



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

# MODELO HIDRODINÂMICO 2D PARA O SISTEMA ESTUARINO BAÍA DA CARTAGENA

FREDYS SEGUNDO CASTELLANO BARBOZA

Belém  
2018

FREDYS SEGUNDO CASTELLANO BARBOZA

**MODELO HIDRODINÂMICO 2D PARA O SISTEMA  
ESTUARINO BAÍA DA CARTAGENA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Geofísica da Universidade Federal do Pará para ob-  
tenção do título de Mestre em Geofísica.

Área de Concentração: Geofísica marinha

Orientador: Marcelo Rollnic

Belém  
2018

FREDYS SEGUNDO CASTELLANO BARBOZA

MODELO HIDRODINÂMICO 2D PARA O SISTEMA  
ESTUARINO BAÍA DA CARTAGENA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Geofísica da Universidade Federal do Pará para ob-  
tenção do título de Mestre em Geofísica.

Data de aprovação:

Banca Examinadora:



---

Marcelo Rollnic (Orientador)  
UFPA



---

Ludimila Pinheiro  
UFPA



---

Alex Costa da Silva  
UFPE

Este trabalho está dedicado à memória de  
minha avó Maria E Tapias LLorentes.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Marcelo Rollnic, pela sua orientação e valiosas considerações, o laboratório de Geofísica Marinha (GEOFMAR), pela sua disposição em compartilhar seus conhecimentos, o Centro de Pesquisa Oceanográfica e Hidrográfica (CIOH) da Colômbia pelo sua disposição em compartilhar os dados reais usados neste trabalho, a Universidade Federal do Pará e o Programa de Pós-Graduação em Geofísica e ao Cnpq pela contribuição de uma bolsa de estudos para fazer este trabalho.

E Deus limpará de seus olhos toda a lágrima; e não haverá mais morte, nem pranto, nem clamor, nem dor; porque já as primeiras coisas são passadas. Apocalipse 21:4

## RESUMO

Neste trabalho apresenta-se a implementação, validação de um modelo hidrodinâmico bi-dimensional para a Baía de Cartagena (Colômbia) e sua calibração por séries de tempo de maré e dados de corrente. O modelo hidrodinâmico é um módulo do modelo SisBaHia® (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental). Os resultados do modelo hidrodinâmico foram comparados com medições de marés e medições de corrente. A comparação mostrou uma boa aproximação entre os dados, particularmente melhor na maré alta em comparação com a maré baixa. É mostrado também o uso de varios tipo de malhas para garantir uma resolução e qualidade adequadas da malha considerando o tipo de geometria que a baía de Cartagena apresenta. Algumas condições de fronteira, como a diferença de fase de maré, são definidas a partir de um modelo de maré global, dada a falta de informações nesta região. O modelo foi calibrado com dados pretéritos de elevação da superfície e velocidade de correntes coletados em dois períodos: seco do ano 2014, chuvoso do ano 2014. Também foi aplicado para estimar a quantidade de água entrando e saindo da baía em condição de marés de sizigia e de quadratura, tanto para a estação seca quanto para a estação chuvosa, considerando a contribuição do canal do Dique

**Palavras-chaves:** Modelagem hidrodinâmica. Calibração. Validação. SisBaHia®.

## ABSTRACT

This work presents the implementation and validation of a two-dimensional hydrodynamic model for the Cartagena Bay (Colombia) and its calibration by real data of surface elevation and current speed. The hydrodynamic model is a module of the SisBaHia model (Base System of Environmental Hydrodynamics). The results of the hydrodynamic model were compared to tide measurements and current measurements. Some boundary conditions, such as tidal phase difference, are defined from a global tide model, given the lack of information in this region. In addition, a procedure is shown to ensure a mesh that provides good quality and resolution considering the geometry conditions of Cartagena Bay. The model was calibrated with previous surface elevation data and current speed collected in two periods: dry 2014, rainy 2014. The calibration showed a good approximation between real and model data, particularly better at high tide also applied to estimate the amount of water entering and leaving the bay in a living and dead tide, both for the dry season and for the rainy season, considering the contribution of Dique channel.

**Keywords:** Modelagem hidrodinâmica. Calibração. Validação. SisBaHia©.

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Localização da área . . . . .	3
2.2	Média plurianual de temperatura mínima, média e máxima na cidade de Cartagena. . . . .	4
2.3	Média plurianual de precipitação na cidade de Cartagena. . . . .	5
3.1	Tipo de malhas de elementos finitos: (a) Malha estruturada, (b) Malha não estruturada. . . . .	8
3.2	Exemplo da distribuição de 9 nós do elemento quadrangular e 6 nós do elemento triangular. Os números em azul indicam o número dos nós na malha, enquanto que a numeração em preto a localização dos nós nos elementos. . . . .	9
3.3	Malhas confeccionadas para discretização da área: (a) Malha de refinamento médio, (b) Malha de refinamento fino. . . . .	10
3.4	Mapa batimétrico da área de estudo. . . . .	11
3.5	Curva de maré genérica para um mês gerada a partir das constantes harmônicas. . . . .	14
3.6	Intensidade e direção dos ventos no mês de Janeiro. . . . .	15
3.7	Intensidade e direção dos ventos no mês de junho do ano 2014 . . . . .	15
3.8	Precipitação total na cidade de Cartagena no mês de junho do ano 2014 . . . . .	16
3.9	Localização dos pontos de calibração. . . . .	19
3.10	Malha com elementos definindo a seção do canal do Dique . . . . .	20
4.1	Calibração do modelo. . . . .	22
4.2	Calibração do modelo em relação à velocidade de corrente com a malha de resolução média. . . . .	23
4.3	Calibração do modelo em relação à velocidade de corrente com a malha de resolução fina. . . . .	24
4.4	Comparação na maré do mês de janeiro entre os dados modelados (vermelho) e reais(azul). . . . .	25
4.5	Comparação na maré de sizígia entre os dados modelados (vermelho) e reais (azul). . . . .	26
4.6	Comparação na maré de quadratura entre os dados modelados (vermelho) e reais(azul). . . . .	26
4.7	Comparação na maré do mês de junho entre os dados modelados (vermelho) e reais(azul). . . . .	27
4.8	Comparação na maré de sizígia do mês de junho entre os dados modelados (vermelho) e reais(azul). . . . .	27
4.9	Comparação na maré de quadratura do mês de junho entre os dados modelados (vermelho) e reais(azul). . . . .	28
4.10	Vazão d'água ( $m^3/s$ ) que entram e saem da baía de Cartagena em maré de quadratura no período seco mês de janeiro: (a) Vazão em Boca chica, (b) Vazão em Boca grande, (c) Vazão no canal do Dique . . . . .	29

4.11	Vazão d'água ( $m^3/s$ ) que entram e saem da baía de Cartagena em maré de sizígia o período seco mês de janeiro: (a) Vazão em Boca chica, (b) Vazão em Boca grande, (c) Vazão no canal do Dique . . . . .	30
4.12	Vazão d'água ( $m^3/s$ ) que entram e saem da baía de Cartagena em maré de quadratura no período chuvoso mês de junho: (a) Vazão em Boca chica, (b) Vazão em Boca grande, (c) Vazão no canal do Dique . . . . .	31
4.13	Vazão d'água ( $m^3/s$ ) que entram e saem da baía de Cartagena em maré de sizígia no período chuvoso mês de junho: (a) Vazão em Boca chica, (b) Vazão em Boca grande, (c) Vazão no canal do Dique . . . . .	32
4.14	Volumes de água (Mm) que entram e saem da baía de Cartagena em diferentes condições de maré no período seco: (a) Maré de quadratura, (b) Maré de sizígia . . . . .	33
4.15	Volumes de água (Mm) que entram e saem da baía de Cartagena em diferentes condições de maré no período chuvoso: (a) Maré de quadratura, (b) Maré de sizígia . . . . .	34

## LISTA DE TABELAS

3.1	Características dos tipos de malhas de elementos finitos. . . . .	8
3.2	Informações sobre as malhas na área de estudo. . . . .	9
3.3	Valores de rugosidade para diferentes tipos de leito(Rosman, 2015) . . . . .	12
3.4	Constantes harmônicas de maré para estação em a ílhia Manzanillo. . . . .	13
3.5	Configurações referentes ao modelo hidrodinâmico. . . . .	18
4.1	Vazão máxima período seco no mês de Janeiro. . . . .	30
4.2	Vazão máxima período chuvoso no mês de junho. . . . .	32
4.3	Transporte resultante no período seco nas entradas á baía . . . . .	34
4.4	Transporte resultante no período chuvoso nas entradas á baía . . . . .	34

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS . . . . .	2
1.1.1	Objetivo geral . . . . .	2
1.1.2	Objetivo específico . . . . .	2
<b>2</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>6</b>
3.1	DOMÍNIO DE MODELAGEM E MALHA . . . . .	7
3.2	BATIMETRIA . . . . .	10
3.3	RUGOSIDADE DO FUNDO . . . . .	11
3.4	CONDIÇÕES DE CONTORNO . . . . .	12
3.5	VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS . . . . .	14
3.6	CONFIGURAÇÕES GERAIS UTILIZADAS NO MODELO HIDRODINÂMICO . . . . .	16
3.7	CALIBRAÇÃO . . . . .	18
3.8	VALIDAÇÃO . . . . .	19
3.9	APLICAÇÃO . . . . .	20
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>22</b>
4.1	CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO . . . . .	22
4.2	VALIDAÇÃO DO MODELO . . . . .	24
4.3	APLICAÇÃO . . . . .	28
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b>	<b>38</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>39</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Os modelos numéricos devem ser calibrados e verificados antes da sua implementação. No entanto, não há procedimento amplamente aceito para fazer esta tarefa. A calibração depende de vários aspectos, incluindo a disponibilidade de dados, as características do corpo de água e acima de tudo, percepção, opinião e experiência dos modeladores (Hsu et al., 1999). A combinação de complexidade nos parâmetros numérico e físico, bem como a mesma estrutura do modelo hidrodinâmico e erros nas medidas de campo, são fatores que introduzem incerteza no uso de modelos numéricos (Sincock et al., 2003). Por esse motivo, é necessário usar técnicas para investigar e conhecer o comportamento do modelo contra esse tipo de incerteza. Algumas dessas técnicas podem ser consultadas em Wheeler and Beck (1995). Se o modelo mostra grande sensibilidade a um parâmetro específico, a incerteza nos resultados do modelo estará altamente associada à incerteza de valor desse parâmetro; este aspecto pode fazer do processo de construção e calibração de modelo, uma atividade complexa (Palacio, 2002).

Na baía de Cartagena foram utilizados alguns modelos hidrodinâmicos, como é o caso do modelo RMA para caracterizar esta região, mas devido à falta de dados reais não foi possível concluir no comportamento desses modelos em termos da corrente. O pacote computacional para modelagem hidrodinâmica ambiental SisBaHiA<sup>®</sup>, é a primeira vez que foi testado no hemisfério norte no desenvolvimento deste trabalho.

A metodologia do trabalho consistiu em: 1) fazer o levantamento de dados pretéritos de corrente, elevação da superfície livre, batimetria da região da baía cartagena, 2) confecção de malha discretizada para a área de estudo, 3) Implementação, calibração, validação e aplicação de modelo hidrodinâmico utilizando o pacote computacional para modelagem hidrodinâmica ambiental SisBaHiA<sup>®</sup>. Os dados utilizados na calibração do modelo tem como fonte o banco de dados do Centro de Pesquisa Oceanográfica e Hidrográfica (CIOH, Colombia).

Com o modelo calibrado, ele foi aplicado para se conhecer o volume de água que entra e sai da parte interna da baía em maré de quadratura e sizígia.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

- Verificação de fluxo d'água de entrada e saída para a baía Cartagena considerando a contribuição do canal de Dique.

### 1.1.2 Objetivo específico

- simular as condições hidrodinâmicas da baía Cartagena através do uso de Modelo Hidrodinâmico 2DH do SisBaHiA® em períodos distintos
- Calibração e validação do modelo hidrodinâmico através de dados coletados in situ.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

A Baía de Cartagena está localizada no centro do Caribe colombiano, figura 2.1, entre as latitudes de  $10^{\circ} 26' N$  -  $10^{\circ} 16' N$  e longitudes de  $75^{\circ}30' W$  -  $75^{\circ}36' W$ . De acordo com as características morfológicas da baía, ela apresenta um comprimento máximo meridional de  $16\text{ km}$  e  $9\text{ km}$  de comprimento latitudinal, com uma área superficial de  $82,6\text{ km}^2$  e profundidade média de  $26\text{ m}$  (Tuchkovenko and Lonin, 2003). Ao oeste da baía encontra-se a ilha de Tierrabomba, cuja localização origina duas entradas; uma denominada Bocagrande, localizada ao noroeste; e a outra Bocachica, a sudoeste da ilha. Ao Sudoeste da baía existem três canais de acesso. Destes, o principal e mais profundo é o Bocachica; o outro canal é chamado Canal de Varadero e o canal botadero localizado entre as ilhas Draga e Abanico, com profundidades de apenas  $2\text{ m}$  (Ray, 1999). No Sudeste da baía encontra-se o Canal do Dique, que descarrega água doce do rio Magdalena na baía, uma importante artéria fluvial que flui do Sul para o Norte do país.

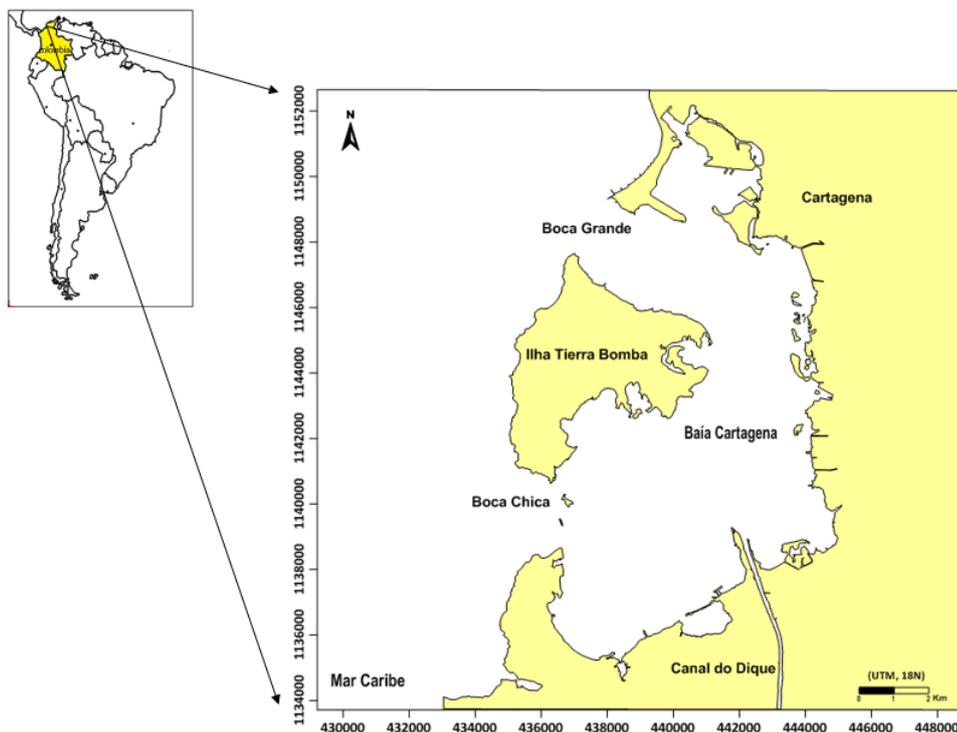


Figura 2.1: Localização da área

Cartagena das Índias tem um clima caracterizado como tropical semi-árido. Com estação chuvosa ocorrendo entre os meses de abril a outubro, apresentando umidade em torno de 90%. Já a estação seca ocorre, tipicamente, entre os meses de novembro e março..

