

# XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

## INFLUÊNCIA DA BATIMETRIA NA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA COSTEIRA 2DH NO LITORAL SETENTRIONAL DO RN-BRAZIL

*José Edson de Moura<sup>1</sup>; Ada Cristina Scudelari<sup>2</sup>; Venerando Eustáquio Amaro<sup>3</sup>*

**Resumo** – A caracterização da circulação hidrodinâmica é um dos estudos com apelo ambiental que se utiliza da batimetria, entre outros dados de entrada e, independentemente da complexidade dos processos representados nos modelos numéricos, pode ter a qualidade de seus resultados dependente da capacidade de reprodução do MDT usado para representar a batimetria da área de interesse. Sendo assim, o objetivo deste estudo é avaliar a influência de batimetrias obtidas de diversos MDTs, nos padrões de circulação hidrodinâmica via modelagem numérica. Para tanto, considerou-se os dados referentes à região costeira do nordeste do Brasil, correspondente ao litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte, frontal aos municípios de Macau, Guamaré e Galinhos. Essa região se caracteriza pela forte presença de processos físicos costeiros, com batimetria rasa e complexas feições de fundo. A presença intensa de atividades petrolíferas faz da região uma das mais importantes para o desenvolvimento socioeconômico do estado, mas, por outro lado, potencializa a possibilidade de acidentes ambientais de grandes e graves proporções. O modelo de circulação hidrodinâmica utilizado foi o 2DH, que faz parte do Sistema de Hidrodinâmica Ambiental, chamado SisBaHiA<sup>®</sup>, desenvolvido pela área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ.

**Palavras-Chave** – Circulação Hidrodinâmica, Batimetria, SisBAHIA

**Abstract** – The characterization of the hydrodynamic circulation is one of the environmental studies appeal that uses the bathymetry, and other data entry, and regardless of the complexity of the processes represented in numerical models, may have the quality of its results dependent on the reproductive capacity of the DTM used to represent the bathymetry of the area of interest. Therefore, the objective of this study is to evaluate the influence of bathymetry obtained from several DTMs in hydrodynamic circulation patterns through numerical modeling. To this end, we considered the data on the coastal region of northeastern Brazil, corresponding to the northern coast of Rio Grande do Norte State, front to the cities of Macau, Guamaré and Galinhos. This region is characterized by strong presence of coastal physical processes, with shallow bathymetric features and complex background. The intense presence of oil activities makes the region one of the most important for the socioeconomic development of the state, but on the other hand, enhances the possibility of major and serious proportions environmental accidents. The hydrodynamic circulation model was used 2DH, part of the System of Environmental Hydrodynamics, called SisBaHiA<sup>®</sup>, developed by the area of Coastal and Oceanographic Engineering of the Ocean Engineering Program of COPPE / UFRJ.

**keywords** – Hydrodynamic circulation, bathymetry, SisBAHIA<sup>®</sup>

<sup>1</sup> PPGES-DEC-UFRN: Campus Universitário – CT – LARHISA – Fone 84.3215-3775 ramal 205, Fax 84.3215-3930, email [jedsonmoura@gmail.com](mailto:jedsonmoura@gmail.com)

<sup>2</sup> PPGES-DEC-UFRN: Campus Universitário – CT – LARHISA – Fone 84.3215-3775 ramal 205, Fax 84.3215-3930, email [ada@ct.ufrn.br](mailto:ada@ct.ufrn.br)

<sup>3</sup> PPGG-DG-UFRN: Campus Universitário – CCET – GEOPRO – Fone 84.3215-3212, Fax 84.3215-3831, email [amaro@geologia.ufrn.br](mailto:amaro@geologia.ufrn.br)

## INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência de batimetrias, obtidas de diversos MDTs, nos padrões de circulação hidrodinâmica 2DH, da região do litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, que abrange os municípios de Macau, Guamaré e Galinhos (Figura 1).



Figura 1 – Mapa representativo do Estado do Rio Grande do Norte. Adaptado de Abreu (2006).

Esta região destaca-se no estado pelas significativas transformações que o cenário econômico vem apresentando nas últimas décadas, em virtude do desenvolvimento de novas formas de ocupação e exploração dos recursos naturais. Destaca-se, nesse contexto, a exploração e produção petrolífera, com a instalação de um pólo de processamento de petróleo e a implantação de uma refinaria no município de Guamaré, tornando o RN um estado de particular interesse para o Brasil. Adicionam-se a essas novas atividades, a carcinicultura, a exploração turística, o extrativismo do sal marinho e a pesca. Esses segmentos socioeconômicos caracterizam-se pela ocupação dos espaços e pelos usos dos recursos costeiros e marinhos, provocando fortes influências sobre os ecossistemas – tanto pelos impactos diretos das atividades, quanto pela dinâmica socioeconômica e demográfica delas decorrentes. Tais influências promovem processos de riscos contundentes, de abrangência temporal e espacial, sobre as feições naturais da região e além dos limites de jurisdição municipal. A presença intensa de atividades de exploração e produção de petróleo, além de fazer da região uma das mais importantes para o desenvolvimento socioeconômico do estado, potencializa a possibilidade de acidentes ambientais de grandes e graves proporções, afetando toda a cadeia de processos e atividades econômicas, sociais e naturais. Isso demanda um conhecimento detalhado dos aspectos geomorfológicos existentes, a fim de que sejam viabilizados projetos de desenvolvimento sustentável na região.

Essa região se caracteriza pela presença de processos físicos costeiros bastante acentuados, tais como: movimentações de areia; surgimento e desaparecimento de dunas; variação do nível do mar; batimetria rasa e complexas feições de fundo. Isso implica em alterações geomorfológicas bastantes dinâmicas. Uma visão panorâmica das unidades geoambientais presentes no estuário Galinhos-Guamaré pode ser observada na Figura 2.



Figura 2 – Vistas panorâmicas das unidades geoambientais no Estuário Galinhos-Guamaré: A) Sede do Município de Guamaré situado na planície flúvio-marinha do estuário; B) Manguezais sob influência direta da atividade salinera nas planícies estuarinas; C) Barra arenosa na desembocadura do estuário, onde se localiza a sede do Município de Galinhos; D) Campos de dunas móveis recentes e depressões interdunares por vezes com lagoas intermitentes e recobertas por vegetação rasteira. Fonte: IDEMA (2004).

Do ponto de vista geoambiental a região vem sendo estudada por diversos autores (Grigio (2003), Lima (2004), Vital et al. (2005), Silveira et al. (2006), Leite (2007), Tabosa e Vital (2007), Costa Neto (2009), Góis (2008), Gomes (2007), Souto (2009), Moura (2010)), onde são evidenciados os processos físicos presentes e a forte influência dos seus aspectos hidrodinâmicos. A batimetria da região é bastante complexa, onde se verifica a presença de um paleocanal na foz do rio Açú, cordões de *beachrocks*, campos de dunas com tendência transversal e corpos arenosos isolados. Também, dos trabalhos desenvolvidos na região, verifica-se uma forte dinâmica sedimentar, acarretando variações morfológicas e de feições de fundo significativas e em curto espaço de tempo. Sabidamente as feições de fundo têm influência direta nos aspectos hidrodinâmicos, e uma vez que representam entradas de dados básicas aos estudos de circulação hidrodinâmica com suporte computacional, justifica-se o estudo da influência da batimetria na circulação hidrodinâmica 2DH.

As informações batimétricas disponíveis para a região referem-se aqueles obtidos da digitalização das cartas náuticas CN-720 (DHN, 2009) e CN-700 ((DHN, 1981), e de campanha de

campo realizada pelo GGEMMA-PPGG-UFRN em 2005. Com base nessas informações são gerados os MDTs, a partir de diversos métodos interpoladores, sendo esses aplicados a um modelo de circulação hidrodinâmica 2DH, implementado via SisBaHiA®, onde são mantidas constantes os forçantes hidrodinâmicos. Os resultados obtidos são analisados espacialmente e temporalmente, onde são apresentados os campos de velocidade e de elevação do domínio modelado.

Logo os objetivos declarados no presente trabalho estão justificados e para sua realização valeu-se da seguinte estratégia: processar dados de batimetria da área de estudo obtidos de duas fontes (digitalização de cartas náuticas e campanha de campo), visando a geração e análise de diferentes MDTs da região a partir de diversos métodos interpoladores; aplicar os dados resultantes da análise dos MDTs no modelo de circulação hidrodinâmica 2DH, verificando sua influência na qualidade e na magnitude dos resultados dessa modelagem e avaliando a sensibilidade do modelo às variações de batimetria.

## **MDTs PARA A ÁREA DE ESTUDO**

Segundo Felgueiras e Câmara (2004), um Modelo Digital de Terreno (MDT) é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre. Para a representação de uma superfície real no computador é indispensável a elaboração e criação de um modelo digital, que pode estar representado por equações analíticas ou por uma rede (*grid*) de pontos, de modo a transmitir ao usuário as características espaciais do terreno.

A produção de um MDT passa, em linhas gerais, por três etapas, conforme Felgueiras e Câmara (2004): primeiro, a aquisição dos dados amostrais; segundo, a geração do modelo digital pelo processo de interpolação dos dados; e terceiro, a aplicação de procedimentos de análises estatísticas executados sobre os dados do modelo digital gerado.

