidade de renovação das águas, através de um parâmetro denominado de Tempo de Residência Local (ABDELRHMAN, 2002). Esse autor define o Tempo de Residência Local como o tempo necessário para que a concentração de um traçador, uniformemente distribuído ao longo de um determinado corpo d'água, seja reduzida a um percentual (pré-definido) da concentração inicial num local específico do corpo d'água em questão. Jouon et al. (2006) chamou esse parâmetro de tempo de descarga local, pois apesar de considerar a variação espacial desta escala de tempo, o conceito difere da definição clássica do tempo de descarga. Outros trabalhos foram desenvolvidos com metodologia semelhante (ABDELRHMAN, 2005; LIU et al., 2004; CUCCO & UMGIESSER, 2005). No entanto, é possível verificar alguns conflitos em relação aos conceitos dessas escalas de tempo, cuja discussão não é a proposta deste trabalho. Abdelrhman (2002) explica que, na perspectiva de um ecossistema, a água inicialmente presente no corpo d'água em questão é considerada “velha”, enquanto que a água que chega proveniente de fora é considerada “nova”. Desta forma, o processo de mistura é quem garante a diluição das águas “velhas” através das águas novas que chegam provenientes do exterior do corpo d'água em questão. O tempo necessário para que a concentração do traçador seja reduzida a um valor equivalente a $1/e$ (63%) da concentração inicial (onde $e \approx 1,278$), é conhecido como “*e-tempo de descarga*” (*e-flushing time* ou *e-folding time*) (JOUON et al., 2006).

Sendo assim, a capacidade de renovação das águas, em um determinado local de um corpo d'água, pode ser obtida através da taxa de decaimento de um traçador por meio da simulação dos processos de advecção e mistura. É importante salientar que a escala de tempo do Tempo de Descarga Local pode até se aproximar a do Tempo de Residência

clássico de (TAKEOKA, 1984), mas deve-se ter em vista que há uma diferença conceitual, já que o Tempo de Descarga Local envolve processos de mistura e diluição não abordados no conceito clássico de (TAKEOKA, 1984), o que muitas vezes pode levar a diferenças mais significativas entre as duas escalas de tempo (JOUON et al., 2006).

- **Idade** ou *Age*: este conceito foi introduzido por Boling e Rodhe (1973 apud Takeoka, 1984). De acordo com esses autores, a idade de um material num determinado corpo d'água é o tempo passado desde que o mesmo entrou neste reservatório. Uma opção mais realista seria incluir, dentro do conceito de idade, a idéia de “parcela de água”, ou seja, a idade seria o tempo despendido dentro do sistema por uma parcela de água desde a sua entrada por uma das fronteiras do sistema (ZIMMERMAN, 1988). Um ponto interessante dentro deste conceito é o da heterogeneidade espacial da idade, ou seja, parcelas de água de diferentes locais do corpo d'água possuem diferentes idades. Outro ponto interessante é que, a depender da hidrodinâmica local, podem existir parcelas de água com idades diferentes em um mesmo local, já que ambas podem ter percorrido caminhos diferentes para chegar até ali (MONSEN et al., 2002).
- **Tempo de residência**: a definição mais aplicada dessa escala de tempo é dada por Takeoka (1984): *“o tempo de residência em um determinado local de um corpo d'água equivale ao tempo que uma parcela de água, inicialmente localizada no ponto em questão, gasta para sair desse sistema”*. Segundo Takeoka (1984), o tempo de residência é um complemento da idade, já que a idade é o tempo que uma parcela de água gasta para chegar num determinado ponto a partir de uma entrada no sistema. O tempo de residência é um parâmetro mais realista que o tempo de descarga, pois leva em conta variações espaciais no tempo de renovação das águas, ao contrário do outro que analisa a capacidade de renovação das águas de uma forma homogênea para todo o sistema. Desta forma, diferentes regiões de um corpo d'água terão diferentes tempos de residência, que variam em função da heterogeneidade do campo de correntes (dependente da

morfologia e oscilações das forçantes) e da sua localização em relação à saída do corpo d'água. Uma metodologia bastante aplicada para se calcular o tempo de residência em corpos d'água é através da simulação da deriva de partículas por meio de modelos hidrodinâmicos (MONSEN et al., 2002; XAVIER, 2002; OLIVEIRA et al., 2006; GONG et al., 2008). Esse tipo de análise se aproxima do conceito clássico de Takeoka (1984) pois permite identificar a posição inicial e o tempo que uma determinada partícula ou parcela de partículas gasta para sair do corpo d'água em questão. Por outro lado existem limitações associadas à dificuldade de representação dos processos de difusão e mistura, sendo mais focado o processo advectivo da deriva de materiais.

- **Tempo de transito:** o tempo de transito é o tempo total despendido por uma parcela de água (ou algum outro material) desde o momento em que entra no corpo d'água até o instante em que a mesma é eliminada do sistema (TAKEOKA, 1984; MONSEN et al., 2002).

3 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DA ÁREA DE ESTUDO

A Baía da Ribeira está localizada no interior da porção leste da Baía de Todos os Santos, na região urbana da cidade de Salvador. A baía possui uma área de 3,2 km² e perímetro de 16,2 km, sendo subdividida nos setores norte e sul, onde se situam respectivamente as enseadas dos Tainheiros e Cabrito (Figura 2).

3.1 MORFOLOGIA E DISTRIBUIÇÃO SEDIMENTAR

A Baía da Ribeira possui águas rasas, com profundidade média de aproximadamente 2,8 m e máxima de 12,7 m na boca da baía. A morfologia da área é bastante irregular, com pequenas pontas e reentrâncias. Nas zonas marginais observam-se áreas de mangue bastante degradadas e algumas praias arenosas na sua margem oeste.

A área continental adjacente constitui-se de um planalto definido pela Falha de Salvador, com forte inclinação, atingindo cerca de 70m de altitude. O planalto é recortado por vales estreitos apresentando encostas convexas e preenchido por mangues degradados (VILAS BOAS & NASCIMENTO, 1979).

O leito da baía é coberto por sedimentos de coloração escura, rica em material conchífero resultante da presença significativa de moluscos marinhos (BARROS, 1977). As características dos sedimentos biogênicos indicam uma biota de ambiente lagunar, de fraca energia, baixas profundidades e alto nível de poluição (regiões mais internas) devido à eutrofização natural e artificial (BARROS, 1977). Em relação aos aspectos texturais, observam-se sedimentos finos (lama levemente cascalhosa e lama arenosa levemente cascalhosa) na zona do canal principal de escoamento e na Enseada do Cabrito (Figura 5) (VILAS BOAS & NASCIMENTO, 1979). Os sedimentos de textura intermediária (lama cascalhosa, areia lamosa levemente cascalhosa e areia cascalho-lamosa) aparecem nas bordas do canal e zonas marginais, enquanto sedimentos grosseiros (areia levemente cascalhosa e areia cascalhosa) ocorrem na margem oeste da Enseada dos Tainheiros (Figura 5).

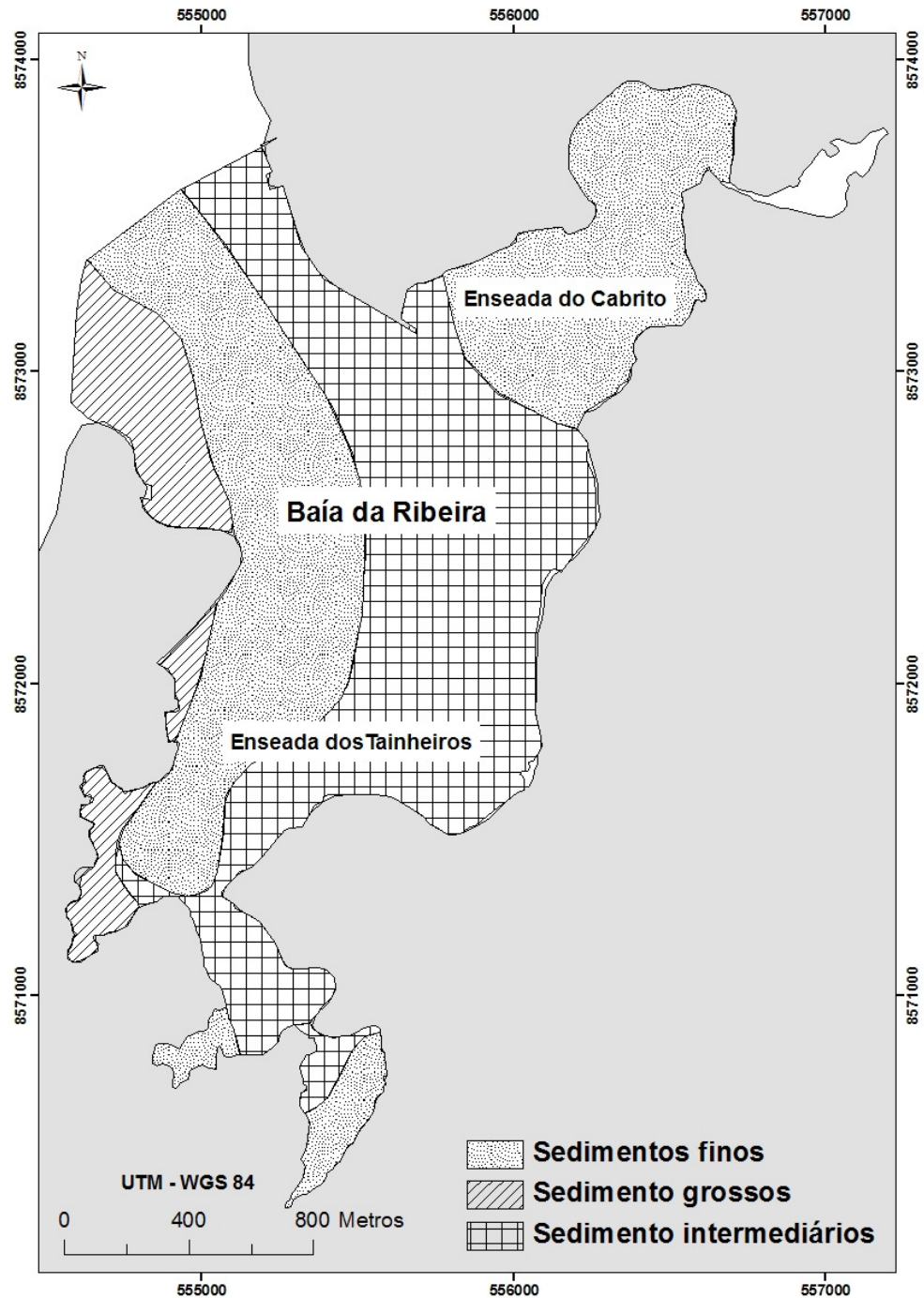


Figura 5: Mapa de distribuição textural dos sedimentos da Baía da Ribeira: sedimentos finos (lama levemente cascalhosa e lama arenosa levemente cascalhosa) , sedimentos de textura intermediária (lama cascalhosa, areia lamosa levemente cascalhosa e areia cascalho-lamosa), sedimentos grosseiros (areia levemente cascalhosa e areia cascalhosa). Adaptado de Vilas Boas & Nascimento (1979).

3.2 CLIMA

O clima da área de estudo corresponde ao tipo *Af* (tropical úmido sem estação seca bem definida) da classificação de Köppen (SANTOS, 1962). As Normais Climatológicas da estação meteorológica de Salvador, de 1960 a 1990 (Tabela 1), obtida junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2008), foram utilizadas para a caracterização dos parâmetros climáticos apresentados a seguir.

Tabela 1: Normais Climatológicas (1961 a 1990) – Estação de Salvador – Fonte: INMET (2008). Na tabela a temperatura é indicada por: Md/mx (média das máximas), Md/mn (média das mínimas), Mx/Ab (máxima absoluta), Mn/Ab (mínima absoluta) e Md (média). Max.24 é a precipitação máxima ocorrida num intervalo de 24h e a data indica o dia e o ano da precipitação para o respectivo mês.

Mês	Pressão (mb)	Temperaturas (°C)					Umidade Relativa (%)	Precipitação (mm)				Insolação Total (h)	Vento	
		Md/mx	Md/mn	Mx/Ab	Mn/Ab	Md		Total	Max.24	Data	No dias Chuvas		Dir (graus)	Vel (m/s)
JAN	1006,3	29,9	23,7	33,6	21,8	26,5	79,4	102,4	130,8	12/88	13	245,6	E	2,1
FEV	1006,3	30,0	23,9	34,4	21,9	26,6	79,0	122,1	159,0	06/80	15	226,4	SE	2,0
MAR	1005,8	30,0	24,1	34,7	22,3	26,7	79,8	148,0	100,9	16/69	18	231,1	SE	2,0
ABR	1006,6	28,6	22,9	32,8	21,2	25,2	82,2	326,2	367,2	27/71	21	189,7	SE	2,3
MAI	1008,3	27,7	23,0	31,5	21,3	25,2	83,1	349,5	208,4	22/66	24	174,3	SE	2,3
JUN	1010,4	26,5	22,1	31,8	20,3	24,3	82,3	251,0	217,5	03/78	23	167,2	SE	2,3
JUL	1011,5	26,2	21,4	30,6	19,8	23,6	81,5	184,9	97,8	14/90	23	181,2	SE	2,5
AGO	1011,4	26,4	21,3	31,3	19,9	23,7	80,0	134,1	86,1	22/71	20	202,6	SE	2,4
SET	1010,4	27,2	21,8	29,8	20,2	24,2	79,6	109,5	123,7	19/89	16	211,4	SE	2,4
OUT	1008,2	28,1	22,5	32,2	20,9	25,0	80,7	123,0	178,0	27/90	14	228,0	SE	2,3
NOV	1006,7	28,9	22,9	32,1	21,0	25,5	81,5	119,0	126,5	24/64	14	213,6	SE/NE	2,3
DEZ	1006,2	29,0	23,2	32,5	21,4	26,0	81,1	130,6	104,0	31/90	14	224,7	E	2,2
ANO	1008,2	28,2	22,7	34,7	20,8	25,2	80,8	2100,2			18	2495,8	SE	2,2

As médias mensais de temperatura da região estão sempre acima dos 18°C, ocorrendo pequena amplitude térmica devido à proximidade do mar. A temperatura máximas pode chegar aos 34,7°C e a mínima a 19,8°C. As menores temperaturas são observadas no mês de julho (média de 23,6°C), enquanto que as temperaturas médias mais elevadas acontecem em março (26,7°C), o que dá uma média anual em torno dos 25°C.

A precipitação média anual é de 2100,2 mm/ano, variando entre um mínimo 102,4 mm em janeiro um máximo de 349,5 mm em maio. As maiores precipitações ocorrem entre abril e junho (período chuvoso), quando chove cerca de 45% do total anual.

Dados existentes que melhor devem caracterizar o clima de ventos na Baía da Ribeira foram monitorados no ano de 1999 em Mar Grande para os períodos de verão e inverno (CRA, 2000 b). Os dados mostram uma sazonalidade bem clara na distribuição da velocidade e direção dos ventos nos períodos de inverno e verão (Figura 6). No verão as direções principais foram E, SE-E e SE, correspondendo a mais de 50% dos registros. A

direção do vetor resultante foi de 89° para o período de verão. As velocidades médias ficaram em torno de 4 a 8 m s^{-1} .

No inverno houve a predominância de ventos S e S-SW (62% dos dados). Com direção resultante de 188° . As velocidades médias registradas foram ligeiramente maiores que as de verão, com velocidade média em torno de 6 a 8 m s^{-1} .

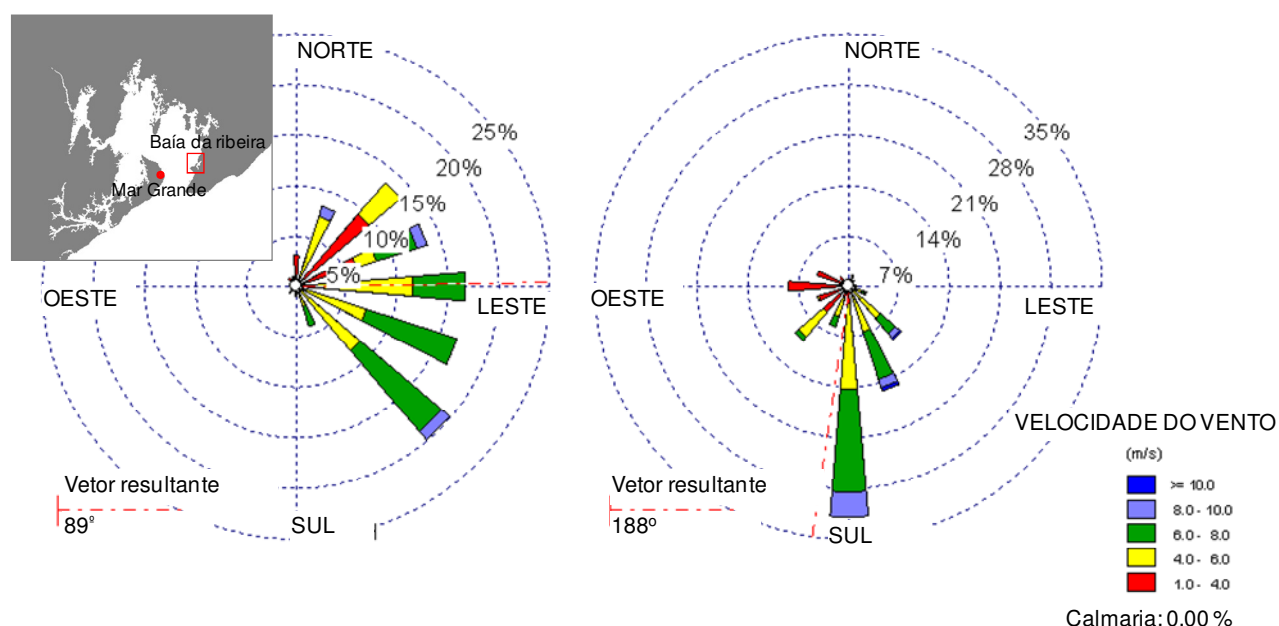


Figura 6: Rosa dos ventos para o período de verão e inverno de 1999, em Mar Grande, onde a direção indicada mostra de onde vem o vento (CRA, 2000 b).

3.3 CONTRIBUIÇÃO FLUVIAL

A drenagem fluvial que aporta à Baía da Ribeira é constituída de pequenos córregos, sendo o principal o rio do Cobre que deságua na Enseada do Cabrito (Figura 7). O rio do Cobre encontra-se barrado a cerca de 2 km da sua foz, com cerca de 60% ($12,8 \text{ km}^2$) da sua bacia de drenagem (26 km^2) localizada a montante da barragem (SRH, 2007). De acordo com o critério de qualidade de água do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente, Resolução N^o 20, 18/07/1986), o rio do Cobre foi classificado na Classe 2 (águas destinadas ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional, à proteção das comunidades aquáticas, à recreação de contato primário, à irrigação, à aqüicultura e à atividade de pesca) na região da barragem, e na Classe 3 (águas que podem ser destinadas ao abastecimento para consumo humano, após

tratamento convencional ou avançado, à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras, à pesca amadora, à recreação de contato secundário e à dessedentação de animais) daí até a foz. O rio do Cobre é o principal recurso hídrico da região metropolitana denominada de subúrbio ferroviário, sendo ainda aproveitado pela EMBASA para abastecer boa parte da população de Salvador (CRA, 2000).



Figura 7: Localização da Barragem do Rio do Cobre e sua desembocadura na Baía da Ribeira (Google, 2007).

Com base nas dimensões do vertedor da Barragem do Cobre (SRH, 2007) e na série temporal dos níveis d'água fornecida pela ANA (1949-1971) foi possível calcular a série de descargas médias diárias liberadas pelo vertedor da barragem de acordo com o método indicado por Porto (1998). A série apresentou uma vazão máxima de $40,86 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e uma média de $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para o período observado. Ainda de acordo com os dados da

série, observa-se que 50% foram menores que $0,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e que 47% foram vazões nulas, ou seja, o nível do reservatório estava abaixo da cota da crista do vertedor.

Uma forma de se avaliar o grau de influência da contribuição fluvial num corpo d'água estuarino pode ser realizada através do cálculo da razão de fluxo (DYER, 1973). A razão de fluxo pode ser calculada pela seguinte relação (DYER, 1973):

$$R = \frac{\int_0^{12,4} Q}{P}$$

onde o numerador é a vazão fluvial integrada por um ciclo completo de maré de 12,4 h e P é o prisma de maré. O prisma de maré representa o volume de água potencialmente trocado a cada ciclo de maré, calculado pelo produto da altura da maré, h , pela área do corpo d'água. A Baía da Ribeira tem uma área de $3,2 \text{ km}^2$ e uma vazão média de $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Considerando que a altura de maré nas proximidades região é de cerca de 0,89 m (CIRANO & LESSA, 2008), temos que a razão de fluxo média é de $\approx 0,03$, ou seja, o volume de água doce descarregado na baía equivale a apenas 3% do volume de água que é trocado pela correntes de maré, que prova a pequena influência fluvial na circulação de água na Baía da Ribeira.

3.4 CONDIÇÕES DE SANEAMENTO AMBIENTAL

A Baía da Ribeira é considerada a região do Município de Salvador com o maior grau de degradação urbana e ambiental. Cerca de 6% da população (133.387 habitantes) reside na região, em condições precárias de salubridade ambiental (CONDER, 2005). A região é carente de serviços sociais e de infra-estrutura, o que acaba por gerar uma grande vulnerabilidade social, como o baixo nível de escolaridade, desemprego, informalidade no trabalho, proliferação de doenças infectocontagiosas, alto risco epidemiológico e elevados índices de violência (CONDER, 2005).

Apesar de grande parte da população ter acesso a água tratada, a deficiência no sistema de esgotamento sanitário da região obriga muitas residências a lançar seus efluentes diretamente no sistema de drenagem pluvial, que chegam à Baía da Ribeira, comprometendo seriamente a qualidade das água. Segundo (CRA, 2001), no ano de 1999 a carga de efluentes sanitários lançada diariamente no interior da Baía da Ribeira era da ordem de $1,03 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, que corresponde a aproximadamente 50% da vazão de água média liberada pelo vertedor da barragem do rio do Cobre.

Ocorrem ainda problemas no sistema de coleta de lixo, que em conjunto com o baixo nível de educação da população, acaba gerando um elevado acúmulo de lixo nas águas da Ribeira. O problema do lixo é tão grave que levou a Companhia de Limpeza Urbana do Município a instalar redes para contenção dos resíduos sólidos na região da Enseada dos Tainheiros, de forma a impedir que o lixo seja levado para a Bahia de Todos os Santos pelas correntes de maré.

A poluição industrial também foi significativa na história de ocupação da região, principalmente em meados da década de 60 quando foram implantadas várias indústrias do ramo têxtil, químico, alimentício, tabaco e farmacêutico, sendo que as duas únicas remanescentes são a Fábrica de Gases Industriais Agro Protetoras S/A. e a BOLEY - Óleo de Mamona S/A. Todas estas fábricas lançaram seus resíduos, por longos períodos dentro da baía. A contribuição industrial antiga, notadamente a contaminação crônica com cerca de dez toneladas de mercúrio inorgânico, proveniente de uma planta de cloro soda, ainda é verificada nas concentrações de Hg presentes nos sedimentos de fundo da Baía da Ribeira (CRA, 2000 a).

3.5 CIRCULAÇÃO DE ÁGUA (ESTUDOS PRÉVIOS)

As características hidrodinâmicas da área são típicas de um ambiente restrito, lagunar, com águas calmas e de difícil renovação, que é comprovada pelas reduzidas condições de aerobiose e altas concentrações de matéria orgânica na água (BARROS, 1977).

A variação da maré é o principal fator responsável pela circulação na Baía da Ribeira. As magnitudes das correntes no interior da Baía da Ribeira calculadas pelo modelo (XAVIER, 2002) foram inferiores a 25 cm s^{-1} chegando a valores próximos de zero nas áreas mais internas. O tempo de renovação das águas da Ribeira calculado pelo SisBAHIA é da ordem de 30 dias, numa simulação considerando apenas a forçante da maré. Já numa simulação forçada pela maré e ventos em período de verão o tempo de renovação foi da ordem de 2 a 3 dias.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia descrita a seguir aborda os procedimentos adotados para a construção dos modelos hidrodinâmicos associados a diferentes cenários morfológicos ocorridos ao longo da ocupação humana na Baía da Ribeira. Como não havia informações batimétricas que correspondessem exatamente ao mesmo ano das linhas de costa mapeadas, os modelos foram construídos a partir da combinação das linhas de costa dos anos de 2007, 1980, 1959 com as batimetrias disponíveis para os anos mais próximos de cada cenário. Desta forma foram construídos três cenários morfológicos para os anos de 1959, 1980 e 2007.

4.1 MAPEAMENTO DA EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA

O mapeamento da linha de costa da Baía da Ribeira para os anos de 1959 e 1981 foram utilizadas ortofotos fornecidas pela CONDER para os referidos anos. A linha de costa do cenário de 2007 foi mapeada com base na fotografia de satélite disponibilizada pelo software Google Earth ® (GOOGLE, 2007).

A partir do georeferenciamento do banco de fotografias e imagens em meio digital foi possível executar a vetorização e confecção dos mapas digitais das linhas de costa da Baía da Ribeira para todos os cenários em escala de 1:23000. Todo o banco de dados foi georeferenciado no sistema de projeção UTM com datum horizontal WGS – 1984.

4.2 BATIMETRIA

As informações batimétricas para os cenários de 1959 e 1980 foram adquiridas a partir de cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN, 1958 e 1986). A batimetria digitalizada a partir da carta náutica 1101 do ano de 1958 foi utilizada para a caracterização do cenário de 1959. O cenário de 1980 foi caracterizado pela batimetria digitalizada da carta náutica 1101 do ano de 1986.

Os dados batimétricos recentes, aplicados ao cenário de 2007, foram coletados em abril de 2005 e novembro de 2006 utilizando um ecobatímetro SIMRAD CE 33 com GPS acoplado (não diferencial). Desta forma a localização espacial dos registros pode apresentar erros máximos de até 10 metros. O planejamento dos perfis de navegação procurou compor uma malha uniforme de modo a garantir uma distribuição espacial

homogênea dos dados e facilitar o posterior processo de interpolação para gerar o modelo digital do terreno. As cotas batimétricas foram reduzidas para a menor elevação da baixa-mar registrada na Baía da Ribeira durante os levantamentos, sendo em seguida ajustada para o nível médio de referência da DHN com o auxílio dos registros de maré do Porto de Salvador (LESSA & PEREIRA, 2006).

Considerando que a batimetria das planícies de maré e áreas de mangue é algo muitas vezes inviável de se obter com base nas ferramentas disponíveis, optou-se por obter esses dados por meio de uma aproximação numérica (Figura 8). Sendo assim, foi adotado um talude uniforme, partindo das regiões mais altas dessas áreas de inundação (cota de 2 m referente ao nível médio da preamar no local) para as regiões mais baixas onde havia dados batimétricos disponíveis. Em alguns locais foram adaptados micro canais de escoamento com profundidade correspondente ao menor nível da baixamar observado nos dados de maré local (-0,3 m). Os pequenos canais de maré são feições comuns à estas áreas e necessários para garantir o escoamento de água em regime uniforme nessas regiões. Essa aproximação numérica garante uma representatividade aceitável dessas áreas dentro dos modelos hidrodinâmicos construídos, além de garantir uma maior estabilidade numérica nas simulações. Deve-se ter em mente que a própria natureza morfológica do estirâncio é típica de um terreno semi-plano cujas dimensões no plano horizontal são muito mais significativas que as do plano vertical.

Com base neste conjunto de dados batimétricos e de linhas de costa, foram construídos modelos digitais do terreno da Baía da Ribeira para os cenários dos anos de 1959, 1980 e 2007.

