

UNIVERSIDADE DO ALGARVE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA



***INFLUÊNCIA DE PLUMAS DE ÁGUA DOCE NA HIDRODINÂMICA DO
ESTUÁRIO DA RIA DE AROUSA (NW ESPANHA), UMA ABORDAGEM
DE MODELAÇÃO MATEMÁTICA***

Anabela Neto Venâncio

Dissertação para obtenção do grau de mestre em Geomática, ramo Análise de
Sistemas Ambientais

Trabalho efetuado sob orientação de: Prof. Doutor Flávio Augusto Bastos da Cruz Martins

FARO
2013

UNIVERSIDADE DO ALGARVE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA



***INFLUÊNCIA DE PLUMAS DE ÁGUA DOCE NA HIDRODINÂMICA DO
ESTUÁRIO DA RIA DE AROUSA (NW ESPANHA), UMA ABORDAGEM
DE MODELAÇÃO MATEMÁTICA***

Anabela Neto Venâncio

Dissertação para obtenção do grau de mestre em Geomática, ramo Análise de
Sistemas Ambientais

Trabalho efetuado sob orientação de: Prof. Doutor Flávio Augusto Bastos da Cruz Martins

FARO
2013

RESUMO

Localizada na parte sul da costa da Galiza, a ria de Arousa, tem um interesse particular devido à sua importante indústria de exploração de marisco, especialmente culturas de bivalves. O crescimento, qualidade e mortalidade destes bivalves não só são afetados por possíveis incidentes de poluição, mas também por episódios de grande *run-off*, que podem produzir decréscimos sazonais significativos de salinidade.

Neste contexto, a presente dissertação pretende contribuir para uma melhor compreensão de como as plumas de água doce provenientes dos rios vão influenciar os gradientes de salinidade e temperatura no estuário da ria de Arousa. O objetivo é proceder a uma melhoria da previsão hidrodinâmica do modelo operacional oceanográfico desta ria, que é executado diariamente pela MeteoGalicia.

Para atingir esse objectivo executaram-se simulações numéricas para diferentes cenários de forçamento. Foram escolhidos dois períodos com diferentes condições meteorológicas: um período de inverno, coincidindo com chuvas fortes e um período de verão, coincidindo com a ausência de precipitação.

Foi aplicado o modelo hidrodinâmico MOHID (*Hydrodynamic Model*) para simular os processos físicos da ria de Arousa, utilizando a metodologia de modelos encaixados. O forçamento para a superfície foi imposto através do modelo atmosférico WRF (*Weather Regional Forecast*), que fornece as variáveis meteorológicas necessárias. Para fronteira terra, uma ferramenta hidrológica foi implementada, o modelo SWAT (*Soil water Assessment Tool*), este providencia as descargas de água doce para os principais rios da região. É feita neste trabalho uma descrição da implementação deste sistema, assim como a caracterização da área de estudo.

Os resultados do modelo foram comparados com medidas provenientes de bóias oceanográficas e perfis de CTDs (*Conductivity-Temperature-Depth instrument*) em diferentes localizações.

Palavras-chave: Ria de Arousa, modelação, MOHID, SWAT, hidrodinâmica, plumas de água doce, modelo hidrológico.

ABSTRACT

Ria de Arousa, located in southern part of the galician coast, has a special added interest due to its important shellfish fishing activity, especially bivalve cultures. The growth, quality and mortality of these bivalves are not only affected by possible pollution incidents, but also by river run-off which may result in a significant seasonal salinity decrease.

In this context, the present document is intended to contribute for a better understanding of how the river plumes influence the gradients of salinity and temperature in the ria de Arousa estuary. The aim is the improvement of the hydrodynamic forecasts for the operational oceanographic model of this ria, running daily at MeteoGalicia office.

Numerical experiments were carried out with different scenarios. Two periods with different meteorological conditions were chosen: a winter period coinciding with strong rain events and a summer period coinciding with a dry season.

The hydrodynamic MOHID model (Hydrodynamic Model) was applied in order to simulate the physical processes of ria de Arousa, using a nesting methodology. The surface forcing is imposed using the WRF (Weather Regional Forecast) atmospheric model, which provides the necessary meteorological variables. In the land boundary, a hydrological tool was implemented, the SWAT model (Soil water Assessment Tool), in order to introduce the fresh water discharges for the main rivers of the region. A description of this system implementation is made in this document, as well as the characterization of the study area.

The model results were compared against the measured data from the oceanographic buoys and CTDs (Conductivity-Temperature-Depth instrument) profiles at different locations.

Keywords: Ria de Arousa, modelling, MOHID, SWAT, hydrodynamic, river plumes, hydrological model.

Agradecimentos

Depois de um longo caminho com altos e baixos, finalmente chegou o momento de expressar os meus agradecimentos a todas as pessoas que diretamente ou indiretamente me apoiaram na realização deste trabalho.

Ao professor Flávio Martins, pela oportunidade, pela paciência e pela ajuda prestada com os seus conhecimentos.

À diretora do mestrado de Geomática, Professora Cristina Veiga Pires, pela segunda oportunidade de poder realizar este trabalho.

Ao Pedro Montero, pela disponibilidade e pela ajuda com os seus conhecimentos e a disponibilização dos dados.

Aos meus colegas da MeteoGalicia, pela compreensão demonstrada durante a realização deste trabalho.

Às instituições MeteoGalicia e INTECMAR pela disponibilidade dos dados.

Ao Marco Alvo, pela sua sempre disponibilidade quando é preciso.

Aos meus amigos pela constante motivação e energia positiva.

A toda a minha família, em especial a minha mãe pela motivação e apoio incondicional, a minha irmã Lina pelo “olho clínico”, ao meu irmão Rui e cunhada Bé pela motivação, aos meus sobrinhos, Íris, André, Mara e Nuría, pela alegria que transmitem e à minha avó, que apesar dos seus 97 anos, nunca deixa de demonstrar o seu carinho.

Por último, dedico este trabalho ao meu namorado Daniel, por todo o carinho, compreensão, apoio e boa vontade demonstrada nas épocas mais duras deste trabalho. Sem ti não teria conseguido!

A todos vocês, uma vez mais um MUITO OBRIGADO!

"A persistência é o caminho do êxito."

Charles Chaplin

ÍNDICE GERAL

	Página
RESUMO.....	I
ABSTRACT.....	II
AGRADECIMENTOS.....	III
ÍNDICE GERAL	IV
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	IX
Capítulo 1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos da investigação	2
Capítulo 2. Caracterização da Área de Estudo – Ria de Arousa.....	4
2.1. Aspectos gerais que influenciam a hidrodinâmica.....	5
2.1.1. Caracterização do estuário	5
2.1.2. Circulação residual, campos de densidade	7
2.1.3. Massas de água costeira frente à ria de Arousa	8
2.1.4. Condições meteorológicas	9
2.1.5. Caudais fluviais	9
2.1.6. Marés.....	11
Capítulo 3. Metodologia.....	14
3.1. Descrição geral do sistema de modelos MOHID	14
3.2. Principais módulos do modelo MOHID	16
3.3. MOHID Water	17
3.4. Descrição dos módulos usados neste estudo.....	19
3.4.1. Módulo hidrodinâmico	19
3.4.2. Equações resolvidas.....	20
3.4.2.1. Principais aproximações.....	21
3.4.3. Módulo de turbulência.....	23
3.4.4. Módulo de propriedades da água - transporte Euleriano	23
3.4.5. Módulo geometria (discretização vertical).....	25
3.5. Condições de fronteira.....	25
3.5.1. Fronteiras abertas	27

3.5.2. Fronteiras fechadas.....	27
3.6. Modelo SWAT - Soil and Water Assessment Tool.....	27
Capítulo 4. Implementação do Sistema.....	30
4.1. Condições do modelo da ria de Arousa	31
4.1.1. Condições de fronteira aberta e iniciais.....	32
4.1.2. Forçamento atmosférico	33
4.1.3. Forçamento hidrológico.....	34
4.2. Dados de observações.....	38
Capítulo 5. Simulação Hidrodinâmica do Sistema.....	41
5.1. Descrição dos testes de modelação	41
5.2. Resultados e discussão	43
5.2.1. Campos de salinidade e correntes	43
5.2.2. Validação do modelo.....	47
Capítulo 6. Conclusão.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
ANEXOS.....	67

LISTA DE FIGURAS

	Página
<i>Figura 2.1: Localização geográfica da área de estudo - Ria Arousa.....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2.2: Esquema da circulação estuarina positiva</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.3: Esquema de upwelling² que se proporciona na costa Galega.</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.4: Série do nível do mar (m) do marégrafo do porto de Vilagarcía (ria de Arousa).....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3.1: Estrutura hierarquizada do framework¹⁶ adoptada pelo MOHID.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3.2: Hierarquias e dependências entre os módulos utilizados pelo MOHID Water.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.3: Malha ilustrativa das potencialidades da discretização vertical do sistema MOHID.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 4.1: Esquema de modelos utilizados, a) Margem Ibérica (Maretec⁵/IST¹⁰), b) Rias Baixas, c) Arousa.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 4.2: Domínio de cálculo de 4km do modelo WRF.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4.3: Rosa dos ventos, comparando o vento do modelo para a malha de 4 km com estação meteorológica de Corón (lat: 42,58º; long: -8,8º), para o mês de dezembro (a – estação; b – modelo) e para o mês de junho (c – estação; d – modelo).....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.4: Rede hidrográfica da bacia drenante da ria de Arousa.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4.5: Bacia hidrográfica para o rio Ulla delineada pelo modelo SWAT.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4.6: Comparação entre as medidas da estação hidrométrica do rio Deza, afluente do rio Ulla e o caudal simulado pelo SWAT nesse ponto.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4.7: Comparação entre as medidas da estação hidrométrica do rio Ulla e o caudal simulado pelo SWAT nesse ponto.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.8: Localização das estações de medidas que se usaram neste trabalho: boia de Cortegada, estação meteorológica de Corón, e as hidrométricas Deza e Ulla.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.9: Localização dos pontos de monitorização CTD da ria de Arousa.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 5.1: Série temporal de precipitação da estação meteorológica de Corón (gráfico de barras) e do caudal médio diário do rio Ulla, simulado pelo modelo SWAT (gráfico de linhas), para os meses de dezembro 2009 (a) e junho de 2010 (b).....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 5.2: Nível da maré observado pelo marégrafo de Vilagarcía, e a indicação de marés vivas e mortas, para o período de 6 a 9 de dezembro (a), e para o período de 21 a 24 de junho, (b).....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 5.3: Resultados dos campos de salinidade e correntes, para diferentes profundidades para o dia 7 de dezembro, para a baixa-mar (figuras da esquerda) e preia-mar (figuras da direita).....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 5.4: Resultados dos campos de salinidade e correntes, para diferentes profundidades para o dia 22 de junho, para a baixa-mar (figuras da esquerda) e preia-mar (figuras da direita).....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5.5: Séries temporais do modelo, de nível e do módulo da velocidade, à superfície, 2m, 4m e no fundo, para o período de 6 a 9 de Dezembro, extraídas de um ponto no meio do canal da ria.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5.6: Comparação do nível de maré do modelo com as medidas do marégrafo de Vilagarcía, a) a correlação entre as séries, b) para o período de 4 a 14 de dezembro de 2009.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5.7: Posição das estações CTD na ria de Arousa, identificação dos rios que desaguam na ria de Arousa que podem afetar a salinidade medida pelos CTDs³.....</i>	<i>49</i>

<i>Figura 5.8: Variabilidade horizontal da salinidade superficial a) e temperatura superficial b), comparação entre as medidas em cada estação de CTD com o modelo (Teste 1), para os dias 9 e 10 de dezembro.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.9: CTD A0 – dezembro (a); junho (b).....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.10: CTD A2, dezembro.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.11: CTD A3, dezembro (a).....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.12: CTD A4, dezembro (a); junho (b).....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.13: CTD A5, dezembro (a).....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.14: CTD A6, dezembro (a).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.15: CTD A7, dezembro (a); junho (b).....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.16: CTD A8, dezembro (a).....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.17: CTD A9, dezembro (a).....</i>	<i>59</i>

LISTA DE TABELAS

	Página
<i>Tabela 2.1: Caudal médio em m³/s, dos principais rios da costa galega e norte de Portugal.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabela 2.2: Principais componentes harmónicas da maré obtidas no porto de VilaGarcía.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 2.3: Distorção barotrópica da maré em função da sua fase relativa</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 3.1: Lista dos principais módulos utilizados do MOHID.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabela 4.1: Síntese da configuração do modelo da ria de Arousa.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 4.2: Área e número de sub-áreas das bacias dos rios drenantes à ria de Arousa; média diária do caudal para os meses de dezembro e junho para cada rio, calculado pelo modelo SWAT.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 5.1: Testes efetuados para os 2 períodos de simulação e as suas principais diferenças. Teste de referência - o modelo hidrodinâmico operacional da MeteoGalicia²², Teste 1- com base no teste de referência mas com as respetivas diferenças indicadas.</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 5.2: Resumo das estações CTD que vão ser utilizados para as comparações entre as medidas e os resultados do modelo.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 5.3: Resumo da variabilidade da salinidade e temperatura das estações CTD e do modelo (Teste 1), e o BIAS associado, para os dias 9 e 10 de Dezembro, na superfície, 4 m e no fundo.</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 5.4: Resumo da variabilidade da salinidade e temperatura das estações CTD e do modelo (Teste 1), e o BIAS associado, para os dias 21 e 22 de junho, na superfície, 4 m e no fundo.....</i>	<i>51</i>

LISTA DE ABREVIATURAS

ANSI – *American National Standards Institute.*

ASCII – *American Standard Code for Information Interchange.*

CN – Curva Número.

CTD – *Conductivity-Temperature-Depth instrument.*

ENACWst – *Eastern North Atlantic Water* (Água central do nordeste Atlântico de origem subtropical).

FORTTRAN – *Mathematical Formula Translating System.*

GOTM – *General ocean turbulence model.*

HDF – *Hierarchical Data Format.*

HRU – Unidade de Resposta Hidrológica.

IET – *Instituto de Estudos do Território*

IST – Instituto Superior Técnico.

Maretec – *Marine and Environmental Technology Research Center.*

MOHID – Modelo Hidrodinâmico (*Hydrodynamic Model*).

NACW – *North Atlantic Central Water.*

PCOMS – *Portuguese Coast Operational Modelling System.*

SIG – Sistema de Informação Geográfica.

SWAT – *Soil water Assessment Tool.*

U.S. – *United States of America*

UTC – *Universal Time Coordinated* (Tempo Universal Coordenado).

WIBP – *Western Iberian Buoyant Plume.*

WRF – *Weather Research and Forecasting model.*

WXGEN – *Weather Generator Model.*

Capítulo 1. Introdução

A região da Galiza localiza-se a noroeste da Península Ibérica, sendo, caracterizada por ter uma morfologia singular. Ao longo da linha de costa encontram-se profundas reentrâncias com orientação SW-NE (sudoeste-nordeste), designadas rias, que são vales fluviais invadidos pelo mar e onde desaguam os vários rios da zona. As suas características naturais permitiram o desenvolvimento de um ecossistema de grande beleza e produtividade, o que permitiu um grande desenvolvimento socioeconómico da região, conseqüente de uma forte indústria ligada ao sector dos recursos marinhos (pesca, aquicultura) e conseqüentemente do sector turístico.

O favorecimento da biodiversidade das águas das rias está influenciado pelas condições meteorológicas da costa galega. A interação entre o oceano e a atmosfera é afetada pela presença do sistema de baixas - altas pressões do Atlântico Norte (CARRACEDO *et al.*, 2005), nomeadamente o movimento associado ao anticiclone dos Açores, repercute-se no campo de ventos que vão interferir na circulação da margem Ibérica. Quando o vento sopra ao largo da costa provoca um deslocamento das camadas superficiais das massas de água perpendicularmente à direção do vento, conhecido como transporte de *Ekman*. Este transporte é direcionado para a direita (esquerda), no Hemisfério Norte (Hemisfério Sul) devido a força de *Coriolis*¹. Se os ventos predominantes são de direção Norte-Sul, originam uma corrente superficial para o oceano aberto que é compensada por uma corrente de direção contrária que se gera em profundidade, este fenómeno é conhecido como afloramento costeiro ou *upwelling*². O ressurgimento das águas profundas enriquecidas com nutrientes, associado a luz do sol traduz-se num rápido crescimento das populações de fitoplâncton. A costa galega faz parte de um sistema importante de afloramento que se estende ao longo da costa este do Atlântico Norte desde aproximadamente 10° N até 44° N. Este tem sido objecto de vários estudos realizados por (WOOSTER *et al.*, 1976; FRAGA *et al.*, 1981; MCCLAIN *et al.*, 1986; BLANTON *et al.*, 1987; TILSTONE *et al.*, 1994).

A maior parte da população galega vive na zona costeira a qual fica por isso sujeita a uma considerável pressão antropogénica. Devido a situações contínuas de *stress* ambiental tornou-se imperativo o conhecimento detalhado dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nos estuários. Nos últimos anos várias agências e institutos de investigação desenvolveram metodologias para monitorizar e fazer previsões dos sistemas aquáticos,

¹ *Coriolis*: Força aparente devida à rotação da terra que se faz sentir quando se utiliza um referencial inercial fixo à superfície da terra e rodando com ela.

² *Upwelling*: Fenómeno oceanográfico que consiste na subida de águas profundas, muitas vezes ricas em nutrientes, para regiões menos profundas do oceano.

possibilitando de forma mais eficiente a mitigação dos impactos negativos assim como potenciar benefícios destas áreas. Neste contexto surge a hidroinformática, domínio que faz a integração de várias ferramentas como modelos matemáticos e tecnologias de informação contribuindo cada vez mais para uma gestão sustentável dos recursos hídricos, (ABBOT *et al.*, 1996). É um campo multidisciplinar que abrange três componentes principais: medidas, modelação e a divulgação de dados. A aquisição de medidas pelos satélites, boias, CTDs³, fornecem diretamente informação do ecossistema e podem-se utilizar para a calibração e validação dos modelos tornando estes mais precisos para simular o comportamento destes sistemas. Por outro lado é necessário um conjunto de ferramentas, para visualização, análise de resultados e dados e o acesso a estes de uma forma simples como por exemplo através dos sistemas de informação geográfica (SIG). Este tipo de abordagem vai permitir auxiliar nos processos de planeamento e no suporte à decisão em operações *offshore*, navegação, gestão costeira, atividades de turismo, poluição marinha, bem como em outras situações de emergência no mar, todas elas criticamente dependentes das condições oceanográficas e meteorológicas.

1.1. Objetivos da investigação

Devido à sua importância económica e dinâmica complexa, existe um interesse especial pela parte sul da costa galega, chamada Rias Baixas, na qual se encontra inserida a ria de Arousa. Esta zona é a maior produtora de bivalves da Europa, destacando-se o cultivo de mexilhões em cordas suspensas em plataformas flutuantes (*bateas*). O crescimento, qualidade e mortalidade dos bivalves não é só afetada por possíveis acidentes de poluição, mas também por grandes eventos de *run-off*⁴ que provocam grandes descidas de salinidade sazonais, (ÁLVAREZ-SALGADO *et al.*, 2003).

A qualidade da água na ria de Arousa é ainda afetada por esta servir como meio receptor das águas residuais provenientes das populações ribeirinhas, aumentando a pressão nas épocas estivais.