Uma vez que o modelo de circulação 2DH, usado neste trabalho, é o SisBaHiA®, que se utiliza do Surfer® para a geração dos seus MDTs associados, os interpoladores aqui utilizados se referem aos integrados nesse software.

Os MDTs da área estudada originaram-se de dois conjuntos distintos de dados: da digitalização de pontos das cartas náuticas disponibilizadas pela DHN, doravante referenciado como BD-CN, e de campanha batimétrica executada pela UFRN, de agora em diante chamado de BD-UFRN.

O BD-CN foi obtido a partir da digitalização manual de duas cartas náuticas da região: a principal, CN nº 720 (DHN, 2009) compreendendo o litoral entre os municípios de Areia Branca a Guamaré, disponibilizada em formato *raster* na Internet pela DHN; a outra, CN nº 700 (DHN,

1981), abrangendo o litoral frontal ao município de Macau até o município de São Bento do Norte, disponível em papel, que foi usada para complementar os dados mais a leste da região de domínio da modelagem. A seção A da Figura 3 apresenta a distribuição dos pontos digitalizados sobre as cartas náuticas da área de estudo.

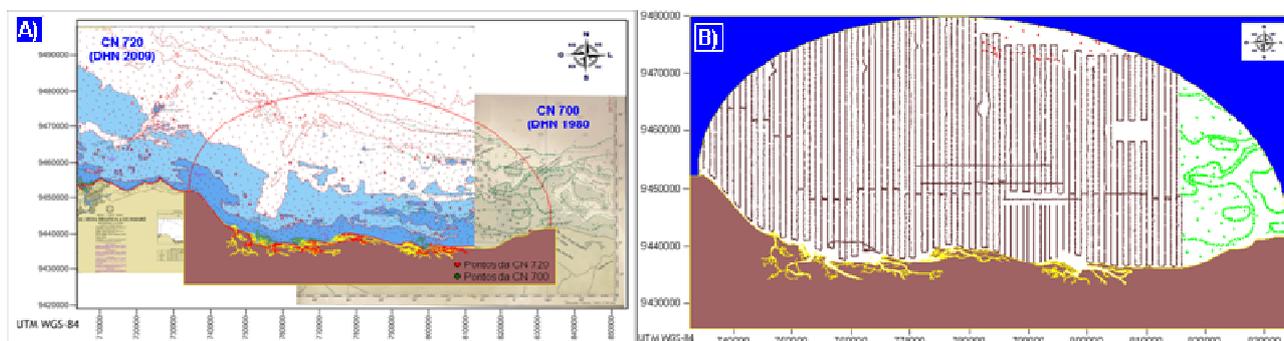


Figura 3: Domínio da área de estudo: A) Visualização dos pontos digitalizados sobre as cartas náuticas; B) Visualização dos pontos da campanha de campo.

O BD-UFRN refere-se à base de dados composta de dados batimétricos pré-existent, devidamente georreferenciados, reunidos e disponibilizados pelo GGEMMA-PPGG-UFRN. Esses dados foram obtidos a partir de levantamentos batimétricos in situ realizado em 2005 e estruturados em coordenadas UTM no Datum Horizontal WGS-84, na forma XYZ, com profundidade em metros corrigida a partir do nível médio das marés. A seção B da Figura 3 apresenta a distribuição desses dados sobre a região de domínio da modelagem hidrodinâmica. Moura (2010) realiza a análise descritiva desses dados, apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Estatística descritiva dos dois conjuntos de dados.

| Item                                | BD-UFRN   | BD-CN     |
|-------------------------------------|-----------|-----------|
| Média                               | -17,030   | -17,031   |
| Erro padrão                         | 0,304     | 1,073     |
| Mediana                             | -5,69     | -5,10     |
| Moda                                | -5,21     | -1,30     |
| Desvio padrão                       | 69,47     | 88,60     |
| Variância da amostra                | 4.825,65  | 7.849,50  |
| Amplitude                           | 1.102,8   | 1.100,0   |
| Mínimo                              | -1.101,3  | -1.101,3  |
| Máximo                              | 1,5       | -1,3      |
| 1º quartil                          | -9,7      | -11,3     |
| 3º quartil                          | -4,0      | -1,3      |
| Média quadrática                    | 5.115,565 | 8.138,389 |
| Raiz da média quadrática            | 71,523    | 90,213    |
| Nº pontos                           | 52.180    | 6.813     |
| Área (Km <sup>2</sup> )             | 4.313     | 4.502     |
| Densidade (pontos/km <sup>2</sup> ) | 12,1      | 1,5       |

Dessa análise destaca-se a diferença de densidade de pontos por km<sup>2</sup> e observa-se a semelhança entre a amplitude e os valores máximos e mínimos dos dados. A pequena diferença entre as medianas (0,59 m) também demonstra coerência entre os dois conjuntos de dados (12,1

para BD-UFRN 1 1,5 para BD-CN). Entretanto, ressalta Moura (2010), o valor da moda de BD-CN (-1,30 m), muito inferior ao mesmo valor em BD-UFRN (5,69 m), foi nitidamente influenciado pelo excesso de pontos de contorno de terra.

Com base nesses dois conjuntos de dados, Moura (2010) utilizando os doze métodos de interpolação/aproximação existentes no Surfer®, gerou 24 MDTs para a região. Através da análise estatística, da comparação visual da capacidade de reprodução das feições de fundo e das medidas de erro percentual médio absoluto (MAPE), raiz do erro médio quadrático (RMES), coeficiente de correlação e índice de concordância, Moura (2010) mostra que o MDT que melhor reproduz as feições de batimetria da área estudada é o gerado a partir do interpolador Vizinho Natural do BD-UFRN (Figura 4), sendo, conseqüentemente, esse MDT adotado como referência batimétrica nas aplicações do modelo hidrodinâmico 2DH. A Figura 4 mostra esse MDT e as Figuras 5 e 6 apresentam outros dois MDTs utilizados no trabalho de Moura (2010) que correspondem respectivamente ao de melhor e pior semelhança com oriundo da interplação com Vizinho Natural do BD-UFRN. Dessa forma, os resultados obtidos são analisados.

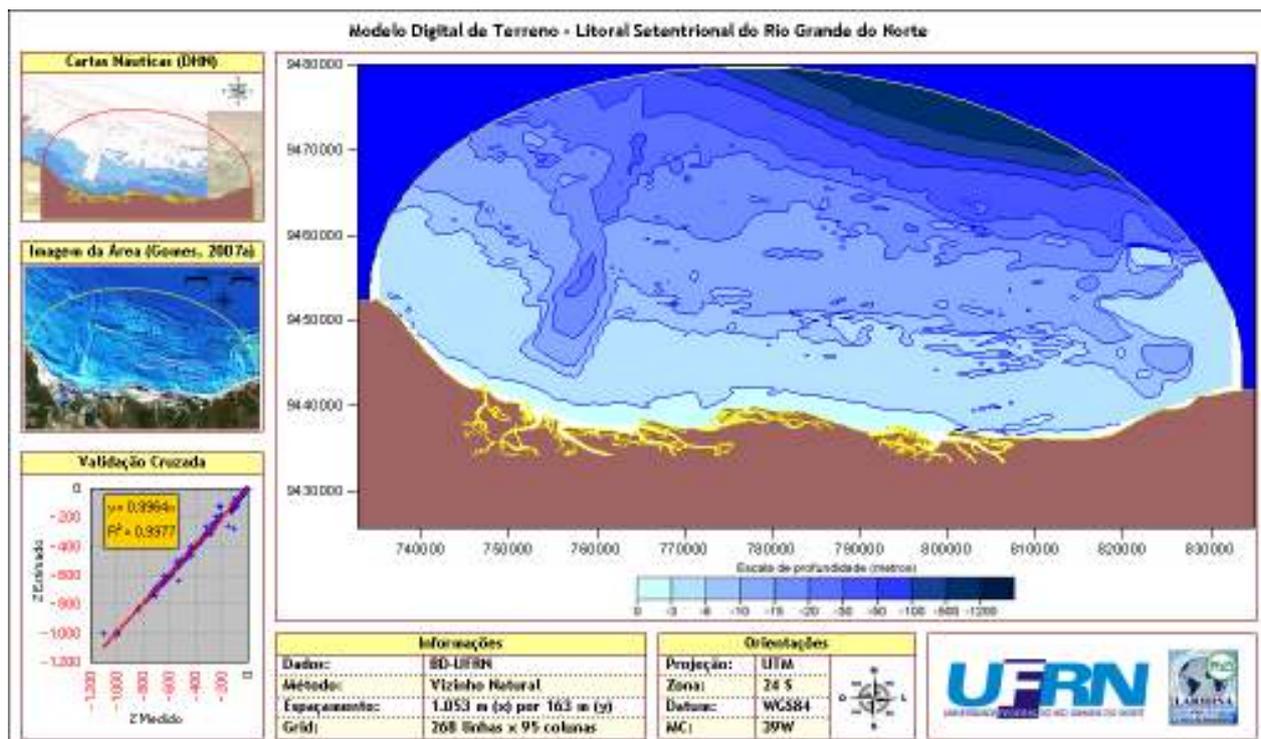


Figura 4 – MDT da área de estudo – Método Interpolador: Vizinho Natural (BD-UFRN).