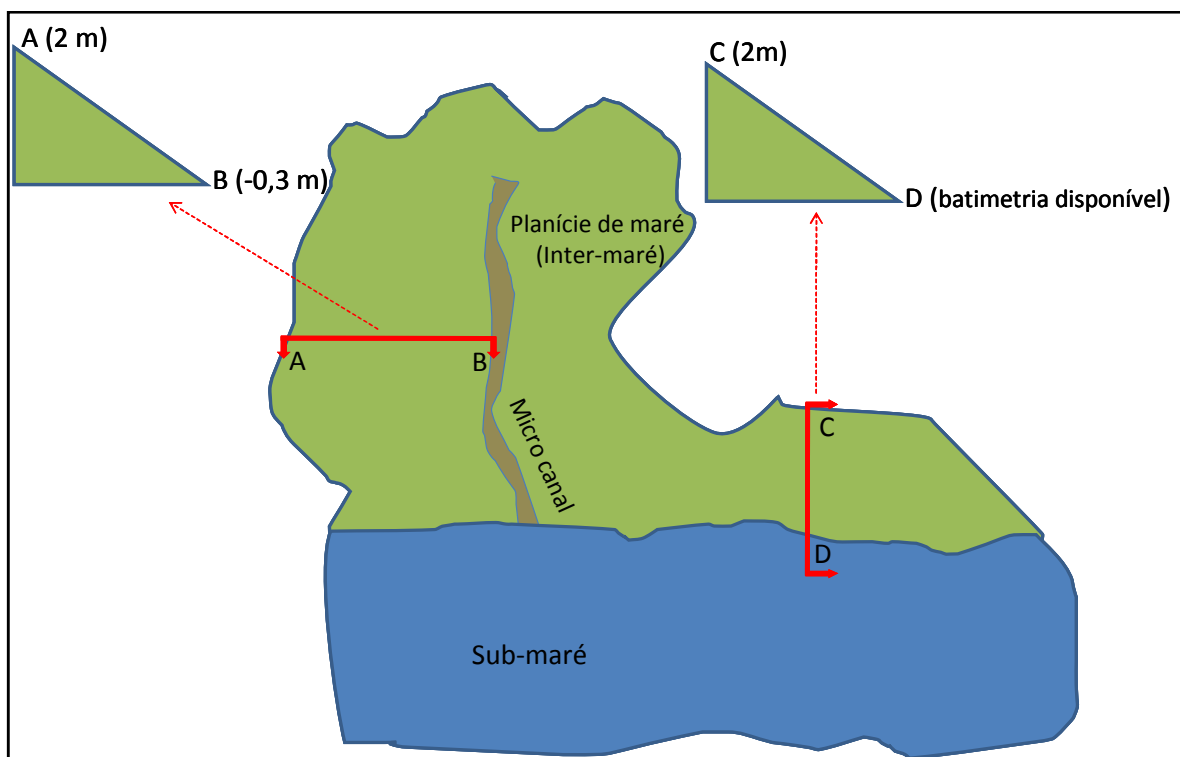


Figura 8: Esquema de aproximação batimétrica das áreas de estirâncio (áreas de mangue ou planícies de maré). Estão indicados pelos perfis AB e CD os gradientes batimétricos aplicados do mangue para o micro canal de maré e a zona de sub-maré na baía, respectivamente.

4.3 AQUISIÇÃO DE DADOS DE CAMPO PARA VALIDAÇÃO DO MODELO E CARACTERIZAÇÃO DA CIRCULAÇÃO ESTUARINA

Os dados de campo utilizados como comparativos dos dados simulados na calibração e validação dos modelos, bem como para a caracterização do padrão de circulação local foram coletados conforme metodologia descrita a seguir.

Correntes e descargas foram obtidos nos dias 08/04/2005 (sizígia) e 28/09/2006 (quadratura), através de perfis com ADCP na seção indicada na Figura 9, durante um ciclo completo de maré. Com intuito de ampliar o conjunto de dados utilizados na validação do modelo foi realizado um terceiro monitoramento de correntes em 29/08/2008 (sizígia). No entanto, devido a dificuldades técnicas com a embarcação, nesta campanha optou-se por trabalhar com o ADCP num ponto fixo (Figura 9), da mesma seção monitorada anteriormente, durante um ciclo completo de maré. Os dados de ADCP foram tratados através de rotina matlab (Genz et al. 2006) para o cálculo das velocidades residuais e da descarga líquida.

Dados de maré foram coletados no período de 08 à 10/04/2005 através de maregráfo analógico (Figura 9) sendo posteriormente digitalizados com auxílio de mesa digitalizadora.

Durante as medições de fluxo foram coletados dados de temperatura e salinidade através de perfilagens verticais com CTD SeaBird, a cada meia hora, no ponto mais profundo da seção de monitoramento das correntes e vazões (Figura 9). As profundidades dos dados de CTD foram transformadas em profundidades adimensionais dividindo-se as profundidades dos registros pela profundidade máxima da coluna d'água. Desta forma os dados podem ser apresentados em função da sua posição na coluna d'água independentemente das variações de profundidades resultantes da maré.

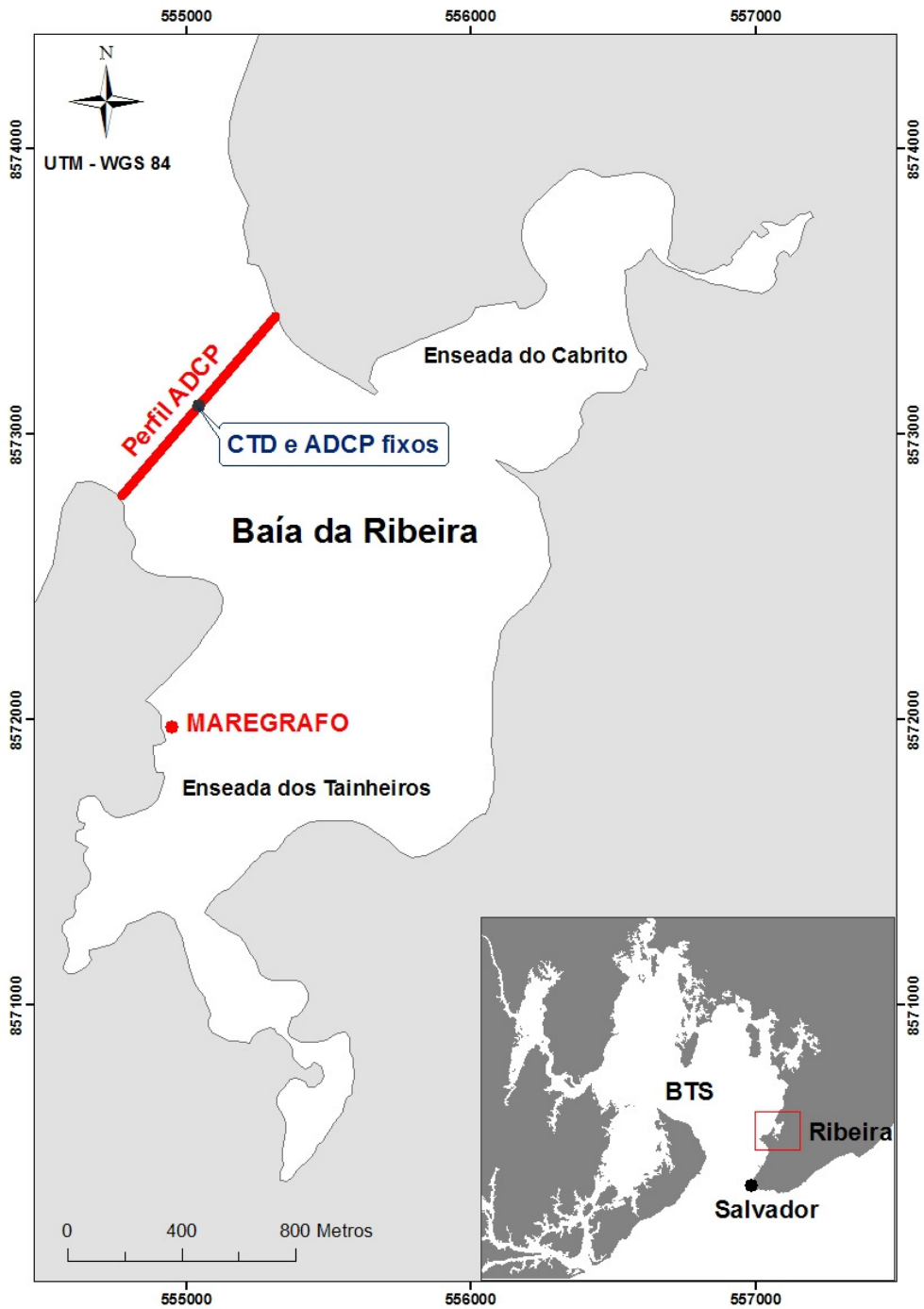


Figura 9: Localização das estações de monitoramento na Baía da Ribeira.

Tabela 2: Listagem dos monitoramentos e equipamentos utilizados.

DATA	MONITORAMENTO	EQUIPAMENTO
08 à 10/04/2005	Maré	Marégrafo analógico
08/04/2005 (sizígia)	Fluxo (perfil) / Salinidade e Temperatura	ADCP (WorkHorse - RDI) / CTD (SeaBird)
28/09/2006 (quadratura)	Fluxo (perfil) / Salinidade e Temperatura	ADCP (WorkHorse - RDI) / CTD (SeaBird)
29/8/2008 (sizígia)	Correntes (estação fixa) / Salinidade e Temperatura	ADCP (WorkHorse - RDI) / CTD (SeaBird)

4.4 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A modelagem numérica da Baía da Ribeira foi desenvolvida com o modelo numérico RMA2 (Research Management Associates, Version 4.45) (NORTON et al., 1973; KING, 1990). Este modelo usa a forma de Reynolds das equações de Navier-Stokes para calcular variações no nível d'água e correntes integradas na vertical para fluxos subcríticos em condutos livres, sendo, desta forma, desenvolvido para aplicações em corpos d'água bem misturados, onde as variações de correntes ao longo da coluna d'água são desprezíveis. O RMA2 é capaz de simular a emersão e imersão de áreas de intermaré, podendo computar a hidrodinâmica nessas regiões.

A construção dos modelos numéricos e as operações de pré e pós-processamento das simulações foram realizadas através da interface SMS 8.1 (Surface-water Modeling System) desenvolvida pelo Environmental Modeling Research Laboratory da Brigham-Young University (KING et al., 2005).

Para cada cenário modelados com o RMA2 foi construída uma malha de elementos finitos não estruturada, com resolução de cerca 30m de largura para cada elemento. Cada malha foi interpolada sobre os modelos digitais do terreno, previamente construídos para cada cenário a ser modelado.

O modelo hidrodinâmico foi calibrado para o cenário atual (2007), comparando-se os resultados das simulações com os dados de correntes e marés previamente coletados. A calibração do modelo hidrodinâmico RMA2 depende da definição de dois parâmetros básicos: a viscosidade turbulenta do fluido, dado em Pa s^{-1} , e da rugosidade do fundo, que é representada pelo número de Manning “*n*” (KING et al., 2005). Geralmente esses valores são definidos de forma empírica ao se comparar os resultados do modelo com os dados observados em campo (KING et al., 2005). Melhor dizendo, se as alturas de maré ou as magnitudes das velocidades das correntes simuladas estiverem menores que os valores observadas em campo, então será necessário reduzir o valor do parâmetro de rugosidade, para que os resultados do modelo se ajustem aos dados observados. A experiência prática mostra que variações na viscosidade turbulenta não afetam de forma significativa os resultados do modelo, porém seu papel é fundamental para garantir a estabilidade numérica do modelo, no sentido de controlar as oscilações turbulentas e garantir uniformidade do escoamento. O parâmetro de rugosidade de fundo, além controlar a estabilidade numérica do modelo, tem papel significativo na distribuição de

energia dentro do sistema, regulando a magnitude das correntes e alturas de maré simuladas.

Mapas texturais de sedimentos de fundo podem auxiliar na determinação dos parâmetros de rugosidade, existindo inclusive valores tabulados disponíveis na literatura para diferentes tipos de fundo. Porém, nem sempre essa correlação é verdadeira, principalmente se tratando de canais naturais, onde o processo de dissipação de energia por atrito resulta de uma dinâmica bastante complexa. Muitas dessas tabelas aplicam-se a condições específicas, sendo geralmente limitadas ao corpo d'água onde foi realizada a sua calibração.

A definição dos parâmetros de rugosidade do modelo hidrodinâmico da Baía da Ribeira se baseou em valores padrões (KING et al., 2005), recomendados pelos desenvolvedores do *software*, para este tipo de ambiente. A partir daí foi realizada uma série de testes com diferentes valores de rugosidade até encontrar o que garantisse o melhor ajuste entre os valores simulados e observados (ver a análise de sensibilidade do modelo em anexo). A viscosidade turbulenta do fluido foi considerada constante em toda a área modelada partindo também do valor médio indicados pelos desenvolvedores do *software* (KING et al., 2005). Na prática, o melhor valor do parâmetro de viscosidade turbulenta é justamente aquele que garante a estabilidade numérica do modelo, permitindo que ele processe as simulações utilizando os parâmetros de rugosidade já pré-selecionados.

Para forçar a circulação do modelo nas simulações de calibração foram utilizadas as marés previstas no Porto de Salvador para os mesmos períodos de monitoramento das correntes e vazões. Os parâmetros de calibração do modelo – fator de atrito e viscosidade do fluido – foram definidos de forma a permitir a melhor aproximação possível dos dados observados com os simulados. Em todas as simulações o modelo RMA2 foi iniciado partindo de uma condição inicial onde todo o domínio está inundado, partindo em seguida para uma simulação de maré vazante. Isso garante a estabilidade inicial do modelo, que após a simulação de 3 ciclos de maré o modelo já está “aquecido”, podendo, a partir daí, simular os resultados desejados. O passo de tempo utilizado em todas as simulações foi de 30 minutos, garantindo uma discretização aceitável da escala de tempo dos fenômenos de interesse neste trabalho e também permitindo uma relação ótima entre a capacidade de processamento do *hardware* disponível e o volume de dados a serem processados. Por ser resolvido por um método completamente implícito (KING et al.,

2005), o modelo RMA2 não depende de um critério de estabilidade para o passo de tempo, o que garante a utilização do passo de 30 minutos sem maiores problemas.

A avaliação do erro dos resultados do modelo em relação aos dados observados, foi realizada com base nos seguintes parâmetros:

- Erro médio percentual absoluto: este erro reflete, em percentual, o quanto a razão entre os dados observados e simulados esta distante do valor ideal que seria 1. Seu calculo é feito de acordo com:

$$E_m = \left| \left(1 - \frac{\text{observado}}{\text{simulado}} \right) 100 \right|$$

- Raíz quadrada do erro quadrado médio (REQ): é obtido a partir da raiz quadrada da média dos quadrados dos erros entre os valores simulados pelo modelo e os dados observados em campo, sendo calculado da seguinte forma:

$$REQ = \left[\frac{1}{n} \sum_i^n (\text{simulado} - \text{observado})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

- Coeficiente de correlação do momento do produto Pearson: índice sem dimensão situado entre -1,0 e 1,0 inclusive, que reflete a extensão de uma relação linear entre dois conjuntos de dados de acordo com a equação

$$C_{os} = \frac{\sum (o - \bar{o})(s - \bar{s})}{\sqrt{\sum (o - \bar{o})^2 \sum (s - \bar{s})^2}},$$

onde o e s são os dados observados e simulados, respectivamente, enquanto \bar{o} e \bar{s} são valores médios dos dados observados e simulados.

Após a calibração e validação do modelo para o cenário de 2007 foram aplicados os mesmos parâmetros de calibração nos demais cenários estudados. Desta forma, considerou-se que não houve uma alteração significativa nos parâmetros de atrito e viscosidade turbulenta do fluido para os diferentes cenários.

Com os modelos já calibrados, foi realizada uma simulação de 28 dias, correspondendo ao período de 01 a 29 de março de 2006 (Figura 10), utilizando-se a mesma condição de contorno para todos os cenários, de modo a proporcionar análises comparativas entre as diferentes situações morfológicas. A escolha deste período de

simulação tem o intuito de englobar uma data em que ocorressem marés com alturas expressivas (mês de março) e que pudesse cobrir as duas fases de sizígia (lua nova e cheia) e quadratura (lua crescente e minguante).

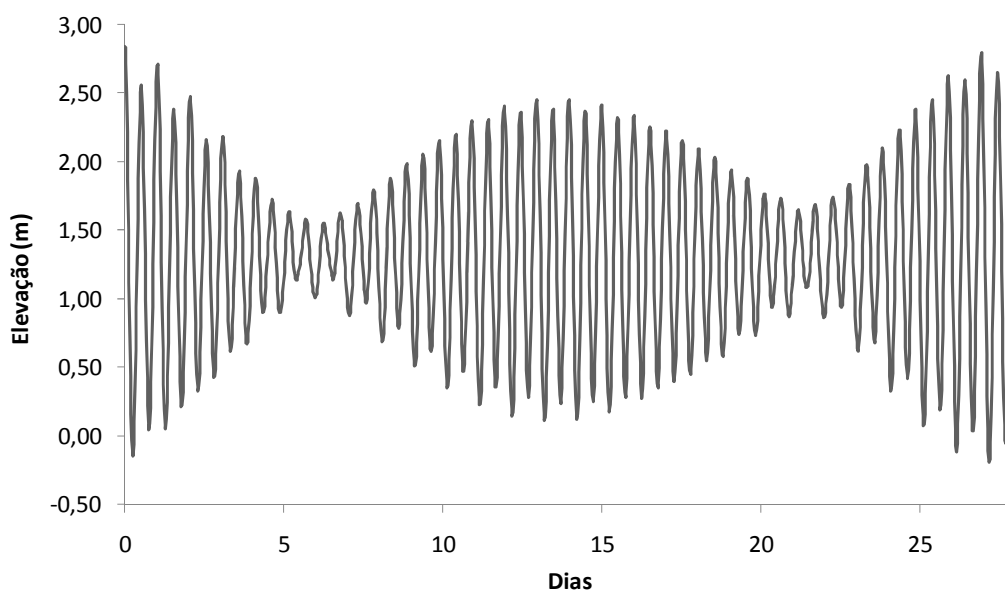


Figura 10: Série de maré utilizada como condição de contorno dos modelos, correspondendo ao período de 01 a 29 de março de 2006.

Com o intuito de avaliar o efeito dos ventos sobre a hidrodinâmica da Baía da Ribeira, foram realizadas simulações aplicando-se campos de ventos sobre o cenário de 2007. Para isso foram utilizados campos de vento característicos de verão e inverno registrados em Mar Grande (Figura 11). No caso de verão, com atuação de brisa marítima e terrestre, foram utilizados os dados registrados no período de 7 a 9 de janeiro de 1999 (CRA 2000), repetidos durante os 28 dias de simulação. Para o cenário de inverno, com entrada de frente fria, foram utilizados os dados do período de 27 a 29 de maio de 1999 (CRA 2000), novamente repetidos em todo o período da simulação. A utilização de séries de 3 dias repetidas durante o período simulado se deve ao fato de não haver dados de séries de ventos contínuas mais longas que pudessem ser aplicados à Baía da Ribeira. Dessa forma, optou-se por usar essa estratégia com intuito de se adaptar uma série de ventos curta para um período mais longo de simulação de forma semelhante ao método utilizado por Xavier (2002).

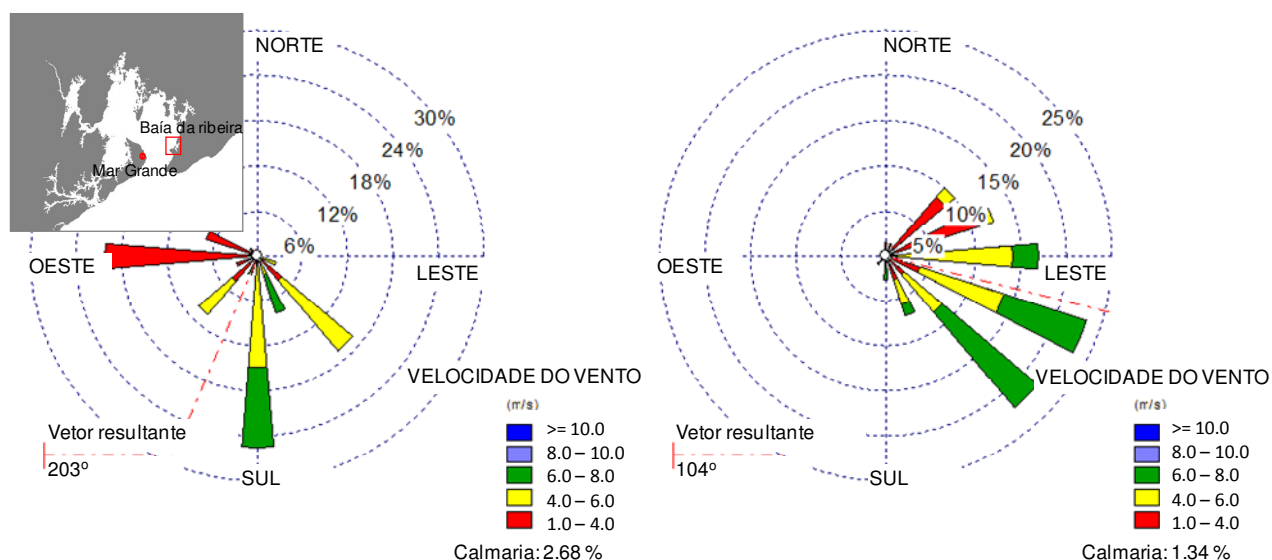


Figura 11: Rosas dos ventos utilizados nas simulações para os períodos de inverno (esquerda) e verão (direita). Os dados foram obtidos das séries de ventos medidas em Mar Grande (CRA, 2000). A direção indicada mostra de onde vem o vento.

As soluções hidrodinâmicas foram utilizadas nas simulações para avaliar a capacidade de renovação das águas da Baía da Ribeira nos diferentes cenários morfológicos. Os cálculos foram realizados com o emprego do modelo RMA4, que calcula o transporte médio de substâncias na coluna d'água através de computações do transporte advectivo e difusivo. Foi adotada como medida de tempo de troca, o Tempo de Descarga Local, proposto por Abdelrhman (2002), com a diferença de que será aqui adotada a necessidade da troca de 100% do volume de água, ou a completa diluição do traçador. Também serão calculados os tempos para atingir 63% (equivalente ao *e-tempo de descarga local* visto anteriormente). Isso porque, pode ocorrer de o tempo de renovação a 100% tender a infinito em algumas situações onde a fração residual do traçador demora muito tempo para ser eliminada. Com a renovação a 63% pode se ter uma idéia mais realista da capacidade de renovação considerando que a maior parte da concentração do traçador é eliminada nesse intervalo de meia vida (ABDELRHMAN, 2002; ABDELRHMAN, 2005; JOUON et al., 2006). O Tempo de Descarga Local será doravante referenciado neste trabalho por *tempo de renovação*.

As simulações partiram de uma concentração inicial homogênea (100 %) em todo o corpo da Baía da Ribeira. Na condição de contorno aberta na embocadura da baía (fronteira com a BTS) a concentração foi igual a zero. A partir daí, foi possível avaliar, ao

longo de uma simulação de 28 dias, qual o potencial de redução desta concentração inicial decorrente de mecanismos de troca com as águas provenientes da BTS.

As regiões da baía com tempo de renovação superior a 28 dias tiveram seu tempo de renovação calculado com base na projeção da curva de decaimento, como sugerido por Monsen et al. (2002). A partir daí é possível criar um mapa com a distribuição espacial dos tempos de renovação das águas da Baía da Ribeira em diferentes cenários morfológicos.

5 RESULTADOS

5.1 ALTERAÇÕES MORFOLÓGICAS DA BAÍA DA RIBEIRA

A linha de costa da Baía da Ribeira sofreu significativas modificações 1959 e 2007, como pode ser comprovado pelas linhas de costa apresentadas na Figura 12. A Tabela 3 apresenta as dimensões da Baía da Ribeira ao longo dos anos observados. É possível verificar que entre 1959 e 1980 houve uma perda acelerada de 41% da área original da baía, com uma redução de 29% do volume do corpo d'água. Entre 1980 e 2007 a intensidade da ocupação da baía foi menor havendo mais perda em volume (15%) do que em área (2%). No final das contas a perdas totais de volume e área da baía foram proporcionais, com uma redução de 43% e 44% da área e volume da baía, respectivamente.

Tabela 3: Dimensões da Baía da Ribeira nos cenários estudados.

Cenário	Volume (10^7 m^3)	Área (km^2)	Redução da área em relação a 1959	Redução do volume em relação a 1959
1959	5,7	5,76	0%	0%
1980	3,38	4,1	41%	29%
2007	3,23	3,22	43%	44%

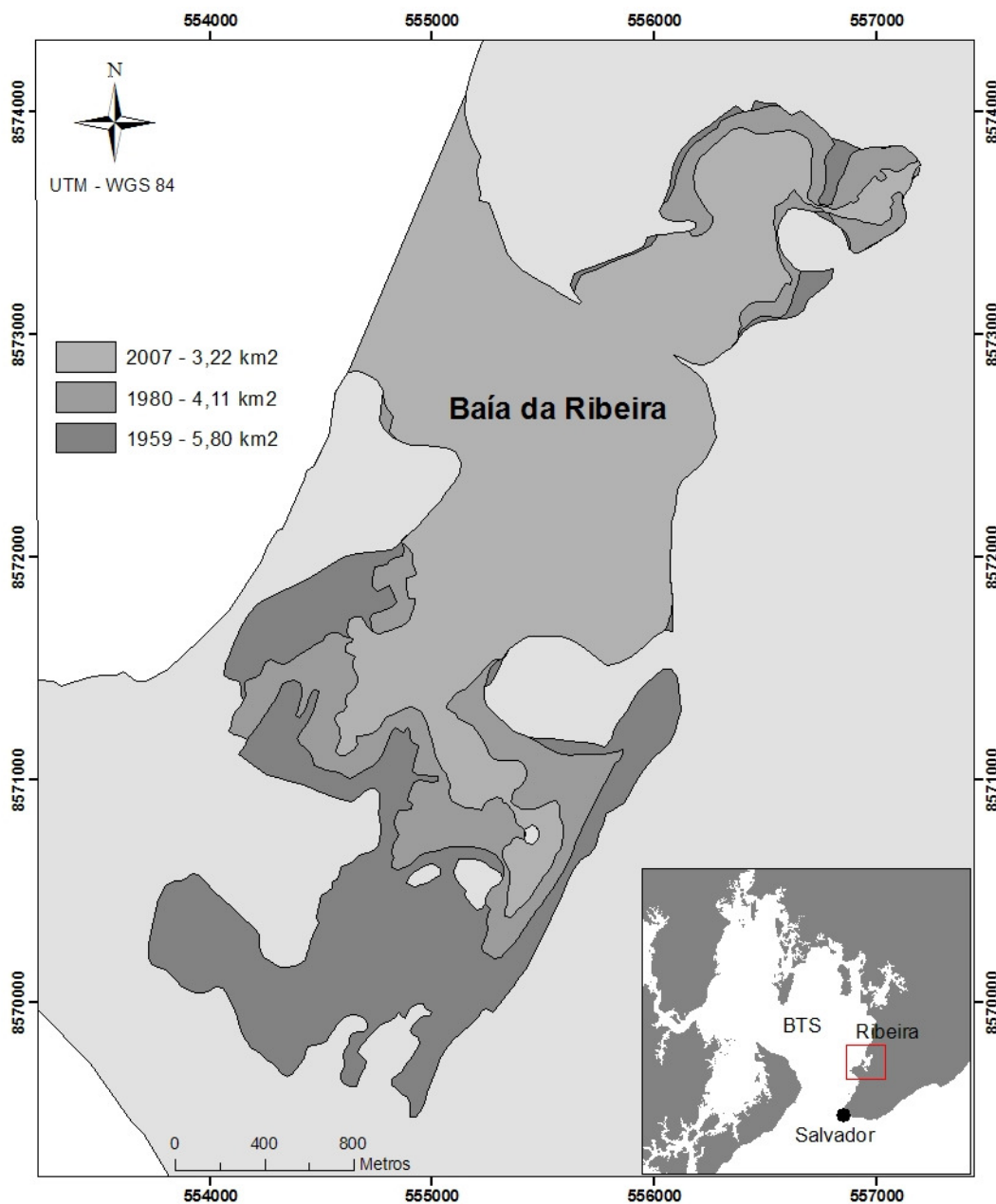


Figura 12: Espelhos d'água da Baía da Ribeira em diferentes épocas. Na legenda estão indicadas em km² as áreas dos respectivos cenários.

