



GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
Secretaria de Estado do Ambiente - SEA
Instituto Estadual do Ambiente - INEA



Plano Estadual de Recursos Hídricos
do Estado do Rio de Janeiro

R3-B - Temas Técnicos Estratégicos

RT-07 - Estudos de Avaliação da Intrusão Salina

Revisão 01

Fevereiro de 2013



GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
Secretaria de Estado do Ambiente - SEA
Instituto Estadual do Ambiente - INEA

**ELABORAÇÃO DO PLANO ESTADUAL DE RECURSOS
HÍDRICOS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**

R3-B – TEMAS TÉCNICOS ESTRATÉGICOS

RT-07 – Estudos de Avaliação da Intrusão Salina

Revisão 01

Elaboração: Fundação COPPETEC
Laboratório de Hidrologia e Estudos de Meio Ambiente

Fevereiro de 2013

Instituto Estadual do Ambiente (INEA)
Av. Venezuela, 110 – 3º andar - Saúde
Rio de Janeiro, RJ
22.640-102

Elaboração e Execução:
Fundação COPPETEC
Laboratório de Hidrologia e Estudos de Meio Ambiente

Todos os direitos Reservados.
É permitida a reprodução de dados e de informações contidos nesta publicação,
desde que citada a fonte.

ÍNDICE

APRESENTAÇÃO	1
1. INTRODUÇÃO	2
2. SISTEMA DE MODELAGEM ADOTADO.....	4
2.1. Desenvolvimento e Calibração de Modelos	5
3. CENÁRIOS MODELADOS	6
4. METODOLOGIA DE MODELAGEM HIDRODINÂMICA.....	7
4.1. Mapa Base	7
4.1.1. Rio Paraíba do Sul	7
4.1.2. Rio Guandu/Canal de São Francisco	8
4.1.3. Rio São João	9
4.1.4. Rio Macaé.....	10
4.1.5. Baía de Guanabara – Rios Iguaçu/Sarapuí, Caceribú e Guapimirim	10
4.2. Malha	11
4.2.1. Rio Paraíba do Sul	11
4.2.2. Rio Guandu/Canal de São Francisco	13
4.2.3. Rio São João	14
4.2.4. Rio Macaé.....	14
4.2.5. Baía de Guanabara – Rios Iguaçu/Sarapuí, Caceribú e Guapimirim	15
4.3. Dados Ambientais de Entrada do Modelo Hidrodinâmico	16
4.3.1. Batimetria.....	16
4.3.2. Rugosidade.....	21
4.3.3. Vazões.....	22
4.3.4. Maré.....	26
4.3.5. Salinidade	38
4.3.6. Vento	38
5. RESULTADOS	40
5.1. Rio Paraíba do Sul.....	40
5.1.1. Análise Parcial dos Resultados	46
5.2. Rio Guandu/Canal de São Francisco	46
5.2.1. Análise parcial dos resultados	48
5.3. Rio São João.....	49
5.3.1. Análise parcial dos resultados	50
5.4. Rio Macaé	51
5.4.1. Análise parcial dos resultados	54
5.5. Baía de Guanabara – Rios Iguaçu/Sarapuí, Caceribú e Guapimirim.....	55
5.5.1. Análise parcial dos resultados	59
6. DEFINIÇÃO DE ZONA DE RESTRIÇÃO DE OUTORGA.....	60
7. RECOMENDAÇÕES	67
7.1. Dados Geográficos e Topo-Hidrográficos	68
7.2. Dados Meteorológicos e Oceanográficos	68
7.3. Dados Hidrológicos e de Vazões Afluentes e de Captação	69
7.4. Dados de Qualidade de Água.....	70
7.5. Resumo dos Dados Utilizados em cada Modelo e Sugestões para Futuros Trabalhos	70
8. CONCLUSÕES	74
9. BIBLIOGRAFIA.....	75

APRESENTAÇÃO

O presente relatório consiste na apresentação dos resultados da avaliação da intrusão salina, conforme previsto no Contrato 33/2011/Processo nº. E-07/502.786/10, firmado entre a Fundação Coppetec e o Instituto Estadual do Ambiente (INEA), tendo por objeto a elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos.

O estudo tem como objetivo caracterizar as diferentes zonas das regiões estuarinas das principais bacias hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro, com base em dados secundários e auxílio de modelagem computacional.

O relatório está organizado da seguinte forma: o item 1 contém uma breve introdução ao trabalho; o item 2 trata do sistema de modelagem adotado; o item 3 define os cenários modelados; o item 4 descreve a metodologia de modelagem hidrodinâmica utilizada; o item 5 os resultados obtidos com a aplicação da modelagem; o item 6, as conclusões do estudo e; o item 7, a bibliografia utilizada.

1. INTRODUÇÃO

Um estuário pode ser definido como um corpo d'água costeiro que tem uma ligação **livre** com o mar, dentro do qual ocorre uma **mistura** mensurável de água doce de origem terrestre com água salgada do mar e se estende para montante até onde se pode medir efeito de maré nos níveis d'água. O termo "livre" remete à possibilidade da embocadura do estuário fechar de tempos em tempos. Já o termo "mistura" encontra-se destacado, pois nem sempre há água doce suficiente para se ter uma mistura significativa – como pode ocorrer em alguns rios durante as épocas de estiagem.

Os estuários possuem, basicamente, três regiões bastante características e que são de interesse para as atividades sócio-econômicas ao redor. Indo de montante para jusante, as regiões de interesse são:

- **ZNA – Zona de oscilação de níveis de água ou “cabeça do estuário”:** é o trecho a partir do qual se começa a registrar oscilações de nível com períodos típicos de marés. Por exemplo, oscilações de níveis com períodos típicos de 12h e 25min (M2), 24h e 50min (M1), 12h (S2) e 24h (S1), correspondendo respectivamente às constantes harmônicas lunares e solares semidiurnas e diurnas. A caracterização da ZNA é fundamental para a avaliação de projetos de macrodrenagem em áreas de baixada.
- **ZIC – Zona de inversão de correntes:** é o trecho a partir do qual se registra inversão de sentido nas correntes por efeitos de maré, e que pode ficar a uma distância considerável para jusante da cabeça do estuário. Para jusante da ZIC, ao longo de um período de maré, tipicamente de 12h e 25min, ocorrem correntes de enchente, fluindo para montante, e correntes de vazante fluindo para jusante. Quanto mais para montante mais longa é a duração das vazantes frente à das enchentes. Na região da embocadura junto ao mar, as durações das vazantes e das enchentes tendem a se igualar em um tempo próximo da metade do período da maré. As vazantes geralmente são mais longas, pois precisam escoar o volume de água do mar que entrou na enchente, ou prisma de maré, a vazão do rio que ficou represada durante a enchente e a própria vazão do rio.
- **ZM – Zona de mistura:** é o trecho a partir do qual a água começa a ficar salobra, com valores de salinidade entre 0,5 e 30 ups. Tal trecho se inicia a jusante da ZIC e se estende para fora da embocadura, na zona costeira adjacente. Na zona metropolitana do Rio de Janeiro e adjacências, há complexos estuarinos com características particulares, como baías e sistemas lagunares. Em geral, todas as baías estão nas zonas de mistura. O mais peculiar do Estado é o sistema lagunar de Araruama que apresenta hipersalinidade, caracterizando o que se chama de “estuário negativo”. A caracterização da ZM é fundamental para definição de pontos de captação de água doce.

Os limites a montante das três zonas, ZNA, ZIC e ZM, podem mudar consideravelmente de posição ao longo do ciclo hidrológico e do mês lunar. Em épocas de chuvas e cheias os limites são empurrados para jusante, pela maior vazão fluvial, e em épocas de estiagem avançam para montante. Em um dado mês, tipicamente, durante as fases de marés de sizígia, na lua nova e lua cheia, os limites ficam mais para montante. Opostamente, nas marés de quadratura, quarto crescente e quarto minguante, os limites tendem a ficar mais para jusante.

Os efeitos esperados das mudanças climáticas são a ocorrência mais frequente de entrada de frentes frias mais severas, ou seja, maiores marés meteorológicas, elevação do nível médio do mar e vazões fluviais menores. Como consequência, a expectativa é

que os limites das três zonas sejam deslocados mais para montante dos estuários, podendo afetar a macrodrenagem das regiões ao redor, obrigar o deslocamento dos pontos de captação de água doce para as atividades mais vulneráveis, entre outras consequências.

Este relatório tem como objetivo caracterizar as diferentes zonas – ZNA, ZIC e ZM, das regiões estuarinas das principais bacias hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro, de modo a embasar tecnicamente decisões futuras no que diz respeito ao planejamento para o uso sustentável desses ecossistemas. A caracterização é feita com o auxílio de modelagem computacional, usando dados secundários, sem a utilização de levantamentos de campo para obtenção de dados primários.

2. SISTEMA DE MODELAGEM ADOTADO

Os modelos utilizados no desenvolvimento dos serviços fazem parte do SisBaHiA[®] - **Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental**. O SisBaHiA[®] é continuamente ampliado e aperfeiçoado na COPPE/UFRJ desde 1987, através de várias teses de mestrado e doutorado, além de projetos de pesquisa. Modelos do SisBaHiA[®] têm sido adotados em dezenas de estudos e projetos contratados junto à Fundação Coppetec envolvendo modelagem de corpos de água naturais. A Figura 2.1 mostra uma imagem da tela de abertura do sistema.



Figura 2.1 - Imagem da tela de abertura do SisBaHiA[®].

Amplas informações sobre o sistema estão disponíveis em www.sisbahia.coppe.ufrj.br. Do site pode-se baixar a *Referência Técnica do SisBaHiA[®]*, com detalhadas informações de formulação matemática e numérica de todos os modelos.

Para referendar a qualidade dos modelos propostos, no item *Aplicações – Projetos* do site há uma lista de dezenas de projetos desenvolvidos com modelos do SisBaHiA[®], com breves explicações das modelagens realizadas e nome dos contratantes.

2.1. Desenvolvimento e Calibração de Modelos

A modelagem hidrodinâmica ambiental é um processo evolutivo no qual, apesar do forte viés quantitativo inerente a modelos matemáticos, numéricos e computacionais, há um viés qualitativo. É usual se iniciar um processo de modelagem com dados parciais, dando assim um viés qualitativo mais pronunciado aos modelos. Na medida em que dados mais detalhados são obtidos, os modelos evoluem com calibrações mais refinadas, diminuindo o viés qualitativo e aumentando a confiabilidade quantitativa em diagnósticos e prognósticos. O desenvolvimento e a calibração de modelos de hidrodinâmica ambiental é um processo em níveis, que deve obedecer à seguinte hierarquia:

- Nível 1. **Modelagem e calibração geométrica:** Desenvolvimento de modelo digital do terreno do domínio de modelagem, feito através da malha de discretização. Para calibração, faz-se ajustes para que mapas de isolinhas de cotas de fundo e contornos produzidos pelo modelo representem adequadamente os contornos e a batimetria da região de interesse. O grau de aferição e calibração depende da qualidade dos dados topo-hidrográficos disponíveis.
- Nível 2. **Modelagem e calibração hidrodinâmica:** Desenvolvimento de modelos hidrodinâmicos capazes de reproduzir adequadamente a variação de níveis de água e correntes na região de interesse, sob diferentes condições de vazões e ventos. A calibração é feita mediante comparação de resultados obtidos com os dados medidos no campo. Para isso, é necessário que, além da boa modelagem digital do terreno, haja informações corretas sobre os forçantes da circulação hidrodinâmica, tais como níveis de controle, vazões afluentes e ventos. A qualidade da calibração e da aferição dependem da qualidade dos dados disponíveis.
- Nível 3. **Modelagem e calibração de transporte de escalares (sedimentos e parâmetros de qualidade de água):** Desenvolvimento de modelos de transporte de escalares, usando as correntes e os níveis dos modelos hidrodinâmicos, que sejam capazes de representar adequadamente taxas de transporte de sedimentos e concentrações de parâmetros de qualidade de água ao longo do tempo. Para isso, é necessário que, além das correntes e níveis de água, haja informações corretas sobre vazões sólidas afluentes e cargas poluentes e sobre taxas de reação de parâmetros não conservativos, e.g. OD, DBO, nutrientes, dentre outros. Para modelagem de processos sedimentológicos é necessário dispor-se de caracterização sedimentológica do leito dos rios envolvidos, cargas sólidas afluentes a montante dos limites de modelagem, dentre outras informações.

Não é razoável querer obter bons resultados em Nível 3, sem previamente obter bons resultados em Nível 2, que por sua vez depende da calibração no Nível 1. A calibração em Nível 3 é a mais complexa. Aspectos detalhados sobre efetiva calibração de modelos são apresentados no decorrer dos trabalhos, na medida em que sejam disponibilizados dados que permitam seguir os passos indicados.

Vale lembrar que para o presente trabalho não foram feitos levantamentos de campo para a obtenção de dados primários, tais como, batimetria, velocidade das correntes, elevação, salinidade. A falta dessas informações inviabiliza a calibração dos modelos, permitindo apenas uma avaliação de cunho qualitativo. No entanto, os rios Guandu e Macaé dispõem de levantamentos topobatimétricos anteriores, o que possibilitou assim a uma melhor aferição desses sistemas.

3. CENÁRIOS MODELADOS

Neste trabalho cinco estuários são caracterizados:

- Rio Paraíba do Sul;
- Rio Guandu/Canal de São Francisco;
- Rio São João;
- Rio Macaé;
- Baía de Guanabara, com foco nas bacias dos rios Iguaçu/Sarapuí, Caceribú e Guapimirim.

Para cada um dos sistemas hídricos acima definidos são caracterizadas as zonas estuarinas descritas anteriormente, considerando os seguintes cenários:

I. Cenário atual:

I.1 Típico: Marés de sizígia e quadratura típicas em condições de estiagem;

I.2 Extremo: considerando marés de sizígia com maré meteorológica de 7 dias com altura de 0,8 m, em épocas de estiagem. A subida da maré meteorológica levará 3 dias gerando sobre elevação de 0,8 m no nível médio do mar (NMM) em dia de maré de sizígia. A descida do NMM ocorrerá em 5 dias.

II. Cenário de 50 anos, com efeitos de mudanças climáticas: Considera-se que, por efeito de mudanças climáticas, os seguintes condicionantes serão alterados: Nível médio do mar estará mais alto que o atual em 0,5 m; Alturas de marés meteorológicas poderão chegar a 1,0 m; Vazões de estiagem poderão ser mais baixas.

II.1 Típico: Marés de sizígia e quadratura típicas em condições de estiagem;

II.2 Extremo: considerando marés de sizígia com maré meteorológica de 7 dias com altura de 1,0 m, em épocas de estiagem. A subida da maré meteorológica levará 3 dias gerando sobre elevação de 1,0 m no nível médio do mar, 0,5 m acima do atual, em dia de maré de sizígia. A descida do NMM ocorrerá em 5 dias.

A vazão de estiagem considerada para cada rio no Cenário Atual é a $Q_{7,10}$ vazão mínima média de sete dias de duração e dez anos de recorrência. Para o Cenário de 50 anos, são utilizadas as vazões máximas outorgáveis no Estado do Rio de Janeiro, que correspondem a 50% da $Q_{7,10}$.

Vale ressaltar que no presente estudo não foram utilizados cenários considerando vazões de cheia dos rios, uma vez que as piores condições ocorrerão, necessariamente, durante as épocas de estiagem. Entende-se por pior condição, o cenário em que o limite da Zona de Mistura avança mais para montante dos rios.

4. METODOLOGIA DE MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Neste capítulo são descritas as etapas de modelagem que foram seguidas para cada um dos estuários analisados. Para que não haja repetições desnecessárias, quando necessário o rio Paraíba do Sul foi escolhido para uma análise mais aprofundada em cada etapa.

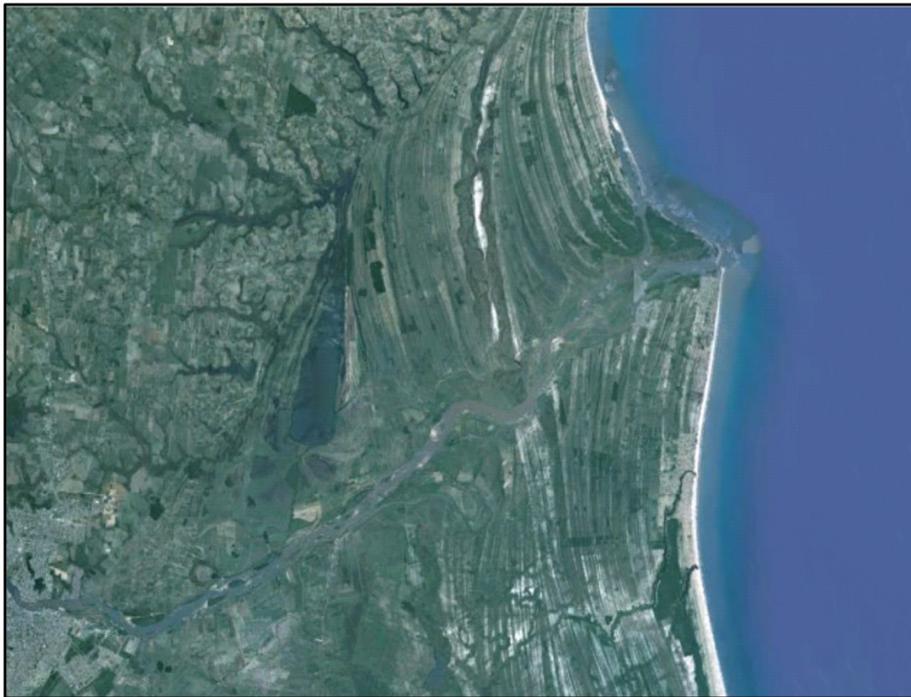
4.1. Mapa Base

O mapa base é a delimitação da região de interesse de cada modelo. A definição dos contornos do corpo d'água a ser modelado pode ser obtida através de diversas bases, como por exemplo: Imagens de satélite; Cartas náuticas; Cartas topográficas e Fotos aéreas. O detalhamento dos contornos deve estar de acordo com os objetivos do projeto e a precisão desejada nos resultados da modelagem.

Para todos os estuários analisados neste projeto, os contornos foram extraídos das imagens do *Google Earth*.

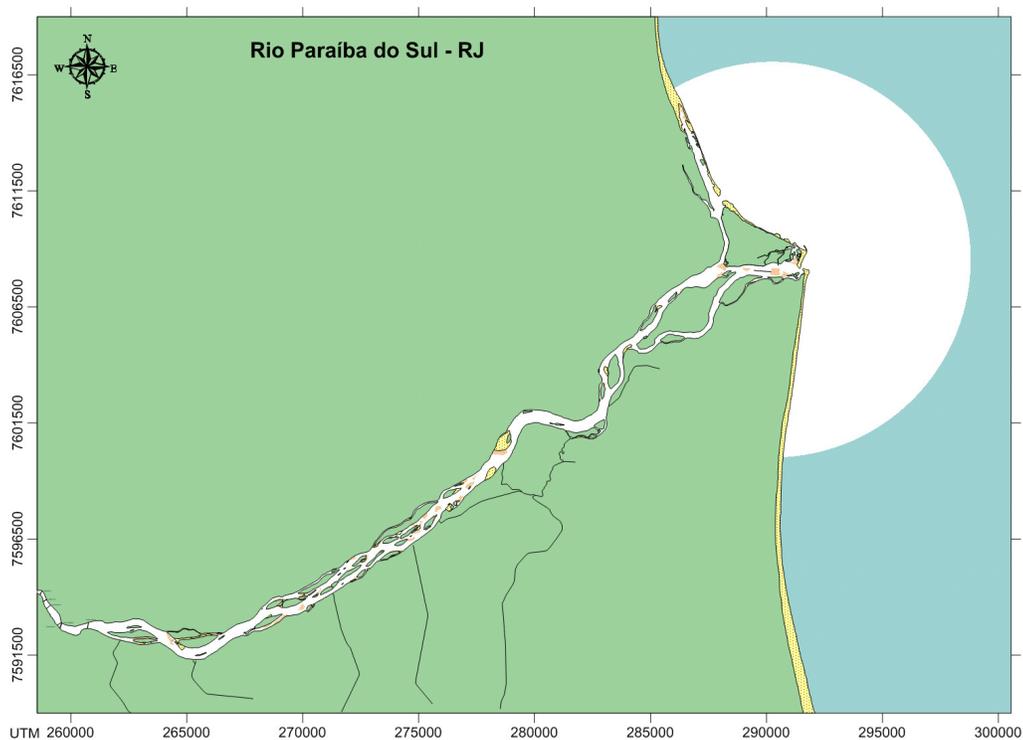
4.1.1. Rio Paraíba do Sul

As figuras 4.1.1.1 e 4.1.1.2 comparam a imagem real de satélite e a digitalizada a ser usada pelo modelo do rio Paraíba do Sul.



Obs: Coordenadas limites da imagem: limite inferior esquerdo - 21°47'10,66"S e 41°20'6,74"O; limite superior direito - 21° 31' 14,31" S e 40° 55' 32,713" O.

Figura 4.1.1.1 - Imagem de satélite extraída do *Google Earth* no dia 05/03/2012.



OBS: As coordenadas da região foram transformadas para o sistema métrico UTM (Universal Transverse Mercator).

Figura 4.1.1.2 - Mapa Base digitalizado a partir da figura 4.1.1.1.

As imagens do *Google Earth* são montadas a partir de processo de composição de mosaicos de uma série de imagens tiradas em diferentes datas. Portanto, a posição de cada banco, ilha e margem representados na figura 4.1.1.2, não reproduz com exatidão a realidade. No entanto, como os processos morfológicos possuem escalas temporais grandes, é bastante razoável criar o mapa base a partir das imagens do *Google Earth*.

Para um maior detalhamento e precisão dos contornos do modelo, são necessárias medições de campo.

4.1.2. Rio Guandu/Canal de São Francisco

A figura 4.1.2.1 apresenta o domínio de modelagem do rio Guandu/canal de São Francisco.

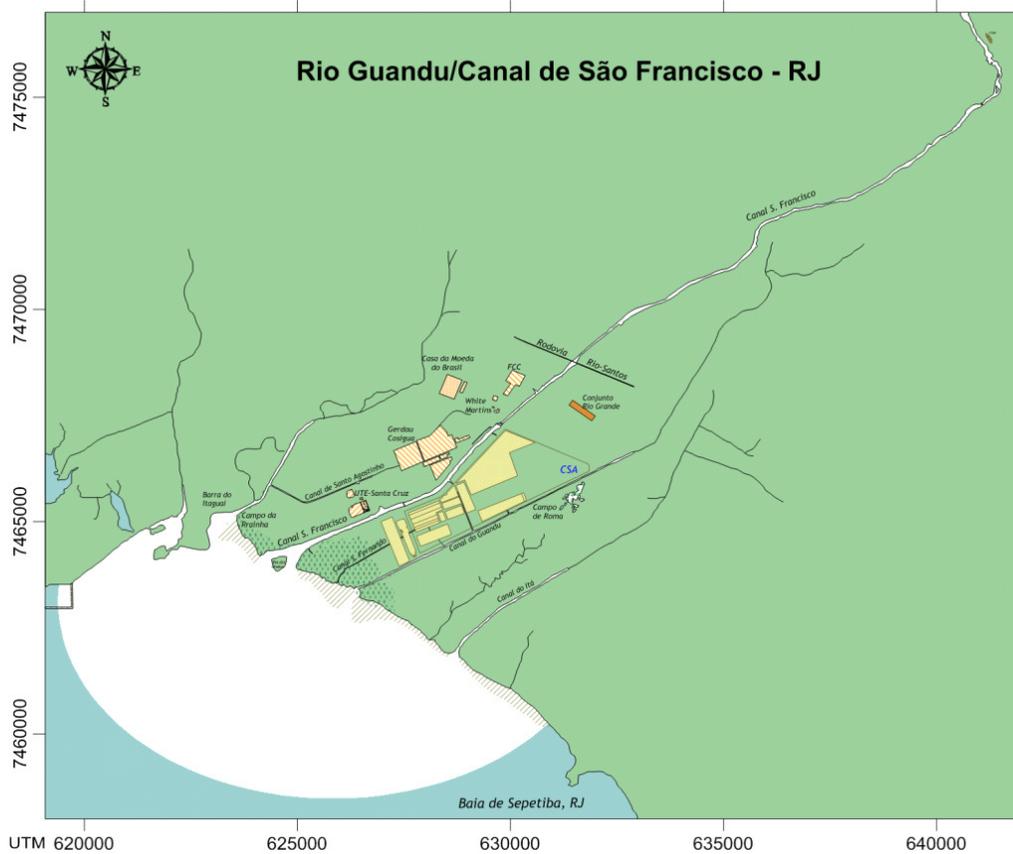


Figura 4.1.2.1 - Domínio de modelagem do rio Guandu/canal de São Francisco.

4.1.3. Rio São João

A figura 4.1.3.1 apresenta o domínio de modelagem do rio São João.

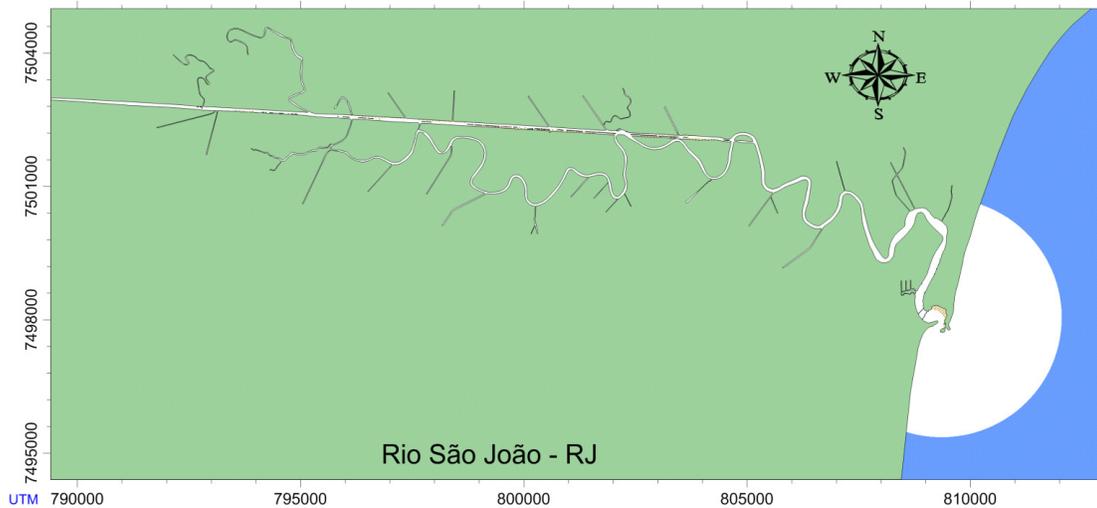


Figura 4.1.3.1 - Domínio de modelagem do rio São João.

4.1.4. Rio Macaé

A figura 4.1.4.1 apresenta o domínio de modelagem do rio Macaé.

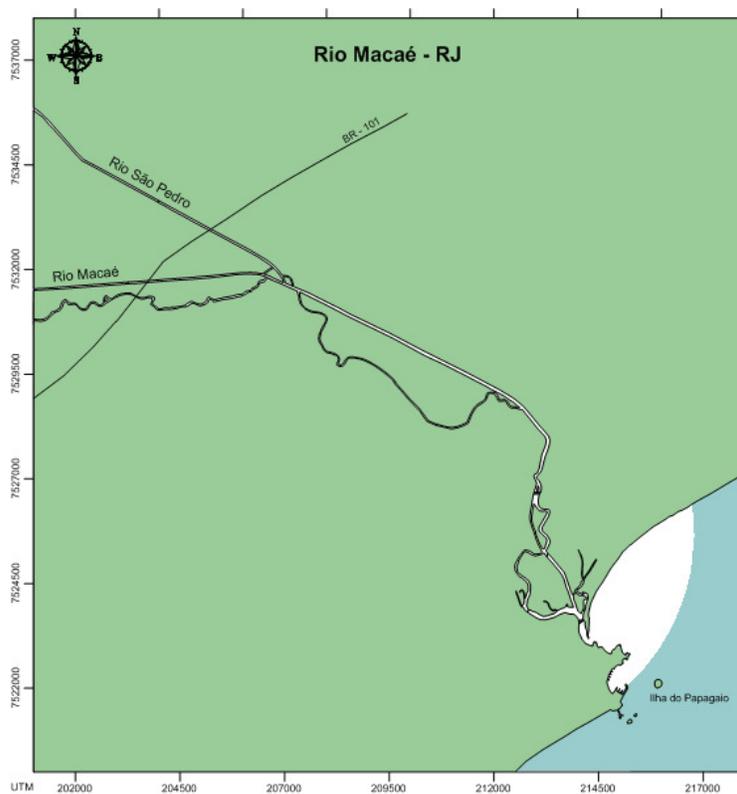


Figura 4.1.4.1 - Domínio de modelagem do rio Macaé.

4.1.5. Baía de Guanabara – Rios Iguaçu/Sarapuí, Caceribú e Guapimirim

A figura 4.1.5.1 apresenta o domínio de modelagem da Baía de Guanabara.

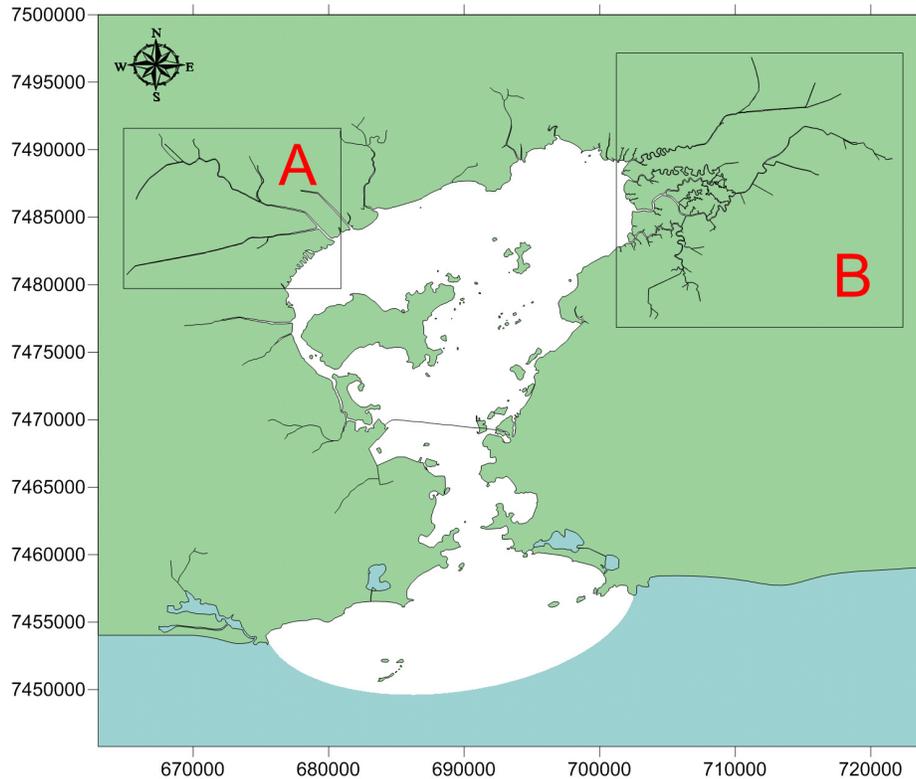


Figura 4.1.5.1 - Domínio de modelagem da Baía de Guanabara.

Vale ressaltar que as regiões A e B (figura 4.1.5.1) contém os rios Iguaçú/Sarapuí e rios Caceribú e Guapimirim, respectivamente, e correspondem às áreas de maior interesse neste estuário.

4.2. Malha

A malha é a discretização espacial do meio contínuo através da definição geométrica de elementos finitos. Para cada nó destes elementos, serão resolvidas as equações governantes do *SisBaHiA*[®]. Tais equações encontram-se deduzidas e apresentadas na *Referência Técnica do SisBaHiA*[®].