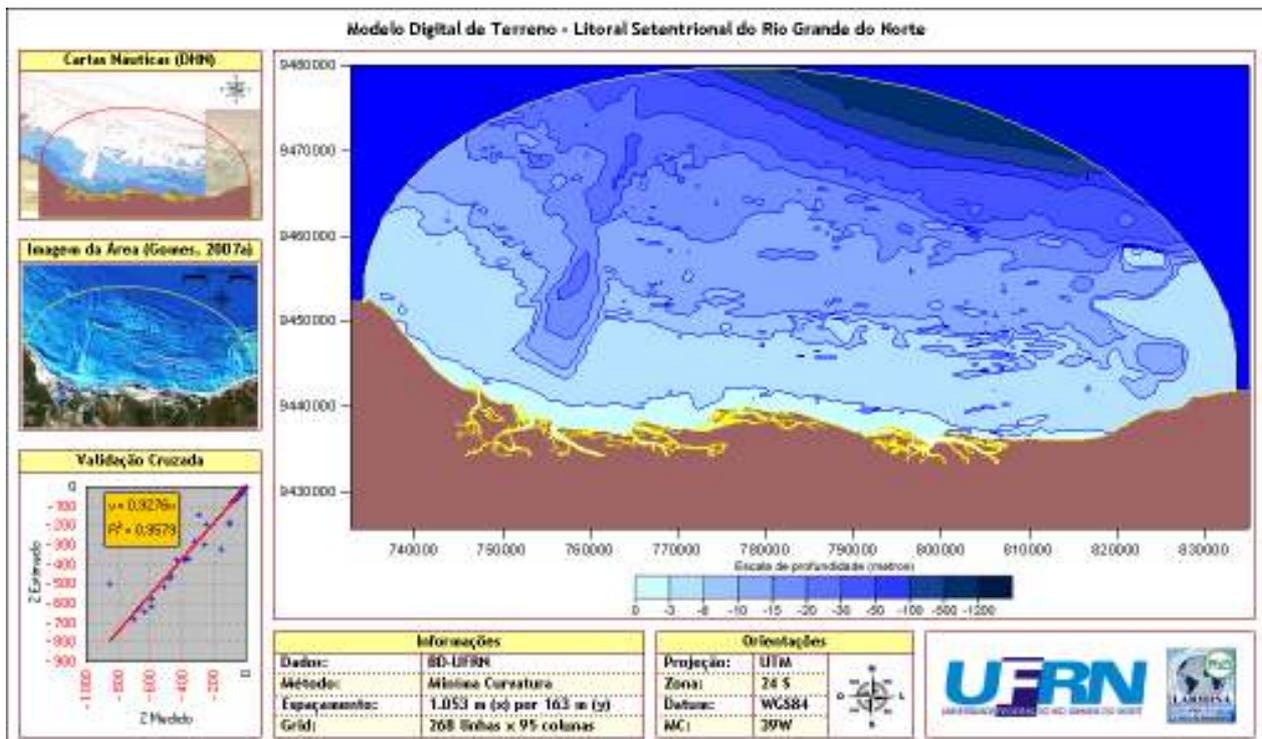


Figura 5 – MDT da área de estudo – Método Interpolador: Mínima Curvatura (BD-UFRN).

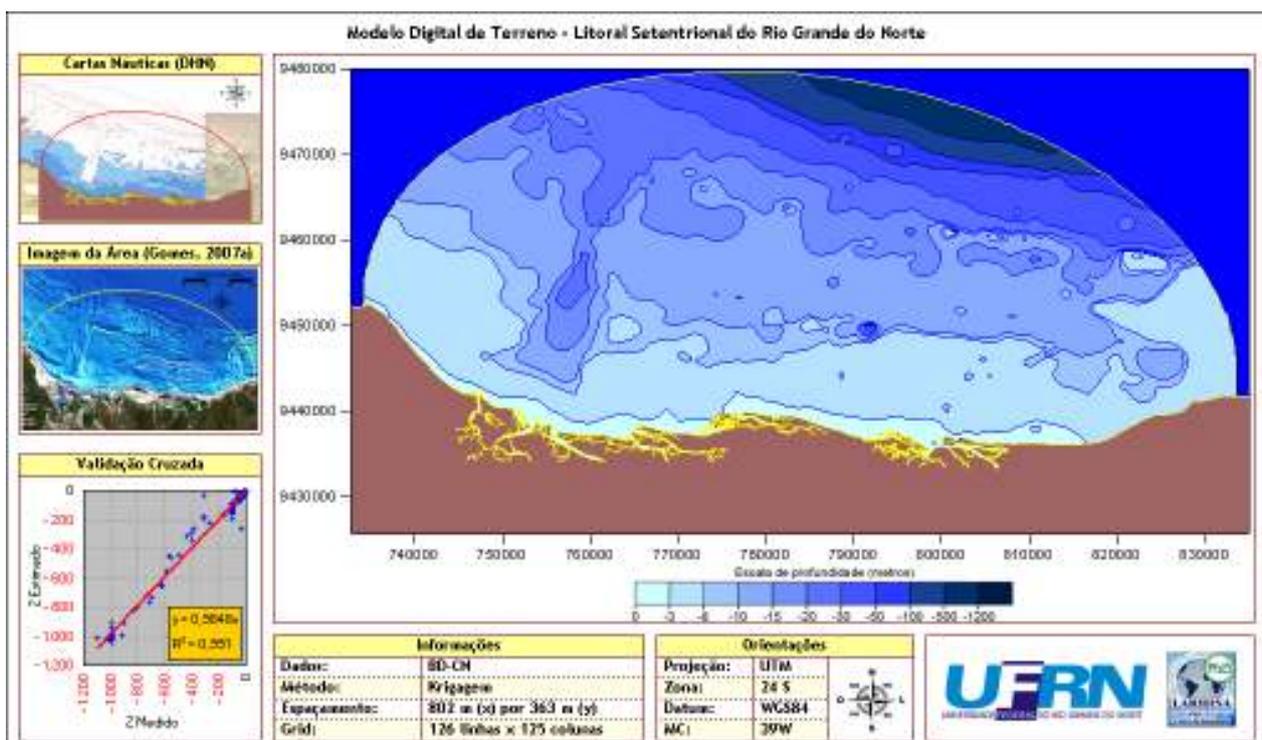


Figura 6 – MDT da área de estudo – Método Interpolador: Krigagem (BD-CN).

## APLICAÇÃO DO MODELO 2DH

A implementação de um modelo 2DH num estudo de circulação hidrodinâmica, depende de um conjunto de parâmetros consistentes de entrada, previamente selecionados e preparados. A fase de coleta e elaboração dos dados vai desde a definição da área a ser modelada até a adequação desses dados à utilização do modelo. São necessárias informações que permitam a definição dos contornos do domínio a ser modelado, bem como dados referentes à batimetria, tipo de fundo e rugosidade equivalente, marés, ventos, entre outros.

Como o objetivo deste trabalho é apresentar o estudo da influência dos MDTs na modelagem da circulação hidrodinâmica 2DH, lança-se mão do modelo 2DH, aplicado por Góis (2008), quando do estudo da dispersão de óleo na zona costeira entre Macau e Galinhos-RN. O modelo 2DH de circulação hidrodinâmica utilizado é o presente no SisBaHiA® – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, desenvolvido na área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ. Esse modelo é da linhagem FIST (*Filtered in Space and Time*), otimizado para corpos d'água naturais, utilizando elementos finitos na discretização espacial e diferenças finitas na discretização temporal. A linhagem FIST representa um sistema de modelagem de corpos de água com superfície livre composta por uma série de modelos hidrodinâmicos, nos quais a modelagem da turbulência é baseada em técnicas de filtragem, semelhantes aquelas empregadas na Simulação de Grandes Vórtices (LES-Large Eddy Simulation). Maiores detalhes sobre o SisBaHiA® podem ser encontrados em <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br>.

Na região, a cada ciclo de aproximadamente 24 horas, ocorrem duas marés altas ou preamares e duas marés baixas ou baixa-mares, caracterizando uma maré do tipo semi-diurna com desigualdade diária e a amplitude da ordem de 2,50 m. Para a modelagem da circulação hidrodinâmica, as margens em terra (contorno fechado) foram consideradas como impermeáveis, recebendo valor de vazão nulo. Também não foi considerada a existência de rios afluentes, devido suas pequenas contribuições de vazão numa região estudada com aproximadamente 4.600 km<sup>2</sup> de área costeira. A condição de contorno no fundo é a imposição da velocidade nula. Na superfície livre, a condição é a prescrição da tensão do vento. Neste trabalho, foi realizada a simulação com 'partida fria', referindo-se a uma condição inicial com nível plano e velocidades nulas.

A Figura 7 apresenta o domínio da área de estudo com a discretização da malha adotada.