Os modelos batimétricos para os cenários de 1959, 1980 e 2007 estão apresentados nas Figura 13, Figura 14 e Figura 15 respectivamente. Os resultados indicam que houve uma redução de aproximadamente 48,73% no volume da baía entre 1831 e 2007. As modificações na morfologia da baía vão se refletir no seu prisma de maré, que serão apresentados nos capítulos seguintes.

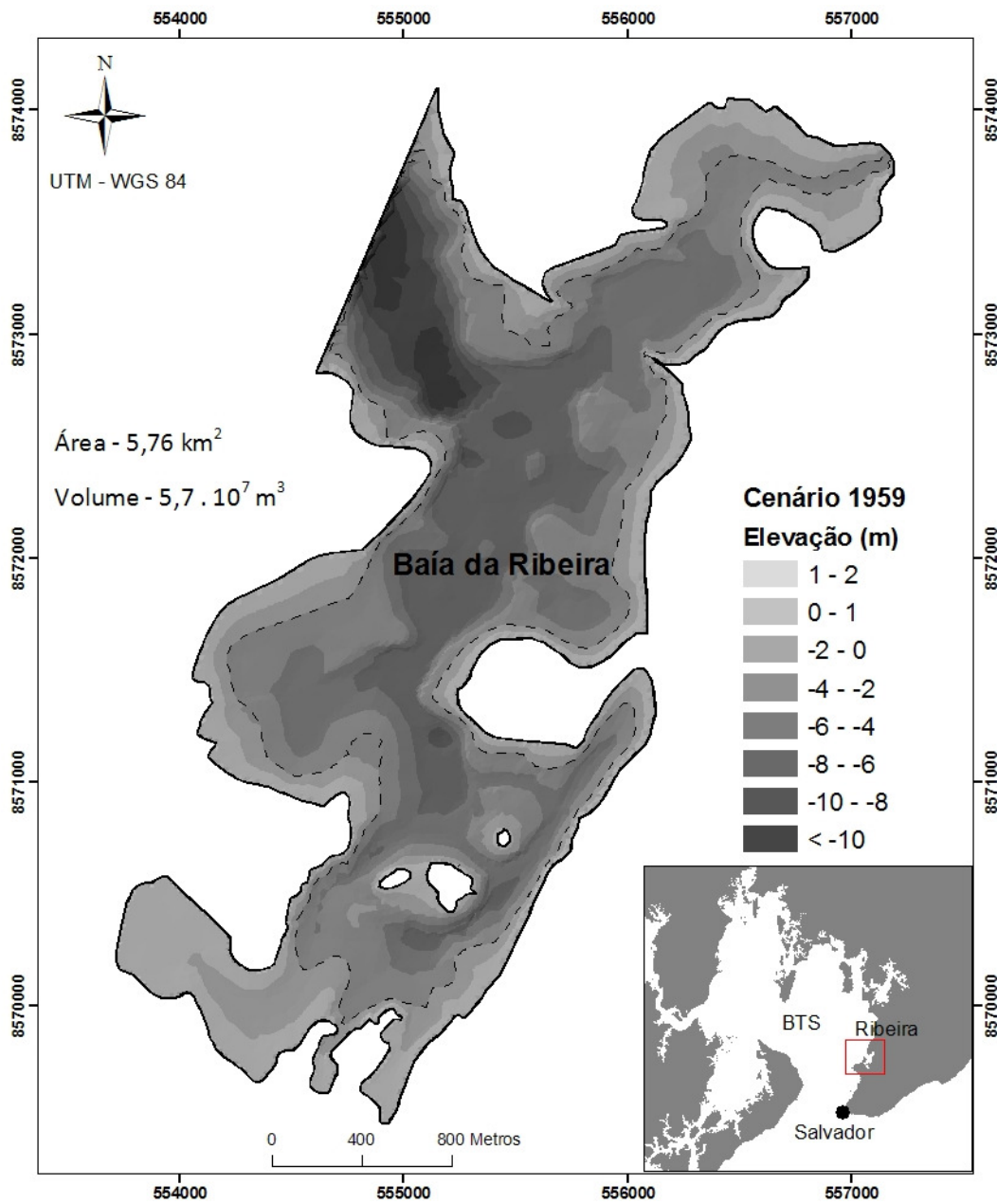


Figura 13: Modelo batimétrico da Ribeira no cenário de 1959. A linha tracejada indica a posição do zero batimétrico.

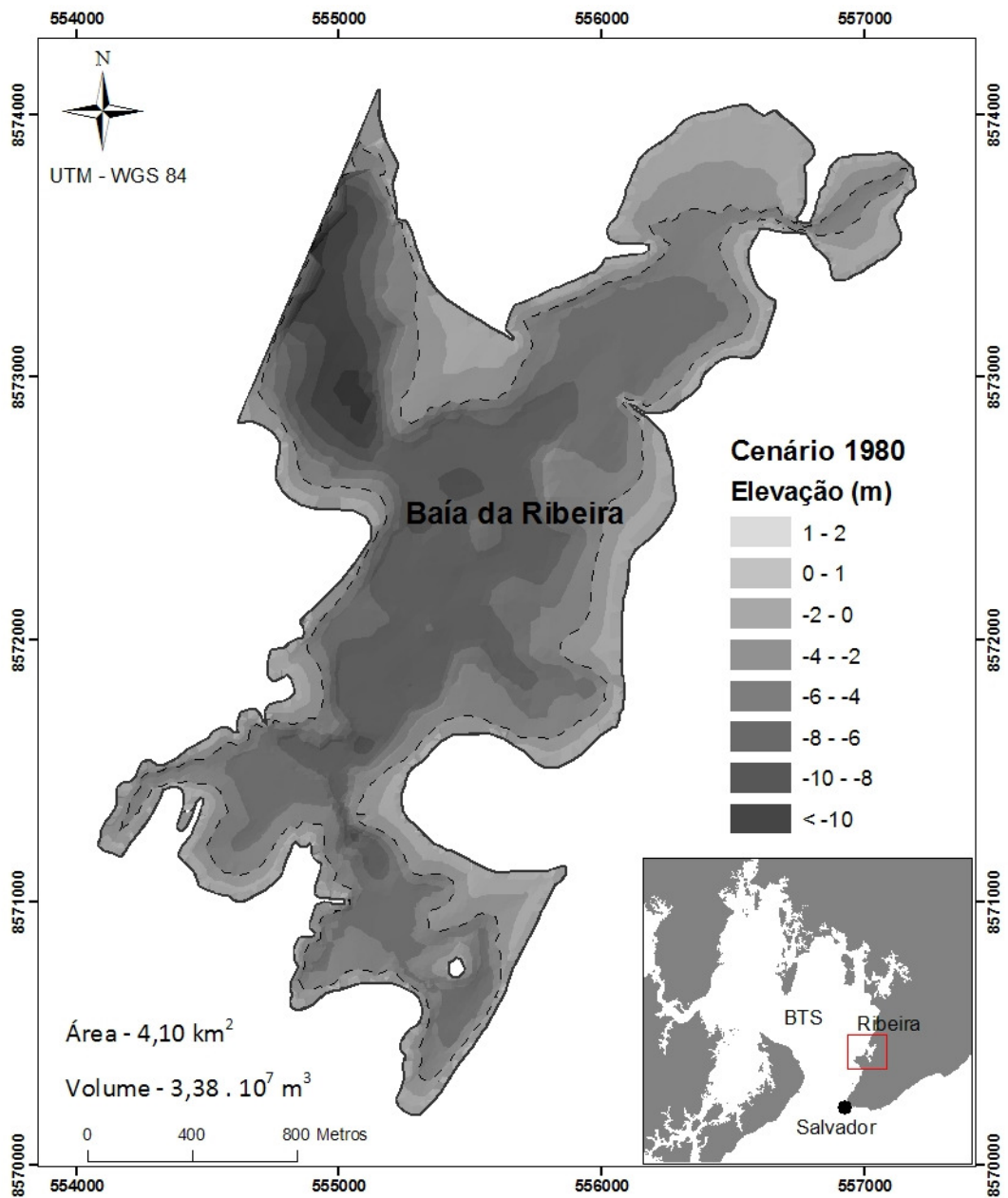


Figura 14: Modelo batimétrico da Ribeira no cenário de 1980. A linha tracejada indica a posição do zero batimétrico.

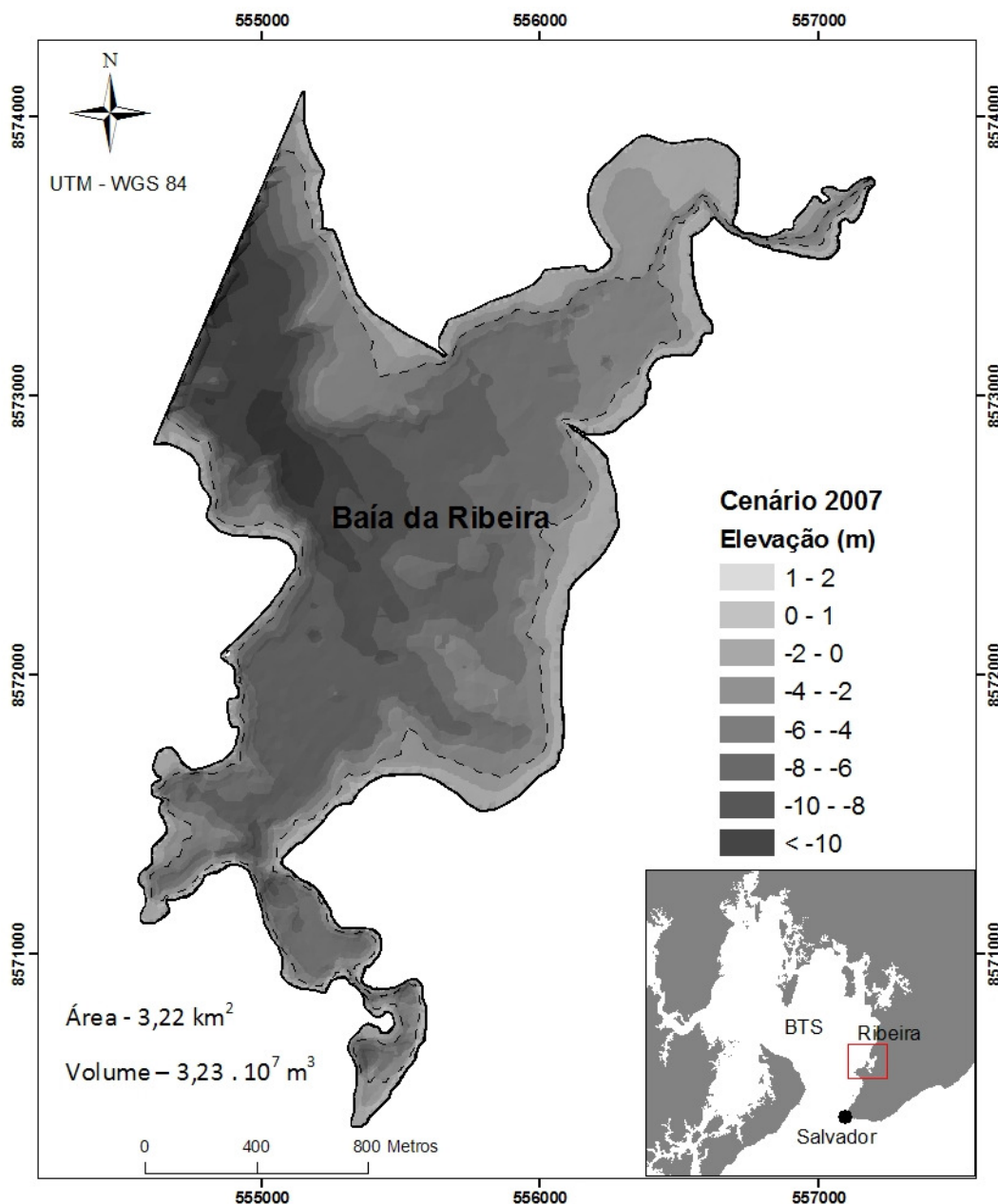


Figura 15: Modelo batimétrico da Ribeira no cenário de 2007. A linha tracejada indica a posição do zero batimétrico.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DA HIDRODINÂMICA ESTUARINA ATUAL E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

A seguir serão apresentados os resultados referentes à análise dos dados de campo de forma a caracterizar o padrão de circulação de água na Baía da Ribeira. Também será apresentada a comparação entre os dados de campo e os correspondentes resultados simulados pelo modelo hidrodinâmico, com intuito de verificar o grau de confiabilidade da resposta fornecida pelo modelo.

5.2.1 MARÉS

As características da maré na Baía da Ribeira são equivalentes ao padrão de maré ocorrente na Baía de Todos os Santos (BTS). De acordo com Cirano e Lessa (2008), a maré na BTS tem característica semi-diurna (ciclo de 12 h), sendo a maré astronômica a principal responsável pela variação do sinal de maré na BTS. De acordo com Lessa e Pereira (2006), a maior altura de maré registrada no Porto de Salvador entre outubro de 2004 a junho de 2006 foi de 2,7 m em maré de sizígia equinocial na primavera.

As marés observadas no período de 08 à 10/04/2005 na Baía da Ribeira e no Porto de Salvador, apresentadas na Figura 16, são bastante similares, indicando não haver distorções, atrasos ou alterações de altura significativas entre os dois locais de monitoramento. As elevações de baixa-mar não foram registradas corretamente na Baía da Ribeira devido a problemas na localização do marégrafo em região de profundidade rasa, o que acarretou em empoçamento e truncamento do sinal. Neste período a altura máxima de maré foi aproximadamente 2,5 m.

Ao se comparar a maré simulada e observada (Figura 16), observa-se um erro médio de 5,7%. A raiz do erro quadrado médio (REQ) foi de 0,07 m. O ajuste linear, dos dados observados contra os simulados (Figura 17), apresentou um coeficiente de correlação de 99%. A distribuição dos erros, apresentada na Figura 18, indica que a maior parte dos dados (11%) apresentou erros entre 10 e 20%. É importante que fique claro que os erros resultantes das falhas no registro da maré observada em campo (distorções da baixa-mar verificadas na Figura 16, foram previamente filtrados de forma que a validação dos resultados do modelo não fosse contaminada.

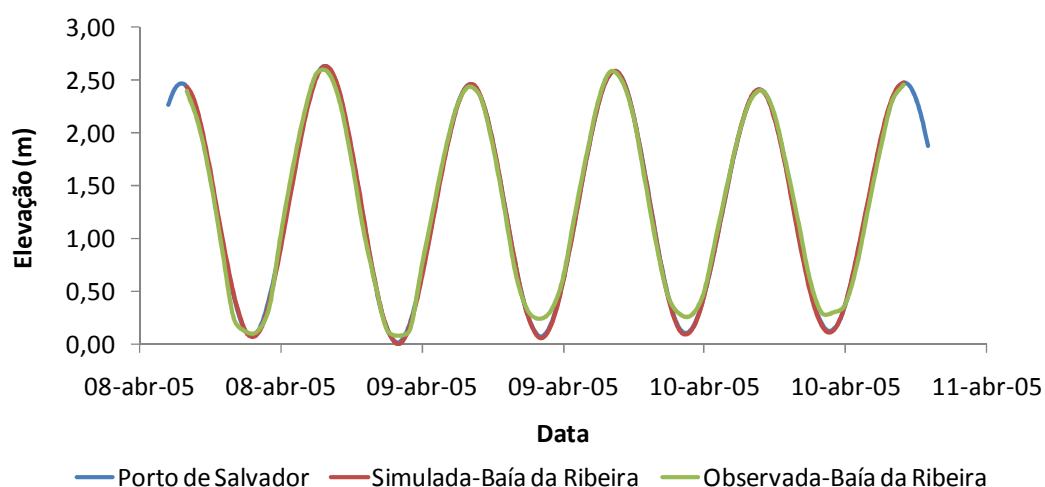


Figura 16: Séries das marés observadas no Porto de Salvador e na Baía da Ribeira em abril de 2005. Em vermelho esta o sinal, da mesma maré, simulada pelo modelo hidrodinâmico. As elevações de baixa-mar na Baía da Ribeira foram registradas incorretamente pelo marégrafo devido à empoçamentos ocorridos próximo à baixa-mar.

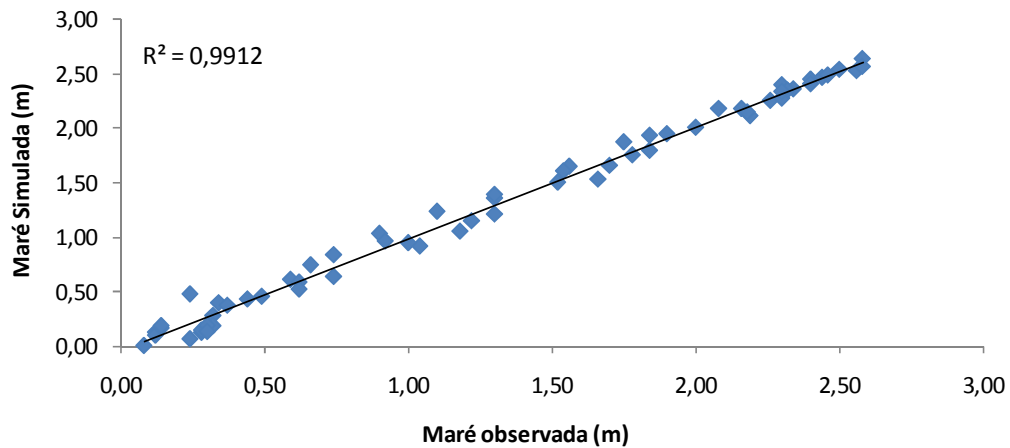


Figura 17: Ajuste linear entre as marés simuladas e observadas na Baía da Ribeira em 08 a 10/04/2005. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.

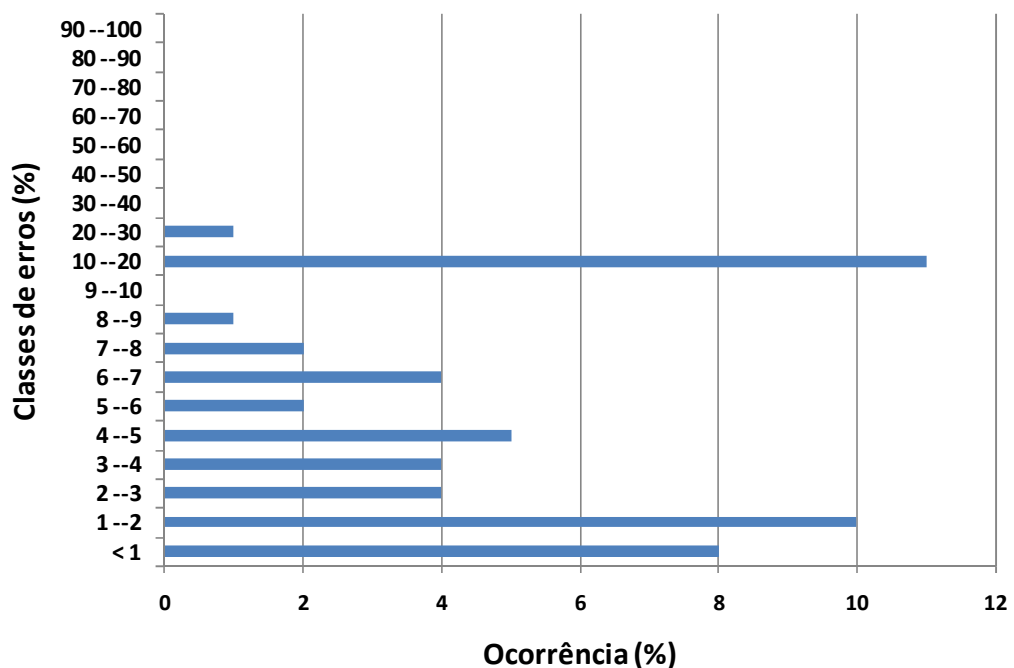


Figura 18: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 08 a 10/04/2005.

5.2.2 CORRENTES E DESCARGAS

Os dados de correntes e descargas observados em campo serão apresentados a seguir, bem como a sua comparação com os respectivos valores simulados. O sinal positivo nos dados indica fluxo de vazante (em direção a BTS), paralelo as margens do canal de escoamento. A Figura 19 indica as posições de referência para o sinal do fluxo e posição das margens na seção de controle para os monitoramentos com ADCP na boca da Baía da Ribeira.

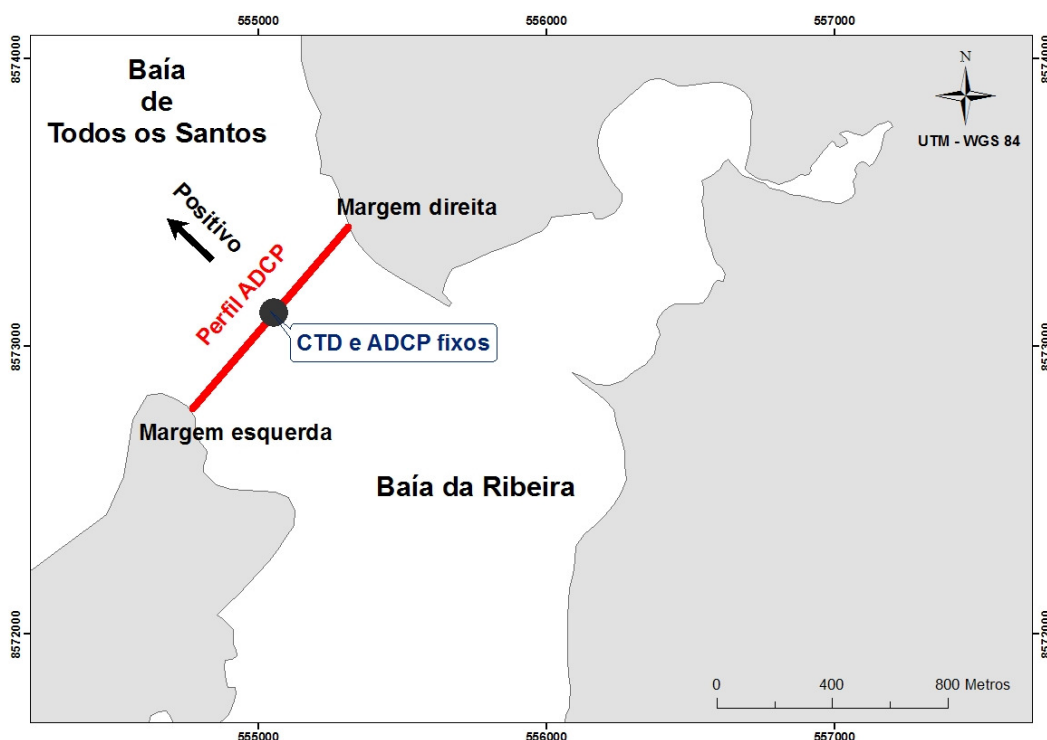


Figura 19: Local de monitoramento de fluxo na boca da Baía da Ribeira. O sentido positivo do fluxo está indicado pela seta preta.

- **Perfis de ADCP 08/04/2005 (sizígia)**

As vazões observadas na Baía da Ribeira em 08/04/2005 estão plotadas na Figura 20, junto à maré prevista para o Porto de Salvador. Neste dia registrou-se uma vazão máxima de $-538 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durante a meia-maré de enchente. O campo de velocidades no instante de vazão máxima (Figura 21) apresentou magnitudes entre $-0,05 \text{ m s}^{-1}$ e $-0,01 \text{ m s}^{-1}$. O campo de velocidades residuais, apresentado na Figura 21, mostra magnitudes máximas de $-0,03 \text{ m s}^{-1}$ e a estruturação de fraca circulação gravitacional, com fluxo direcionado para dentro da baía na camada inferior da coluna d'água.

Nota-se que as vazões de vazante simuladas apresentaram boa correspondência com a observada, mas a vazão de enchente é subestimada (Figura 20). O erro médio entre as séries foi de 38%, a raiz do erro quadrado médio (REQ) foi $84 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e o coeficiente de correlação foi de 84%. O ajuste da fase foi coerente nos instantes de máximo, mas com uma diferença significativa nos instantes de estofa. Isso provavelmente se deve à dificuldade do ADCP em registrar o fluxo quando as correntes são muito baixas.

A distribuição dos erros, apresentada na Figura 23, indica que a maior parte dos dados (30%) apresentaram erros entre 10 e 20%. Os prismas de maré enchente – obtidos pela integração das descargas no período de enchente – apresentaram uma diferença de 19% entre os valores observados ($11,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) e simulados ($8,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$). O prisma de vazante não foi calculado devido à limitação da série observada.

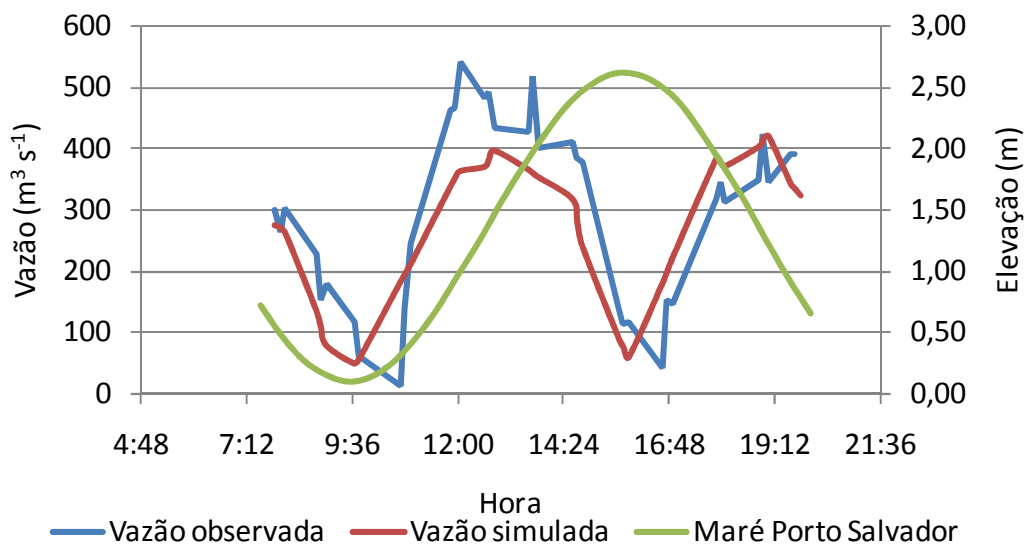


Figura 20: Vazões observadas e simuladas em 08/04/2005. No eixo vertical secundário está plotada a maré do porto de Salvador, indicando o sentido das vazões.

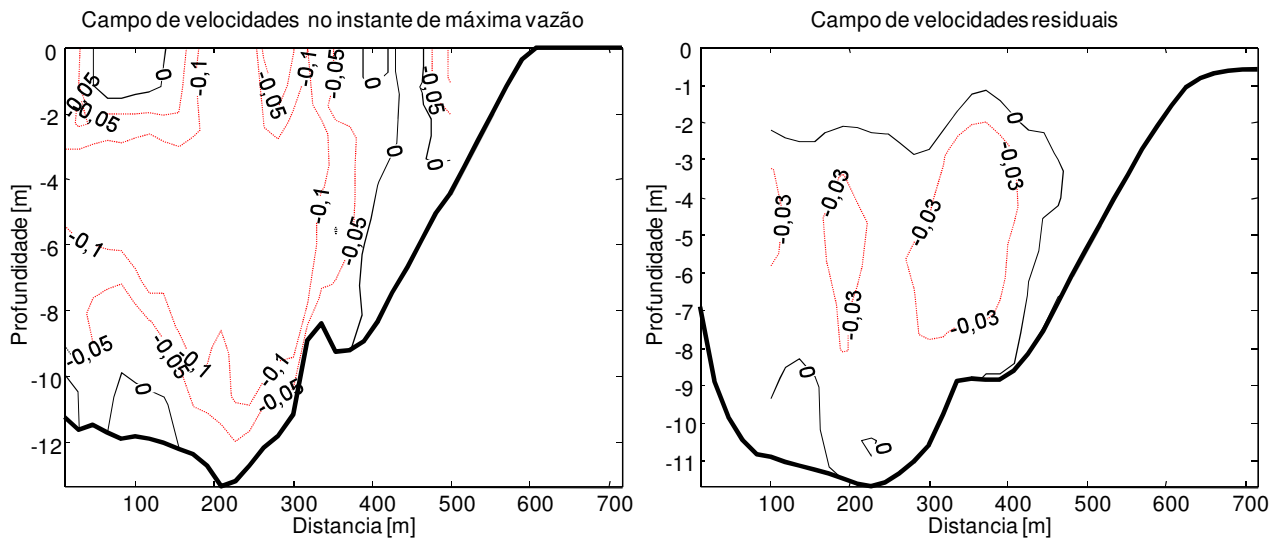


Figura 21: Campo de correntes (m s^{-1}) do perfil transversal do canal na boca da Baía da Ribeira (Figura 19), para o ciclo de maré monitorado em 8/04/2005. O perfil batimétrico da seção (linha preta grossa) tem origem na margem esquerda do canal monitorado.