O domínio de cada estuário foi discretizado com uma malha de elementos finitos biquadráticos. Cada domínio de modelagem e sua discretização (espaçamento entre os nós de cálculo) foram definidos com o compromisso de maximizar a representação dos contornos das ilhas, bancos emersos e submersos, além dos meandros dos rios estuarinos.

4.2.1. Rio Paraíba do Sul

A figura 4.2.1.1 apresenta a malha de elementos finitos elaborada para o modelo do rio Paraíba do Sul, com 1.459 elementos lagrangeanos subparamétricos quadrangulares e 6.944 nós de cálculo.

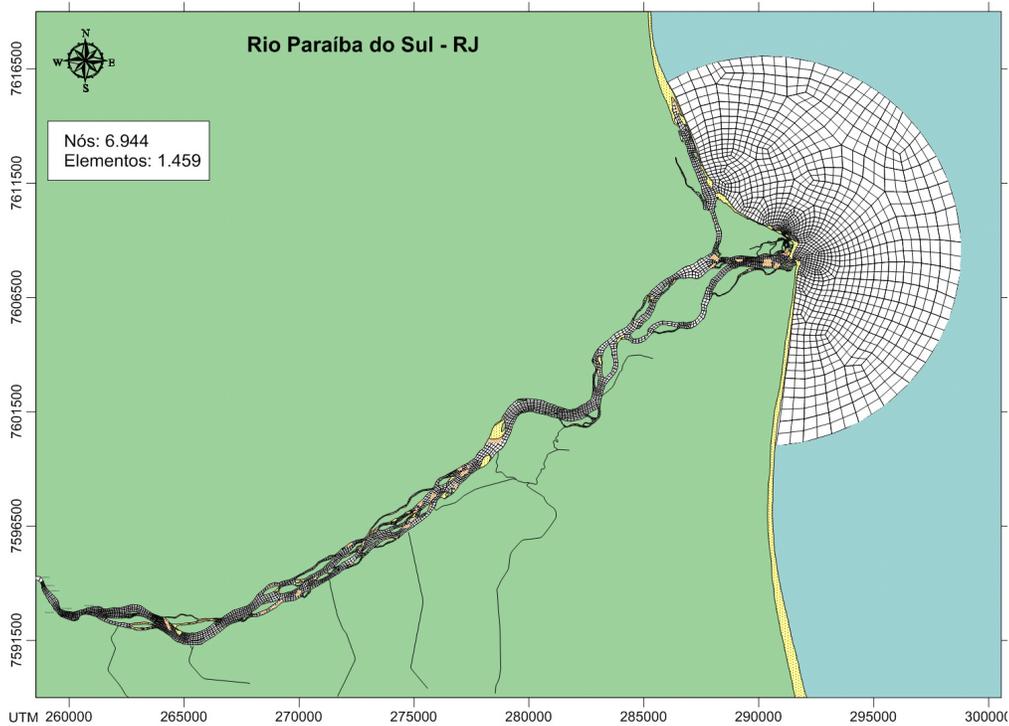


Figura 4.2.1.1 - Malha de elementos finitos com 1.459 elementos e 6.944 nós de cálculo.

Observa-se na figura acima que as regiões de bancos de areia têm coloração característica e sofrem efeitos de alagamento e secamento.

Convém ressaltar que o modelo hidrodinâmico do *SisBaHiA*[®] opera com mecanismos de alagamento e secamento em locais propensos, como os bancos de areia. Para detalhes sobre o procedimento, veja a seção 3.12 na *Referência Técnica do SisBaHiA*[®] (www.sisbahia.coppe.ufrj.br).

A tabela 4.2.1.1 apresenta as informações da malha de elementos finitos elaborada para o modelo hidrodinâmico e para a modelagem digital do terreno do modelo do rio Paraíba do Sul.

Tabela 4.2.1.1 - Características resumidas da malha de elementos finitos
Modelo do rio Paraíba do Sul.

Elementos Totais		1459
Nós Totais		6944
Nós	Internos	4612
	Contorno Terra	2277
	Contorno Aberto	57
	Terra/Aberto	2
Domínio Discretizado	Área (m ²)	151.147.840,306
	Volume (m ³)	1.419.781.617,998
	Profundidade Média (m)	9,692

4.2.2. Rio Guandu/Canal de São Francisco

A figura 4.2.2.1 apresenta a malha de elementos finitos elaborada para do Modelo do rio Guandu/canal de São Francisco.

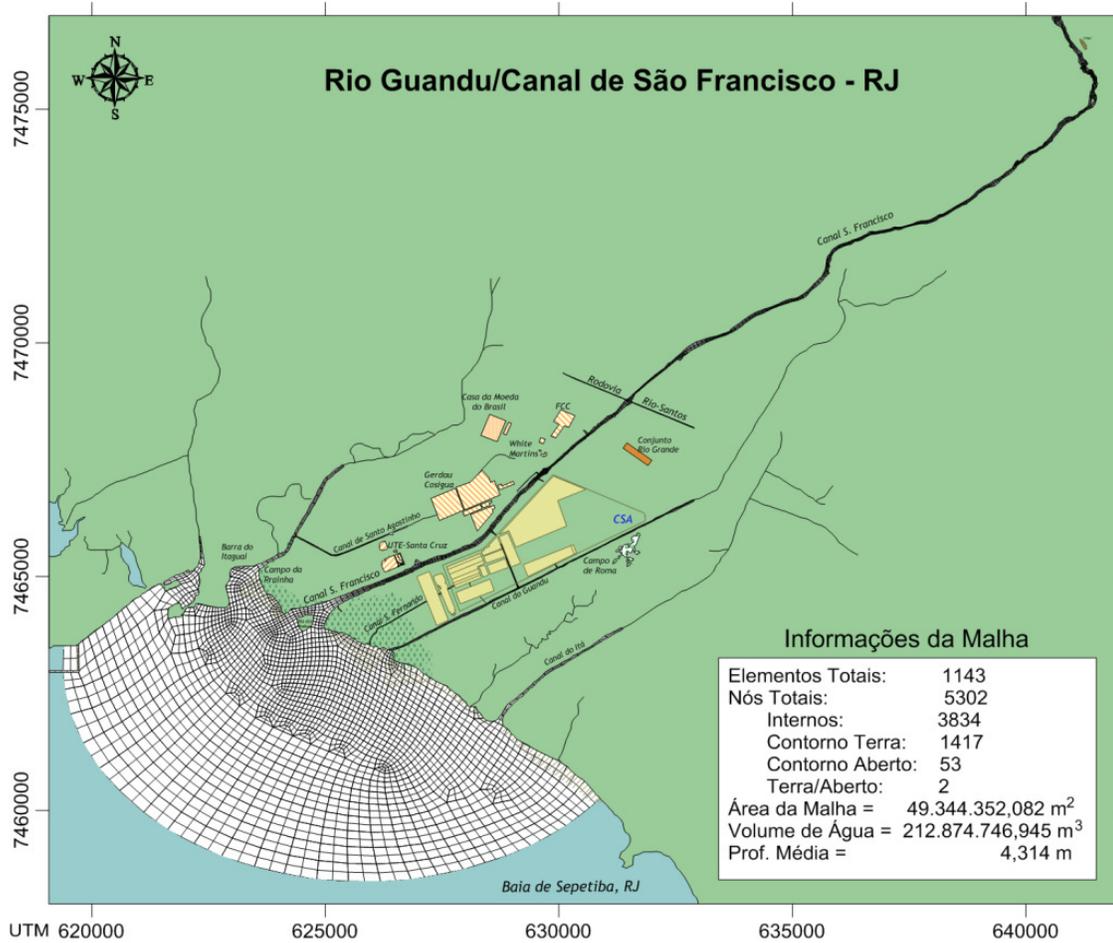


Figura 4.2.2.1 - Malha de elementos finitos com 1.143 elementos e 5.302 nós de cálculo.

4.2.3. Rio São João

A figura 4.2.3.1 apresenta a malha de elementos finitos elaborada para o Modelo do rio São João.

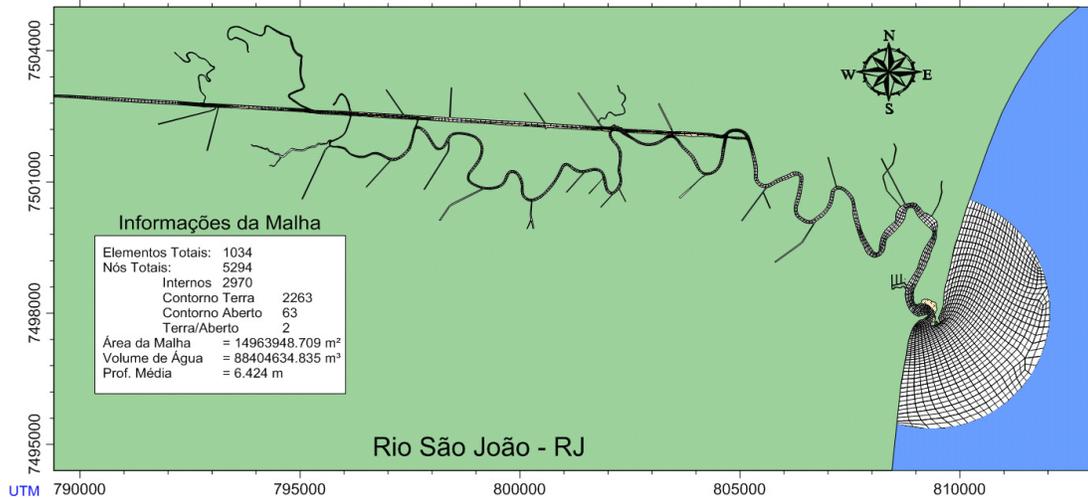


Figura 4.2.3.1 - Malha de elementos finitos com 1.034 elementos e 5.294 nós de cálculo.

4.2.4. Rio Macaé

A figura 4.2.4.1 apresenta a malha de elementos finitos elaborada para o Modelo do rio Macaé.

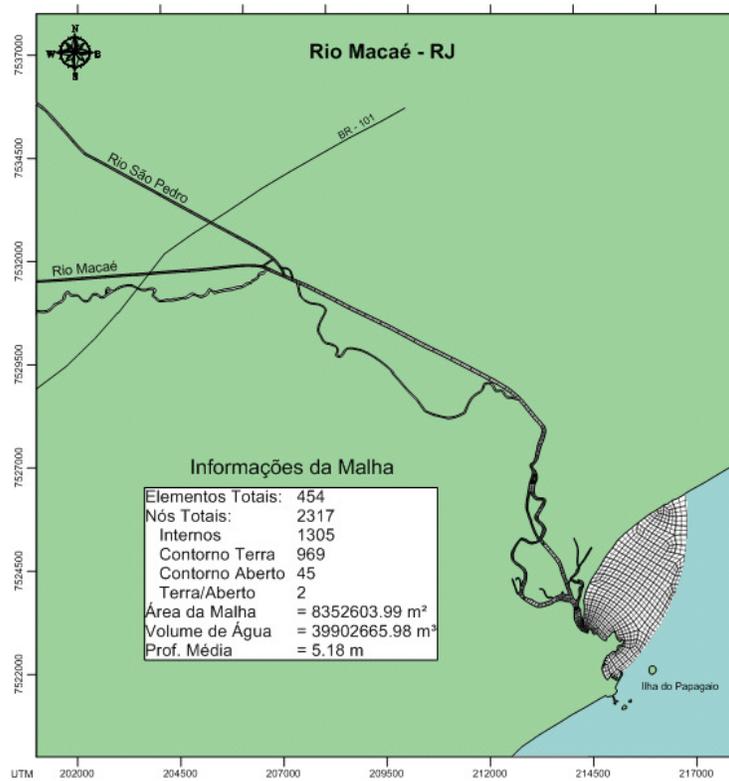


Figura 4.2.4.1 – Malha de elementos finitos com 454 elementos e 2.317 nós de cálculo.

4.2.5. Baía de Guanabara – Rios Iguaçu/Sarapuí, Caceribú e Guapimirim

As figuras 4.2.5.1 a 4.2.5.3 apresentam a malha de elementos finitos elaborada para o Modelo da Baía de Guanabara

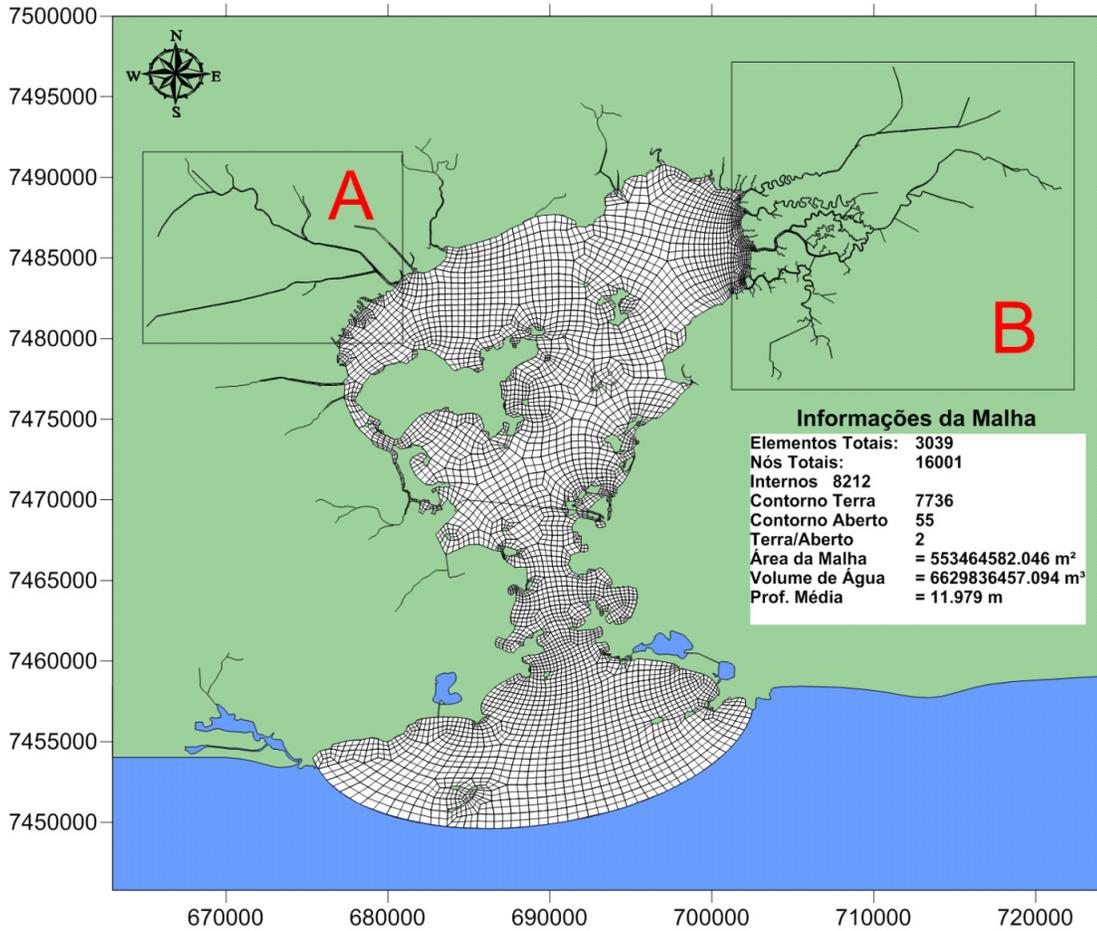


Figura 4.2.5.1 - Malha de elementos finitos com 3.039 elementos e 16.001 nós de cálculo

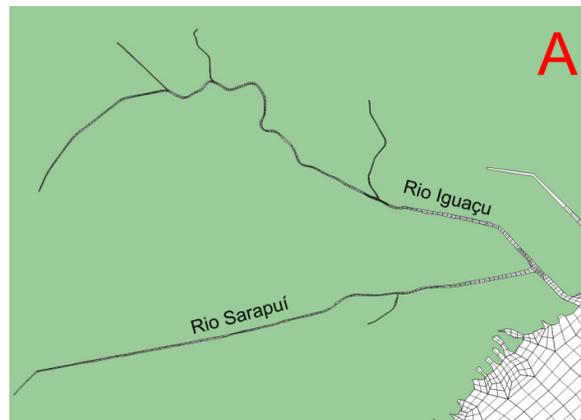


Figura 4.2.5.2 – Região A da figura 4.2.5.1



Figura 4.2.5.3 - Região B da figura 4.2.5.1

Vale ressaltar as regiões A e B correspondem às áreas de maior interesse neste estuário para o trabalho.

4.3. Dados Ambientais de Entrada do Modelo Hidrodinâmico

Os dados de entrada que compõe o modelo hidrodinâmico SisBaHiA®, são apresentados, resumidamente, nos itens a seguir.

4.3.1. Batimetria

A fonte de dados de batimetria de cada estuário teve como base a disponibilidade de dados secundários, uma vez que não está previsto no PERHI o levantamento de dados primários.

Para os estuários do rio Guandu/canal de São Francisco, rio Macaé e Baía de Guanabara foram utilizados dados batimétricos de trabalhos desenvolvidos anteriormente. Com relação aos demais, incluindo os rios que desembocam na Baía de Guanabara, foram feitas estimativas com dados da literatura de fluviomorfologia, relacionando a largura e a profundidade média das seções dos rios.

Os dados das Cartas Náuticas mais próximas de cada região estuarina também foram utilizados. Vale ressaltar que, para todos os estuários, foi utilizado como nível de redução da respectiva Carta Náutica, o nível zero ($h = 0\text{m}$) de batimetria.

Para os estuários em que a batimetria foi estimada, um modelo hidrossedimentológico foi rodado previamente, de modo a ajustar possíveis não conformidades na batimetria criada. Isto só é possível, pois o SisBaHiA® permite o acoplamento dos modelos hidrodinâmicos aos sedimentológicos, tornando a relação entre os dois biunívoca, aproximando-se ao que ocorre na natureza.

4.3.1.1. Rio Paraíba do Sul

No rio Paraíba do Sul, a batimetria da região marítima foi estimada com base nos dados da seguinte carta náutica:

- 140301 DA PONTA DO UBU AO CABO DE SÃO TOMÉ - 1:150.000 – última edição: 2004.

Nas demais regiões, a batimetria foi estimada de acordo com as teorias de fluviomorfologia.

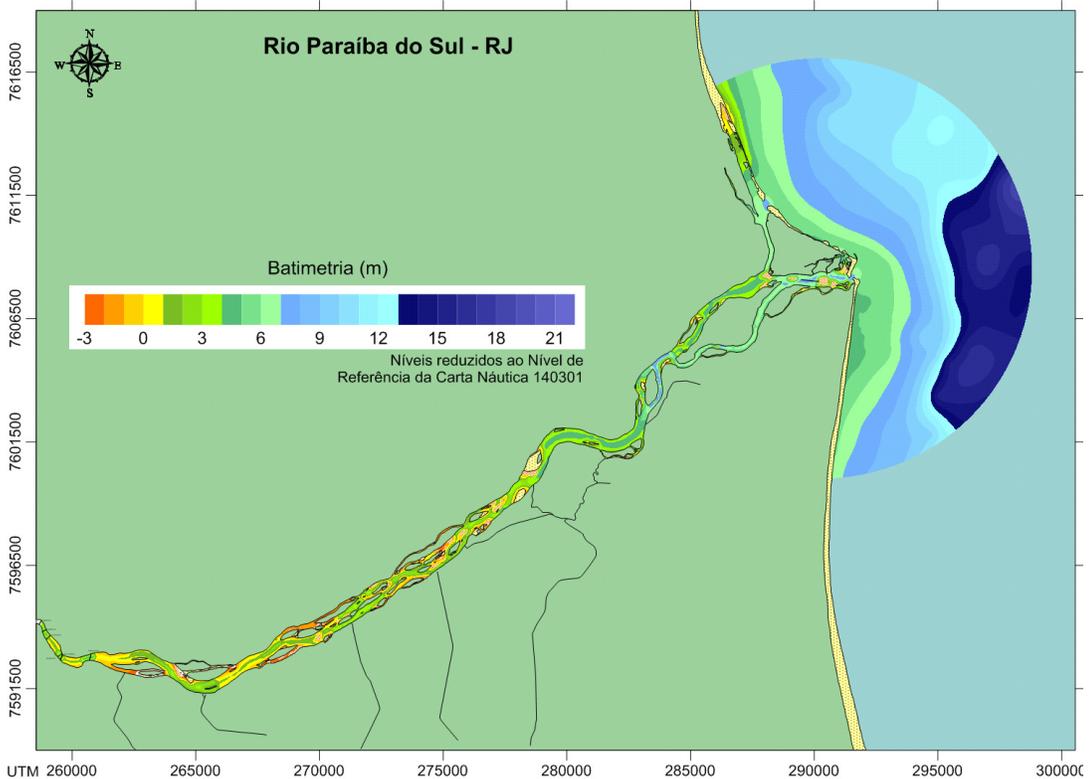


Figura 4.3.1.1.1 - Batimetria conforme o modelo digital do terreno utilizado no modelo hidrodinâmico do rio Paraíba do Sul.

Os resultados hidrodinâmicos das zonas de inversões de correntes – ZIC, reunidos no item 5.1, mostram uma grande coerência em relação à localização de ilhas e bancos de areia no rio Paraíba do Sul. Na falta de dados medidos, esses resultados servem como uma forma de validação da batimetria estimada.

4.3.1.2. Rio Guandu/Canal de São Francisco

Para o rio Guandu/canal de São Francisco, a batimetria foi extraída da Modelagem Hidrodinâmica da Intrusão Salina, realizada pela Fundação COPPETEC em 2006, no âmbito do Projeto PENO-6963. Nesse projeto, foram feitos levantamentos topobatimétricos, resultando na batimetria indicada na figura 4.3.1.2.1.

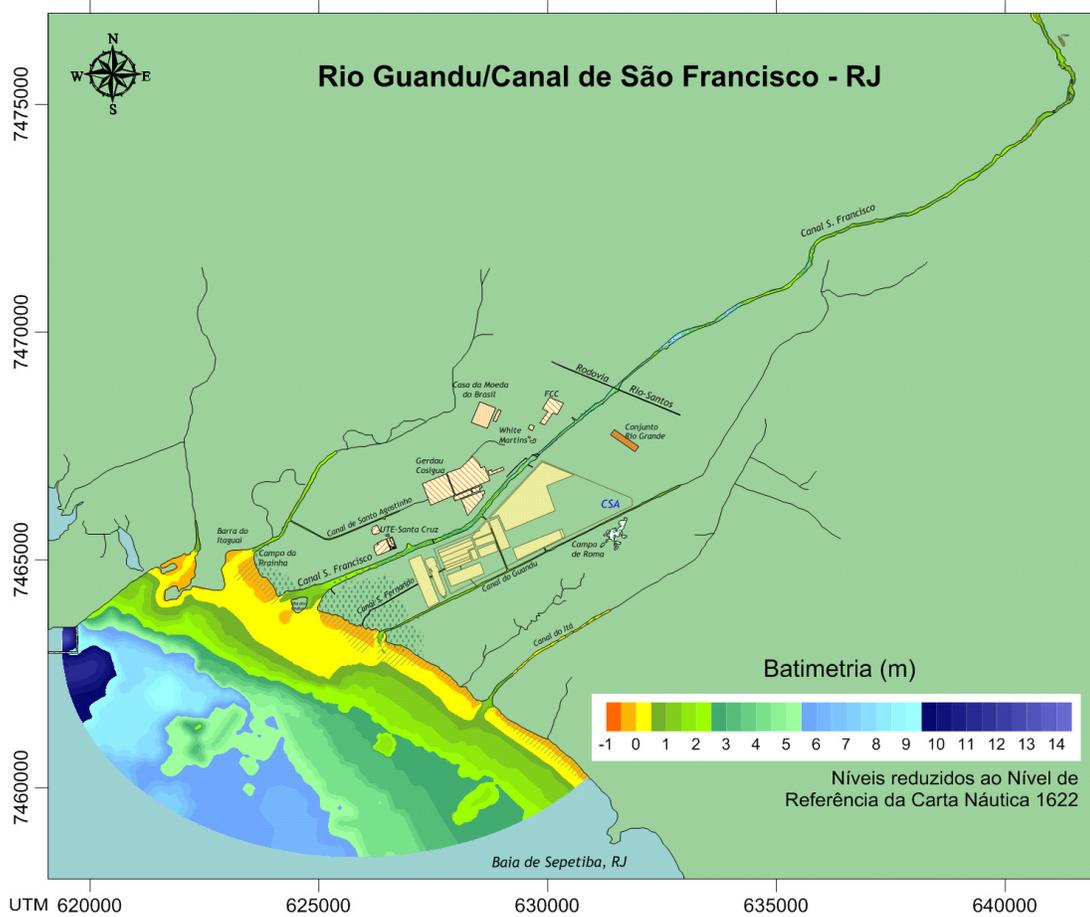


Figura 4.3.1.2.1 - Batimetria conforme o modelo digital do terreno utilizado no modelo hidrodinâmico do rio Guandu/canal de São Francisco.

4.3.1.3. Rio São João

A batimetria da região marítima do rio São João (figura 4.3.1.3.1) teve como subsídio os dados da seguinte carta náutica:

- 1500 DO CABO DE SÃO TOMÉ AO RIO DE JANEIRO - 1:300.000 – última edição: 1988.

Nas outras regiões do domínio de modelagem, a batimetria foi determinada de acordo com as teorias da fluviomorfologia.

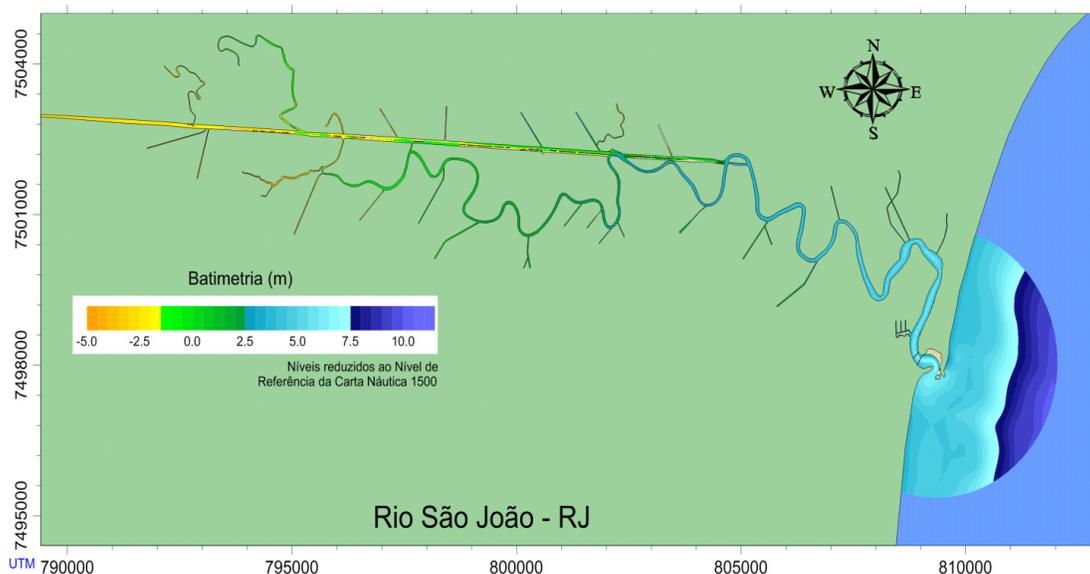


Figura 4.3.1.3.1 - Batimetria conforme o modelo digital do terreno utilizado no modelo hidrodinâmico do rio São João.

4.3.1.4. Rio Macaé

A batimetria do rio Macaé foi determinada com auxílio de dados de campo levantados nos estudos hidrológicos realizados no rio Macaé, no âmbito do projeto da tomada d'água da UTE Norte Fluminense. Vale ressaltar que nesse projeto, foram levantadas doze seções topobatimétricas.

Já a batimetria do trecho marítimo foi obtida através da seguinte carta náutica:

- 1507 ENSEADA DE MACAÉ E PROXIMIDADES - 1:25.000 – última edição: 1974.

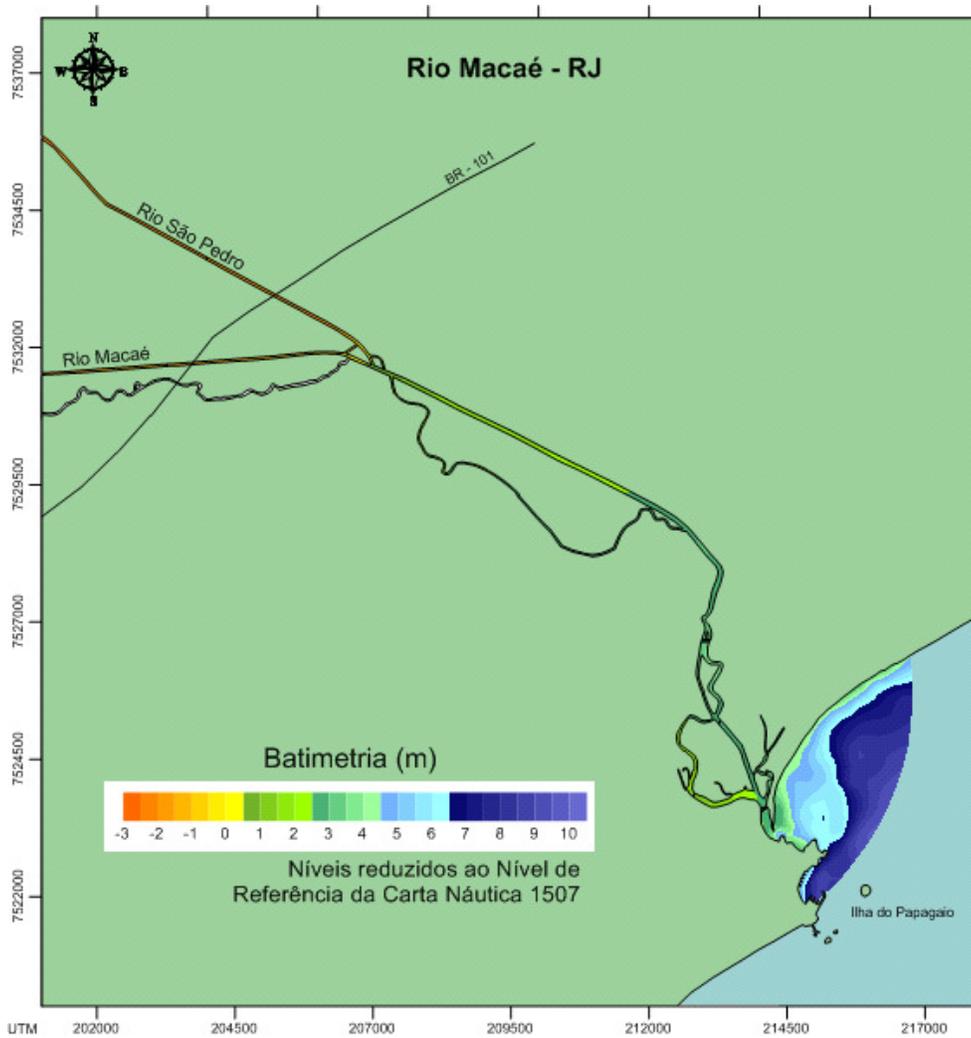


Figura 4.3.1.4.1 - Batimetria conforme o modelo digital do terreno utilizado no modelo hidrodinâmico do rio Macaé.

4.3.1.5. Baía de Guanabara – Rios Iguaçu/Sarapuí, Caceribú e Guapimirim

A batimetria da Baía de Guanabara foi extraída das seguintes cartas náuticas:

- 1501 BAÍA DE GUANABARA - 1:50.000 – última edição: 1962.
- 1511. BARRA DO RIO DE JANEIRO - 1:20.000 – última edição: 1983.
- 1512. PORTO DO RIO DE JANEIRO - 1:20.000 – última edição: 1983.