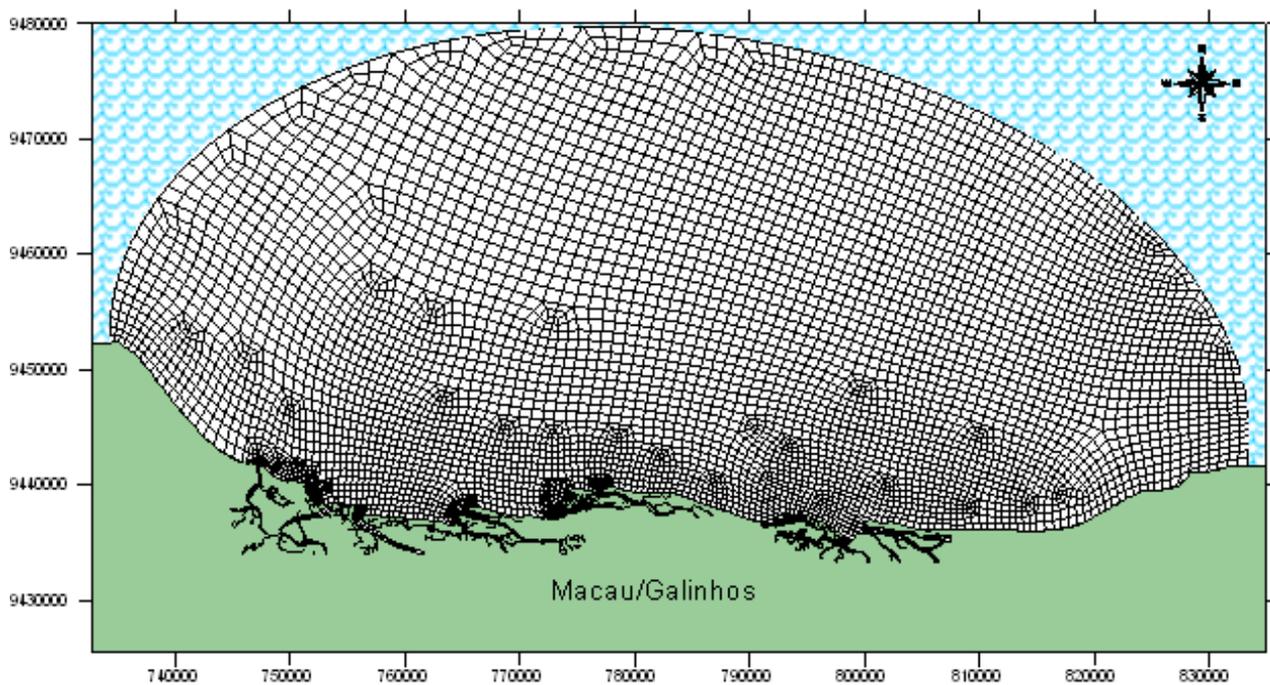


Figura 7 – Malha com domínio e discretização ajustada da área de estudo.

## ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Da análise da batimetria, ao longo de quatro perfis da área de estudo e da análise estatística das medidas de erros MAPE, RMSE, coeficiente de correlação e índice de concordância, Moura (2010) observou que o MDT gerado a partir do método Mínima Curvatura do BD-UFRN é o que guarda melhor similaridade com o Método de Referência (MR) (Vizinho Natural de BD-UFRN), enquanto que o MDT gerado pelo método Krigagem do BD-CN tem os piores relacionamentos com o método de referência, sendo esses dois métodos, referenciados como Métodos Comparados (MCs), selecionados para a avaliação dos resultados da modelagem hidrodinâmica

Como dito anteriormente, os resultados obtidos são analisados espacialmente e temporalmente. Para tanto, foram definidos três pontos onde as variações temporais das elevações e das velocidades são analisados, conforme a figura 8.

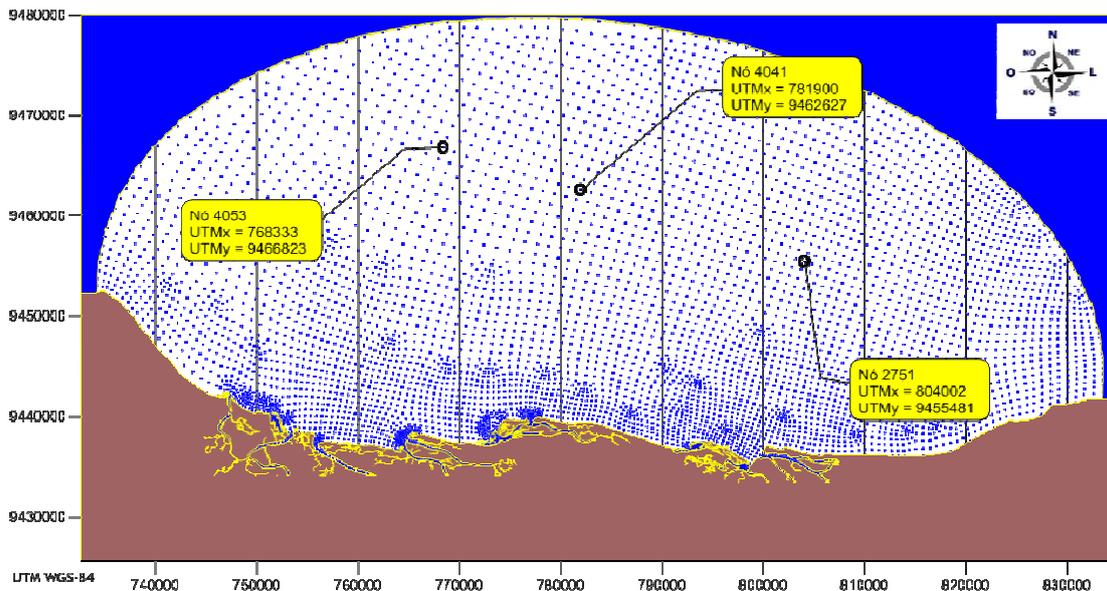


Figura 8 – Malha da modelagem com indicação dos nós centrais para análise dos resultados.

Como se necessita determinar um passo de tempo específico para a análise espacial dos resultados, a Figura 9 mostra o gráfico temporal de elevação no nó central 4041, com destaque para os passos de tempo que foram utilizados nas análises espaciais dos resultados da modelagem. Foram selecionados dois instantes que representam momentos diferentes dos ciclos de marés: Preamar de Sизigia (PM\_S) e Baixa-mar de Quadratura (BM\_Q).

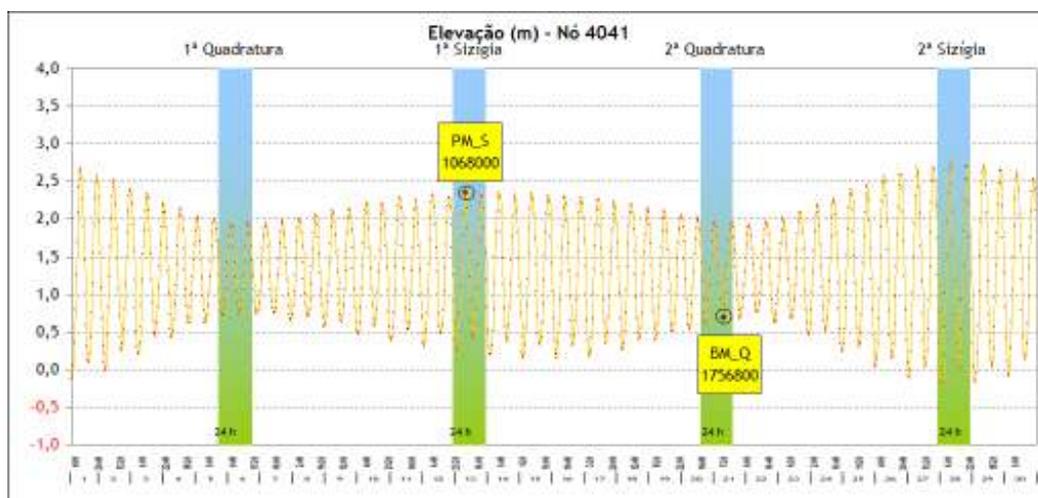


Figura 9 – Gráfico de elevação no nó 4041.

A seguir são apresentados os resultados ao longo do domínio da modelagem referentes a esses instantes distintos de maré. Para cada um dos instantes são apresentadas duas figuras compostas de três seções: seção A, mostrando a intensidade dos campos de velocidade e o mapa de elevação do MR; Seções B e C, mostrando a comparação de intensidade dos campos de velocidade de cada MC em relação ao MR, o mapa de elevação de cada MC e a classificação das diferenças de direção dos vetores de velocidade dos MCs em relação ao MR ( $\Delta = MC - MR$ ). Ainda, para cada instante, é apresentado o resumo estatístico e as medidas de erros dos MCs em relação ao MR.