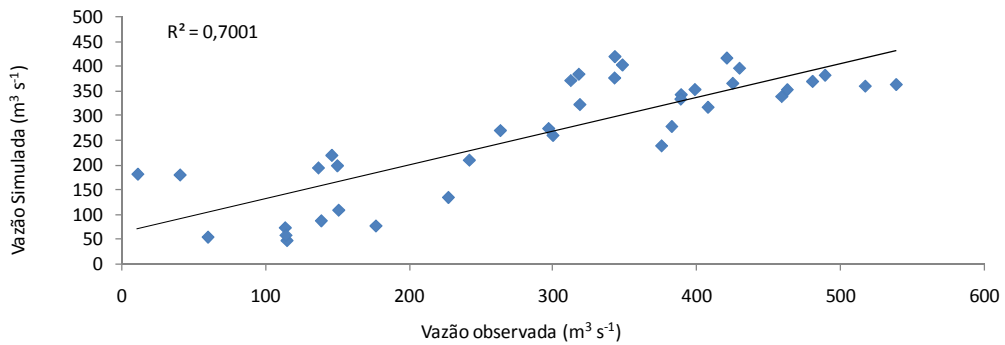


Figura 22: Ajuste linear entre as vazões simuladas e observadas na Baía da Ribeira em 08/04/2005. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.

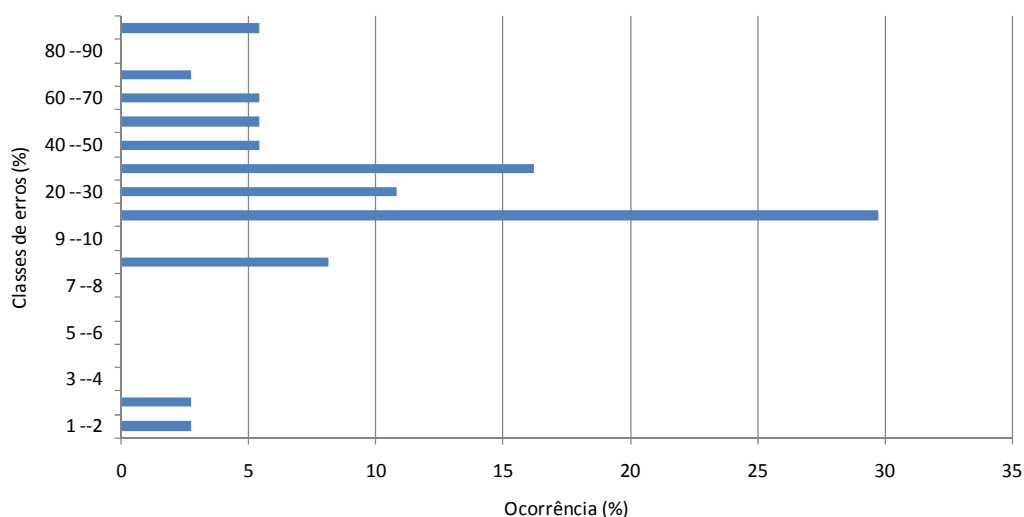


Figura 23: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 08/04/2005.

- **Perfis de ADCP 28/09/2006 (quadratura)**

As vazões observadas na Baía da Ribeira em 28/09/2006 estão plotadas na Figura 24, com a maré correspondente do Porto de Salvador. Observou-se uma vazão máxima de cerca de $175 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durante a meia-maré de vazante. O campo de velocidades de corrente no instante vazão máxima (Figura 25) apresentou magnitudes de $0,03$ a $0,06 \text{ m s}^{-1}$ em direção a BTS. O campo de velocidades residuais, apresentado na Figura 25, indica uma tendência próxima de zero do transporte durante o período monitorado.

Nota-se que o modelo foi capaz de reproduzir os valores máximos de vazão de enchente e vazante, mas incapaz de reproduzir a variabilidade de alta frequência em quadratura. Novamente observa-se que ocorre uma diferença de fase significativa nos instantes de estofa. É possível que a variabilidade de alta frequência das vazões registradas esteja associada a limitações do ADCP ao registrar fluxos muito lentos em quadratura. O erro médio do modelo foi de 49%, a raiz do erro quadrado médio (REQ) foi de $84 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e o coeficiente de correlação foi 65%. A distribuição dos erros, apresentada na Figura 27, indica que a maior parte dos dados (30%) apresentou erros entre nas faixas de 30 a 40% e de 60 e 70%. O prisma de maré vazante calculado pelo modelo ($2,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) foi 46% maior que o valor observado em campo ($1,37 \cdot 10^6 \text{ m}^3$). Já para o prisma de enchente houve uma melhor aproximação, onde o resultado do modelo ($2,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) superestimou em 19% o valor observado ($2,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$).

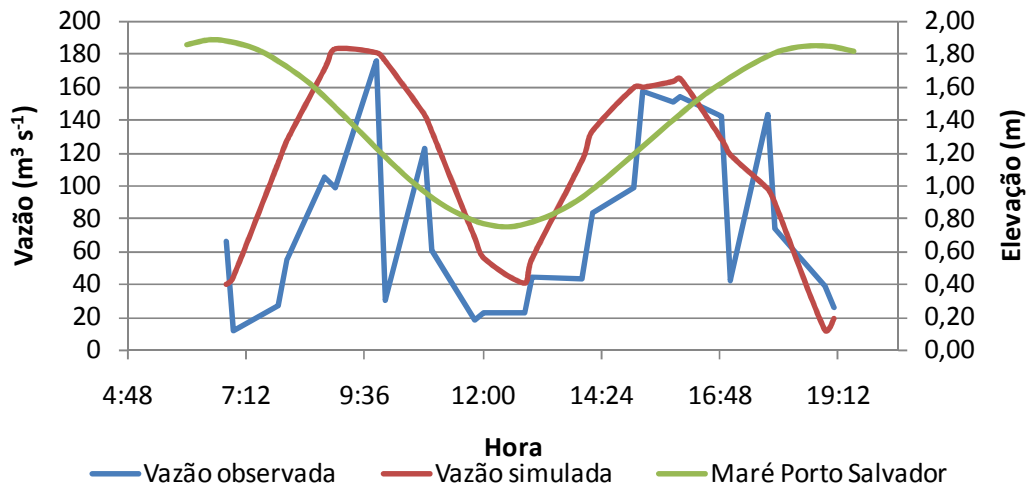


Figura 24: Vazões observadas e simuladas na Baía da Ribeira em 28/09/2006. No eixo vertical secundário está plotada a maré do porto de Salvador, indicando o sentido das vazões.

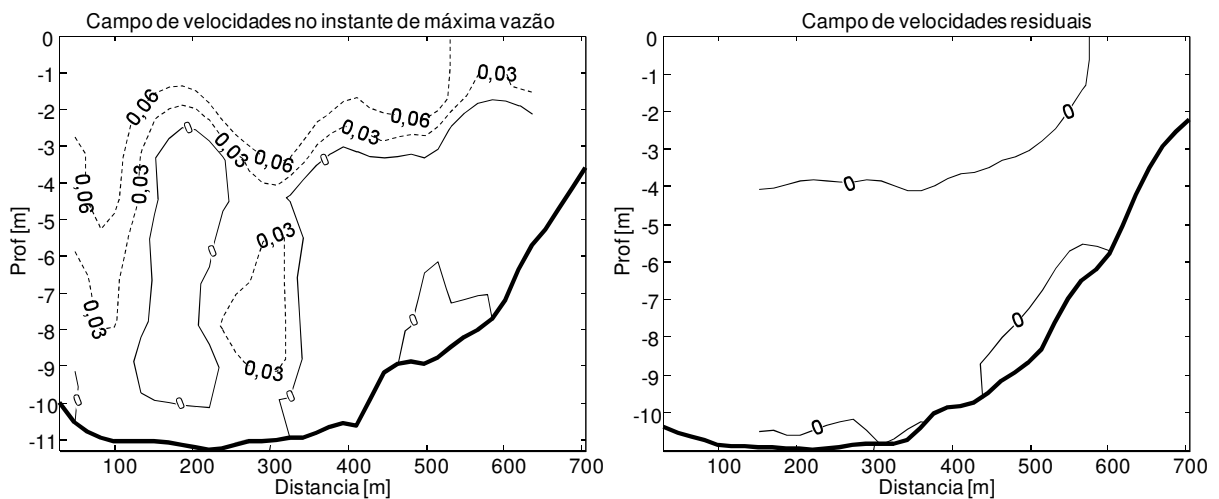


Figura 25: Campo de correntes ($m s^{-1}$) do perfil transversal do canal na boca da Baía da Ribeira (Figura 19), para o ciclo de maré monitorado em 28/09/2006. O perfil batimétrico da seção (linha preta grossa) tem origem na margem esquerda do canal monitorado.

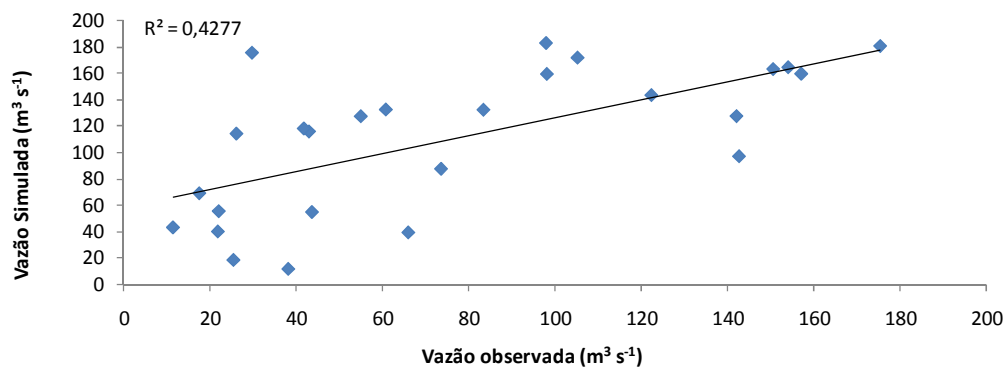


Figura 26: Ajuste linear entre as vazões simuladas e observadas na Baía da Ribeira em 28/09/2006. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.

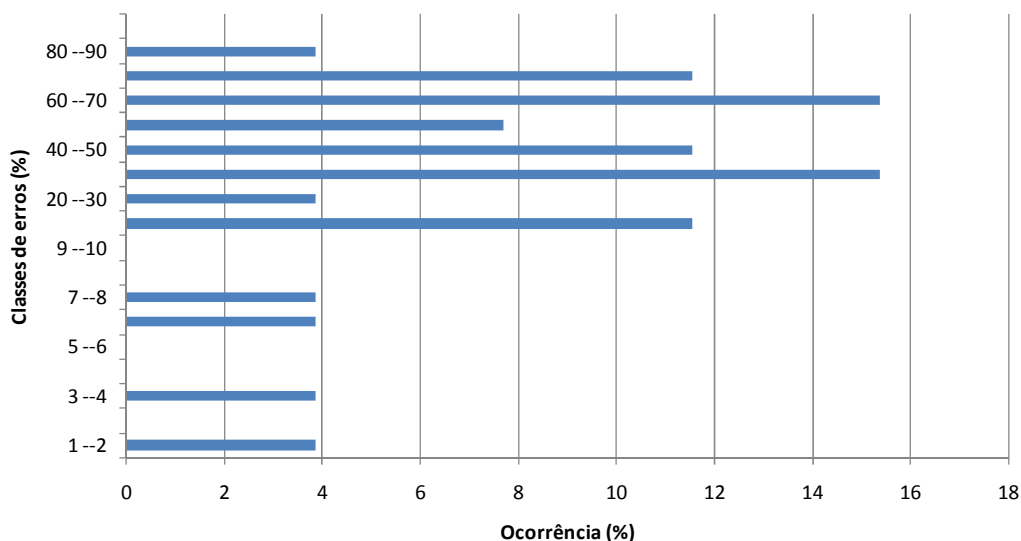


Figura 27: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 28/09/2006.

- **Correntes com ADCP fixo 29/08/2008 (sizígia)**

As velocidades das correntes observadas em um ponto fixo na embocadura da Baía da Ribeira em 29/08/2008 estão plotadas na Figura 28, juntamente com as correspondentes profundidades observadas no local. A velocidade máxima registrada foi de $0,13 \text{ m s}^{-1}$ durante a meia-maré de vazante.

O perfil vertical de velocidades residuais, apresentado na Figura 29, também indica uma tendência próxima de transporte em direção ao interior da Baía da Ribeira, mas com uma pequena tendência de fluxo de vazante na superfície e fundo.

O modelo foi capaz de reproduzir os picos de enchente, porém a velocidade máxima do pico de vazante foi $0,02 \text{ m s}^{-1}$ inferior à observada (Figura 28). As correntes calculadas pelo modelo estão em fase com os dados observados na estufa de baixa-mar e no instante de máximas correntes de enchente. No entanto, observa-se que ocorre uma diferença de fase significativa na estufa de preamar entre os dados simulados e observados. Novamente verifica-se a dificuldade do ADCP em registrar corretamente correntes fracas, pois os resultados do modelo estão em fase com o sinal da maré (Figura 28). O erro médio foi de 46%, a raiz do erro quadrado médio (REQ) foi $0,018 \text{ m s}^{-1}$ e o coeficiente de correlação foi de 79% (Figura 30). A distribuição dos erros, apresentada na Figura 31, indica que a maior parte dos dados (37%) apresentaram erros entre 10 e 20%.

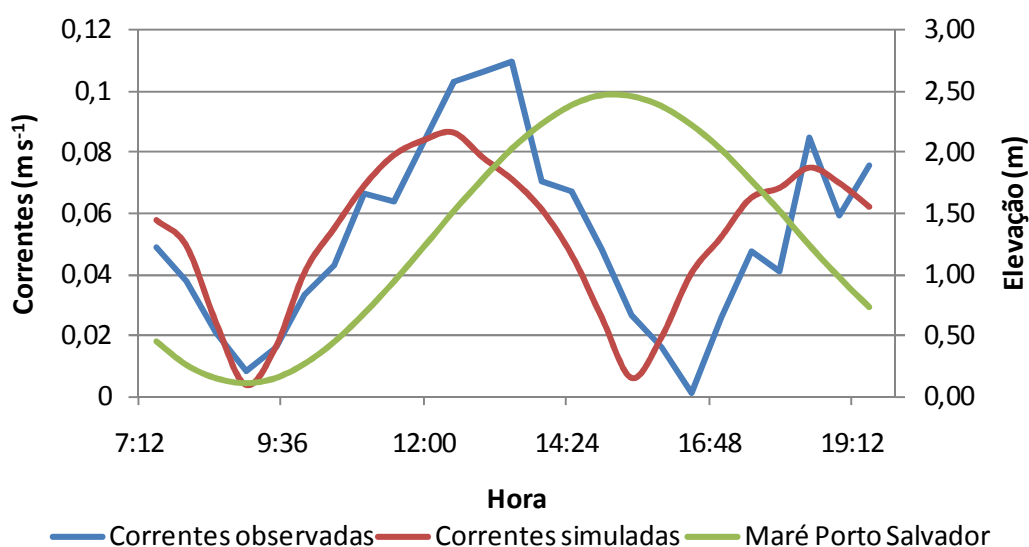


Figura 28: Velocidades das correntes observadas vs simuladas na Baía da Ribeira em 29/08/2008.

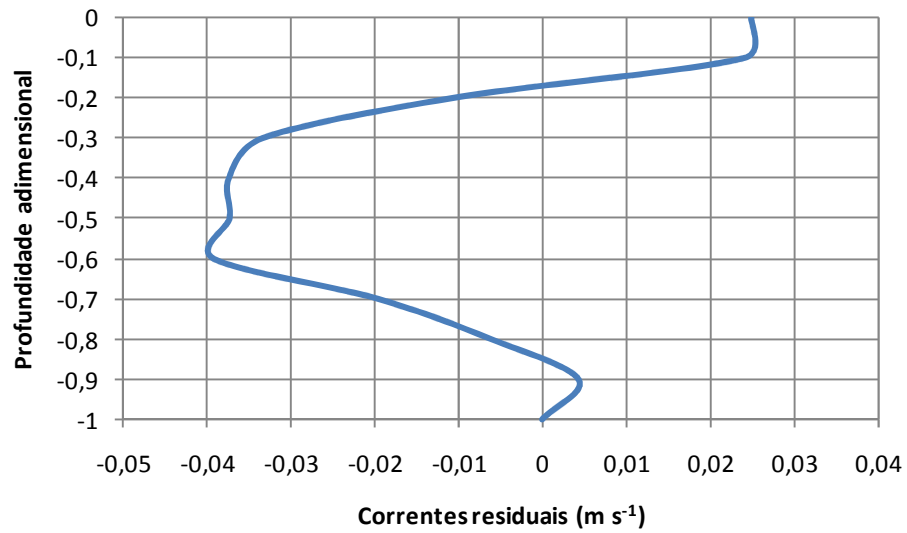


Figura 29: Perfil de velocidades residuais ao longo da coluna d'água (média do ciclo monitorado), observado na Baía da Ribeira em 29/08/2008.

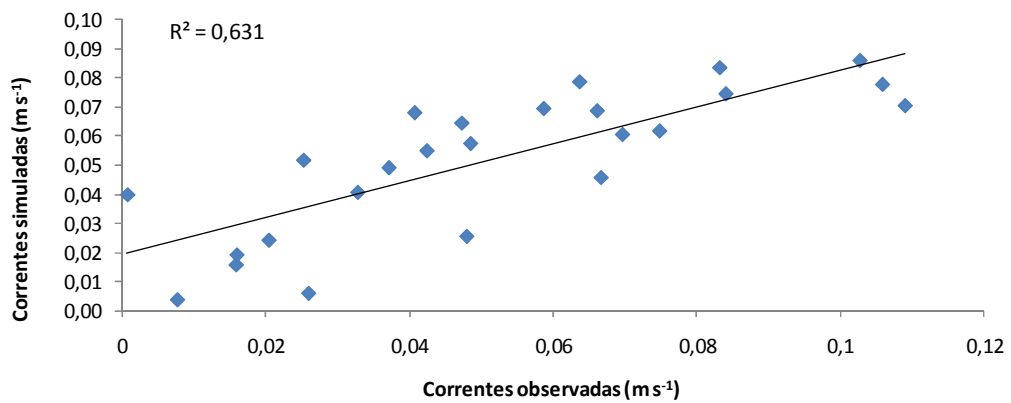


Figura 30: Ajuste linear entre as velocidades das correntes simuladas e observadas na Baía da Ribeira em 29/08/2008. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.

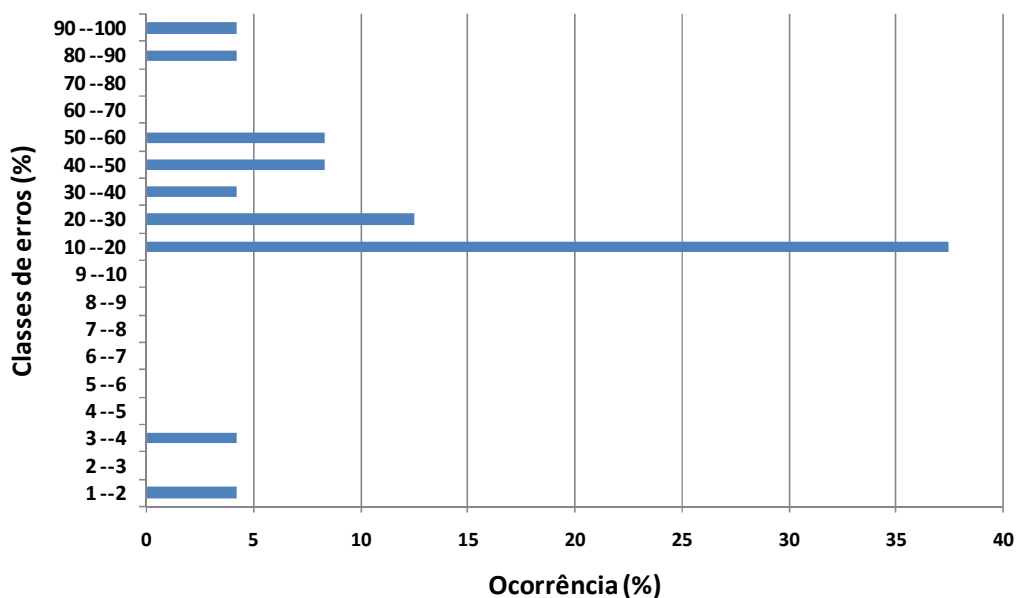


Figura 31: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 29/08/2008.

5.2.3 PERFIS VERTICAIS DE SALINIDADE E TEMPERATURA

Os perfis verticais médios de salinidade, monitorados durante as medições de fluxo das campanhas de 08/04/2005, 28/09/2006 e 29/08/2008 estão apresentados na Figura 32. Em 08/04/2005 (sizígia) o perfil médio de salinidade indica uma pequena variação da salinidade ao longo da coluna d'água, com águas cerca de 1,3 ups mais salinas no fundo do que na superfície. Já em 28/09/2006 (quadratura) perfil médio de salinidade foi mais homogêneo que o anterior, com diferença de salinidade entre superfície e fundo de 0,5 ups. No dia 29/08/2008 (sizígia) o perfil médio de salinidade mostra águas com cerca de 0,14 ups mais salinas no fundo que na superfície. Em geral os perfis indicam a presença de águas salinas (média de 35 ups) bem misturadas na coluna d'água.

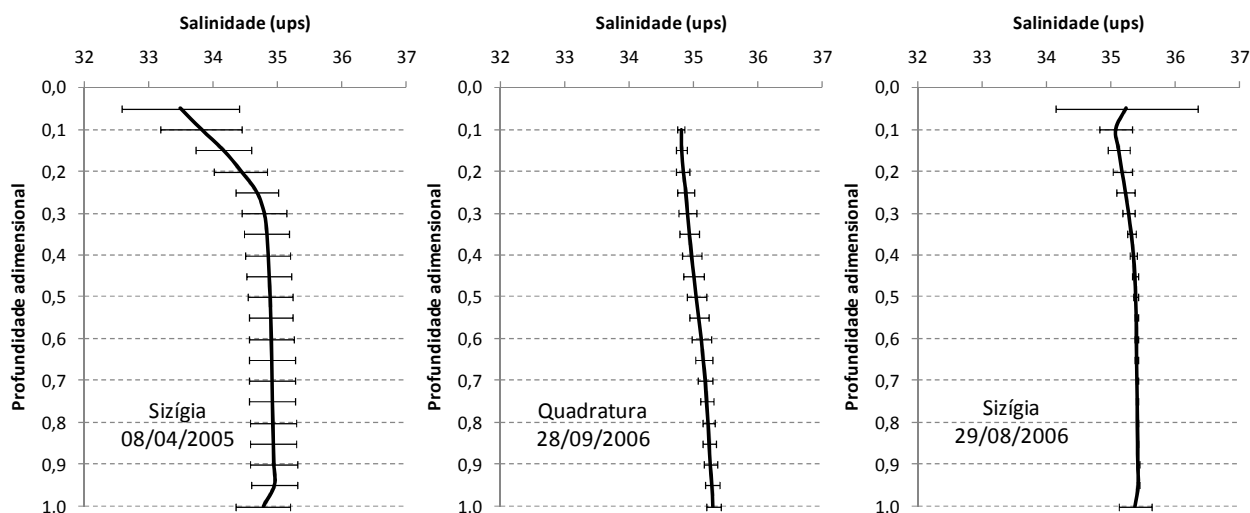


Figura 32: Perfis verticais de salinidade monitorados na boca da Baía da Ribeira ao longo de um ciclo de maré. Os dados representam os valores médios de salinidade ao longo da profundidade adimensional para cada período de monitoramento. O valor do desvio padrão da média está indicado pelas linhas horizontais.

Os perfis verticais médios de temperatura monitorados durante as medições de fluxo estão apresentados na Figura 33. Em 08/04/2005 (sizígia) o perfil médio de temperatura apresentou uma variação de 0,6 °C entre superfície e fundo, com águas mais quentes na superfície. Em 28/09/2006 (quadratura) perfil médio de temperatura apresentou estratificação menor que o anterior, com diferença de 0,1 °C entre superfície e fundo. No dia 29/08/2008 (sizígia) o perfil médio de temperatura apresentou estratificação maior que os demais com águas 0,74 °C mais frias no fundo que na superfície. O dia 08/04/2005 (sizígia) apresentou as maiores temperaturas na água, com média de 29 °C, enquanto que nos demais dias a temperatura média ficou em torno dos 26 °C. Em geral observa-se que os perfis apresentaram baixa estratificação de temperatura, indicando a presença de águas bem misturadas na coluna d'água.

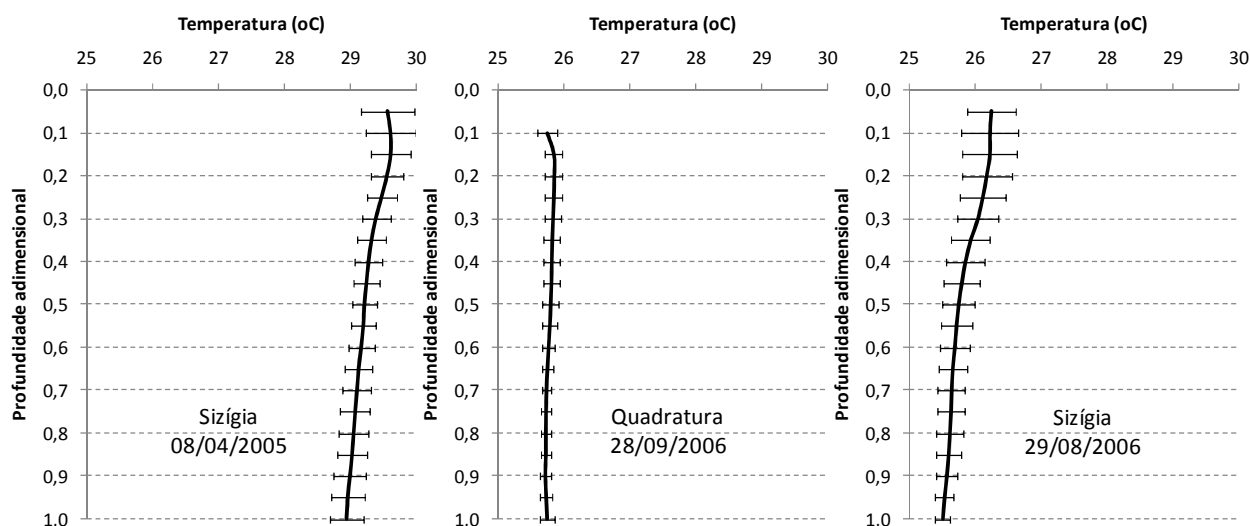


Figura 33: Perfis verticais de temperatura monitorados na boca da Baía da Ribeira ao longo de um ciclo de maré. Os dados representam os valores médios de salinidade ao longo da profundidade adimensional para cada período de monitoramento. O valor do desvio padrão da média está indicado pelas linhas horizontais.