Para os rios que desembocam na baía, a batimetria foi estimada de acordo com as teorias da fluviomorfologia.

A figura 4.3.1.5.1 apresenta a batimetria final utilizada na modelagem hidrodinâmica.

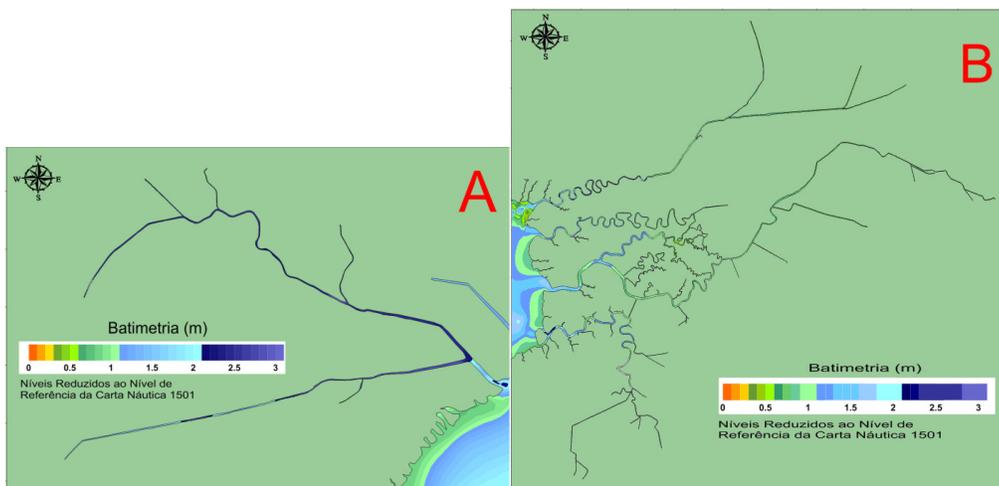
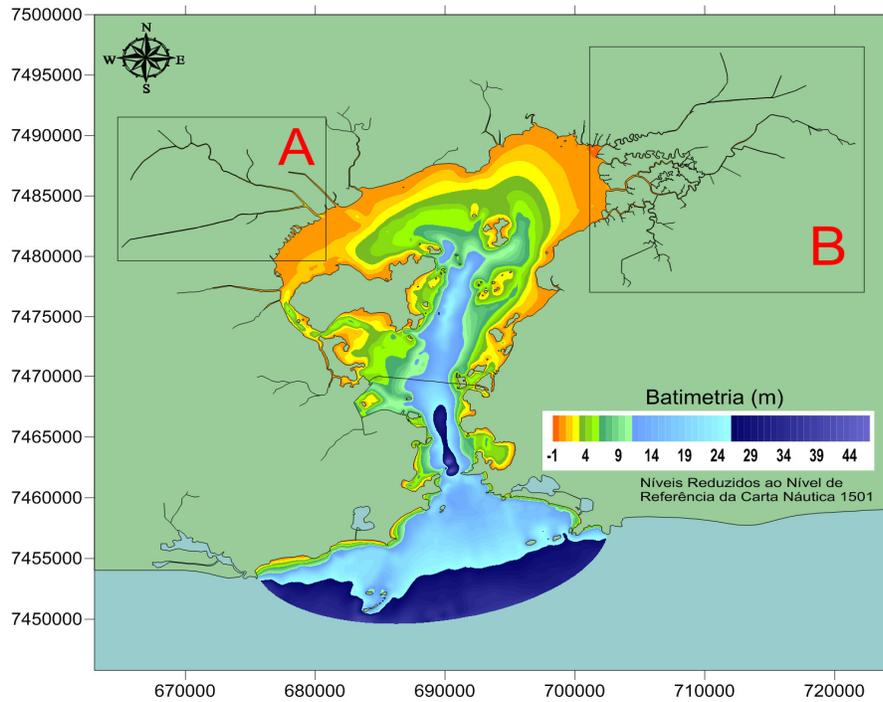


Figura 4.3.1.5.1 - Batimetria conforme o modelo digital do terreno utilizado no modelo hidrodinâmico da Baía de Guanabara.

É importante destacar que a escala de cor da figura 4.3.1.5.1 não é a mesma entre o mapa geral da baía e das regiões A e B.

4.3.2. Rugosidade

A rugosidade equivalente do fundo está relacionada ao tipo de sedimento do leito em cada estuário. Como essa informação não está disponível, foi estimado um valor uniforme de rugosidade equivalente do fundo igual a 0,03 m, para todos os estuários aqui analisados. Observa-se que esse valor é típico de leitos naturais constituídos por areias finas e médias.

4.3.3. Vazões

Nas simulações dos cenários foram utilizadas vazões de estiagem (item 3) para cada rio que consistem na vazão de referência e na vazão máxima outorgável praticadas pelo ERJ, com exceção do rio Guandu. Nesse caso, utilizou-se a vazão ambiental conforme recomendado no PERH-Guandu.

4.3.3.1. Rio Paraíba do Sul

Com relação ao rio Paraíba do Sul, as vazões utilizadas em cada cenário simulado foram determinadas com base no estudo de regionalização de vazões da sub-bacia 58 elaborado pela CPRM. A tabela 4.3.3.1.2 a seguir reúne as vazões utilizadas em cada cenário.

Tabela 4.3.3.1.2 - Vazões em cada cenário simulado - rio Paraíba do Sul

Cenário		Vazão (m ³ /s)	
I	1	Q _{7,10}	247,00
	2		
II	1	0,5 x Q _{7,10}	123,50
	2		

4.3.3.2. Rio Guandu/Canal de São Francisco

Na região estuarina do rio Guandu/canal de São Francisco, diversos canais naturais e artificiais aduzem ou captam água dos rios. De modo a facilitar a visualização das vazões de cada um, os esquemas abaixo são apresentados. A figura 4.3.3.2.1 apresenta as vazões de cada canal para os Cenários atuais (I.1 e I.2), enquanto que a Figura 4.3.3.2.2 ilustra as vazões para os Cenários de 50 anos (II.1 e II.2).

Para o rio Guandu/canal de São Francisco considerou-se um cenário crítico de oferta hídrica determinado pelo PERH-Guandu (tabela 4.3.3.2.1) Dessa forma, a vazão a montante do parque industrial localizado no trecho da foz corresponde a um valor de 76,35 m³/s. Vale ressaltar que a captação da CEDAE de 45 m³/s considerada no PERH-Guandu foi atualizada para 42 m³/s, de acordo com os estudos de avaliação de fontes alternativas para o abastecimento do estado do Rio de Janeiro do PERHI.

Utilizando um critério conservador para os cenários de 50 anos, foram mantidas as vazões atuais captadas pelas indústrias, enquanto que a vazão captada pela CEDAE foi acrescida de 36 m³/s, conforme o estudo citado anteriormente. Seguindo esse critério, a montante do parque industrial a vazão do rio Guandu/canal de São Francisco é de 40,35 m³/s.

Tabela 4.3.3.2.1 - Cenários de oferta hídrica crítica para o uso atual no Rio Guandu/Canal de São Francisco

Usuários / Afluentes	Disponibilidade e Uso Consuntivo (m ³ /s)
	Situação Atual – Cenário Crítico
UHE Pereira Passos – Vazão Mínima	+ 120,000
El Paso	- 0,100
UTE Paracambi	- 0,300
CEDAE – Eng. Paulo de Frontin ⁶	- 0,005
CEDAE – Miguel Pereira ⁷	- 0,030
CEDAE – Paracambi ⁸	+ 0,074
CEDAE – Japeri ⁹	- 0,070
Alto Guandu ¹ – Qmín (Q _{7,10})	+ 0,675
Rio Santana – Qmín (Q _{7,10})	+ 0,378
Duke Energy Brasil	- 0,171
Rio São Pedro – Qmín (Q _{7,10})	+ 0,117
UTE Eletrobolt	- 0,075
Jolimode Roupas	- 0,001
AMBEV ²	- 0,725
Petrobrás - REDUC	- 0,739
Petroflex	- 0,260
Rio Polímeros	- 0,206
UTE Termorio	- 0,448
Rio dos Poços/Queimados/Ipiranga – Qmín (Q _{7,10})	+ 0,241
ETA Guandu ³	- 42,000 ¹¹
Disponibilidade hídrica para futuras outorgas	-
Vazão escoando pelo canal de São Francisco	+76,35
Inepar Energia ⁴	- 1,400
CSN	- 2,000
FCC ⁴	- 0,060
CSA ⁵	- 21,000
Gerdau/COSIGUA ⁴	- 3,472
UTE Santa Cruz ⁴	- 3,450 ¹⁰

Fonte: Extraído do Plano Estratégico de Recursos Hídricos das Bacias dos rios Guandu, Guarda e Guandu-Mirim.

1 - A vazão de Q_{7,10} do trecho do Alto Guandu correspondente ao somatório das vazões dos rios Cacaria, Ribeirão das Lajes, da Onça, Macacos, da Areia e córrego dos Macacos.

2 - A vazão de 0,333 m³/s é restituída no rio Guandu Mirim.

3 - O efluente da lavagem dos filtros, atualmente estimados em 3 m³/s, são encaminhados para o rio Guandu Mirim.

4 - Os efluentes desses empreendimentos, perfazendo um total de 6,515 m³/s, são lançados no rio da Guarda, sendo 5,880 m³/s na foz do canal Santo Agostinho e 0,635 m³/s imediatamente a montante da antiga ponte ferroviária.

5 - Os efluentes da siderúrgica e de sua UTE, totalizando cerca de 20,100 m³/s, são lançados no rio Guandu Mirim (18 m³/s da UTE+ 70% de 3 m³/s da Siderúrgica).

6 - As vazões captadas, no cenário atual e futuro, correspondem respectivamente aos valores 24,26 l/s e 43,11 l/s, dos quais 20% são consumidos e 80% são lançados no rio Macaco.

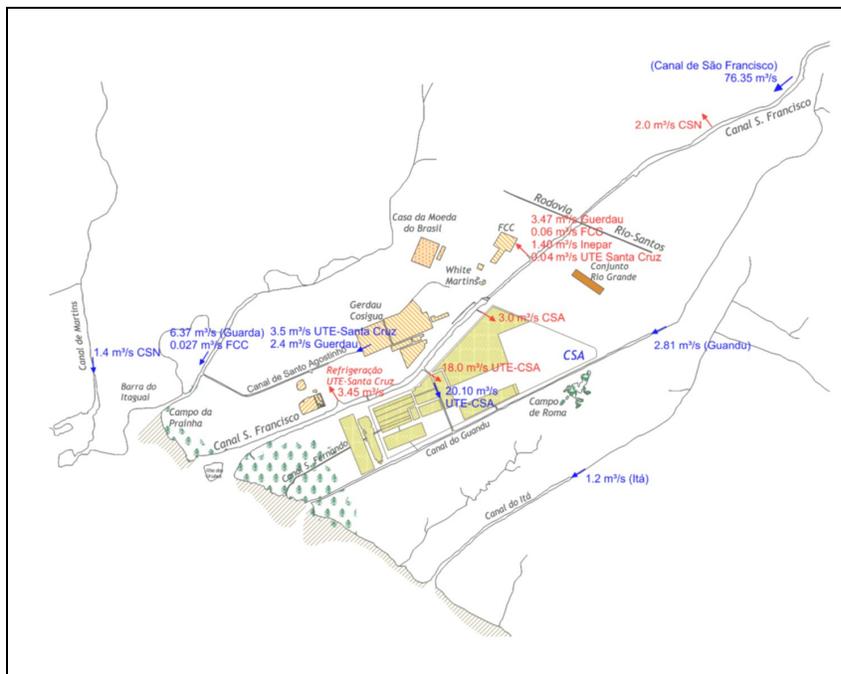
7 - As vazões captadas, no cenário atual e futuro, correspondem respectivamente aos valores 172,75 l/s e 297,32 l/s, dos quais 20% são consumidos e 4 % são lançados no rio Santana e 76% são lançados na bacia do Paraíba do Sul.

8 - A vazão captada no cenário atual correspondente ao somatório da captação na adutora de lajes (82,55 l/s), de poços artesianos (4,99 l/s) e do rio Saudoso (4,99 l/s). A vazão captada prevista para o cenário futuro é de 323,19 l/s. A vazão consumida corresponde a 20 % e a lançada no rio dos Macacos corresponde a 80% total captado.

9 - As vazões captadas, no cenário atual e futuro correspondem, respectivamente, aos valores 351,50 l/s e 809,38 l/s, dos quais 20% são consumidos e 80% são lançados no rio São Pedro.

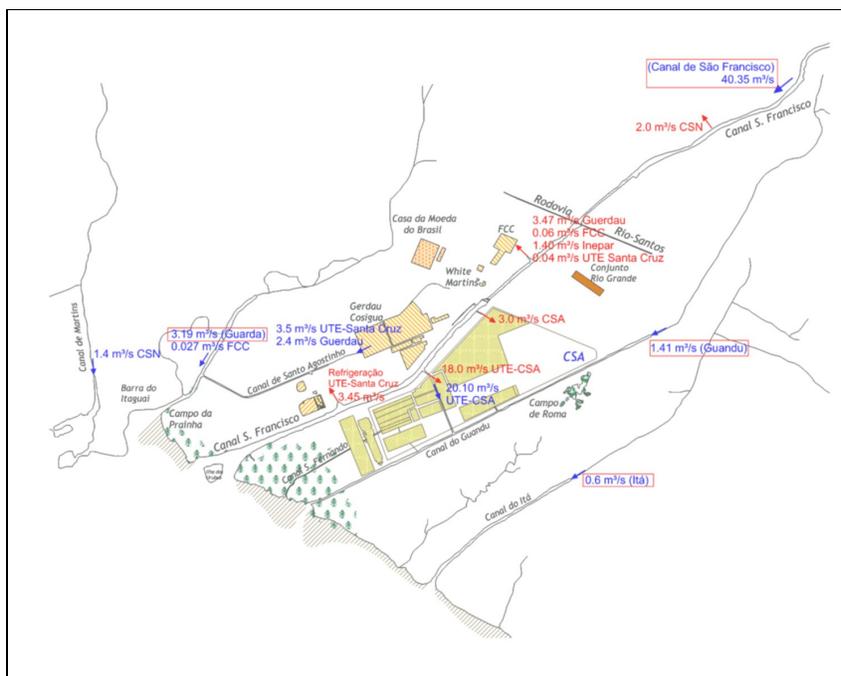
10 – Esta vazão é utilizada no processo de refrigeração da UTE Santa Cruz.

11 - A vazão da captação pela CEDAE no PERHI foi atualizada para o valor de 42,000 m³/s.



Obs: As setas em azul indicam afluência de água e as setas em vermelho indicam captação.

Figura 4.3.3.2.1 – Vazões dos diversos canais naturais e artificiais Região estuarina do rio Guandu/canal de São Francisco - Cenário atual (I.1 e I.2)



Obs: As setas em azul indicam afluência de água e as setas em vermelho indicam captação.

Figura 4.3.3.2.2 - Vazões dos diversos canais naturais e artificiais Região estuarina do rio Guandu/canal de São Francisco - Cenário de 50 anos (II.1 e II.2)

Vale ressaltar que no cenário de 50 anos, figura 4.3.3.2.2, apenas as vazões dos rios naturais foram reduzidas em 50% (envoltas por um retângulo vermelho).

4.3.3.3. Rio São João

Para o rio São João, as vazões mínimas $Q_{7,10}$ foram determinadas com base na relação de áreas de drenagem com o posto de Correntezas localizado no rio São João. A tabela 4.3.3.3.1 apresenta as vazões calculadas em cada cenário.

Tabela 4.3.3.3.1 - Vazões em cada cenário simulado - rio São João

Cenário		Vazão (m ³ /s)	
I	1	$Q_{7,10}$	14,60
	2		
II	1	$0,5 \times Q_{7,10}$	7,30
	2		

4.3.3.4. Rio Macaé

Para o estuário do rio Macaé a $Q_{7,10}$ foi calculada utilizando-se a regionalização de vazões do rio Macaé elaborada por Elpaso/Ecologus. A vazão resultante foi dividida entre os afluxos dos rios Macaé e São Pedro conforme suas larguras, próximo ao ponto de convergência. A tabela 4.3.3.4.1 resume as vazões utilizadas em cada cenário modelado.

Tabela 4.3.3.4.1 - Vazões em cada cenário simulado - rios Macaé e São Pedro

Cenário		Vazão (m ³ /s)		
			Rio Macaé	Rio São Pedro
I	1	$Q_{7,10}$	8,30	5,40
	2			
II	1	$0,5 \times Q_{7,10}$	4,20	2,70
	2			

Obs.: As vazões $Q_{7,10}$ utilizadas nesse estudo diferem das vazões $Q_{7,10}$ determinadas nos estudos hidrológicos apresentados posteriormente no relatório "R3-A – Temas Técnicos Estratégicos - RT-01 – Estudos Hidrológicos e Vazões Extremas". No entanto, as diferenças entre as vazões não trazem modificações significativas nos resultados visto que as imprecisões na base de dados utilizada, tais como, batimetria e variáveis envolvidas na calibração do modelo, são mais relevantes para a resposta do modelo.

4.3.3.5. Baía de Guanabara – Rios Iguaçu/Sarapuí, Caceribú e Guapimirim

A tabela 4.3.3.5.1 apresenta as vazões utilizadas em cada cenário simulado para os rios Iguaçu, Sarapuí, Caceribú e Guapimirim. (Malta; 2005; UFF/FEC, 2010).

**Tabela 4.3.3.5.1 - Vazões em cada cenário simulado
Rios Iguaçu, Sarapuí, Caceribú e Guapimirim**

Cenário		Vazão (m ³ /s)				
			Rio Iguaçu	Rio Sarapuí	Rio Caceribú	Rio Guapimirim
I	1	$Q_{7,10}$	12,94	3,80	8,38	1,42
	2					
II	1	$0,5 \times Q_{7,10}$	6,47	1,90	4,19	0,71
	2					

Obs.: As vazões $Q_{7,10}$ utilizadas nesse estudo diferem das vazões $Q_{7,10}$ determinadas nos estudos hidrológicos apresentados posteriormente no relatório "R3-A – Temas Técnicos Estratégicos - RT-01 – Estudos Hidrológicos e Vazões Extremas". No entanto, as diferenças entre as vazões não trazem modificações significativas nos resultados visto que as imprecisões na base de dados utilizada, tais como, batimetria e variáveis envolvidas na calibração do modelo, são mais relevantes para a resposta do modelo.

As vazões ($Q_{7,10}$) utilizadas para os demais rios afluentes à Baía de Guanabara são: canal do Cunha ($1,44 \text{ m}^3/\text{s}$); rio Irajá ($0,65 \text{ m}^3/\text{s}$); rio São João de Meriti ($3,89 \text{ m}^3/\text{s}$); rio Estrela ($8,15 \text{ m}^3/\text{s}$); rio Suruí ($1,27 \text{ m}^3/\text{s}$); rio Iriri ($0,20 \text{ m}^3/\text{s}$); rio Roncador ($2,55 \text{ m}^3/\text{s}$); rio Imboassú ($0,28 \text{ m}^3/\text{s}$); rio Guapi-açu ($6,44 \text{ m}^3/\text{s}$); rio Guaraí ($0,31 \text{ m}^3/\text{s}$); rio Macacu ($6,02 \text{ m}^3/\text{s}$) e rio Guaxindiba ($0,28 \text{ m}^3/\text{s}$). Para os Cenários de 50 anos, tais vazões também sofreram um decréscimo de 50%.

4.3.4. Maré

A força motriz principal que provoca o movimento das águas nos estuários é a força relacionada ao gradiente de pressão, associado à diferença de nível d'água – gradiente de pressão barotrópico. Neste aspecto a maré local é o principal agente que rege a dinâmica do estuário.

Nos trechos dos rios que não se encontram sob a influência das marés, o gradiente barotrópico é uma função, basicamente, da vazão a montante do trecho. Quanto maior for esta vazão, maior será a declividade da linha d'água, provocando maiores velocidades hidrodinâmicas. É o que ocorre em períodos de cheia. Em épocas de estiagem, as vazões a montante do trecho são diminuídas, assim como o gradiente de pressão barotrópico, resultando em menores velocidades.

Em regiões estuarinas, no entanto, o gradiente barotrópico ganha uma nova variável: o nível d'água do mar. As oscilações periódicas do nível do mar, as quais são acompanhadas de correntes horizontais, são chamadas de marés. Essas são geradas pela resultante entre as forças gravitacionais e centrípetas exercidas pelos astros, principalmente entre a Terra, o Sol e a Lua – marés astronômicas.

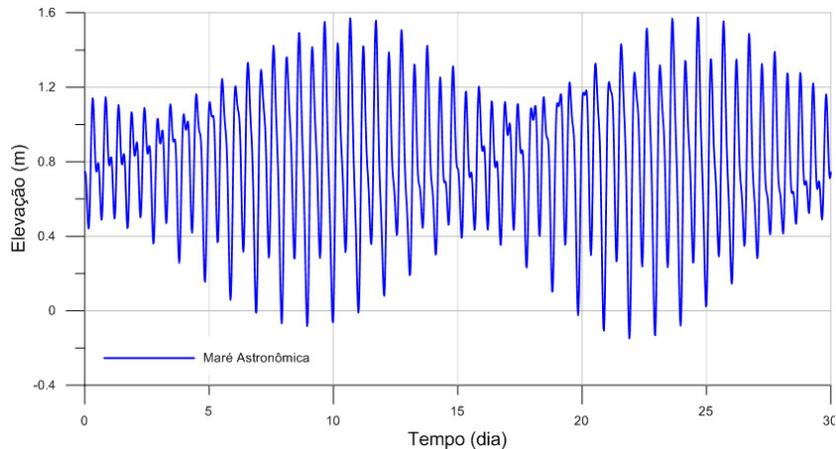
Em geral, as marés apresentam um comportamento semidiurno, ou seja, com duas preamares e duas baixamars ao dia, embora sejam observadas marés diurnas – com um ciclo de maré por dia, em regiões de maiores latitudes. No Estado do Rio de Janeiro, as marés são semidiurnas ao longo de toda a sua costa.

4.3.4.1. Rio Paraíba do Sul

Os dados de entrada na fronteira aberta (fronteira com o mar) do modelo do rio Paraíba do Sul, para cada cenário modelado, são apresentados a seguir, onde também é feita uma breve discussão a respeito dos critérios conservadores utilizados para estabelecer as marés meteorológicas introduzidas no modelo. Vale ressaltar que esses critérios foram utilizados também nos modelos simulados para os estuários dos rios Guandu, São João, Macaé e afluentes à baía de Guanabara. Portanto, não são descritos novamente nos itens respectivos a cada um desses estuários.

- Cenário atual – Típico (I.1)

A figura 4.3.4.1.1 apresenta a maré astronômica típica da região da embocadura do rio Paraíba do Sul, utilizada no cenário atual. Observa-se que ocorrem dez ciclos de maré a cada cinco dias, ou dois ciclos por dia, caracterizando uma maré semidiurna.



Obs: Estação maregráfica Fundeio 2 Norte - Oceânica (22° 2' S, 39° 52,0'). Mês de referência: Jan/2012. NMM=0,8m.

Figura 4.3.4.1.1 – Maré astronômica utilizada na simulação - rio Paraíba do Sul
Cenário atual: Típico (I.1)

Vale ressaltar que a estação maregráfica mais próxima à região de interesse é a de Fundeio 2 Norte – Oceânica (22° 2' S e 39° 52,0' O). Nesse local, o nível médio do mar (NMM) é de 0,8 m. A Maré astronômica apresentada na figura 4.3.4.1.1 refere-se ao mês de Janeiro de 2012.

- Cenário atual – Extremo (I.2)

No Cenário atual – Típico (I.1), figura 4.3.4.1.1, o nível médio do mar foi considerado constante, com o valor de 0,8 m. No entanto, devido à entrada de frentes frias, é comum ocorrer oscilações do nível médio do mar. Este efeito é chamado de maré meteorológica e se dá pelo empilhamento de água na costa, resultante dos ventos que acompanham as frentes. A figura 4.3.4.1.2 ilustra a oscilação do nível d'água com influência de uma maré meteorológica genérica¹.

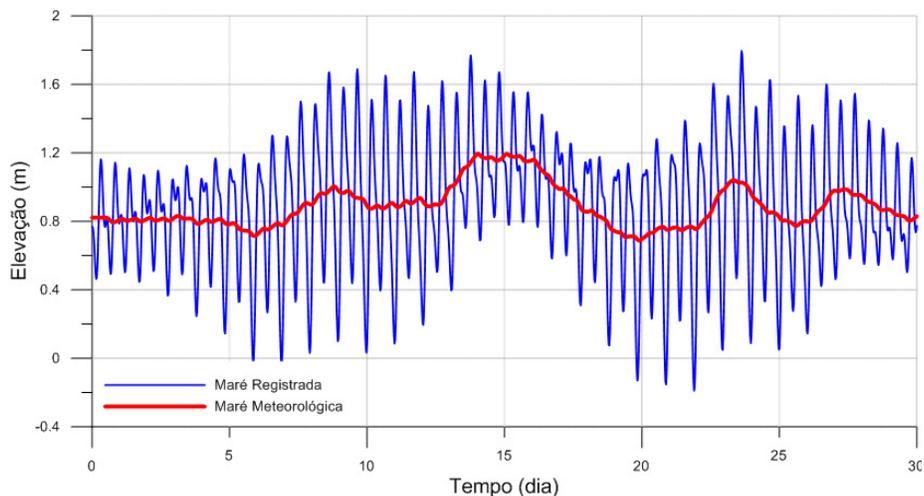
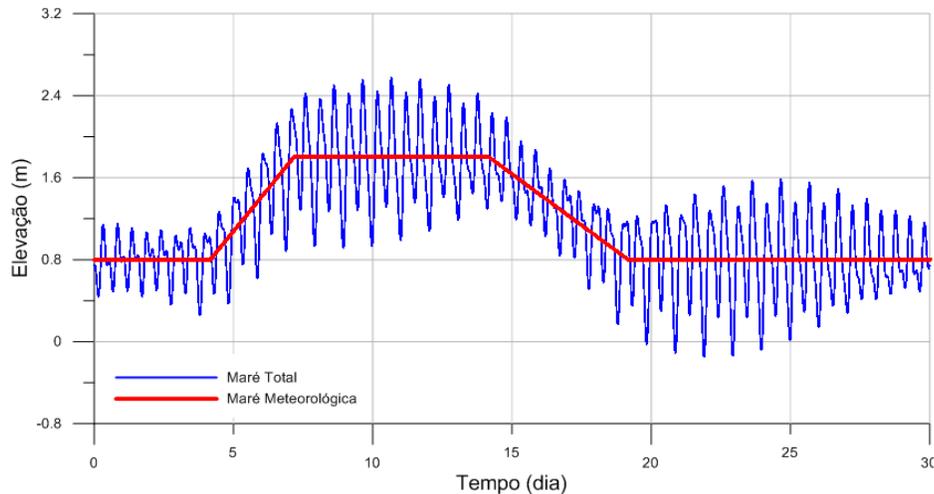


Figura 4.3.4.1.2 - Maré astronômica idêntica a da figura 4.3.4.1.1, somada a uma maré meteorológica genérica.

¹ A maré meteorológica da figura 4.3.4.1.2 não foi inserida no modelo hidrodinâmico. Serve apenas para exemplificar uma maré meteorológica típica no Estado do Rio de Janeiro.

Comparando-se as figuras 4.3.4.1.1 e 4.3.4.1.2, são observadas nitidamente as alterações provocadas pela inserção da maré meteorológica.

No entanto, como descrito no item 3 (Cenários Modelados), a maré meteorológica a ser inserida no modelo deve subir durante 3 dias gerando uma sobre-elevação de 0,8 m no nível médio do mar, em dia de maré de sizígia, permanecer durante 7 dias e descer durante 5 dias. Assim, a maré que foi inserida no modelo do cenário atual (Extremo I.2) é apresentado na figura 4.3.4.1.3 que corresponde a maré astronômica idêntica à da figura 4.1.3.1, somada à maré meteorológica estabelecida com as condições desse cenário.



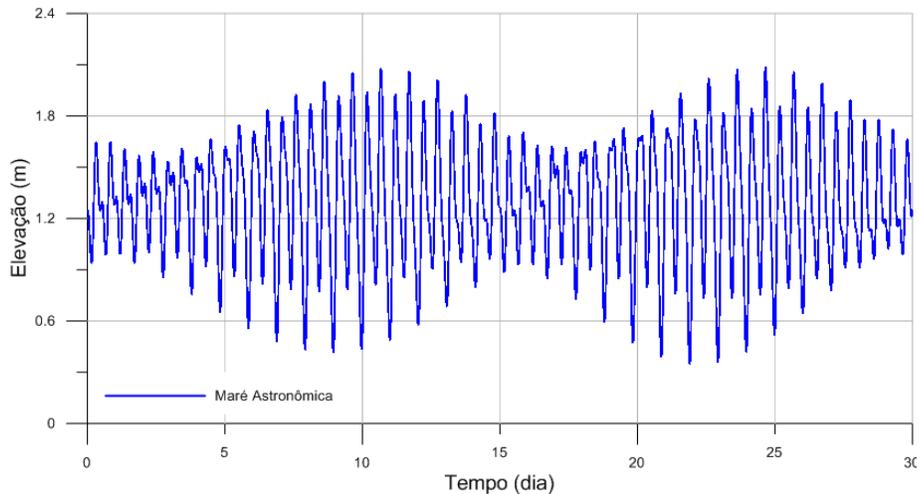
Obs: maré astronômica da Figura 4.3.4.1.1, somada à maré meteorológica do cenário atual-extremo (I.2).

Figura 4.3.4.1.3 - Maré utilizada na simulação - rio Paraíba do Sul - Cenário atual: Extremo (I.2)

Observa-se nitidamente o caráter conservador deste cenário, mostrado na figura 4.3.4.1.3, frente a uma maré típica no Estado do Rio de Janeiro (figura 4.3.4.1.2).

- Cenário de 50 anos – Típico (II.1)

De acordo com o item 3, este cenário caracteriza uma situação de maré com efeitos de mudanças climáticas no nível médio do mar, o qual deve subir 0,5 m em relação ao nível atual. Portanto, o novo nível médio do mar passa a ser de 1,3 m. A figura 4.3.4.1.4 apresenta a maré utilizada para este cenário no rio Paraíba do Sul.



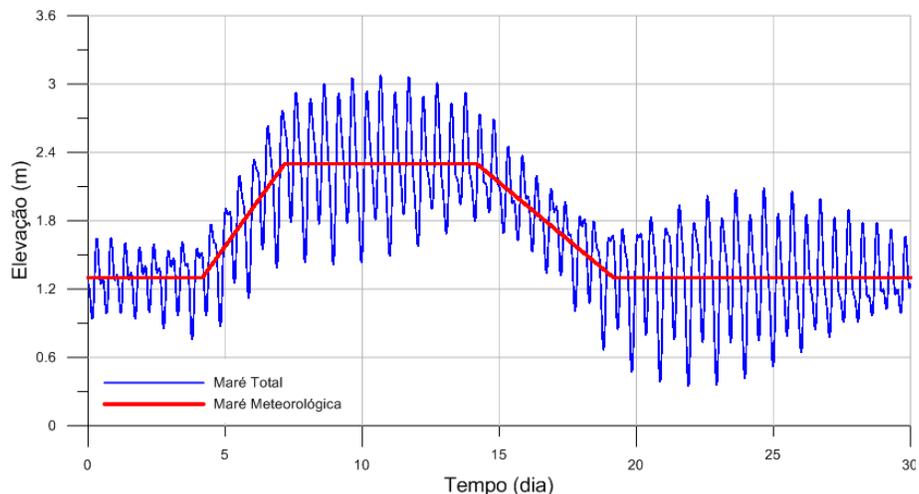
Obs: Estação maregráfica Fundeio 2 Norte - Oceânica (22° 2' S, 39° 52,0'). Mês de referência: Jan/2012. NMM=1,3m (+0,5m).