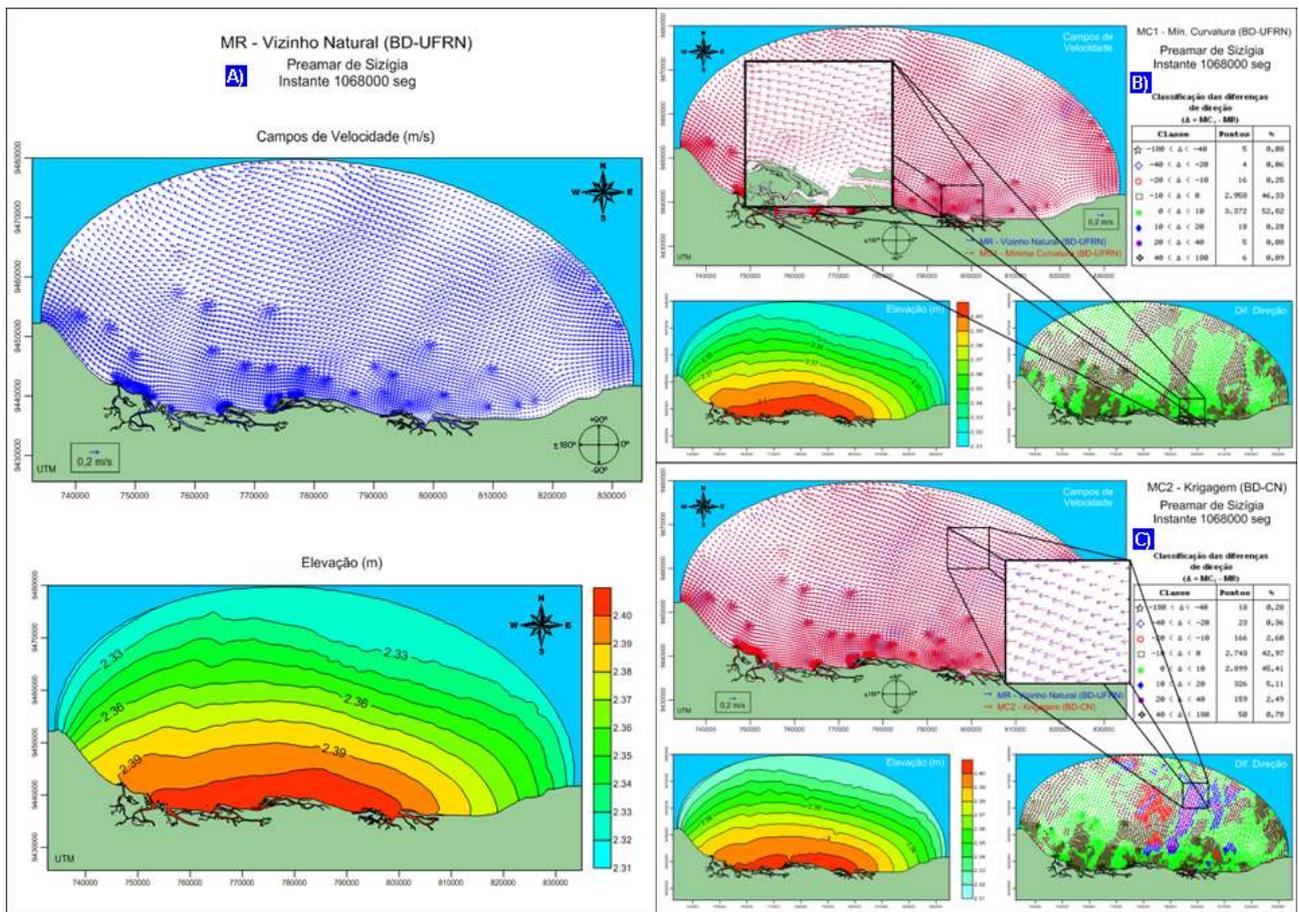


Figura 10 – Análise dos resultados no instante 1068000, preamar de sizigia: A) Intensidade dos campos de velocidade e mapa de elevação do MR – Vizinho Natural (BD-UFRN); Comparação dos campos de velocidade do MC1 – Mínima Curv. (BD-UFN) em relação ao MR; mapa de elevação do MC1; classificação das diferenças de direção entre o MC1 e o MR; C) Comparação dos campos de velocidade do MC2 – Krigagem (BD-CN) em relação ao MR; mapa de elevação do MC2; classificação das diferenças de direção entre o MC2 e o MR.

Tabela 2 – Estatística descritiva e medidas de erro dos resultados de elevação e velocidade em relação ao MR, no Instante 1068000 seg.  
 Preamar de Sizigia

Análise Estatística - PM\_S - Preamar de sizigia - Instante 1068000

| Grandeza                   | Método Interpolador             | Média  | Mediana | Desvio Padrão | Coeficiente de Variação (%) | Assimetria | Amplitude | Mínimo  | Máximo | Comparação com o método de referência |        |   |                          |
|----------------------------|---------------------------------|--------|---------|---------------|-----------------------------|------------|-----------|---------|--------|---------------------------------------|--------|---|--------------------------|
|                            |                                 |        |         |               |                             |            |           |         |        | MAPE                                  | RMSE   | Coefficiente de Correlação R <sup>2</sup> | Índice de Concordância d |
| Elevação (m)               | MR - Vizinho Natural (BD-UFRN)  | 2,378  | 2,388   | 0,030         | 0,012                       | -0,527     | 0,118     | 2,318   | 2,436  |                                       |        |   |                          |
|                            | MC1 - Mínima Curvatura (BD-UFN) | 2,378  | 2,388   | 0,029         | 0,012                       | -0,526     | 0,118     | 2,319   | 2,436  | 0,0136                                | 0,0002 | 0,9998                                    | 0,9999                   |
|                            | MC2 - Krigagem (BD-CN)          | 2,379  | 2,388   | 0,029         | 0,012                       | -0,526     | 0,117     | 2,319   | 2,436  | 0,0636                                | 0,0008 | 0,9963                                    | 0,9989                   |
| Módulo de Velocidade (m/s) | MR - Vizinho Natural (BD-UFRN)  | 0,099  | 0,105   | 0,053         | 0,532                       | -0,088     | 0,363     | 0,000   | 0,363  |                                       |        |   |                          |
|                            | MC1 - Mínima Curvatura (BD-UFN) | 0,098  | 0,103   | 0,053         | 0,538                       | -0,034     | 0,361     | 0,000   | 0,361  | 5,1488                                | 0,1331 | 0,9910                                    | 0,9977                   |
|                            | MC2 - Krigagem (BD-CN)          | 0,098  | 0,106   | 0,050         | 0,512                       | -0,240     | 0,350     | 0,000   | 0,350  | 14,8052                               | 0,5092 | 0,9396                                    | 0,9839                   |
| Direção (°)                | MR - Vizinho Natural (BD-UFRN)  | -17,18 | -49,80  | 155,49        | -9,05                       | 0,21       | 359,98    | -179,99 | 180,00 |                                       |        |   |                          |
|                            | MC1 - Mínima Curvatura (BD-UFN) | -15,78 | -45,84  | 155,24        | -9,84                       | 0,20       | 359,97    | -179,99 | 179,98 | 3,8753                                | 1,1695 | 0,8247                                    | 0,9540                   |
|                            | MC2 - Krigagem (BD-CN)          | -25,10 | -95,27  | 154,84        | -6,17                       | 0,30       | 359,98    | -179,98 | 180,00 | 11,1908                               | 1,6504 | 0,3832                                    | 0,8085                   |

Na Tabela 2, com relação à preamar de sizígia, instante 1068000 segundos, as diferenças de elevação dos dois MCs foram praticamente nulas com um MAPE calculado inferior a 0,1% em ambos os casos.

Para as diferenças dos módulos de velocidade, percebeu-se maiores alterações no MC2 – Krigagem (BD-CN), Seção C da Figura 10, que atingiu um MAPE de 14,9%.

Também para as diferenças de direção, as maiores alterações foram no MC2 – Krigagem (BD-CN) com um MAPE de 11,2%. Percebeu-se também no detalhe da Seção C da Figura 10 uma mudança de direção no vetor da corrente do MC2, com tendência de giro no sentido Oeste-Sudoeste.