5.2.4 SÍNTESE DA CARACTERIZAÇÃO DA HIDRODINÂMICA E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

Um modelo numérico deve ser capaz de simular padrões de circulação hidrodinâmica que sejam característicos do ambiente em questão. No caso da Baía da Ribeira, os dados de campo indicam características de um estuário bem misturado, com pouca influência fluvial e com significativa área intermareal. Os resultados dos monitoramentos realizados apresentaram salinidade mínima de 33,5 ups e máxima de 35,4, indicando a presença de águas tipicamente salinas e coluna d'água bem misturada. A máxima variação de salinidade e temperatura entre superfície e fundo foi de 1,3 ups e 0,74 °C, respectivamente. É significativo o aporte esgotos domésticos nas regiões mais internas da baía, assim como descarga de água doce proveniente do sistema de drenagem urbana, que acabam por promover um ambiente de águas salobras nessas áreas (CRA, 2002). No entanto, dificuldades técnicas impediram um monitoramento mais detalhado da distribuição da salinidade e temperatura nas regiões mais internas da Baía da Ribeira.

A existência de eventuais gradientes longitudinais de densidade pode causar um padrão de circulação estacionária estratificado, como observado no monitoramento na maré de sizígia em 2008. No entanto, os dados dos dois outros monitoramentos – sizígia

em abril de 2005 e quadratura em setembro de 2006 – mostraram respectivamente padrões de correntes residuais unidirecional de enchente e correntes nulas. Não se dispõe de registros pluviométricos para avaliar se as condições meteorológicas e a descarga de água doce foram significativamente maiores no monitoramento de 2008, de forma a causar a estratificação. É provável que além da entrada do gradiente de densidade, o efeito dos ventos soprando em direção a saída da Baía da Ribeira tenham influenciado no deslocamento da camada superficial. Infelizmente o modelo hidrodinâmico utilizado neste trabalho (RMA2), não é capaz de simular a componente baroclínica da circulação, ou mesmo a influência do campo de ventos sobre correntes ao longo da coluna d'água.

Apesar de ser um modelo bidimensional barotrópico, o RMA2 conseguiu reproduzir com fidelidade o sinal da maré no interior da Baía da Ribeira. No caso das vazões e correntes observa-se que os resultados do modelo não foram tão fiéis aos dados observados em campo. O que se observou em geral, é que o modelo não conseguiu acompanhar a fase do sinal de fluxo nos momentos de estofa. Tal fato pode ser atribuído à limitações do ADCP utilizado em medir fluxos muito lentos que ocorrem nestes instantes. Isso porque se verificou que o modelo foi capaz de reproduzir de forma aceitável a magnitude e a fase do sinal de fluxo nos instantes de máximas correntes e descargas. É provável que os resultados seriam melhores caso fosse feita uma análise estatística mais detalhada utilizando um volume maior de dados de correntes e descargas.

Diversos testes foram realizados até encontrar os parâmetros de calibração que melhor ajustassem os resultados do modelo com os dados observados em campo. Com base nos resultados da análise de sensibilidade do modelo (ver anexo) e nos valores dos parâmetros de calibração indicados pelos desenvolvedores do RMA2, foram selecionados os seguintes valores de rugosidade e viscosidade turbulenta:

- Áreas de intermaré: $E = 4250$ e $n = 0,035$
- Áreas de submaré: $E = 4250$ e $n = 0,025$

A análise de sensibilidade do modelo da Baía da Ribeira mostra que não há variação significativa nas magnitudes das correntes e vazões, e nem no sinal da maré calculada pelo modelo em função dos diferentes valores de rugosidade de fundo e viscosidade turbulenta (ver Anexo 1).

Desta forma, serão apresentados a seguir, os resultados do modelo, de acordo com os parâmetros de calibração predefinidos, e as respectivas análises comparativas com os dados observados em campo.

5.3 ANÁLISE DOS DIFERENTES CENÁRIOS MODELADOS

Os capítulos seguintes irão descrever as comparações entre as principais características hidrodinâmicas da Baía da Ribeira para os diferentes cenários modelados. As malhas de elementos finitos dos domínios modelados em cada cenário estão expostas na Figura 34.

Foram realizadas simulações para cada cenário a partir de uma mesma condição de contorno utilizando os mesmos parâmetros de calibração do modelo descritos anteriormente. Desta forma é possível fazer uma análise comparativa entre os diferentes cenários, onde apenas a geometria do corpo d'água é quem irá variar.

O mapa da Figura 35 mostra as estações de controle onde serão feitas as comparações entre os diferentes cenários, no tempo e no espaço. O perfil indicado em branco na boca da baía (Figura 35) foi utilizado para as comparações entre as vazões observadas nos diferentes cenários. Como já foi dito, o sentido do fluxo é positivo em direção ao exterior da baía (maré vazante). As margens esquerda e direita estão referenciadas de acordo com fluxo de vazante.

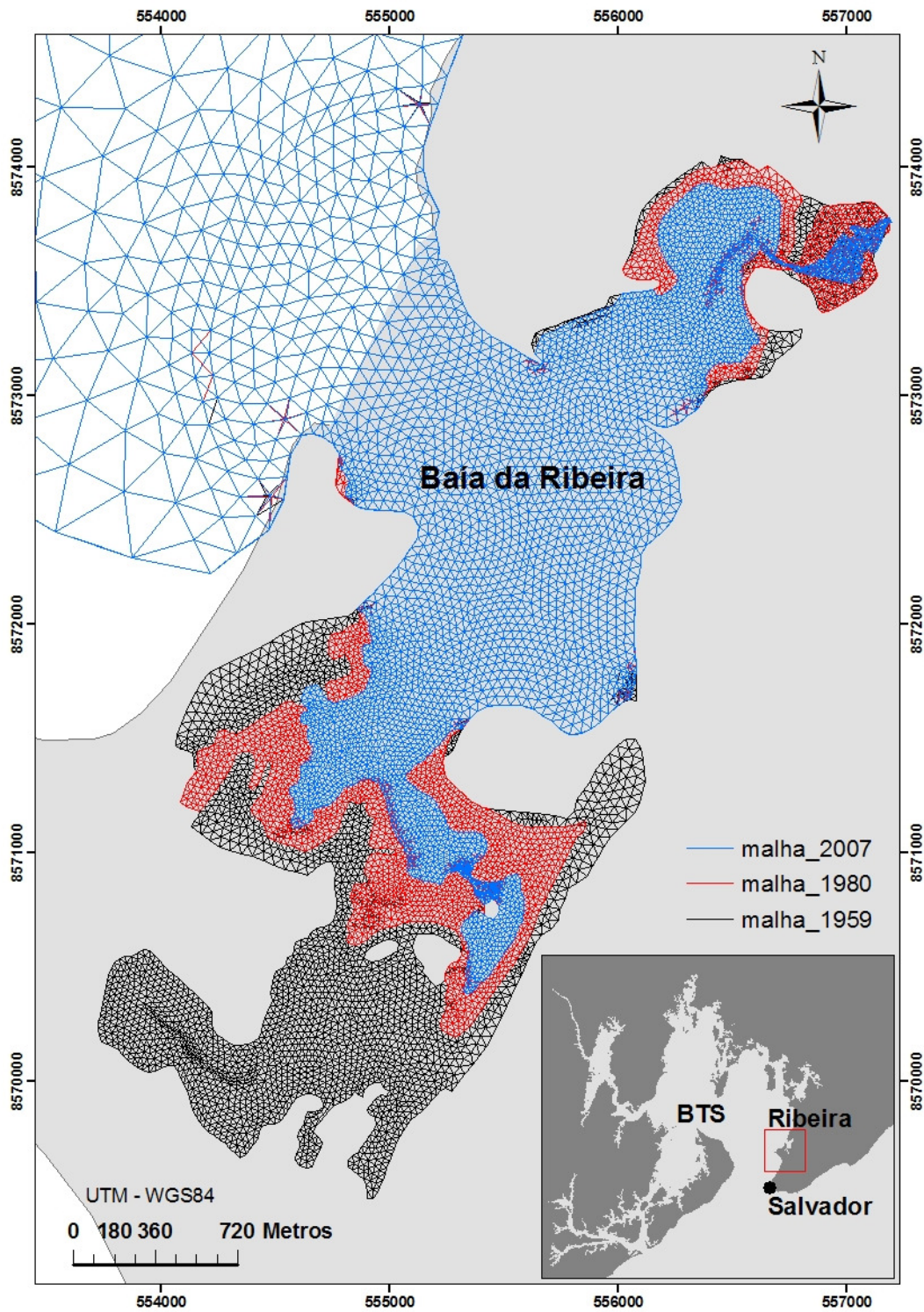


Figura 34: Malhas de elementos finitos utilizadas na construção dos cenários modelados da Baía da Ribeira.

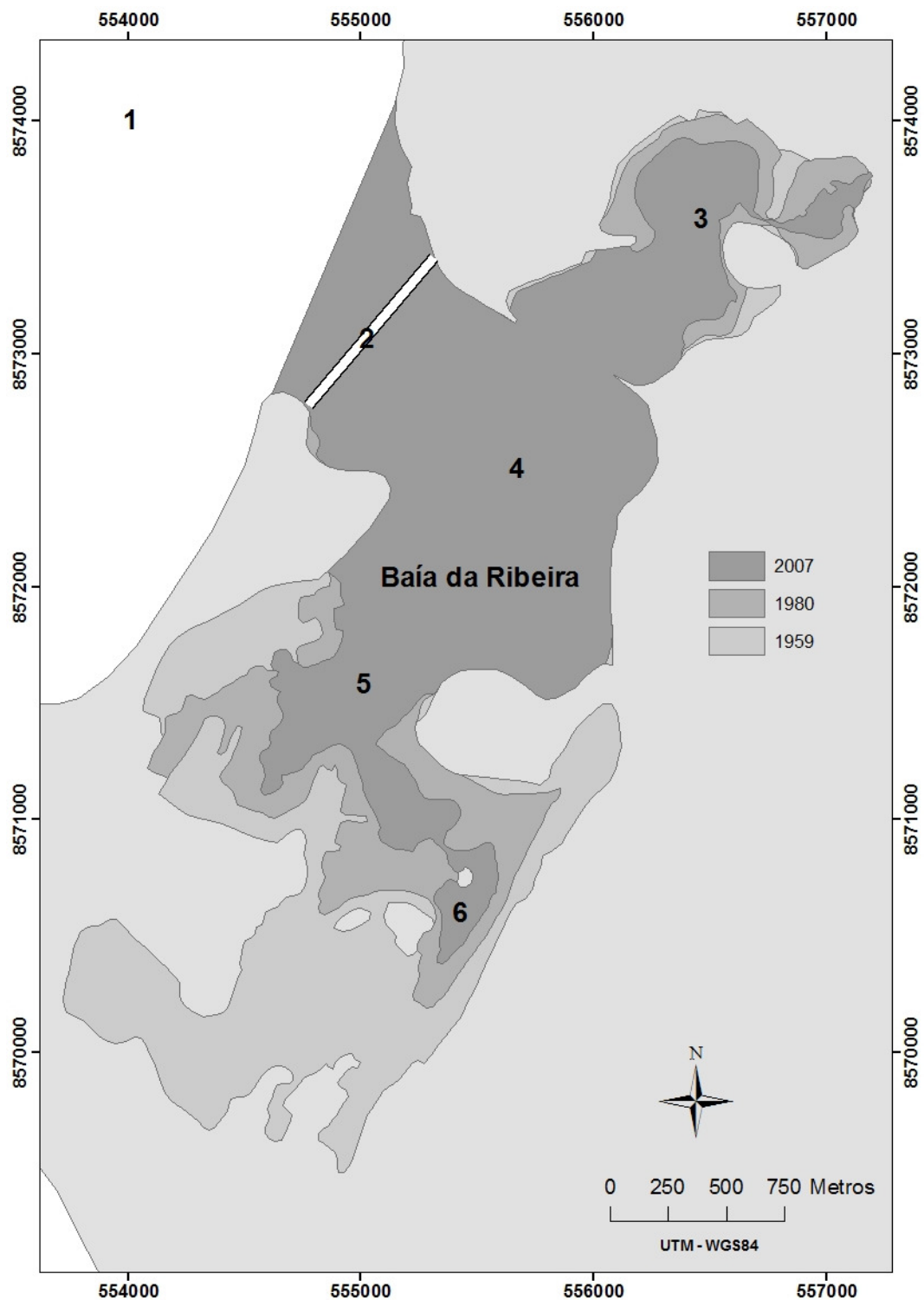


Figura 35: Posição das estações de controle (pontos numerados) utilizados para a comparação entre características hidrodinâmicas dos diferentes cenários simulados. O perfil transversal localizado na boca da baía indica a transversal do canal onde foram extraídos os dados de vazão para a comparação entre os diferentes cenários.

5.3.1 MARÉS

A Figura 36 mostra as séries de marés calculadas pelo modelo hidrodinâmico para os diferentes cenários na estação de controle mais interna na Baía da Ribeira (estação 6, Figura 35). Os dados mostram que o sinal de maré não sofreu mudança significativa em maré de quadratura. Em maré de sizígia é possível verificar, que o cenário de 2007 apresenta uma pequena diferença de fase de 0,5 h e uma diferença de elevação de 5 cm na baixa-mar, não ocorrendo diferenças notáveis na preamar. A diferença observada no cenário de 2007 é fruto da restrição do fluxo causada pelo estreito canal de acesso a região onde se localiza a estação de nº 6 (Figura 35). Essa restrição impede que a maré acompanhe o mesmo sinal ocorrido nos outros cenários. Essa hipótese pode ser comprovada pelo fato da estação de nº 5 (que se encontra numa região sem muita restrição ao fluxo), em 2007, apresentar o mesmo sinal observado na estação de nº 6 nos demais cenários (Figura 36). Isso também indica a uniformidade do sinal de maré ao longo da baía, que não mostra variação significativa, independente da posição espacial ou dos cenários morfológicos, exceto no caso de 2007 mostrado acima.

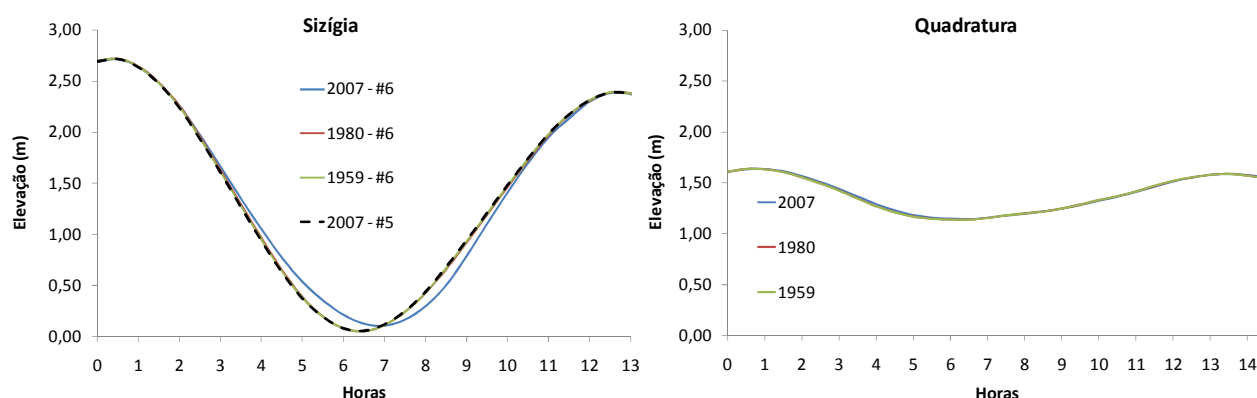


Figura 36: Séries de maré computadas pelo modelo hidrodinâmico na estação 6 para os diferentes cenários observados.

Apesar de não haver uma variação muito significativa na propagação da onda de maré na Baía da Ribeira, a redução do espelho d'água ocasionou mudanças significativas no prisma de maré. A Tabela 4 mostra a média dos prismas de maré, calculados a partir da integração das vazões de enchente e vazante, em dois ciclos consecutivos de maré de sizígia e quadratura. Os dados mostram que não há diferenças significativas entre os prismas de vazante e enchente em ambos os cenários. No entanto, houve uma redução

de cerca de 45% do prisma original de 1959 para o cenário atual de 2007. Como não houve alteração na altura de maré dentro da baía independente do cenário, este resultado corresponde proporcionalmente à redução da área da baía ocorrida entre 1959 e 2007.

Tabela 4: Prismas de maré (10^6 m^3) para os diferentes cenários processados pelo modelo hidrodinâmico.

Cenários	2007	1980	1959
Quadratura			
Enchente	1,14	1,41	2,06
Vazante	1,14	1,42	2,06
Sizígia			
Enchente	6,63	8,15	11,99
Vazante	6,67	8,35	11,97

5.3.2 CORRENTES E VAZÕES PARA SIMULAÇÕES SEM VENTOS

As seções transversais do canal na boca da Baía da Ribeira para os diferentes cenários diferentes cenários estão expostas na Figura 37. Observa-se que houve um aprofundamento na margem esquerda e um assoreamento na margem direita entre 1959 e 2007.

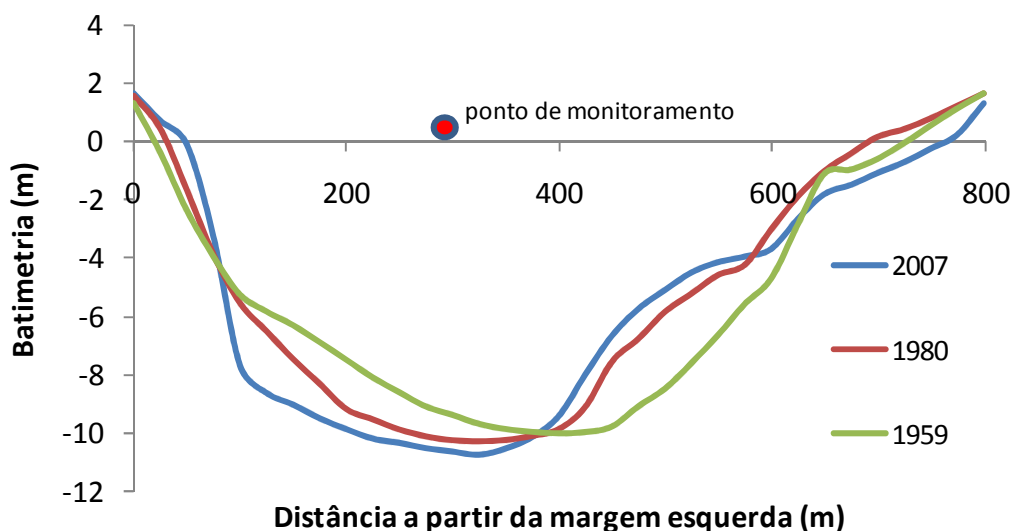


Figura 37: Perfis transversais na boca da Baía da Ribeira (Figura 35). A posição da estação de controle nº 2, está indicada pelo ponto em vermelho.

Na Figura 38 estão plotadas as magnitudes máximas das correntes de enchente e vazante para cada ciclo de maré simulado. Observa-se que entre 1959 e 2007 ocorreu

uma redução, da ordem de 45%, na magnitude das velocidades máximas de corrente (Figura 38). Em geral os resultados mostram um domínio das velocidades de corrente de vazante em sizígia em todos os cenários. No entanto, em 2007 a assimetria das correntes é menos expressiva. Em maré de quadratura, e principalmente no período de transição de quadratura para sizígia, ocorre um domínio maior das velocidades das correntes de enchente, como pode ser verificado na Figura 38. Um aspecto interessante é que a diferença entre as magnitudes das correntes de 2007 e 1980 é grande quando comparada com a diferença entre 1980 e 1959. De acordo com as alterações morfológicas ocorridas na Baía da Ribeira, as magnitudes de corrente em 1980 deveriam estar mais próximas das de 2007, já que a proporção da redução das dimensões da baía nesse período não foi tão grande, como já foi visto na Tabela 3.

As vazões máximas calculadas pelo modelo para os diferentes cenários estão expostas na Figura 39. Os resultados mostram um domínio dos fluxos de vazante em sizígia para todos os cenários. Observa-se também uma redução da ordem de 45% nas descargas máximas entre os cenários de 1959 e 2007, acompanhando a redução relativa do prisma de maré. Os dados de vazões indicam que a maior diferença entre as velocidades das correntes máximas de 1980 para 2007 (observada na Figura 38) pode ser resultado de uma variação pontual em função da batimetria no local de amostragem. Isso porque, ao se observar as vazões máximas, os valores entre 2007 e 1980 estão mais próximos, já que o dado de vazão tem uma natureza mais integrada, estando muito mais relacionado com o prisma de maré, que por sua vez está diretamente ligado aos diferentes volumes da baía.

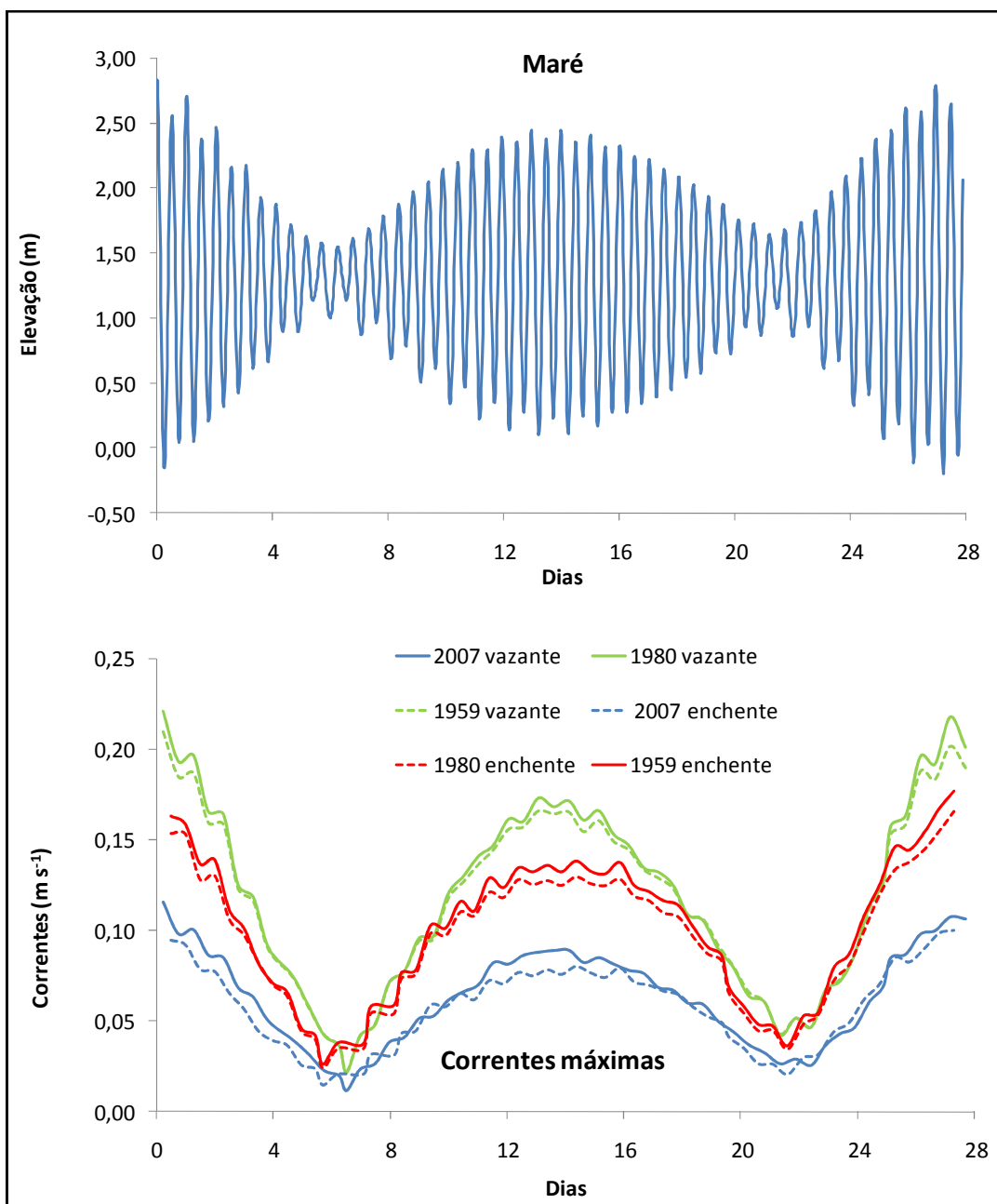


Figura 38: Velocidades de corrente máximas a cada 6h para cada período de maré enchente ou vazante, extraídas na boca da Baía da Ribeira (estação n^o 2, Figura 35). A magnitude das velocidades de corrente corresponde à direção preferencial do fluxo no ponto monitoramento.

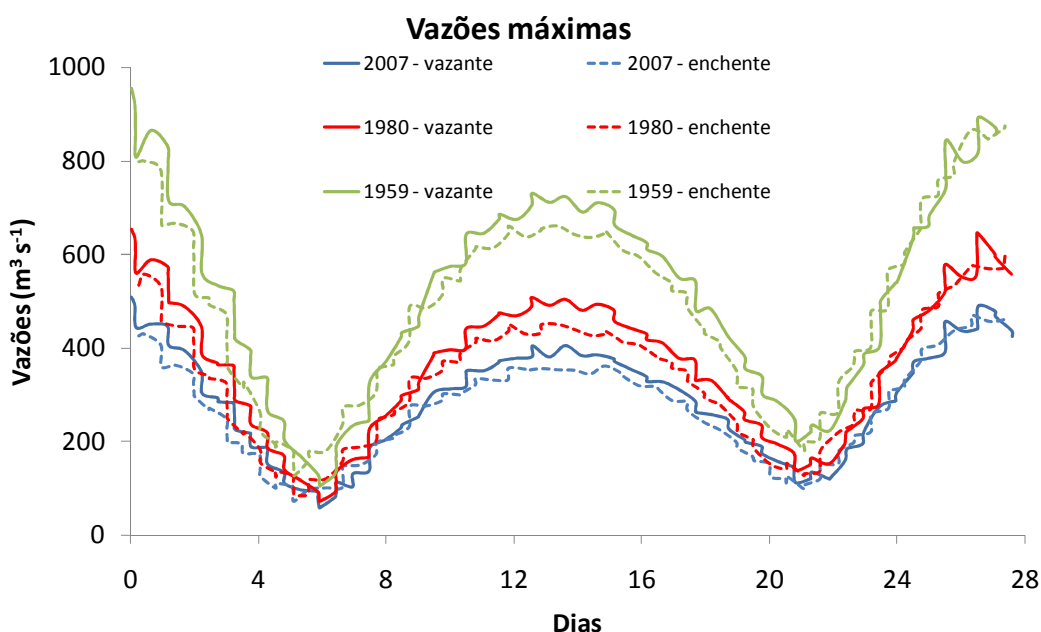


Figura 39: Série de maré e vazões simuladas, extraídas na seção de monitoramento na saída da baía (Figura 35). Verifica-se uma redução na magnitude das descargas partindo dos cenários pretéritos para o mais recente.

Com o intuito de se avaliar o efeito das alterações morfológicas sobre a circulação residual, foram calculadas as correntes residuais eulerianas, obtidas a partir das médias das velocidades de corrente em dois ciclos consecutivos de maré (Figura 40 e Figura 41). A utilização de dois ciclos consecutivos tem como objetivo filtrar a desigualdade diurna que ocorre no sinal de maré da região.

Em maré de sizígia o cenário de 2007 apresentou um padrão de circulação com águas fluindo para o exterior da baía nas regiões mais internas, também apresentando duas células de circulação com giro horário e anti-horário na porção sul e norte e do centro da Baía da Ribeira. Na saída da baía observa-se uma outra célula de circulação, que provoca uma tendência de entrada de água pela margem norte e saída pela margem sul (Figura 40). Em geral magnitude das correntes residuais em 2007 foi menor que $0,02 \text{ m s}^{-1}$, com velocidades mais intensas na boca da baía na ordem de $0,04 \text{ m s}^{-1}$. Em maré de quadratura as correntes foram ainda menores (praticamente nulas), mas com padrão de circulação semelhante ao de maré de sizígia (Figura 41).

O cenário de 1980 apresentou correntes residuais com magnitudes um pouco maiores que no cenário de 2007 em maré de sizígia, principalmente na região da boca da baía. Também observou-se uma tendência de fluxo de vazante ao longo das regiões internas da baía (Figura 40). É possível observar uma célula de circulação com giro no

sentido horário na porção central da baía e uma tendência de entrada de água pela margem norte da boca da baía enquanto ocorre uma tendência de saída de água pela margem sul, semelhante ao cenário de 2007 (Figura 40). Novamente verifica-se um padrão de circulação semelhante em quadratura com diferenças pouco expressivas em relação ao período de sizígia (Figura 41).