Figura 4.3.4.1.4 – Maré astronômica utilizada na simulação Rio Paraíba do Sul - Cenário de 50 anos: Típico (II.1)

Vale destacar que a maré astronômica utilizada na simulação foi gerada para o mês de Janeiro de 2012, com as constantes harmônicas da estação maregráfica de Fundeio 2 Norte – Oceânica (22° 2' S e 39° 52,0' O). O NMM foi aumentado em 0,5 m, passando a ser de 1,3 m.

- Cenário de 50 anos – Extremo (II.2)

Para as marés, as condições extremas deste cenário englobam, além da elevação do nível do mar em 0,5 m, marés meteorológicas de até 1,0 m. Novamente, o tempo de subida da maré meteorológica é de 3 dias, mantendo-se por 7 dias e descendo por 5 dias, durante as marés de sizígia. A figura 4.3.4.1.5 apresenta a maré utilizada para o rio Paraíba do Sul.



Obs: maré astronômica da figura 4.3.4.1.4, somada à maré meteorológica do cenário de 50 anos – extremo (II.2).

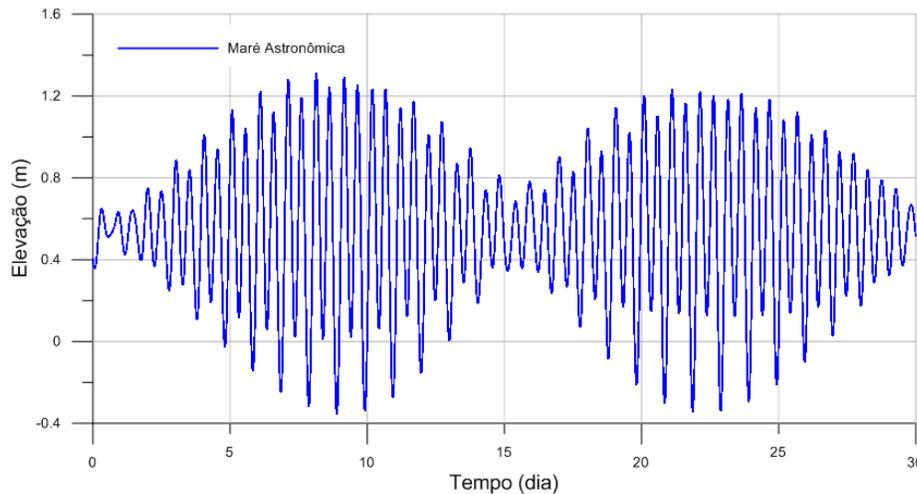
Figura 4.3.4.1.5 – Maré utilizada na simulação Rio Paraíba do Sul - Cenário de 50 anos: Extremo (II.2)

Destaca-se que a maré utilizada nas simulações figura 4.3.4.1.5, tem como base a Maré astronômica idêntica a da figura 4.3.4.1.4, somada à maré meteorológica estabelecida com as condições extremas estabelecidas no cenário de 50 anos (extremo II.2).

4.3.4.2. Rio Guandu/Canal de São Francisco

Para cada cenário simulado com o modelo hidrodinâmico do rio Guandu/canal de São Francisco, foram introduzidas marés nas fronteiras abertas do modelo. As marés utilizadas nas simulações estão reunidas nas figuras 4.3.4.2.1 a 4.3.4.2.4, apresentadas nos itens a seguir.

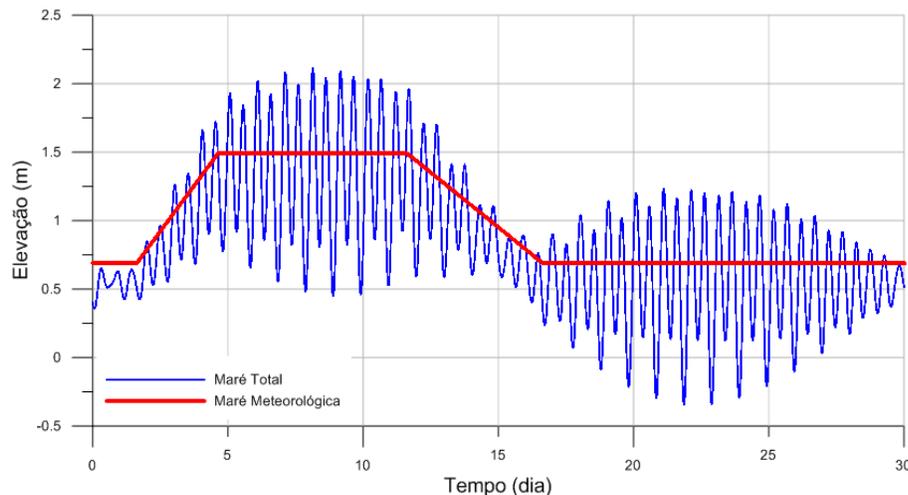
- Cenário atual – Típico (I.1)



Obs: Estação maregráfica Ponta Guaia - RJ (22° 55,7' S e 43° 50,6' O). Mês de referência: Jan/2012. NMM=0,69m.

Figura 4.3.4.2.1 – Maré utilizada nas simulações Rio Guandu/canal de São Francisco - Cenário atual: Típico (I.1)

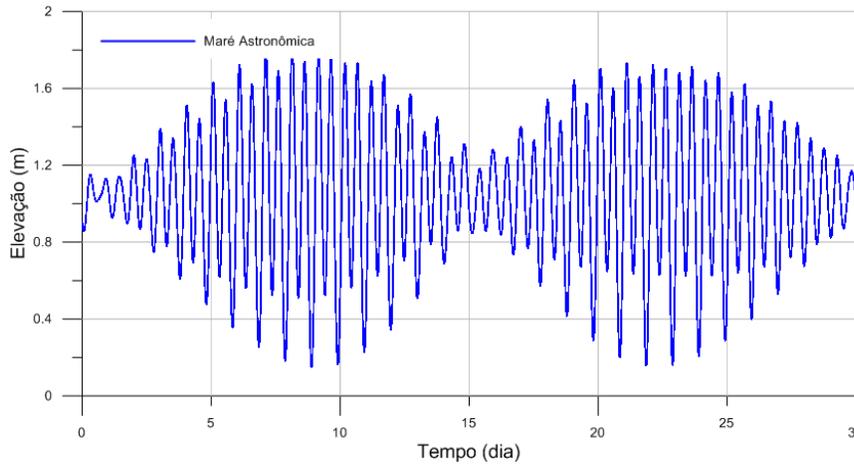
- Cenário atual – Extremo (I.2)



Obs: maré astronômica da figura 4.3.4.2.1, somada à maré meteorológica do cenário atual-extremo (I.2).

Figura 4.3.4.2.2 - Maré utilizada nas simulações Rio Guandu/canal de São Francisco - Cenário atual: Extremo (I.2)

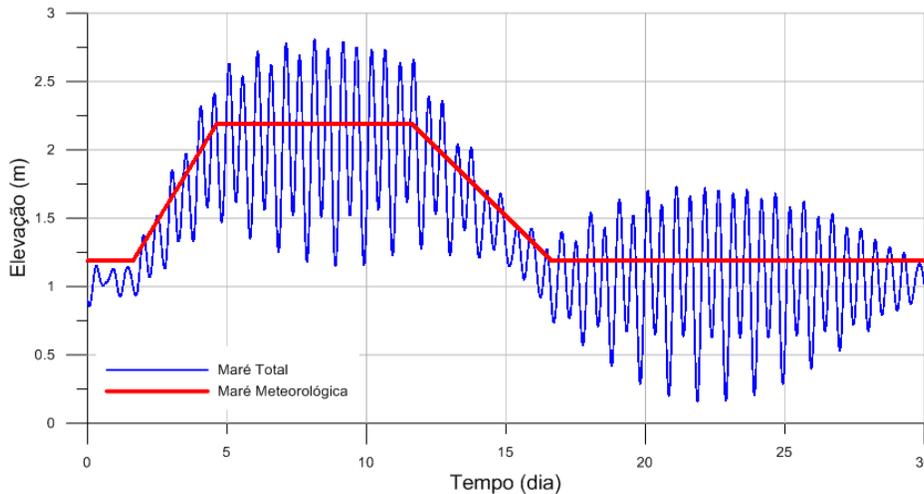
- Cenário de 50 anos – Típico (II.1)



Obs: Estação Ponta Guaiá - RJ (22° 55,7' S e 43° 50,6' O). Mês de referência: Jan/2012. NMM = 1,19m (+0,5m).

Figura 4.3.4.2.3 - Maré utilizada nas simulações
Rio Guandu/canal de São Francisco - Cenário de 50 anos: Típico (II.1)

- Cenário de 50 anos – Extremo (II.2)



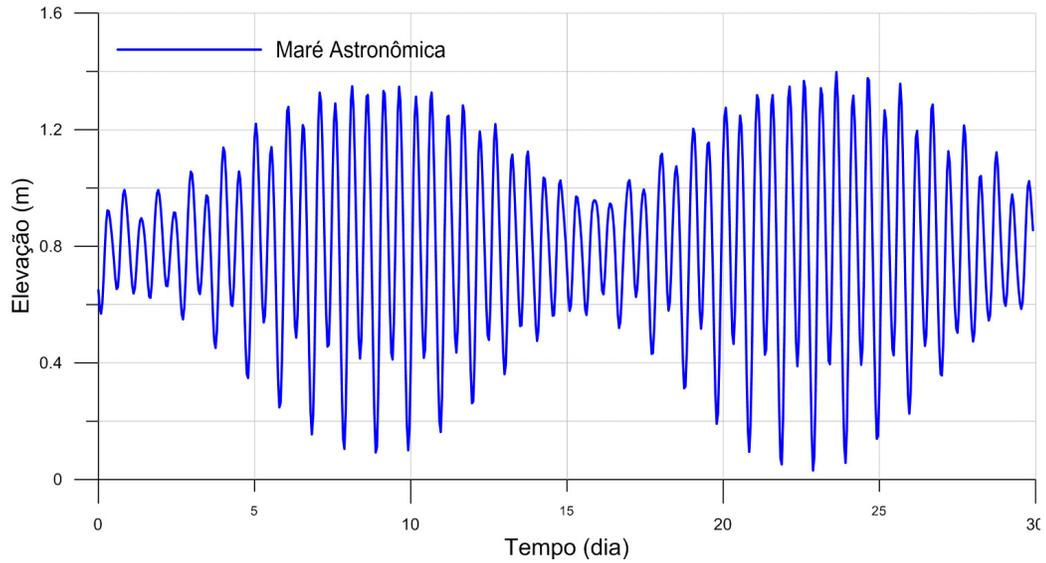
Obs: maré astronômica da figura 4.3.4.2.3, somada à maré meteorológica do cenário de 50 anos – extremo (II.2).

Figura 4.3.4.2.4 - Maré utilizada nas simulações
Rio Guandu/canal de São Francisco - Cenário de 50 anos: Extremo (II.2)

4.3.4.3. Rio São João

Para o modelo hidrodinâmico do rio São João, as marés reunidas nas figuras 4.3.4.3.1 a 4.3.4.3.4 foram introduzidas nas fronteiras abertas de cada cenário simulado, conforme apresentado nos itens a seguir.

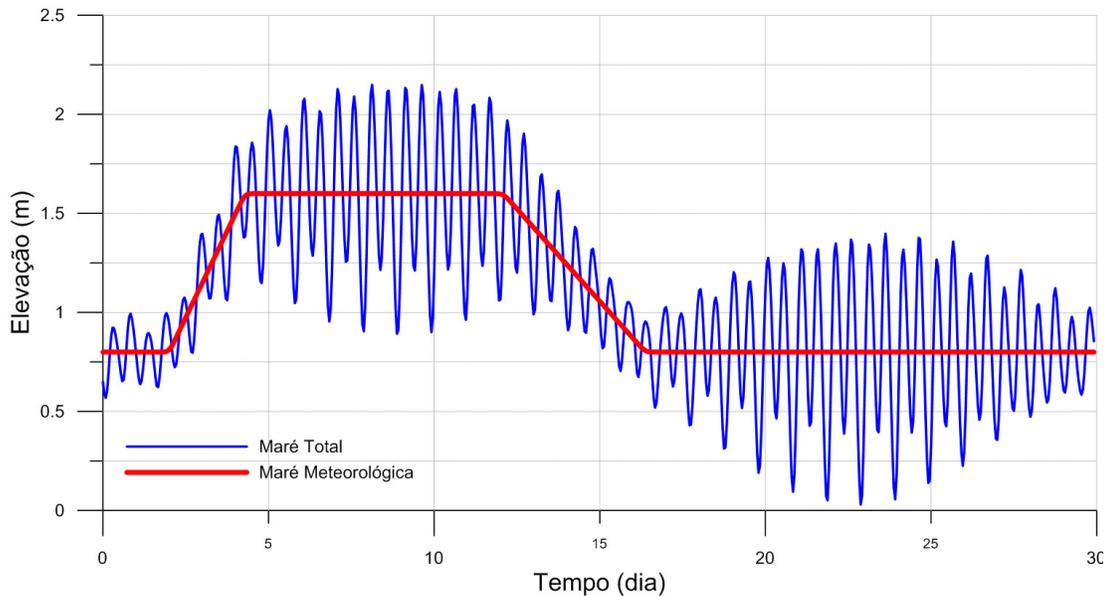
- Cenário atual – Típico (I.1)



Obs: Estação maregráfica Rio das Ostras - RJ (22°31,5' S e 41°56,5' O). Mês de referência: Jan/2012. NMM = 0,72m.

**Figura 4.3.4.3.1 - Maré utilizada nas simulações
Rio São João - Cenário atual: Típico (I.1)**

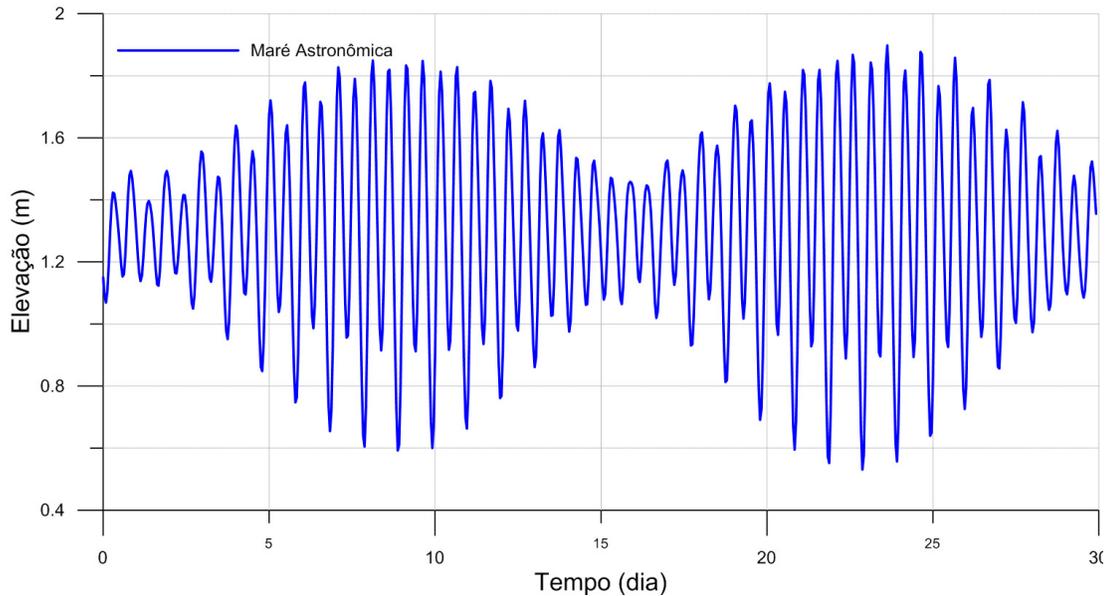
- Cenário atual – Extremo (I.2)



Obs: Maré astronômica da figura 4.3.4.3.1, somada à maré meteorológica do cenário atual-extremo (I.2).

**Figura 4.3.4.3.2 - Maré utilizada nas simulações
Rio São João - Cenário atual: Extremo (I.2)**

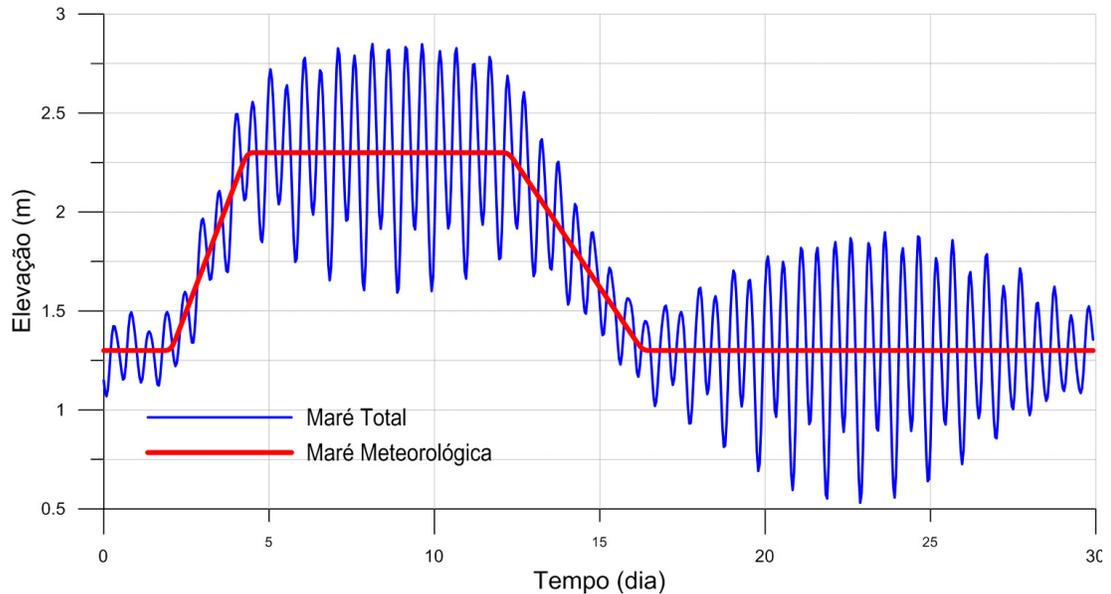
- Cenário de 50 anos – Típico (II.1)



Obs: Estação maregráfica Rio das Ostras - RJ (22°31,5' S e 41° 56,5' O). Mês de referência: Jan/2012. NMM = 1,22m (+0,5m).

Figura 4.3.4.3.3 - Maré utilizada nas simulações
Rio São João – Cenário de 50 anos: Extremo (II.2)

- Cenário de 50 anos – Extremo (II.2)



Obs: maré astronômica da figura 4.3.4.3.3, somada à maré meteorológica do cenário de 50 anos – extremo (II.2).

Figura 4.3.4.3.4 - Maré utilizada nas simulações
Rio São João – Cenário de 50 anos: Extremo (II.2)

4.3.4.4. Rio Macaé

Para o modelo hidrodinâmico do rio Macaé, as marés das figuras 4.3.4.4.1 a 4.3.4.4.4 foram introduzidas nas fronteiras abertas de cada cenário simulado, de acordo com os itens apresentados a seguir.

- Cenário atual – Típico (I.1)

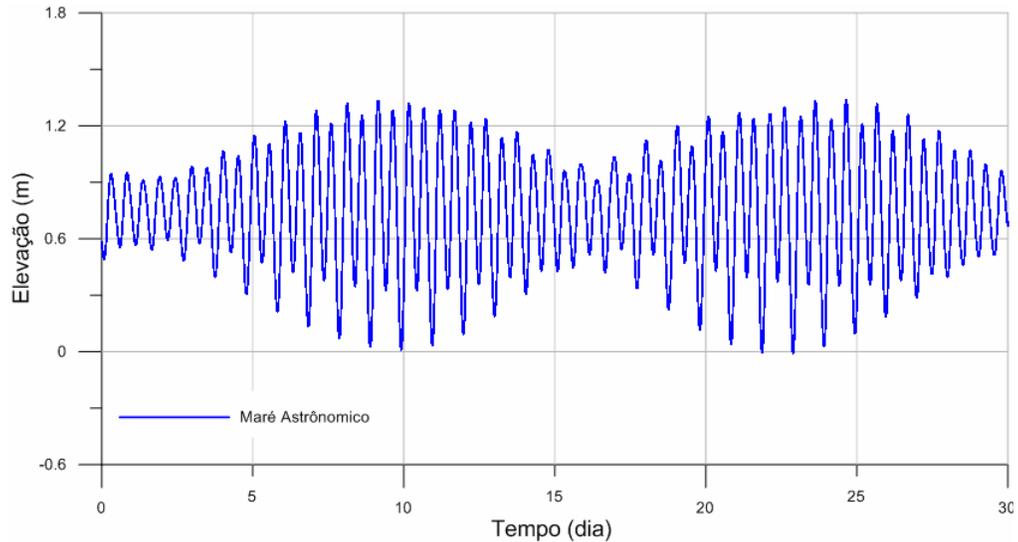


Figura 4.3.4.4.1 - Maré utilizada nas simulações
Rio Macaé – Cenário atual: Típico (I.1)

- Cenário atual – Extremo (I.2)

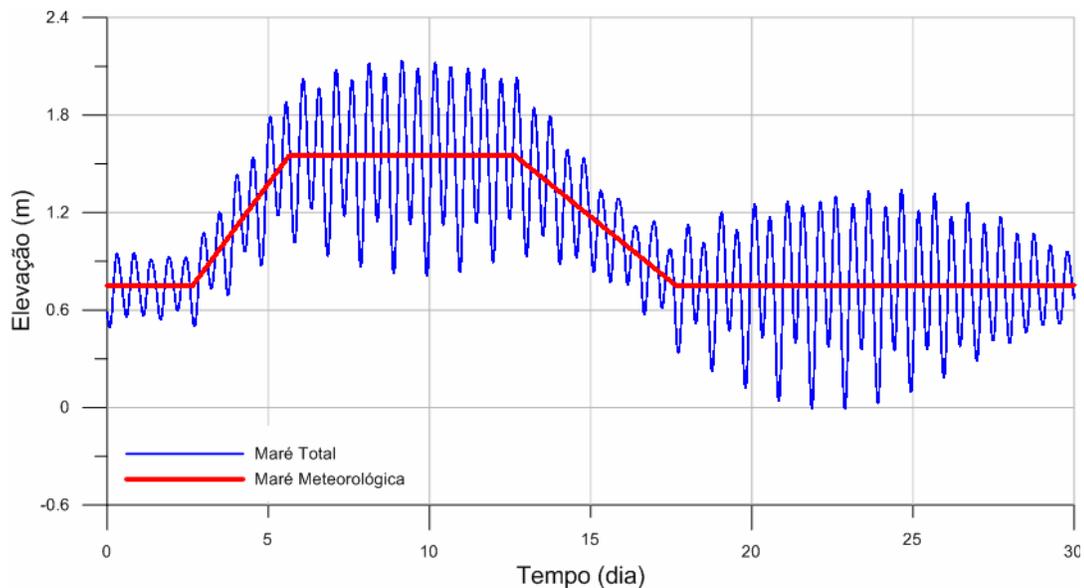
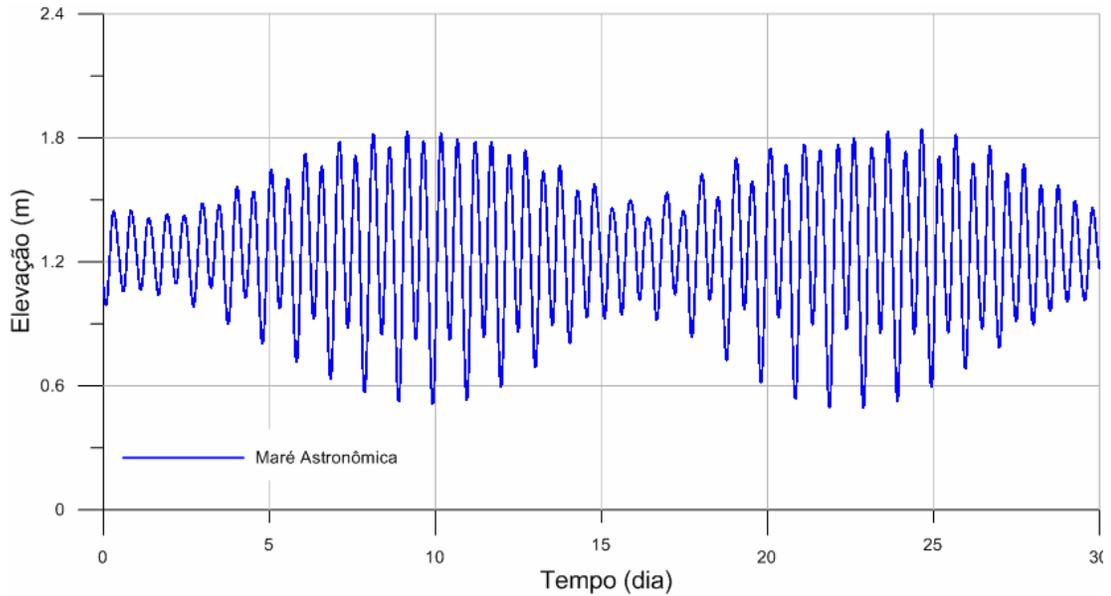


Figura 4.3.4.4.2 - Maré utilizada nas simulações
Rio Macaé – Cenário atual: Extremo (I.2)

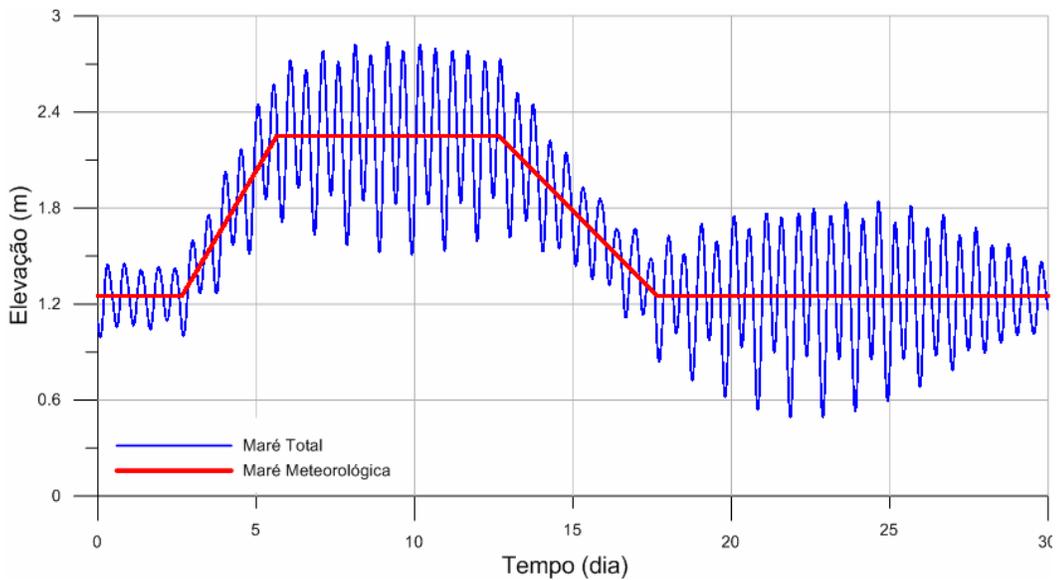
- Cenário de 50 anos – Típico (II.1)



Obs: Estação maregráfica Porto Macaé - RJ (22° 23,0' S e 41° 47,0' O). Mês de referência: Jan/2012. NMM = 1,25m (+0,5m).

Figura 4.3.4.4.3 - Maré utilizada nas simulações
Rio Macaé – Cenário de 50 anos: Típico (II.1)

- Cenário de 50 anos – Extremo (II.2)



Obs: Maré astronômica da figura 4.3.4.4.3, somada à maré meteorológica do cenário de 50 anos – extremo (II.2).

Figura 4.3.4.4.4 - Maré utilizada nas simulações
Rio Macaé – Cenário de 50 anos: Extremo (II.2)

4.3.4.5. Baía de Guanabara – Rios Iguaçu/Sarapuí, Caceribú e Guapimirim

Para o modelo hidrodinâmico da Baía de Guanabara, as marés reunidas nas figuras 4.3.4.5.1 a 4.3.4.5.4 foram introduzidas nas fronteiras abertas de cada cenário.

- Cenário atual – Típico (I.1)

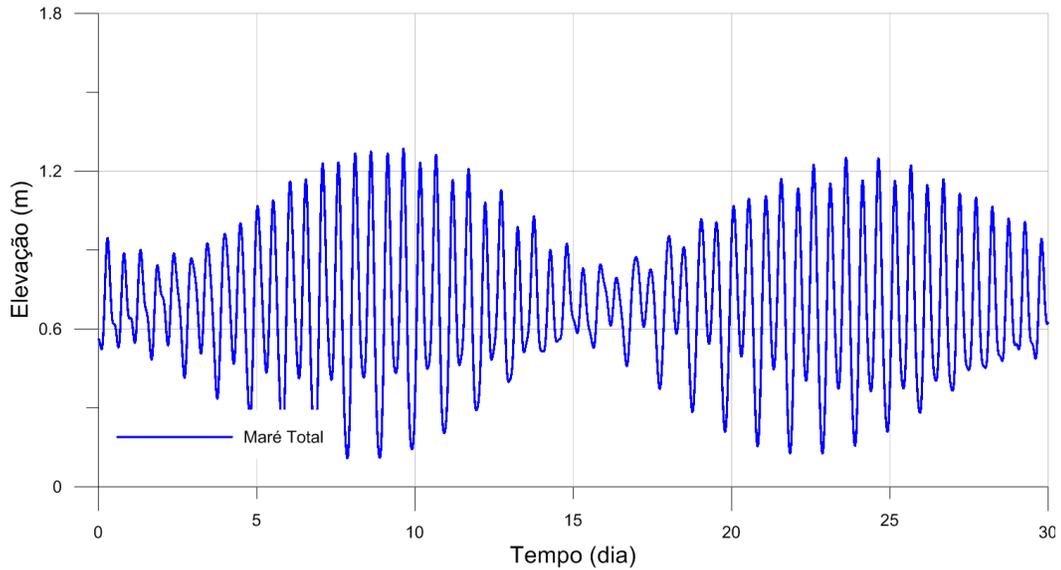


Figura 4.3.4.5.1 - Maré utilizada nas simulações Baía de Guanabara - Cenário atual: Típico (I.1)

- Cenário atual – Extremo (I.2)

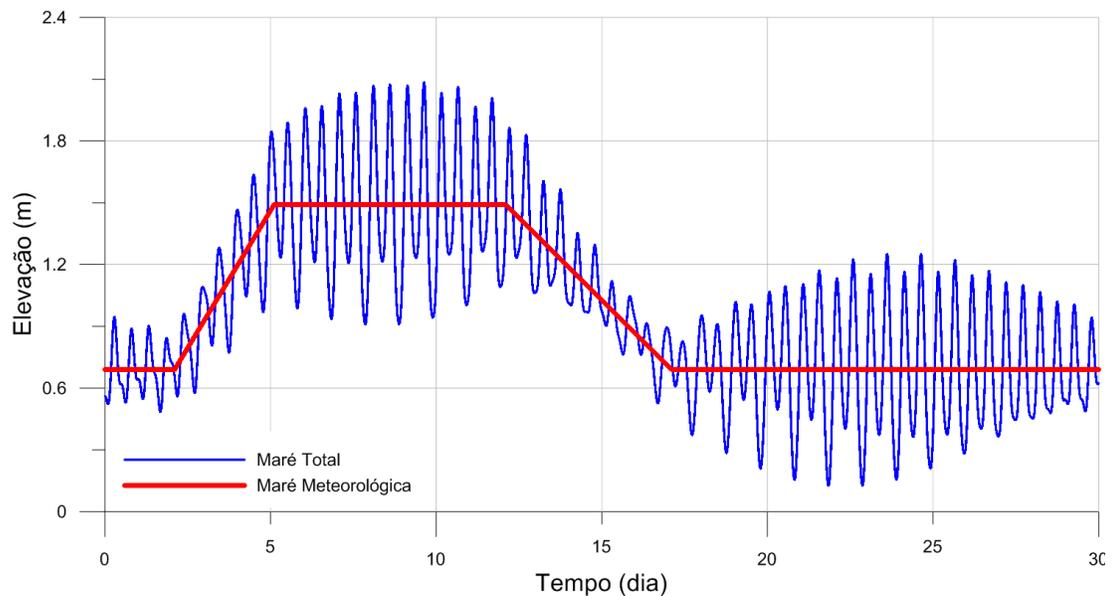
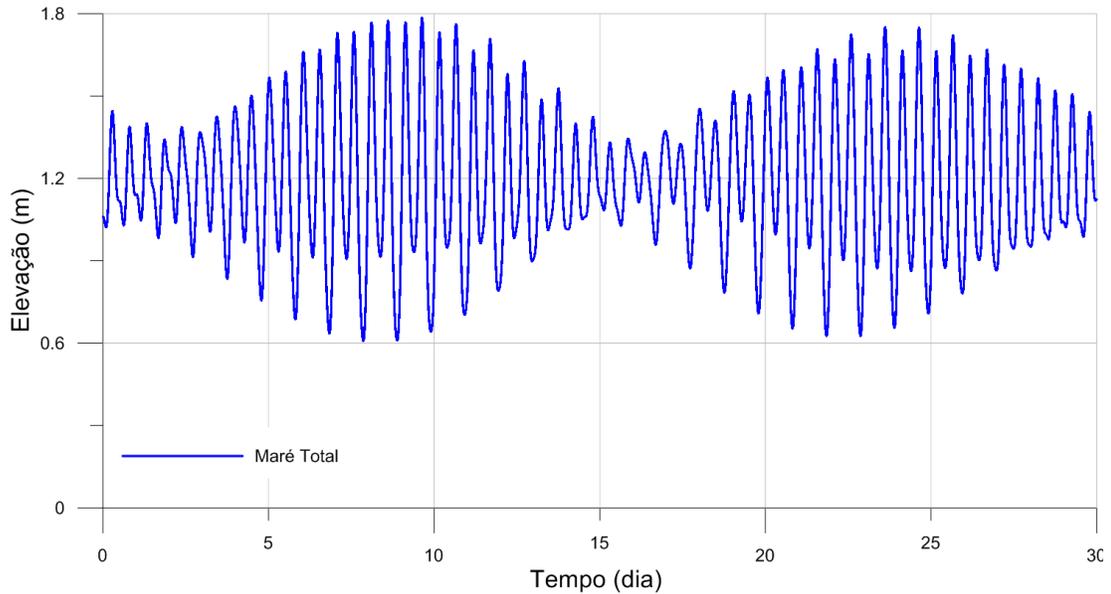


Figura 4.3.4.5.2 - Maré utilizada nas simulações Baía de Guanabara - Cenário atual: Extremo (I.2).