Devido à sua localização geográfica na região do sudoeste do Caribe, o regime climático da região onde Cartagena de Indias está sob a influência dos deslocamentos Norte-Sul da Zona de Convergência Intertropical (Z.C.I.)(Urbano, 1993; Durango, 2009).

A ZCI é uma area semicontinua de baixa pressão localizada entre as regiões subtropicais dos hemisférios norte e sul; Este cinto também é conhecido como a Crista Equatorial, Frente Intertropical e Frente Equatorial.

Na área, dois principais períodos climáticos são identificados, denominados período seco (Verão) e período chuvoso (Inverno) e um período de transição. Vale ressaltar que, embora o tempo esteja quente durante todo o ano, ele sempre faz o vento, é sempre um fator a ser levado em conta para resultar no clima suportável e confortável. Os meses de novembro a fevereiro são os mais ventosos do ano, resultando em um resfriamento extra.

As temperaturas máximas na cidade de Cartagena registraram média plurianual de 31,5 °C, apresentando valores mais elevados nos meses de junho, julho e agosto com médias entre 31,9°C e 32,0°C, e seus valores mínimos entre janeiro a março, com médias entre 31,0 °C e 31,1°C. Da mesma forma, a temperatura média apresenta seus maiores valores entre os meses de maio a junho, com médias entre 28,3°C e 28,4°C. Os valores mínimos da temperatura média são apresentados durante os meses de janeiro, fevereiro e março, oscilando entre 26,8°C e 27,1°C. (Urbano, 1993; Durango, 2009).

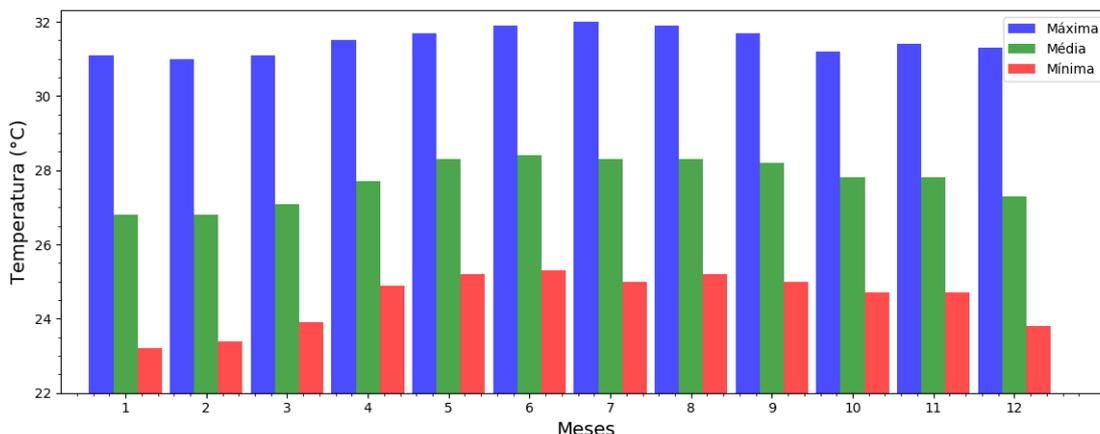


Figura 2.2: Média plurianual de temperatura mínima, média e máxima na cidade de Cartagena.

Na cidade de Cartagena, o período de chuvoso vai do mês de abril a novembro, às vezes se estende até a segunda semana de Dezembro, os valores variam entre 29 e 244 milímetros / mês, com os mais altos níveis de precipitação no mês de outubro. O período seco decorre dos meses de dezembro a março, com médias entre 1,0 e 37 mm / mês (Urbano, 1993; Durango, 2009). Da mesma forma, o número de dias com precipitação varia ao longo do ano entre 0 e 17 dias, figura 2.3.

Os níveis mais altos de precipitação são registrados nos meses de outubro e novembro, seguido de maio, junho, agosto, setembro e dezembro, e o período de menor precipitação

ocorre nos meses de fevereiro e março.

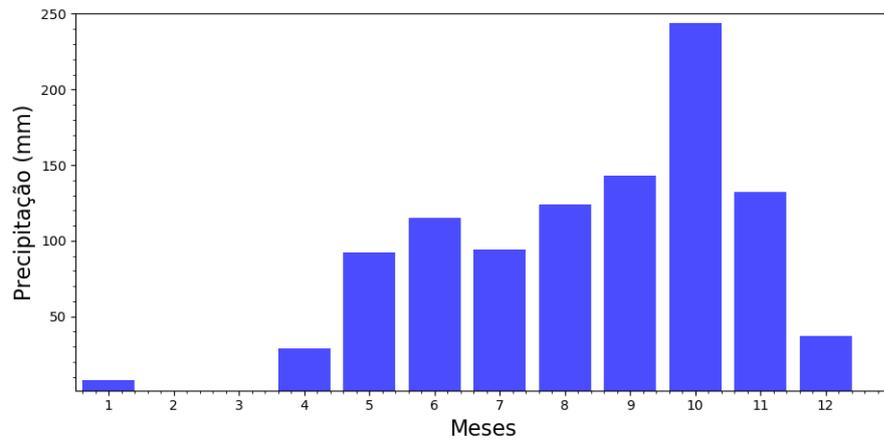


Figura 2.3: Média pluriannual de precipitação na cidade de Cartagena.

### 3 METODOLOGIA

O SisBaHia é um pacote profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação Coppetec, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do COPPE/UFRJ - Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Dentro do pacote escolhido utiliza-se o modelo FIST3D (Filtered in Space and Time). Uma característica importante deste modelo é o fato dele modelar os efeitos de sub-escala (turbulência) baseado em técnicas de filtragem, semelhantes àquelas empregadas na simulação de grandes vórtices (LES - Large Eddy Simulation) (Rosman, 2015). O SisBaHia oferece duas opções de modelagem: 3D e 2DH.

No presente trabalho, optou-se pela modelagem 2DH, a qual caracteriza-se pela resolução das equações de movimento (Navier-Stokes) com aproximação de águas rasas (pressão hidrostática) para escoamentos homogêneos integrados na vertical na direção  $x$  equação 3.1 e na direção  $y$  equação 3.2 e a resolução da equação da continuidade (do volume) integrada na vertical equação 3.3, tendo como solução os valores  $U$ ,  $V$  e  $\xi$  que representam a velocidade longitudinal média na coluna d'água, a velocidade transversal média na coluna d'água e a elevação da superfície livre, respectivamente.

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = & -g \frac{\partial \xi}{\partial x} - g \frac{H}{2} \frac{\partial \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial (H \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H \tau_{xy})}{\partial y} \right) + \\ & \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S - \tau_x^B - \tau_x^E) - \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + 2\omega V \operatorname{sen}\theta - \frac{U}{H} \sum q \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = & -g \frac{\partial \xi}{\partial y} - g \frac{H}{2} \frac{\partial \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial (H \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (H \tau_{yy})}{\partial y} \right) + \\ & \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^S - \tau_y^B - \tau_y^E) - \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + 2\omega U \operatorname{sen}\theta - \frac{V}{H} \sum q \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial (\xi + h)}{\partial t} + \frac{\partial U H}{\partial x} + \frac{\partial V H}{\partial y} = \sum q \quad (3.3)$$

$\frac{\partial U}{\partial t} \rightarrow$  Aceleração local.

$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} \rightarrow$  Aceleração advectiva.

$-g \frac{\partial \xi}{\partial x} \rightarrow$  Componente barotrópica do gradiente de pressão.

$-g \frac{H}{2} \frac{\partial \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)}{\partial x} \rightarrow$  Componente baroclínica do gradiente de pressão.

$\frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right) \rightarrow$  Resultante das tensões turbulentas 2DH.

$\frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S - \tau_x^B - \tau_x^E) \rightarrow$  Resultante das tensões de atrito entre o fundo, superfície e estruturas inseridas no escoamento.

$\frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \rightarrow$  Efeito das tensões de radiação devido a ondas de curto período.

$2\omega V \sin\theta \rightarrow$  Aceleração de Coriolis.

$\frac{U}{H} \sum q \rightarrow$  Efeitos na quantidade de movimento devido à variação de massa

em função dos fluxos, por unidade de área, de precipitação, evaporação e infiltração.

Para a correta implementação do modelo hidrodinâmico, as características de fronteira devem ser fornecidas. Dentre essas características, aquelas que vão nortear a resolução numérica do modelo, são chamadas condições de contorno. As informações básicas a serem fornecidas na condição de contorno e iniciais são: Domínio de modelagem e malha, os quais delimitam a região modelada, esta região é limitada pelos contornos (ou fronteira) de terra, que podem representar ilhas, porções continentais e margens dos corpos d'água e pelo contorno aberto, que representa o limite do domínio de água modelada; a batimetria do corpo d'água e a rugosidade do fundo (Rosman, 2015).

SisBaHia tem a opção de modelar volumes de água que estão entrando no domínio através de seus limites (fronteiras).

### 3.1 DOMÍNIO DE MODELAGEM E MALHA

Para um bom uso e criação de uma malha de elementos finitos é necessário conhecer os tipos de malhas existentes e as que podem ser implementadas no SisBahia, considerando as características e vantagens de cada uma, ver tabela 3.1 . As malhas de elementos finitos são classificadas em malhas estruturadas e não estruturadas (Tizón, 2010), figura 3.1.

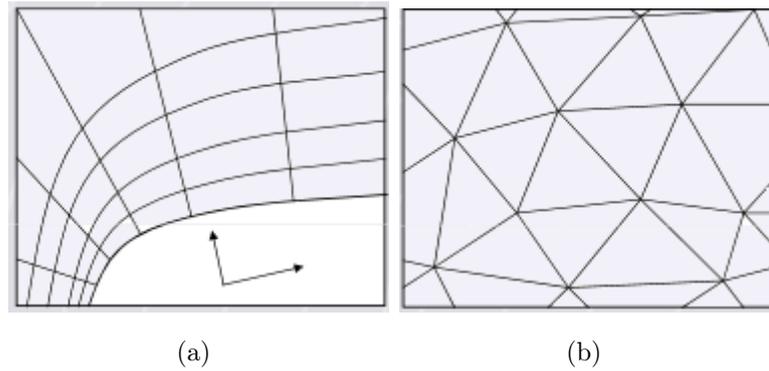


Figura 3.1: Tipo de malhas de elementos finitos: (a) Malha estruturada, (b) Malha não estruturada.

Tabela 3.1: Características dos tipos de malhas de elementos finitos.

Malha estruturada	Malha não estruturada
Geração semiautomática	Geração automática
Alinhamento em contornos	Geometrias complexas
Menos memória	Mais memória
Menos tempo de cálculo	Mais tempo de cálculo

Na confecção da malha utilizou-se uma opção própria do SisBahia para confecção de malhas não estruturadas com elementos finitos, o qual permite fazer malha com elementos triangulares e quadrangulares. Os elementos triangulares tem 6 nós e o elementos quadrangulares tem 9 nós, ver na figura 3.2.

A transição entre elementos deve ser suave, elementos adjacentes não devem ultrapassar o fator 2 de proporção entre eles, ou seja, os elementos adjacentes devem ser no máximo metade ou o dobro de um do outro. Portanto, se estiver fazendo uma malha com uma região superdetalhada e outra não detalhada, a gradação entre elas deve ser suave (Rosman, 2015).

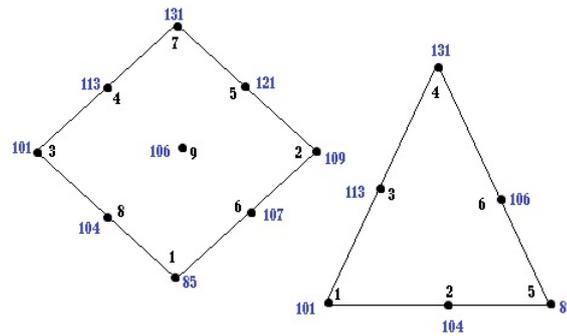


Figura 3.2: Exemplo da distribuição de 9 nós do elemento quadrangular e 6 nós do elemento triangular. Os números em azul indicam o número dos nós na malha, enquanto que a numeração em preto a localização dos nós nos elementos.

Para esta dissertação as malhas confeccionadas foram: uma malha de refinamento médio e uma de refinamento fino. A malha de refinamento médio é composta por 3254 elementos e 12619 nós, 2797 elementos quadrangulares e 457 elementos triangulares, sendo 11585 nós internos, 973 nós de contorno de terra e 63 de contorno aberto e 2 nós híbridos sendo de contorno de terra e aberto, ver na figura 3.3a. A malha de refinamento fino é composta por 4319 elementos e 17855 nós, 4307 elementos quadrangulares e 12 elementos triangulares, sendo 16643 nós internos, 1151 nós de contorno e terra e 63 de contorno aberto e 2 nós híbrido, ver na figura 3.3b.

As duas malhas cobrem uma área de aproximadamente  $12.3940 \text{ km}^2$ , tabela 3.2. O limite do domínio de água modelado é estabelecido através da fronteira aberta.

As duas entradas que se conectam ao mar aberto e a parte interna da baía é a região de maior interesse dentro do modelo, por isso foi necessário um refinamento maior da malha nessa região, visando obter maior estabilidade numérica, ver na figura 3.3b.

Tabela 3.2: Informações sobre as malhas na área de estudo.