No cenário de 1959 as velocidades de correntes residuais apresentaram magnitudes mais intensas que nos cenários de 1980 e 2007 (Figura 40). Novamente verifica-se o domínio de um fluxo de água em direção ao exterior da Baía da Ribeira nas regiões mais internas (Figura 40 e Figura 41). Também é possível observar duas células de circulação com giro horário e anti-horário na porção sul e norte e do centro da Baía da Ribeira respectivamente tanto em sizígia quanto em quadratura. Em geral observa-se que em quadratura a magnitude das correntes foi bastante fraca em todos os cenários modelados com padrão de circulação semelhante ao de maré de sizígia.

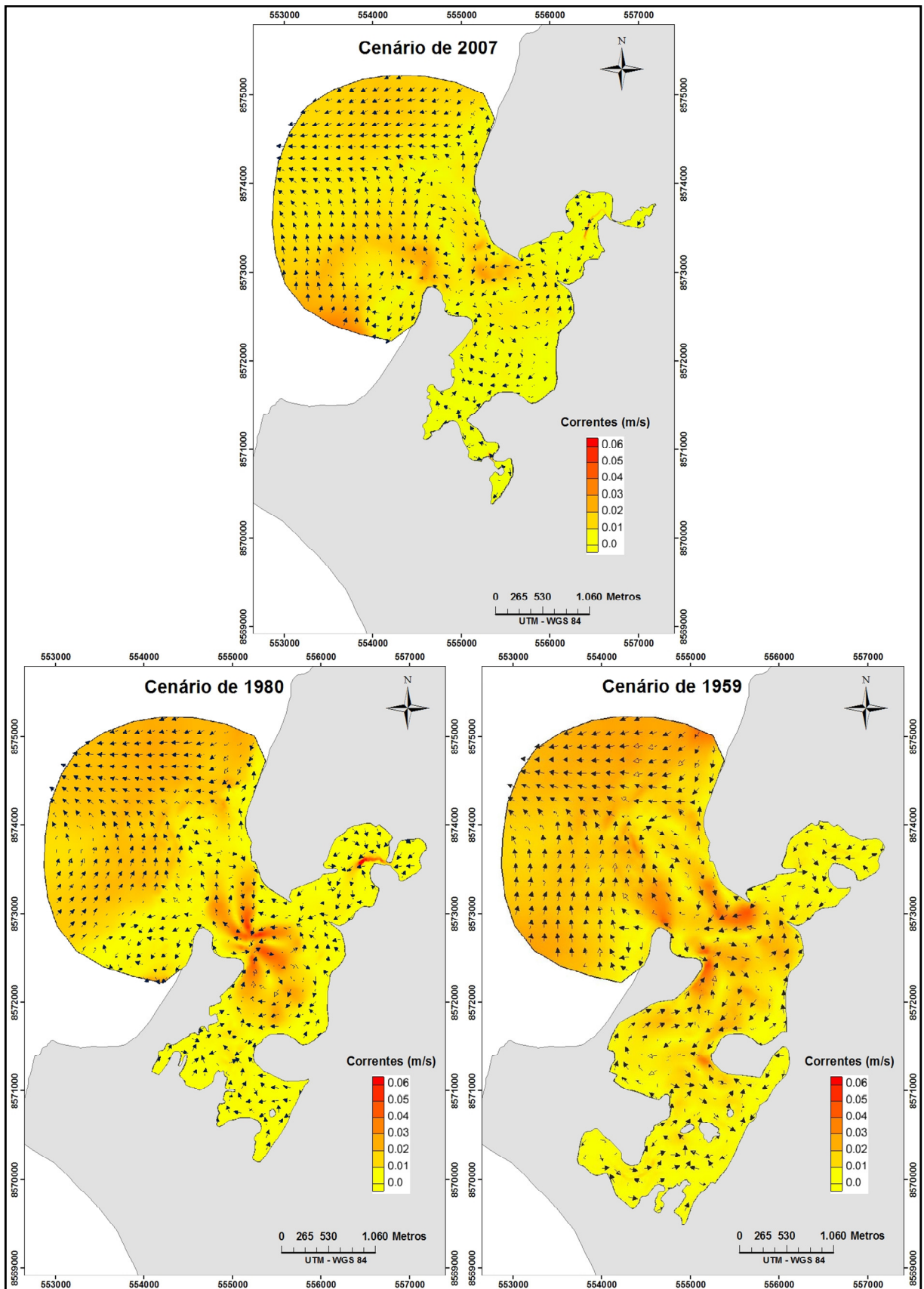


Figura 40: Velocidades das correntes residuais eulerianas (média de 2 ciclos consecutivos de maré de sizígia).

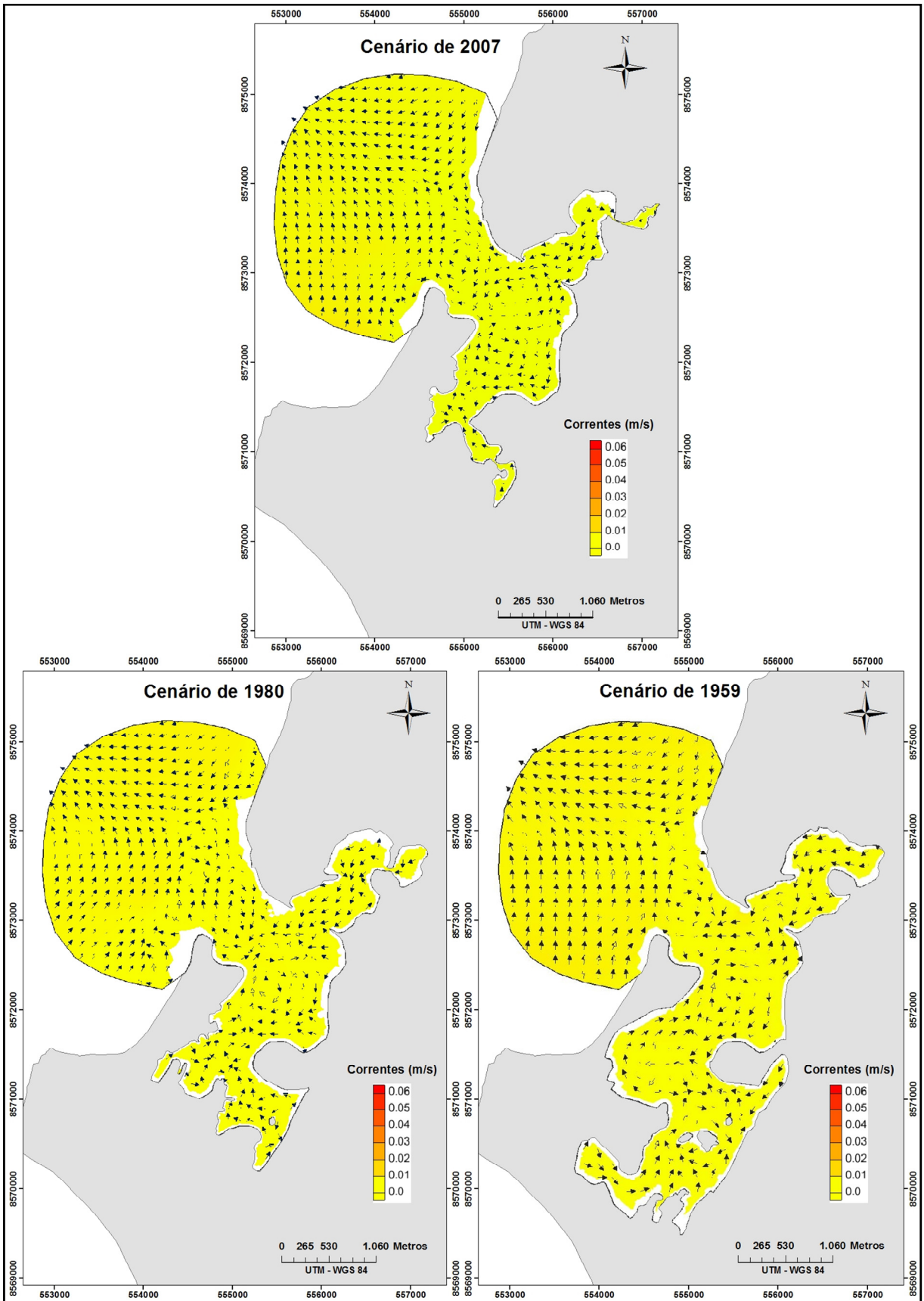


Figura 41: Velocidades das correntes residuais eulerianas (média de 2 ciclos consecutivos de maré de quadratura).

5.3.4 CORRENTES EM 2007 SOB EFEITO DE VENTOS

As simulações para os cenários de 2007 aplicando-se campos de ventos típicos de inverno e verão foram realizadas para os mesmos 28 dias onde foram realizadas as simulações sem vento.

Na Figura 42 estão plotadas os valores máximos das velocidades das correntes de enchente e vazante para cada ciclo de maré. É possível verificar que o efeito dos ventos foi significativo no cenário de 2007, onde as velocidades das correntes máximas de vazante aumentaram 20%, em média, devido aos ventos de verão (Figura 42). Por outro lado, os ventos de inverno causaram uma redução da ordem de 20% nas velocidades das correntes de vazante e um aumento pouco expressivo nas velocidades das correntes máximas de enchente para o cenário de 2007 (Figura 42).

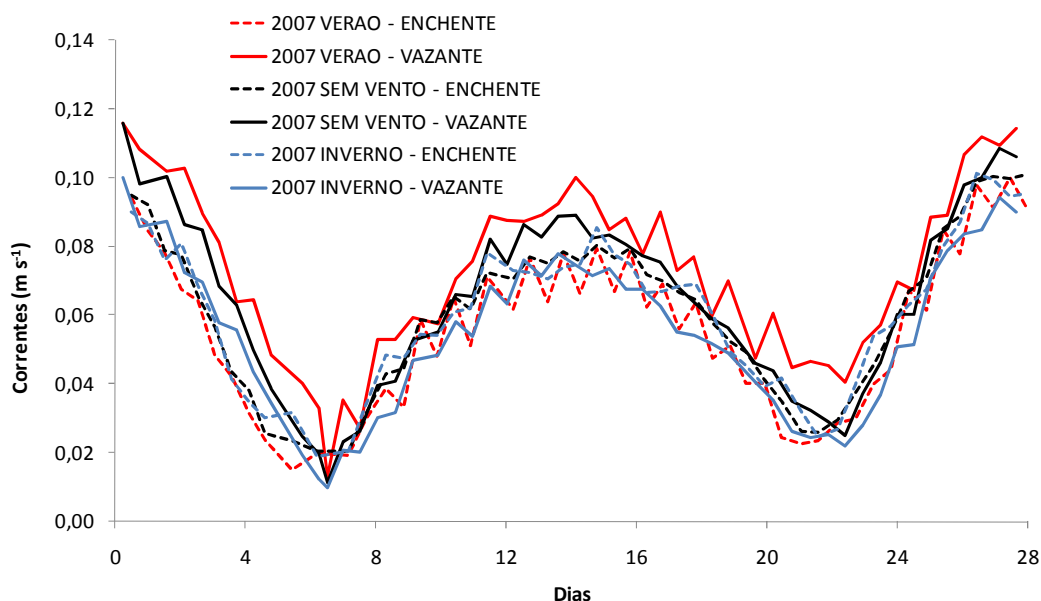


Figura 42: Magnitude das correntes máximas (em intervalos de 6h) para cada período de maré enchente ou vazante. Cada gráfico indica o efeito das diferentes condições de ventos (verão, inverno e sem ventos) sobre as velocidades de correntes máximas de enchente e vazante no cenário de 2007. As séries referem-se à componente das velocidades na direção principal do fluxo na saída da Baía da Ribeira.

Na Figura 43 estão apresentados os mapas das correntes residuais eulerianas – em dois ciclos consecutivos de maré de sizígia – para as diferentes condições de ventos no cenário de 2007. Observa-se que sob todas as condições de ventos, as correntes residuais apresentaram um padrão de circulação com águas fluindo para o exterior da

baía nas regiões mais internas (Figura 43). Tanto em condições de ventos de verão como sem vento é possível verificar o mesmo padrão no campo de correntes, sendo que sob ventos de verão as velocidades das correntes são mais intensas. Já no caso dos ventos de inverno é visível o desaparecimento das duas células de circulação no centro da Baía da Ribeira, apresentando apenas uma única célula com giro no sentido anti-horário. Na saída da baía observa-se outra célula de circulação que provoca uma tendência de entrada de água pela margem norte e saída pela margem sul. Em geral houve um pequeno aumento na magnitude das correntes sendo mais expressivo na porção mais rasa da boca da baía sob ventos de inverno (Figura 43).

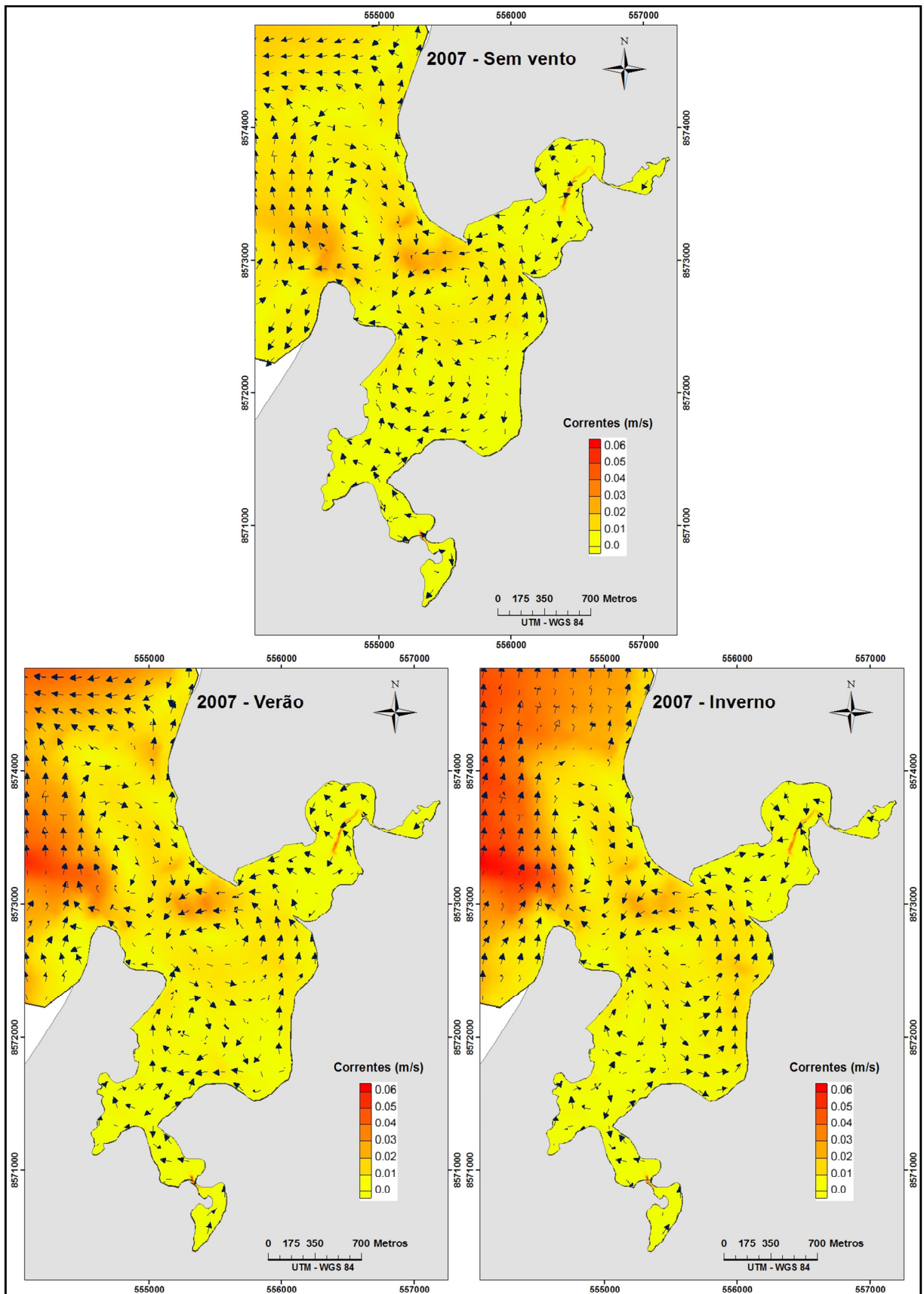


Figura 43: Velocidades de correntes residuais eulerianas (média de um dois ciclos consecutivos de maré de sizígia) para o cenário de 2007 sob diferentes condições de vento.

5.3.5 CAPACIDADE DE RENOVAÇÃO DAS ÁGUAS PARA SIMULAÇÕES SEM VENTO

A capacidade de renovação das águas da Baía da ribeira foi avaliada em uma simulação de 28 dias, utilizando-se como condição de contorno a série de maré apresentada na Figura 10.

Na Figura 44 estão plotadas as curvas de renovação das águas em diferentes pontos na Baía da Ribeira (ver estações de monitoramento na Figura 35). As oscilações apresentadas nas curvas resultam do fluxo e refluxo de água que ocorrem durante os ciclos de maré. Pode-se verificar que o ponto #6 localizado na região sul interna da baía apresenta as piores taxas de renovação em todos os cenários. É possível observar que a capacidade de renovação das águas foi melhor no cenários de 2007.

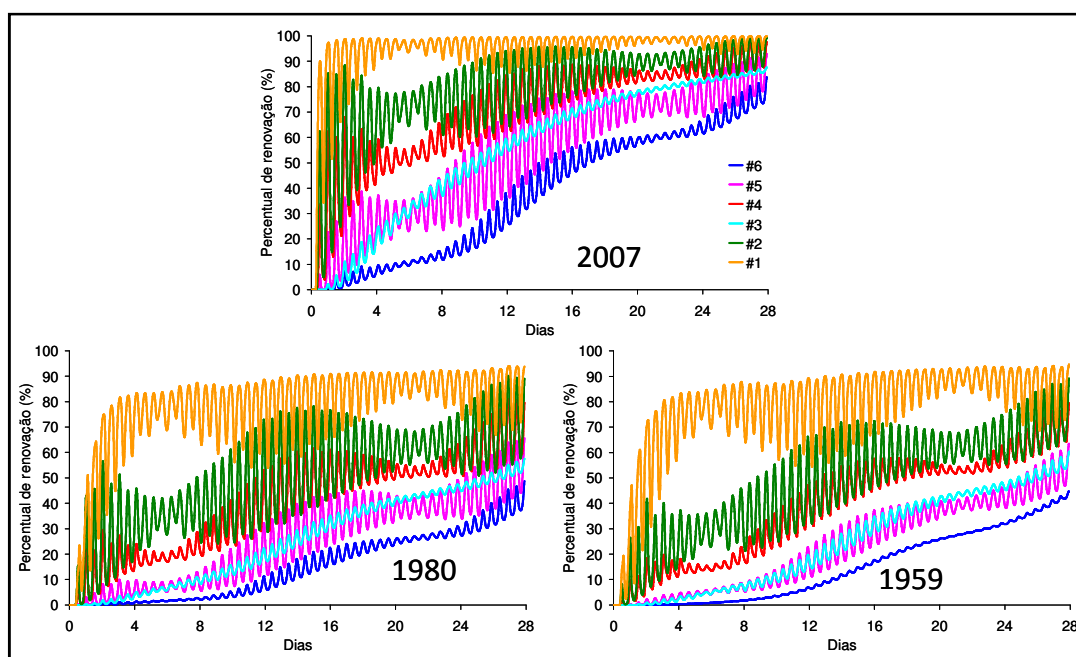


Figura 44: Curvas de renovação das águas na Baía da Ribeira, mostrando o percentual de renovação das águas da baía ao longo de 28 dias de simulação. Os diferentes pontos observados referem-se às estações de monitoramento indicadas anteriormente na Figura 35.

Os resultados das simulações mostram que as águas da Baía da Ribeira não se renovam completamente em 28 dias em todos cenários simulados (Figura 44). Desta forma, os tempos de renovação a 100% foram calculados utilizando uma projeção logarítmica com base nas curvas de renovação calculadas anteriormente. A Figura 45 mostra o tempo de renovação (em dias) das águas da Baía da Ribeira para 100% de

renovação. Os resultados indicam de maneira geral que a Baía apresentou uma melhor capacidade de renovação no ano de 2007, enquanto que a pior situação foi no ano de 1959.

No entanto, no curto prazo, a capacidade de renovação dos cenários de 1980 e 1959 são aproximadamente equivalentes. Isso pode ser comprovado pelos resultados apresentados na Figura 46, onde estão indicados, os tempos de renovação (em dias) para atingir 63% de renovação (equivalente ao *e-tempo de descarga local* visto na metodologia).

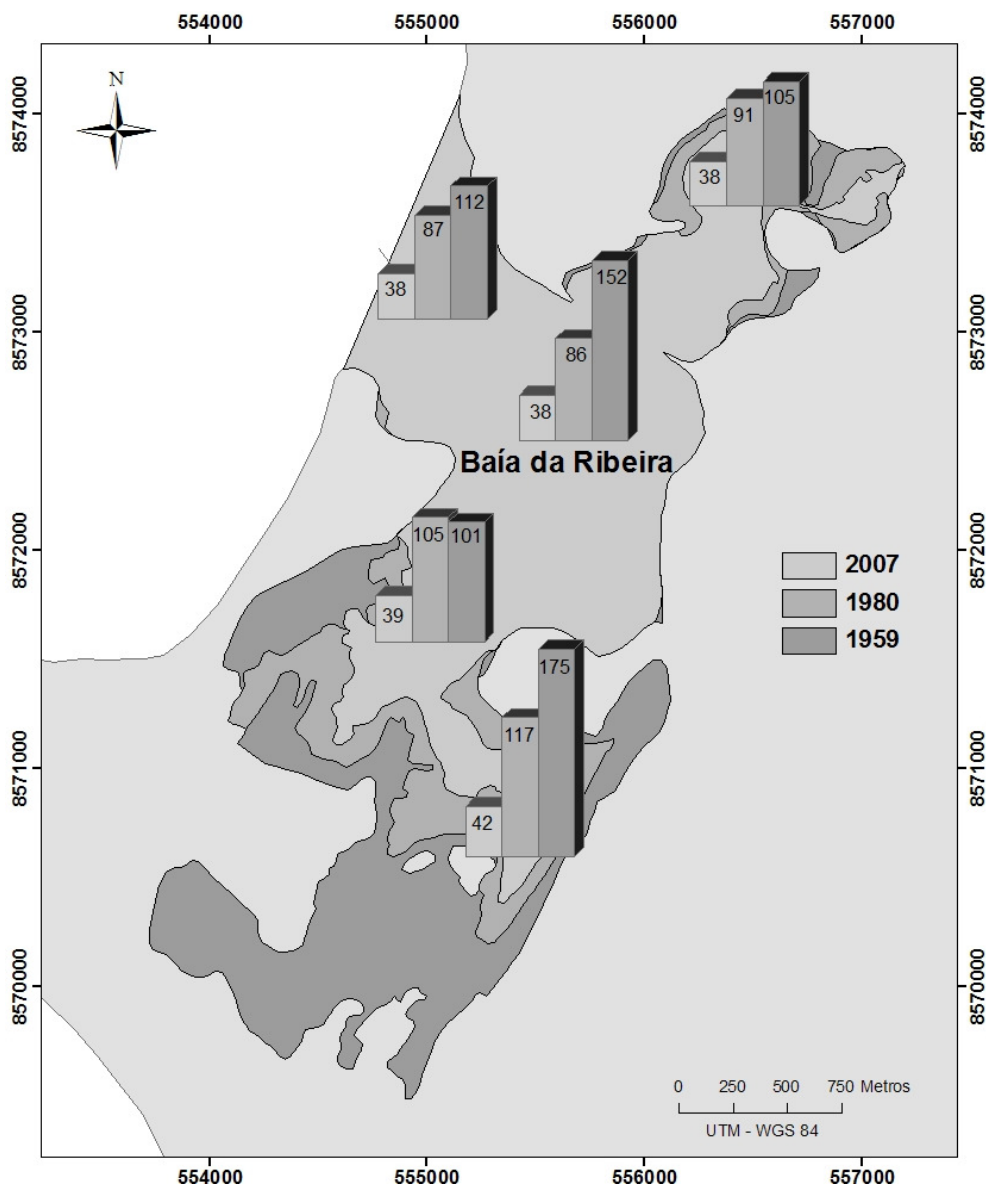


Figura 45: Tempo de renovação em dias, para 100% de renovação das águas na Baía da Ribeira.

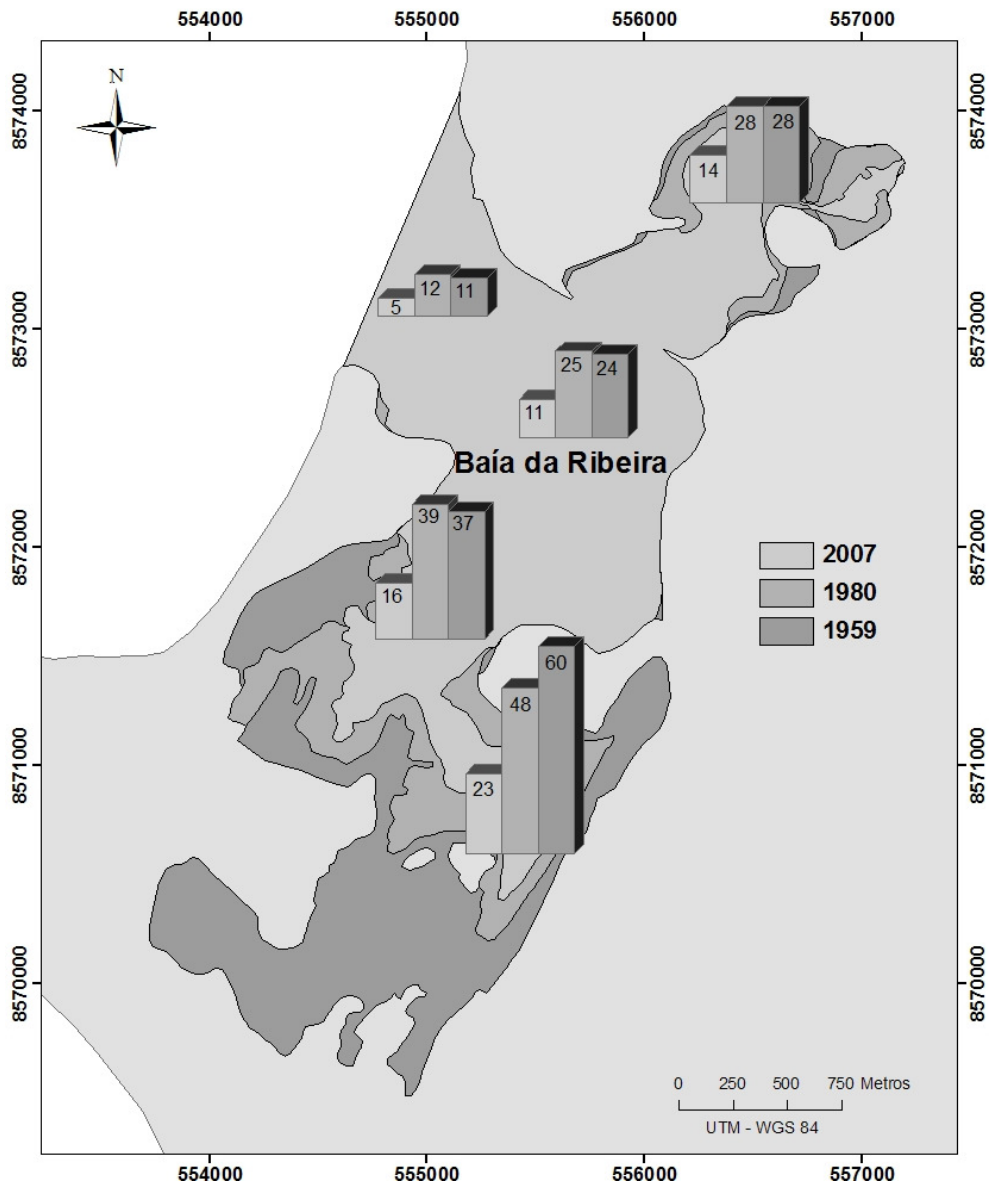


Figura 46: Tempos de renovação em dias, para 63% de renovação das águas na Baía da Ribeira.