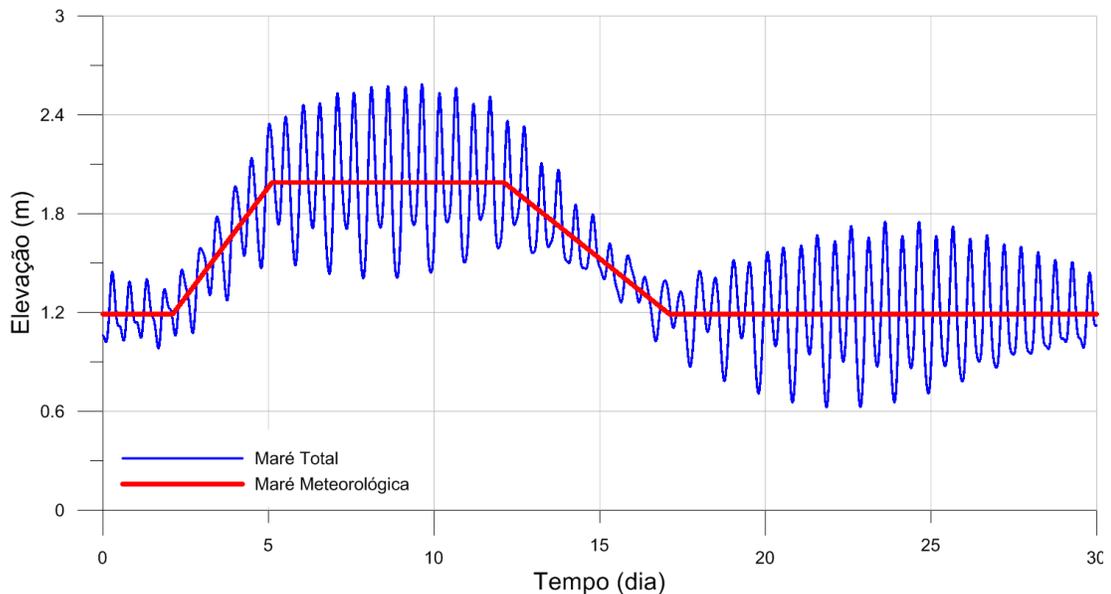
- Cenário de 50 anos – Típico (II.1)



Obs: Estação maregráfica Ilha Fiscal - RJ (22° 53,8' S e 43° 09,9' O). Mês de referência: Jan/2012. NMM = 1,19m (+0,5m).

Figura 4.3.4.5.3 - Maré utilizada nas simulações
Baía de Guanabara - Cenário de 50 anos: Típico (II.1)

- Cenário de 50 anos – Extremo (II.2)



Obs: Maré astronômica da figura 4.3.4.5.3, somada à maré meteorológica do cenário de 50 anos – extremo (II.2).

Figura 4.3.4.5.4 - Maré utilizada nas simulações
Baía de Guanabara - Cenário de 50 anos: Extremo (II.2)

4.3.5. Salinidade

Uma outra força motriz que deve ser levada em consideração no estudo dos estuários é a força relacionada ao gradiente de pressão associado à diferença de densidade das águas contidas nos estuários – gradiente de pressão baroclínico.

A massa específica das águas é uma função dos constituintes que nela estão inseridos, como o sal, a temperatura², a concentração de sedimentos em suspensão etc. No entanto, na maioria dos sistemas estuarinos – e em todos que estão sendo analisados neste trabalho, o sal é o constituinte que mais influência no gradiente de pressão baroclínico.

No caso dos estuários, a força gerada pelo gradiente baroclínico estará sempre na direção de jusante para montante, devido à diferença de salinidade entre o mar e a água doce dos rios, dificultando o escoamento das águas provenientes dos rios.

Para representar este efeito o *SisBaHiA*[®] permite o acoplamento do modelo hidrodinâmico com o de qualidade de água. Isso permite que a cada cálculo feito, o modelo hidrodinâmico leve em consideração a diferença de salinidade das regiões e, portanto, o gradiente baroclínico.

Para todos os estuários a salinidade do mar foi considerada igual a 35 ups³ e a salinidade afluyente aos rios igual a 0 ups. Na análise dos resultados, a água foi considerada salgada a partir de 0,5 ups.

Para o caso do rio Guandu/canal de São Francisco, como o modelo apenas abrange uma pequena parte interna da Baía de Sepetiba, considerou-se que a fronteira aberta do modelo tem salinidade de 32 ups. Esse valor foi retirado de trabalhos anteriores, em que foi modelada toda a região da baía.

4.3.6. Vento

Os efeitos dos ventos locais só são relevantes quando a sua área de atuação – pista, é bastante extensa. No caso dos rios, o fluxo é bem encaixado na margem e dominado pela vazão do rio e pelos efeitos das marés.

Mesmo assim, para que o pior caso possível fosse retratado, exceto na modelagem da Baía de Guanabara, utilizou-se ventos permanentes e uniformes com a mesma direção do eixo principal dos rios, no sentido de jusante para montante e magnitude igual a 5 m/s.

Assim, para o caso do rio Paraíba do Sul o vento inserido foi de Nordeste e com magnitude de 5 m/s.

No caso da Baía de Guanabara foi utilizado um registro de ventos típicos da região, ilustrado na figura 4.3.6.1.

² Apesar da temperatura não ser propriamente uma substância que esteja diluída na água, ela pode ser considerada um constituinte.

³ ups – Unidades Práticas de Salinidade.

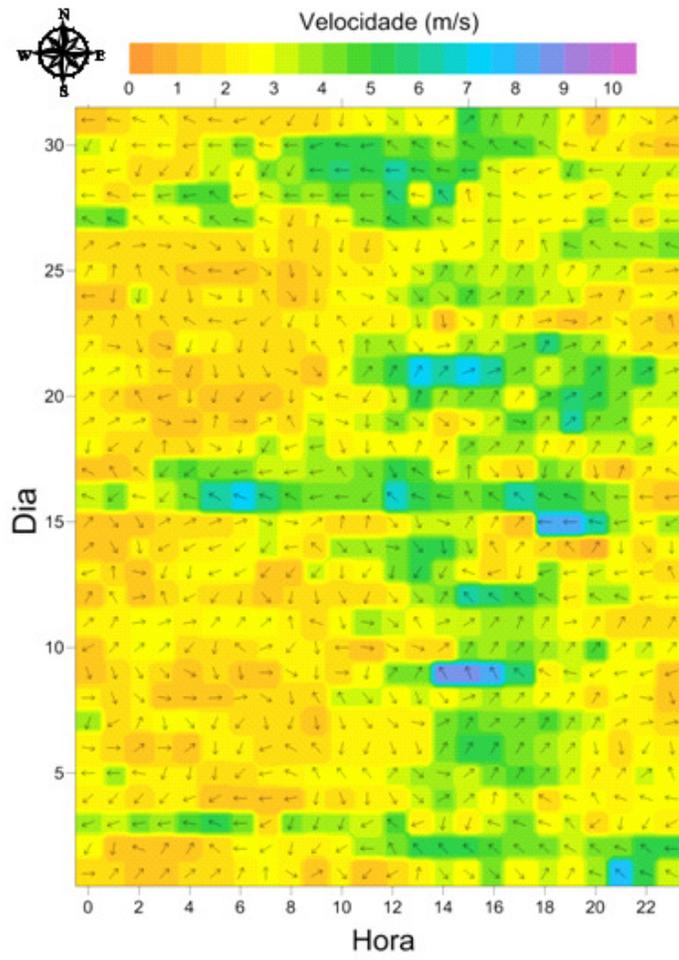


Figura 4.3.6.1 - Regime de ventos típicos utilizados no modelo da Baía de Guanabara

5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados do modelo hidrodinâmico, acoplado ao de qualidade de água, para as cinco regiões estuarinas analisadas com o *SisBaHiA*[®]. A modelagem contemplou um período de 30 dias, em todos os casos, apresentando dois períodos de quadratura e sizígia, como indicados no item 4.3.4, “Maré”.

Para o rio Paraíba do Sul é realizada uma análise mais detalhada a respeito das zonas de oscilação de níveis d’água (ZNA), de inversão de correntes (ZIC) e de mistura (ZM), enquanto que para as demais regiões estuarinas os resultados são apresentados de forma resumida.

5.1. Rio Paraíba do Sul

Para o estuário do rio Paraíba do Sul, os resultados obtidos são apresentados a seguir.

- Cenário atual – Típico (I.1)

Zona de oscilações de níveis de água – ZNA

Os resultados do modelo hidrodinâmico do *SisBaHiA*[®] para o cenário de marés típicas mostram que há efeitos de oscilação de níveis d’água além da região limite da modelagem – às margens da cidade de Campos de Goytacazes. Em marés de sizígia, tais oscilações atingem cerca de 30 cm.

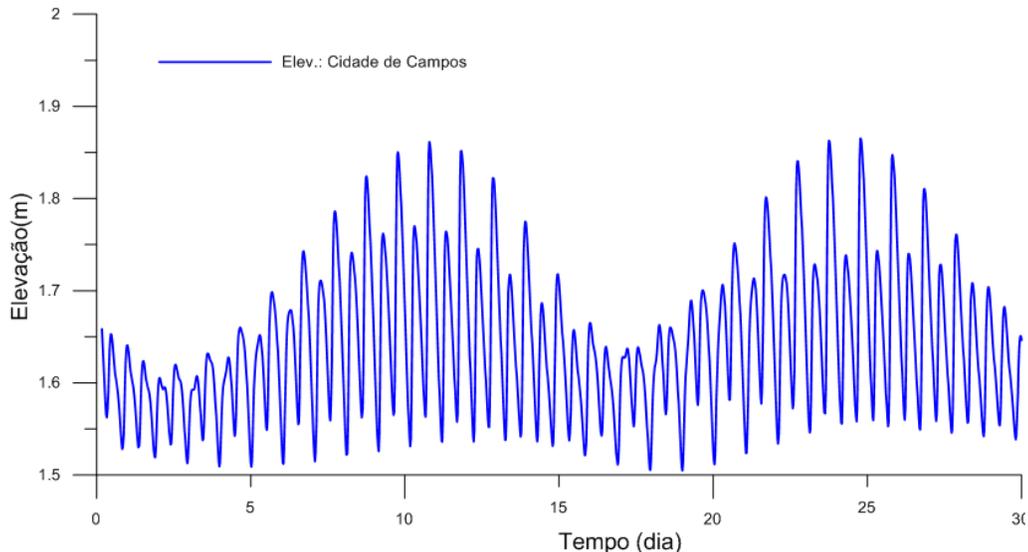


Figura 5.1.1 - Série de elevações temporais em um trecho às margens da Cidade de Campos dos Goytacazes – limite do modelo hidrodinâmico.

Zona de inversão de correntes – ZIC

A figura 5.1.2 mostra o limite da zona de inversão de correntes para o cenário de marés típicas. Nela está representado o instante da maré de sizígia em que o limite da ZIC se estendeu mais para montante do rio Paraíba do Sul.

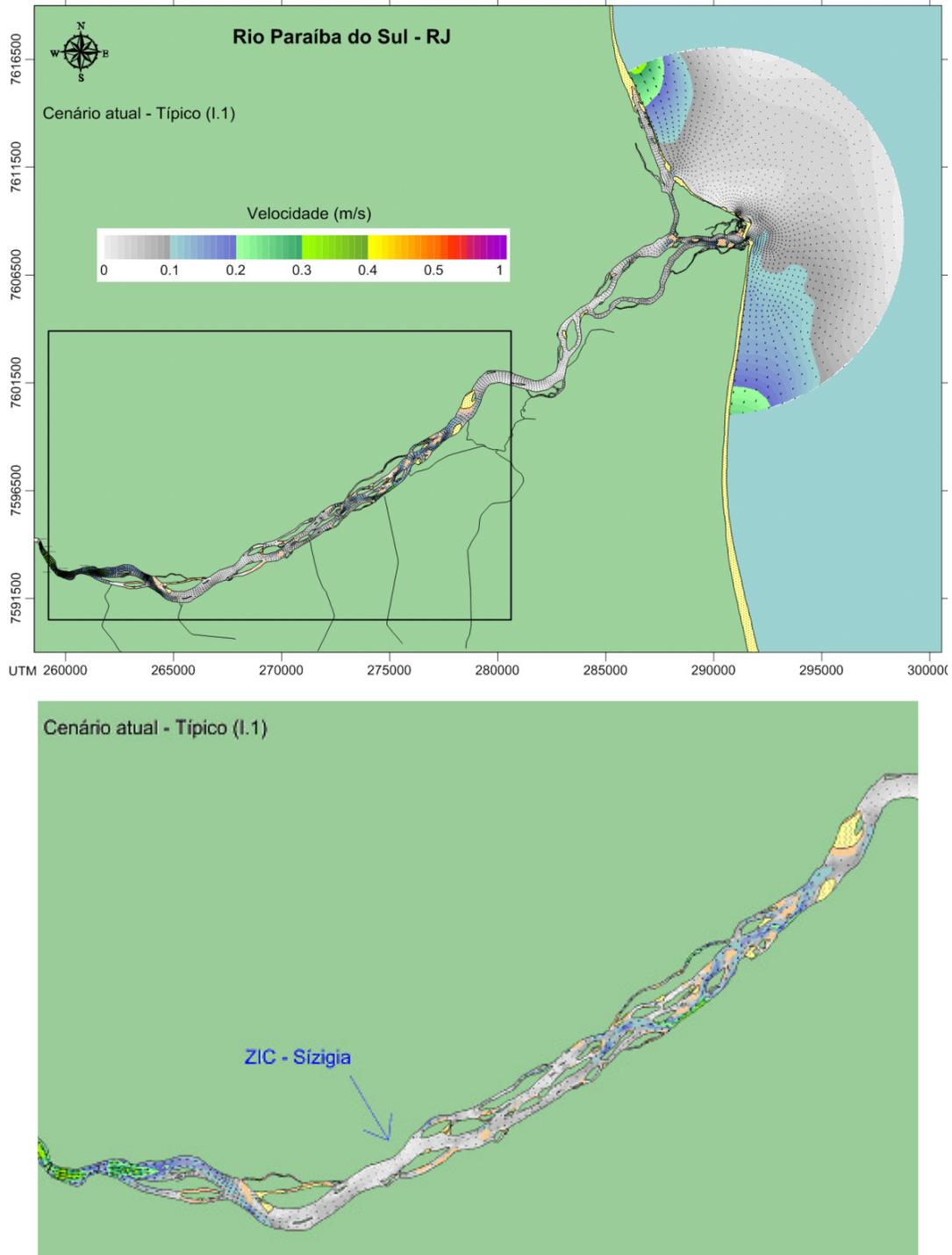


Figura 5.1.2 - Instante de maré de sizígia em que o limite da ZIC se estendeu mais para montante do rio Paraíba do Sul.

A figura 5.1.3 ilustra um instante da maré de quadratura em que o limite da ZIC mais se estendeu para montante.

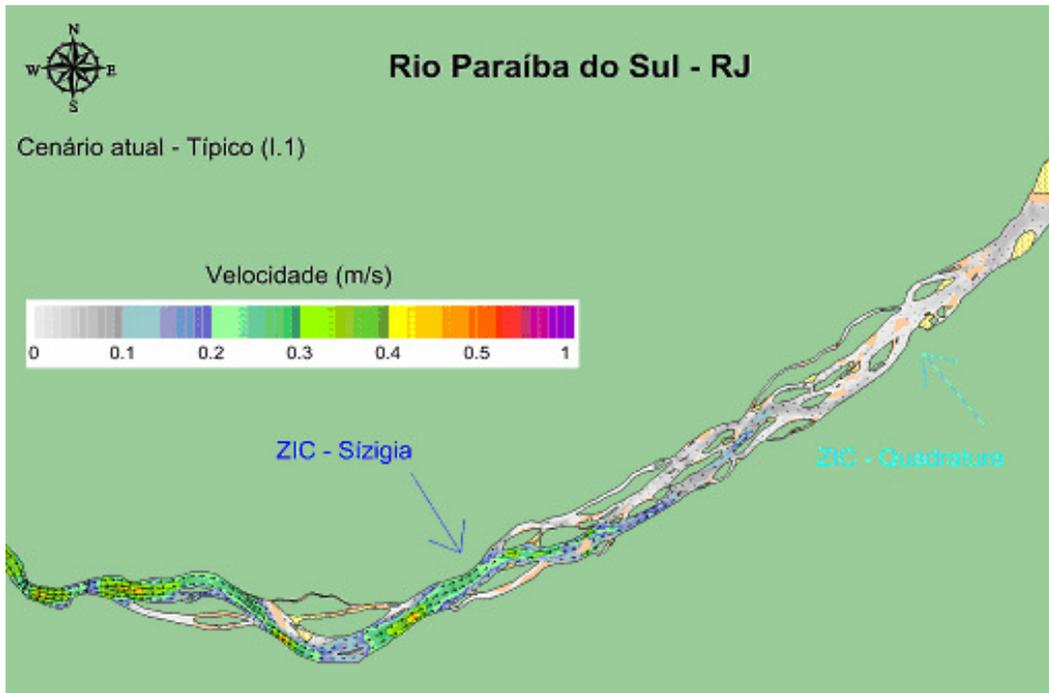


Figura 5.1.3 - Instante de maré de quadratura em que o limite da ZIC se estendeu mais para montante do rio Paraíba do Sul.

É interessante observar que a região entre a ZIC – Sizígia e a ZIC – Quadratura é justamente onde está a maior concentração de ilhas e bancos de areia do rio Paraíba do Sul. Essas formações ocorrem, pois é uma região preferencial para a sedimentação dos grãos carregados pelo estuário. Assim, essa constatação é uma forma de validação da batimetria que foi inferida no item 4.3.1 “Batimetria”.

Zona de Mistura

Para a determinação da zona de mistura (ZM), utilizou-se uma ferramenta do *SisBaHiA*[®] que permite determinar a porcentagem de ocorrência de salinidades maiores que 0,5 ups – limite inferior das águas salgadas. A figura 5.1.4 ilustra esse resultado para o cenário de marés típicas.

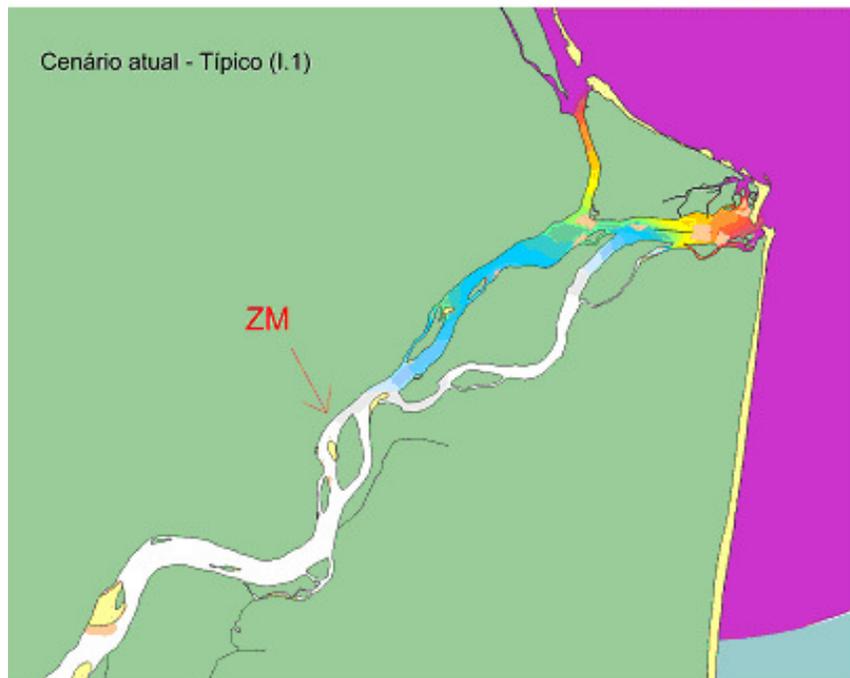
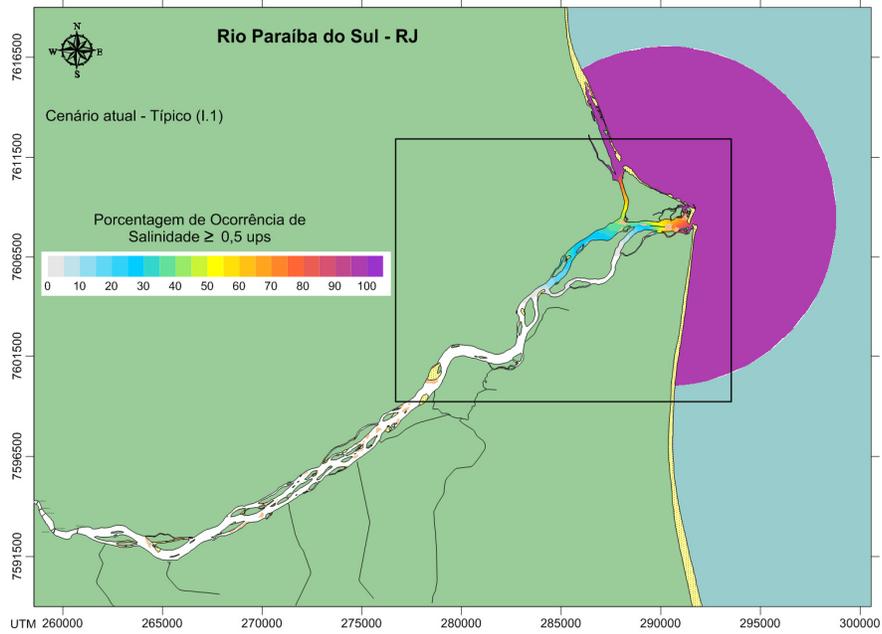


Figura 5.1.4 - Limite da intrusão salina no estuário do rio Paraíba do Sul.

A figura 5.1.5 resume os resultados encontrados das três zonas para o cenário em estudo. Destaca-se que para evitar o excesso de figuras, para os demais cenários será apresentada apenas uma figura resumo do mesmo tipo (figuras 5.1.6 a 5.1.8).

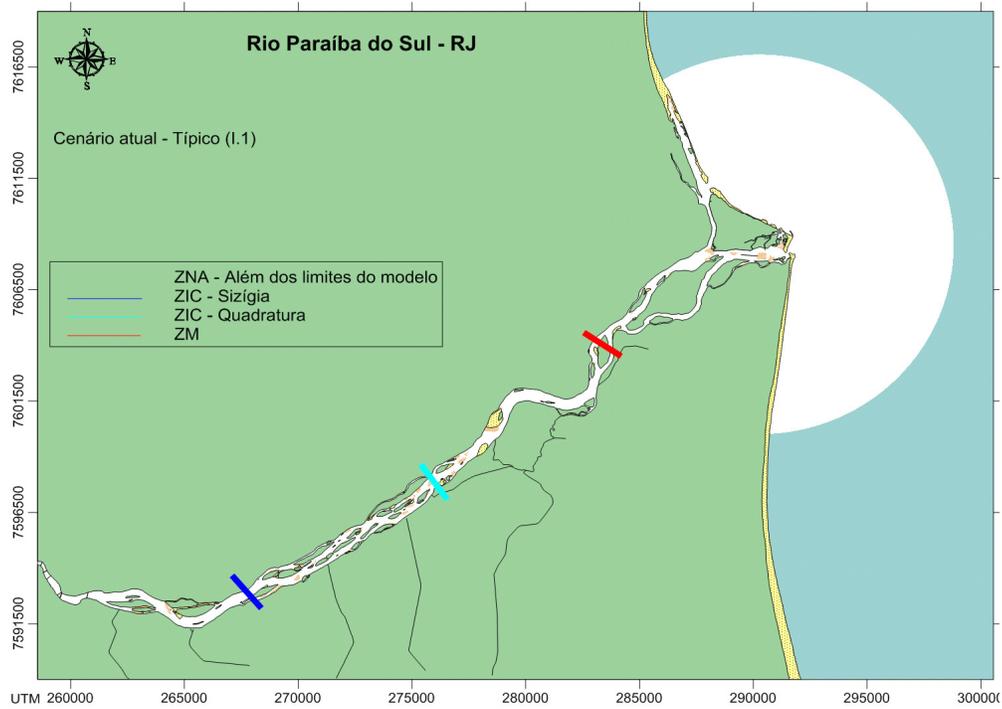


Figura 5.1.5 - Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
Rio Paraíba do Sul - Cenário atual: Típico (I.1)

- Cenário atual – Extremo (I.2)

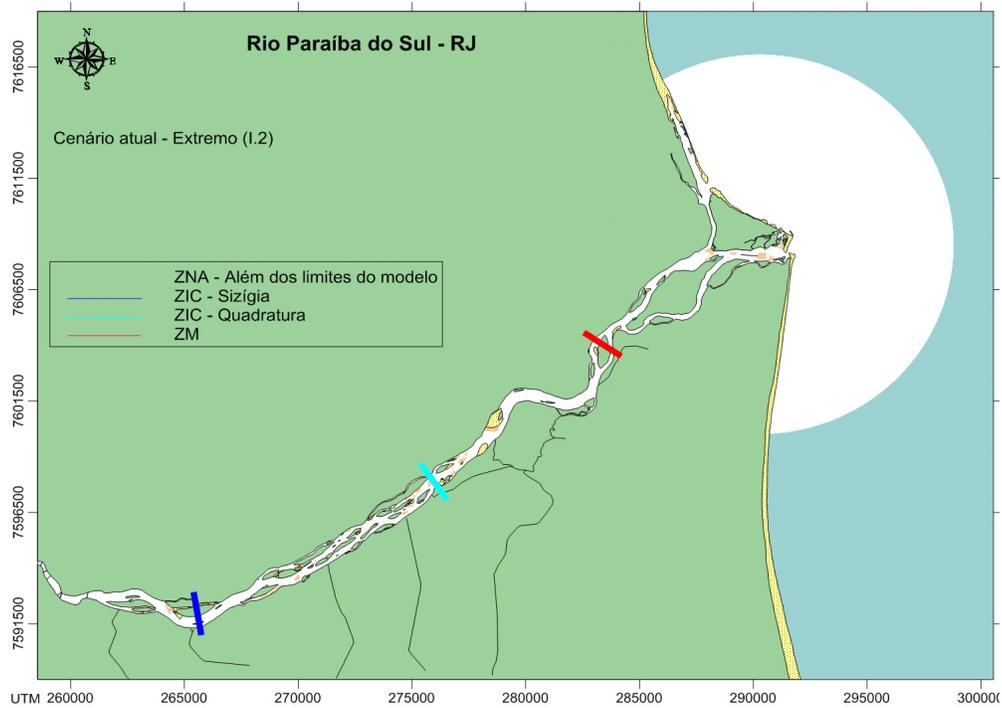


Figura 5.1.6 - Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
Rio Paraíba do Sul - Cenário atual: Extremo (I.2)

- Cenário de 50 anos – Típico (II.1)

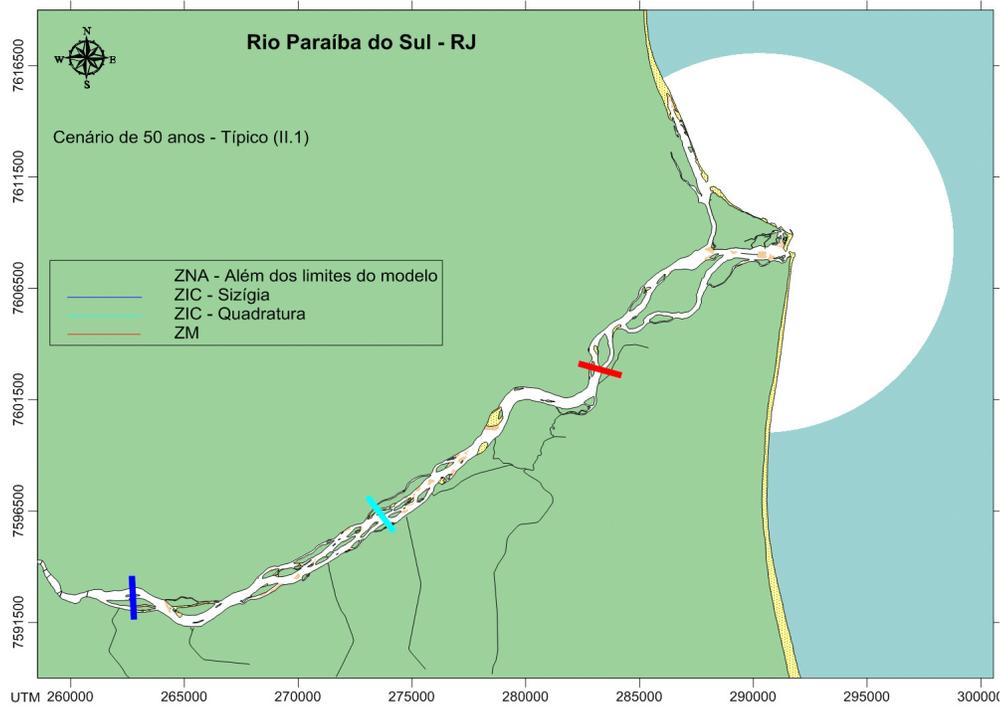


Figura 5.1.7 - Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
Rio Paraíba do Sul - Cenário de 50 anos: Típico (II.1)