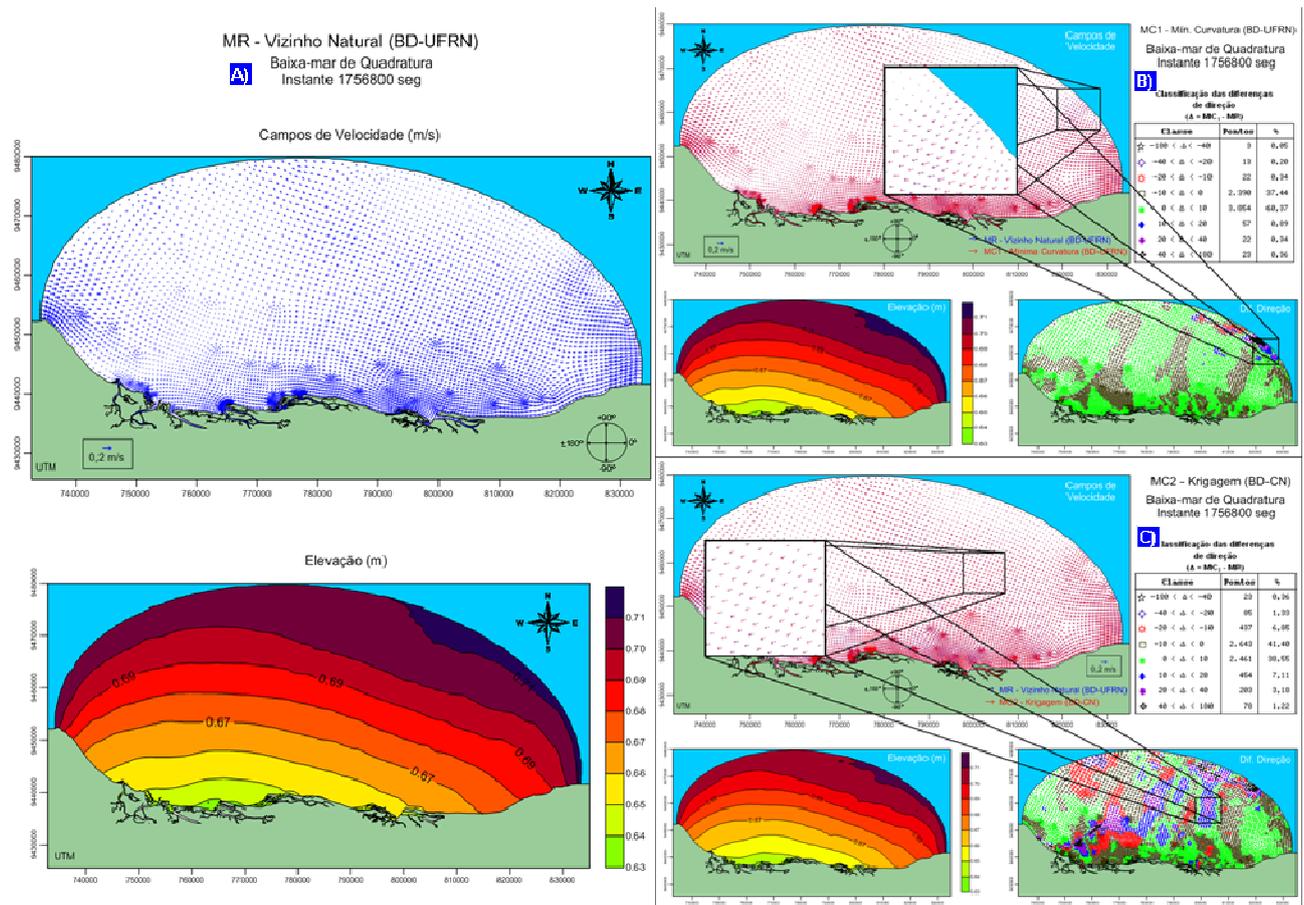


Figura 11 – Análise dos resultados no instante 1756800, baixa-mar de quadratura: A) Intensidade dos campos de velocidade e mapa de elevação do MR – Vizinho Natural (BD-UFRN); B) Comparação dos campos de velocidade do MC1 – Mínima Curv. (BD-UFRN) em relação ao MR; mapa de elevação do MC1; classificação das diferenças de direção entre o MC1 e o MR; C) Comparação dos campos de velocidade do MC2 – Krigagem (BD-CN) em relação ao MR; mapa de elevação do MC2; classificação das diferenças de direção entre o MC2 e o MR.

Tabela 3 – Estatística descritiva e medidas de erro dos resultados de elevação e velocidade em relação ao MR, no Instante 1756800 seg. Baixa-mar de Quadratura

**Análise Estatística - BM\_Q - Baixa-mar de quadratura - Instante 1756800**

| Grandeza                   | Método Interpolador              | Média  | Mediana | Desvio Padrão | Coeficiente de Variação (%) | Assimetria | Amplitude | Mínimo  | Máximo | Comparação com o método de referência |        |   |                          |
|----------------------------|----------------------------------|--------|---------|---------------|-----------------------------|------------|-----------|---------|--------|---------------------------------------|--------|---|--------------------------|
|                            |                                  |        |         |               |                             |            |           |         |        | MAPE                                  | RMSE   | Coefficiente de Correlação R <sup>2</sup> | Índice de Concordância d |
| Elevação (m)               | MR - Vizinho Natural (BD-UFRN)   | 0,667  | 0,666   | 0,028         | 0,042                       | -0,468     | 0,137     | 0,575   | 0,712  | MAPE                                  | RMSE   | Coefficiente de Correlação R <sup>2</sup> | Índice de Concordância d |
|                            | MC1 - Mínima Curvatura (BD-UFRN) | 0,667  | 0,667   | 0,028         | 0,042                       | -0,489     | 0,137     | 0,575   | 0,712  | 0,0403                                | 0,0006 | 0,9999                                    | 1,0000                   |
|                            | MC2 - Krigagem (BD-CN)           | 0,667  | 0,665   | 0,027         | 0,041                       | -0,372     | 0,131     | 0,581   | 0,712  | 0,2542                                | 0,0035 | 0,9944                                    | 0,9984                   |
| Módulo de Velocidade (m/s) | MR - Vizinho Natural (BD-UFRN)   | 0,041  | 0,039   | 0,028         | 0,673                       | 0,997      | 0,198     | 0,000   | 0,198  | MAPE                                  | RMSE   | Coefficiente de Correlação R <sup>2</sup> | Índice de Concordância d |
|                            | MC1 - Mínima Curvatura (BD-UFRN) | 0,041  | 0,039   | 0,028         | 0,679                       | 1,026      | 0,194     | 0,000   | 0,194  | 4,3779                                | 0,1196 | 0,9935                                    | 0,9983                   |
|                            | MC2 - Krigagem (BD-CN)           | 0,041  | 0,039   | 0,027         | 0,667                       | 1,024      | 0,205     | 0,000   | 0,205  | 17,7684                               | 0,5733 | 0,9511                                    | 0,9873                   |
| Direção (°)                | MR - Vizinho Natural (BD-UFRN)   | -40,52 | -137,62 | 144,00        | -3,55                       | 0,50       | 359,98    | -179,99 | 180,00 | MAPE                                  | RMSE   | Coefficiente de Correlação R <sup>2</sup> | Índice de Concordância d |
|                            | MC1 - Mínima Curvatura (BD-UFRN) | -43,58 | -139,85 | 142,31        | -3,27                       | 0,55       | 359,99    | -180,00 | 180,00 | 3,6203                                | 0,7907 | 0,8375                                    | 0,9573                   |
|                            | MC2 - Krigagem (BD-CN)           | -28,25 | -86,15  | 147,40        | -5,22                       | 0,34       | 359,98    | -180,00 | 179,99 | 28,1047                               | 4,7295 | 0,4329                                    | 0,8257                   |

Analisando a Tabela 3, para a baixa-mar de quadratura, instante 1756000 segundos, mais uma vez, as diferenças de elevação dos dois MCs foram praticamente nulas com um MAPE calculado inferior a 0,3% em ambos os casos.

As diferenças de módulo de velocidade e de direção do MC1 – Mínima Curvatura (BD-UFRN), Seção B da Figura 11, foram pouco significativas, com MAPE de 4,4% e 3,6%, respectivamente.

Já o MC2 – Krigagem (BD-CN), Seção C da Figura 11, apresentou um MAPE igual a 17,8% para a diferença do módulo de velocidade, embora os valores máximos absolutos sejam pequenos (da ordem de 0,20 m/s).

As diferenças de direção do MC2 – Krigagem (BD-CN) contabilizaram um MAPE de 28%. Entretanto, a maioria dos dados (98%) apresenta seus valores de diferença classificados na faixa do -10 a 10°, conforme Seção C da Figura 11.

São apresentados, a seguir, os gráficos comparativos de elevação e módulo de velocidade para os passos de tempo nos três nós centrais. Os gráficos apresentam os diferentes valores obtidos do MR – Vizinho Natural (BD-UFRN) e dos dois MCs – Mínima Curvatura (BD-UFRN) e Krigagem (BD-CN).