5.3.6 CAPACIDADE DE RENOVAÇÃO DAS ÁGUAS PARA SIMULAÇÕES COM VENTO

As curvas de renovação das águas da Baía da Ribeira para o cenário de 2007, sob condições típicas de ventos de verão e inverno, estão plotadas na Figura 47. Os resultados mostram que o tempo de renovação das águas sofre uma pequena diminuição com a presença dos ventos, tanto de inverno quanto de verão (Figura 47).

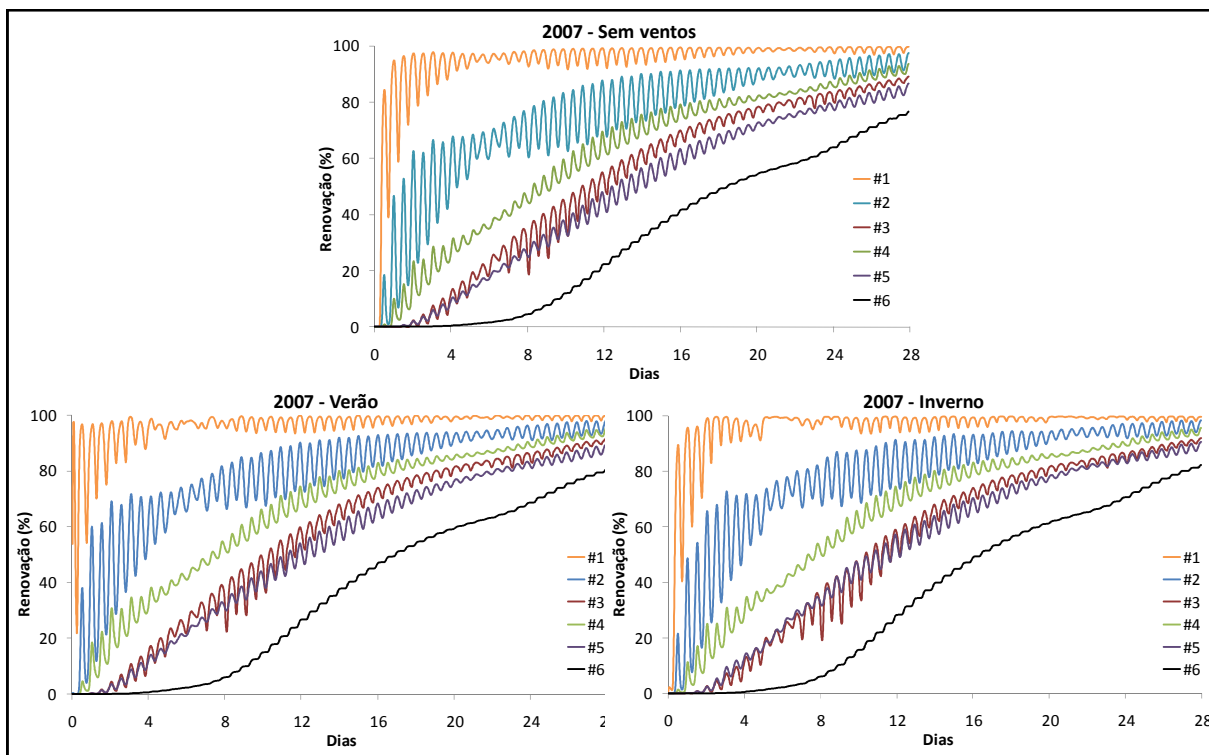


Figura 47: Curvas de renovação das águas na Baía da Ribeira, mostrando o percentual de renovação das águas da baía, ao longo de 28 dias de simulação, para as diferentes condições de ventos. Os diferentes pontos observados referem-se às estações de monitoramento indicadas anteriormente na Figura 35.

Estão indicados na Figura 48 e Figura 49 os tempos de renovação das águas da Baía da ribeira sob diferentes condições de ventos para o cenário de 2007. Os resultados indicam, de maneira geral, que a ação dos ventos melhora em poucos dias a capacidade de renovação das águas da baía. A diferença entre os tempos de renovação em condições de inverno e verão também é bastante pequena, sendo que, sob efeito dos ventos de inverno, o tempo de renovação foi em geral mais curto.

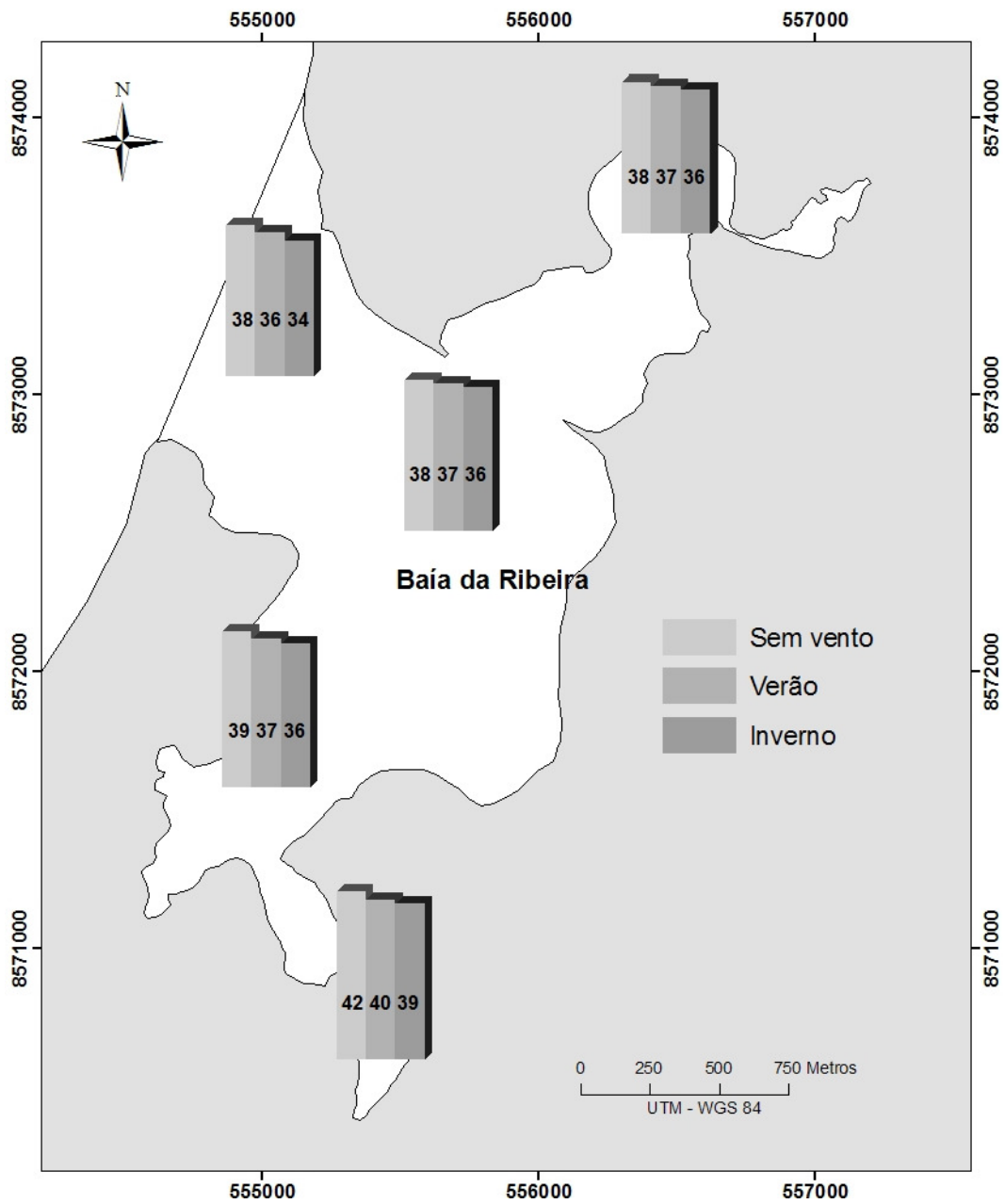


Figura 48: Tempo de renovação em dias, para 100% de renovação das águas na Baía da Ribeira, sob efeito de ventos de verão e inverno.

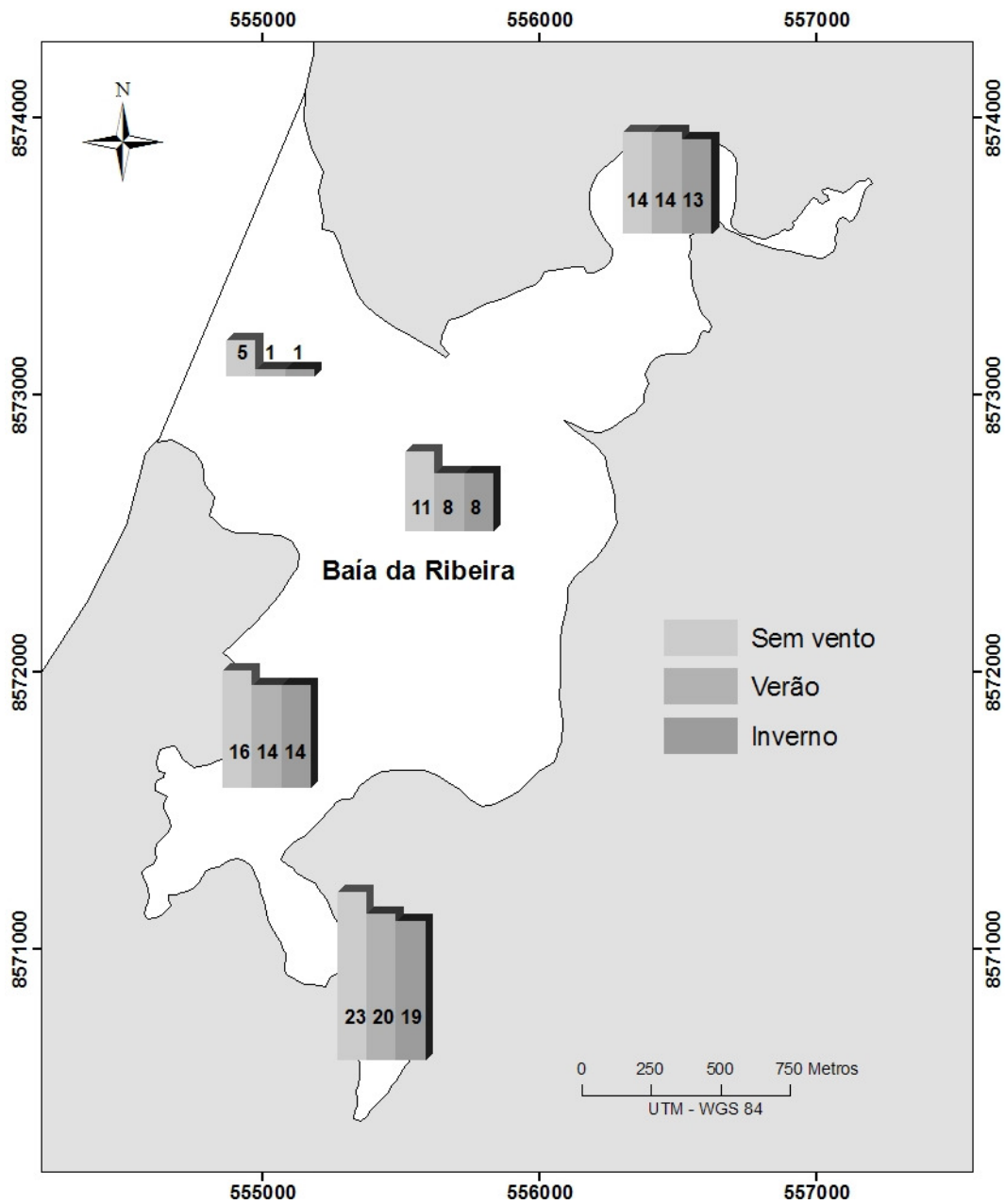


Figura 49: Tempo de renovação em dias, para 63% de renovação das águas na Baía da Ribeira, sob efeito de ventos de verão e inverno.

6 DISCUSSÃO

A ocupação humana na Baía da Ribeira causou uma redução de 43% da área do espelho d'água da baía entre 1959 e 2007, e de forma mais extensa na região dos Tainheiros. Similar à redução de área, o volume da baía também foi reduzido em 44%. Por serem mais favoráveis à ocupação humana, as áreas de estirâncio foram as que mais se perderam ao longo do processo de urbanização da orla da baía. Os resultados mostram que o período entre 1959 e 1980 foi quando ocorreram as alterações mais expressivas na linha de costa da baía. O volume da baía nesse período foi reduzido em 41%. Entre 1980 e 2007 o processo de aterramento continuou ocorrendo, porém em áreas de maior profundidade. Neste período houve uma perda maior em área do que em volume, ao contrario do que ocorreu entre 1959 e 1980. Após quase 50 anos de urbanização, a perda de área e volume relativos na Baía da Ribeira acabaram coincidentes.

A redução de 43% volume e área da Baía da Ribeira acabou se refletindo na diminuição em 45% do prisma de maré observado entre 2007 e 1959. Alguns estudos verificados na literatura também observaram essa relação direta entre a redução das dimensões morfológicas e a diminuição do prisma de maré (THOMAS et al., 2002; BERTIN et al., 2005; AMANO et al., 2006; GONG et al., 2008). Não houve, no entanto, impactos significativos na propagação do sinal de maré. Isto está associado às pequenas dimensões da baía e ao profundo canal de entrada, o que evita que a maré sofra distorções ou alterações de altura e fase. Diferente do que ocorreu na Baía da Ribeira, Gong et al. (2008) observaram impactos significativos na propagação da onda de maré devido a aterros na laguna de Xiaohai na China (área 10 vezes maior que a da Baía da Ribeira em 2007), mostrando uma redução na amplitude da maré ao longo dos últimos anos.

Em consonância com o modelo de Dronkers (1986), o estirâncio relativamente extenso da Baía da Ribeira favoreceu magnitudes de correntes de vazante em sizígia mais intensas, sendo essa assimetria menos expressiva em 2007, onde o estirâncio tem menor expressão espacial. Também foi verificado que em maré de quadratura e, principalmente no período de transição de quadratura para sizígia, ocorre um domínio maior das correntes de enchente em todos os cenários simulados, que se deve à inundação de uma menor área do estirâncio durante o ciclo de maré. Há também a possibilidade de a desigualdade diurna da maré favorecer a maior intensidade das

correntes de enchente no período de transição entre quadratura e sizígia. Isso pode ser comprovado pelo gráfico de maré da Figura 38, que mostra que as desigualdades de baixa-mar são mais intensas nesse período. O gráfico das correntes máximas (Figura 38) também mostra uma alternância entre o domínio das máximas de enchente e vazante no período de transição entre quadratura e sizígia.

A magnitude das correntes máximas na boca da baía foi reduzida em 45% entre os cenários de 1959 e 2007. Da mesma forma houve uma redução da ordem de 45% nas descargas máximas neste mesmo período. A estreita correspondência entre a redução nas dimensões da baía e a descarga observada na boca da baía, é explicada pelo fato da dimensão da área da seção transversal do canal da boca da baía não ter mudado significativamente nesse período, o que por sua vez permitiu manter inalterado o padrão do sinal de maré no seu interior. Caso não fosse mantida a proporção geométrica, poderiam ter surgido assimetrias nas correntes de maré capazes de quebrar a linearidade das alterações hidráulicas e hidrodinâmicas dos resultados entre 1959 e 2007.

O fato de a seção transversal da boca da Baía da Ribeira ter permanecido relativamente estável (área na ordem de 5000 m² em todos os cenários estudados) traz a tona uma série de questionamentos. De acordo com alguns autores, há uma tendência natural de redução da área da seção transversal do canal de maré em função de uma redução nas dimensões do corpo d'água a qual o mesmo está conectado (ESCOFFIER, 1940; KREEKE, 2004; SUPRIJO & MANO, 2006). Isso seria reflexo da redução do prisma de maré e da intensidade das correntes, e conseqüente deposição de sedimentos e assoreamento do canal. Teoricamente o que deveria ter ocorrido na Baía da Ribeira seria a manutenção das velocidades com a diminuição da área do canal da boca. Sendo assim, é possível que o canal de entrada esteja em “desequilíbrio”, ou seja, sujeito a uma possível sedimentação, já que as correntes são muito fracas no local. Por outro lado, também há evidências de que ocorreram dragagens na baía, mas que devido à falta de documentos oficiais, fica difícil saber exatamente quando foram realizadas e qual o volume dragado.

O maior prisma de maré nos cenários passados está também associado a correntes residuais mais intensas, apesar de haver uma variabilidade muito grande (sem uma correlação muito clara) no padrão de circulação em função das diferentes geometrias. A presença de vórtices nos mapas de correntes residuais, mostra a não linearidade no fluxo, derivada das acelerações e desacelerações localizadas, ocasionadas por irregularidades da morfologia de fundo (KJERFVE et al., 1992). Vórtices podem

controlar o transporte de materiais em suspensão bem como influenciar nos processos de mistura, podendo, a depender de cada caso, favorecer ou dificultar o potencial de autodepuração das águas num determinado corpo d'água (KJERFVE et al., 1992).

Os ventos também exercem influência na hidrodinâmica da Baía da Ribeira, com uma sensível alteração da magnitude das correntes na boca da baía. Observa-se que a ação dos ventos aumentou a magnitude das velocidades das corrente máximas de vazante em 20% em condições típicas de verão (E-SE). Já os ventos de inverno, com direção S-SW, causaram uma redução da ordem de 20% nas velocidades das correntes de vazante. No caso das correntes residuais, observa-se que a presença dos ventos interrompeu a formação de vórtices e causou o surgimento de novas células de circulação. A sazonalidade da circulação eólica também parece interferir no padrão de circulação residual, com ventos de verão favorecendo correntes residuais de vazante enquanto que os ventos de inverno favorecem correntes residuais de enchente na boca da baía.

No trabalho desenvolvido com modelo hidrodinâmico SisBAHIA as magnitudes das velocidades das correntes na boca da Baía da Ribeira foram inferiores a 25 cm s^{-1} chegando a valores próximos de zero nas áreas mais internas da baía (XAVIER, 2002). Estes valores não diferem muito dos resultados encontrados no presente trabalho, onde a magnitude das velocidades das corrente máximas observadas foi da ordem de 22 cm s^{-1} na boca da baía. O padrão de circulação residual euleriano, obtido por Xavier (2002), também foi semelhante ao padrão calculado no presente trabalho, com correntes em direção ao exterior da baía nas regiões mais internas e apresentando duas células de circulação com giro horário e anti-horário na porção sul e norte e do centro da Baía da Ribeira respectivamente. Ao que tudo indica, esses giros parecem estar mais associados ao formato da linha de costa do que à morfologia de fundo. Isso porque a escala do modelo aplicado por Xavier (2002) – dimensionado para englobar toda à Baía de Todos os Santos – não engloba o detalhamento batimétrico coberto pelo modelo do presente trabalho. No entanto a linha de costa em ambos os modelos tem formato relativamente semelhante apesar das diferenças de escala. Nas simulações incorporando o campo eólico, os resultados de Xavier (2002) também demonstram influência significativa dos ventos na hidrodinâmica, principalmente em regiões de baixa profundidade. De forma similar aos resultados do presente trabalho, Xavier (2002) observou que os ventos podem afetar a magnitude das velocidades de correntes instantâneas, bem como o padrão de circulação residual euleriano. No entanto fica difícil traçar maiores comparações já que há

uma diferença de escala significativa entre o modelo hidrodinâmico de Xavier (2002) e o do presente trabalho, bem como diferenças significativas nos campos de ventos e ciclos de maré simulados.

A capacidade de renovação das águas em um determinado corpo aquático depende diretamente do campo de correntes, que resulta das oscilações das forçantes do fluxo (marés e ventos no caso do estudo em questão) e da morfologia do corpo d'água. Sendo assim, fica claro que alterações na morfologia original da Baía da Ribeira alteraram o campo de correntes e, conseqüentemente, podem alterar a capacidade de renovação das suas águas.

O tempo de renovação das águas da Ribeira para o cenário atual – calculado pelo modelo hidrodinâmico SisBAHIA, através da simulação de transporte lagrangeano – é da ordem de 30 dias numa simulação considerando apenas a forçante da maré (Xavier, 2002). Já numa simulação com dados de maré e ventos reais, em período de verão, o tempo de residência foi da ordem de 2 a 3 dias (Xavier, 2002). Os resultados obtidos no presente trabalho mostram que o tempo de renovação das águas da Baía da Ribeira (no cenário de 2007) foi da ordem de 40 dias em condições de vento nulo. Sob efeito de ventos o tempo de renovação sofre uma pequena redução, mas não tão significativa quanto a que ocorreu no trabalho de Xavier (2002). É bem provável que a diferença dos resultados entre os dois trabalhos seja fruto dos diferentes métodos de cálculo utilizados. Xavier (2002) utilizou o método de simulação de deriva de partículas para simular o Tempo de Residência clássico (TAKEOKA, 1984), enquanto o presente trabalho se baseou num modelo de decaimento de um traçador para avaliar o tempo de renovação ou Tempo de Descarga Local (ABDELRHMAN, 2002; ABDELRHMAN, 2005; JOUON et al., 2006). Outro aspecto pertinente é o fato de que Xavier (2002) considerou como limite do modelo a saída do canal principal da BTS, diferentemente do que foi utilizado no presente trabalho, cujo limite do domínio do modelo se restringe a região adjacente a boca da Baía da Ribeira. Desta forma, caso o tempo de renovação sob efeito de ventos apresentado por Xavier (2002) fosse recalculado considerando a saída da Baía da Ribeira como limite, é bem provável que seu valor fosse inferior a 1 dia. No entanto, essa interpretação está condicionada à resolução do modelo utilizado por Xavier (2002). É bastante provável que se o método aplicado por Xavier (2002), utilizasse a mesma resolução espacial e o mesmo domínio modelado do presente trabalho, chegar-se ia a resultados menos discrepantes.

Os resultados das simulações mostram que a capacidade de renovação das águas da Baía da Ribeira foi bastante afetada em função das alterações morfológicas ocorridas ao longo dos anos. Entre 1959 e 2007 a capacidade de renovação sofreu significativa melhora. De acordo com a lógica mostrada por alguns autores a redução do volume de um corpo d'água, com conseqüente redução do prisma de maré, dificulta o processo de renovação das águas (OLIVEIRA et al., 2006; GONG et al., 2008). No entanto, quando há uma redução muito grande no volume – como é o caso da Baía da Ribeira entre 1959 e 2007 – a quantidade de água a ser renovada é muito menor acarretando em tempos de renovação mais curtos.

7 CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho indicam significantes impactos sobre morfologia da Baía da Ribeira resultantes da ocupação humana, que por sua vez modificaram significativamente a hidrodinâmica do local. O grau de degradação ambiental observado atualmente na Baía da Ribeira parece ser um bom reflexo do processo mal planejado de ocupação humana, que resultou na redução do seu espelho d'água e da sua capacidade de trocas d'água com BTS.

Desta forma, pode-se se dizer em síntese, que os aterros realizados na Baía da Ribeira foram responsáveis por significativas alterações na hidrodinâmica deste local. Se observarmos que o prisma de maré está diretamente relacionado com o volume do corpo d'água da baía e com a magnitude dos fluxos de água promovidos pelas correntes de maré, pode-se entender então que, a redução do volume da baía resultou em menores vazões e magnitudes de corrente entre 1959 e 2007. Os resultados mostram que as alterações morfológicas afetaram a capacidade de renovação das águas no interior da Baía da Ribeira, com uma redução no tempo de renovação de 1959 até a situação atual.

O presente exercício de modelagem foi capaz de investigar as variações na hidrodinâmica para os diferentes cenários morfológicos simulados. No entanto, a componente baroclínica da circulação e o efeito do cisalhamento eólico na camada superficial, capazes de causar estratificação do fluxo residual, não puderam ser devidamente investigados devido às limitações do modelo. É assim sugerido que esforços futuros de investigação tentem avaliar com mais detalhe a importância destas duas outras componentes da circulação.

REFERÊNCIAS

- ABDELRHMAN, M., 2002. Modeling how a hurricane barrier in New Bedford Harbor, Massachusetts, affects the hydrodynamics and residence times. *Estuaries*, pp.177-96.
- ABDELRHMAN, M., 2005. Simplified modeling of flushing and residence times in 42 embayments in New England, USA, with special attention to Greenwich Bay, Rhode Island Estuarine. *Coastal and Shelf Science*, pp.339-51.
- AMANO, A., IWAMOTO, N., INOUE, T. & INOUCHI, Y., 2006. Seafloor environmental changes resulting from nineteenth century reclamation in Mishou Bay, Bungo Channel, Southwest Japan. *Environmental Geology*, p.989–999.
- ANA Agencia Nacional de Águas, n.d. *Sistema de informações hidrológicas - Hidroweb*. [Online] Available at: <http://hidroweb.ana.gov.br> [Accessed Maio 2007].
- AUBREY, D.G.&.S.P.E., 1985. A Study of Non-Linear Tidal Propagation in Shallow Inlet/Estuarine Systems Part I: Observations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, pp.185-205.
- AUBREY, D.G., VOULGARIS, G., SPENCER, W.D. & O'MALLEY, S.P., 1997. *Tidal Circulation and Flushing Characteristics of the Nauset Marsh System*. Technical Reports. WHOI - Technical Reports - pp. 11.
- BARROS, F., 1977. Estudos dos Sedimentos Biogênicos das Enseadas dos Tainheiros e do Cabrito. *Tese de Mestrado em Geologia / Sedimentologia, Univ. Federal da Bahia*, p.94.
- BERTIN, X., CHAUMILLON, E., SOTTOLICHIO, A. & PEDREROS, R., 2005. Tidal inlet response to sediment infilling of the associated bay and possible implications of human activities: the Marennes-Oléron Bay and the Maumusson Inlet, France. *Continental Shelf Research*, p.1115–1131.
- CHAPRA, S.C., 1997. Surface Water-Quality Modeling. *McGraw-Hill. Texas, EUA*, p.884.
- CIRANO, M. & LESSA, G.C., 2008. Oceanographic characteristics of Baía de Todos os Santos, Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica (in press)*, pp.363-87.
- CONDER, 2005. *Projeto de Urbanização e Desenvolvimento Integral de Áreas Carentes no Estado da Bahia - Viver Melhor/BIRD. Relatório de Avaliação Ambiental*. pp. 26.

CRA, 2000 a. *Relatório de Diagnóstico da Qualidade das Águas da BTS - CRA (Centro de Recursos Ambientais), No RT- 257-05-MA-002, 48 pp.*

CRA, 2000 b. *Saneamento ambiental da Baía de Todos os Santos. (Centro de Recursos Ambientais). No RT-257-03-GR-002-RF, 248 pp.*

CRA, 2001. *Saneamento ambiental da Baía de Todos os Santos – Modelamento e Avaliação Ambiental. (Centro de Recursos Ambientais). Nº RT-257-05-MA-003 RF, 109 pp.*

CRA, 2002. *Avaliação da Qualidade das Águas costeiras Superficiais – Baía de Todos os Santos. Relatório Técnico / Avaliação Ambiental Salvador – Bahia, 15 pp.*

CROSSLAND, C., BAIRD, D. & DUCROTOY, J.a.L.H., 2005. The Coastal Zone – a domain of global interactions. *In: CJ Crossland, HH Kremer, HJ Lindeboom, JI Marshall Crossland and MDA Le Tissier (eds), Coastal Fluxes in the Anthropocene. Springer-Verlag, New York, p.231.*

CUCCO, A. & UMGIESSER, G., 2005. Modeling the Venice Lagoon residence time. *Ecological Modelling*, pp.34-51.

CUNHA, A.C.B., 2003. Uma Análise do Sistema Lagunar de Araruama - RJ, com Enfoque Hidrodinâmico - RJ, [Rio de Janeiro]. *XIII (COPPE/UFRJ, Msc., Engenharia Civil, 2003) Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE*, p.163.