- Cenário de 50 anos – Extremo (II.2)

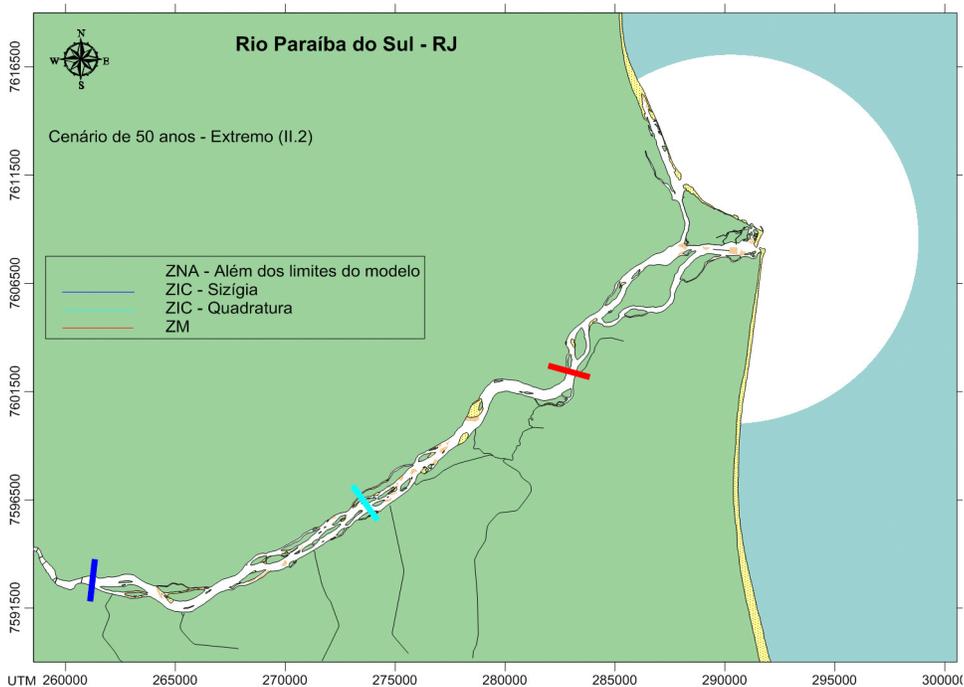


Figura 5.1.8 - Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
Rio Paraíba do Sul - Cenário de 50 anos: Extremo (II.2)

- Cenário atual – Extremo (I.2)

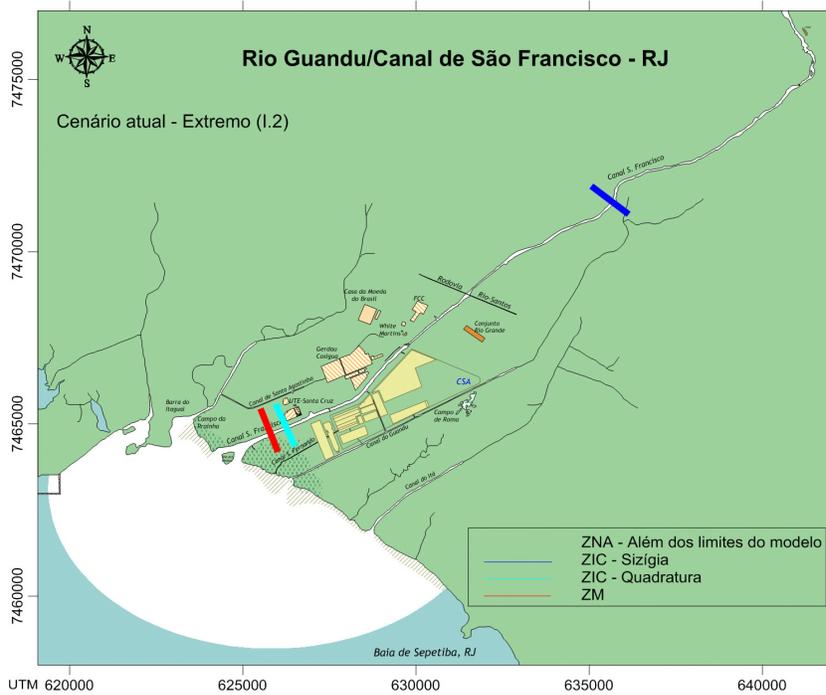


Figura 5.2.2 - Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
Rio Guandu/canal de São Francisco - Cenário atual: Extremo (I.2)

- Cenário de 50 anos – Típico (II.1)

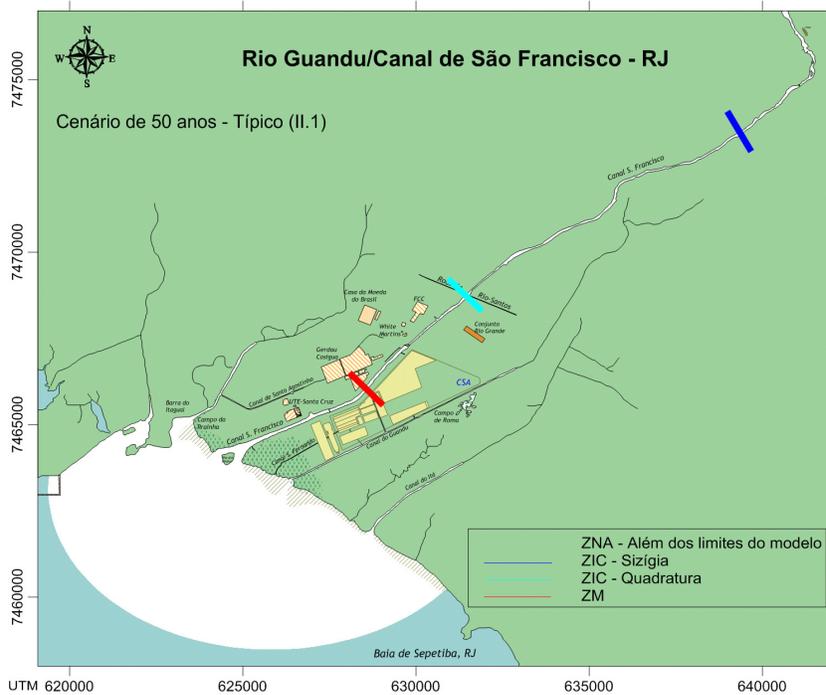


Figura 5.2.3 - Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
Rio Guandu/canal de São Francisco - Cenário de 50 anos: Típico (II.1)

- Cenário de 50 anos – Extremo (II.2)

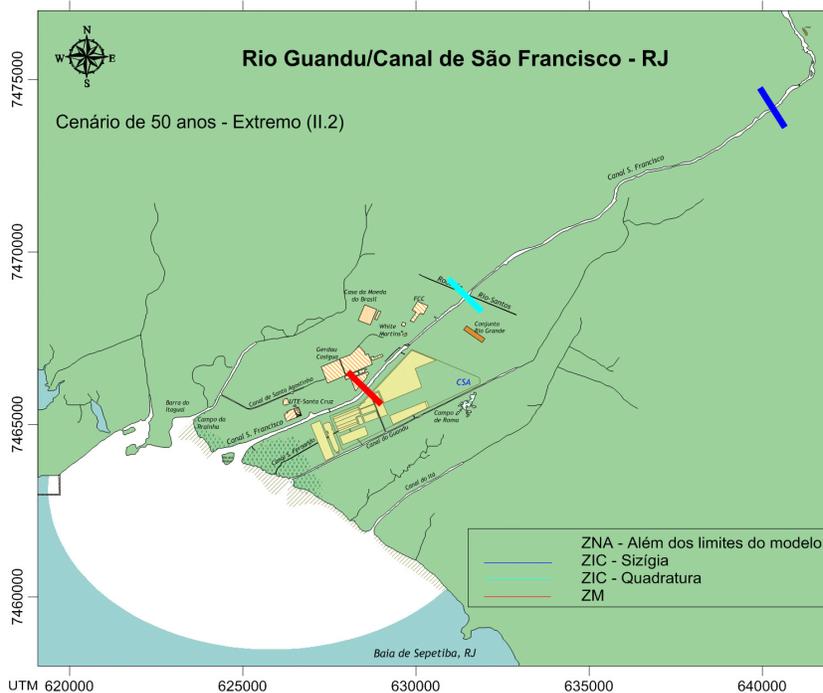


Figura 5.2.4 - Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
Rio Guandu/canal de São Francisco - Cenário de 50 anos: Extremo (II.2)

5.2.1. Análise parcial dos resultados

Comparando-se os resultados da modelagem de cada cenário, podem ser feitas as seguintes observações:

- A ZNA se apresentou fora dos limites de modelagem em todos os cenários simulados;
- Entre os cenários I.1 e I.2, as zonas ZIC-Sizígia se desloca de forma considerável para montante enquanto que a ZM permanece praticamente na mesma posição. O mesmo ocorre nos cenários II.1 e II.2;
- Como o foco da influência da maré meteorológica é sobre o período de sizígia, as alterações sobre a ZIC de quadratura foram desconsideradas, mesmo que a descida da maré meteorológica influencie no período de quadratura subsequente. Por isso, são consideradas apenas marés típicas de quadratura, de modo que a ZIC-Quadratura permanece na mesma posição quando comparados os cenários Típicos e Extremos.
- Quando comparados os cenários atuais (I.1 e I.2) e de 50 anos (II.1 e II.2), são observadas as maiores modificações nos limites de todas as zonas, que são deslocados para montante, podendo avançar até 7,5 km – limite das ZIC-Sizíguas.
- Mesmo na comparação entre o cenário mais conservador, I.1, e mais extremo, II.2, o limite da ZM avança pouco para montante – na ordem de 3 km.

5.3. Rio São João

As figuras 5.3.1 a 5.3.4 reúnem os limites das zonas ZNA, ZIC e ZM para todas os cenários estudados nas simulações do rio São João.

- Cenário atual – Típico (I.1)

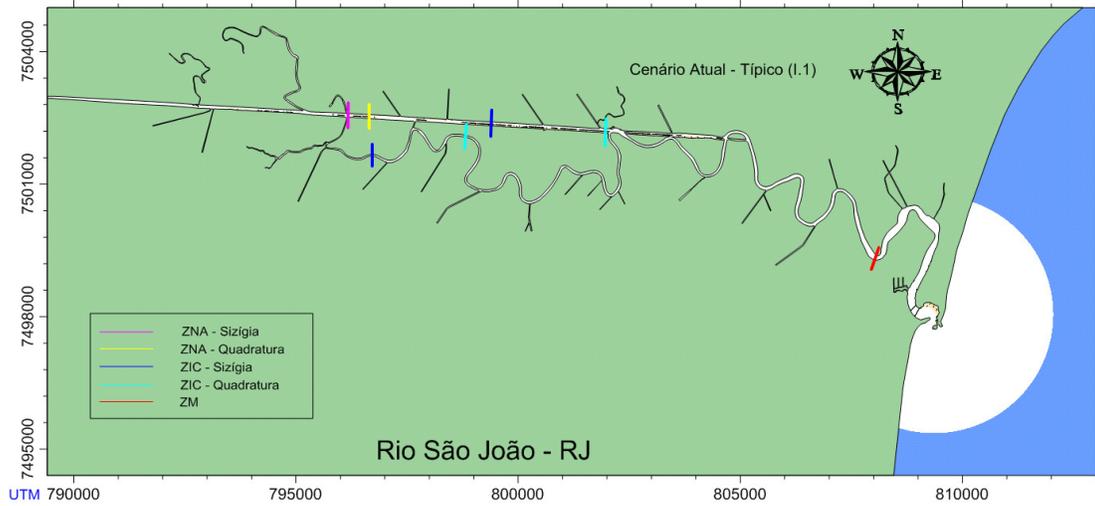


Figura 5.3.1 – Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
Rio São João - Cenário atual: Típico (I.1).

- Cenário atual – Extremo (I.2)

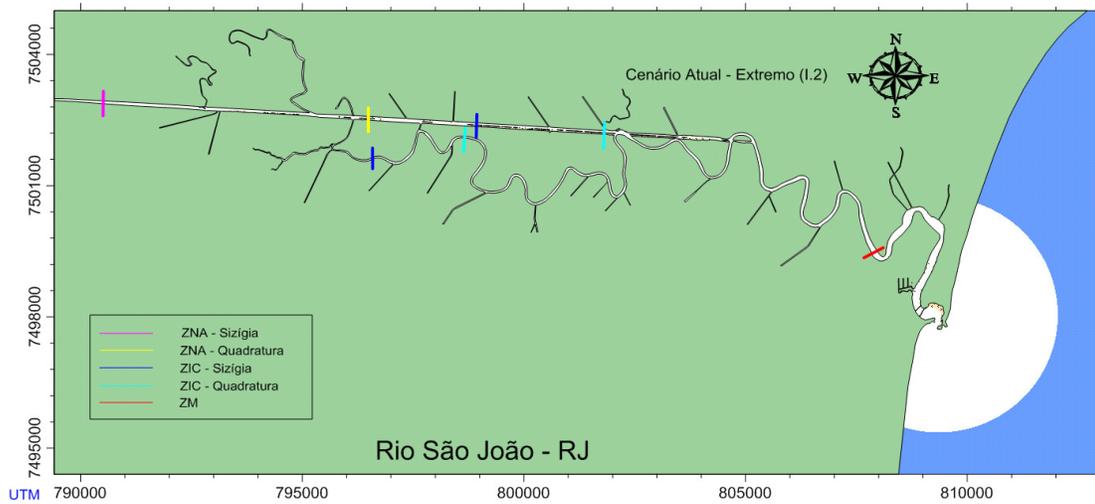


Figura 5.3.2 – Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
Rio São João - Cenário atual: Extremo (I.2)

- Cenário de 50 anos – Típico (II.1)

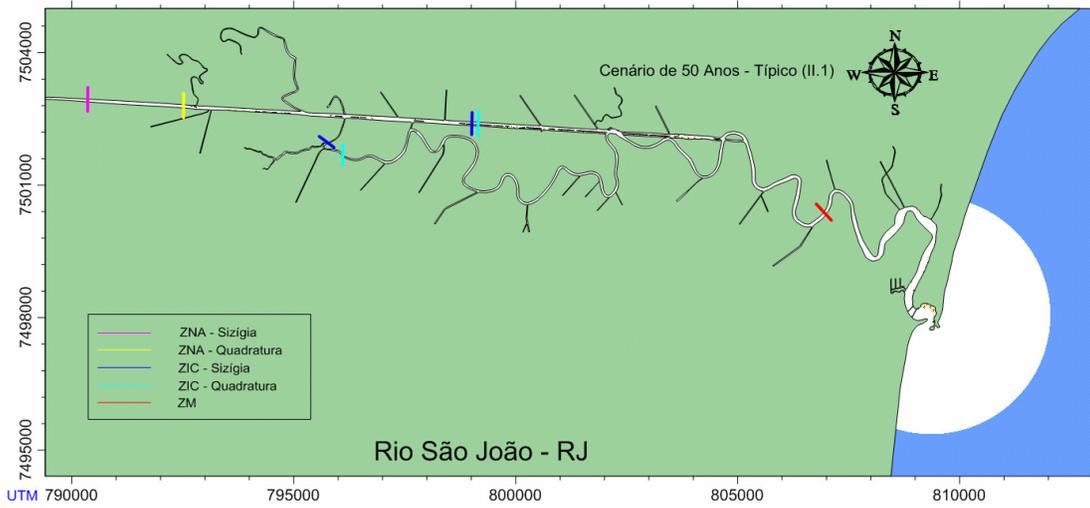


Figura 5.3.3 – Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
Rio São João - Cenário de 50 anos: Típico (II.1)

- Cenário de 50 anos – Extremo (II.2)

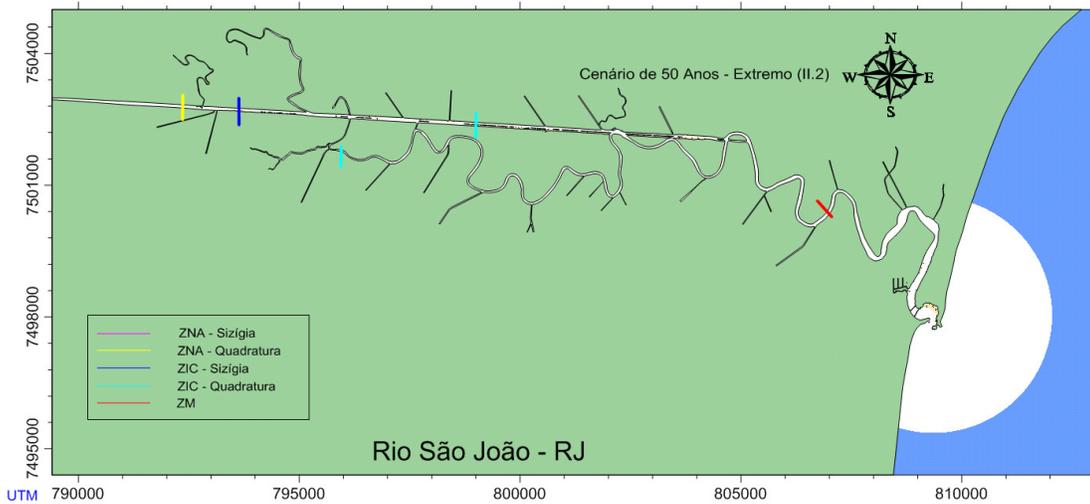


Figura 5.3.4 – Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
Rio São João - Cenário de 50 anos: Extremo (II.2)

5.3.1. Análise parcial dos resultados

A análise dos resultados da modelagem do estuário do rio São João para os cenários estudados permitiu as seguintes considerações:

- Na análise entre os cenários típicos e os cenários extremos correspondentes, percebe-se que de uma maneira geral os limites estuarinos sofrem deslocamentos para montante na ocorrência de marés meteorológicas, embora para a Zona de Mistura isso não ocorra de forma pronunciada.

- Como o foco da influência da maré meteorológica é sobre o período de sizígia, as alterações sobre a ZNA e ZIC de quadratura foram desconsideradas, mesmo que a descida da maré meteorológica influencie no período de quadratura subsequente. Por isso, foram consideradas apenas marés típicas de quadratura, de modo que a ZNA-Quadratura e ZIC-Quadratura permanecem na mesma posição quando se compara os cenários típicos e extremos.
- Quando são comparados os cenários atuais (I.1 e I.2) e de 50 anos (II.1 e II.2), são observadas as maiores modificações nos limites de todas as zonas, que são deslocados para montante, podendo avançar até 6 km – limite das ZIC-Sizígias.
- Analisando os cenários atual e futuro nota-se que os deslocamentos são mais pronunciados que quando se está comparando os cenários típicos e críticos, especialmente no que diz respeito à intrusão salina que apresentou deslocamento para montante da ordem de 2 km.

5.4. Rio Macaé

As figuras 5.4.1 a 5.4.4 reúnem os limites das zonas ZNA, ZIC e ZM para todas os cenários estudados nas simulações do rio Macaé.

- Cenário atual – Típico (I.1)

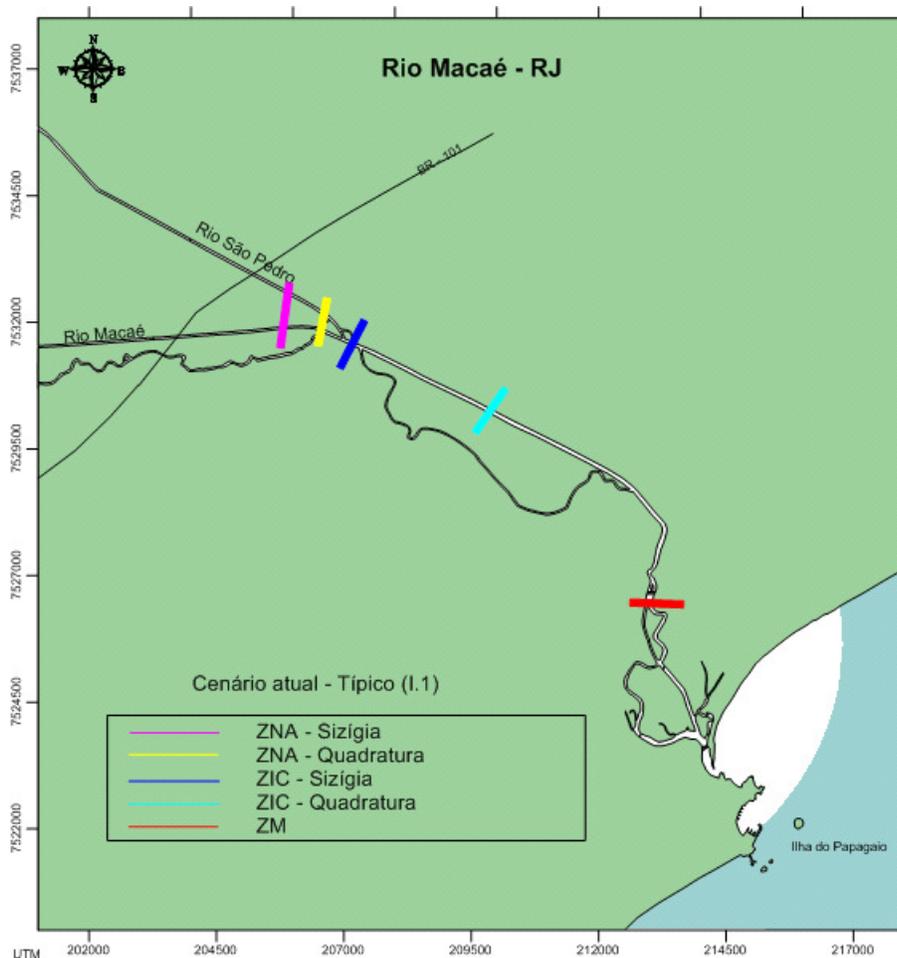
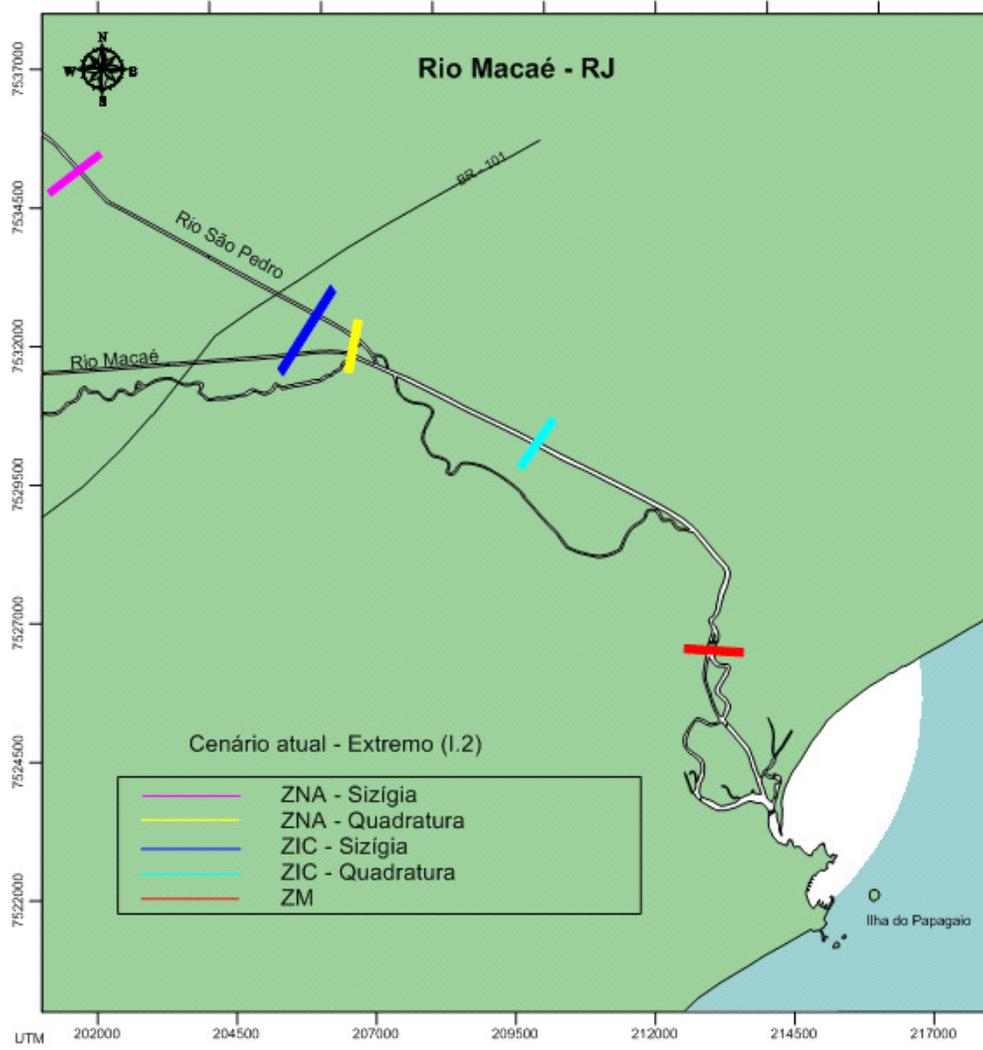


Figura 5.4.1 - Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
Rio Macaé - Cenário atual: Típico (I.1)

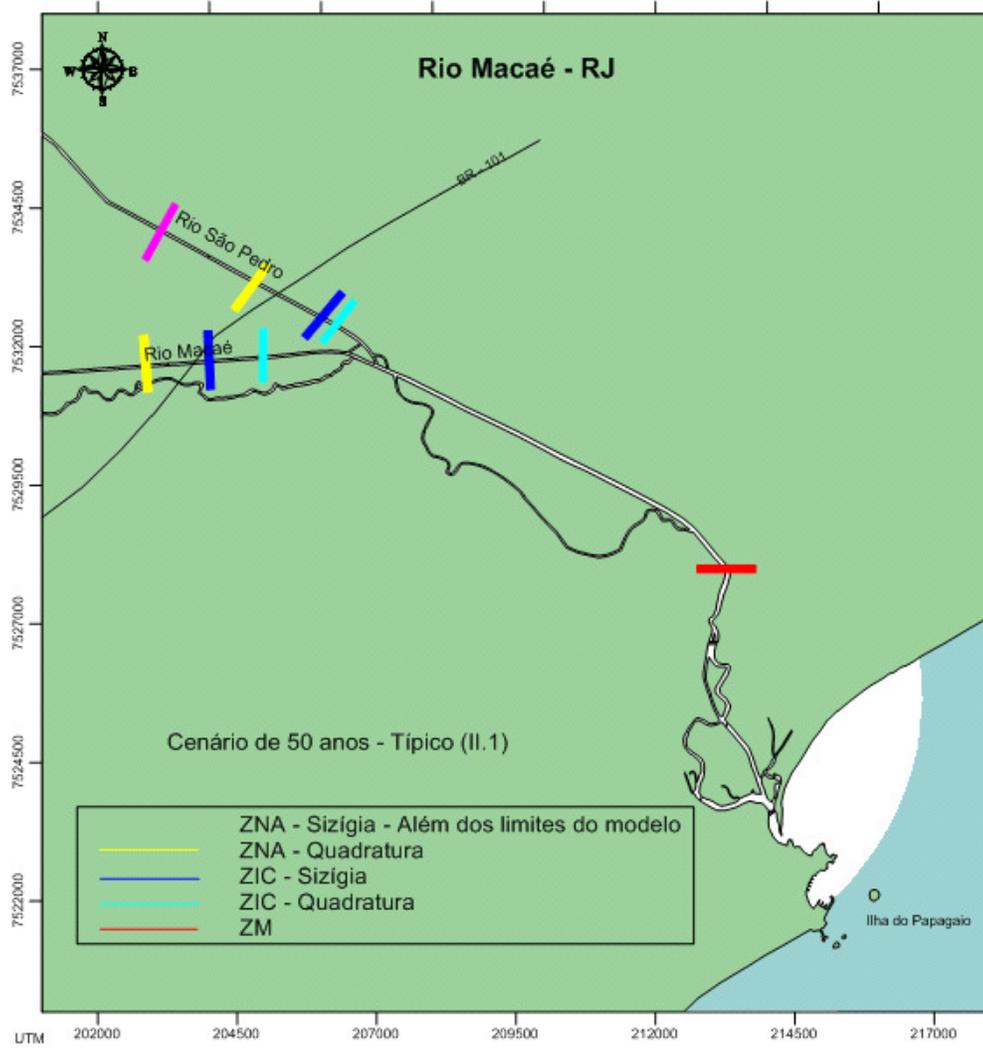
- Cenário atual – Extremo (I.2)



Obs: A ZNA - Sizígia no trecho do rio Macaé fica a montante do limite do domínio de modelagem

Figura 5.4.2 - Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
Rio Macaé. Cenário atual: Extremo (I.2)

- Cenário de 50 anos – Típico (II.1)



Obs: A ZNA - Sizigia no trecho do rio Macaé fica a montante do limite do domínio de modelagem.

Figura 5.4.3 - Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
Rio Macaé - Cenário de 50 anos: Típico (II.1)

- Cenário de 50 anos – Extremo (II.2)

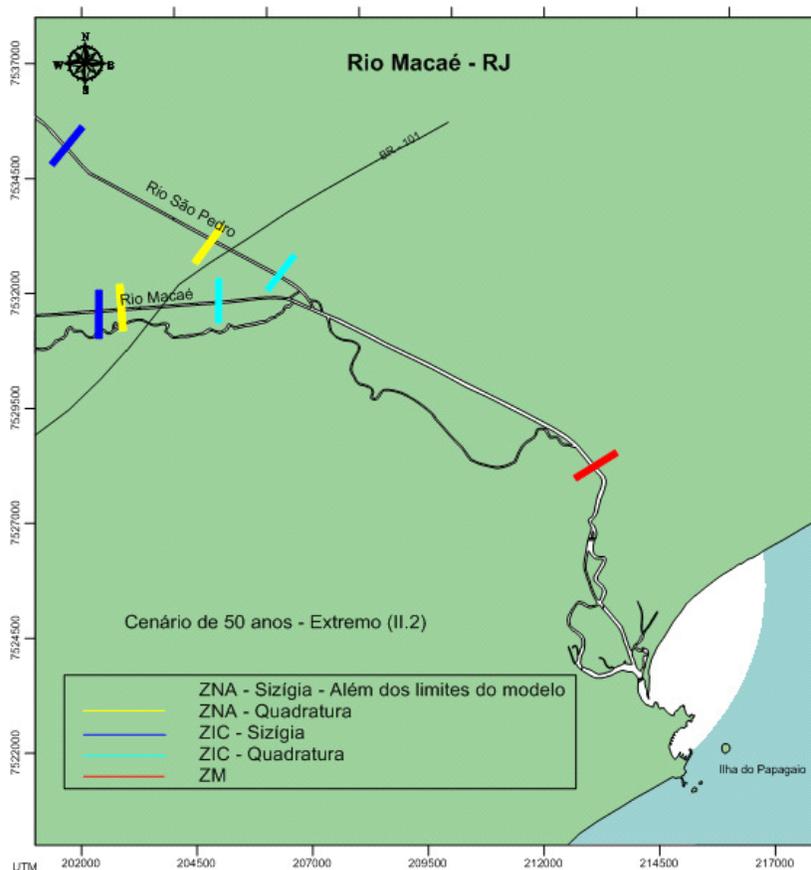


Figura 5.4.4 - Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
Rio Macaé - Cenário de 50 anos: Extremo (II.2)

5.4.1. Análise parcial dos resultados

A análise dos resultados da modelagem de cada cenário possibilitou as seguintes considerações:

- Entre os cenários I.1 e I.2, a ZIC e a ZNA, em condições de sizígia, se deslocam de forma considerável para montante. O mesmo ocorre quando comparados os cenários II.1 e II.2.
- Como o foco da influência da maré meteorológica é sobre o período de sizígia, as alterações sobre a ZNA e ZIC de quadratura foram desconsideradas, mesmo que a descida da maré meteorológica influencie no período de quadratura subsequente. Por isso, foram consideradas apenas marés típicas de quadratura, de modo que a ZNA-Quadratura e ZIC-Quadratura permanecem na mesma posição quando se comparam os cenários Típicos e Extremos.
- Na comparação entre os cenários atuais (I.1 e I.2) e de 50 anos (II.1 e II.2) são observadas modificações nos limites de todas as zonas, que são deslocados para montante.
- Mesmo na comparação entre o cenário mais conservador, I.1, e o mais extremo, II.2, o limite da ZM avança pouco para montante – na ordem de 1.9 km.