O presente estudo enquadra-se na área da modelação hidrodinâmica e hidrológica. Pretende-se conhecer o impacto das descargas de água doce na distribuição do gradiente de salinidade e temperatura da ria de Arousa. Neste contexto a tarefa de modelação tem como objectivo contribuir para a melhoria do sistema de modelação oceanográfico operacional já

³ CTD: *Conductivity-Temperature-Depth Instrument*

⁴ *Run-off* ou Escorrência superficial define o fluxo de água que ocorre na superfície do solo quando este se encontra saturado de humidade.

existente na ria de Arousa de forma a aumentar a sua capacidade de precisão, especialmente em situações de elevada descarga de água doce. Em consequência, os seus resultados possam por um lado dar suporte mais eficaz às entidades competentes relacionadas com a gestão costeira, por outro serem utilizados em outras aplicações de interesse para o estuário em diversas áreas como a biogeoquímica, modelos de bivalves e peixes ou de qualidade da água.

O sistema de modelação hidrodinâmico utilizado foi o MOHID (Modelo Hidrodinâmico), é um modelo baroclínico tridimensional desenvolvido pelo Maretec⁵ (*Marine and Environmental Technology Research Center*). A ferramenta hidrológica implementada foi o modelo SWAT (*Soil water Assessment Tool*), desenvolvido pelo U.S. *Agricultural Research Service*⁶ e a *Texas A&M University*⁷.

⁵ Maretec: *Marine & Environment Technology Center* Instituto Superior Técnico Secção de Ambiente e Energia - Dep. de Mecânica; Av. Rovisco Pais nº1, 1049-001 Lisboa - Portugal; Tel: +351 21 8419428; Fax: +351 21 8419423 – <http://www.maretec.org>

⁶ *Agricultural Research Service*: U.S. Department of Agriculture, 1400 Independence Ave., S.W. Washington, DC 20250, U.S – <http://www.ars.usda.gov>

⁷ *Texas A&M University*: College Station, TX 77843, U.S. – <http://www.tamu.edu/>

Capítulo 2. Caracterização da Área de Estudo – Ria de Arousa

As Rias Baixas são compostas por 4 rias, das quais faz parte a ria de Arousa, as restantes são a ria de Muros e Noia, a ria de Pontevedra e a ria de Vigo, todas elas com características oceanográficas (físicas e geológicas) similares. Têm a forma típica de V, ou seja à medida que nos aproximamos da plataforma ficam mais largas e profundas, o que favorece a troca de água com a plataforma continental adjacente.

A ria de Arousa é a maior e mais irregular das rias, situa-se entre as latitudes de 42,25° a 42,44° N e longitudes 8,66° a 8,93° W, Figura 2.1. Tem uma superfície de 230 Km², uma longitude 25 km e um volume de 4,34 Km³. A sua profundidade média é de 19 m e a máxima de 70 m. Tem numerosas ilhas das quais se destacam Sálvora, Arousa, Cortegada, A Toxa e várias enseadas que fazem com que os seus padrões de circulação sejam ainda mais complexos. Os principais afluentes são o rio Ulla, que desagua na cabeceira da ria e o rio Umia, que desagua na enseada do O Grove.

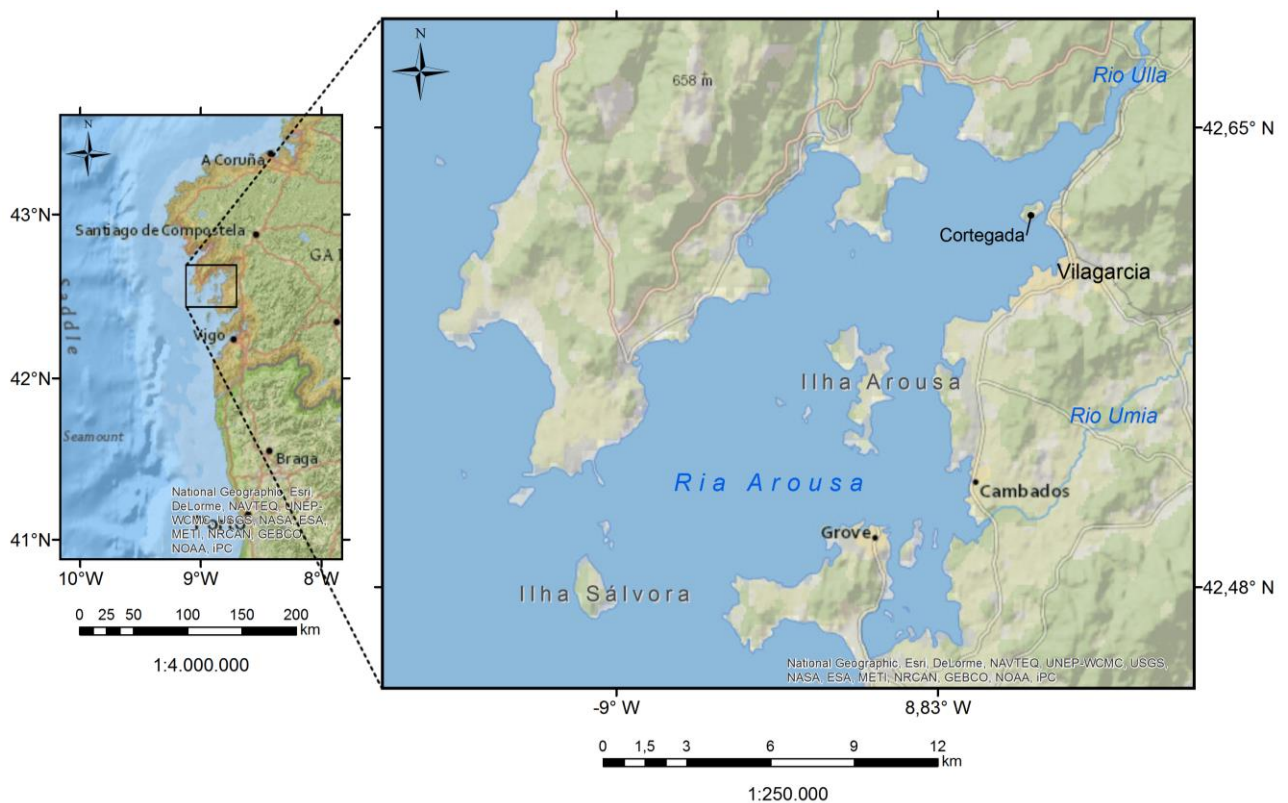


Figura 2.1: Localização geográfica da área de estudo - Ria de Arousa.

Dos pontos de vista dinâmico e geomorfológico, a ria pode ser dividida em 5 partes, segundo (OTTO *et al.*, 1997) em: uma zona correspondente ao estuário do rio Ulla; uma zona interna, localizada a Norte da ilha Arousa, uma central que abrange a enseada de Poboia do Caramiñal e a área a Oeste da ilha Arousa; a zona sudeste, que engloba a área pouco profunda a sul da ilha A Toxa e a área localizada a oeste da linha que liga o sul da ilha Arosa à península do O Grove; finalmente a zona oceânica que corresponde à região localizada a Nordeste da ilha Sálvora.

A maior parte da água que circula pela superfície da ria de Arousa é proveniente da água da plataforma adjacente, modificada pelas descargas de água doce e o aquecimento/arrefecimento em consequência das trocas de calor com a atmosfera. A circulação das massas de água na ria é devida por um lado, à corrente de maré e por outro pela corrente residual de frequência característica muito inferior à da maré e que é devida às descargas fluviais e aos ventos tanto locais como da plataforma.

Em cada zona da ria predomina um tipo diferente de circulação, a parte interna da ria, zona dos estuários dos rios Ulla e Umia, é dominada pelos ventos locais, as descargas fluviais e a maré. A circulação da zona externa é dominada pelos ventos que sopram na plataforma continental adjacente que promovem o intercâmbio de água com a ria. A zona média está sujeita a ambas as influências.

2.1. Aspectos gerais que influenciam a hidrodinâmica

2.1.1. Caracterização do estuário

Pelas suas propriedades, as rias galegas comportam-se como estuários, segundo (CAMERON & PRITCHARD *et al.*, 1963): um estuário é um corpo de água costeiro, semi-fechado, o qual possui uma ligação livre com o mar aberto e no interior do qual a água do mar se dilui de forma mensurável com água doce proveniente da drenagem terrestre. Esta definição exclui a maré, então (DYER *et al.*, 1997) propôs a seguinte: um estuário é um corpo de água costeiro, semi-fechado, o qual possui uma ligação livre com o mar aberto, estendendo-se o rio até o limite da influência da maré, sendo que em seu interior a água do mar se dilui de forma mensurável com água doce proveniente da drenagem terrestre.

Existem diversas classificações para os estuários, neste trabalho são consideradas as classificações de Pritchard (PRITCHARD *et al.*, 1952), que distingue estuários positivos ou negativos, consoante a descarga fluvial excede a evaporação, ou o contrário.

Cameron e Pritchard (CAMERON & PRITCHARD *et al.*, 1963) classificam os estuários em quatro tipos:

- **Cunha salina** - a circulação é dominada pelo fluxo de água doce proveniente do rio e as marés têm uma importância secundária. Existe uma interface bem diferenciada entre a água doce e salgada. A massa de água salgada na embocadura do estuário diminui à medida que a profundidade do canal diminui, formando assim a característica cunha salina. A ponta da cunha move-se para dentro ou para fora do estuário de acordo com a intensidade das forças atuantes. Caracteriza-se por uma forte estratificação.
- **Fiordes** – com características similares aos de cunha salina, mas com a haloclina situada a grandes profundidades. A água doce, mantém-se numa camada da superfície, movimentando-se admitindo pouca mistura com as camadas subjacentes de água salgada.
- **Parcialmente misturado** - as correntes de maré estão presentes e o fluxo do rio não domina a circulação. A mistura causada pelas marés faz com que a haloclina seja mais difusa, aumentando a influência da água doce nas camadas inferiores do estuário.
- **Homogêneos ou bem misturados** - as velocidades de correntes de maré e o fluxo do rio são fortes o suficiente para romper completamente a estratificação de salinidade, o perfil vertical é homogêneo. A salinidade, entretanto pode variar lateralmente.

A água que flui pela parte superficial do estuário é proveniente da descarga de água doce dos rios, pela sua menor densidade permanece nas camadas superiores e vai-se misturando a medida que avança para a embocadura. Este deslocamento é compensado pela entrada de água salgada do oceano pelo fundo. Observa-se um padrão de circulação em dupla camada, a água entra através das camadas profundas e sai pelas camadas superficiais, (OTTO *et al.*, 1975; FRAGA & MARGALEF *et al.*, 1979; PREGO & FRAGA *et al.*, 1992), este tipo de movimento das massas de água é conhecido como circulação estuarina positiva, Figura 2.2.

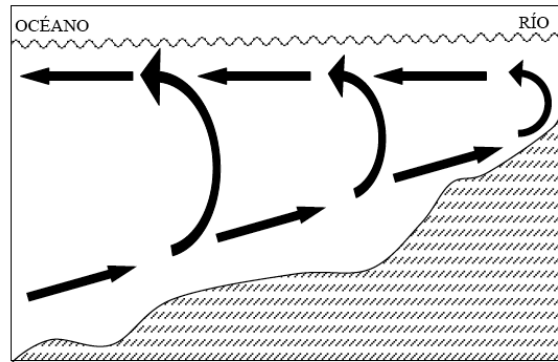


Figura 2.2: Esquema da circulação estuarina positiva.

A ria de Arousa, de forma semelhante às outras rias, geralmente é classificada como um estuário positivo, parcialmente misturado e com circulação residual em dupla camada.

2.1.2. Circulação residual, campos de densidade

A circulação residual é determinada pelas diferenças de densidade que ocorrem entre a ria e a sua fronteira com o oceano, assim como pelo vento. Esta circulação resulta da dinâmica produzida pela variação semanal ou sazonal da temperatura e salinidade, e que filtra os movimentos de alta frequência (maré). Dependendo da época do ano e das suas condições meteorológicas, a estratificação da coluna de água é determinada pela salinidade ou pela temperatura.

Durante o Verão, a dinâmica da ria é controlada maioritariamente pela troca de água com o oceano induzida pelo vento, tendo uma menor importância as trocas de calor com a atmosfera e as descargas fluviais, (ROSÓN, *et al.*, 1997). Ou seja apesar da radiação solar provocar um aumento da temperatura nas camadas superficiais, os eventos de afloramento de águas mais frias são mais relevantes e acabam por provocar um decréscimo na temperatura da água superficial.

De novembro a março, devido a intensas precipitações e às descargas de água doce, a estratificação da coluna de água é mantida pela salinidade. A água doce vai diminuir a densidade da camada superficial, proporcionando a entrada de água do oceano pelo fundo o que faz com que a salinidade nas camadas do fundo aumente, (circulação positiva). As diferenças de densidade na camada superficial, na embocadura da ria, além de dependerem da pluma de água doce, também dependem da direção do vento costeiro, por exemplo, durante episódios de vento predominante de SW, pode inverter a circulação e em ocasiões provocar bloqueios na embocadura, retendo a água no interior da ria, (ROSÓN, *et al.*, 1997). Quando o

vento muda de direção para NE promove a saída da água da camada superficial, o que associado a eventos de *upwelling*², reforça a circulação positiva permitindo a renovação das águas da ria, (ALVAREZ-SALGADO *et al.*, 2000). O tempo de residência da água da ria de Arousa pode variar de uns dias até um mês, dependendo das descargas dos rios e da intensidade do *upwelling*², (OTTO *et al.*, 1975).

2.1.3. Massas de água costeira em frente à ria de Arousa

Dada a sua importância, os padrões de circulação da margem Ibérica têm sido profundamente estudados e descritos em muitas publicações, (FIÚZA *et al.*, 1998). A produtividade das rias galegas está associada a esta circulação, originada pelas características das massas de água presentes na coluna de água e a sua interação com o vento. O conhecimento da coluna de água da plataforma adjacente é essencial para compreender as diferenças de densidade dentro da ria. Para profundidades a partir dos 1500 m surge a água Profunda Norte Atlântica, caracterizada por possuir temperaturas inferiores a 4°C e salinidades relativamente baixas, 34.9 psu. Por volta dos 1000 m surge a água mediterrânea distinguida por salinidades (35.8 - 37.5) psu e temperaturas relativamente altas, de aproximadamente 13°C. Entre os 900 m e 600 a 400 m a água do mediterrâneo encontra-se misturada com a água central do Atlântico norte (NACW - *North Atlantic Central Water*). Esta massa de água em frente às rias, é conhecida como água central do nordeste Atlântico de origem subtropical (ENACWst), caracterizada pelas suas águas frias e ricas em nutrientes (RÍOS *et al.*, 1992; CASTRO *et al.*, 1994). Por último, a água superficial inclui a camada de mistura e a termoclina sazonal. Esta camada encontra-se condicionada pelas condições meteorológicas, as suas correntes são forçadas diretamente pelo vento. As variabilidades destas correntes em geral estão restringidas a dois períodos, Verão e Inverno. De maio a setembro, existe uma corrente superficial para o sul, chamada corrente de Portugal, associada a ventos do quadrante norte, dá-se o fenómeno de afloramento (*upwelling*), Figura 2.3. Desde o final do Verão até ao de Inverno, os ventos passam a ser de sul e sudoeste, reforçando uma corrente para norte de água mais quente e salina, sendo esta época favorável a episódios de *downwelling*, (BLANTON *et al.*, 1984).

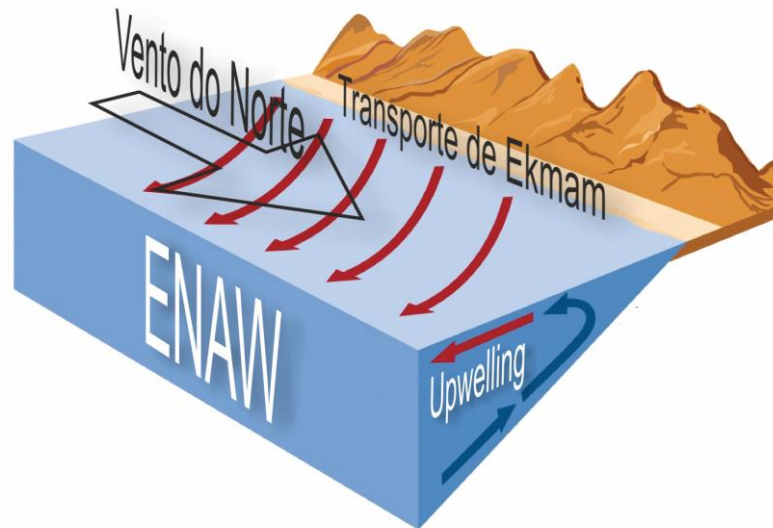


Figura 2.3: Esquema de upwelling² que se proporciona na costa Galega.

2.1.4. Condições meteorológicas

A distribuição dos centros de pressões atmosféricas desempenha um papel fundamental na climatologia da zona, em geral são duas as situações sinópticas mais frequentes. No Inverno, o anticiclone dos Açores costuma situar-se a noroeste da costa Africana e do ciclone da Islândia, esta situação vai favorecer ventos de SW, provocando um empilhamento de água junto à costa e o afundamento das águas superficiais (*downwelling*). Os ventos deste quadrante introduzem também massas de ar húmido que quando chegam às barreiras orográficas da região dão origem a precipitação. Nos meses de Verão, o fortalecimento do anticiclone dos Açores e o seu deslocamento para NW, estimula ventos de componente norte, provocando uma divergência junto à costa o que origina o ressurgimento das águas mais profundas e mais frias, (BLANTON *et al.*, 1987).

De salientar que este comportamento é um padrão geral, pois em qualquer estação do ano podem ser observados tanto ventos do quadrante norte como de sul (OTERO *et al.*, 2008, 2009).

No interior da ria, os ventos são canalizados pelo seu eixo principal e ficam afetados pela orografia circundante que faz atenuar a sua intensidade.

2.1.5. Caudais fluviais

Os caudais de água doce que afluem à ria provocam gradientes de densidade responsáveis por alterações à circulação produzida pela ação da maré e do vento. Estas descargas têm ainda influência na distribuição espacial da salinidade e da temperatura. A ria

de Arousa possui uma bacia hidrográfica (Figura 2.1) de aproximadamente 3415 Km², que contém duas importantes bacias fluviais correspondentes ao rio Ulla e Umia. A do rio Ulla, a maior, situada na cabeceira da ria tem uma extensão 2803.67 km² e a do rio Umia, na sua margem esquerda, de 446.2 km². Na sua margem direita destacam-se ainda, mas de menor dimensão as bacias dos rios Barbanza, Coroño, Beluso e Te, e na margem esquerda as dos rios Chanca e Con. Os principais rios que influenciam a salinidade da ria de Arousa são os rios Ulla e Umia, no entanto os rios secundários podem adquirir importância em eventos de grande precipitação.

A fronteira oceânica adquire também importância do ponto de vista das descargas fluviais uma vez que ao longo da costa galega, vários rios, da região galega e portuguesa, nomeadamente o Douro e o Minho, contribuem para a formação de uma extensa pluma, chamada WIBP - *Western Iberian Buoyant Plume*, (PELIZ *et al.*, 2002). Esta pluma aparece principalmente nos meses de Outono e Inverno, associada a grandes precipitações. Tipicamente as suas dimensões são de 10-40 km de extensão e menos de 40 m de largura, (SANTOS *et al.*, 2004; TORRES & BARTON *et al.*, 2007; OTERO *et al.*, 2008, 2009). Os ventos do quadrante sul fazem com que esta pluma fique confinada na costa, com direção norte, afetando a densidade nas embocaduras das rias. Quando as descargas de água doce diminuem, esta pluma desaparece, uma situação frequente nos meses de Primavera e Verão, (OTERO *et al.*, 2008, 2009).