CUNHA, A.C., 2004. Microbiologic water quality in urban and periurban rivers on low Amazon river - study of case: Amapá State. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, p.36.

DALRYMPLE, R.W., ZAITLIN, B.A. & BOYD, R., 1992. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, pp.1130-46.

DHN, 1958 e 1986. Carta Nautica 1101. Proximidades do Porto de Salvador. *Diretoria de Hidrografia e Navegação – DHN.*

DRONKERS, J., 1986. Tidal Asymmetry and Estuarine Morphology. *Netherlands Journal of Sea Research*, pp.117-31.

DYER, K.R., 1973. *Estuaries: A physical introduction*. N.Y.: John Wiley & Sons. 140 pp. p.140.

Dyer, K., 1997. *Estuaries: a physical introduction*. 2nd. Ed. New York, John Wiley & Sons, p.195.

ELLIOTT, M. & MCLUSKY, D.S., 2002. The Need for Definitions in Understanding Estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, p.815–827.

ESCOFFIER, F., 1940. The stability of tidal inlets. *Shore and Beach*, pp.114-15.

FISCHER, H., 1979. Mixing in inland and coastal waters. *Academic Press, New York*, p.483.

FORTUNATO, A.B. & OLIVEIRA, A., 2005. Influence of Intertidal Flats on Tidal Asymmetry. *Journal of Coastal Research*, pp.1062-67.

GENZ, F., 2006. Avaliação dos efeitos da barragem pedra do cavalo sobre a circulação estuarina do rio paraguaçu e baía de iguape. *Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia*, p.250.

GEYER, W.R., 1997. Influence of Wind on Dynamics and Flushing of Shallow Estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, pp.713-22.

GEYER, W.R., MORRIS, J.T., PAHL, F.G. & JAY, D.A., 2000. Interaction between physical processes and ecosystem structure: A comparative approach. *Estuarine science: A synthetic approach to research and practice*. Island Press, pp.177-206.

GONG, W., SHEN, J. & JIA, J., 2008. The impact of human activities on the flushing properties of a semi-enclosed lagoon: Xiaohai, Hainan, China. *Marine Environmental Research*, February. pp.62-66.

GOOGLE, 2007. *Google Earth*. [Online] Available at: www.earth.google.com [Accessed Maio 2007].

GRPU, 2005. Mapa de situação das linhas de preamar 03, 06 e 14. *SEDEC – Serviço de Demarcação e Cadastramento. Gerencia Regional de Patrimônio da União – GRPU – Salvador - Bahia*.

IBGE, 2000. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. [Online] Available at: http://www.ibge.gov.br/mapas_ibge/ [Accessed Maio 2008].

INMET, 2008. *Instituto Nacional de Meteorologia*. [Online] Available at: www.inmet.gov.br [Accessed 2008].

JIANG, Y., KIRKMAN, H. & HUA, A., 2001. Megacity development: managing impacts on marine environments. *Ocean & Coastal Management*, p.293–318.

JOJON, A., DOUILLET, P., OUILLO, S. & FRAUNIE, P., 2006. Calculations of hydrodynamic time parameters in a semi-opened coastal zone using a 3D hydrodynamic model. *Continental Shelf Research*, p.1395–1415.

KING, I.P., 1990. Program Documentation - RMA2 - A Two Dimensional Finite Element Model for Flow in Estuaries and Streams. *Lafayette: Resource Management Associates*, p.296.

KING, I. et al., 2005. Users Guide to RMA2 WES Version 4.5. *Valhalla: Environmental Modeling Research Laboratory*, p.296.

- KJERFVE, B., 1989. Estuarine geomorphology and physical oceanography. In Jr, J.D., Hall, C. & (Eds), W.K.a.A.A. *Estuarine Ecology*. Ed. John Wiley & Sons. pp.47-78.
- KJERFVE, B., SEIM, H.E., BLURMBERG, A.F. & WRIGHT, L.D., 1992. Modelling of the Residual Circulation in Broken Bay and the Lower Hawkesbury River, NSW. *Aust. J. Mar. Freshwater Res*, pp.39-57.
- KREEKE, J., 2004. Equilibrium and cross-sectional stability of tidal inlets: application to the Frisian Inlet before and after basin reduction. *Coastal Engineering*, p.337–350.
- LeFloch, J., 1961. Propagation de la maree dans l'estuarie de la seine et en seine-maritime. *Thèse DS, University of Paris*, p.507.
- LESSA, G. & PEREIRA, M., 2006. *Relatório sobre analise dos dados de maré da estação de Salvador – período outubro de 2004 a junho de 2006*. 6 p.
- LIU, Z., WEIA, H., LIU, G. & ZHANGD, J., 2004. Simulation of water exchange in Jiaozhou Bay by average residence time approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, pp.25-35.
- LUNG, S.-W., 1993. Water quality modeling. Vol III: Application to Estuaries. *CRC Press, Inc.USA*, p.194.
- MASSELINK, G. & HUGHES, M., 2003. *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. London: Arnold, p. 354.
- MATSURA, H. & CANNON, G.A., 1996. Wind Effects on Sub-Tidal Currents in Puget Sound. *Journal of Oceanography*, pp.53-66.
- McCUTHEON, S. & FRECH, R., 1989. Water quality modeling: transport and surface exchange in rivers. v. 1. *Series Edit. CRC Pres. Inc. Boca Raton, Florida. EUA*, p.334.
- MIRANDA, L., CASTRO, B. & KJERFVE, B., 2002. *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. São Paulo: Ed. USP. 414 p.
- MONSEN, N.E., CLOERN, J.E., LUCAS, L.V. & MONISMITH, S.G., 2002. A comment on the use of flushing time, residence time and age as transport time scales. *Limnology and Oceanography*, pp.1545-53.
- NORTON, W.R., KING, I.P. & ORLOB, G.T., 1973. A Finite Element Model for Lower Granite Reservoir. Walla: Walla Walla District. *U.S. Army Corps of Engineers*, p.621–639.
- OLIVEIRA, A. & BAPTISTA, A.M., 1997. Diagnostic modeling of residence time in estuaries. *Water Resources Research*, pp.1935-46.

- OLIVEIRA, A., FORTUNATO, A.B. & REGO, J.R.L., 2006. Effect of morphological changes on the hydrodynamics and flushing properties of the O' bidos lagoon (Portugal). *Continental Shelf Research*, pp.917-42.
- PENDON, J. et al., 1998. Evolution of estuarine facies in tidal channel environment, SW Spain: evidence for a change from tide- to wave-domination. *Marine Geology*, pp.43-62.
- PORTO, R.M., 1998. *Hidráulica Básica*. SP: São Carlos: EESC – USP. 540 p.
- PRITCHARD, D., 1952. Estuarine Hydrography. *Advances in Geophysics, Vol 1*, Academic press, New York, pp.243-80.
- PUGH, D.T., 1987. *Tides, Surges, and Mean Sea Level*. Avon (U.K.): John Wiley and Sons Ltd. 472 p.
- SANFORD, L.P., BOICOURT, W.C. & RIVES, S.R., 1992. Model for estimating tidal flushing of small embayments. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Engineering*, p.635–654.
- SANTOS, R.A.F., 1962. Chuvas na Bahia. *DNOCS/CPE*, p.170.
- SRH, 2007. *Secretaria de Recursos Hídricos do Estado da Bahia*. [Online] Available at: www.srh.ba.gov.br [Accessed Junho 2007].
- STRAM, D.L., KINCAID, C.R. & CAMPBELL, D.E., n.d. Water quality modeling in the Rio Chone estuary. *Journal of Coastal Research*, pp.797-810.
- SUPRIJO, T. & MANO, A., 2006. Maximum flow velocity in equilibrium tidal inlets. *Journal of Coastal Research* *Journal of Coastal Research, SI 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium)*. Itajaí, SC, Brazil, pp.406 - 409.
- TAKEOKA, H., 1984. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. *Continental Shelf Research*, pp.311-26.
- THOMAS, C.G., SPEARMAN, J.R. & TURNBULL, M.J., 2002. Historical change in the Mersey Estuary. *Continental Shelf Research*, p.1775–1794.
- TÖNIS, I., STAM, J. & VAN DE GRAAFF, J., 2002. Morphological changes of the Haringvliet estuary after closure in 1970. *Coastal Engineering*, pp.191-203.
- VAN DER WAL, D., PYE, K. & NEAL, A., 2002. Long-term morphological change in the Ribble estuary, Northwest England. *Marine Geology*, pp.249-66.
- VELZ, C.J., 1984. Applied Stream Sanitation. *A Wiley-Interscience Publication. Second Edition. Michigan, EUA*, p.799.
- VILAS BOAS, G.S. & NASCIMENTO, M.R.M., 1979. Evolucao Paleogeografica e Paleoclimatica da Regiao das Ens. dos Tainheiros e dos Cabritos, Ba. *REVISTA BRASILEIRA DE GEOCIENCIAS*, pp.159-68.

WANG, Z.B. et al., 2002. Morphology and asymmetry of the vertical tide in the Westerschelde estuary. *Continental Shelf Research*, pp.2599-609.

WEYLL, C.A., 1851. Mappa Topographica da Cidade de S. Salvador e Seus Suburbios. *Stuttgart: Ferd. Glocker*.

WHITEHOUSE, R.J.S. et al., 2000. The influence of bedforms on flow and sediment transport over intertidal mudflats. *Continental Shelf Research*, pp.1099-124.

WOLANSKI, E. et al., 2001. Rapid, Human-Induced Siltation of the Macro-Tidal Ord River Estuary, Western Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, pp.717-32.

XAVIER, A.G., 2002. Análise da Hidrodinâmica da Baía de Todos os Santos – BA. (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Oceânica, 2002) Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, p.222.

ZIMMERMAN, J.T.F., 1976. Mixing and flushing of tidal embayments in the Western Dutch Wadden Sea, Part I: distribution of salinity and calculation of mixing time scales. *Netherlands Journals of Sea Research*, pp.149-91.

ZIMMERMAN, J.T.F., 1988. Estuarine residence times. B. Kjerfve [ed.], *Hydrodynamics of estuaries*. V. 1. CRC Press, pp.75-84.

ANEXOS

ANEXO 1 – Análise e sensibilidade do modelo

A análise de sensibilidade do modelo foi realizada com base numa simulação de 66 horas, onde se procurou testar diferentes valores de viscosidade turbulenta, bem como diferentes valores de rugosidade de fundo, tanto nas áreas de submaré (abaixo do zero batimétrico) e intermaré (acima do zero batimétrico). As comparações foram feitas a partir dos resultados extraídos no perfil transversal e na estação pontual localizadas na saída da Baía da Ribeira (Figura 35). Os gráficos das figuras Figura 50, Figura 51, Figura 52, Figura 53, Figura 54, Figura 55, Figura 56, Figura 57, Figura 58 mostram os resultados do modelo para diferentes variações dos parâmetros de calibração (rugosidade de fundo e viscosidade turbulenta). Esses resultados indicam que não houve alterações significativas nos números calculados pelo modelo, independente dos valores de rugosidade e viscosidade turbulenta. Isso mostra que a hidrodinâmica computada pelo modelo está muito mais sensível às variações da geometria do corpo d'água do que à variação dos parâmetros de calibração.

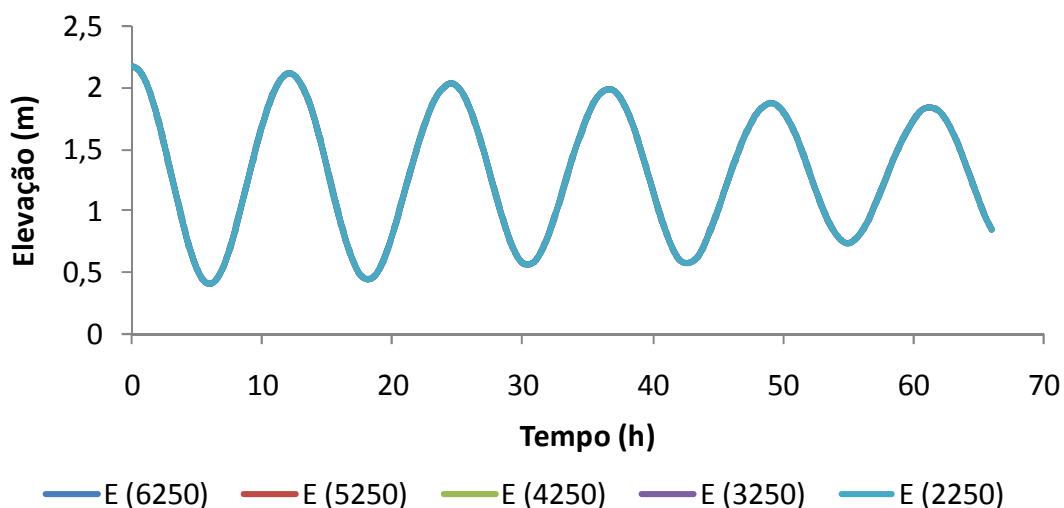


Figura 50: Sinal da maré para diferentes valores de viscosidade turbulenta E (Pa s^{-1}).

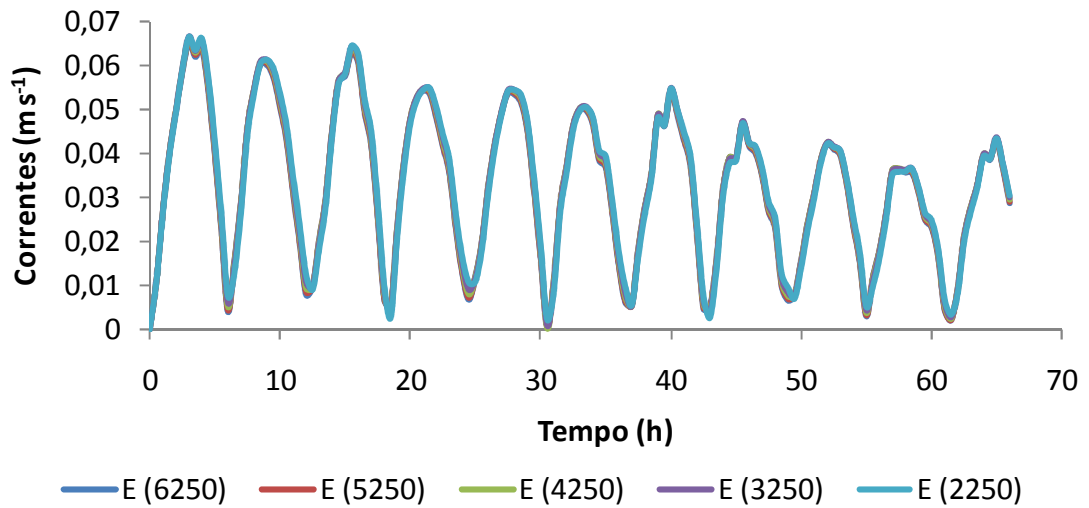


Figura 51: Magnitude das correntes para diferentes valores de viscosidade turbulenta E (Pa s⁻¹).

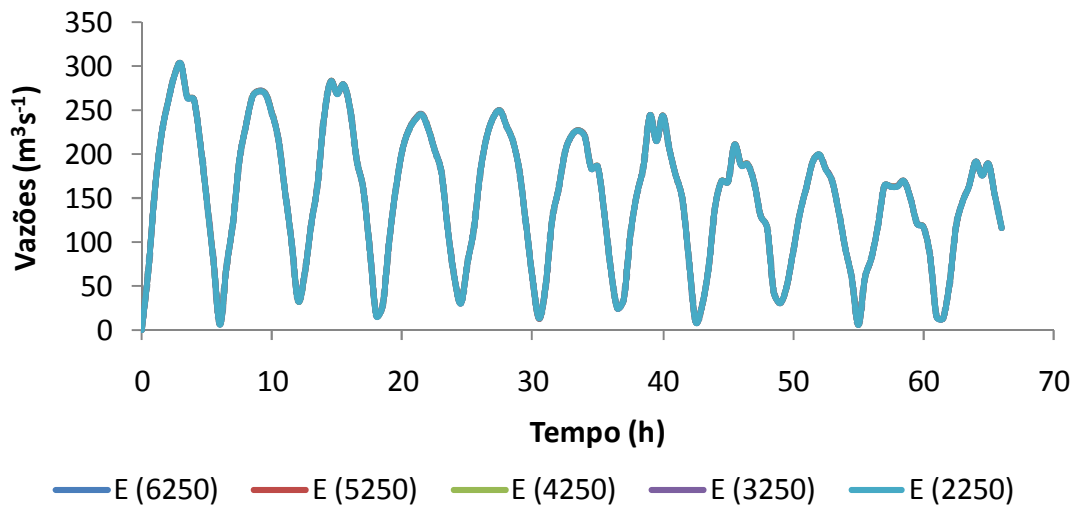


Figura 52: Magnitude das vazões para diferentes valores de viscosidade turbulenta E (Pa s⁻¹).

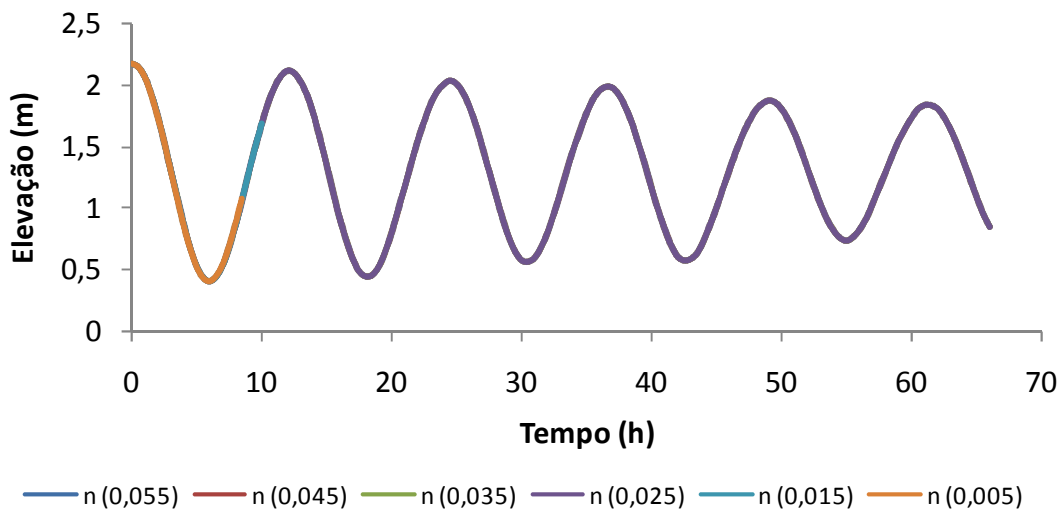


Figura 53: Sinal da maré para diferentes valores de rugosidade de Manning (n) das áreas de submaré.¹

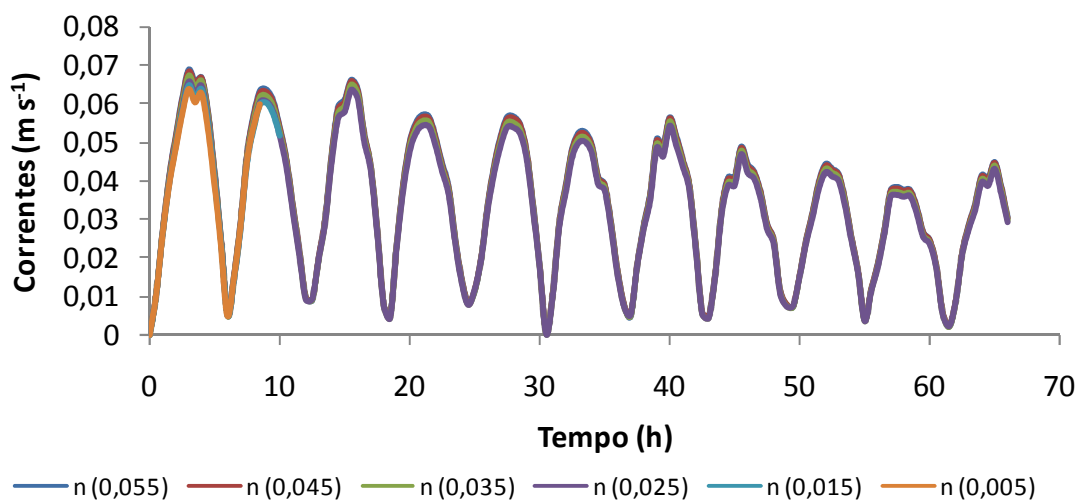


Figura 54: Magnitude das correntes para diferentes valores de rugosidade de Manning (n) das áreas de submaré.

¹ As séries que estão aparecendo truncadas (no caso de Manning igual a 0,015 e 0,005) indicam que o modelo tornou-se instável e não pôde rodar completamente a simulação.

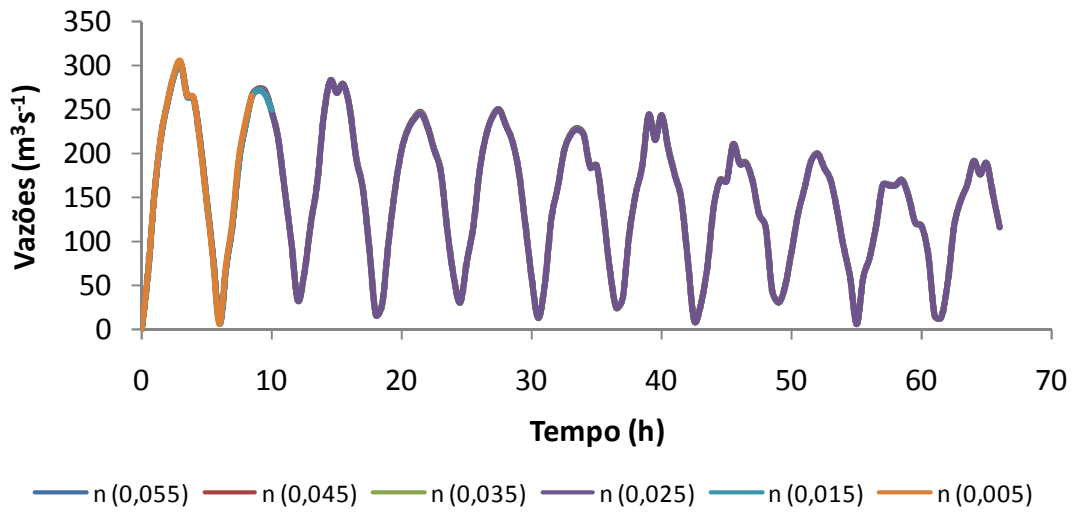


Figura 55: Magnitude das correntes para diferentes valores de rugosidade de Manning (n) das áreas de submaré.

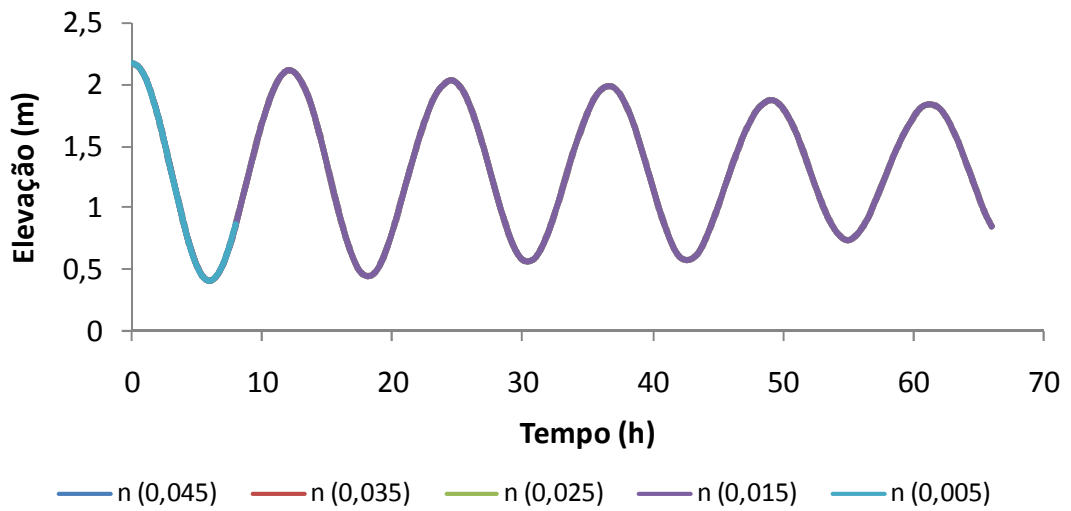


Figura 56: Sinal da maré para diferentes valores de rugosidade de Manning (n) das áreas de intermaré.

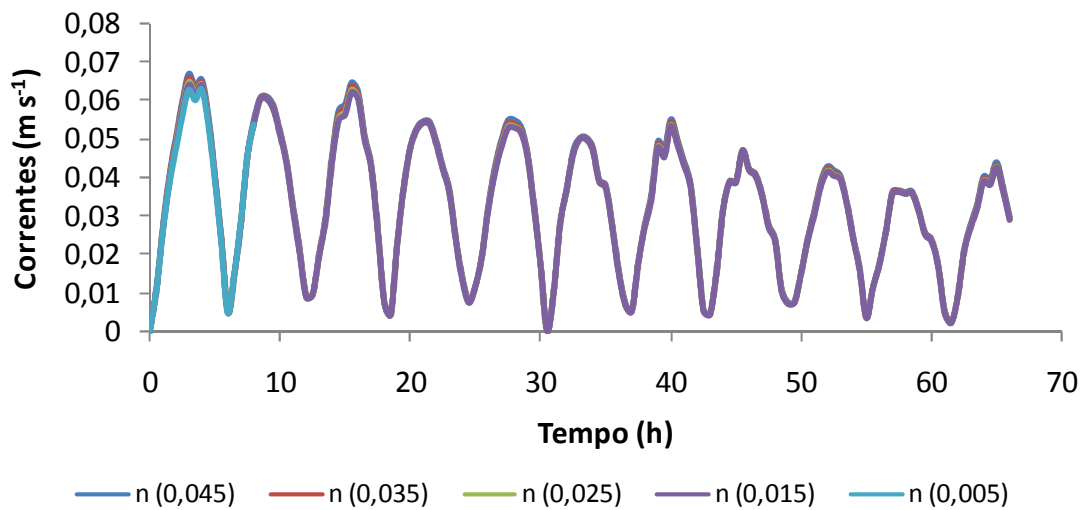


Figura 57: Magnitude das correntes para diferentes valores de rugosidade de Manning (n) das áreas de intermaré.

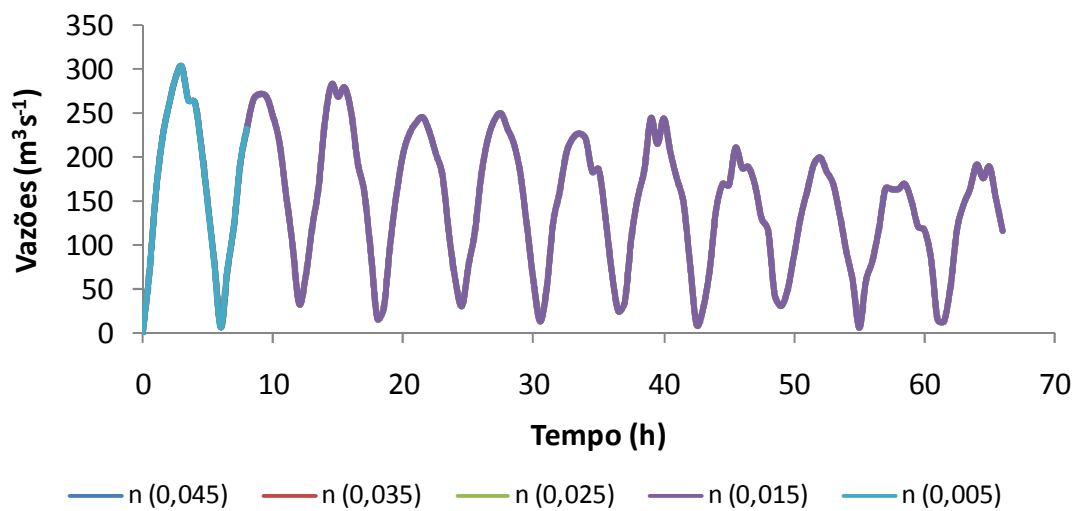


Figura 58: Magnitude das vazões para diferentes valores de rugosidade de Manning (n) das áreas de intermaré.