5.5. Baía de Guanabara – Rios Iguaçú/Sarapuí, Caceribú e Guapimirim

As figuras 5.5.1 a 5.5.4 reúnem os limites das zonas ZNA, ZIC e ZM para todas os cenários estudados nas simulações dos rios Iguaçú/Sarapuí, Caceribú e Guapimirim.

- Cenário atual – Típico (I.1)

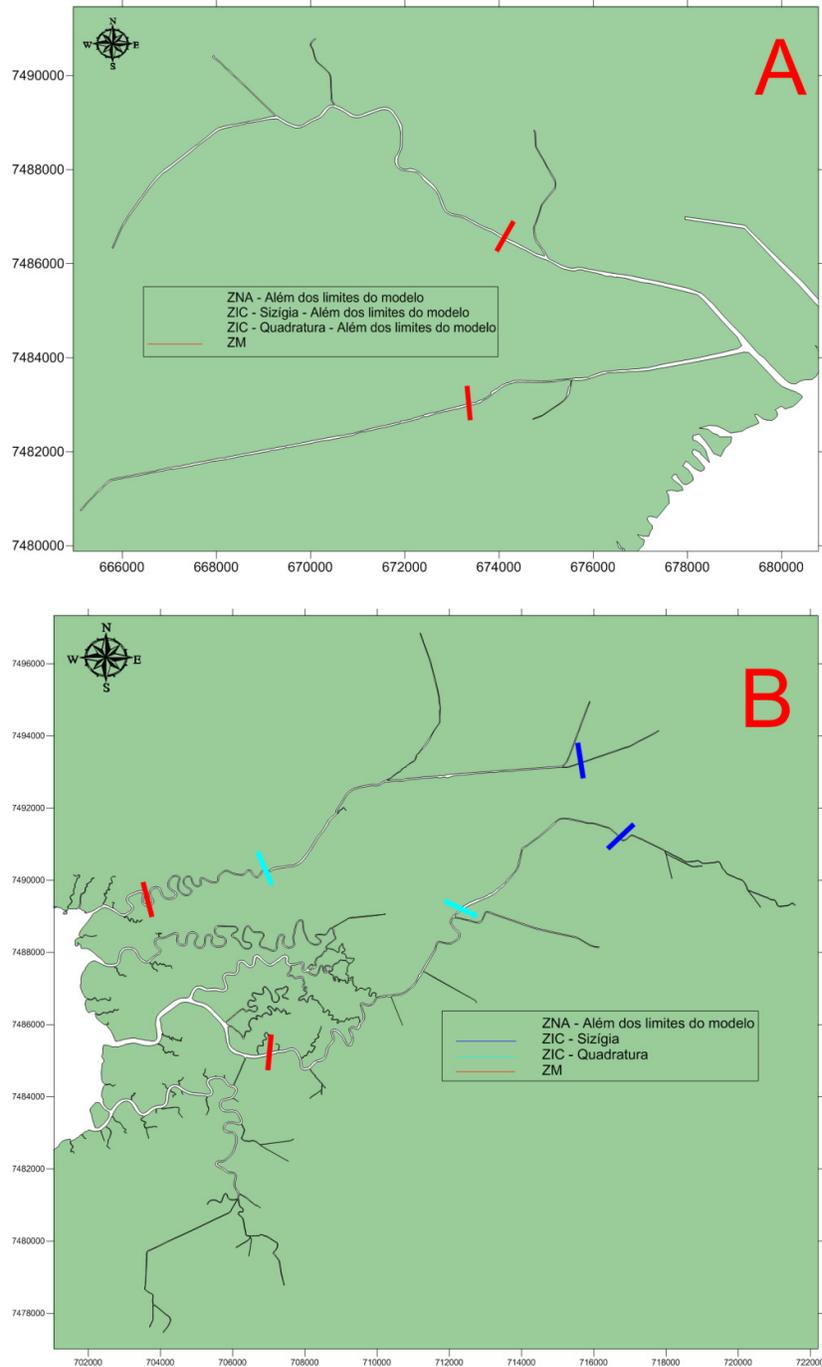


Figura 5.5.1 - Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
Rios Iguaçú/Sarapuí (A), Caceribú e Guapimirim (B) - Cenário atual: Típico (I.1)

- Cenário atual – Extremo (I.2)

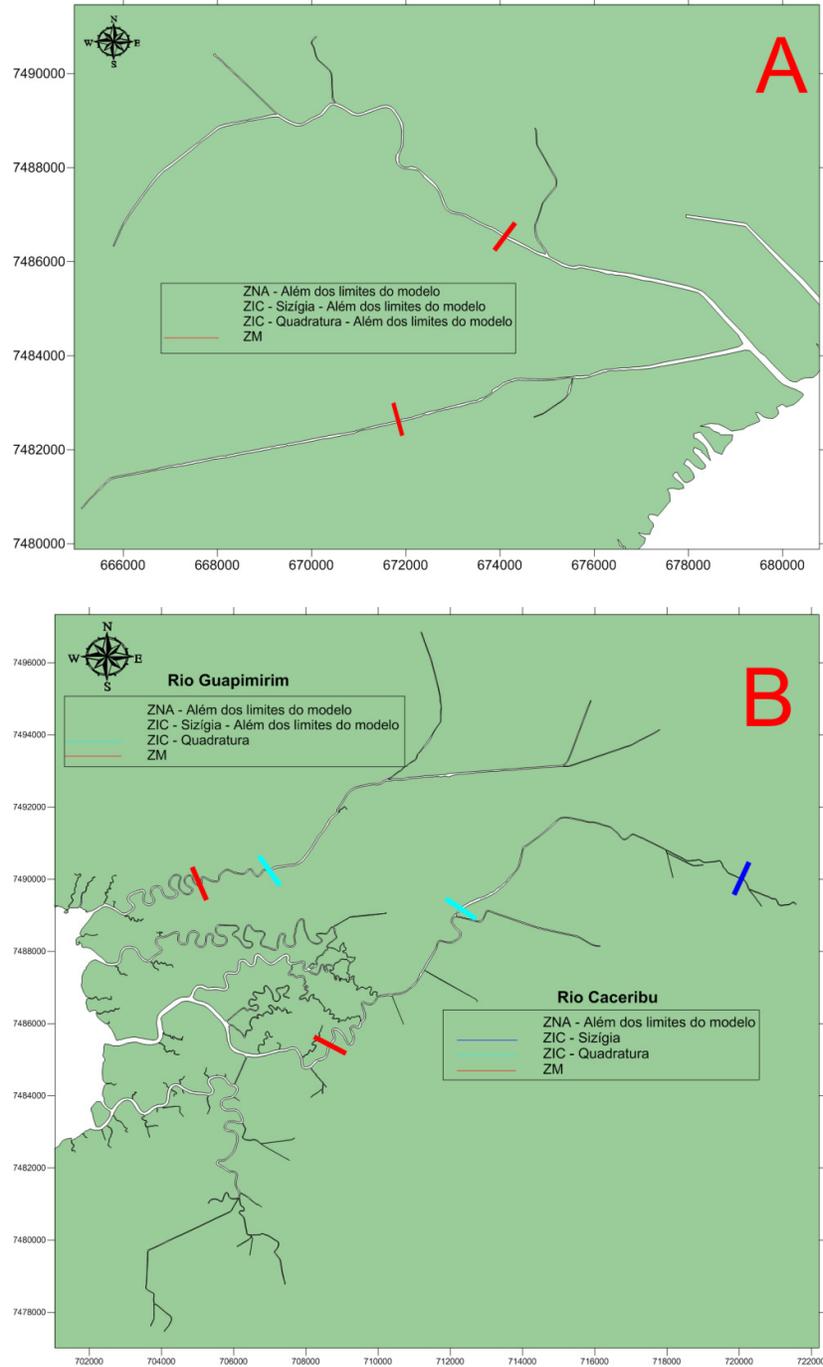


Figura 5.5.2 - Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
Rios Iguazu/Sarapuí (A), Caceribú e Guapimirim (B) - Cenário atual: Extremo (I.2)

- Cenário de 50 anos – Típico (II.1)

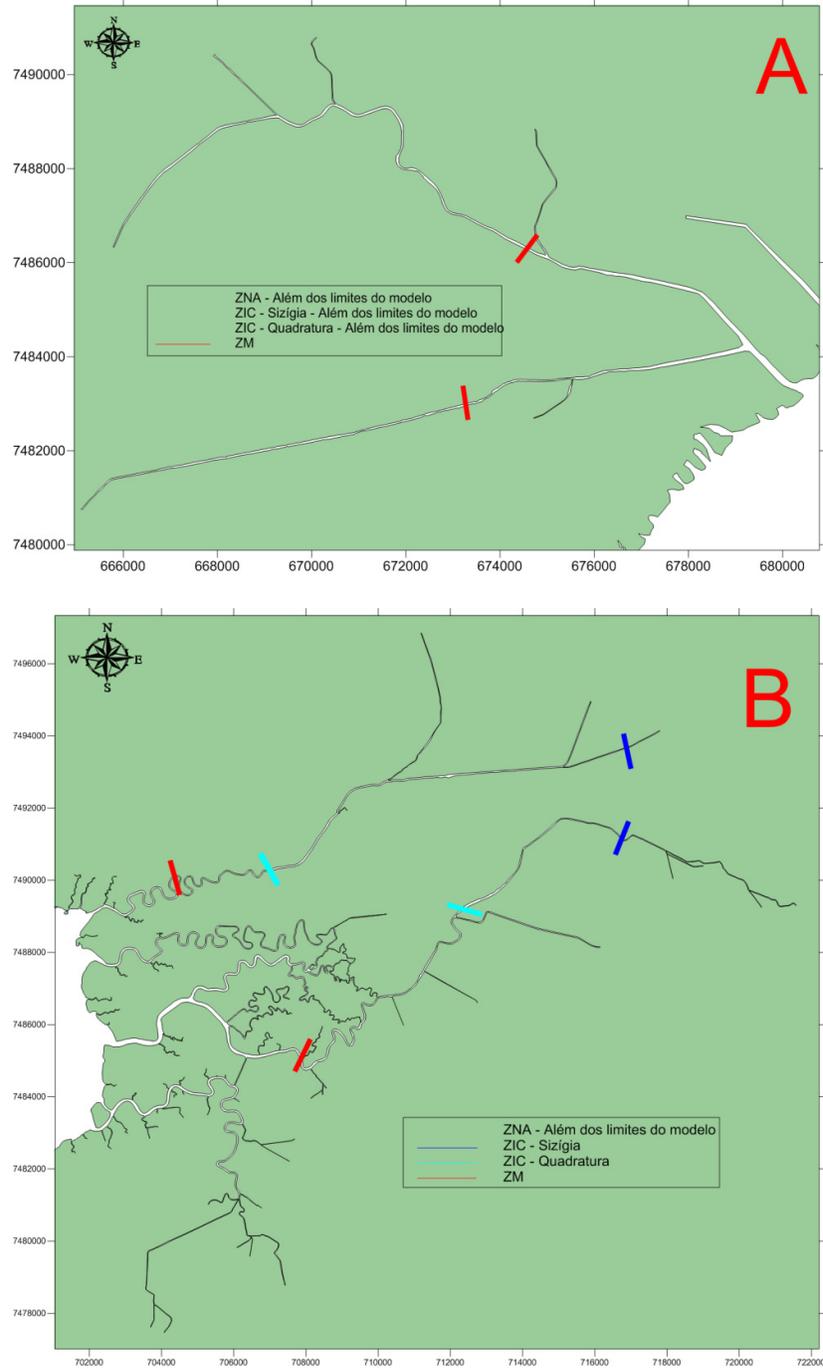


Figura 5.5.3 - Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
 Rios Iguaçu/Sarapuí (A), Caceribú e Guapimirim (B) - Cenário de 50 anos: Típico (II.1)

- Cenário de 50 anos – Extremo (II.2)

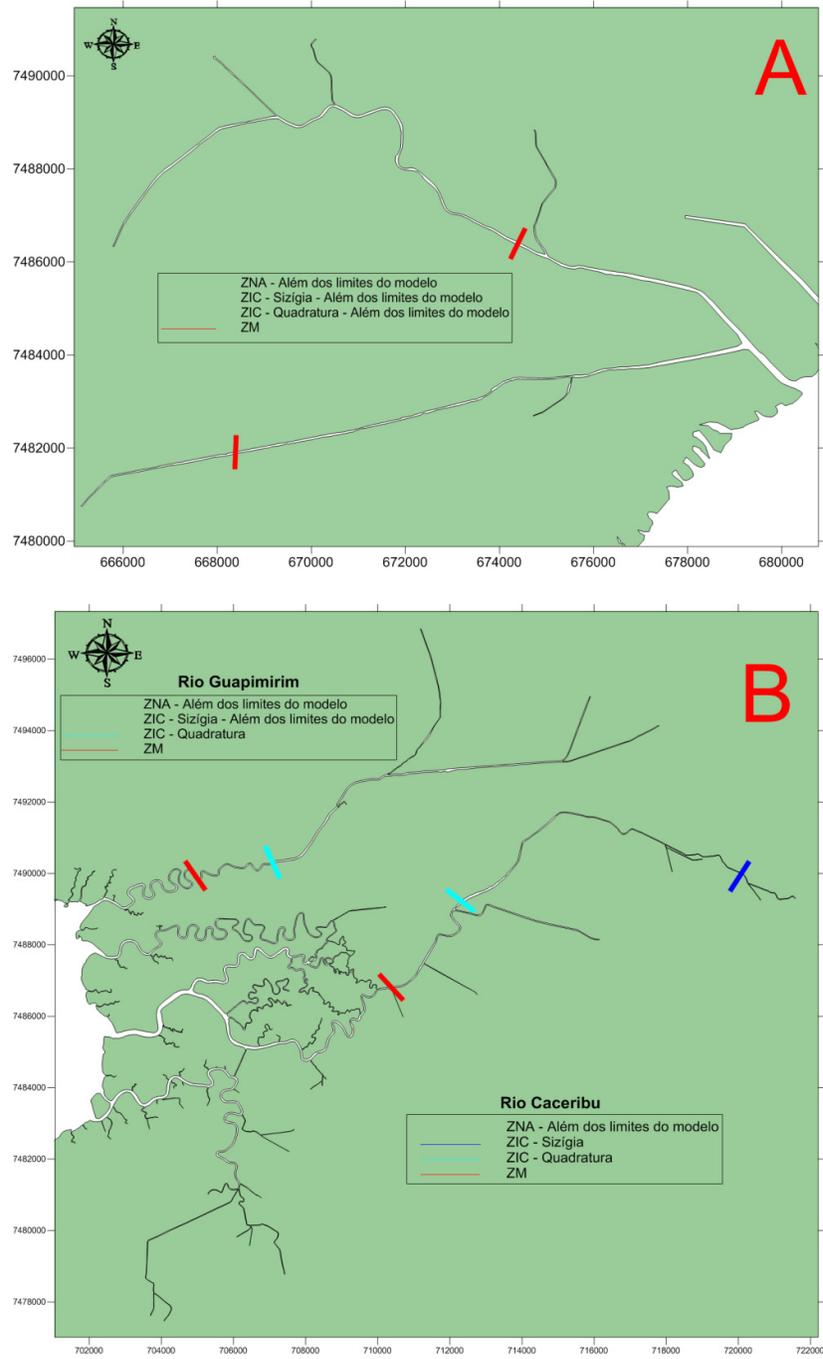


Figura 5.5.4 - Limites das três zonas – ZNA, ZIC e ZM
Rios Iguazu/Sarapuí (A), Caceribú e Guapimirim (B) - Cenário de 50 anos: Extremo (II.2)

5.5.1. Análise parcial dos resultados

Comparando-se os resultados obtidos em cada cenário, podem ser feitas as seguintes observações:

- Entre os cenários I.1 e I.2, as zonas ZIC-Sizígia e ZM se deslocam de forma bastante pronunciada para montante, evidenciando a influência das marés meteorológicas sobre a hidrodinâmica local. O mesmo ocorre na comparação dos cenários II.1 e II.2;
- Como o foco da influência da maré meteorológica é sobre o período de sizígia, as alterações sobre a ZIC de quadratura foram desconsideradas, mesmo que a descida da maré meteorológica influencie no período de quadratura subsequente (figura 4.3.4.5.2). Por isso, na plotagem dos resultados foram consideradas apenas marés típicas de quadratura, de modo que a ZIC-Quadratura permanece na mesma posição quando comparados os cenários Típicos e Extremos.
- Na comparação entre os cenários atuais (I.1 e I.2) e de 50 anos (II.1 e II.2), são observadas as maiores modificações nos limites de todas as zonas, que são deslocados para montante, fazendo inclusive com que a ZIC-Sizígia se desloque para além dos limites do modelo em alguns rios.

Na comparação entre o cenário mais conservador, I.1, e o mais extremo, II.2, o limite da ZM avança aproximadamente 5,5 km para montante do rio Caceribú.

6. DEFINIÇÃO DE ZONA DE RESTRIÇÃO DE OUTORGA

Como regra, os trechos de rios onde ocorrem misturas com água do mar não deveriam estar sujeitos à outorga, pelo fato de o órgão gestor não poder garantir o acesso à água doce. Nesse sentido, é recomendável que o INEA não outorgue usos da água cujas captações se localizem em zonas estuarinas.

O conhecimento do comportamento da intrusão salina é fundamental para a gestão de recursos hídricos, pois fornece as bases técnicas necessárias à definição de critérios para a outorga de direito de uso da água em regiões estuarinas. É útil também na definição da localização de tomadas d'água para usos restritivos à presença de sais.

Embora a legislação brasileira não aborde com clareza esse aspecto, verifica-se que o sistema nacional de recursos hídricos foi estruturado para a outorga de água doce. A despeito desse fato, os sistemas de gestão de vários estados brasileiros e do estado do Rio de Janeiro não dispõem de critérios técnicos claros sobre a outorga nessas situações.

Não obstante, o Plano Estratégico de Recursos Hídricos da Bacia dos rios Guandu, Guarda e Guandu Mirim, concluído em 2006, tratou objetivamente dessa questão, propondo uma zona de restrição de outorga no canal de São Francisco para a orientação dos procedimentos de outorga na bacia.

Com base nesta experiência, propõe-se que o INEA adote a mesma orientação para todas as bacias estuarinas do estado. Neste trabalho cinco estuários foram caracterizados: rio Paraíba do Sul; rio Guandu/Canal de São Francisco; rio São João; rio Macaé e Baía de Guanabara, com foco nas bacias dos rios Iguaçu/Sarapuí, Caceribú e Guapimirim.

Conforme demonstrado nas simulações, a penetração da cunha salina depende de inúmeras variáveis. Os limites a montante das três zonas, ZNA, ZIC e ZM, podem mudar consideravelmente de posição ao longo do ciclo hidrológico e do mês lunar. Em épocas de chuvas e cheias os limites são empurrados para jusante, pela maior vazão fluvial, e avançam para montante em épocas de estiagem. Em um dado mês, tipicamente, durante as fases de marés de sizígia, na lua nova e lua cheia, os limites ficam mais para montante. Opostamente, nas marés mais fracas de quadratura, quarto crescente e quarto minguante, os limites tendem a ficar mais para jusante.

Para a definição da zona sujeita à restrição de outorga, adotou-se o Cenário Atual I.2, conforme descrito no item 3. Esse cenário considerou a ocorrência simultânea de marés de sizígia com maré meteorológica de 7 dias com altura de 0,8 m, em épocas de estiagem. É, portanto, uma condição extrema, mas possível de ocorrer nas condições atuais.

Entretanto, para se definir uma zona com restrição de outorga é necessário estabelecer um critério operacional, que poderia ser, por exemplo, limitar a extensão da zona com base na presença de no mínimo 0,5 g/l de sal, com permanência, por exemplo, em 30% do tempo. Por segurança, deve ser adotado o cenário que considera a duração de marés de sizígia, efeitos meteorológicos e estiagem fluvial. As figuras 6.1 a 6.6 indicam como ficariam as zonas de restrição de outorga caso seja adotado o critério sugerido.

A dispensa de outorga, por seu turno, não eliminaria a exigência de o lançamento ou diluição de poluentes pelos empreendimentos estarem em conformidade com a legislação ambiental e o enquadramento dos corpos d'água em classes de uso. Da mesma forma, deveria ser exigido o cadastramento desses usos junto ao órgão gestor para o pleno controle da atividade.

Essas recomendações objetivam dispensar de outorga a implantação de tomadas d'água de empreendimentos usuários de água bruta que admitam a utilização de água salgada ou salobra em seus processos produtivos. No entanto, é necessário que os empreendimentos que usam água em processos menos exigentes captem água de fundo, evitando que parte da água doce seja utilizada em processos menos nobre e não outorgado.

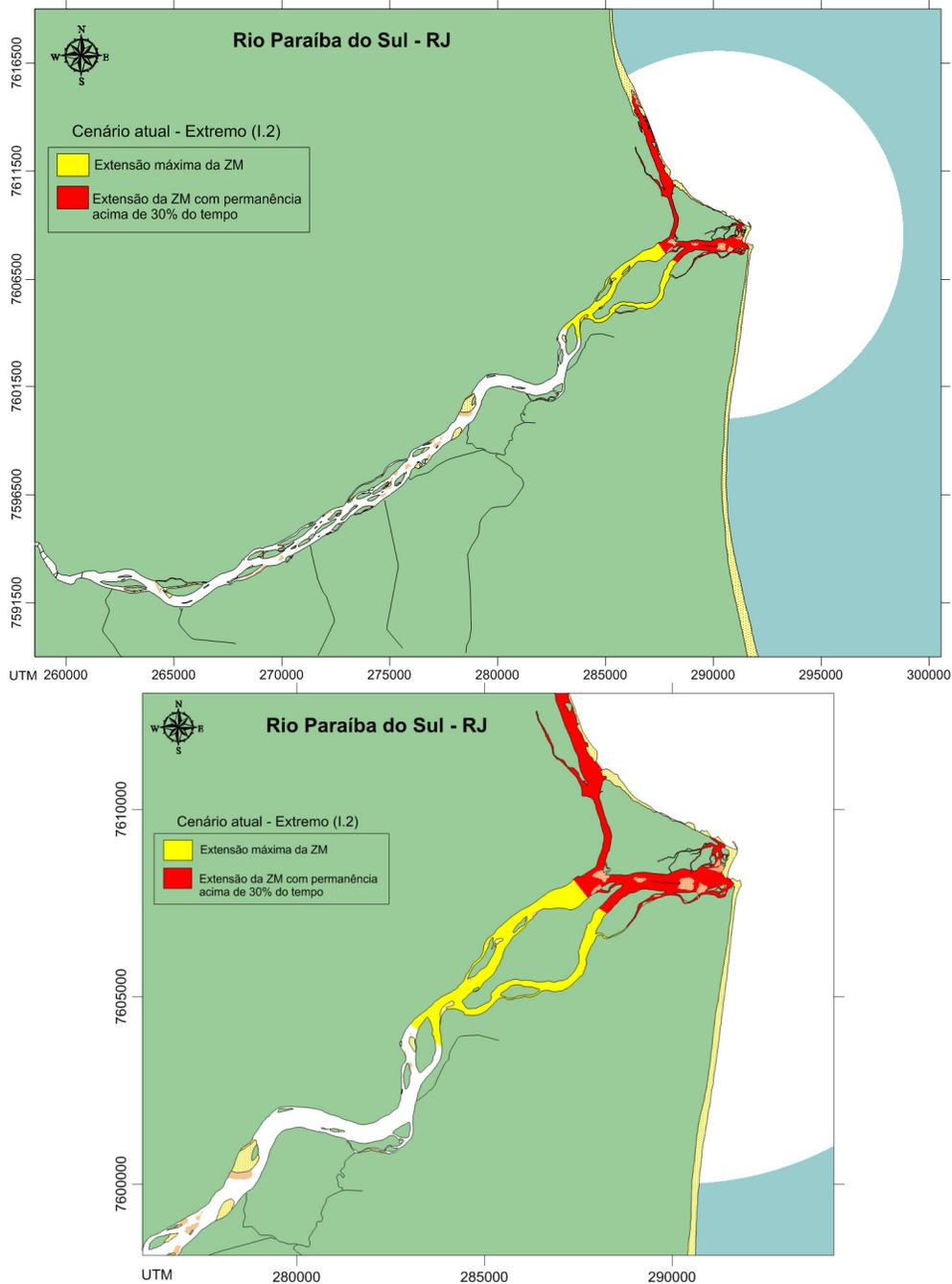


Figura 6.1

Rio Paraíba do Sul

Extensão máxima da zona de intrusão salina: 10 km a partir da foz.
 Extensão da zona de intrusão salina com permanência acima de 30% do tempo:
 4 km a partir da foz.

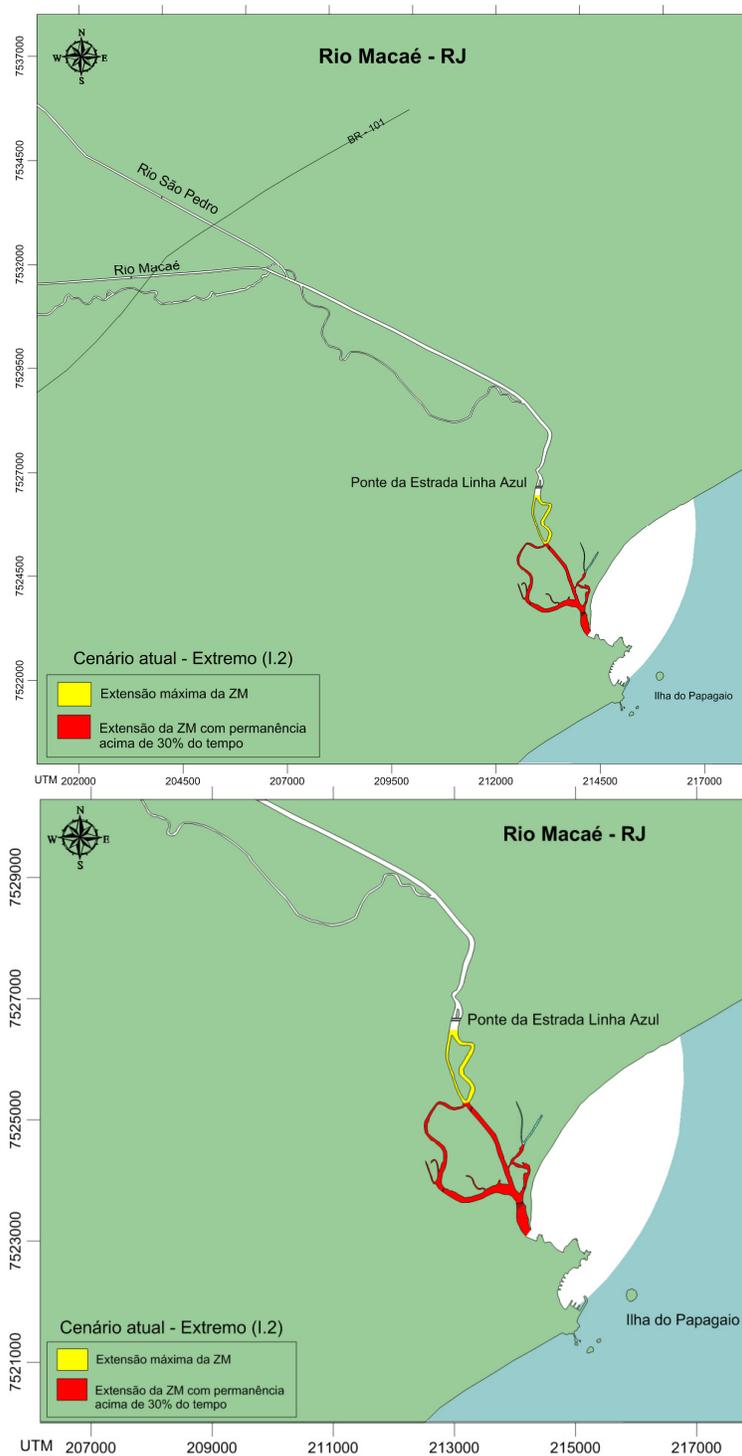


Figura 6.2

Rio Macaé

Extensão máxima da zona de intrusão salina: 3,5 km a partir da foz
(na altura da Ponte da estrada Linha Zul)

Extensão da zona de intrusão salina com permanência acima de 30% do tempo:
2,5 km a partir da foz.

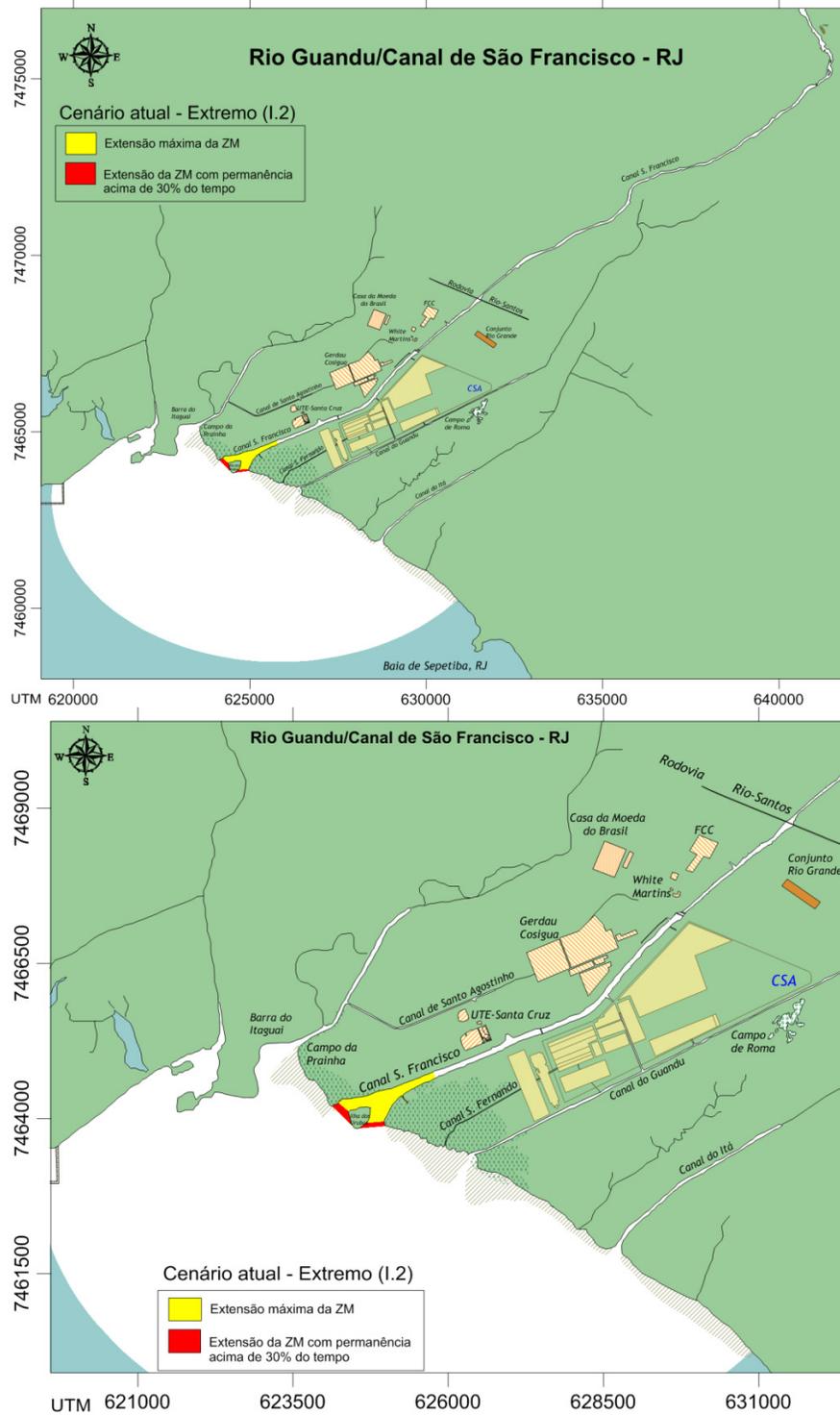


Figura 6.3

Rio Guandu/Canal de São Francisco

Extensão máxima da zona de intrusão salina: 1,5 km a partir da foz.
 Extensão da zona de intrusão salina com permanência acima de 30% do tempo: 150 m a partir da foz.