Na Tabela 2.1, encontra-se o caudal médio histórico dos principais rios que têm influência nas rias galegas, e na Figura 4.4 a sua localização.

Tabela 2.1: Caudal médio em m³/s, dos principais rios da costa galega e norte de Portugal.

Rios	Caudal (m³/s)
Douro	650
Minho	479
Verdugo	23
Lerez	20
Umia	26
Ulla	92
Tambre	60

Fonte: Augas de Galicia⁸.

⁸Augas de Galicia: Xunta de Galicia - Consellería de medio ambiente; Tel:+34 981 54 45 51; email: augasdegalicia@xunta.es – <http://augasdegalicia.xunta.es/>

2.1.6. Marés

Para se fazer a caracterização da maré é necessário conhecer as suas componentes harmónicas, Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Principais componentes harmónicas da maré obtidas no porto de Vilagarcía.

Constituintes	Amplitude (cm)	Fase (graus)
Z0	216,86	0,00
SSA	6,35	164,07
MSM	2,46	275,16
MM	2,69	221,28
MF	2,39	130,12
Q1	1,59	261,70
O1	6,53	319,47
P1	2,23	52,75
K1	7,21	63,19
2N2	2,80	40,17
MU2	4,00	37,39
N2	24,00	60,15
NU2	4,34	63,81
M2	113,86	79,18
L2	2,96	86,68
S2	39,73	109,01
K2	11,21	105,71
M4	0,83	241,90

Fonte: Puertos del Estado⁹.

A partir destas harmónicas pode-se conhecer o carácter diurno, semidiurno, ou misto da maré através do coeficiente de forma F (KJERFVE & KNOPPERS, *et al* 1991), que relaciona as amplitudes das principais componentes diurnas (K_1 e O_1) e semidiurnas (M_2 e S_2):

$$F = \frac{K1 + O1}{M2 + S2} \quad (1)$$

Segundo o valor de F classifica-se:

- a) Semidiurno caso $F < 0,25$
- b) Misto caso $0,25 < F < 3$
- c) Diurno caso $F > 3$

⁹ Puertos del Estado – Oficina de Información; Avda. del Partenón, 10-28042 Madrid – España; Tel: +34 915245500; Fax: +34 915245501– <http://www.puertos.es/>

Para a ria de Arousa obteve-se um $F = 0,09$, ou seja, $F < 0,25$. A sua maré possui por isso um carácter marcadamente semidiurno, com o qual existem duas baixa-mar e preia-mar ao longo do dia.

As características dos estuários como a profundidade, largura, atrito e as descargas do rio, deformam as ondas de maré que se propagam ao longo destes. Uma forma de caracterizar a distorção da onda de maré dentro do estuário é relacionar as componentes M2 e M4 ($M4/M2$), que nos permite ver a intensidade da distorção. De modo similar a diferença entre as fases da M2 e M4 indicam a direção da distorção.

Tabela 2.3. A fase relativa é dada pela equação (2):

$$\Delta = \phi_{M_4} - 2\phi_{M_2} \quad (2)$$

Tabela 2.3: Distorção barotrópica da maré em função da sua fase relativa

<i>Fase relativa</i>	<i>Tipo de distorção</i>
$\Delta = 0$	Enchente dominante: enchentes curtas e com velocidades elevadas, vazantes lentas, inversão de maré com a mesma duração em preia-mar e em baixa-mar.
$\Delta = \pi/2$	Velocidades semelhantes em enchente e em vazante, inversão de maré mais demorada em preia-mar
$\Delta = \pi$	Vazante Dominante: vazantes curtas e com velocidades elevadas; enchentes lentas, inversão de maré com a mesma duração em preia-mar e em baixa-mar.
$\Delta = 3\pi/2$	Velocidades semelhantes em enchente e em vazante, inversão de maré mais demorada em baixa-mar

Para o estuário de Arousa obteve-se $M4/M2 = 0,0073$ e $\Delta = 83,5^\circ$, significando que a distorção da onda é pequena e que as enchentes são mais lentas que as vazantes.

Segundo a amplitude da onda de maré os estuários podem ainda ser classificados de microtidais se a amplitude média é menor que 2 m, mesotidais, se esta se situa entre 2 a 4 m, ou macrotidais para amplitudes maiores que 4 m. A amplitude da onda de maré, tendo como referência o zero do porto, em média na ria é de 2 m, podendo atingir em marés vivas os 4 m, e em marés mortas 2,7 m, Figura 2.4.

Pode-se por isso caracterizar a maré da ria de Arousa como sendo tipo semidiurno, mesomareal, e com um período médio de 12,4 h.

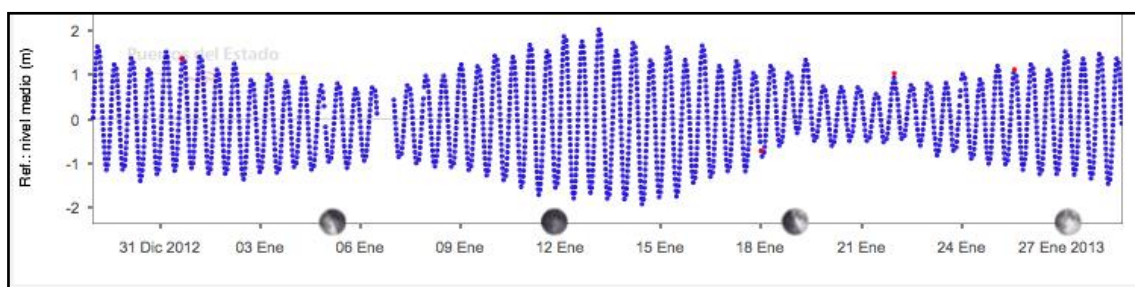


Figura 2.4: Série do nível do mar (m) do marégrafo do porto de Vilagarcía (ria de Arousa).

Fonte: Puertos del Estado⁹.

Capítulo 3. Metodologia

Neste capítulo são descritas as ferramentas numéricas aplicadas a este caso de estudo, o modelo hidrodinâmico MOHID (*Water Modeling System*) e o modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*).

Para ambos os modelos descrevem-se em detalhe os principais módulos utilizados neste trabalho.

3.1. Descrição geral do sistema de modelos MOHID

O sistema de modelos MOHID é um modelo computacional com capacidade para utilização em modelação operacional. Representa mais de 27 anos de conhecimento científico aplicado. Foi resultado da parceria entre centro de investigação Maretec⁵ do Instituto Superior Técnico¹⁰, a Escola de Engenharia da Universidade de Lisboa, em cooperação próxima com a empresa Hidromod Lda¹¹.

Atualmente o desenvolvimento do MOHID é coordenado por Ramiro Neves¹², Frank Braunschweig¹³ e Paulo Leitão¹⁴, conta também com uma equipa permanente de investigadores responsáveis pela manutenção dos conceitos presentes nos modelos, e da sua validação e operacionalidade, (MOHID¹⁵).

A atual versão do MOHID encontra-se implementada em ANSI FORTRAN 95, com recurso ao método de programação orientada por objetos. A utilização desta técnica de programação aliada à escolha de uma linguagem de programação otimizada para cálculo matemático permitiu aumentar a robustez e fiabilidade geral dos sistemas (DECYK, *et al* 1997; MIRANDA, *et al.*, 2000; LEITÃO *et al.* 2003). A subdivisão do sistema em módulos assim como a utilização de fluxos de informação pré-definidos para a comunicação entre estes, permitiu uma melhor proteção a eventuais erros de programação, facilitou a otimização e atualização de funcionalidades existentes assim como o desenvolvimento e incorporação de novas

¹⁰ IST - Instituto Superior Técnico: Avenida Rovisco Pais, 1 — 1049-001 Lisboa— Portugal; Tel: +351 218 417 000; Fax: +351) 218 499 242; — <http://www.ist.utl.pt/>

¹¹ Hidromod, Lda: Rua Rui Teles Palhinha, n.º 4, 1.º 2740-278, Porto Salvo – Portugal; Tel: +351 218 486 013; Fax: +351 218 484 621; email: hidromod@hidromod.com — <http://www.hidromod.pt/>

¹² PhD, Prof./Instituto Superior Técnico, ramiro.neves@ist.utl.pt

¹³ Master, Researcher/Instituto Superior Técnico, frank.maretec@ist.utl.pt

¹⁴ PhD, Hidromod, Taguspark, Núcleo Central, 363, 2780-920 Oeiras, pchambel.hidromod@taguspark.pt

¹⁵ Fonte: “DESCRIÇÃO do MOHID MARETEC Instituto Superior Técnico Universidade Técnica de Lisboa” – ISBN: 978-85-99968-20-8

funcionalidades ao sistema. Atualmente, o sistema MOHID encontra-se dividido em três grandes grupos de aplicações¹⁶, divididos pelas seguintes áreas de estudo científico:

- *MOHID Water*: é um modelo numérico tridimensional que permite a simulação dos processos hidrodinâmicos, fenómenos de dispersão (abordagens lagrangeana e euleriana), transporte de sedimentos, qualidade da água / processos biogeoquímicos na coluna de água e trocas com o fundo (FERNANDES, *et al.*, 2005).
- *MOHID Land*: é um modelo numérico que simula o fluxo de água em bacias hidrográficas e aquíferos.
- *MOHID Soil*: é um modelo que simula o fluxo de água através de meios porosos.

O conjunto de aplicações: *Water*, *Land* e *Soil* são componentes de alto nível do *framework*¹⁷ utilizado pelo MOHID. O *framework*¹⁷ encontra-se estruturado segundo 3 tipos de componentes: executáveis, bibliotecas e módulos, estes encontram-se hierarquicamente ligados e organizados da forma indicada na Figura 3.1.

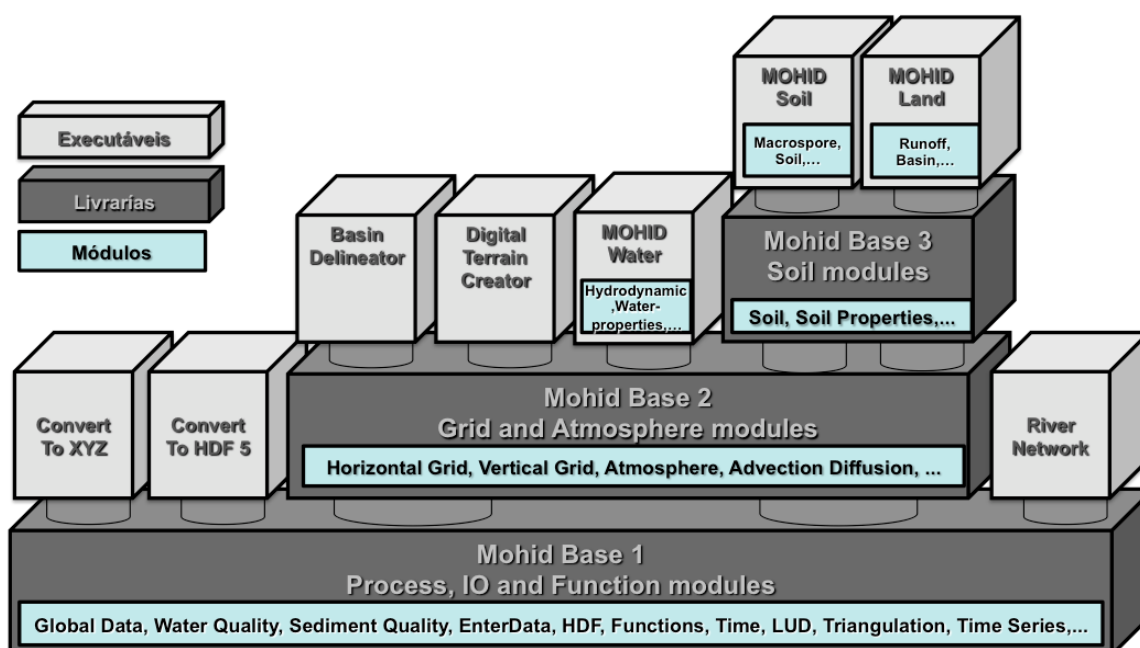


Figura 3.1: Estrutura hierarquizada do *framework*¹⁷ adoptada pelo MOHID.

Fonte: Adaptado da Fig. 2. “*Hierarchical structure of the MOHID framework*” presente no livro - An advanced modelling tool for simulating complex river systems.¹⁸

¹⁶ Fonte: <http://www.mohid.com/HowItWorks.htm>

¹⁷ *framework*: Estrutura formada por blocos pré-fabricados de *software* que os programadores podem usar, estender ou adaptar para uma solução específica. (DECYK et al., 1997)

¹⁸ “An advanced modelling tool for simulating complex river systems. Science of the Total Environment. Vol 407(8): 3004-3016”

Sendo que:

- **Executáveis:** são os programas que permitem ao utilizador final a utilização do sistema de modelos. As aplicações *MOHID Water, Land e Soil* são considerados executáveis, pois utilizam um conjunto de módulos específicos organizados sobre a forma de bibliotecas.
- **Bibliotecas de módulos:** é uma forma simplificada de distribuição de módulos, com um determinado nível de dependência entre si ou que permitem aceder a um conjunto de funcionalidades comuns a uma determinada área.
- **Módulo:** são os elementos de baixo nível responsável por processar uma tarefa muito específica que se encontram ligados entre si e a outros componentes do *framework*¹⁷ através de método de comunicação normalizado e pré-definido.

Os executáveis no sistema MOHID são considerados os únicos componentes de alto nível que “encaixam” em cima dos módulos, disponibilizando um conjunto de ferramentas utilitárias que permitem ao utilizador proceder a operações de pré e pós-processamento. Os dados são enviados a alto nível pelos executáveis, de seguida são processados a baixo nível pelos módulos, que posteriormente devolvem os resultados aos executáveis que apresentam os dados ao utilizador final.

Os módulos são os componentes de baixo nível no *framework*¹⁷ do MOHID, dividindo-se pelo tipo de processo simulado existem, porém módulos responsáveis por tarefas menos visíveis mas necessárias para os processos de processamento de dados e obtenção de resultados. Os módulos responsáveis por este tipo de tarefas encontra-se maioritariamente reunidos na livreria de módulos MOHID Base 1 e MOHID Base 2.

3.2. Principais módulos do modelo MOHID

Os principais módulos que vão ser utilizados neste trabalho são apresentados na, Tabela 3.1, onde também se indica a funcionalidade que cada um tem dentro do sistema MOHID:

Tabela 3.1: Lista dos principais módulos utilizados do MOHID.

<i>Nome</i>	<i>Descrição</i>
<i>Model (Modelo)</i>	Módulo de topo na arquitetura do MOHID, controlando o fluxo da informação entre os módulos de alto nível, o progresso da simulação, o arranque e finalização da mesma.
<i>Hydrodynamic (Hidrodinâmica)</i>	Módulo hidrodinâmico tridimensional baroclínico 3D: calcula o nível de água, as velocidades e os fluxos.

<i>Water Properties - Eulerian Transport (Propriedades da água - Transporte Euleriano)</i>	Módulo de transporte de Euleriano: controla a evolução das propriedades da água (temperatura, salinidade, oxigênio, etc.) usando uma aproximação euleriana.
<i>Turbulence (Turbulência)</i>	Módulo unidimensional de turbulência vertical: utiliza a formulação do modelo GOTM ¹⁹ .
<i>Geometry (Geometria)</i>	Guarda e atualiza a informação sobre os volumes finitos.
<i>Atmosphere (Atmosférico)</i>	Condições atmosféricas.
<i>InterfaceWaterAir (Interface água ar)</i>	Condições entre a atmosfera e a coluna de água à superfície.
<i>InterfaceSedimentWater (Interface água sedimentos)</i>	Condições de fundo.
<i>Discharges (Descargas)</i>	Descargas de água com origens em rios ou em atividades antropogénicas.

Fonte: Adaptado da “Tabela 1-1: Principais módulos do modelo MOHID”, presente no livro “MOHID DESCRIÇÃO do MOHID”, Maretec⁵ & Instituto Superior Técnico & Universidade Técnica de Lisboa, ISBN 978-85-99968-20-8.

A forma de funcionamento, acima descrito, em conjunto com a utilização de uma arquitetura modular ao MOHID a importante funcionalidade de encaixar submodelos, permitindo, desta forma, o estudo de áreas restritas da região de estudo com uma maior discretização espacial. A comunicação entre o modelo (modelo-pai) e os submodelos (modelos-filhos) é feita em um único sentido, através das condições de fronteira fornecidas. O número de submodelos suportados pelo MOHID é ilimitado, dependendo unicamente da capacidade computacional disponível, (LEITÃO *et al.*, 2003).

3.3. MOHID *Water*

O MOHID *Water* é um modelo baroclínico tridimensional integrado no sistema de modelos MOHID (Figura 3.1), que tem como objetivo a modelação do meio marinho. Este permite o cálculo da evolução das propriedades da água através da simulação dos processos hidrodinâmicos, fenómenos de dispersão (abordagens lagrangeana e euleriana), transporte de sedimentos, qualidade da água, processos biogeoquímicos na coluna de água e trocas com o fundo, (FERNANDES, *et al.*, 2005). O MOHID *Water* é constituído pelos seguintes módulos acoplados, Figura 3.2.

¹⁹ GOTM: “Generic Ocean Turbulence Model” – <http://www.gotm.net/>

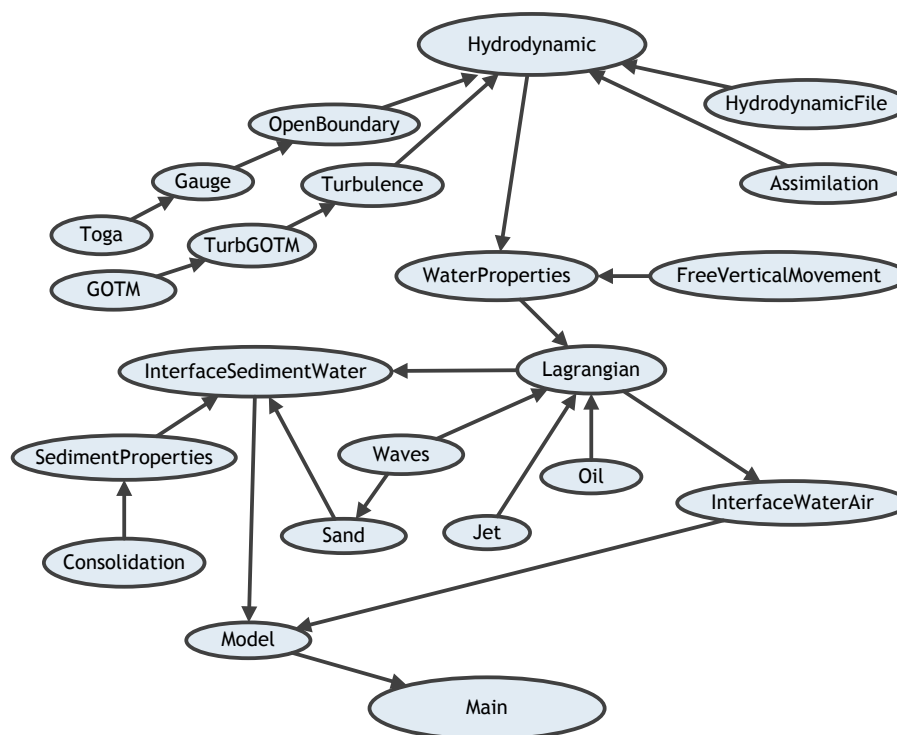


Figura 3.2: Hierarquias e dependências entre os módulos utilizados pelo MOHID *Water*.