Número de elementos	Número de nós	Área total da malha $\text{km}^2$
3254	12619	12.3940
4319	17855	12.3950

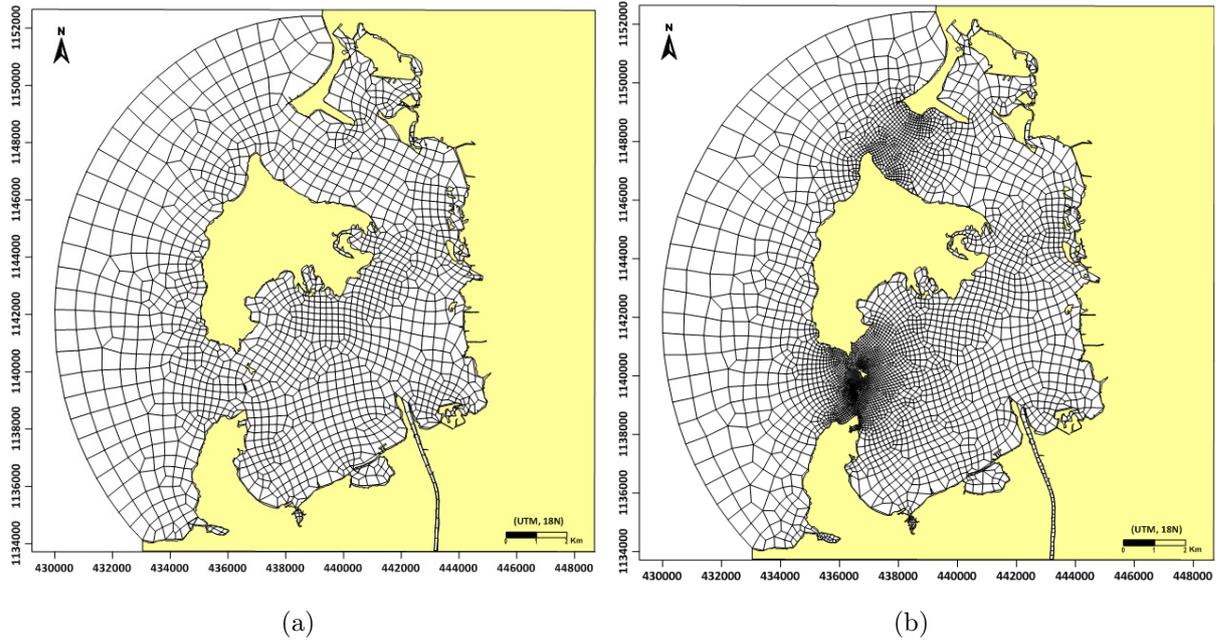


Figura 3.3: Malhas confeccionadas para discretização da área: (a) Malha de refinamento médio, (b) Malha de refinamento fino.

### 3.2 BATIMETRIA

A batimetria da baía Cartagena inserida foi obtida do banco de dados do Centro de Investigações Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH) coletados em 2014. A coleta foi realizada através do uso de um equipamento de medição hidrográfica de alta frequência (200 KHz) com precisão de 1% da profundidade e um DGPS com precisão submétrica. Após a integralização dos dados de batimetria, gerou-se um mapa batimétrico, como se observa na figura 3.4 através da interpolação kriging, que consiste em uma média ponderada de valores conhecidos em determinadas posições espaciais, para estimar um valor desconhecido em uma determinada posição (Kansas, 2005).

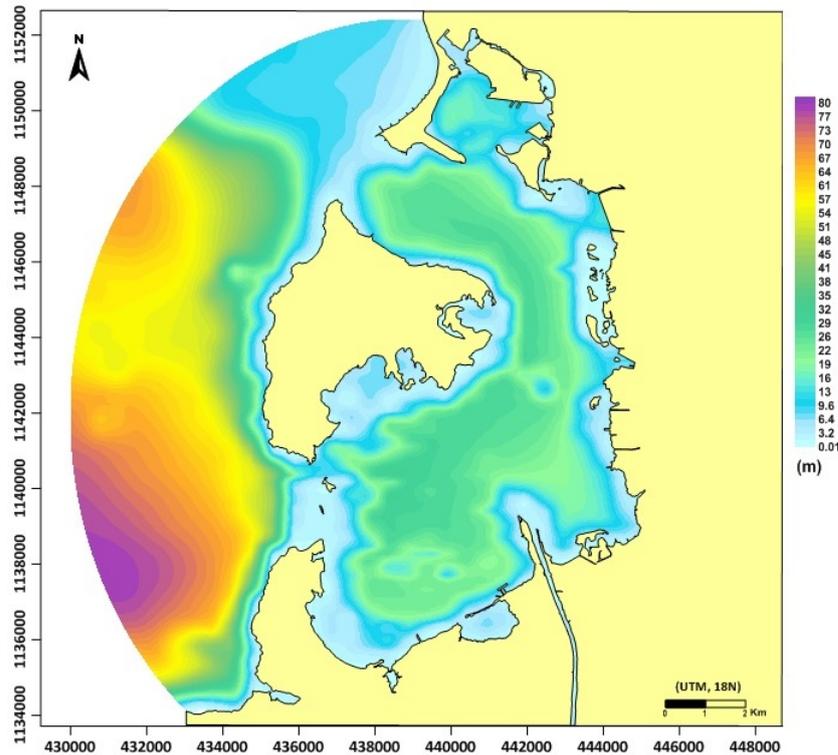


Figura 3.4: Mapa batimétrico da área de estudo.

### 3.3 RUGOSIDADE DO FUNDO

A rugosidade do fundo é caracterizada pela variável amplitude da rugosidade  $\epsilon$ , que é definida de acordo com o tipo sedimentar de leito. A rugosidade influencia diretamente nos termos de atrito os quais agem de forma a dissipar a energia da onda. Os fundos podem ser classificados como: leito de sedimentos com rugas e similares, fundo de pedra ou rochoso e fundo de concreto, cada um desses tipos possuem ainda subdivisões, conforme apresentado na tabela 3.3.

Assim, utilizando os valores de rugosidade da tabela 3.3 e fazendo uma interpolação com o método kriging, gerou-se um mapa de distribuição de rugosidade do fundo, sendo que os valores de rugosidade constantes e igual a 0.001 na parte interna da baía e uma rugosidade na parte externa e estritos da baía de 0.0001.

A morfologia da Baía de Cartagena é composta por argila e areia fina, um exemplo típico da Ilha Tierra Bomba e Isla Barú. O setor Norte da região caracteriza-se pela presença de formações de saída de composição arenosa, como Punta Canoas, e no setor Sul presença de formações calcáreas e recifes que cercam o mar, que são conformados

Tabela 3.3: Valores de rugosidade para diferentes tipos de leito(Rosman, 2015)

Leito de sedimentos com rugas e similares	Rugosidade
Predominância de siltes e finos	$0.0001m < \epsilon < 0.0100m$
Predominância de areias finas	$0.0070m < \epsilon < 0.0150m$
Predominância de areias médias	$0.0100m < \epsilon < 0.0300m$
Predominância de areias grossas	$0.0250m < \epsilon < 0.0500m$
Predominância de areias muito grossas	$0.0400m < \epsilon < 0.0800m$
Predominância de areias com cascalho	$0.0500m < \epsilon < 0.1200m$
Sedimentos com vegetação	$0.0500m < \epsilon < 0.1500m$
Sedimentos com obstáculos (e.g. pedras, troncos)	$0.1500m < \epsilon < 0.4000m$
<hr/>	
Fundo de pedra ou rochoso	
Fundo de alvenaria	$0.0003m < \epsilon < 0.0010m$
Fundo de pedra lisa	$0.0010m < \epsilon < 0.0030m$
Fundo de asfalto ou similar	$0.0030m < \epsilon < 0.0070m$
Fundo com pedregulho ( $d_{50} < 3cm$ )	$0.0070m < \epsilon < 0.0150m$
Fundo com pedras médias( $d_{50} < 8cm$ )	$0.0150m < \epsilon < 0.0400m$
Fundo com pedras( $d_{50} < 20cm$ )	$0.0400m < \epsilon < 0.1000m$
Fundo com rochas( $d_{50} < 50cm$ )	$0.1000m < \epsilon < 0.2500m$
<hr/>	
Fundo de Concreto	
Fundo de concreto liso	$0.0001m < \epsilon < 0.0005m$
Fundo de concreto inacabado	$0.0005m < \epsilon < 0.0030m$
Fundo de concreto antigo	$0.0030m < \epsilon < 0.0100m$

por areias calcárias de menor extensão em comparação com o setor norte(Franco, 2009; Rueda, 2010).

### 3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As constantes harmônicas, tabela 3.3 para a área de estudo foram obtidas através da análise harmônica feita em uma série temporal de elevação no período de 01/01/2014 à 03/02/2014 que faz parte do o banco de dados do Centro de Pesquisa Oceanográfica e Hidrográfica (CIOH). Sendo a localização da estação de coleta na latitude  $10^{\circ}23'27.09''N$  e longitude  $75^{\circ}32'1.47''O$  (ilha Manzanillo).

Tabela 3.4: Constantes harmônicas de maré para estação em a filha Manzanillo.

Constantes	Período (s)	Amplitude (m)	Fase (rad)
Mm	2380713.364	0.0139	5.567
MSf	1275721.423	0.0250	1.957
alpha1	104661.598	0.0020	2.439
2Q1	100822.400	0.0018	2.602
Q1	96726.083	0.0099	2.813
O1	92949.630	0.0592	3.008
M1	89399.693	0.0060	2.250
K1	86164.090	0.1168	3.263
J1	83154.516	0.0117	3.044
OO1	80301.867	0.0048	3.917
KQ1	77681.651	0.0027	3.811
MNS2	47258.162	0.0023	0.701
mu2	46338.327	0.0034	5.056
N2	45570.053	0.0288	5.644
M2	44714.164	0.0727	6.124
L2	43889.832	0.0027	0.414
S2	43200.000	0.0156	4.882
KJ2	42316.278	0.0021	3.356
MO3	30190.690	0.0012	1.198
M3	29809.442	0.0029	4.360
MK3	29437.703	0.0018	2.702
SK3	28773.740	0.0022	5.005
MN4	22569.026	0.0014	0.495
M4	22357.082	0.0004	0.547
SN4	22176.694	0.0004	6.181
MS4	21972.021	0.0018	5.344
S4	21599.999	0.0009	5.522
2MK5	17751.168	0.0005	3.047
2SK5	17270.542	0.0006	1.943
2MN6	14998.621	0.0001	2.556
M6	14904.721	0.0002	1.799
2MS6	14732.595	0.0004	2.592
2SM6	14564.399	0.0001	2.926
3MK7	12706.706	0.0001	5.226
M8	11178.541	0.0005	5.390

A curva de maré genérica para um mês gerada a partir das constantes harmônicas podem ser observadas na figura 3.5. A maré tem uma amplitude de aproximadamente 0.6 m, caracterizando uma região de micromaré, sendo tipo mixta diurna com duas preamares e duas baixa-mares por dia. Os respectivos valores de amplitude e fase das constantes harmônicas são impostos como condição de fronteira aberta do modelo. Sendo as componentes k1 e M2 as mais relevantes.

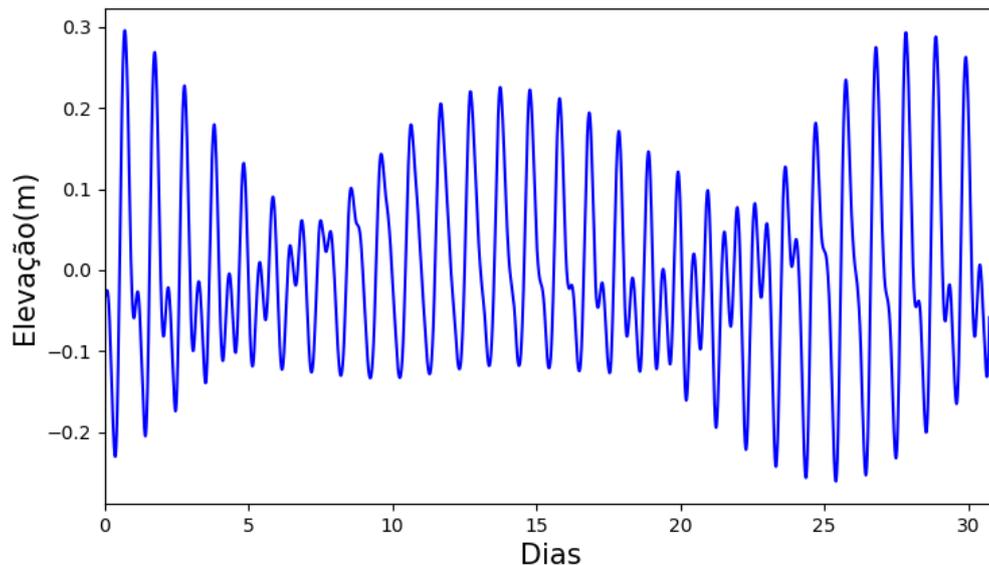


Figura 3.5: Curva de maré genérica para um mês gerada a partir das constantes harmônicas.

### 3.5 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

Uma das forças responsável pela circulação e mistura nos estuários são os ventos. No caso da baía de cartagena, onde a descarga fluvial e maré têm níveis baixos, os ventos desempenham um papel importante nos processos de circulação e mistura, sendo indispensável sua inclusão no modelo, visto que se deseja reproduzir, com precisão, os fenômenos naturais. Por isso, dados de vento e de precipitação nos meses de janeiro e junho foram utilizados como dados de entrada do modelo. Este dados foram fornecidos pelo banco de dados do Centro de Pesquisa Oceanográfica e Hidrográfica (CIOH).

No mês de janeiro de 2014, o vento à 10m de altitude, apresentou valores médios de 2.93 m/s e direção preferencial NE, ver na figura 3.6. No mês de Junho de 2014 o vento apresentou velocidades médias de 2.71 m/s e direção preferencial NE, ver na figura 3.7 . A dinâmica dos ventos nessa região é influenciada pelos ventos alísios.

Os alísios são caracterizados por uma variação sazonal relacionada a migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) da atmosfera. Quando a ZCIT está localizada

próxima ao equador (entre março e abril) a plataforma está submetida à ação dos ventos alísios de Nordeste. Quando a ZCIT migra para o Norte ( $\sim 5^\circ$  N), durante agosto e setembro, a região está sob a influência predominante dos alísios de Sudeste (Fontes, 2000; Lopes, 2016). O SisBaHia oferece a opção de modelar o vento e a precipitação de forma variável ou uniforme, tanto no tempo quanto no espaço. Neste trabalho adotaram-se os ventos e a precipitação como sendo variáveis no tempo e uniforme no espaço. Os dados de vento estão em um intervalo de tempo de 10 minutos, enquanto a precipitação é diária, sendo inserida no SisBaHia em milímetro/hora.

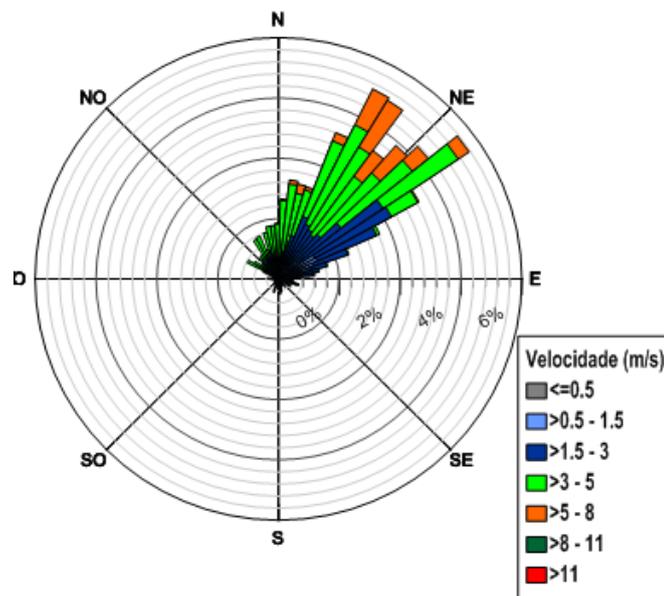


Figura 3.6: Intensidade e direção dos ventos no mês de Janeiro.