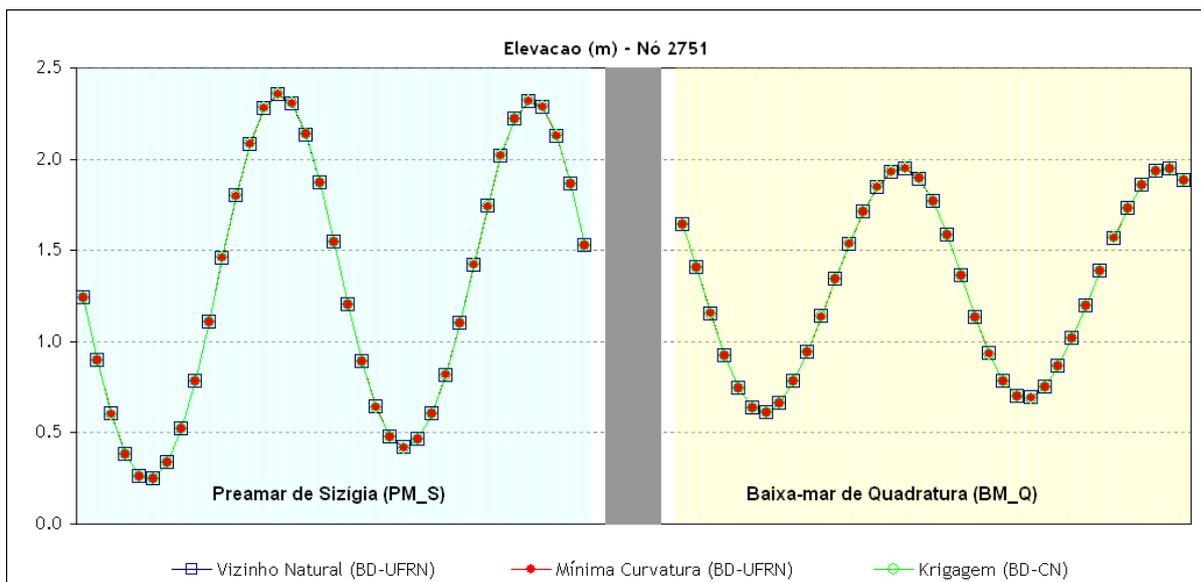
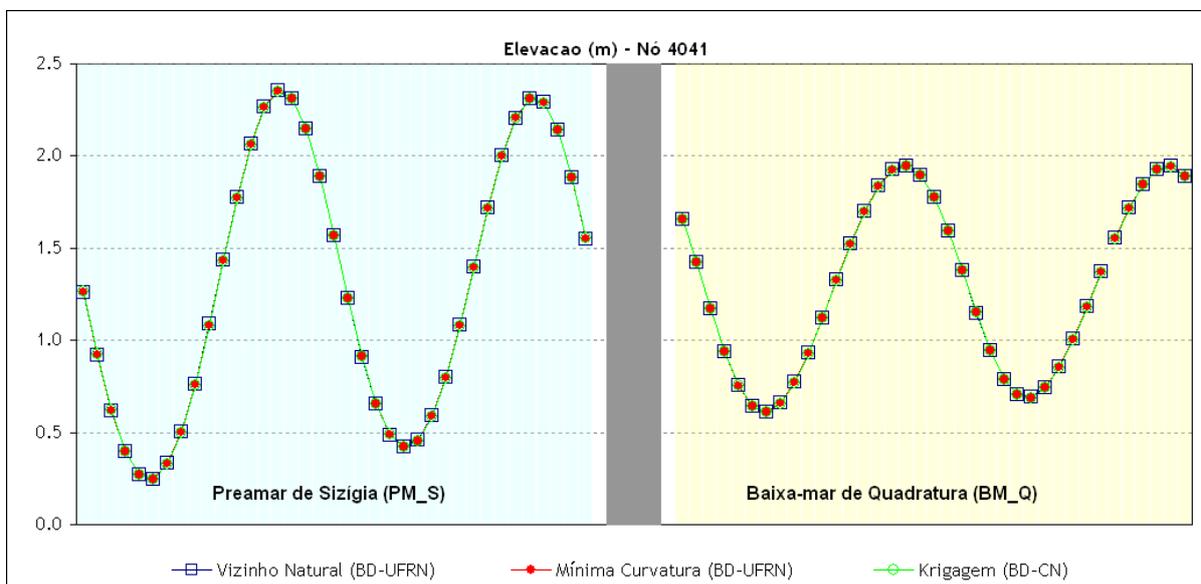
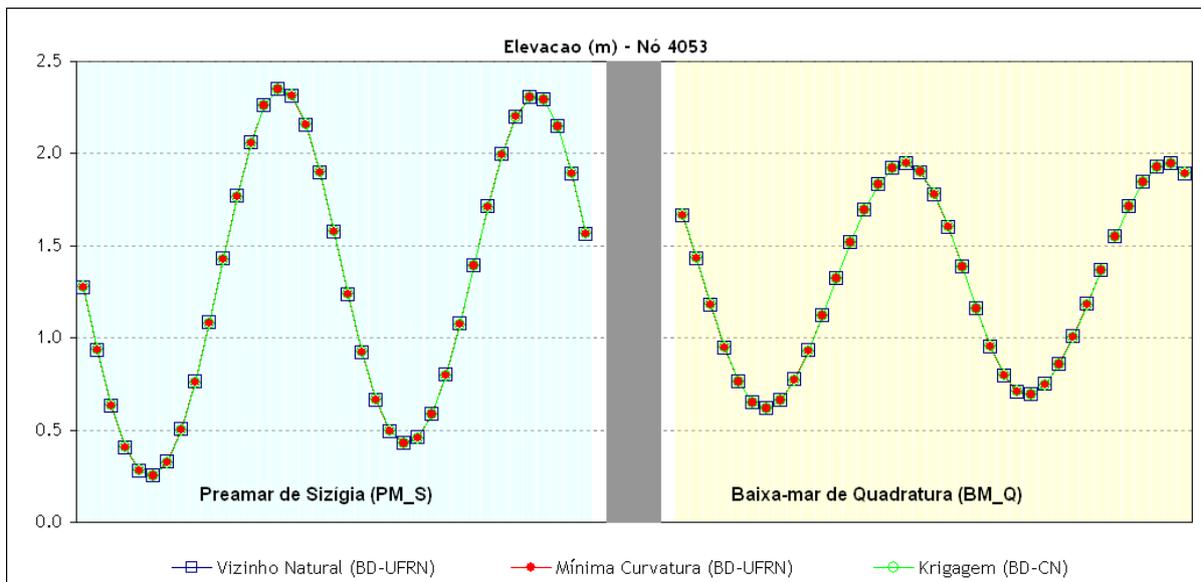


Figura 12 – Comparação temporal das elevações dos MCs Mínima Curvatura (BD-UFRN) e Krigagem (BD-CN) em relação ao MR.

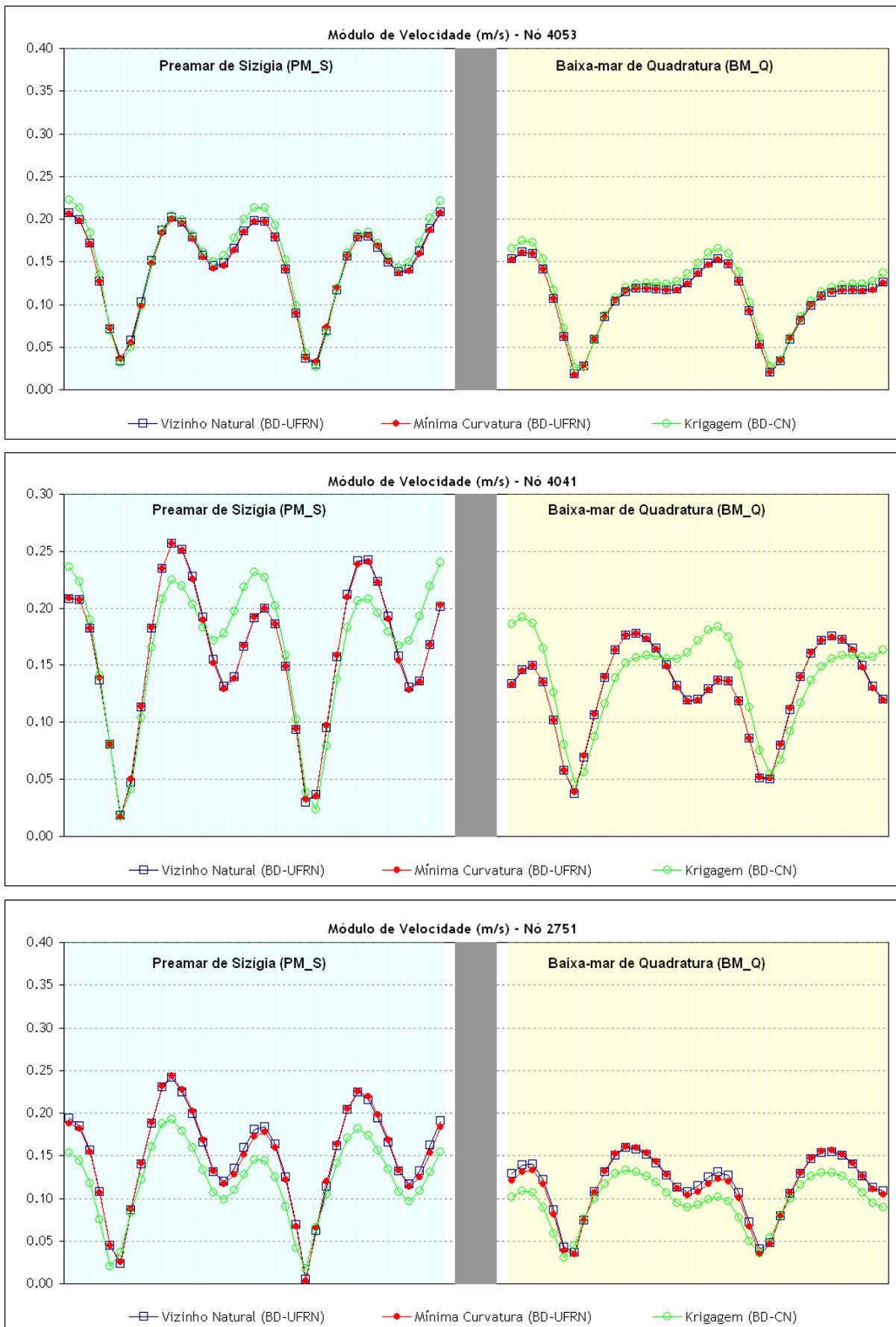


Figura 13 – Comparação temporal dos módulos de velocidade dos MCs Mínima Curvatura (BD-UFRN) e Krigagem (BD-CN) em relação ao MR.