Fonte: Adaptado de: http://www.mohid.com/wiki/images/2/25/20060803_DAG_MohidWater.png

A diversidade de módulos disponibilizados no MOHID confere-lhe a versatilidade necessária para ser aplicado em diferentes áreas de interesse científico, como por exemplo, no estudo de várias regiões aquáticas tais como: estuários, zonas costeiras, oceanos, lagos, *etc.*

O funcionamento do modelo MOHID *Water* encontra-se dividido em três fases²⁰:

- **Pré-processamento** (*Pre-processing*): tarefas associadas aquisição, fornecimento e validação de dados iniciais, escolha de módulos e configuração de condições iniciais.
- **Execução** (*Execution of the model*): processamento computacional dos modelos matemáticos incluídos em cada módulo.
- **Pós-processamento** (*Post-processing*): apresentação de resultados do modelo, sobre a forma de séries temporais de valores obtidos para determinados pontos da malha e resultados na forma matricial, usando o *Hierarchical Data Format* (HDF).

²⁰ Fonte: <http://www.mohid.com/HowItWorks.htm>

Em geral o MOHID *Water* pode ser dividido em duas classes:

- As propriedades hidrodinâmicas (ex: velocidade, elevação, fluxos de água, viscosidade turbulenta, difusividade, energia cinética turbulenta, comprimentos de mistura). A evolução das propriedades é calculada num referencial euleriano pelo método dos volumes finitos.
- A evolução das propriedades da água (ex: salinidade, temperatura, concentração de sedimentos, parâmetros de qualidade). São calculadas num referencial euleriano pelo método dos volumes finitos, outras num referencial lagrangeano.

O modelo baseia-se no conceito de volume finito, as equações são aplicadas a cada volume de controlo, que constitui uma célula da malha sob forma de um fluxo divergente, garantindo-se assim a conservação no transporte das propriedades (ADCROFT *et al.*, 1997).

3.4. Descrição dos Módulos usados neste estudo

3.4.1. Módulo Hidrodinâmico

O módulo hidrodinâmico tem como objectivo simular a evolução das propriedades do escoamento. Para isso resolve as equações primitivas baseadas nas equações de Navier-Stokes, para escoamentos incompressíveis, considerando as aproximações de Boussinesq e hidrostática. A discretização espacial destas equações é feita utilizando uma técnica de volumes finitos a qual permite a utilização de um sistema de coordenadas verticais genérico, tornando o modelo independente da discretização vertical (MARTINS *et al.*, 2001). A discretização temporal é baseada na utilização de um esquema semi-implícito e é incorporado um esquema de turbulência baseado no modelo GOTM¹⁹ (*General Ocean Turbulence Model*). O modelo possibilita ainda a utilização de condições de fronteiras abertas ou fechadas, sendo que para o 1º cenário as fronteiras podem ser do tipo imposto, radiativas ou um misto dos dois tipos.

3.4.2. Equações resolvidas

O transporte de uma propriedade genérica P é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V P dV = - \oint_A \vec{F} \cdot d\vec{A} + FPA \text{ (Fontes - poços)} \quad (3)$$

Onde, A é a superfície que define a fronteira do volume controle V , onde o integral de superfície de \vec{F} corresponde ao fluxo de propriedade P através de A .

O módulo hidrodinâmico tem como objectivo simular a evolução das propriedades do escoamento. As velocidades segundo x e y (horizontais) são umas dessas propriedades, as quais são calculadas com base na equação (3).

As forças de pressão e as forças viscosas são exercidas sobre a superfície fronteira do volume de controlo e resultam da interação deste com o meio envolvente. As forças de pressão são normais à superfície de fronteira ($-\oint_A p \cdot \vec{n} dA$) enquanto que as forças viscosas ($\oint_A \vec{\tau} dA$) podem ser subdivididas em tangenciais e normais.

No que diz respeito às forças viscosas tangenciais é necessário definir condições de fronteira no fundo e à superfície. No fundo é utilizada uma lei quadrática em que a tensão de corte é igual ao coeficiente de Chezy multiplicado pelo quadrado da velocidade. Na superfície, caso um dos agentes forçadores seja o vento, a tensão de corte é a tensão de corte do vento caso contrário o seu valor é nulo.

Quando a propriedade P é a massa específica ρ , a equação (3), torna-se na equação de conservação de massa bidimensional:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV = - \oint_A \rho \vec{v} \cdot d\vec{n} + \text{Descargas} + \text{Precipitação} - \text{Evaporação} \quad (4)$$

Ao contrário da equação anterior em que a propriedade transportada era a incógnita, aqui a propriedade ρ é conhecida e a incógnita é o próprio volume de controlo. Uma vez que se trata de uma abordagem tridimensional é ainda necessário especificar uma equação para o cálculo da velocidade vertical, a qual é obtida a partir da equação de conservação de massa anteriormente descrita admitindo a hipótese hidrostática. Outra propriedade fundamental a ter em consideração é o nível da superfície livre cuja evolução é calculada com base na equação (4) admitindo que o meio é bidimensional.

3.4.2.1. Principais aproximações

A equação (3) aplicada à conservação de quantidade de movimento é válida para um referencial fixo. Num entanto, a Terra encontra-se em permanente rotação, sendo o efeito desta rotação sobre o escoamento usualmente contabilizado na forma de uma força inercial denominada de força de *Coriolis*¹, (FERNANDES, R. M *et al.*, 2001).

Uma das aproximações frequentemente utilizada na aplicação da lei de conservação de quantidade de movimento a escoamentos oceânicos e costeiros é a aproximação de Boussinesq. Esta explora o facto das variações de densidade da água nos oceanos e águas costeiras serem muito pequenas, menos de 3%. Neste caso permite considerar a densidade constante para o cálculo sua massa e forças de inércia, excepto para as forças que são função da aceleração da gravidade.

Tendo em conta que no oceano e em águas costeiras as escalas na direcção vertical são pequenas e que as acelerações verticais são baixas, o fluido no que diz respeito aos movimentos verticais comporta-se como se estivesse em equilíbrio estático. Nestas condições é válido assumir-se a hipótese hidrostática, em que se desprezam todos os termos de inércia e considera-se que o gradiente de pressão vertical está em equilíbrio com a força da gravidade. A pressão, no caso da hipótese hidrostática, é então apenas função da profundidade e do gradiente vertical de densidade.

Na discretização do termo de pressão optou-se pela divisão deste numa componente barotrópica e outra baroclínica. A primeira contabiliza o efeito do gradiente de nível sobre a pressão, enquanto a segunda contabiliza o efeito do gradiente de densidade. Esta divisão permite correlacionar directamente a variação da superfície livre com a pressão (barotrópica). Desta forma a superfície livre pode ser utilizada para calcular o volume de controlo e simultaneamente servir como estimativa da pressão barotrópica. Por outro lado, podem-se aplicar métodos numéricos diferentes a cada um dos termos.

A consideração das aproximações à lei de conservação de quantidade de movimento, apresentadas anteriormente, dá origem à seguinte equação:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \vec{v} \, dV = - \oint_A (\vec{v} \cdot \vec{v}) \, d\vec{n} + \oint_A v_T \frac{\partial(\vec{v})}{\partial n} \, d\vec{n} - g \oint_A (\eta - z) \cdot d\vec{n}_x$$

Força barotrópica segundo x

$$\begin{aligned}
& -g \oint_A \left(\int_z^n \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} dz \right) \cdot d\vec{n}_x - g \oint_A (\eta - z) \cdot d\vec{n}_y - g \oint_A \left(\int_z^n \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} dz \right) \cdot d\vec{n}_y \\
& \text{Força baroclínica segundo } x \qquad \text{Força barotrópica } y \qquad \text{Força baroclínica } y \\
& - \oint_A p_{atm} \cdot d\vec{n}_x - \oint_A p_{atm} \cdot d\vec{n}_y + \int_V 2\vec{\Omega} \times \vec{v} dV + \text{Potencial de Maré} \\
& \text{Pressão atmosférica } x \qquad \text{Pressão atmosférica } y \qquad \text{Força de Coriolis}
\end{aligned} \tag{5}$$

Onde, ρ é a massa volúmica, ρ_0 é a massa volúmica de referência, \vec{v} é o vector da velocidade 3D do escoamento, $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ é o vector normal à superfície fronteira (A) do volume de controle (V), Ω é a velocidade angular, η á cota da superfície livre, z é a profundidade, ν_T a viscosidade turbulenta e p_{atm} a pressão atmosférica.

O módulo hidrodinâmico resolve assim a equação de conservação de quantidade de movimento tridimensional equação (5) para calcular as componentes horizontais da velocidade e uma equação de conservação de massa equação (4), para cada camada, que são depois integradas na vertical, para calcular a variação da superfície livre. Finalmente resolve mais uma vez a equação (4), agora para um meio tridimensional, para calcular a velocidade vertical do escoamento. Considerando estas aproximações, em um sistema de coordenadas cartesiano, as equações resolvidas do transporte da quantidade de movimento e da continuidade são:

$$\partial_t u = -\partial_x(uu) - \partial_y(uv) - \partial_z(uw) + fv - \frac{1}{\rho_0} \partial_x P + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) \tag{6}$$

$$\partial_t v = -\partial_x(uv) - \partial_y(vv) - \partial_z(vw) + fu - \frac{1}{\rho_0} \partial_x P + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) \tag{7}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho g = 0 \tag{8}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{9}$$

Onde, u , v , w são as componentes da velocidade e x , y , z as respectivas direções, ν_H é a viscosidade cinemática turbulenta horizontal, ν_V é a viscosidade cinemática turbulenta vertical, f a força de *Coriolis*¹, P a pressão e ρ a densidade da água.

3.4.3. Módulo de turbulência

O módulo de turbulência tem por objectivo fornecer as seguintes informações aos outros módulos: energia cinética turbulenta, comprimento de mistura, viscosidades horizontais e verticais e difusidades. Para calcular estes resultados este pode recorrer a modelos empíricos, para o cálculo da viscosidade turbulenta. O MOHID disponibiliza também o uso do sistema externo GOTM¹⁹ (*General Ocean Turbulence Model*), que inclui um conjunto de diferentes modelos para a descrição das trocas turbulentas nas camadas de mistura incluindo equações para a energia cinética turbulenta e para o comprimento de mistura.

A integração temporal da equação (5) permite escrevê-la em termos de valores médios surgindo, devido aos efeitos não lineares, termos adicionais (tensores de Reynolds). Estes termos representam a contribuição do transporte turbulento para o campo médio e podem ser vistos como o transporte das flutuações do campo variável em estudo pelas flutuações do campo da velocidade.

As escalas normalmente resolvidas pelos modelos hidrodinâmicos são da ordem dos metros, a que corresponde uma viscosidade turbulenta várias ordens de grandeza superiores à viscosidade molecular, pelo que as forças viscosas podem ser consideradas desprezáveis.

3.4.4. Módulo de propriedades da água - transporte Euleriano

O módulo das propriedades de água coordena toda a evolução das propriedades na coluna de água, sob uma abordagem eulereana. A evolução das propriedades depende dos transportes advectivo e difusivo, das condições de fronteira e das fontes e poços do módulo da qualidade de água.

O MOHID tem 24 propriedades diferentes implementadas, tais como: temperatura, salinidade, fitoplâncton, zooplâncton, fósforo orgânico particulado, fósforo orgânico dissolvido refractário, fósforo orgânico dissolvido não refractário, fósforo inorgânico, nitrogénio orgânico particulado, nitrogénio orgânico refractário, nitrogénio orgânico não refractário, amónia, nitrato, nitrito, demanda biológica de oxigénio, oxigénio, sedimentos

coesivos, bactérias ciliadas, arsénico particulado, arsénico dissolvido, coliformes fecais, inclusive no estado larval, (ver MARETEC²¹).

O transporte e evolução das propriedades da água relativamente a um referencial euleriano são calculados por este módulo. Este resolve a equação (5), aplicada a um meio tridimensional, resolvendo explicitamente os termos advectivos e difusivos horizontais e implicitamente os termos advectivos e difusivos verticais.

O transporte devido aos fluxos advectivo e difusivo, para uma propriedade P , é resolvido pela seguinte equação:

$$\partial_t P = -\partial_x(uP) - \partial_y(vP) - \partial_z(wP) + \partial_x(v'_H \partial_x P) + \partial_y(v'_H \partial_y P) + \partial_z((v'_t + v'_A) \partial_z P) \quad (10)$$

Onde u, v, w são as componentes da velocidade respetivamente nas direções x, y, z e v'_H, v'_t os coeficientes de difusidade horizontal e vertical, e v'_A o coeficiente de difusidade molecular. A evolução no tempo de P é dado pelo balanço entre o transporte advectivo gerado pelo escoamento médio, processos de mistura de natureza turbulenta e por possíveis sumidouros e fontes que a propriedade considerada possa ter.

A densidade é calculada com base na equação de estado para a salinidade e a temperatura (LEENDERTSEE & LIU *et al.*, 1978) descrita da seguinte forma:

$$\rho = ((5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S))/(((1779.5 + 11.25T - 0.074T^2) - (3.8 - 0.01T)S + 0.0698(5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S))) \quad (11)$$

A equação (11) é uma aproximação para águas rasas da equação da UNESCO.

A temperatura e a salinidade podem ser mantidas constantes ou evoluir no tempo devido ao efeito do transporte por parte do escoamento de descargas pontuais, de fluxos à superfície, de trocas de calor no caso da temperatura (radiação solar, radiação infravermelha, calor latente e sensível) e trocas de massa no caso da salinidade (evaporação/precipitação).

²¹ Fonte: “DESCRIPÇÃO do MOHID MARETEC “ edição Instituto Superior Técnico Universidade Técnica de Lisboa, ISBN 978-85-99968-20-8

3.4.5. Módulo Geometria (discretização vertical)

O módulo de geometria processa as áreas laterais e volumes dos volumes finitos que são gerados no método de discretização adotado, usando a elevação da superfície livre e os dados batimétricos que são fornecidos ao modelo.

Na discretização vertical é comum a utilização de transformação de coordenadas para otimizar a precisão da malha. Esta metodologia possibilita igualmente o desenvolvimento, sem muito esforço, de diferentes tipos de coordenadas verticais alternativas que melhor se adaptem a um caso particular (MARTINS *et al.*, 1999). Na modelação de escoamentos geofísicos têm sido utilizados vários tipos de discretização vertical do domínio real (i.e. coordenadas cartesianas, sigma, isopícnica, lagrangeana, células cortadas, *etc.*) com o intuito de descrever de forma adequada o fundo, conservar a resolução vertical em todo o domínio e melhorar as propriedades numéricas dos esquemas de cálculo utilizados (BECKERS *et al.*, 1991).

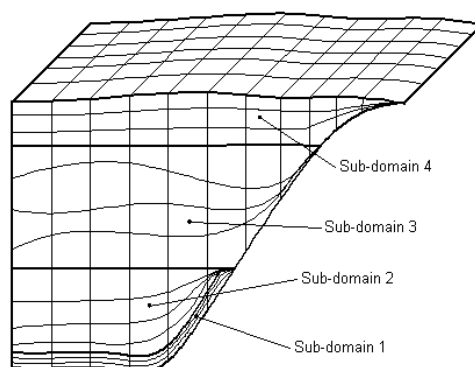


Figura 3.3: Malha ilustrativa das potencialidades da discretização vertical do sistema MOHID.

Fonte: http://www.maretec.mohid.com/Estuarios/Inicio/Mohid2000_files/image060.gif

3.5. Condições de fronteira

Para delimitar a região que se pretende simular o modelo apresenta vários tipos de fronteira. O modelo permite considerar condições de fronteira aberta e fechadas. As condições de fronteira aberta são geralmente utilizadas para definir a interação do módulo hidrodinâmico com outras massas de água, enquanto as condições de fechadas são utilizadas para definir a linha de costa e os processos de cobertura e descobertura em zonas intertidais. As condições de fronteira encontram-se assim divididas da seguinte forma:

- Superfície: onde todos os fluxos advectivos são nulos e os fluxos difusivos são da forma:

$$v \frac{\partial \overline{v_H}}{\partial z} \Big|_{surface} = \vec{\tau}_w \quad (12)$$

E onde a tensão do vento é calculada por:

$$\vec{\tau}_w = C_D \rho_a \vec{W} |\vec{W}| \quad (13)$$

Sendo C_D o coeficiente de atrito em função da velocidade do vento, ρ_a , a densidade do ar e W a velocidade do vento a 10 m sobre a superfície do mar.

- Fundo: onde os fluxos advectivos são nulos e os fluxos difusivos são da forma:

$$v \frac{\partial v_H}{\partial z} \Big|_{bottom} = C_D \vec{v}_H |\vec{v}_H| \quad (14)$$

Sendo C_D o coeficiente de atrito.

Fronteira Aberta

- **Passiva:** têm como principal objectivo deixar sair perturbações geradas para dentro do domínio e dependem da solução interna. Como por exemplo, as fronteiras utilizadas em diversos tipos de aplicação, tais como ondas de vento, e escoamentos oceânicos e costeiros.
- **Aberta ativa:** são impostas, ou seja, não são calculadas pelo modelo. Como por exemplo, a imposição de uma curva de maré para simular a hidrodinâmica de um estuário ou a imposição da vazão de um rio para simular uma cunha salina.

Fronteira Fechada

- **Fixas:** onde a trocas de massa e quantidade de movimento são como sendo nulas, geralmente utilizadas para definir as linhas de costa.
- **Móveis:** são fronteiras fechadas fixas cuja posição evolui no tempo, geralmente utilizadas na definição de processos de cobertura e descobertura em zonas intertidais.

3.5.1. Fronteiras Abertas

O modelo permite definir as condições de fronteira aberta através de várias metodologias. Podem ser impostas através de uma solução exterior (ou de referência), que pode ser definida de forma contínua para cada ponto de cálculo, utilizando arquivos externos ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), que podem ser constantes ou variáveis no tempo. Ou definir a solução em alguns pontos e na fase de execução interpolar a solução para os pontos de fronteira. Esta solução pode ser definida através de uma série temporal, ou no caso da maré na forma de componentes harmónicas.

Em alternativa também é possível utilizar o próprio módulo hidrodinâmico para calcular a solução de referência recorrendo ao conceito de modelos encaixados. O sistema MOHID permite um número ilimitado de modelos encaixados, esta versatilidade permite adaptar o modelo ao caso de estudo. Esta é uma metodologia versátil encontrando-se apenas limitada à capacidade computacional disponibilizada.

3.5.2. Fronteiras Fechadas

O módulo de hidrodinâmica admite que as trocas de massa e quantidade de movimento ao longo as fronteiras fechadas são nulas. Apesar de fisicamente existirem trocas entre a costa e o escoamento por atrito lateral, estas forças são desprezáveis relativamente ao atrito no fundo, devido à diferença existente entre o passo espacial na horizontal e na vertical. Este efeito só será visível no escoamento para passos de malha inferior a 10 metros. Nestes casos tem que escolher a opção de não escorregamento lateral.

As fronteiras fechadas móveis são fronteiras fechadas fixas cuja posição evolui no tempo. Neste caso é necessário fazer uma verificação constante de todos os pontos de cálculo de velocidade que estão descobertos onde é imposta a condição de fluxo de massa e fluxo de quantidade de movimento nulos, aplica-se por exemplo na simulação de zonas intertidais. Por norma utiliza-se um valor para definir a altura mínima da coluna de água tendo em conta que este dever ser escolhido de modo a minimizar o ruído provocado pelas variações bruscas de velocidade nas fases de cobertura ou descobertura. O valor normalmente utilizado é da ordem dos 4 cm.