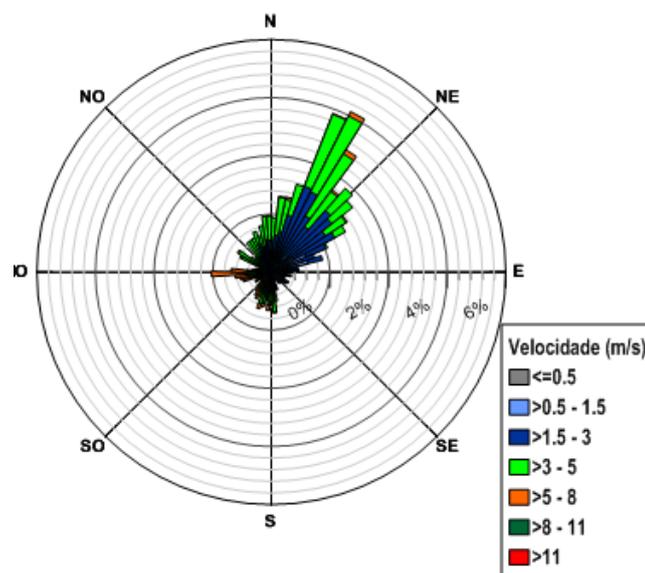


Figura 3.7: Intensidade e direção dos ventos no mês de junho do ano 2014

A precipitação mensal total influencia os níveis de água do modelo que pode alterar o conjunto solução do modelo hidrodinâmico  $(U, V, \xi)$ . A precipitação total nos meses de janeiro e junho foi de 0 mm e 47.2 mm, respectivamente. A distribuição dessas chuvas durante o mês de junho podem ser observadas na figura 3.8 e

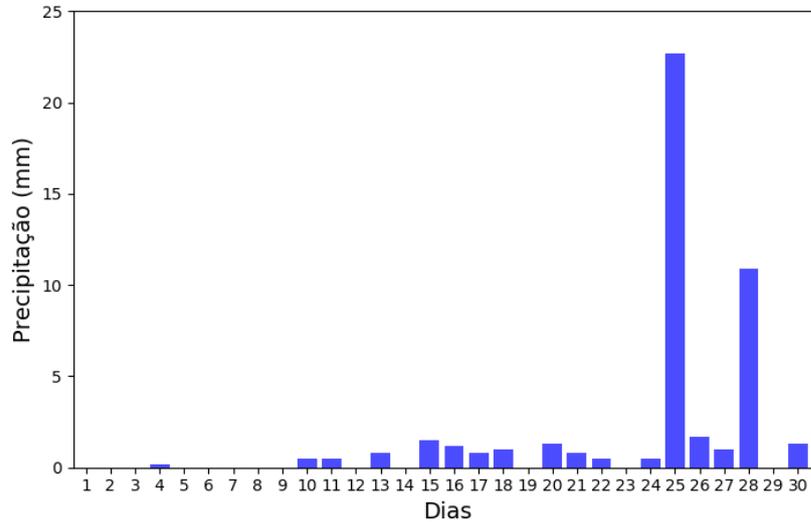


Figura 3.8: Precipitação total na cidade de Cartagena no mês de junho do ano 2014

### 3.6 CONFIGURAÇÕES GERAIS UTILIZADAS NO MODELO HIDRODINÂMICO

Um dos fatores críticos que afetam a precisão dos modelos para estuários e zonas de áreas costeiras é a especificação das condições em fronteiras abertas (Yang and Hamrick, 2005). Para o caso de simulações com forçamento de maré astronômica e levando em consideração que não há medidas diretas dos níveis do mar em águas abertas, foram utilizadas informações obtidas do modelo de maré global Topex 7.2. Para iniciar os cálculos computacionais, foi necessário especificar as condições iniciais para elevação dos níveis e velocidade da água em todo o domínio. Nesta análise é possível determinar os comportamentos do modelo associado aos parâmetros e regiões afetado por essas modificações. Isso pode ser feito utilizando o coeficiente de sensibilidade  $S_{ij}$  expresso pela equação 3.4.

$$S_{ij} = \frac{\Delta C_i / \overline{C_i}}{\Delta B_j / \overline{B_j}} \quad (3.4)$$

Em que:  $\Delta C_i$  e  $\Delta B_j$  representam as variações dos valores dos parâmetros  $\overline{C_i}$  e  $\overline{B_j}$  corresponde aos valores médios dos parâmetros. Os valores  $\Delta C_i$  e  $\Delta B_j$  significam pequenas variações em torno  $C_i$  e  $B_j$ , respectivamente (Orlob, 1983). Se o valor de  $S_{ij}$  calculado fosse aproximadamente zero ( $S_{ij} \approx 0$ ), significa que o parâmetro não tem importância significativo para o modelo. Um parâmetro que tem grande influência nos resultados do modelo afetará a capacidade para estimar com precisão o parâmetro de interesse na simulação.

Devido à construção do Canal do Dique, a baía é classificada como um estuário fortemente estratificado (Garay J, 1998; Marín, 2000). Portanto, a densidade também desempenha um papel importante na circulação; então alguns estuários permanecem estratificado verticalmente, de tal forma que água doce dos rios que fluem na água salgada (Gómez Giraldo et al., 2009). Os níveis do Canal do Dique dependem do rio Magdalena, a partir do qual deriva aproximadamente 8% do fluxo; passando por condições máximas o rio com 16000 ( $m^3/s$ ), virando em direção ao Canal del Dique 1200 ( $m^3/s$ ) com 9% e em condições de baixo fluxo 4% (Ordoñez, 2007). Para o estudo da baía Cartagena optou-se pela utilização de um modelo 2DH, uma vez que é possível reduzir a dimensão do problema e ainda determinar o padrão de circulação médio, levando a uma economia de tempo e recurso computacional, sem prejudicar os resultados de interesse. Escolheu-se como instante inicial da modelagem o tempo 40500s (01/01/2014, 11.25 a.m) que equivale à primeira preamar da curva de maré genérica.

O passo de tempo pode ser calculado considerando que valor do Número de Courant ideal é entre 3 e 8 para uma melhor estabilidade numérica (Rosman, 2015).

A equação do Número de Courant médio ( $C_r$ ) é:

$C_r = \text{Propagação física} / \text{Propagação numérica}$ .

$$C_r = \frac{\sqrt{gH} + |\bar{V}|}{\sqrt{\frac{\Delta x^2}{\Delta t^2} + \frac{\Delta y^2}{\Delta t^2}}} = \left( \sqrt{gH} + |\bar{V}| \right) \Delta t \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}} \quad (3.5)$$

Em que:

$\Delta t$  é o passo de tempo que se deseja determinar (s);

$\Delta x$  é o espaçamento médio longitudinal dos nós da malha (m);

$\Delta y$  é o espaçamento médio transversal dos nós da malha (m);

$|V|$  é o módulo da velocidade da corrente (em geral na prática, este valor é desprezível por ser muito menor que  $\sqrt{gH}$ );

$g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$H$  é a profundidade média local (m).

O passo de tempo ( $\Delta t$ ) utilizado foi de 20s para o período seco e chuvoso e. Para o intervalo de tempo dos resultados, escolheu-se 1 hora na parte espacial e 60s na parte

temporal, ou seja, foram programados para uma saída a cada uma hora modelada os resultados de  $(U, V, \xi)$  onde  $U$  é a velocidade longitudinal média na vertical e  $V$  a velocidade transversal média na vertical, e  $\xi$  a altura da superfície livre. O instante final de modelagem para o mês de janeiro foi de 2678400s equivalente à 31 dias e para o mês de Junho foi 259200s equivalente a 30 dias. Como condição de contorno, atribuiu-se para todos os nós da fronteira aberta o valor de elevação de superfície livre igual a 0.28 m para o mês de janeiro e 0.19 m para o mês de junho, o qual equivale ao pico da preamar, retirada da curva de maré. Os parâmetros podem ser visto na tabela 3.5.

Tabela 3.5: Configurações referentes ao modelo hidrodinâmico.

Dados	Período Seco	Período Chuvoso
Instante Inicial ( $s$ )	40500	9000
Instante final ( $s$ )	2678400	2592000
Passo de tempo ( $s$ )	20	20
Vazão nodal Canal do Dique ( $m^2/s$ )	0.89	3.20
Velocidade inicial ( $m/s$ )	0	0
Elevação inicial ( $m$ )	0.28	0.19
Nº de Courant médio	4.1	4.1

### 3.7 CALIBRAÇÃO

O objetivo da calibração do modelo é reproduzir o movimento do corpo de água para uma situações conhecida, através da variação de parâmetros físicos dentro valores racionalmente adequados. Para a calibração do modelo 2D da Baía de Cartagena, foi usada a metodologia de teste e error comparando os dados horários de níveis de água observados e os dados mostrados pelo modelo (Palacio, 2002). Segundo Rosman (2015), os passos para a calibração devem passar pela checagem da discretização espacial e temporal utilizada na malha, sendo condizentes com a variação temporal e espacial do fenômeno que se deseja estudar. Um modelo tem escalas de discretização compatíveis com um fenômeno de interesse quando pode efetivamente resolver o fenômeno. Nesse sentido, deve-se lembrar de que, se um determinado fenômeno de interesse tem escalas espaciais e temporais características dadas por  $\Delta s$  e  $\Delta t$ , para se resolver tal fenômeno, as escalas de discretização do modelo devem ser pelo menos quatro vezes menores ( $\Delta s/4$  e  $\Delta t/4$ ) (Rosman, 2015). Mais a frente, Rosman (2015) sugere que para resolver bem os fenômenos de interesse, os intervalos de discretização deveriam ser até oito vezes menores que a variação dos fenômenos ( $\Delta s/8$  e  $\Delta t/8$ ). Em seguida, os níveis de água devem ser analisados e comparados com os dados reais. Foram feitos ajustes nos parâmetros físicos em que se encontrou um RMS (erro de raiz do meio quadrático) correspondente a 3.5% do valor da amplitude da maré.

O modelo foi executado para simular os níveis de água durante um período de tempo que compreendeu três (3) períodos de maré alta, entre 2 e 4 de Janeiro de 2014.

Os dados utilizados para calibrar o modelo, cedidos pelo CIOH, constam de uma série temporal de altura da superfície livre no período de 01/01/2014 à 03/02/2014 e dados de corrente para um ciclo de maré no mês de Janeiro 2013, coletados em 3 pontos, como se mostra na figura (3.9).

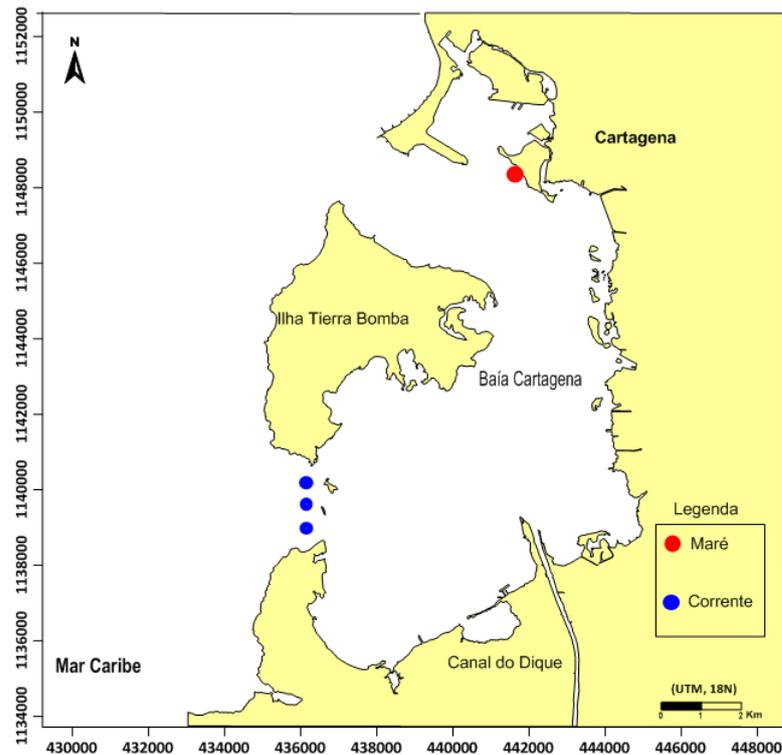


Figura 3.9: Localização dos pontos de calibração.

### 3.8 VALIDAÇÃO

A validação de um modelo computacional é um processo para formular e documentar a aplicabilidade dos resultados do modelo em relacionamento com o sistema natural que se quer representar (Ditmars et al., 1987). Seu objetivo é confirmar que o modelo corresponde à realidade física que queremos modelar, isto é, que as previsões feitas são confiáveis o suficiente para serem usadas na tomada de decisões. Segundo Palacio (2002) a validação de um modelo deve ser realizada com simulações de longo período para validar o modelo em relação aos níveis de água.

O modelo 2D da Baía de Cartagena foi validado através da simulação das condições de níveis de elevação da superfície do mar.

Decidiu-se realizar uma simulação de um período de tempo longo (31 dias) a partir de 1 de Janeiro de 2014, para avaliar o ajuste do modelo em períodos de maré de sizígia e maré de quadratura.

### 3.9 APLICAÇÃO

O processo de troca de massa de água está condicionado a variações temporárias no fluxo de água doce, maré e vento, que dominam e determinam a distribuição de salinidade e circulação dentro do estuário (Rueda, 2010); que para o caso da baía de Cartagena, fazendo modificações no Canal del Dique, geraria uma redução da carga de sólidos suspenso que poderia afetar o equilíbrio da baía, aumentando os tempos de residência da água e a possibilidade de gerar problemas de qualidade da água (Hsu et al., 1999).

Uma vez que o modelo foi calibrado e validado, ele foi usado na quantificação da quantidade de água que entra e sai da baía de Cartagena, através dos estreitos que a conectam com o Mar do Caribe, considerando a contribuição da água do canal do Dique para o período seco e chuvoso.

Para calcular os vetores de vazão nodal deve-se definir a distribuição desejada, lembrando que a integral das vazões nodais ao longo da largura da seção será igual à vazão, isto é, em cada nó da seção com largura  $L$ ,  $q$  é o vetor vazão nodal e  $n$  é o vetor normal ao eixo da seção alinhado com  $L$ . Na figura 3.10 se mostra o esquema da malha no canal do Dique.