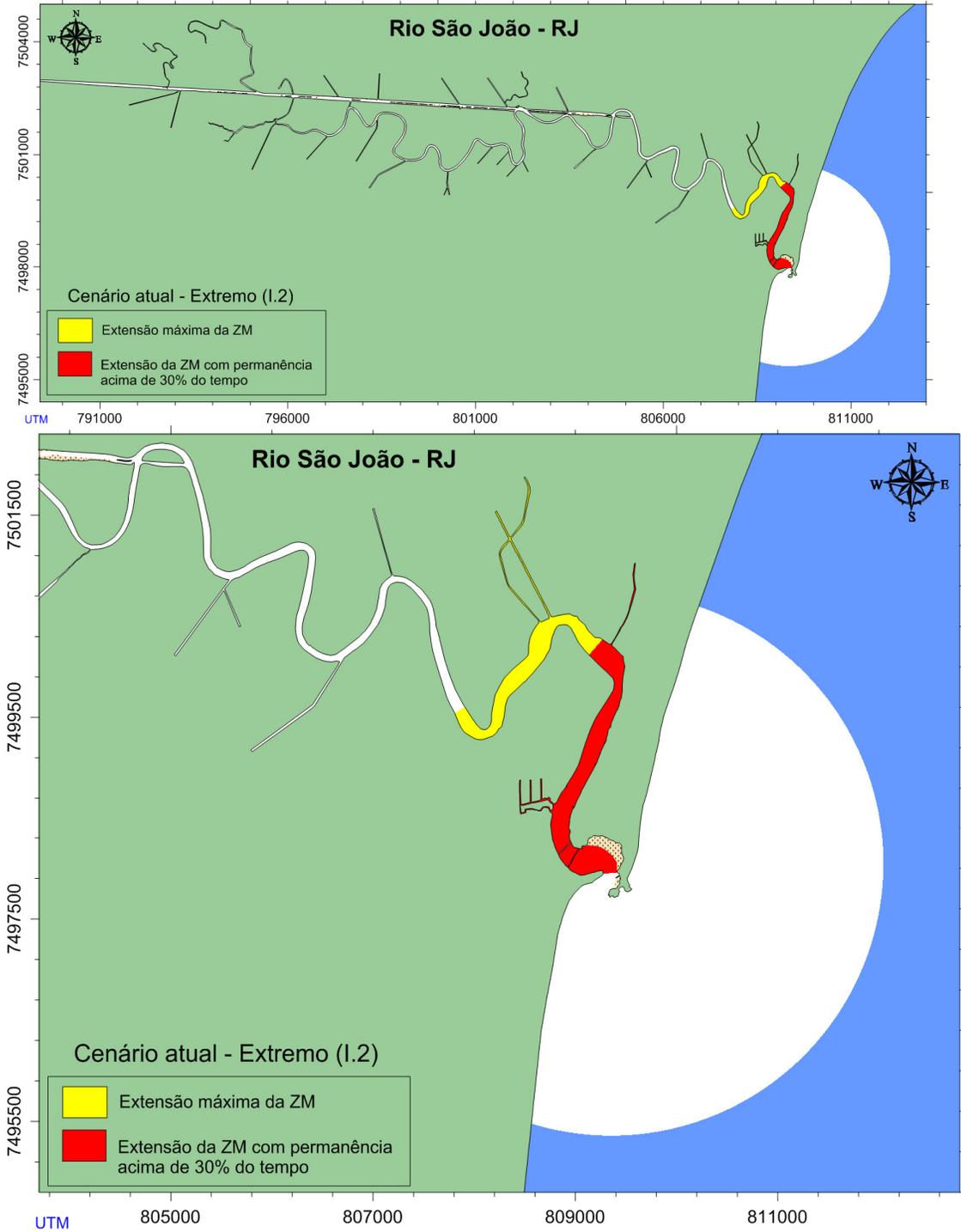


Figura 6.4

Rio São João

Extensão máxima da zona de intrusão salina: 5 km a partir da foz.
 Extensão da zona de intrusão salina com permanência acima de 30% do tempo:
 2,7 km a partir da foz.

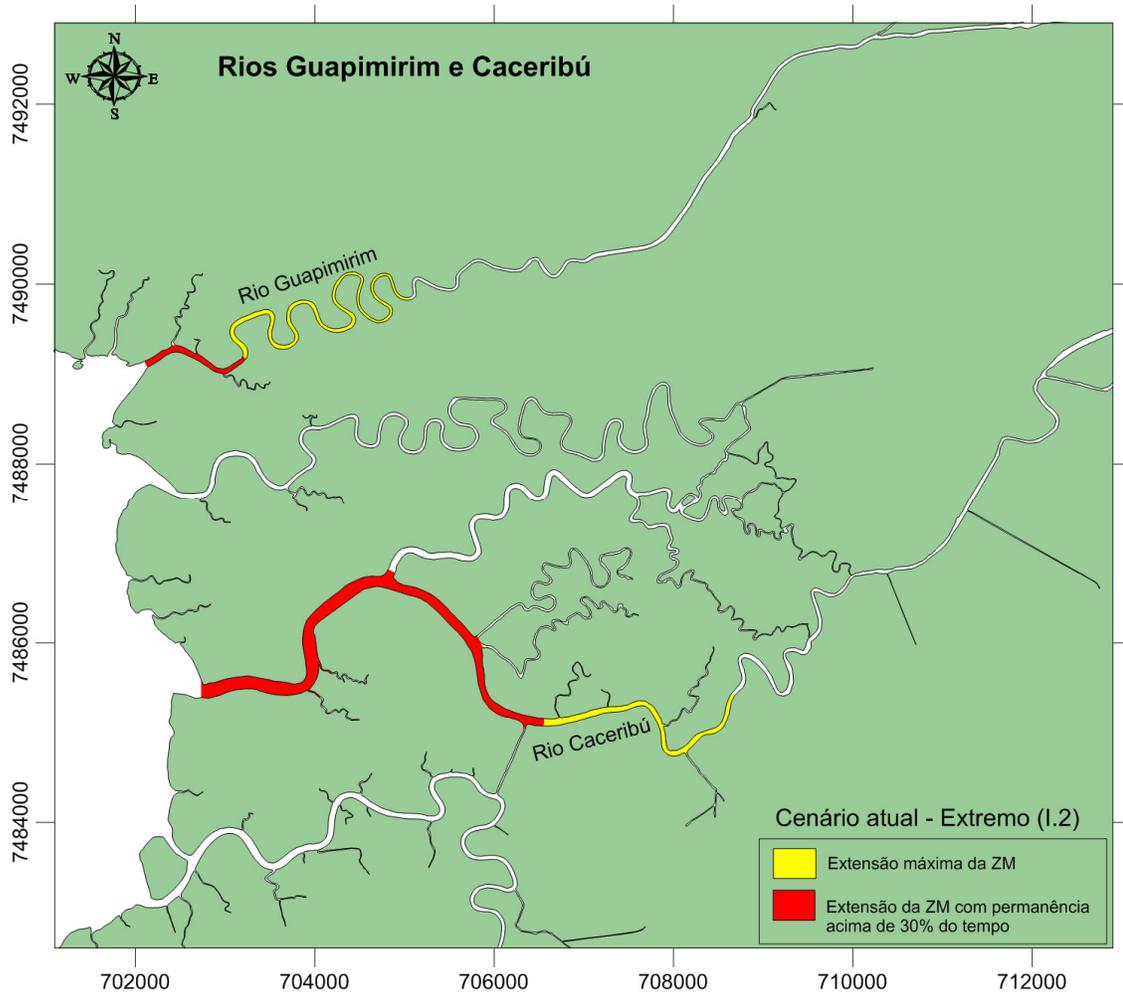


Figura 6.5

Rio Guapimirim

Extensão máxima da zona de intrusão salina: 6,5 km a partir da foz.

Extensão da zona de intrusão salina com permanência acima de 30% do tempo: 1,2 km a partir da foz.

Rio Caceribú

Extensão máxima da zona de intrusão salina: 8 km a partir da foz.

Extensão da zona de intrusão salina com permanência acima de 30% do tempo: 5,5 km a partir da foz.

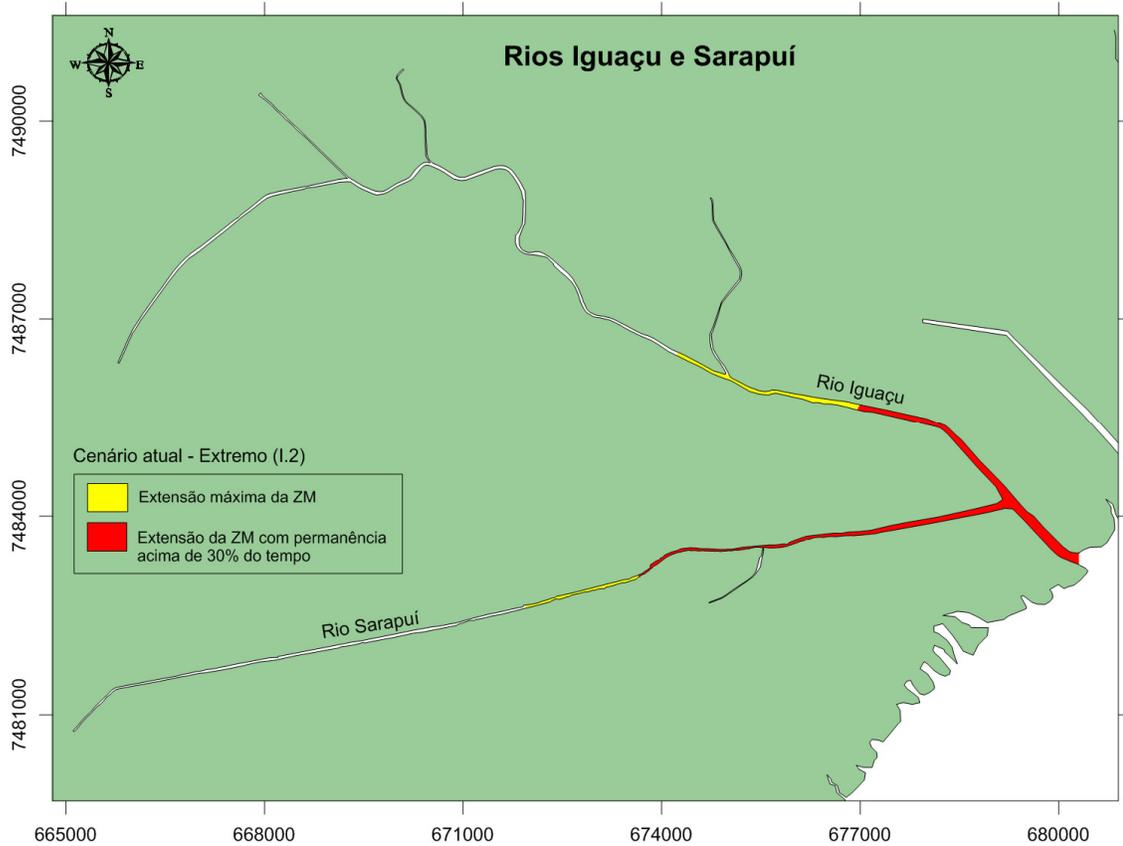


Figura 6.6

Rio Iguaçu

Extensão máxima da zona de intrusão salina: 7 km a partir da foz.
Extensão da zona de intrusão salina com permanência acima de 30% do tempo: 4,2 km a partir da foz.

Rio Sarapuí

Extensão máxima da zona de intrusão salina: 9 km a partir da foz.
Extensão da zona de intrusão salina com permanência acima de 30% do tempo: 7 km a partir da foz.

7. RECOMENDAÇÕES

Conforme ressaltado no Capítulo 2.1. *Desenvolvimento e Calibração de Modelos*, os dados existentes são insuficientes para um processo amplo de calibração dos modelos desenvolvidos com o SisBaHiA® para as regiões de estudo. Destaca-se que tais carências não inviabilizam a utilização dos modelos para estudos diversos. Entretanto, quanto melhor calibrados e validados estiverem os modelos de uma dada região, mais confiabilidade quantitativa se terá nos resultados de diagnóstico e prognóstico. Com a calibração e validação realizadas com os dados secundários existentes, os resultados obtidos com os modelos, apesar de quantitativos, têm um viés mais qualitativo, visto que para todos os casos não foi possível realizar comparações diretas entre valores computados e medidos.

Objetivando o continuado aprimoramento dos modelos desenvolvidos, bem como aumentar o viés quantitativo dos resultados para diagnósticos e prognósticos, apresenta-se nesta seção recomendações e especificações para uma futura coleta de dados primários. Os dados listados são os necessários para suprir carências básicas e para viabilizar um processo adequado de calibração e validação dos modelos.

A especificação de coleta de dados primários para cada região de interesse contém quatro categorias de dados básicos:

1. Geográficos e topo-hidrográficos,
2. Meteorológicos e oceanográficos,
3. Hidrológicos e de vazões afluentes e de captação,
4. Qualidade de água.

As três primeiras categorias compreendem os dados utilizados para calibração e validação de modelos hidrodinâmicos, que são a base para o funcionamento dos modelos de transporte de constituintes que qualificam a água, e.g., OD e DBO. O quarto conjunto é focado nas necessidades dos modelos de qualidade de água, e objetivam a definição de condições iniciais e de parâmetros de qualidade de água para permitir a calibração de coeficientes de difusão/dispersão do sal, ou de qualquer outro constituinte que se deseja estudar.

Somente após a calibração e a validação de modelos hidrodinâmico pode-se efetivamente passar à etapa de calibração e validação de modelos de qualidade de água. Desta forma, a hierarquização da coleta de dados de uma determinada região deverá ser, sequencialmente, a descrita a seguir:

1. Coleta de dados para calibração da modelagem digital do terreno, ou seja, representação da geometria do domínio de modelagem: contornos dos corpos de água, dados de batimetria e tipo de material do leito.
2. Coleta de dados para calibração de modelos hidrodinâmicos, ou seja, representação de padrões de escoamento: dados de maré, níveis de água em rios, correntes, ventos e vazões afluentes e de captação.
3. Coleta de dados para calibração de modelos de transporte e qualidade de água, ou seja, medição da salinidade visando detectar o avanço e recuo da cunha salina ao longo dos ciclos de maré.

7.1. Dados Geográficos e Topo-Hidrográficos

Os dados geográficos e topo-hidrográficos se referem aos contornos das margens, ilhas e zonas de alagamento ocupadas por manguezais de cada região modelada, além da batimetria e caracterização do tipo de material do leito de cada domínio.

- **Contorno**

Todas as informações dos contornos foram levantadas com êxito a partir de imagens do *Google Earth*, não havendo necessidade de fazer o delineamento das margens no campo. No entanto, a definição dos contornos dos bancos sedimentares pode enriquecer o modelo, pois por terem grande mobilidade, podem estar em posições diferentes do que retratado pelas imagens do *Google Earth*.

- **Limites de zonas de alagamento, incluindo cotas de borda com o corpo de água**

Esse item é típico das áreas de manguezais. Em geral, é possível estimar o limite de tais zonas através de imagens de satélite ou aerofotos. Porém, as cotas de borda com o corpo de água não são disponíveis. Cotas de borda são importantes para se definir a partir de que nível de água o manguezal começa a alagar. Deve ser definida a cota de início da vegetação, bem como a cota da borda entre o canal e o banco de mangue, se esta for bem definida. O modelo dos rios Caceribú, Guapimirim, Iguaçú e Sarapuí carece fortemente destes dados.

- **Batimetria**

- Para a região fluvial, recomenda-se para modelos multidimensionais o levantamento de dados distribuídos espacialmente em eixos longitudinais, ao invés das seções transversais utilizadas na modelagem 1D. Uma metodologia que vem sendo empregada com sucesso é a utilização de lanchas equipadas com ecobatímetros ou ADCPs e GPSs. O barco não precisa necessariamente percorrer eixos longitudinais; trajetos em “zigue-zague” fornecem bons resultados e economizam tempo.
- Para a região costeira as cartas náuticas são as principais fontes de dado batimétrico. No entanto, há de se considerar a defasagem de tempo em que as medições foram feitas. Por exemplo, os dados batimétricos do domínio costeiro do rio Macaé foram extraídos da carta 1507, datada de 1974.

- **Tipo de material fundo**

Ao longo dos pontos de medição de batimetria, devem ser colhidas amostras de sedimentos suficientes para caracterização geral do tipo de fundo. Não se trata de realizar análises granulométricas para tal fim, mas ao menos colher amostras suficientes para definir se o fundo é de lama, lama com areia, areia fina, média ou grossa, etc. Se eventualmente forem realizados estudos sedimentológicos, será então necessário uma caracterização sedimentológica abrangente, com granulometria, massa específica e sondagens para determinar o estoque de sedimentos.

7.2. Dados Meteorológicos e Oceanográficos

Para o segundo passo de calibração, a medição de nível de água, correntes e ventos é essencial.

- **Marés e níveis d'água**

Recomenda-se que tais medições sejam realizadas em duas campanhas distintas, com duração de 15 dias cada, de forma a abranger períodos de maré de quadratura e sizígia. As medições deverão ser feitas em três pontos, com intervalo de coleta de 10 minutos. Os pontos deverão estar distribuídos da seguinte forma: um ponto mais próximo possível da fronteira aberta do modelo no mar; um nas proximidades da foz do rio; e outro em um trecho do rio mais para montante que não sofra interferências de meandros, bancos, ilhas, pedras, pontes ou outras estruturas antrópicas. Os dados deverão estar referenciados ao nível médio do mar.

- **Correntes**

Podem ser realizadas nos mesmos pontos em que foram feitas as medições de nível. Ressalta-se a importância de realizar tais medições em locais que não sofram a interferência de meandros, bancos, ilhas, pedras, pontes ou outras estruturas antrópicas.

- **Ventos**

Medição em pelo menos uma estação de monitoramento, com medições de 30 em 30 minutos durante 15 dias. Estas campanhas deverão ser feitas durante as campanhas para coleta de dados dos itens acima descritos.

Todos os dados meteoceanográficos deverão ser coletados nas mesmas datas.

7.3. Dados Hidrológicos e de Vazões Afluentes e de Captação

Apesar dos modelos apresentados neste relatório já utilizarem os dados de vazões predefinidos ($Q_{7,10}$ na maioria dos rios) é necessário haver medição de vazões hidrológicas reais para a calibração dos modelos. Uma vez calibrados e validados, estes poderão exercer a função de prognóstico, obtendo-se confiabilidade quantitativa na modelagem de casos extremos, e.g., utilizando vazões $Q_{7,10}$.

- **Vazão do rio**

Sugere-se a instalação de posto fluviométrico a montante da seção onde foi definida a condição de contorno mais interna de cada modelo. Deverão ser feitas leituras de régua limnimétrica e medições de vazão no posto. O objetivo é o estabelecimento de curva-chave para este posto fluviométrico. Nos dias das campanhas meteoceanográficas, deverão ser feitas leituras de régua com curtos intervalos de tempo para a determinação da vazão do rio.

- **Vazões afluentes e de captação**

Deve-se realizar inspeção de campo para identificação de pontos de lançamento de rede de drenagem, de efluentes domésticos e industriais e pontos de captação de água para irrigação ou afins. As coordenadas dos pontos de lançamento e captação deverão ser indicadas. Tais vazões deverão ser apresentadas com indicação da ocorrência de variações ao longo do dia.

7.4. Dados de Qualidade de Água

Para a calibração dos modelos de transporte de escalares, e.g. sal, medições *in situ* devem ser realizadas de modo a descrever as concentrações dos constituintes nas águas de acordo com as variáveis hidrodinâmicas.

- **Monitoramento de pluma de salinidade**

A campanha de monitoramento deve ser realizada acompanhando a pluma de salinidade na região costeira e nas imediações da foz dos rios modelados. Por meio da medição de salinidade com uso de equipamento instalado em embarcação, será possível acompanhar dinamicamente o desenvolvimento da pluma durante a campanha. Objetivando utilizar estes dados para calibração do modelo de transporte de sal, é necessário que estas medições sejam feitas no período de coleta de dados meteoceanográficos e de vazões, pois deste modo pode-se fazer o balanço de água doce e água salgada (vazão do rio e maré, respectivamente) aportados à região modelada. Os resultados dos limites das Zonas de Mistura apresentados no Capítulo 5. *Resultados*, indicam a região a ser monitorada para a detecção da cunha salina.

7.5. Resumo dos Dados Utilizados em cada Modelo e Sugestões para Futuros Trabalhos

Objetivando o auxílio ao planejamento de uma futura campanha de campo, as tabelas abaixo identificam as principais carências de dados para as 5 regiões estuarinas modeladas. Em seguida, tais regiões são ordenadas para identificar aquelas que possuem os resultados com menor confiabilidade quantitativa, devendo portanto, serem priorizadas nas campanhas de campo.

De modo geral, pode-se avaliar que o modelo do rio Guandu/Canal de São Francisco é o que apresenta a maior confiabilidade quantitativa quanto aos resultados. Apesar de não apresentar dados precisos do tipo de fundo, suas informações topobatimétricas – datadas de 2006, são as mais atuais dentre todas as regiões estudadas. Pode-se dizer que ao menos o Nível 1 do processo de calibração foi atingido satisfatoriamente. No entanto, há carência de dados para realizar as demais calibrações.

O estuário do rio Macaé apresenta algumas defasagens quanto aos dados necessário para o primeiro nível de calibração. A batimetria utilizada resulta de campanhas feitas em 2001. Além disso, através das imagens do *Google Earth* constata-se que o contorno de alguns trechos do rio foram modificados, tendo sido retificados ou eliminados. Deste modo, tanto os dados batimétricos quanto os de contorno das margens precisam ser atualizados.

Já os estuários do rio Paraíba do Sul, São João e da Baía de Guanabara – rios Iguçu/Sarapuí, Caceribú e Guapimirim, não possuem nenhuma das informações necessárias para a calibração de Nível 1. Suas batimetrias nos trechos fluviais foram todas inferidas a partir de relações fluviomorfológicas, prejudicando a confiabilidade quantitativa dos resultados dos modelos. Assim, recomenda-se que estudos futuros priorizem a coleta de dados nestas regiões, que não possuem qualquer dado de campo.

Região	Dados Hidrográficos e Topo-Hidrográficos							
	Contornos		Limites de Zonas de Alagamento (Mangue)		Batimetria		Tipo de Material de Fundo	
	Utilizado	Recomendação	Utilizado	Recomendação	Utilizado	Recomendação	Utilizado	Recomendação
Paraíba do Sul	<i>Google Earth</i>	Conferir a localização dos bancos e ilhas e meandros	-	Dispensável	Fluvial: Estimada Costeira: Carta Náutica (2004)	Medições no trecho fluvial e atualização da costa	Areia Média	Caracterização geral do tipo de fundo
Guandu/Canal de São Francisco	<i>Google Earth</i>	-	-	Dispensável	Medições (2006)	Atualização das medições fluviais e costeiras	Areia Média	Caracterização geral do tipo de fundo
São João	<i>Google Earth</i>	Conferir a localização dos bancos e ilhas e meandros	-	Definir as cotas de início da vegetação e da borda entre o canal e o banco de mangue	Fluvial: Estimada Costeira: Carta Náutica (1988)	Medições no trecho fluvial e atualização da costa	Areia Média	Caracterização geral do tipo de fundo
Macaé	<i>Google Earth</i>	Conferir a localização dos bancos, ilhas e meandros	-	Dispensável	Fluvial: Medições (2001) Costeira: Carta Náutica (1974)	Atualização do trecho fluvial e costeiro	Areia Média	Caracterização geral do tipo de fundo
Baía de Guanabara: Iguçu/Sarapuí e Caceribú/Guapimirim	<i>Google Earth</i>	Conferir a localização dos bancos, ilhas e meandros	-	Definir as cotas de início da vegetação e da borda entre o canal e o banco de mangue	Fluvial: Estimada Costeira/Baía: Cartas Náuticas (1962 e 1983)	Medições no trecho fluvial e atualização da baía/costa	Areia Média	Caracterização geral do tipo de fundo

Região	Dados Meteorológicos e Oceanográficos					
	Marés e níveis d'água		Correntes		Ventos	
	Utilizado	Recomendação	Utilizado	Recomendação	Utilizado	Recomendação
Paraíba do Sul	CH ⁴ – Estação Fundeio 2 Norte – Oceânica (1995)	Medições no trecho fluvial e costeiro	-	Medições no trecho fluvial e costeiro	Cenário desfavorável	Medições em ao menos 1 estação
Guandu/Canal de São Francisco	CH – Estação Ponta Guaia (1990)	Medições no trecho fluvial e costeiro	-	Medições no trecho fluvial e costeiro	Cenário desfavorável	Medições em ao menos 1 estação
São João	CH – Estação Rio das Ostras (1982)	Medições no trecho fluvial e costeiro	-	Medições no trecho fluvial e costeiro	Cenário desfavorável	Medições em ao menos 1 estação
Macaé	CH – Estação Porto Macaé (1993)	Medições no trecho fluvial e costeiro	-	Medições no trecho fluvial e costeiro	Cenário desfavorável	Medições em ao menos 1 estação
Baía de Guanabara: Iguaçu/Sarapuí e Caceribú/Guapimirim	CH – Estação Ilha Fiscal (1965)	Medições no trecho fluvial e costeiro	-	Medições no trecho fluvial e costeiro	Vento típico	Medições em ao menos 1 estação

⁴ CH – Constantes Harmônicas

Região	Dados Hidrológicos e Vazões Afluentes e de Captação				Dados de Qualidade de Água	
	Vazão do rio		Vazões Afluentes/Efluentes		Monitoramento da Pluma Salina	
	Utilizado	Recomendação	Utilizado	Recomendação	Utilizado	Recomendação
Paraíba do Sul	Q _{7,10} – Estudo de regionalização de vazões da sub-bacia 58 (CPRM)	Instalação de postos fluviométricos	-	Inspeção de campo	-	Monitoramento na região próxima à ZM do Cenário I.2
Guandu/Canal de São Francisco	Vazão de cenário crítico de oferta hídrica (PERH-Guandu)	Instalação de postos fluviométricos	Tabela de disponibilidade e uso consultivo	-	Medições de cunha salina (2006)	Atualização das medições
São João	Q _{7,10} – Relação de áreas de drenagem com o Posto de Correntezas	Instalação de postos fluviométricos	-	Inspeção de campo	-	Monitoramento na região próxima à ZM do Cenário I.2
Macaé	Q _{7,10} - Estudo de regionalização de vazões (Elpaso/Ecologus)	Instalação de postos fluviométricos	-	Inspeção de campo	-	Monitoramento na região próxima à ZM do Cenário I.2
Baía de Guanabara: Iguaçú/Sarapuí e Caceribú/Guapimirim	Q _{7,10} – (Malta,2005 e UFF/FEC, 2010)	Instalação de postos fluviométricos	-	Inspeção de campo	-	Monitoramento na região próxima à ZM do Cenário I.2

8. CONCLUSÕES

A determinação das três zonas estuarinas – Zona de oscilações de níveis de água (ZNA), Zona de inversão de correntes (ZIC) e Zona de mistura (ZM), são de grande importância no planejamento urbano das cidades costeiras. A definição do limite de cada uma dessas zonas serve de embasamento para sistemas de outorga, projetos de macrodrenagem, determinação de pontos de captação de água e lançamento de efluentes, dentre outros. Assim, a análise dessas zonas deve considerar não apenas as situações ambientais atuais, como também os cenários de longo prazo, em que fortes alterações climáticas podem vir a influenciar.

Neste sentido, a modelagem computacional é uma ferramenta útil, pois permite tanto o diagnóstico quanto o prognóstico de cenários, auxiliando a tomada de decisões de curto, médio e longo prazo. No entanto, como a modelagem hidrodinâmica ambiental é um processo evolutivo – como descrito no item 2.1 - Desenvolvimento e Calibração de Modelos, é inevitável o fato de que seus resultados são, no máximo, tão bons quanto os dados que o alimentam.

Para o presente estudo, cinco regiões estuarinas foram estudadas: rio Paraíba do Sul, rio Guandu/canal de São Francisco, rio São João, rio Macaé e Baía de Guanabara, com foco nos rios Iguaçú/Sarapuí, Caceribú e Guapimirim. Os modelos foram subsidiados com dados ambientais secundários existentes ou inferidos.

Desta forma, os resultados encontrados estão relacionados ao nível de precisão dos dados secundários disponíveis. No entanto, independente da qualidade dos dados, os resultados obtidos neste estudo são uma importante contribuição para o conhecimento do comportamento das principais zonas estuarinas do ERJ.

De forma geral, os resultados dos modelos hidrodinâmicos e de qualidade de água mostraram que:

- A maré meteorológica influencia de forma pouco significativa no limite das zonas. A ZIC-Sizígia é deslocada suavemente para a montante, enquanto que a ZM praticamente não tem sua posição alterada.
- Maiores modificações são observadas com a elevação do nível médio do mar. Neste caso todas as zonas são deslocadas para montante, sendo as ZNAs e ZICs consideravelmente mais alteradas do que a ZM.
- Mesmo na comparação entre o cenário mais conservador, I.1, e o mais extremo, II.2, em geral o limite da ZM avança pouco para montante nos estuários. O maior deslocamento observado, dentre todos estuários analisados, foi de 5,5 km no rio Caceribú, onde a declividade do leito é bastante suave, permitindo maiores influências da maré.

Considerando a carência ou desatualização dos dados ambientais que alimentaram os modelos, recomenda-se que sejam realizados estudos futuros, em que campanhas de medições de campo sejam feitas (item 7). Tais medições permitiriam a calibração e validação dos modelos, aumentando a confiabilidade dos resultados.

9. BIBLIOGRAFIA

- AMARAL, K.J., 2003, *Estuário do Rio Macaé: Modelagem Computacional como Ferramenta para o Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MALTA, F.S., 2005, *Estudo de correntes de maré no complexo estuarino da Baía de Guanabara – RJ*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- RICHARDS, K., 1982, *Rivers, form and process in alluvial channels*, 1^a ed., New York, Methuen & CO. Ltd.
- ROSMAN, P.C.C., 2000, SisBaHiA – (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental) – Documentação de referência técnica – Fundação COPPETEC – COPPE/UFRJ. Disponível na internet no site: www.sisbahia.coppe.ufrj.br.
- ROSMAN, P.C.C., 2006, *Modelagem Computacional da Hidrodinâmica e da Intrusão Salina no canal de São Francisco, Baía de Sepetiba-RJ, para Avaliação de Disponibilidade Hídrica*, Projeto COPPETEC: PEnO-6963, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- UFF/FEC, 2010, *Planejamento Estratégico da Região Hidrográfica dos Rios Guapi-Macacu e Caceribu-Macacu*, Projeto Macacu, Niterói, RJ.