3.6. Modelo SWAT - Soil and Water Assessment Tool

Para fornecer as condições de fronteira terra para o modelo hidrodinâmico MOHID, foi

implementado o modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). O modelo SWAT é um modelo ao nível de escala de bacias hidrográficas desenvolvido pelo *U.S. Agricultural Research Service*⁶ e a *Texas A&M University*⁷ (NEITSCH *et al.*, 2005).

O modelo tem sido extensivamente usado para prever o impacto das ações humanas no uso do solo ao nível do escoamento superficial e sub-superficial (erosão, sedimentação e qualidade da águas), (SRINIVASAN & ARNOLD *et al.*, 1994). O estudo destas áreas permite uma melhor gestão dos recursos naturais e agrícolas da região. O SWAT recorre a subdivisão da área hidrográfica estudada em sub-bacias homogéneas, permitindo desta forma o estudo de bacias e rios. O resultado da simulação hidrológica, ciclo de nutrientes, erosão e transporte de sedimentos, pode ser obtida para intervalos diários ou de forma contínua, para períodos de tempo de 1 a 100 anos, (SRINIVASAN *et al.*, 1995) e com o declive do mesmo. O modelo utiliza o método da Curva Número (CN) para calcular o escoamento superficial. O método da CN relaciona o escoamento superficial ao tipo e uso do solo (ARNOLD *et al.*, 1995). A componente hidrológica do modelo inclui sub-rotinas do escoamento superficial, percolação, fluxo lateral e sub-superficial, fluxo de retorno do aquífero raso. Na fase de produção de água superficial da bacia hidrográfica é baseado na equação do balanço hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i q_{lat}) \quad (15)$$

Sendo:

SW_t – humidade do solo final em mm (milímetros)

SW_0 – humidade do solo inicial em mm (milímetros)

t – tempos (dias)

R – precipitação no dia i em mm (milímetros)

Q – escoamento superficial no dia i em mm (milímetros)

ET – evapotransposição no dia i em mm (milímetros)

P – escoamento lateral no dia i em mm (milímetros)

Para simular os processos físicos o SWAT vai dividir a bacia em sub-bacias e estas em HRUs (unidade de resposta hidrológica), sendo o primeiro critério para tal a topografia. Uma sub-bacia contém pelo menos uma linha de água e pode estar dividida em várias áreas de características homogéneas, definidas pelo tipo e uso do solo (HRU).

O SWAT necessita de valores da precipitação, radiação, humidade relativa, velocidade do vento e temperatura máxima e mínima do ar. Os valores climáticos necessários podem ser dados observados ou gerados pela rotina que os calcula WXGEN - *Weather Generator Model* (SHARPLEY & WILLIAMS *et al.*, 1990), que estima os valores diários de precipitação, temperaturas máximas e mínimas do ar, radiação solar, humidade relativa e velocidade do vento, com base em valores médios mensais.

O modelo calcula ainda temperatura da água do rio através da temperatura média do ar, pela equação de Stefan and Preud´homme, (STEFAN & PREUD´HOMME, *et al.*, 1993):

$$T_{\text{água}} = 5 + 0.75 T_{\text{média do ar}} \quad (16)$$

Para aplicar o modelo SWAT, torna-se então indispensável o seguinte conjunto de dados:

- DEM (Modelo Digital de Terreno)
- Uso do solo
- Tipo de solo
- Dados meteorológicos

O modelo digital de terreno permite determinar a direção do escoamento, assim como as características físicas da bacia. A rede hidrográfica pode ser determinada automaticamente a partir do modelo digital do terreno ou pode ser fornecida através de um mapa. O uso e tipo do solo são dados importantes pois a junção destes dois tipos de informação com os dados meteorológicos vão influenciar significativamente o balanço hídrico. A textura do solo é uma propriedade básica da física do solo. Com base nela é possível estimar os outros parâmetros necessários.

Uma limitação destes modelos é a dificuldade em trabalhar uma grande quantidade de dados que descrevem a heterogeneidade dos sistemas naturais. A variabilidade espaço-temporal nas características da paisagem, incluindo solo, uso da terra relevo e clima afeta a resposta hidrológica do sistema físico, o que dificulta a aplicação deste tipo de modelos.

O SWAT permite a entrada de dados em formato espacial e de arquivos ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), a manipulação destes para a aplicação do modelo é feita com o auxílio de uma interface entre o modelo e um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Capítulo 4. Implementação do Sistema

O sistema implementado foi baseado na metodologia de modelos encaixados. Esta metodologia permitiu encaixar 3 modelos, capazes de reproduzir a hidrodinâmica para áreas diferentes a distintas resoluções. Deste modo torna-se possível fazer *downscaling* de uma solução e forçar os modelos locais com processos de grande escala. Esta comunicação no MOHID é feita *one-way*, ou seja o pai fornece a informação ao filho, mas não permite o contrário.

Para o modelo da ria de Arousa, foram utilizados 3 níveis, Figura 4.1, com o objectivo de impor as condições de fronteira do oceano aberto até se alcançar o nível de escala pretendida. A inclusão de um nível intermédio, o nível 2, tem a ver com o facto do nível 1 apresentar um passo espacial demasiado grosseiro.

Neste trabalho apenas será abordado com detalhe o nível 3, o domínio do estuário da ria de Arousa e a respetiva validação com as medidas disponíveis para dois períodos de simulação, dezembro de 2009 e junho 2010.

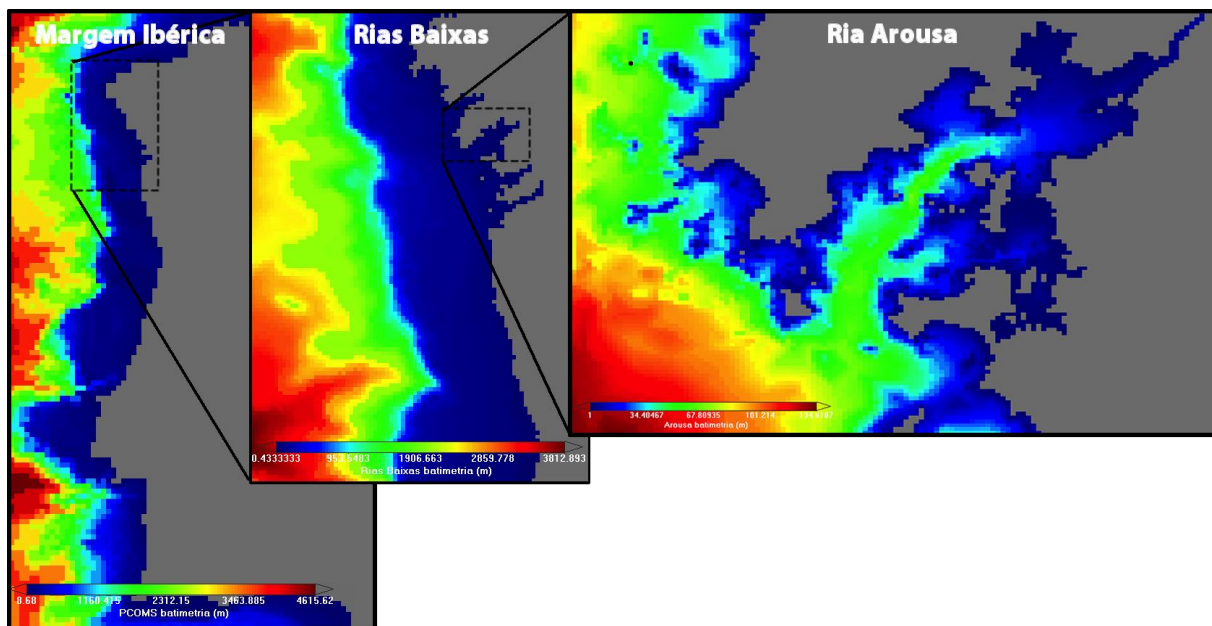


Figura 4.1: Esquema de modelos utilizados, a) Margem Ibérica (Maretec⁵/IST¹⁰), b) Rias Baixas, c) Arousa.

4.1. Condições do modelo da ria de Arousa

O modelo de escala local, o nível 3, corresponde ao domínio da ria de Arousa compreendido entre as longitudes de -9,16 a -8,71, e as latitudes 42,38 a 42,68. Este foi implementado recorrendo a uma malha de passo constante, de resolução igual a 300 metros, com uma dimensão de 126x111x34 (475524 pontos de cálculo). Para a discretização vertical foi utilizada uma dupla camada, (16 sigma + 18 cartesianas), em que as 16 camadas sigma acomodam os primeiros 9 m. O valor de viscosidade horizontal utilizado foi de 2 m²/s. Para a mistura vertical utilizou-se o modelo GOTM¹⁹ (*General Ocean Turbulence Model*), descrito no capítulo 3. O valor considerado para a rugosidade de superfície e de fundo foi de 0.0025 m. A tensão do vento é calculada com a formulação de (LARGE & POND, et al., 1981). Os fluxos de calor são calculados pelas formulas *bulk*, através das variáveis fornecidas pelo modelo atmosférico. É um modelo 3D baroclíno e executou-se com um passo temporal de 15s. A configuração do modelo encontra-se resumida na Tabela 4.1.

A batimetria, Figura 4.1 c) foi construída tendo como base a informação batimétrica existente na MeteoGalicia²² e completada com a informação do mapa dos lombos do rio Ulla, fornecido pelo INTECMAR²³ (*Instituto Tecnolóxico para o Control do Medio Mariño de Galicia*). As profundidades variam entre um mínimo de 1 m e um máximo de 134 m. Foram ainda construídos 2 canais, correspondentes aos rios Ulla e Umia, para impor uma distância de diluição e permitir introduzir salinidades de 0 psu.

No que respeita às condições de fronteira, aberta, à superfície (interface ar-água), terra (rios), estas são descritas em detalhe nas alíneas seguintes.

Tabela 4.1: Síntese da configuração do modelo da ria de Arousa.

<i>Nível</i>	1	2	3
Malha	Margem Ibérica (PCOMS)	Rías Baixas	Arousa
Número de pontos		77x120x47	126x111x34
Passo espacial	6 km	2 km	300 m
Passo temporal		30 s	15 s
Discretização vertical	50 camadas cartesianas	47 camadas (7 sigma+40 cartesianas)	34 camadas (16 sigma+18 cartesianas)

²² MeteoGalicia: Consellería de Medio Ambiente, Territorio e Infraestruturas - Rúa Roma, nº 6. 15707 Santiago de Compostela. A Coruña; Contacto: (+34) 881 999 654 Fax: (+34) 981 957 466; website: <http://www.meteogalicia.es>

²³INTECMAR: Peirao de Vilaxoán, s/n 36611 Vilagarcía de Arousa (Pontevedra); contacto: +34 986 512320/22 ; Fax: +34 986 512300; e-mail: intecmar@intecmar.org; website: <http://www.intecmar.org/>

Fluxo	Baroclíno	Baroclíno	Baroclíno
Atmosfera	MM5 9km <i>vento, temperatura, radiação, humidade relativa, fluxos de calor</i>	WRF 4km <i>vento, temperatura, radiação, humidade relativa, pressão, cobertura das nuvens.</i>	WRF 4km <i>vento, temperatura, radiação, humidade relativa, pressão, cobertura das nuvens.</i>
Descargas	X	rios	rios
OBC	Mercator velocidades, temperatura e salinidade	Nível 1 (<i>offline nesting</i>): <i>nível do mar, velocidades, temperatura e salinidade</i> Radiation: modo barotrópico (Flather, 1976)	Nível 2: <i>nível do mar, velocidades, temperatura e salinidade</i> Radiation: modo barotrópico (Flather, 1976)

4.1.1. Condições de fronteira aberta e iniciais

As condições iniciais e de fronteira do oceano aberto, para o domínio da ria de Arousa (nível 3) são fornecidas pelo modelo das Rias Baixas (nível 2) que por sua vez recebe as condições de fronteira e iniciais da solução do modelo PCOMS (*Portuguese Coast Operational Modelling System*²⁴).

Para o nível 1 foi utilizado o modelo PCOMS, desenvolvido pela empresa Hidromod¹¹ em conjunto com o grupo Maretec⁵/IST¹⁰. É um modelo 3D baroclíno que cobre a região da margem Ibérica Atlântica, com uma resolução horizontal de 5.6 km e utiliza 50 camadas na vertical. Este é forçado, para a fronteira aberta, pela solução do modelo MERCATOR para o norte Atlântico, e pelas marés calculadas por uma versão 2D deste modelo para uma área maior. Para o forçamento atmosférico utiliza o modelo MM5 de resolução de 9 km, (MATEUS *et al.*, 2012). Este nível tem como única função fornecer as condições iniciais e de fronteira de oceano aberto para o nível 2. Para esse efeito é feito um *nesting off-line* da solução. Este modelo executa-se diariamente no Maretec⁵/IST¹⁰.

O nível 2 abrange as Rias Baixas e o norte de Portugal, com uma resolução horizontal de 2 km e 47 (7 sigma + 40 cartesianas) camadas na vertical. A dimensão da malha é de 77x120x47, de profundidade máxima de 3812 m, Figura 4.1. É forçado pela solução do nível 1, de onde são extraídos os campos 3D das velocidades, temperatura e salinidade, e o nível, com uma de frequência de 900s para permitir uma boa resolução da onda de maré. É um modelo baroclínico e executa-se com um passo temporal de 30s. O forçamento atmosférico é fornecido pelo modelo atmosférico WRF (*Advanced Weather Research and Forecasting*). Para a fronteira terra são impostos caudais médios diários do modelo SWAT. Pretende-se com

²⁴ Fonte: http://maretec.mohid.com/PublicData/Products/ConferencePapers/Ligiapinto_etal_2IH_2012.pdf

este nível obter uma hidrodinâmica com mais detalhe para fornecer ao modelo de mais precisão.

4.1.2. Forçamento atmosférico

O forçamento atmosférico, para os níveis 2 e 3 é fornecido pelas previsões do modelo atmosférico WRF. Este modelo foi implementado pela MeteoGalicia²² e executa-se duas vezes por dia (00 e 12 UTC), com 4 malhas de resolução diferente, 36 km, 12 km, 4 km e 1.3 km.

São extraídos do domínio de 4 km, Figura 4.2, os campos horários de pressão ao nível do mar, temperatura do ar, radiação de onda longa e onda curta, cobertura das nuvens e o vento, sendo este último dos mais importantes no que respeita ao transporte das plumas de água doce.

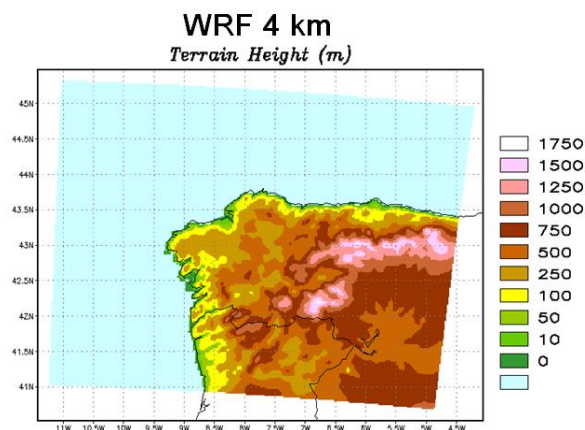


Figura 4.2: Domínio de cálculo de 4km do modelo WRF.

Fonte: MeteoGalicia²²

Este modelo tem sido extensivamente validado, mostrando um bom desempenho, principalmente nas previsões de vento sobre o oceano, (COSTA *et al.*, 2012). Para avaliar o seu desempenho para os períodos de estudo, a Figura 4.3 mostra uma comparação de rosas de ventos do modelo de 4 km (Figura 4.3, b & d) com a estação meteorológica de Corón (Figura 4.3, a & c). Pode-se verificar que existe no geral boa correlação do modelo com a estação tanto em intensidade como direção, principalmente para o mês de junho, (Figura 4.3, c & d), para o mês dezembro, o modelo tende subestimar a intensidade em algumas direções (Figura 4.3, a & b).

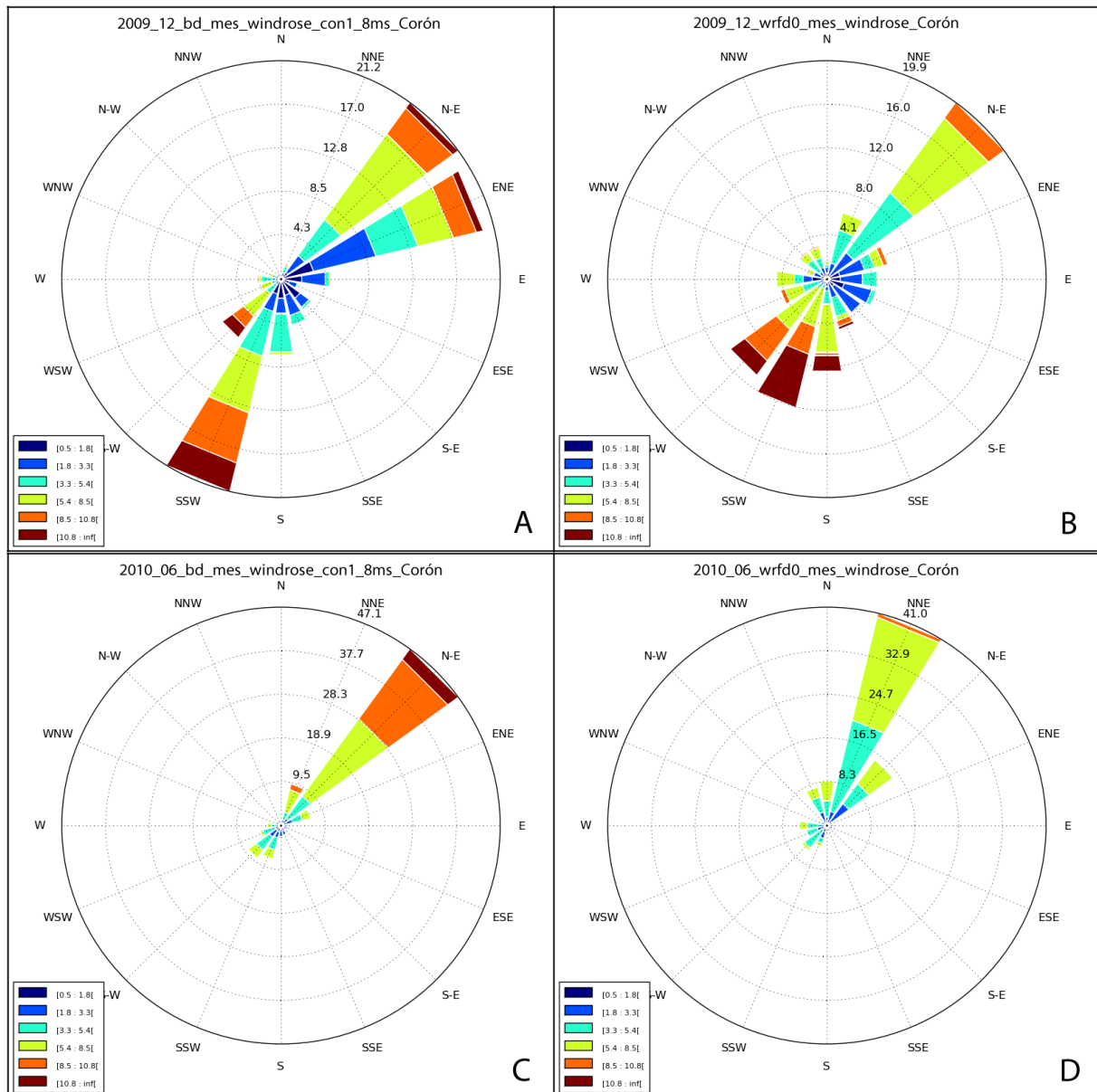


Figura 4.3: Rosa dos ventos, comparando o vento do modelo para a malha de 4 km com estação meteorológica de Corón (lat: 42,58°; long: -8,8°), para o mês de dezembro (a – estação; b – modelo) e para o mês de junho (c – estação; d – modelo).