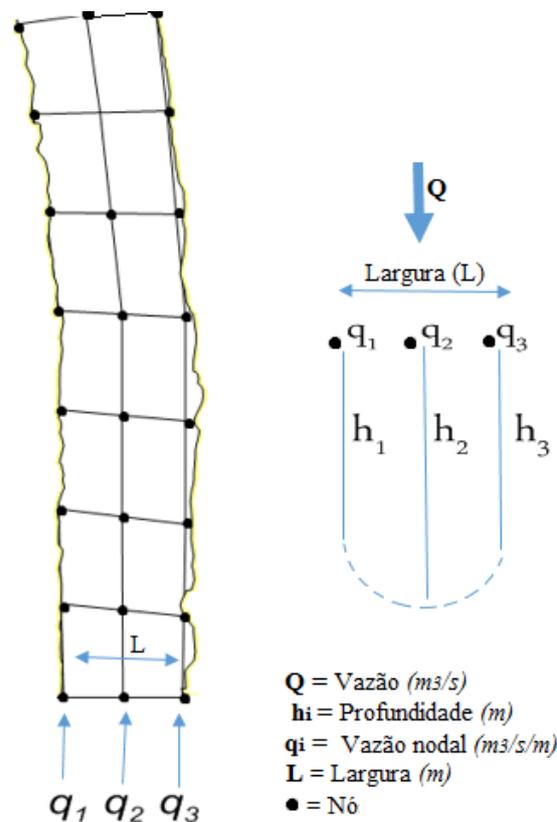


Figura 3.10: Malha com elementos definindo a seção do canal do Dique

Há três tipos de cálculo para a vazão:

1. Distribuição homogênea:

$$q_i = \bar{q} = \frac{Q}{L} \quad (3.6)$$

2. Distribuição proporcional à coluna de água  $H_i$ :

$$q_i = \bar{q} \frac{H_i}{\bar{H}}; \quad \bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (3.7)$$

3. Distribuição geral: quaisquer valores de  $q$  tal que:

$$Q = \int_0^L q \cdot \bar{n} dl \quad (3.8)$$

Em que  $q$  é o vetor vazão nodal e  $n$  é o vetor normal.

O fluxo total neste trabalho é obtido integrando na seção transversal o produto da velocidade média e a profundidade correspondente em cada ponto da seção transversal dado pela equação 3.8.

## 4 RESULTADOS

Na análise dos resultados do modelo deve-se desconsiderar a informação gerada no período de iniciação da rodada, que deve ser suficientemente longo, para que o efeito sobre o padrão de fluxo das condições iniciais impostas no domínio do modelo desapareça por completo (Soto, 2004). Neste trabalho, desconsideraram-se as primeiras 30 horas dos resultados do modelo. Para comparação entre o modelo e os dados reais, valores de média, mínimo e máximo foram analisados. Foi calculado o erro quadrático médio (RMS) entre os dados reais e modelados para quantificar a similaridade.

### 4.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

Para a calibração, os dados dos resultados das simulações obtidas pelo modelo e as medidas dos níveis de água são comparados. O erro final encontrado na fase de calibração do modelo, medido com a expressão do erro de raiz quadrada média (RMS) foi 19.5 milímetros, equivalente a um erro percentual 3.9% da amplitude média da maré (50cm). Na figura 4.1 se mostra a comparação entre os níveis de água medidos e os modelados para os períodos de tempo usados na calibração. O modelo em sua calibração foi executado por 72 horas entre 2 e 4 de janeiro de 2014. Este período abrangeu o ciclo de maré completo.

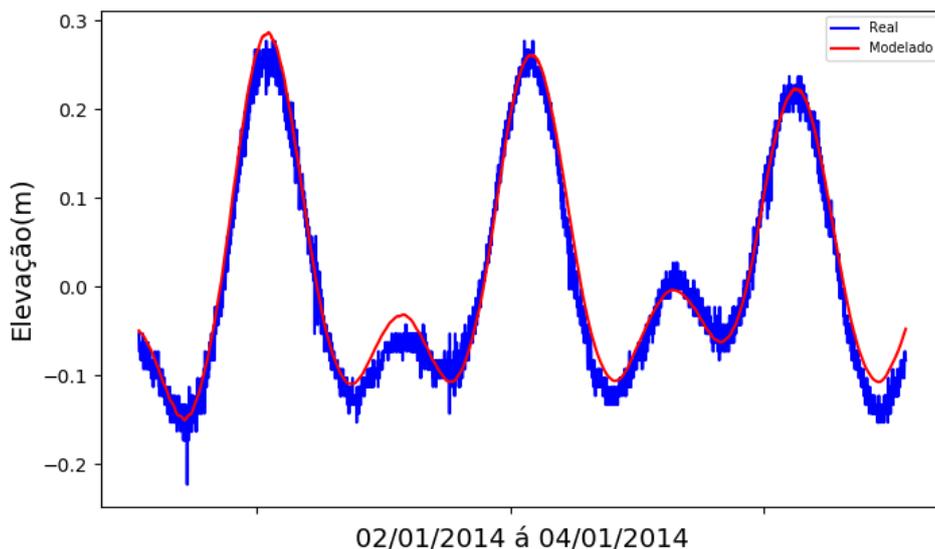


Figura 4.1: Calibração do modelo.

Uma vez que o modelo representa satisfatoriamente o registro dos níveis de água, pretende-se que reproduza corretamente o padrão de fluxo (velocidades e vazão) em um ciclo completo de maré. Os valores das velocidades medidas integradas na profundidade são examinados no domínio da simulação. Para a malha com resolução média o erro final encontrado RMS foi de 55.0%, com um valor máximo de 0.13  $m/s$  para o modelo e para os dados reais um valor máximo de 0.38  $m/s$ , ver na figura 4.2. Para a malha com resolução fina o erro final encontrado RMS foi de 17.3%, com um valor máximo de 0.29  $m/s$  para o modelo, como mostramos na figura 4.3.

Para o valor da elevação não houve diferença significativa nas duas malhas. Lembrando que a maré nessa região é muito pequena, é do tipo micromaré, da ordem de 50  $cm$ , é por isso que as velocidades não excedem os 0.5  $m/s$ .

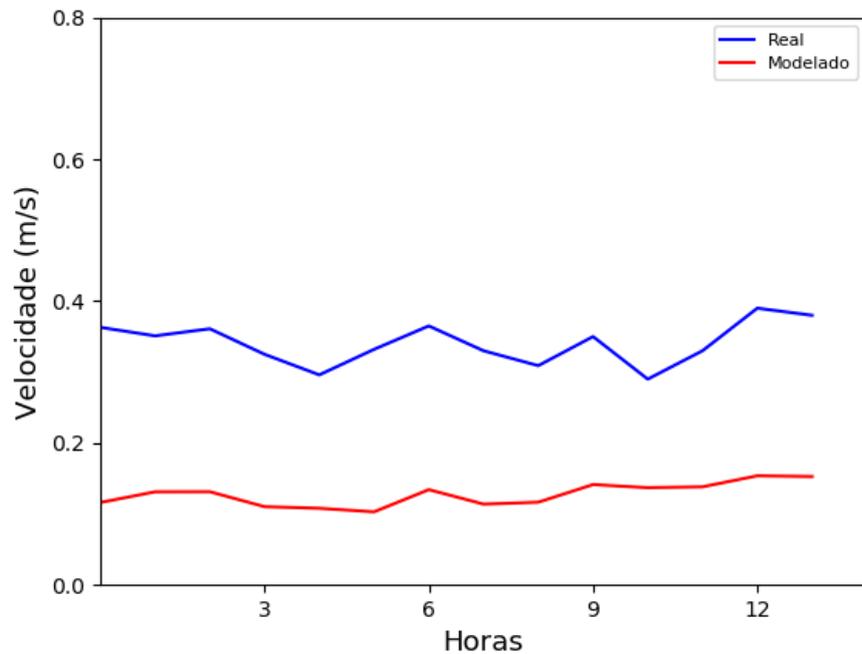


Figura 4.2: Calibração do modelo em relação à velocidade de corrente com a malha de resolução média.

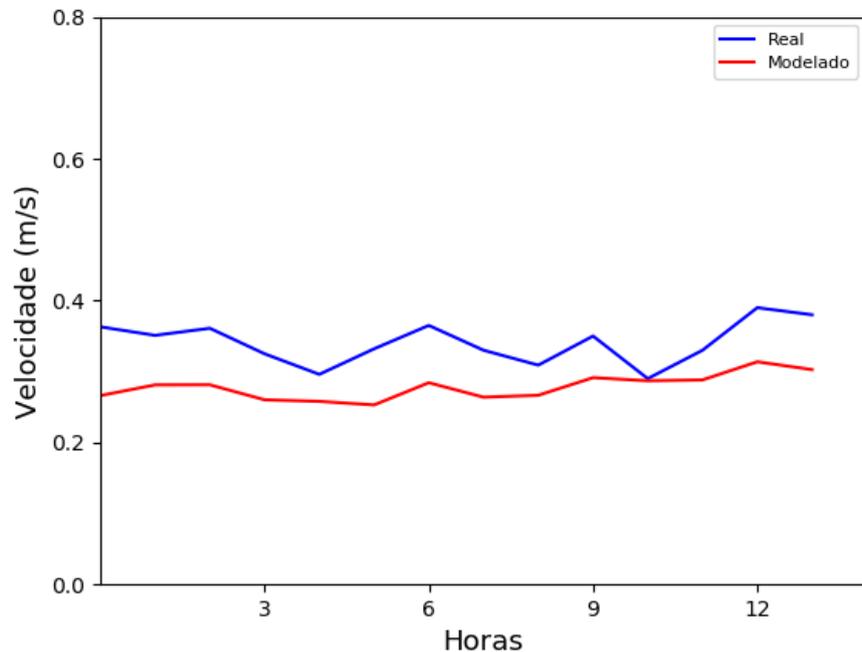


Figura 4.3: Calibração do modelo em relação à velocidade de corrente com a malha de resolução fina.

Segundo Rosman (2015), se os passos de calibração anteriores forem cuidadosamente executados, os erros no campo de velocidade no SisBaHia seriam de no máximo 20%.

Devido à falta de dados em outras partes do domínio, não foi possível fazer mais comparações, no entanto, apesar do fato de que o erro foi de 17.3%, o modelo mostrou-se mais próximo dos dados reais em comparação com outros modelos, como o modelo Mohid e o modelo RMA usado por Rueda (2010) e Palacio et al. (2010), devemos também considerar que o modelo sisbahia é a primeira vez que é usado em latitude Norte.

## 4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO

Os resultados das simulações realizadas na validação do modelo e sua comparação com as medidas da elevação do nível do mar no mês de janeiro são apresentadas na figura 4.4. Durante a maré de sizígia, o erro quadrático médio é de 26 milímetros equivalente a um erro percentual de 4.4% da amplitude média de maré (60 cm), figura 4.5, enquanto na maré de quadratura é de 24 milímetros e um erro porcentual de 5.5% da amplitude média de maré (45 cm), figura 4.6.

O erro final quadratico medio encontrado na fase de validação do modelo e medidas dos níveis de água para todo o mês de janeiro foi de 25 milímetros equivalente a um erro percentual de 4.3% da amplitude média de maré (60 cm), quanto ao mês de junho, o erro

quadrado médio foi de 5.8% da amplitude média de maré (40 *cm*), figura 4.7. Durante a maré de sizígia no mês de junho, o erro quadrático médio é de 33 milímetros equivalente a um erro percentual de 6.7% da amplitude média de maré (50 *cm*), figura 4.8, enquanto na maré de quadratura é de 28 milímetros e um erro porcentual de 7.2% da amplitude média de maré (40 *cm*), figura 4.9. Na maré de sizígia ocorreu um melhor ajuste entre o modelo e medições considerando a amplitude média de cada maré tanto para janeiro e junho.

Em geral, observa-se que os resultados do modelo são melhores na maré alta que na maré baixa, que coincide com o que foi observado na etapa de calibração.

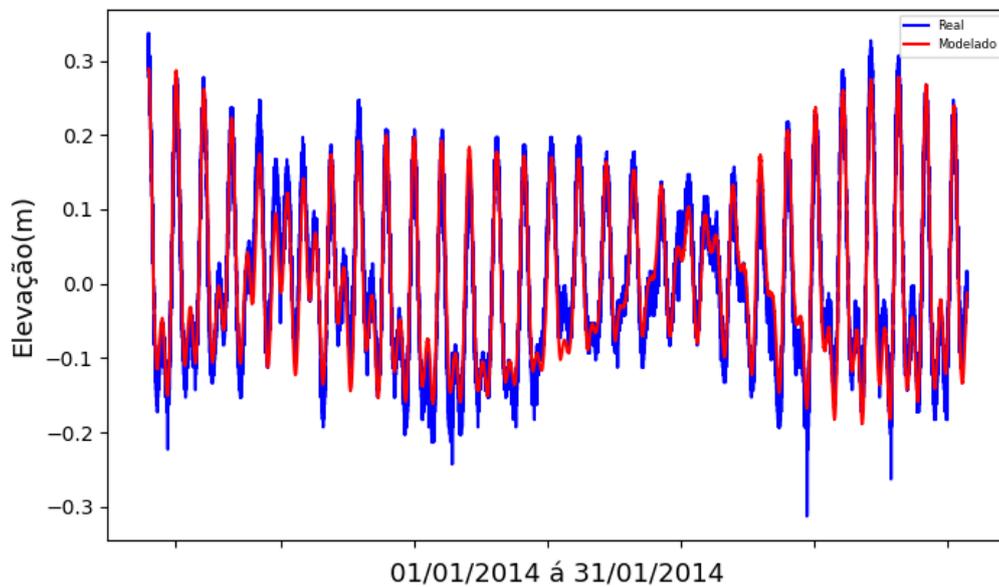


Figura 4.4: Comparação na maré do mês de janeiro entre os dados modelados (vermelho) e reais(azul).

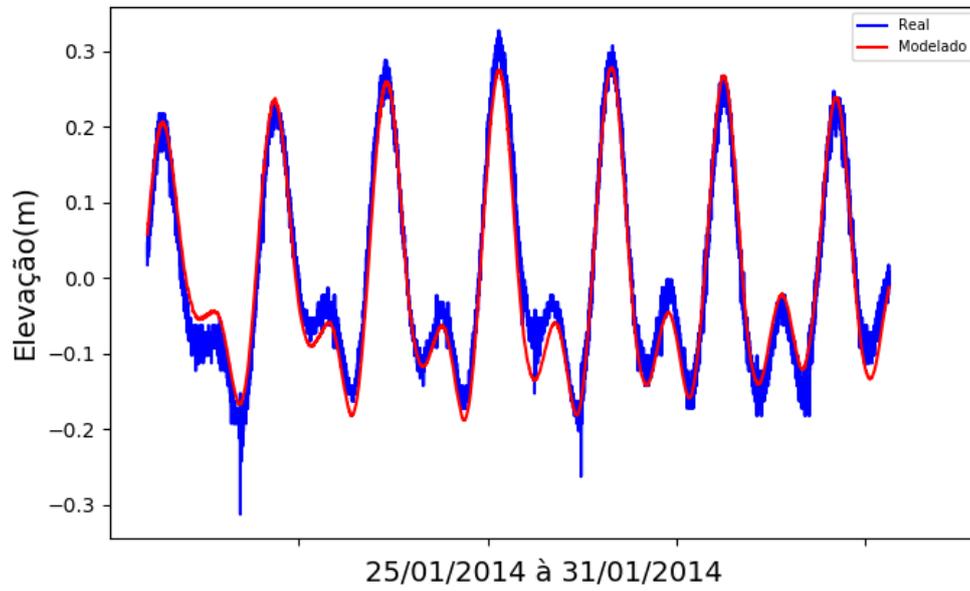


Figura 4.5: Comparação na maré de sizígia entre os dados modelados (vermelho) e reais (azul).