As medidas de elevação apresentadas nos gráficos da Figura 12 são praticamente as mesmas para todos os interpoladores e todos os ciclos de marés, nos três nós da malha, não causando interferências relevantes nos padrões de circulação hidrodinâmica da modelagem. Na Figura 13, os valores de módulo de velocidade do interpolador Mínima Curvatura (BN-UFRN) apresentam pouca variação em relação ao MR. Já o interpolador krigagem (BD-CN) apresenta razoáveis diferenças em relação ao MR

## CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou a influência da batimetria na modelagem hidrodinâmica referente à região costeira frontal aos municípios de Macau, Guamaré e Galinhos. Os MDTs foram construídos a partir de um conjunto de dados de campo e da digitalização de cartas náuticas, através de métodos interpoladores existentes no Surfer®, e aplicados no modelo 2DH de circulação hidrodinâmica do SisBaHiA®.

No que tange a influência dos MDTs, na modelagem de circulação hidrodinâmica 2DH da região estudada, verificou-se que a utilização de diferentes interpoladores resultou em variações pouco significativas nos campos de elevações, porém em variações com alguma significância no que se refere aos campos de velocidades.

Das análises desenvolvidas, observou-se através da estatística descritiva dos dados que o BD-UFRN apresentou densidade dos pontos por km<sup>2</sup> igual a 12,1 pontos enquanto que o BD-CN igual a 1,5 pontos. Observou-se também, a semelhança entre amplitude e os valores máximos e mínimos dos dados, bem como pequena diferença entre as medianas (0,59 m).

O método interpolador que gerou um MDT com melhor representatividade das feições de fundo foi o Vizinho Natural, tendo sido adotado como Método de referência (MR).

Das análises dos resultados batimétricos, avaliando o MDT que apresentou melhor similaridade com o Método de Referência (Mínima Curvatura, BD-UFRN) e o MDT que demonstrou o pior relacionamento com o Método de Referência (krigagem, BD-CN), observou-se que as variações referentes aos campos de elevações são insignificantes, apresentando sempre MAPE inferior a 0,5%.

Com relação aos campos de velocidades, verificou-se MAPE entre 1,5% (Mínima Curvatura, BD-UFRN) e 17,8% (krigagem, BD-CN) para os módulos de velocidades. Em valores absolutos, a maior diferença foi de 0,137 m/s e a menor foi de -0,087 m/s, valores estes que já podem exercer certa influência nos padrões de circulação.

Quanto às variações de direção dos vetores de velocidade, constatou-se MAPE entre 0,7 (Mínima Curvatura, BD-UFRN) e 28,1 (krigagem, BD-CN). Porém, a maioria dos dados apresentou

valores absolutos de variação classificados na faixa de -10 a +10 graus de variação em relação ao Método de Referência. Observou-se, ainda, que as maiores variações ocorreram nos momentos correspondentes as meias-marés vazantes de sizígia.

Logo, de maneira geral, pode-se afirmar que o campo de velocidades gerado pelo modelo 2DH é mais sensível a variações batimétricas oriundas de diferentes interpoladores; e que os procedimentos de coleta de dados batimétricos e de elaboração dos MDTs não devem ser dissociados do processo de modelagem.

## BIBLIOGRAFIA

ABREU, R. L. **Map of Rio Grande do Norte state.** Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Munic%C3%ADpios\\_do\\_Rio\\_Grande\\_do\\_Norte](http://pt.wikipedia.org/wiki/Munic%C3%ADpios_do_Rio_Grande_do_Norte)>. Acesso em 21 abr 2011.

COSTA NETO, L. X. da. **Caracterização Geológica, Geomorfológica e Oceanográfica do Sistema Pisa Sal, Galinhos-RN.** Tese de doutorado – UFRN, Natal. 291 p. 2009.

DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil. **Carta Náutica da DHN nº 700 – DE FORTALEZA A PONTA DOS TRÊS IRMÃOS,** escala 1:316.200, 2ª Edição. 1981.

DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil. **Carta Náutica da DHN nº 720 – DE AREIA BRANCA A GUAMARÉ,** escala 1:100.000, 3ª Edição. 2009.

FELGUEIRAS, C. A., CÂMARA, G. Modelagem Numérica do Terreno – MNT. In: **Introdução à Ciência da Geoinformação.** São José dos Campos, INPE, 2004. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>>. Acesso em: 17 nov 2007.

GÓIS, D. M. M de. **Estudo da Circulação Hidrodinâmica e da Dispersão de Óleo na Zona Costeira entre Macau e Galinhos – RN.** Dissertação de mestrado – UFRN, Natal, 2008.

GOMES, M. P.; VITAL, H.; MACEDO, J. W. P. **Processamento Digital de Imagens Multiespectrais Aplicado no Realce dos Ambientes Marinho Raso e Profundo da Região de Plataforma Continental e Talude da Bacia Potiguar.** In: XXII Simpósio de Geologia do Nordeste. Natal, 2007.

GRIGIO, A. M. **Aplicação do sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica na determinação da vulnerabilidade natural e ambiental do município de guararé (RN): Simulação de risco às atividades da indústria petrolífera.** Dissertação de mestrado – UFRN, Natal. 253 p. 2003.

IDEMA – INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE. RN. Mapas Temáticos do Uso e Ocupação do Solo e das Unidades Geoambientais dos Estuários Apodi-Mossoró, Açú-Piranhas e Guararé-Galinhos/RN, na escala de 1:10.000, baseado em imagens IKONOS de 2000 a 2003. AMARO, V.E. (Coord.). Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente- IDEMA/RN. **Projeto de Zoneamento Ecológico Econômico dos Estuários do Rio Grande do Norte.** SUGERCO/IDEMA. Relatório Final. Natal, 2004

LEITE, F. S. **Análise da influência do cisalhamento eólico sobre a circulação na região costeira de Guararé-RN, Brasil.** Dissertação de mestrado – UFPE, Recife, 2007.

LIMA, Z. M. C. de. **Caracterização da Dinâmica Ambiental da Região Costeira do Município de Galinhos, Litoral Setentrional do Rio Grande Do Norte.** Tese de doutorado – UFRN, Natal. 157 p. 2004.

MOURA, J. E. de; SCUDELARI, A. C.; AMARO, V. E.. **Desenvolvimento de um Visualizador de Perfil Batimétrico para o modelo Ambiental SisBaHiA.** In: COASTGIS 2009, 2009, Santa Catarina. Coastal/Marine SDI Developments Globally: Advances and Tendencies Towards Collaborative Mapping, 2009.

MOURA, J. E. de; SCUDELARI, A. C ; AMARO, V. E.. **Estudo da Representação de Área de Batimetria Rasa através de MDT's Gerados pelo Surfer.** In: COLACMAR 2009, 2009, Cuba. Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar. Ciencias Marinas: Intergración para el Desarrollo, 2009.

- MOURA, J. E. de. **Influência dos Modelos Digitais de Terreno na Modelagem de Circulação Hidrodinâmica 2DH: Um Estudo de Caso.** Dissertação de mestrado – UFRN, Natal-RN, 2010.
- MOURA, J. E. de; SCUDELARI, A. C.; NEVES, C. F.; AMARO, V. E.. **Evaluation of the Influence of Digital Elevation Models for a Hydrodynamic Circulation Model.** Journal of Coastal Research, v. 64, p. 1140-1144, 2011.
- ROSMAN, P. C. C. Referência Técnica do SisBaHiA – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. Programa de Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 2006
- SILVEIRA, I. M.; VITAL, H.; AMARO, V. E. **The evolutionary study of environmental conditions of the coastal area of the Municipal District of Guamaré - RN-** Journal of Coastal Research, Special Issue 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symp Itajaí, SC). Journal of Coastal Research, Special Issue 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium, Itajaí, SC)(no prelo).. Journal of Coastal Rese, Estados Unidos- no prelo, v. 39, p. 237-241, 2006.
- SOUTO, M. V. S. **Análise da evolução costeira do litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte, região sob influência da indústria petrolífera.** Tese de doutorado – UFRN, Natal. 177 p. 2009.
- SURFER. Surfer 8.0. **Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers, User's Guide.** New York. Golden Software, Inc. 2008. 639p.
- TABOSA, W. F.; VITAL, H. **Morfologia, Hidrodinâmica e Sedimentologia da Plataforma Continental na Porção Extremo Norte do Litoral Setentrional do Estado do RN/NE - Brasil.** In: Congresso Latino Americano de Ciencia do Mar, 2007, Florianopolis. Proceedings do COLACMAR XII, 2007.
- VITAL, H.; SILVEIRA, I. M.; AMARO V. E. Carta Sedimentológica da Plataforma Continental Brasileira – Área Guamaré a Macau (NE Brasil), Utilizando Integração de Dados Geológicos e Sensoriamento Remoto. **Revista Brasileira de Geofísica**, Natal, v. 23, n. 3, p.233-241. ISSN 0102-261X, 2005.