Fonte: MeteoGalicia²²

4.1.3. Forçamento hidrológico

As medições dos caudais de água doce na foz dos rios são difíceis de obter e não permitem previsões, em alternativa foi utilizado um modelo hidrológico para simular esses caudais. O modelo SWAT foi implementado e é executado na MeteoGalicia²² numa base operacional diária proporcionando os caudais médios diários para os principais rios: Minho, Verdugo, Lérez, Umia, Ulla, Tambre e Eume e para mais 10 rios secundários pertencentes à

velocidade do vento e temperatura máxima e mínima. Estes dados podem ser introduzidos diretamente através de um ficheiro ou podem ser simulados pelo modelo. Neste caso usaram-se valores medidos de precipitação por ser a variável mais importante para determinar o caudal e os valores de temperatura do ar para calcular a temperatura da água do rio, estas variáveis obtiveram-se da rede de estações meteorológicas da MeteoGalicia²², escolheram-se aquelas mais representativas para as bacias fluviais em questão.

Com base na topografia foram delineadas as bacias e posteriormente divididas em sub-bacias. O critério de divisão é baseado num valor que tem um limite mínimo e máximo permitido, deste modo o número de sub-bacias pode ser controlado. A rede hidrográfica é determinada pela topografia assim como a direção do escoamento em cada troço do sistema. A Tabela 4.2 resume a divisão efectuada, assim como a área calculada para os rios que drenam à bacia de Arousa. A Figura 4.5, mostra um exemplo da bacia hidrográfica do rio Ulla, calculada pelo modelo SWAT.

Tabela 4.2: Área e número de sub-áreas das bacias dos rios drenantes à ria de Arousa; média diária do caudal para os meses de dezembro e junho para cada rio, calculado pelo modelo SWAT.

<i>Rios</i>	<i>SWAT - Área, Km²</i>	<i>SWAT - núm. de sub-áreas.</i>	<i>SWAT - média diária caudal (m³/s)</i>	<i>SWAT - média diária caudal (m³/s)</i>
Data			dezembro / 2009	junho / 2010
Barbanza	29,44	5	3,86	0,79
Coroño	30,34	9	4,41	0,77
Beluso	21,21	3	3,12	0,51
Te	37,63	38	5,44	0,97
Con	24,63	15	1,83	0,30
Chanca	29,50	19	2,50	0,63
Sar	265,59	19	27,37	5,65
Ulla	2182,80	30	109,32	29,99
Umia	440,60	29	34,11	4,51
Grande	19,57	7	2,96	0,51
Valga	25,88	11	2,38	0,48
Louro	16,73	7	1,56	0,32
Área Total	3124,32			

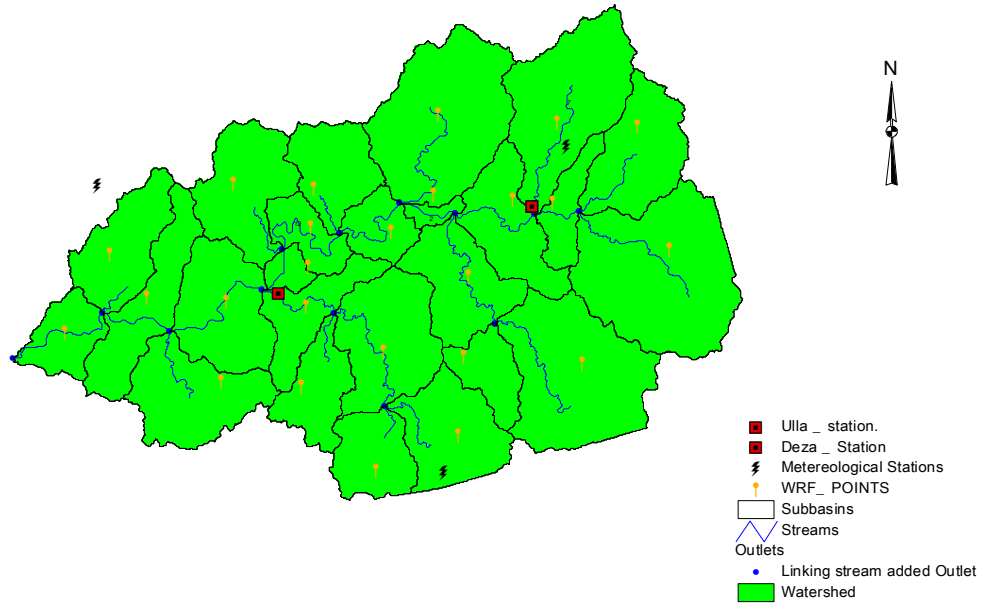


Figura 4.5: Bacia hidrográfica para o rio Ulla delineada pelo modelo SWAT.

De seguida, a Figura 4.6 e Figura 4.7, mostram a validação efectuada para o rio Ulla com os dados históricos das estações hidrométricas pertencentes Augas de Galicia⁸, disponíveis na altura de implementação do sistema, ver localização das estações na Figura 4.8.

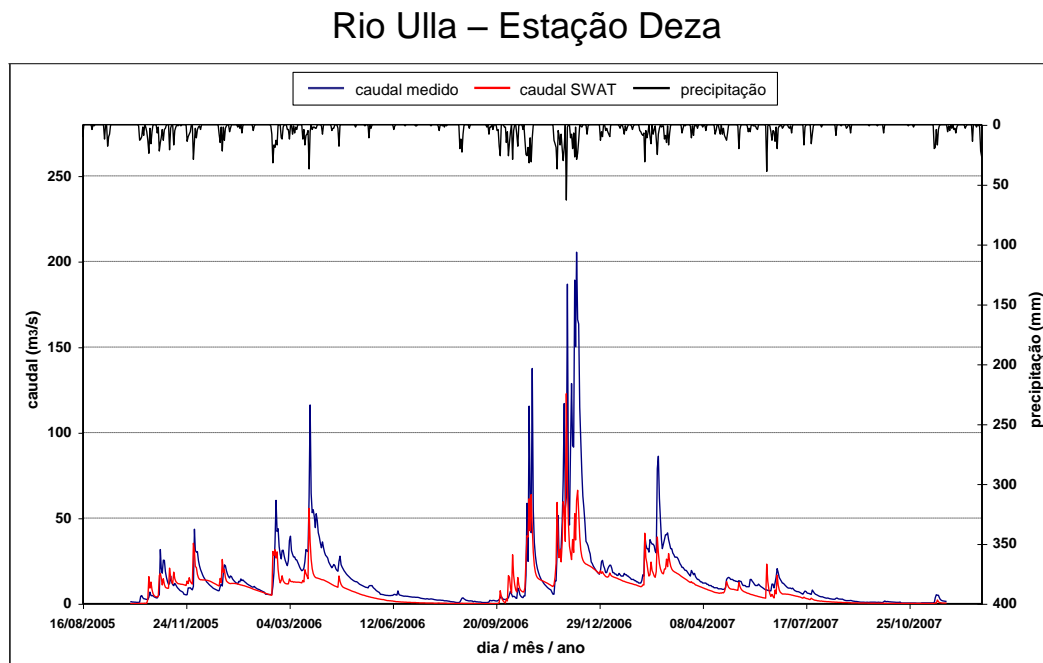


Figura 4.6: Comparação entre as medidas da estação hidrométrica do rio Deza, afluente do rio Ulla e o caudal simulado pelo SWAT nesse ponto.

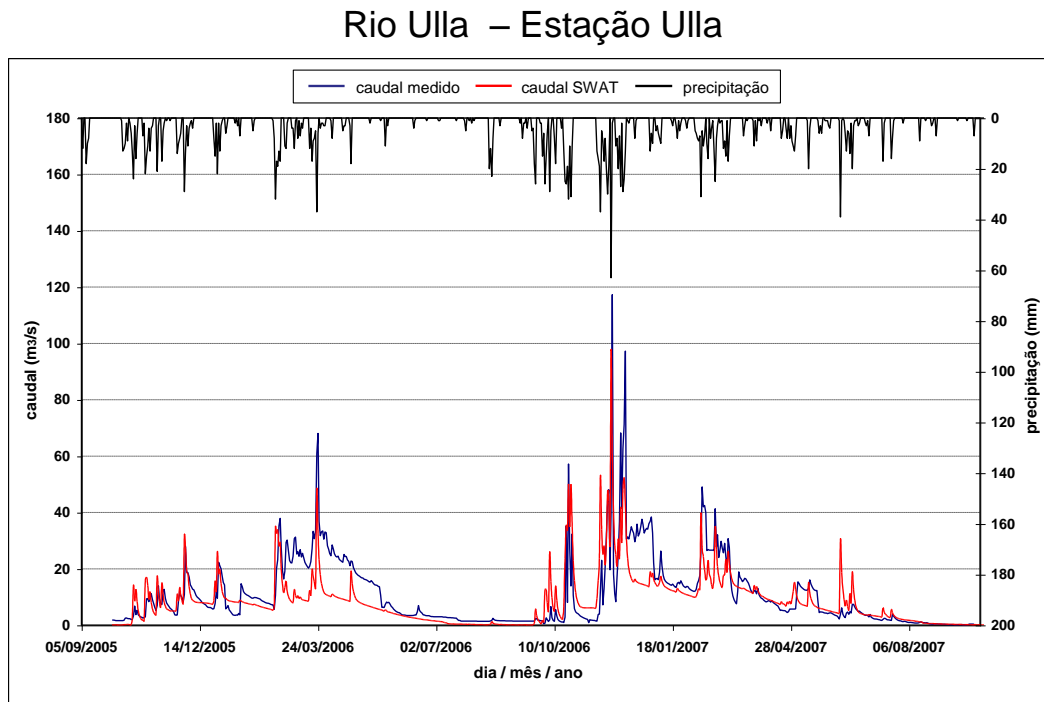


Figura 4.7: Comparação entre as medidas da estação hidrométrica do rio Ulla e o caudal simulado pelo SWAT nesse ponto.

A Figura 4.6 e a Figura 4.7, mostram a capacidade razoável que o modelo tem para reproduzir a sua variância em diferentes períodos: secos e húmidos. Enquanto em alguns períodos, a magnitude do fluxo do rio previsto tem um erro significativo, este poder ser devido por um lado ao facto do SWAT trabalhar com passos temporais diários não capturando os fenómenos de alta frequência, por outro ao facto de estes rios serem fortemente controlados pelas albufeiras existentes a montante das embocaduras dos rios. Ainda assim considera-se que o resultado é melhor do que a introdução de um valor constante climatológico que retiraria a variabilidade da dinâmica do rio.

4.2. Dados de observações

Os dados de observação utilizados para analisar o modelo da ria de Arousa foram obtidos de diversas fontes.

No âmbito de vários projetos financiados pela união Europeia (EROCIPS²⁶, EASY²⁷ e

²⁶ EROCIPIs: “Emergency Response to coastal Oil Chemical and Inert pollution from Shipping”, website: <http://www.erochips.org/intro/erochips-final-conference.htm>

²⁷ EasyCO Project: website: <http://www.project-easy.info/>

RAIA²⁸), tem vindo a ser construída uma rede de observação oceanográfica para a costa galega. Várias boias foram fundeadas medindo dados meteorológicos, oceanográficos e biológicos em contínuo. Para validar e calibrar o modelo da ria de Arousa, utilizaram-se os dados de nível do mar do marégrafo de Vilagarcía de Puertos del Estado⁹, da plataforma de Cortegada, fundada pela MeteoGalicia²² em colaboração com o INTECMAR²³ (*Instituto Tecnológico para o Control do Medio Mariño de Galicia*) e de perfis verticais de CTDs³, obtidos de campanhas semanais feitas pelo INTECMAR²³, Figura 4.8 e Figura 4.9, respetivamente. Foram ainda usados os dados das estações meteorológicas da MeteoGalicia²² e das estações hidrométricas de Augas de Galicia⁸, Figura 4.8.

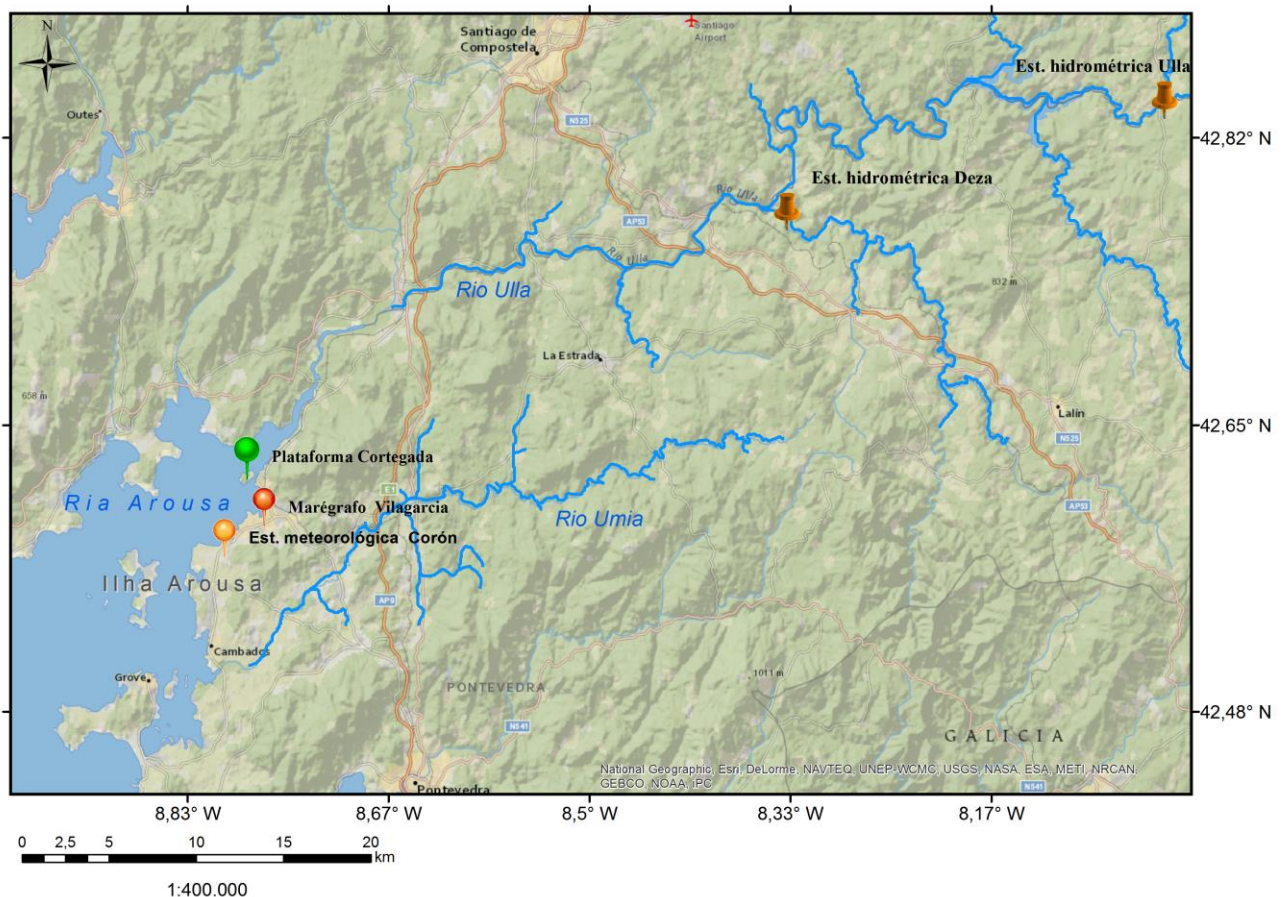


Figura 4.8: Localização das estações de medidas que se usaram neste trabalho: boia de Cortegada, estação meteorológica de Corón, e as hidrométricas Deza e Ulla.

²⁸ RAIA: “Observatório Oceanográfico da Marxe Ibérica” website: <http://www.observatorioraia.org/mg-web-raia/index.action>

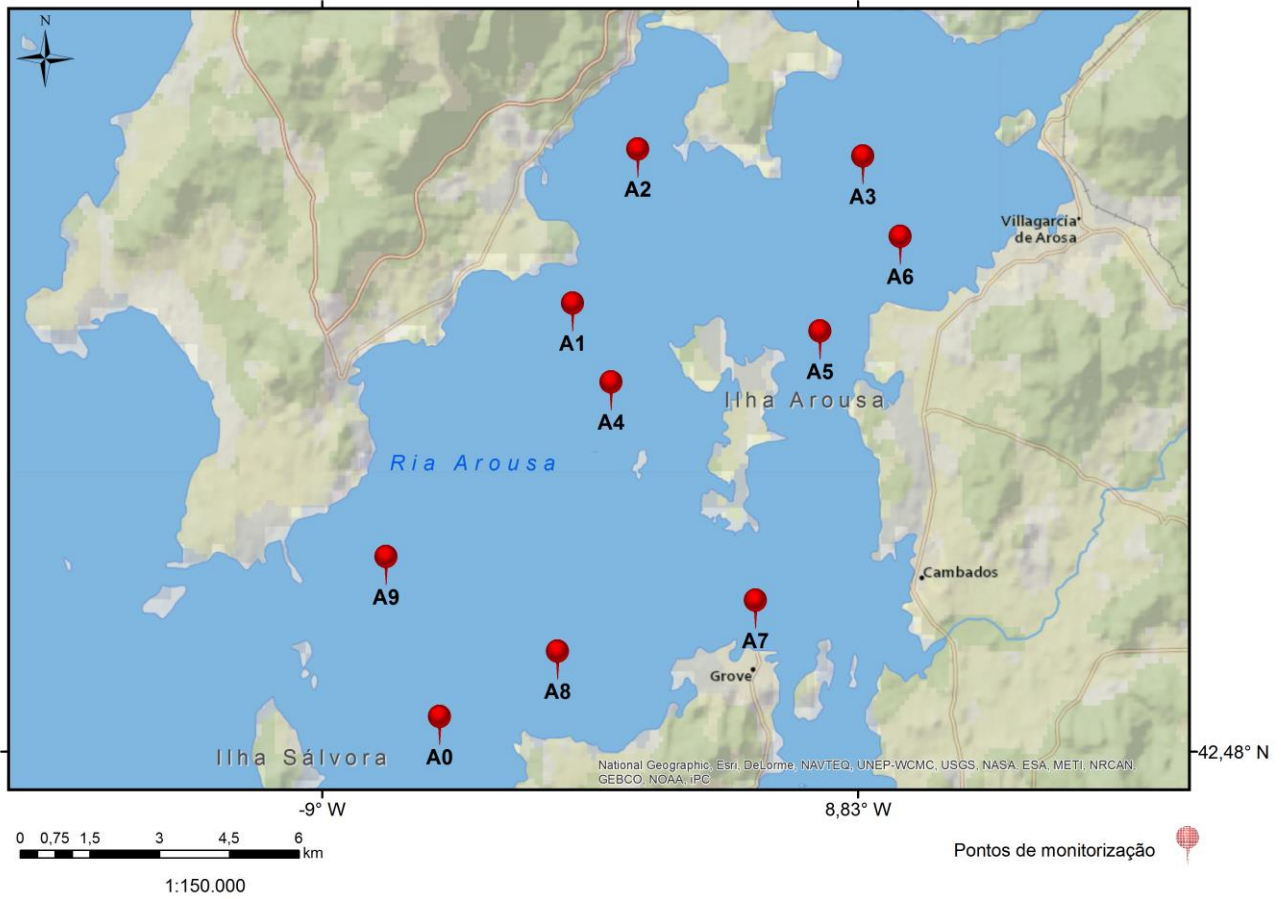


Figura 4.9: Localização dos pontos de monitorização das estações CTD da ria de Arousa.