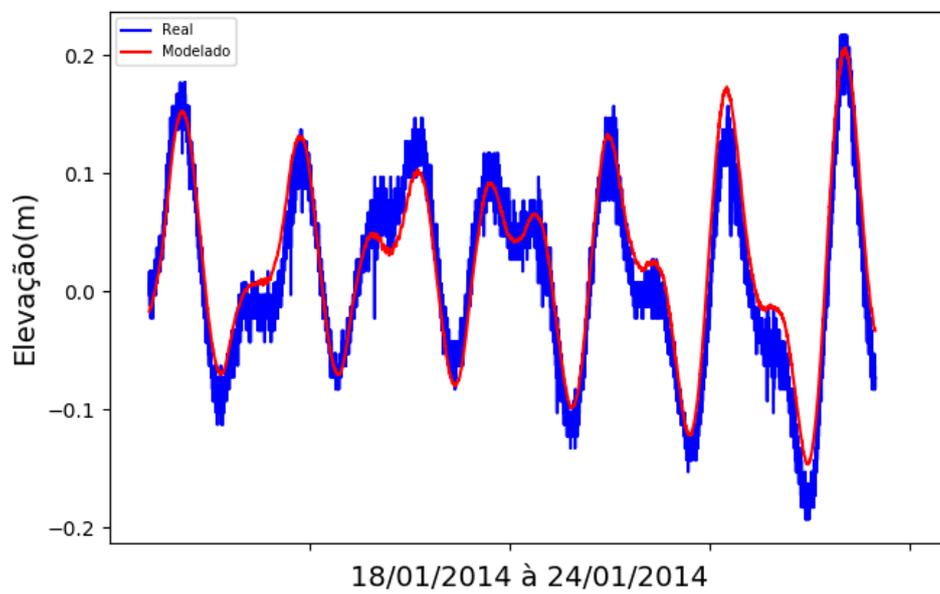


Figura 4.6: Comparação na maré de quadratura entre os dados modelados (vermelho) e reais(azul).

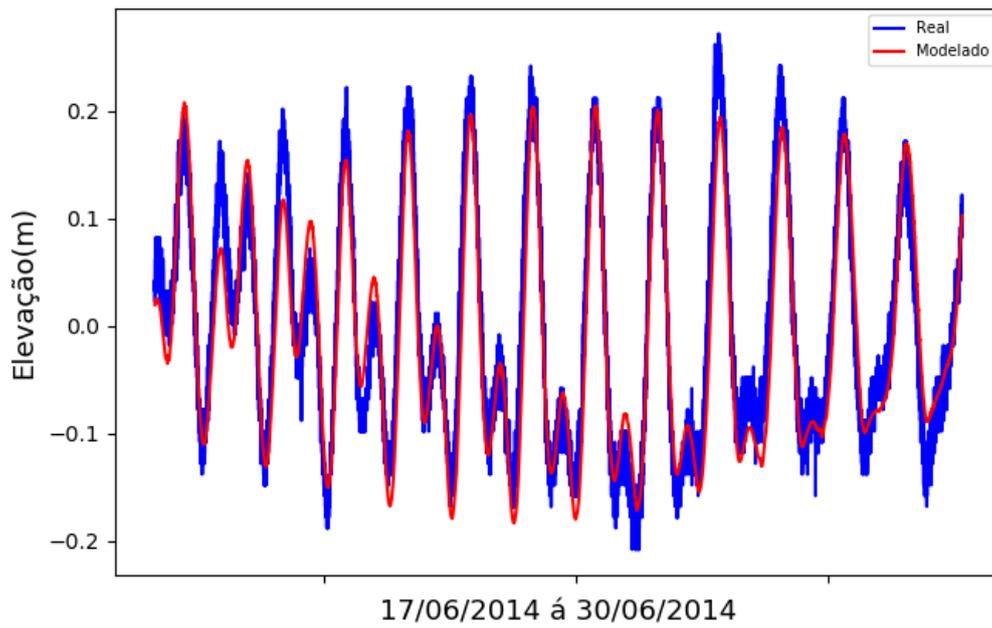


Figura 4.7: Comparação na maré do mês de junho entre os dados modelados (vermelho) e reais(azul).

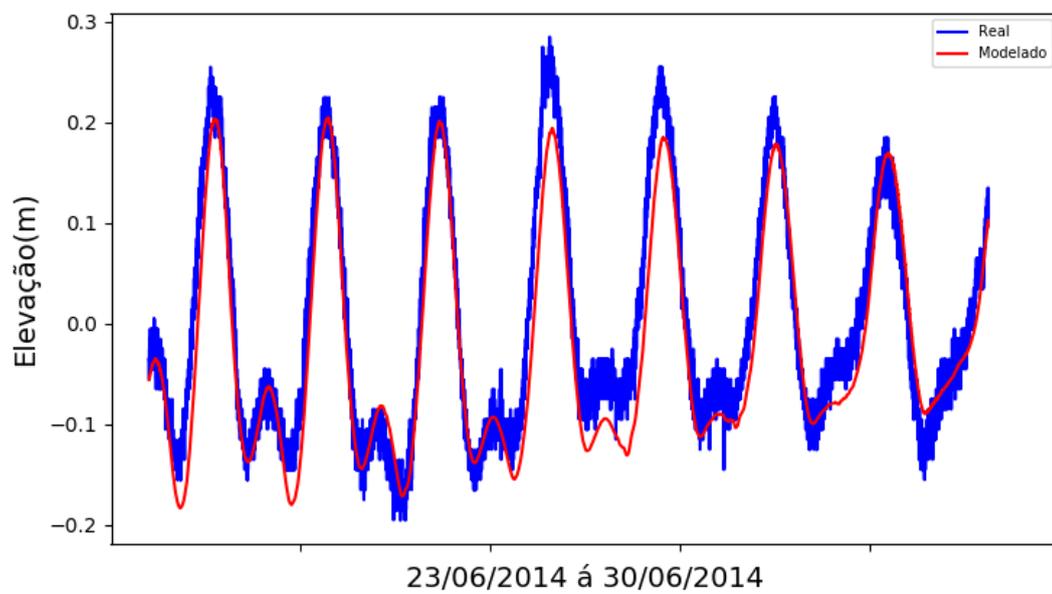


Figura 4.8: Comparação na maré de sizígia do mês de junho entre os dados modelados (vermelho) e reais(azul).

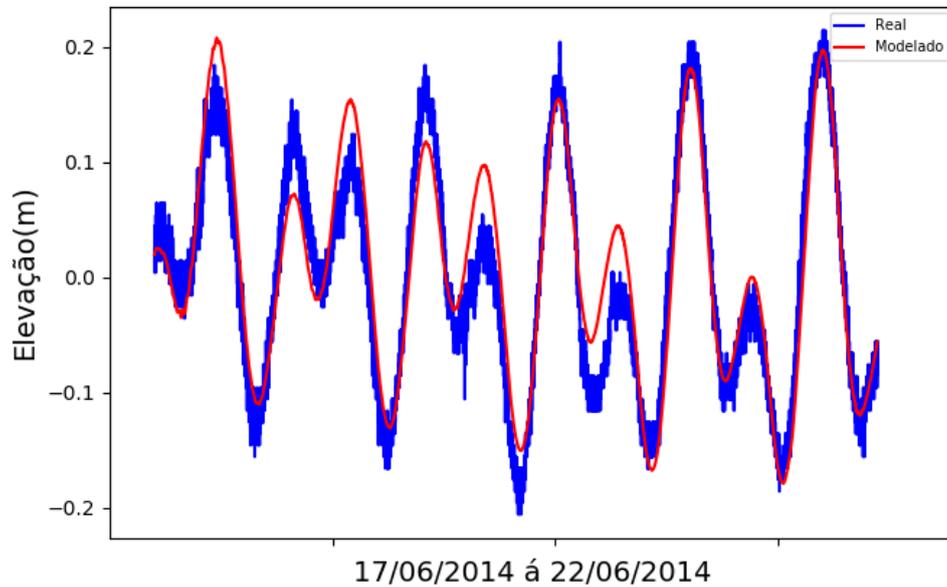


Figura 4.9: Comparação na maré de quadratura do mês de junho entre os dados modelados (vermelho) e reais (azul).

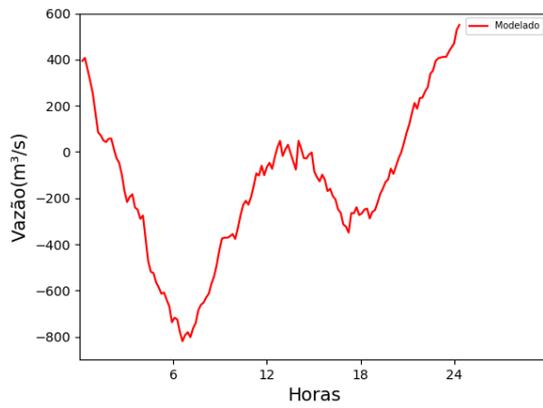
### 4.3 APLICAÇÃO

A troca de águas da baía de Cartagena com o mar Caribe é feita através de dois estreitos, para isso foi realizada uma verificação do fluxo que entra e sai da baía de Cartagena, considerando a contribuição da água do canal do dique, tudo isso para um ciclo completo de maré, tanto no período seco quanto no período chuvoso.

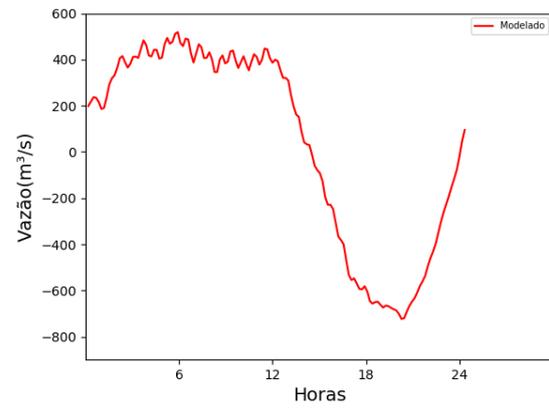
No período seco a simulação da maré de quadratura começou no dia 21 de janeiro de 2014 às 1:00 a.m e culminou 24 horas depois, ver figura 4.10 enquanto a simulação da maré de sizígia começou no dia 27 de janeiro às 1:00 a.m, ver figura 4.11.

No período chuvoso a simulação da maré de quadratura começou no dia 5 de Junho de 2014 às 12:00 a.m e culminou 24 horas depois, ver figura 4.12 enquanto a simulação da maré de sizígia começou no dia 11 de janeiro às 12:00 a.m, figura 4.13.

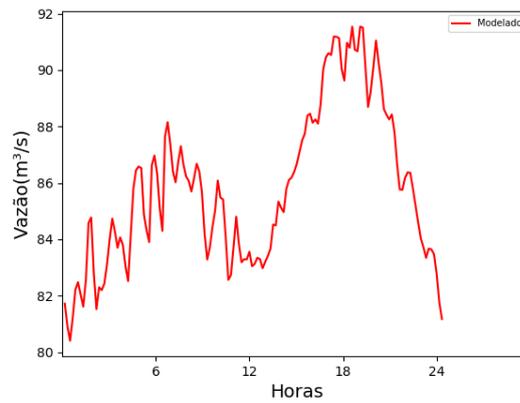
Os valores máximos da vazão ( $m^3/s$ ) em cada entrada para o período seco e período chuvoso são mostrados nas tabelas 4.1 e 4.2



(a)



(b)



(c)

Figura 4.10: Vazão d'água ( $m^3/s$ ) que entram e saem da baía de Cartagena em maré de quadratura no período seco mês de janeiro: (a) Vazão em Boca chica, (b) Vazão em Boca grande, (c) Vazão no canal do Dique

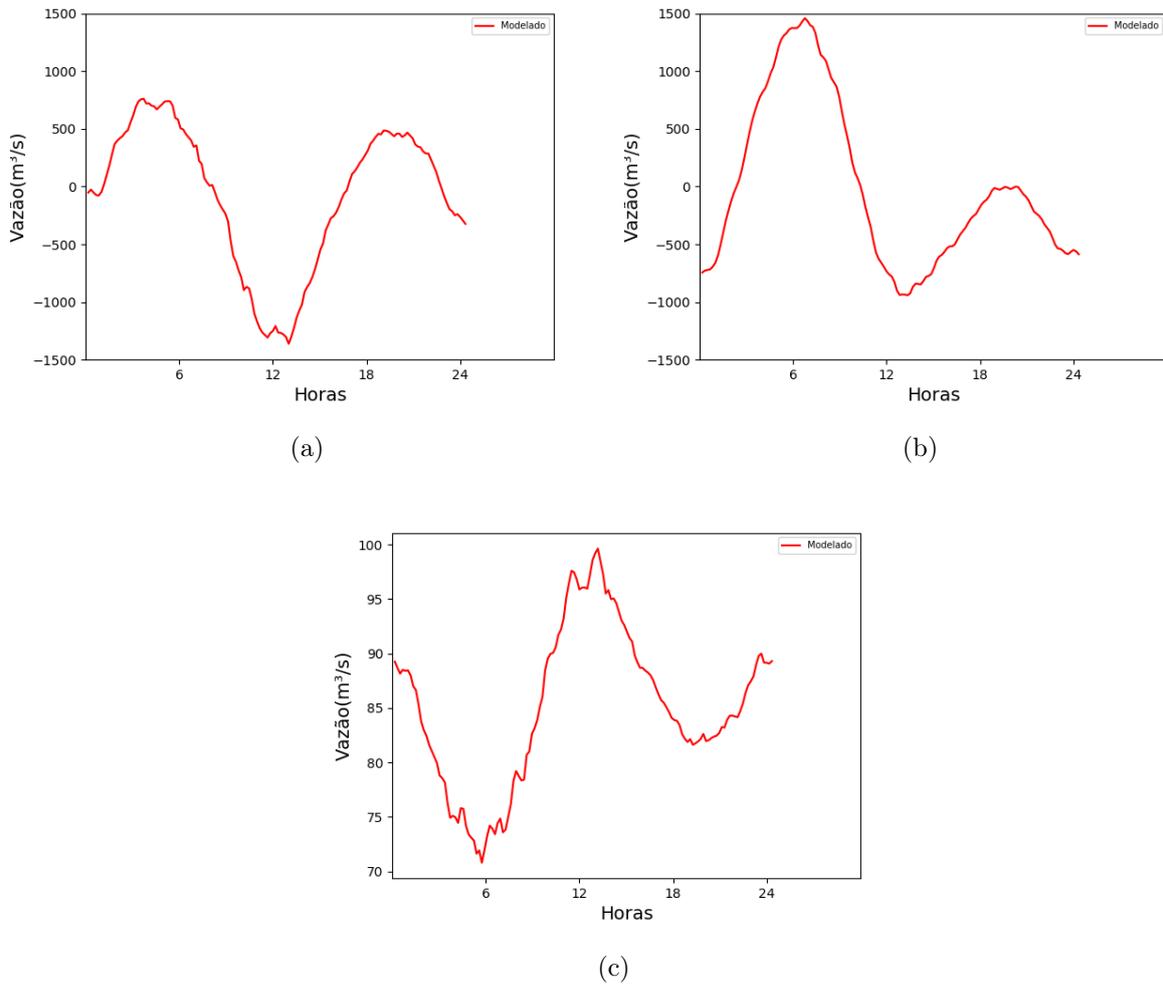


Figura 4.11: Vazão d'água ( $m^3/s$ ) que entram e saem da baía de Cartagena em maré de sizígia o período seco mês de janeiro: (a) Vazão em Boca chica, (b) Vazão em Boca grande, (c) Vazão no canal do Dique

Tabela 4.1: Vazão máxima período seco no mês de Janeiro.