Capítulo 5. Simulação Hidrodinâmica do Sistema

Neste capítulo são descritos os testes que foram realizados, para a simulação da hidrodinâmica da ria de Arousa, assim como é explicado de forma sucinta os procedimentos que foram utilizados.

São ainda apresentados e discutidos os resultados mais relevantes obtidos dos testes, a comparação destes com dados de medidas disponíveis de nível de maré e com perfis verticais de salinidade e temperatura.

5.1. Descrição dos testes de modelação

Com o objectivo de obter uma melhoria nas previsões da hidrodinâmica para a ria de Arousa, procedeu-se a uma remodelação ao modelo operacional desta ria. Para esse efeito efetuaram-se várias alterações, sendo que as mais significativas foram: a alteração da discretização vertical, de 16 camadas cartesianas para dupla camada (7 sigma + 18 cartesianas) e a introdução do caudal médio diário do rio Ulla e Umia, através do modelo SWAT, em vez da utilização de uma média mensal. No entanto veio a verificar-se que a quantidade de água doce detetada no modelo operacional da ria Arousa continuava a ser insuficiente, motivo pelo qual se procedeu à realização de novos testes em que foram introduzidas modificações a esta configuração.

Foram realizados dois testes para os dois períodos de simulação:

- O primeiro teste ao qual iremos chamar de referência (Teste referência), utiliza como base as condições hidrodinâmicas do sistema de modelação operacional.
- O segundo teste ao qual iremos chamar de Teste 1, utiliza como base o sistema implementado anteriormente descrito no capítulo 4, que contem as novas alterações à configuração operacional.

As diferenças mais significativas entre os dois testes, é que para o Teste 1 incrementou-se a discretização vertical e foi incluído o caudal médio diário de mais 10 tributários afluentes à ria, Tabela 5.1. Apesar da utilização do SWAT introduzir no modelo hidrodinâmico a variabilidade diária do caudal dos principais rios Ulla e Umia, verificou-se que este teve dificuldades em reproduzir com exatidão os picos de caudal, pelo qual se procedeu a uma correção manual desses mesmos valores tendo como base a informação das Augas de

Galicia⁸. Foram ainda incluídos ao modelo hidrodinâmico, os valores para temperatura da água para todos os rios prevista pelo modelo SWAT. De seguida procedeu-se a um incremento das camadas verticais com o objetivo de se obter a variabilidade máxima possível nos primeiros metros da coluna de água. Com base em testes preparativos foram escolhidas 16 camadas nos primeiros 9 metros, o critério para a escolha do número de camadas utilizadas, foi o valor limite a partir da qual já não se detetava alteração dos resultados devido ao incremento do número de camadas. Em ambos os testes considerou-se um tempo de ajuste (*spin-up*) do modelo de uma semana.

Os períodos de simulação escolhidos para os testes foram do dia 27 de Novembro ao dia 15 de Dezembro de 2009 e do dia 15 Junho ao dia 30 de Junho de 2010. O motivo que levou à escolha destas datas prende-se com o facto de na 1ª semana de Dezembro de 2009 se ter verificado fortes eventos de precipitação, e de na 3ª e 4ª semana de Junho de 2010 a ausência deste tipo de eventos, como podemos verificar pela Figura 5.1.

Desta forma pretende-se uma análise mais detalhada das diferenças na hidrodinâmica da ria de Arousa devido às diferentes condições meteorológicas verificadas durante estes dois períodos.

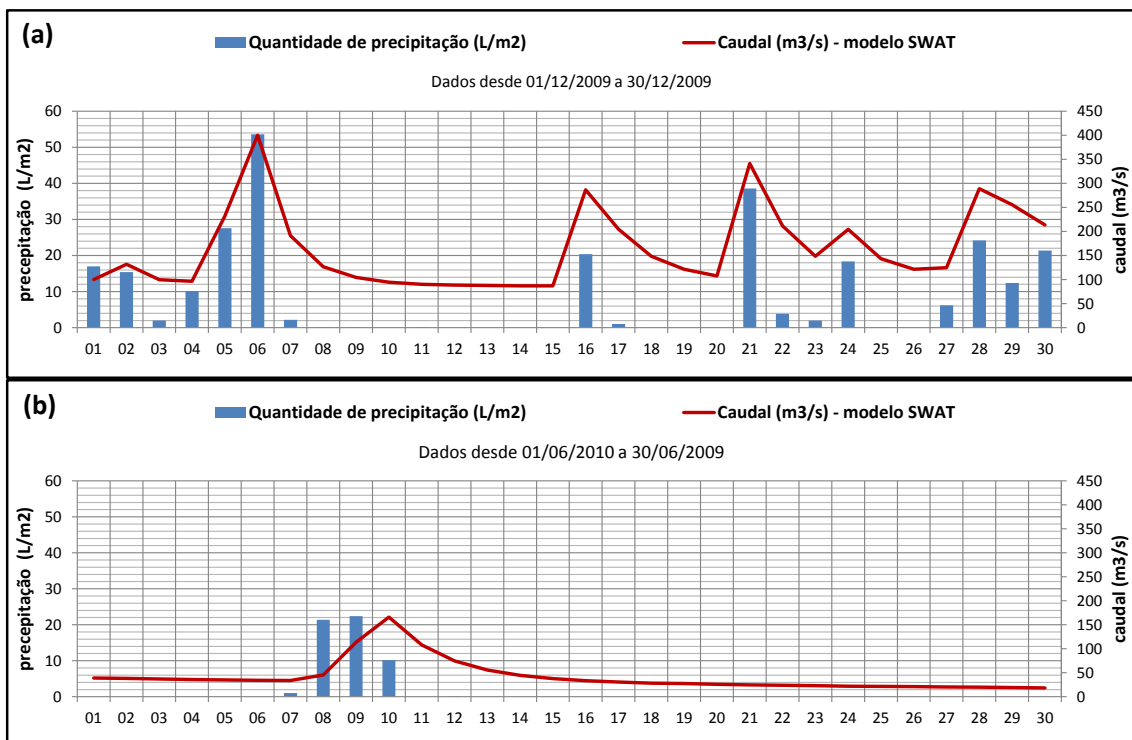


Figura 5.1: Série temporal de precipitação da estação meteorológica de Córion (gráfico de barras) e do caudal médio diário do rio Ulla, simulado pelo modelo SWAT (gráfico de linhas), para os meses de dezembro 2009 (a) e junho de 2010 (b).

Tabela 5.1: Testes efetuados para os 2 períodos de simulação e as suas principais diferenças. Teste de referência - o modelo hidrodinâmico operacional da MeteoGalicia²², Teste 1- com base no teste de referência mas com as respetivas diferenças indicadas.

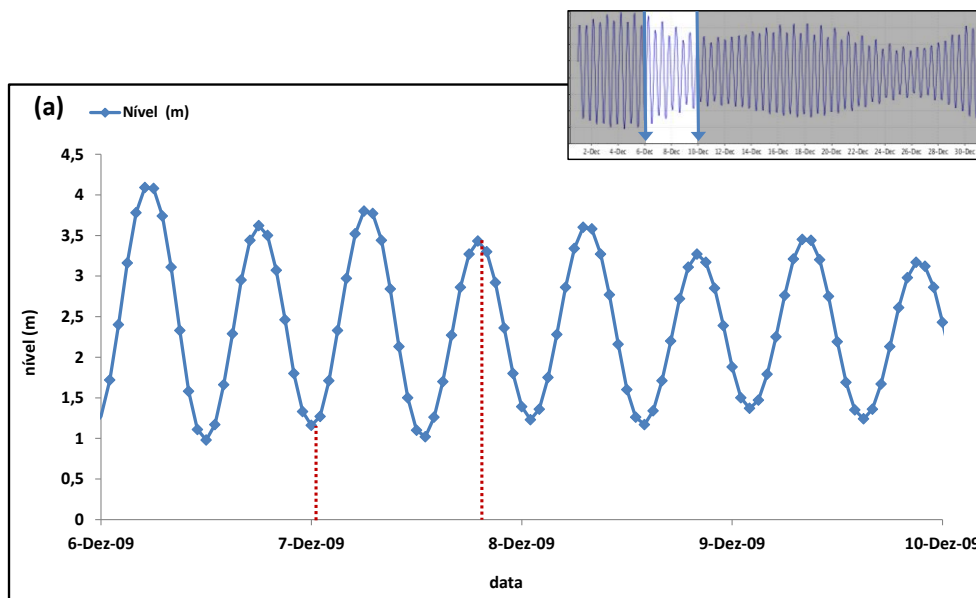
<i>Testes</i>	<i>Discretização Vertical</i>	<i>Rios</i>	<i>Viscosidade</i>
Teste referência	7 sigma + 18 cartesianas	Ulla e Umia	30 m ² /s
Teste 1	16 sigma + 18 cartesianas	Ulla e Umia (picos corrigidos) + 10 rios tributários	2 m ² /s

5.2. Resultados e discussão

5.2.1. Campos de salinidade e correntes

As figuras seguintes mostram os campos de salinidade e as correntes obtidas do modelo (Teste 1), na superfície, a aproximadamente 4 m e no fundo. Foram escolhidos os dias 7 de Dezembro, Figura 5.3 e 22 de Junho, Figura 5.4, para o período chuvoso e seco, respetivamente, para as situações de baixa-mar e preia-mar, Figura 5.2.

Os dias e instantes foram escolhidos por representarem situações que permitem apreciar com maior clareza as diferenças entre os respetivos campos de salinidade.



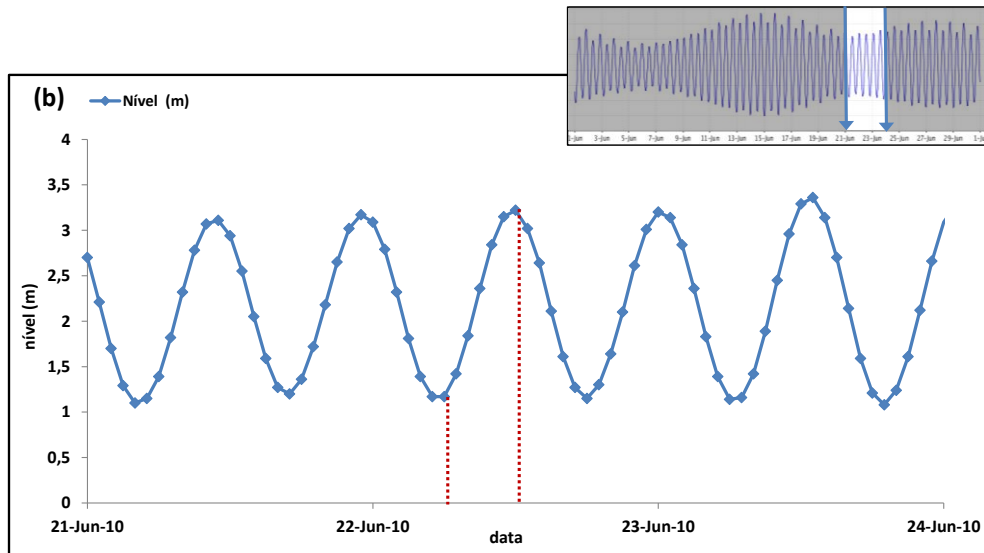
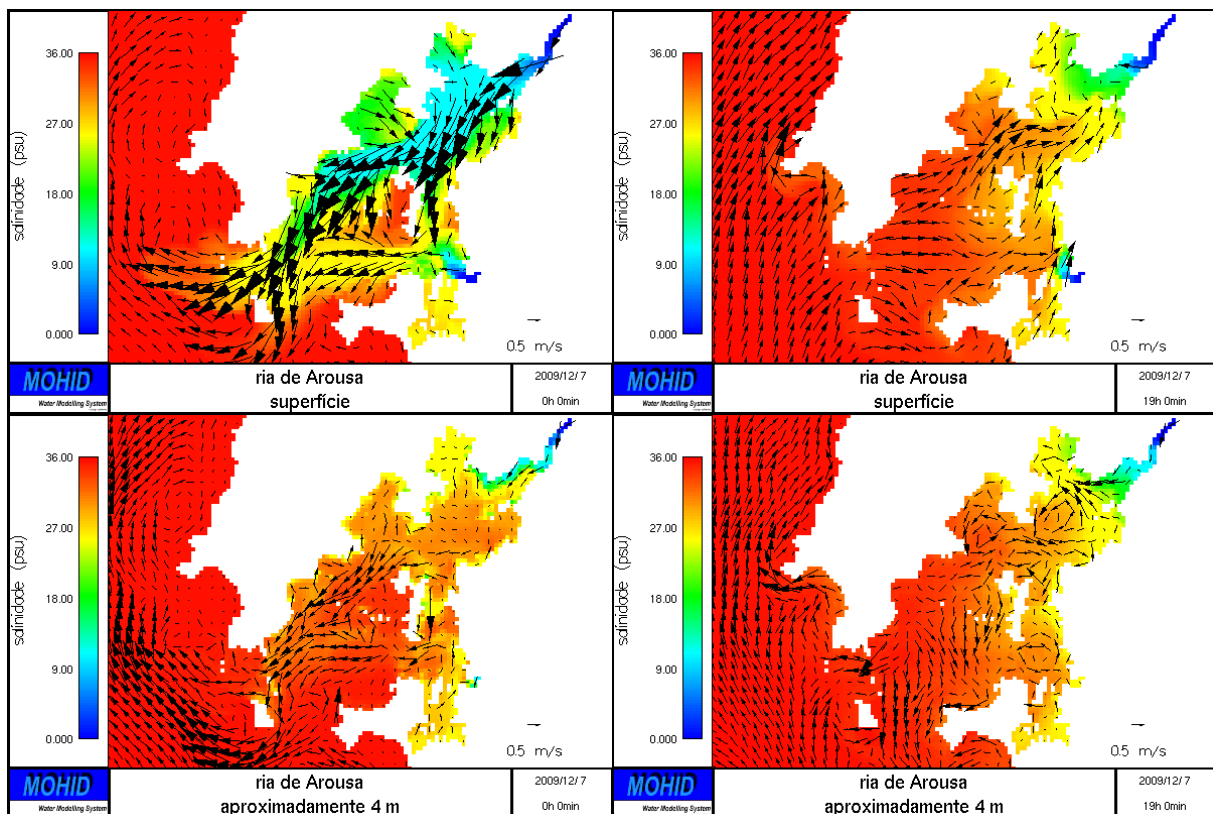


Figura 5.2: Nível da maré observado pelo marégrafo de Vilagarcía, e a indicação de marés vivas e mortas, para o período de 6 a 9 de dezembro (a), e para o período de 21 a 24 de junho, (b).



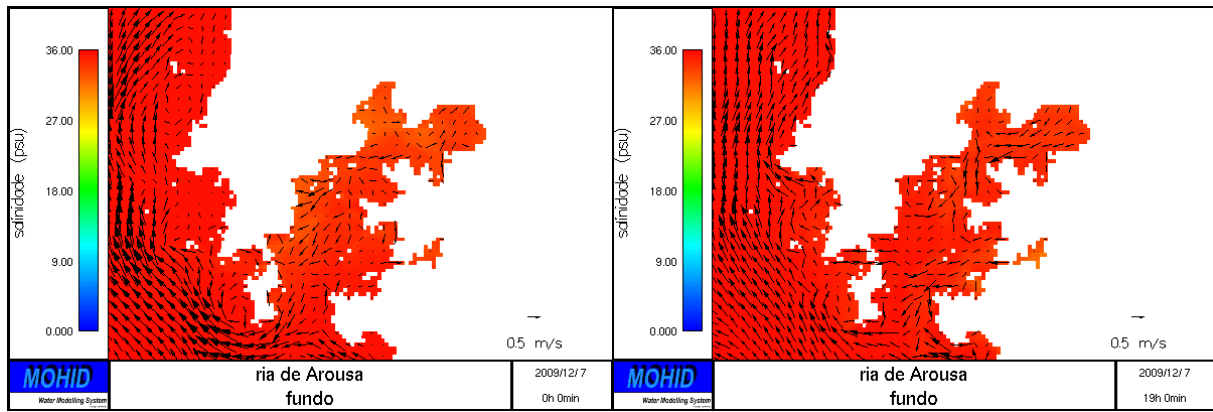
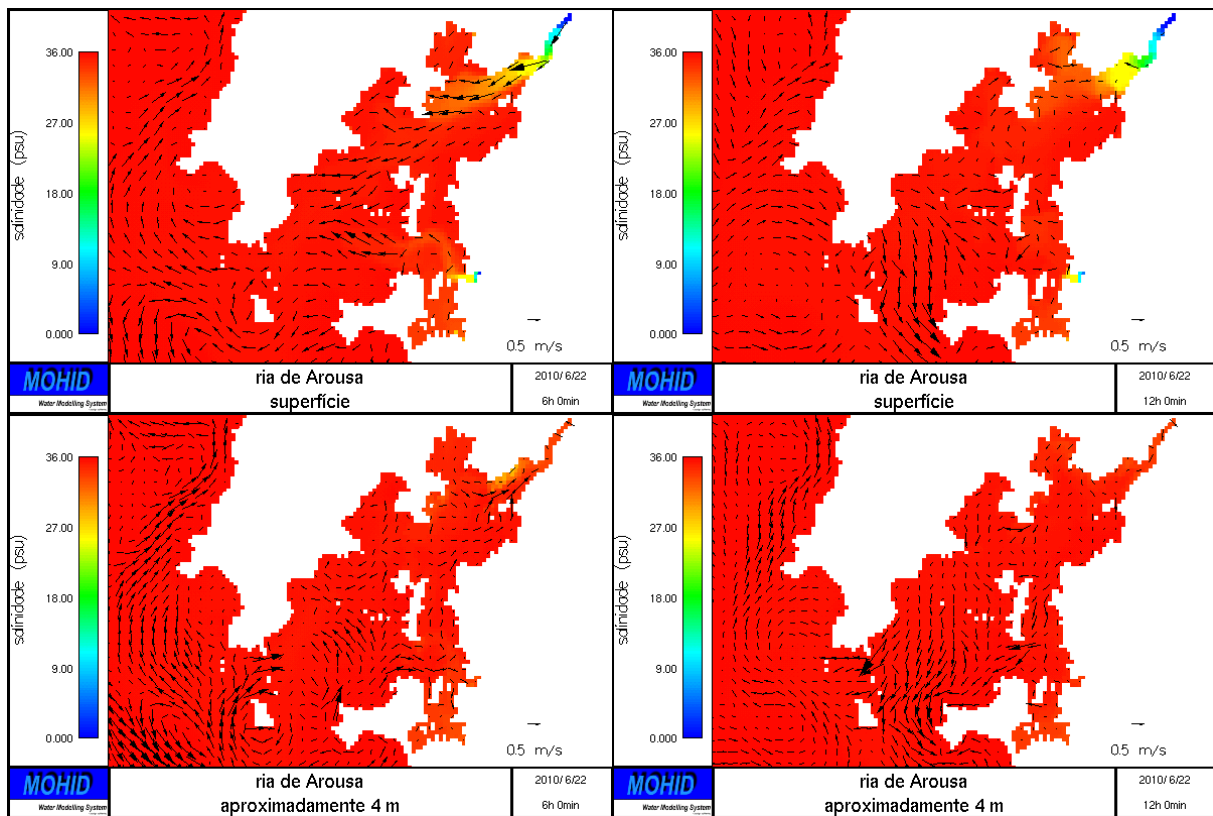


Figura 5.3: Resultados dos campos de salinidade e correntes, para diferentes profundidades para o dia 7 de dezembro, para a baixa-mar (figuras da esquerda) e preia-mar (figuras da direita).