Maré de quadratura janeiro	
Boca chica	Entra $600 (m^3/s)$ , sai $800 (m^3/s)$
Boca grande	Entra $500 (m^3/s)$ , sai $700 (m^3/s)$
Canal do Dique	Entra $95 (m^3/s)$
Maré de sizígia janeiro	
Boca chica	Entra $600 (m^3/s)$ , sai $1300 (m^3/s)$
Boca grande	Entra $1500 (m^3/s)$ , sai $900 (m^3/s)$
Canal do Dique	Entra $100 (m^3/s)$

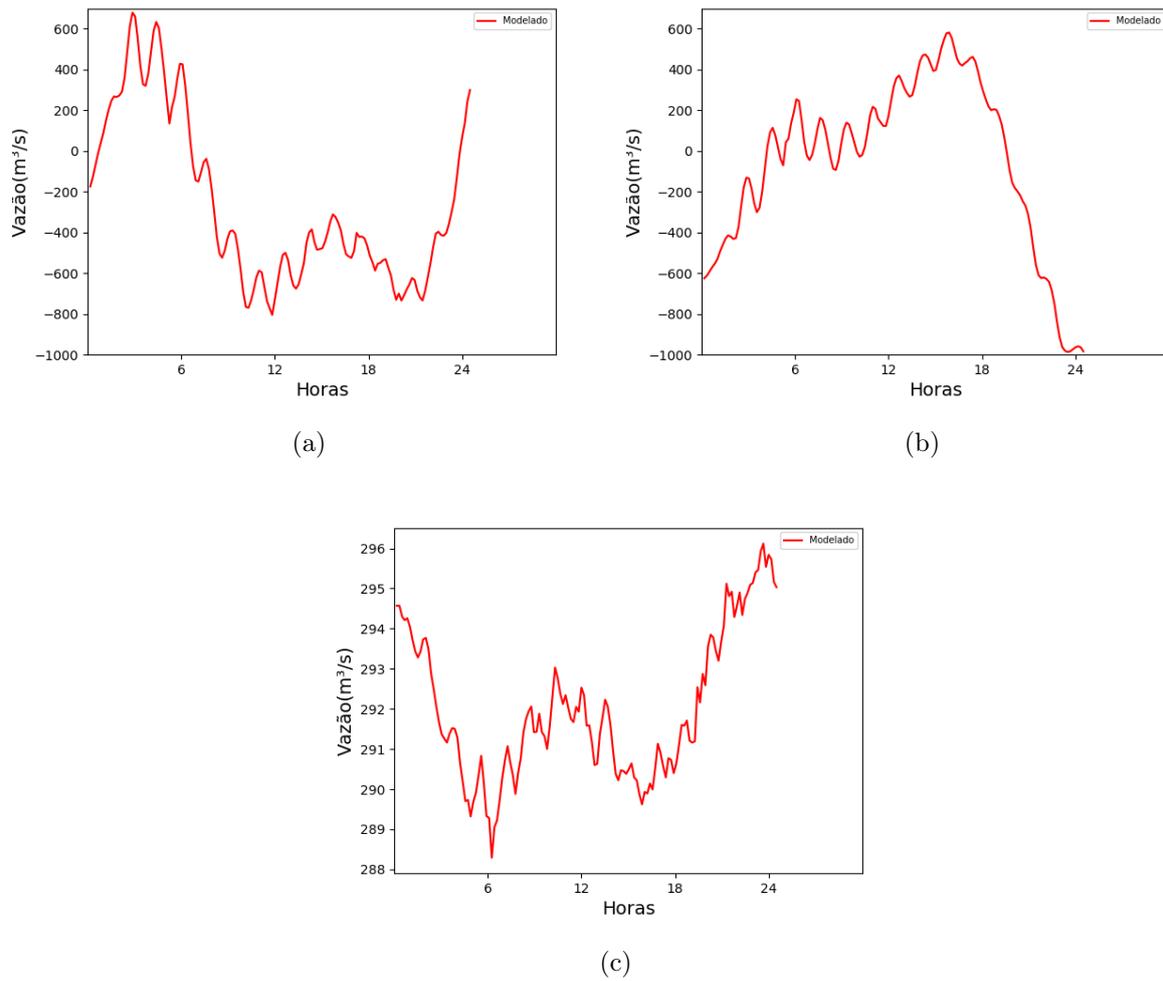


Figura 4.12: Vazão d'água ( $m^3/s$ ) que entram e saem da baía de Cartagena em maré de quadratura no período chuvoso mês de junho: (a) Vazão em Boca chica, (b) Vazão em Boca grande, (c) Vazão no canal do Dique

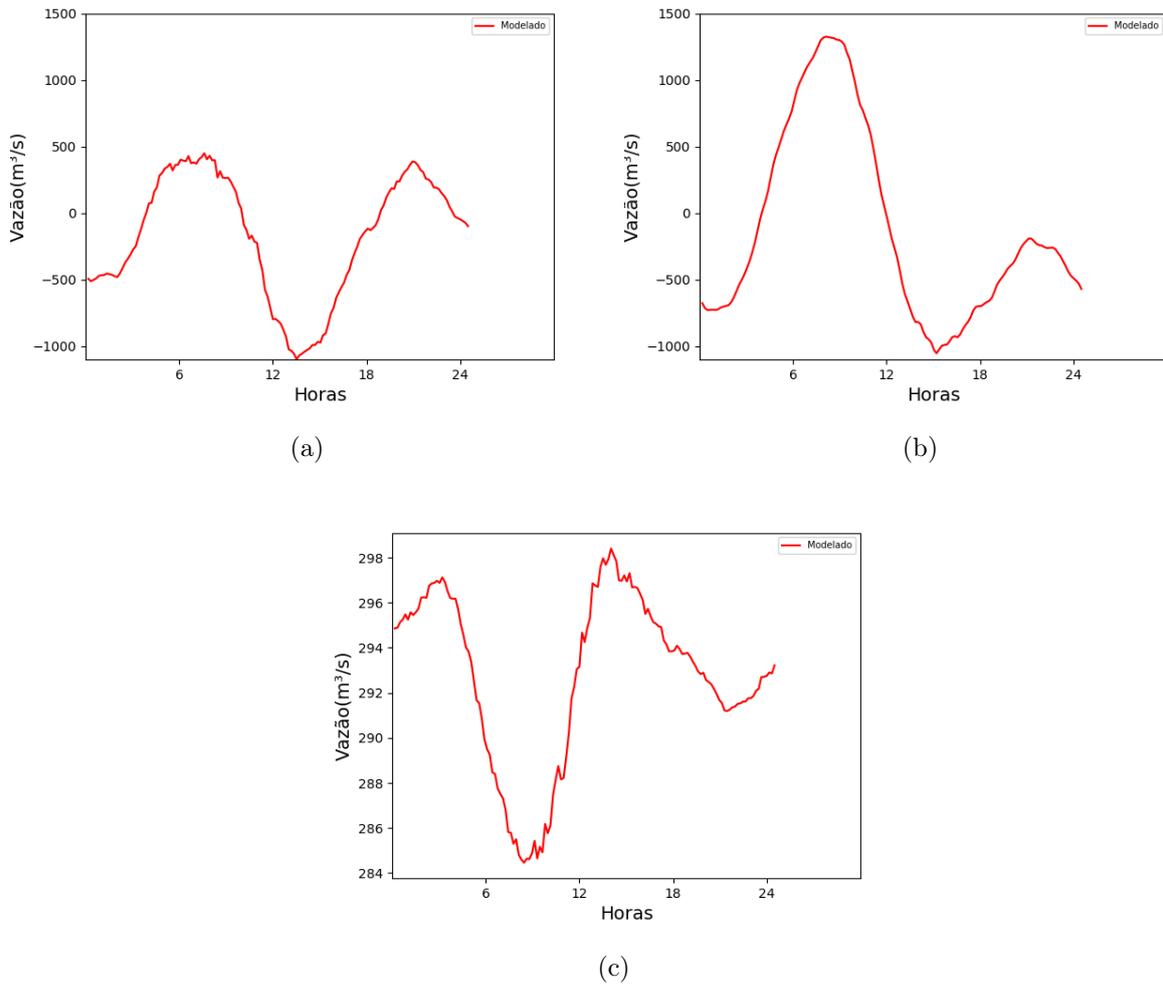


Figura 4.13: Vazão d'água ( $m^3/s$ ) que entram e saem da baía de Cartagena em maré de sizígia no período chuvoso mês de junho: (a) Vazão em Boca chica, (b) Vazão em Boca grande, (c) Vazão no canal do Dique

Tabela 4.2: Vazão máxima período chuvoso no mês de junho.

Maré de quadratura junho	
Boca chica	Entra 680 ( $m^3/s$ ), sai 800 ( $m^3/s$ )
Boca grande	Entra 600 ( $m^3/s$ ), sai 1000 ( $m^3/s$ )
Canal do Dique	Entra 296 ( $m^3/s$ )
Maré de sizígia junho	
Boca chica	Entra 450 ( $m^3/s$ ), sai 1100 ( $m^3/s$ )
Boca grande	Entra 2400 ( $m^3/s$ ), sai 1100 ( $m^3/s$ )
Canal do Dique	Entra 298 ( $m^3/s$ )

O valor da quantidade de água que entra na baía no período seco e chuvoso foi: período seco na maré de quadratura  $33.02 \times 10^6 m^3$  e na maré de sizígia  $51.21 \times 10^6 m^3$ , no período chuvoso maré de quadratura  $46.45 \times 10^6 m^3$  e na maré de sizígia  $58.76 \times 10^6 m^3$ .

A quantidade de água que sai da baía no período seco e chuvoso foi: período seco na maré de quadratura  $33.32 \times 10^6 m^3$  e na maré de sizígia  $51.42 \times 10^6 m^3$ , no período chuvoso maré de quadratura  $46.64 \times 10^6 m^3$  e na maré de sizígia  $58.1 \times 10^6 m^3$  ver na figura 4.14 e figura 4.15.

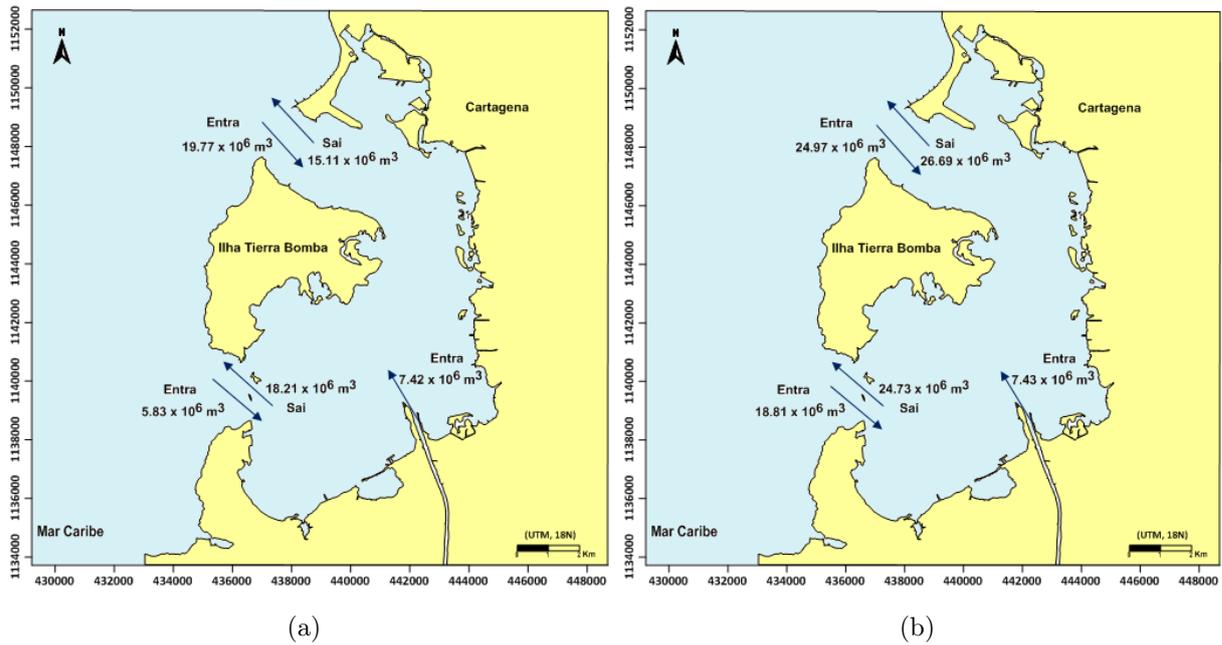


Figura 4.14: Volumes de água (Mm) que entram e saem da baía de Cartagena em diferentes condições de maré no período seco: (a) Maré de quadratura, (b) Maré de sizígia

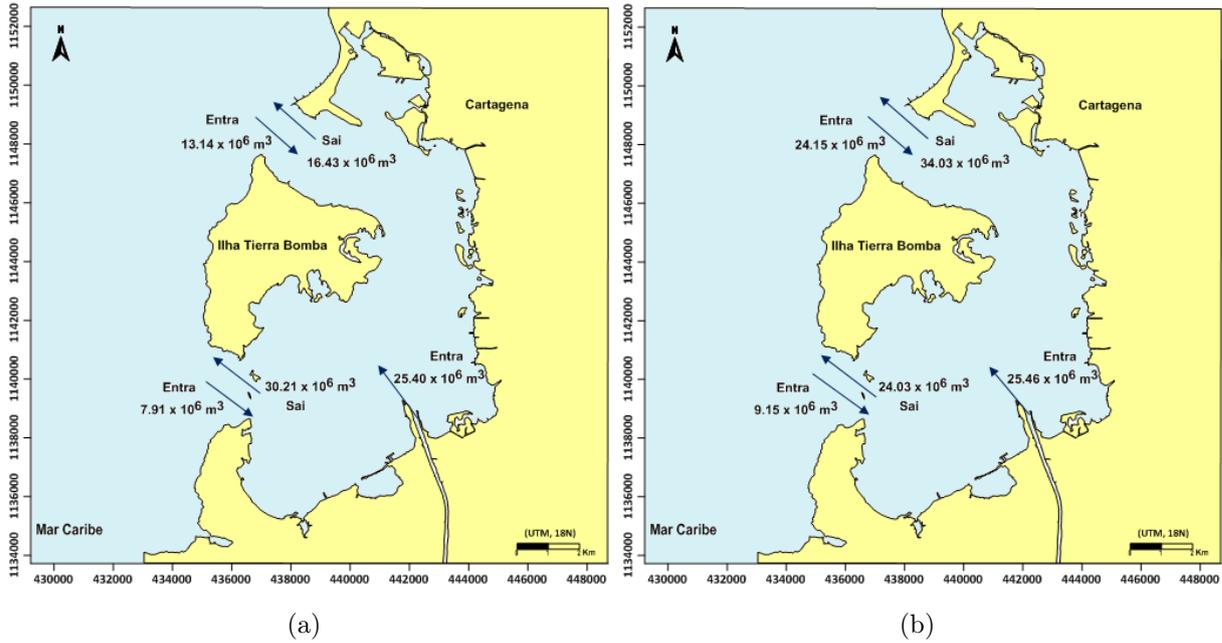


Figura 4.15: Volumes de água (Mm) que entram e saem da baía de Cartagena em diferentes condições de maré no período chuvoso: (a) Maré de quadratura, (b) Maré de sizígia

Tabela 4.3: Transporte resultante no período seco nas entradas á baía

	Maré de quadratura	Transporte resultante
Boca grande	Entra $19.77 \times 10^6 \text{ m}^3$ , sai $15.11 \times 10^6 \text{ m}^3$	Entra $4.66 \times 10^6 \text{ m}^3$
Boca chica	Entra $5.83 \times 10^6 \text{ m}^3$ , sai $18.21 \times 10^6 \text{ m}^3$	Sai $12.38 \times 10^6 \text{ m}^3$
Canal do Dique	Entra $7.42 \times 10^6 \text{ m}^3$	Entra $7.42 \times 10^6 \text{ m}^3$
	Maré de sizígia	Transporte resultante
Boca grande	Entra $24.97 \times 10^6 \text{ m}^3$ , sai $26.69 \times 10^6 \text{ m}^3$	Sai $1.72 \times 10^6 \text{ m}^3$
Boca chica	Entra $18.81 \times 10^6 \text{ m}^3$ , sai $24.73 \times 10^6 \text{ m}^3$	Sai $5.92 \times 10^6 \text{ m}^3$
Canal do Dique	Entra $7.42 \times 10^6 \text{ m}^3$	Entra $7.42 \times 10^6 \text{ m}^3$

Tabela 4.4: Transporte resultante no período chuvoso nas entradas á baía

	Maré de quadratura	Transporte resultante
Boca grande	Entra $13.14 \times 10^6 \text{ m}^3$ , sai $16.43 \times 10^6 \text{ m}^3$	Sai $3.29 \times 10^6 \text{ m}^3$
Boca chica	Entra $7.91 \times 10^6 \text{ m}^3$ , sai $30.21 \times 10^6 \text{ m}^3$	Sai $22.3 \times 10^6 \text{ m}^3$
Canal do Dique	Entra $25.40 \times 10^6 \text{ m}^3$	Entra $25.40 \times 10^6 \text{ m}^3$
	Maré de sizígia	Transporte resultante
Boca grande	Entra $24.15 \times 10^6 \text{ m}^3$ , sai $34.03 \times 10^6 \text{ m}^3$	Sai $9.88 \times 10^6 \text{ m}^3$
Boca chica	Entra $9.15 \times 10^6 \text{ m}^3$ , sai $24.03 \times 10^6 \text{ m}^3$	Sai $14.88 \times 10^6 \text{ m}^3$
Canal do Dique	Entra $25.46 \times 10^6 \text{ m}^3$	Entra $25.46 \times 10^6 \text{ m}^3$

## 5 DISCUSSÃO

A resolução da malha tem uma relação direta com o custo computacional. Um maior número de nós e elementos, o tempo em produzir resultados aceitáveis aumenta. Na baía de Cartagena, uma resolução adequada é essencial para capturar o fenômeno físico da circulação induzida pelos fenômenos intermareais, dado que pelo efeito da entrada e saída da água do mar aberto à baía, os gradientes de alta velocidade são induzidos pelo estreito entre o continente e a ilha Terra Bomba (Palacio et al., 2010; Garcia, 2009).

Dada a proximidade de ilhas e entradas ao litoral, na discretização do domínio através da geração automática de malhas não estruturadas, há uma tendência a produzir um grande número de pequenos elementos que aumentam os custos computacionais, considerando também que é muito importante refinar a malha nessas áreas para melhores resultados (Lopes, 2016). No entanto, para este estudo de caso, uma malha com 17855 nós e 4319 elementos são mais que suficientes para satisfazer estas condições.

Considerando que, no caso de uma malha de resolução média, não conseguiu reproduzir os valores da velocidade de corrente, porque eram muito pequenos comparados aos dados medidos, apresentando uma ordem máxima do 27.7% do valor máximo dos dados medidos, embora para a elevação as duas malhas não apresentassem diferenças significativas.

Na análise de sensibilidade, o objetivo é estabelecer, de forma empírica, o valor dos parâmetros numéricos de tal forma que seja garantido que não afetará a qualidade dos resultados do modelo (Desai and Wahr, 1995).

A sensibilidade do modelo foi investigada em função dos níveis de água, em relação ao tamanho do intervalo de tempo de cálculo, a rugosidade do fundo, a viscosidade do vórtice, a resolução da malha e o vento local.

Os resultados obtidos nos pontos de monitoramento mostram uma clara dependência entre o valor da rugosidade do fundo, ventos, a resolução da malha e os resultados dos níveis de água e as correntes calculadas pelo modelo. As diferenças foram mais significativas nos estreitos onde há o fluxo de entrada e saída de água da baía. Os resultados das simulações não mostraram nenhum efeito de sensibilidade variando o passo do tempo ( $\Delta t$ ), no entanto, poderia ser detectado que após 100s o modelo mostra instabilidade, produzindo mudanças abrupto nos resultados dos níveis de água, portanto, foi necessário determinar o passo do tempo com base no critério de estabilidade do Courant.

Como se previa, não há diferenças significativas nos níveis de água em relação aos diferentes valores do coeficiente de viscosidade do vórtice, ele obedece ao fato de que, para o cálculo das propriedades hidrodinâmicas, o modelo de coeficiente de vórtice constante tem pouco significado, porque em muitos cálculos, especialmente em fluxos de grandes corpos de água, como é o caso da baía de Cartagena, os termos turbulentos nas equações de momentum não são importantes.

Por definição, um modelo matemático é uma reconstrução aproximada dos processos que ocorrem na realidade. Obviamente, as aproximações e simplificações feitas podem trazer diferenças entre os resultados do modelo e os valores medidos. Para garantir que essas diferenças sejam mínimas e que o modelo reproduza adequadamente os processos observados na realidade, os resultados devem ser comparados com as medidas. Neste processo, alguns parâmetros devem ser refinados para alcançar um melhor ajuste entre o resultados e observações (Palacio et al., 2010). Em geral, há poucas guias metodológicas para realizar este processo de ajuste, no entanto, uma calibração típica complementa as comparações quantitativas entre séries curtas de elevação da superfície da água ou velocidades gerado pelo modelo e dados de medição no mesmo local e período.

Neste estudo, a calibração do modelo foi desenvolvida comparando séries temporais de curto período de tempo, com dados de observações de elevações de nível de água. O erro, medido como RMS, entre os resultados do modelo e as observações, quantificou a precisão do modelo.

Comparações diretas do erro RMS podem ser adotadas para avaliar o comportamento do modelo no caso dos níveis de água e corrente. Um grande número de simulações foram realizadas para melhorar o ajuste entre dados simulados e medidos. Os ajustes foram melhorados alterando o atrito do fundo (variando o coeficiente de Manning) e a resolução da malha. Na fronteira aberta o modelo foi alimentado por séries de tempo de elevação da superfície da água. As pequenas discrepâncias encontradas entre os resultados do modelo e as medições podem ser devido as soluções das equações dadas pelo modelo serem do tipo numérico e portanto as soluções são aproximadas. , além do fato de que o modelo SisBaHia é a primeira vez que é testado em uma área com latitude Norte.

De acordo com os resultados na tabela 4.3 e tabela 4.4 do transporte resultante nas duas bocas no período seco e chuvoso, a Boca Grande tem maior entrada e saída de água na baía. O canal do dique tem uma influência notória no período chuvoso, já que sua vazão é quase 4 vezes mais alta que no período seco, influenciando consideravelmente o fluxo de entrada e saída para a baía. No período chuvoso o fluxo de entrada e saída para a baía apresentam um aumento de 29% em relação ao fluxo no período seco, isto é devido ao aumento da contribuição do canal do Dique neste período.

## 6 CONCLUSÕES

Os parâmetros físicos e numéricos que afetam os resultados do modelo, o seja aqueles que são mais importantes para o seu funcionamento foram: o coeficiente de rugosidade, influência dos ventos e a resolução da malha.

O modelo reproduz com maior precisão os níveis de água na maré alta. As discrepâncias entre os dados medidos e os resultados das simulações são maiores na maré baixa. Apesar dessas discrepâncias, o comportamento global do modelo é aceitável.

Na aplicação do modelo hidrodinâmica verificou-se que no período seco na maré de quadratura entra na baía 64.6% do volume de água que passa na maré de sizígia. No período chuvoso na maré quadratura entra na baía 79% do volume de água que passa na maré de sizígia. Boca Grande tem maior entrada e saída de água na baía.

O canal do Dique tem influência no processo de troca de água na baía de Cartagena, pois sua contribuição é considerável tanto no período seco quanto no período chuvoso, contribuindo com um total de  $7.42 \times 10^6 m^3$  e  $25.46 \times 10^6 m^3$ , respectivamente, em um período de 24 horas durante maré de sizígia e quadratura, sua influência é notória no período chuvoso, já que sua vazão é quase 4 vezes mais alta que no período seco.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Uma das grandes dificuldades encontrada durante o desenvolvimento deste estudo diz respeito a escassez de dados medidos "in situ" na baía de Cartagena. Sendo assim, para dar continuidade a este trabalho e para futuros estudos envolvendo, não só a aplicação de modelos hidrodinâmicos para esta região, é de suma importância a coleta de dados em diferentes locais da baía. Informações de correntes, maré, vazão e parâmetros que influenciam no transporte e nos processos de sedimentação podem vir a contribuir para estudos de qualidade da água e de transporte de sedimento.

## REFERÊNCIAS

- Desai, S.D. and Wahr, J.M., 1995, Empirical ocean tide models estimated from topex/poseidon altimetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **100**(C12), 25205–25228.
- Ditmars, J.D., Adams, E.E., Bedford, K.W. and Ford, D.E., 1987, Performance evaluation of surface water transport and dispersion models. *Journal of Hydraulic engineering*, **113**(8), 961–980.
- Durango, L.C., 2009, Climatología de los principales puertos del caribe colombiano. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. Cartagena de Indias. DT Boletín Científico CIOH, 4–10.
- Fontes, C., 2000, Estudo numérico da circulação na Plataforma Continental Amazônica (PCA). Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Franco, D., 2009, Modelo facial a partir del análisis de los Ssedimento. Dissertação de mestrado, Universidad Industrial de Santander.
- Garay J, G.L., 1998, Influencia de los aportes de materia orgánica externa y autóctona en el decrecimiento de los niveles de oxígeno disuelto en la bahía de Cartagena.
- Garcia, F., 2009, Generación de mallas no estructuradas para la implementación de modelos numéricos. DYNA.
- Gómez Giraldo, A., Osorio, A.F., Toro, F.M., Osorio, J.D., Álvarez, O.A. and Arrieta, A., 2009, Patrón de circulación en bahía barbacoas y su influencia sobre el transporte de sedimentos hacia las islas del rosario circulation pattern at the "barbacoas" bay and its influence on sediment transport to the "rosario" islands. *Avances en Recursos Hidráulicos*, (20), 21–39.
- Hsu, M.H., Kuo, A.Y., Kuo., J.T. and Liu, W.C., 1999, Procedure to calibrate and verify numerical models of estuarine hydrodynamics. *Journal of hydraulic engineering*, **125**(2), 166–182.
- Kansas, C., 2005, Kansas geological survey. *Boletín*, **20**.
- Lopes, M., 2016, Modelagem hidrodinâmica 2DH no furo da laura -nordeste paraense. Dissertação de mestrado, Universidade federal do pará.
- Marín, B., 2000, Estado de los estuarios y lagunas costeras en colombia. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras Páginas, 70–83.

- Ordoñez, J., 2007, Balance hídrico y sedimentológico del Canal del Dique y sus efectos sobre la sedimentación de la bahía de Cartagena. Universidad Nacional de Colombia.
- Orlob, G.T., 1983, Mathematical modeling of water quality: Streams, lakes and reservoirs, vol. 12. John Wiley & Sons.
- Palacio, 2002, Metodología para la validación de modelos Hidrodinámicos utilizando amplia información de campo. Tese de Doutorado, Universidad Nacional de Colombia.
- Palacio, C., García, F. and Garcia, U., 2010, Calibración de un modelo hidrodinámico 2d para la bahía de cartagena. *Dyna*, **77**(164).
- Ray, R.D., 1999, A global ocean tide model from topex/ poseidon altimetry: Got99.2.
- Rosman, P.C.C., 2015, Referência Técnica do SisBaHiA COPPE Engenharia Costeira e Oceanográfica. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Rueda, J., 2010, Estudio de la hidrodinámica y sus mecanismos forzadores en la bahía de Cartagena. Dissertação de mestrado, Universidad del Norte (Colombia).
- Sincock, A.M., Wheater, H.S. and Whitehead, P.G., 2003, Calibration and sensitivity analysis of a river water quality model under unsteady flow conditions. *Journal of Hydrology*, **277**(3-4), 214–229.
- Soto, Y.J.M., 2004, A modelagem hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do complexo estuarino Antonina Paranaguá-PR. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná.
- Tizón, J., 2010, Simulación numéricas en sistemas de repulsión, vol. 1. Universidad politécnica de Madrid.
- Tuchkovenko, Y.S. and Lonin, S.A., 2003, Mathematical model of the oxygen regime of cartagena bay. *Ecological Modelling*, **165**(1), 91–106.
- Urbano, J., 1993, Masas de agua del caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, **14**, 3–30.
- Wheater, H. and Beck, M., 1995, Modelling upland stream water quality: process identification and prediction uncertainty. *Solute modelling in catchment systems*, **305**, 324.
- Yang, Z. and Hamrick, J.M., 2005, Optimal control of salinity boundary condition in a tidal model using a variational inverse method. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **62**(1-2), 13–24.