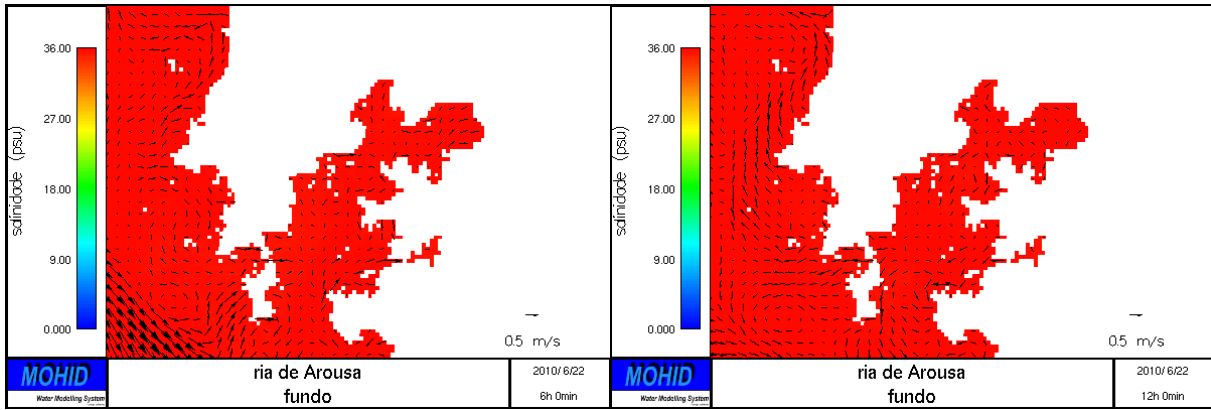


Figura 5.4: Resultados dos campos de salinidade e correntes, para diferentes profundidades para o dia 22 de junho, para a baixa-mar (figuras da esquerda) e preia-mar (figuras da direita).

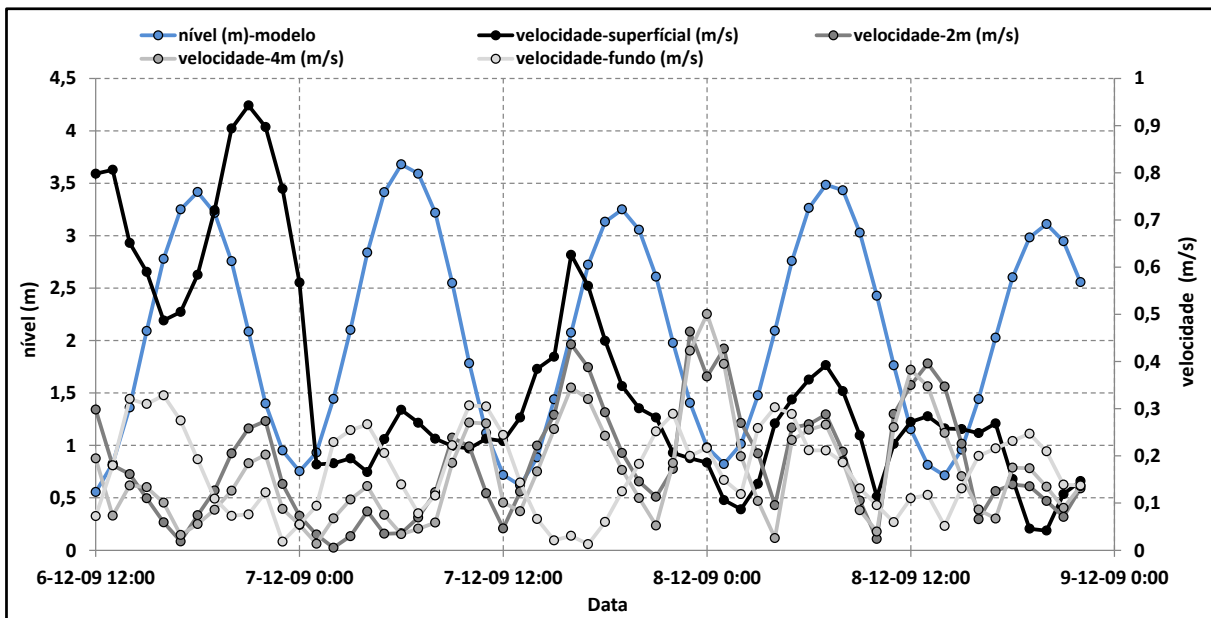


Figura 5.5: Séries temporais do modelo, de nível e do módulo da velocidade, à superfície, 2m, 4m e no fundo, para o período de 6 a 9 de Dezembro, extraídas de um ponto no meio do canal da ria.

Comparando os resultados dos testes, para o período chuvoso, Figura 5.3, e para o seco, Figura 5.4, verifica-se que o modelo consegue reproduzir as diferenças devidas à influência que os caudais dos rios têm nos campos de salinidade assim como na circulação da ria de Arousa.

As condições meteorológicas da primeira semana de Dezembro, caracterizada por ventos fracos de SW-S, (Anexo A), e por fortes precipitações Figura 5.1 a), proporcionaram que as plumas de água doce provocassem uma forte estratificação na ria para esses dias.

A Figura 5.3 mostra para o dia 7 de Dezembro, o comportamento das plumas associado

a uma baixa-mar e a uma preia-mar, de amplitudes de 1.16 m e de 3.43 m, respetivamente, Figura 5.2 a). Em baixa-mar, a água procedente dos rios, principalmente do rio Ulla, propaga-se pelas camadas mais superficiais e com tendência de sair pela parte norte da ria devido à força de *Coriolis*¹. Este efeito combinado do rio e da maré provoca um decréscimo na salinidade nas camadas superficiais, ao mesmo tempo promove a entrada de água salgada pelas camadas do fundo pela margem sul. É visível uma pronunciada variação espacial da salinidade ao longo do canal central, variando de 6 psu na foz do rio Ulla a 27 psu na embocadura da ria. A 4m ainda é perceptível o impacto das plumas, principalmente dos rios Ulla e Umia. Apesar de ser uma situação de baixa-mar, é observada uma forte corrente, com velocidades máximas de 0.85 m/s, devida ao grande volume de caudal entrante pelo dia 6 Dezembro, Figura 5.1 a). As velocidades altas na camada superficial do modelo, também são devidas ao fato de esta possuir uma espessura muito fina, nas camadas inferiores a velocidade diminui e tornam-se mais concordantes com o ciclo de maré, Figura 5.5. Em preia-mar o rio é condicionado pela água proveniente do oceano, aumentando a salinidade nas camadas superficiais. No entanto nas zonas de influência do rio Ulla e Umia, onde existe maior estratificação, verifica-se uma tendência de saída da água doce, contrariando a maré. Para este período é visível que a corrente fluvial adquiriu muita importância, reforçada pela força de maré vazante e contrariada pela maré enchente, Figura 5.5.

Para o segundo período escolhido, dia 22 de Junho caracterizado por ventos moderados de NW-N, (ver Anexo A) e ausência de precipitação Figura 5.1 b). Apenas as plumas dos rios Ulla e Umia demonstraram ter alguma influência na área da foz, que é desvanecida rapidamente, tanto em baixa-mar como preia-mar, Figura 5.4. Nesta situação o vento assume um papel mais importante na circulação da ria. Os resultados obtidos pelo modelo sugerem reproduzir a circulação estuarina de dupla camada típica para esta região. No entanto esta é difícil de apreciar apenas com os resultados de correntes, pois encontra-se dissimulada pelo efeito oscilatório da maré. Para que fosse mais perceptível este tipo de circulação, seria necessário filtrar a maré dos resultados do modelo para obter a circulação residual.

5.2.2. Validação do modelo

As figuras seguintes mostram a comparação entre os resultados do modelo e os dados medidos, para o período de dezembro e de junho.

Na Figura 5.6 é comparado o nível obtido do Teste 1 com o nível do marégrafo de Vilagarcía e a sua correlação. O coeficiente de correlação entre as duas séries é de 0.99,

indicando que neste período existe uma elevada correlação, o modelo consegue reproduzir o nível medido em 99%.

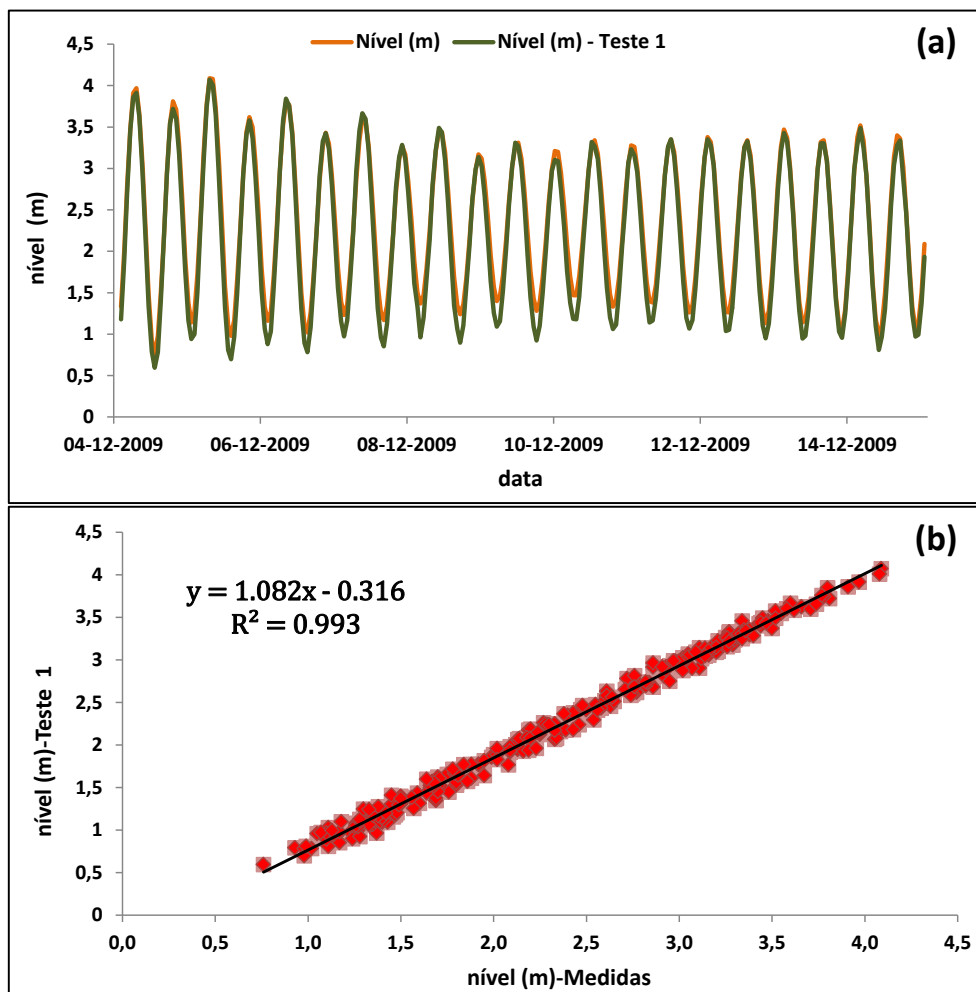


Figura 5.6: Comparação do nível de maré do modelo com as medidas do marégrafo de Vilagarcía, a), a correlação entre as séries, b) para o período de 4 a 14 de dezembro de 2009.

Atendendo à divisão da ria feita no capítulo dois, irá proceder-se à análise e comparação entre os resultados do modelo e dos CTDs³ da Tabela 5.2, de modo similar, ou seja, pelas influências que estes sofrem devido à sua localização, Figura 5.7. No conjunto de figuras, correspondendo à Figura 5.8 até à Figura 5.17, pode-se observar a distribuição horizontal e vertical da salinidade e da temperatura entre os dados medidos e os resultados obtidos pelo modelo. Para ajudar na análise do comportamento dos CTDs³ e do modelo, a Tabela 5.3 e Tabela 5.4, mostra de forma sucinta os valores da salinidade e temperatura, à superfície, nos 4 m e no fundo, assim como o respetivo bias, sendo este a diferença entre o valor previsto pelo

modelo e o observado, permitindo desta forma avaliar se o modelo está a sobrestimar ou subestimar as medidas observadas.

Tabela 5.2: Resumo das estações CTD que vão ser utilizados para as comparações entre as medidas e os resultados do modelo.

<i>CTD</i>	<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>	<i>Data</i>	<i>Hora</i>
A0	-8,96	42,48	09-12-2009	15:00
A0			21-06-2010	15:00
A2	-8,9	42,61	10-12-2009	07:00
A3	-8,83	42,61	09-12-2009	17:00
A4	-8,91	42,56	10-12-2009	08:00
A4			22-06-2010	06:00
A5	-8,85	42,57	09-12-2009	17:00
A6	-8,82	42,59	09-12-2009	17:00
A7	-8,86	42,51	09-12-2009	16:00
A7			21-06-2010	16:00
A8	-8,93	42,50	09-12-2009	15:30
A9	-8,98	42,52	10-12-2009	08:30

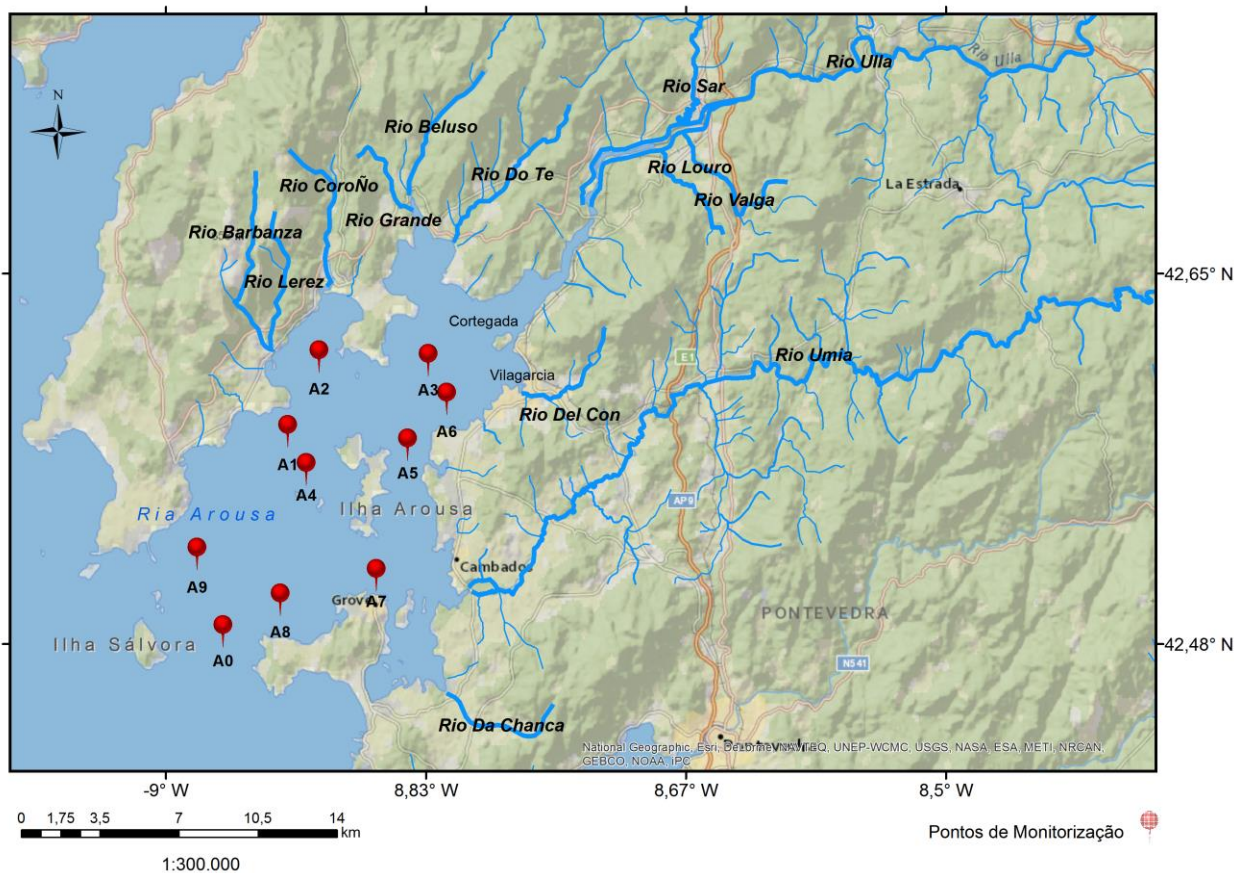


Figura 5.7: Posição das estações CTD na ria de Arousa, identificação dos rios que desaguam na ria de Arousa que podem afetar a salinidade medida pelos CTDs³.

Consoante a posição das estações CTD os valores medidos podem vir a ser afetados, em menor ou maior grau, pelas plumas dos vários rios que desaguam na ria de Arousa, em particular pelo rio Ulla e Umia. Podemos verificar essa influência ao analisar os dados em detalhe onde se pode observar uma variação horizontal e vertical da salinidade.

Destacasse, as estações A3, A2, A4 e A9, que devido à sua posição, são as que mais sofrem com os efeitos dos rios da margem norte, especialmente do rio Ulla, que em conjunto com mistura promovida pela maré, apresentam uma grande estratificação com a haloclina entre a cota dos 2 a 4 metros. E no caso das estações A7, A8 e A0, que sofrem a influência de rios menos caudalosos, como a do rio Umia e dos restantes rios presentes na margem Sul, os CTDs³ correspondentes possuem uma estratificação mais fraca. Para o período de Dezembro, o valor mais baixo de salinidade e de temperatura à superfície é registado na estação A3, a que mais sofre com a influência da pluma do rio Ulla, sendo de 6,1 psu e de 13,1°C, enquanto o mais alto foi de 33 psu e 14,8 °C na estação A8, Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Resumo da variabilidade da salinidade e temperatura das estações CTD e do modelo (Teste 1), e o BIAS associado, para os dias 9 e 10 de Dezembro, na superfície, 4 m e no fundo.

<i>Estação CTD</i>	<i>Profundidade (m)</i>	<i>Salinidade (psu)</i>	<i>Salinidade (psu)-Teste 1</i>	<i>BIAS</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Temperatura (°C)-Teste1</i>	<i>BIAS</i>
SUPERFÍCIE							
A0	0,071	31,95	32,59	0,63	14,66	14,57	-0,09
A2	0,076	13,21	15,71	2,50	13,43	14,47	1,05
A3	0,017	6,14	11,64	5,50	13,37	14,26	0,88
A4	0,015	23,13	23,19	0,07	13,85	14,35	0,49
A5	0,021	22,92	23,23	0,32	14,00	14,10	0,10
A6	0,071	10,36	19,56	9,20	13,65	14,13	0,48
A7	0,041	25,08	31,01	5,93	14,19	14,47	0,28
A8	0,03	33,03	34,31	1,28	14,80	14,67	-0,13
A9	0,064	23,16	31,99	8,83	13,77	14,38	0,61
4 m							
A0	4,024	32,75	33,50	0,75	14,82	14,67	-0,15
A2	4,106	30,76	29,51	-1,25	14,49	14,50	0,00
A3	4,075	27,40	29,18	1,79	14,31	14,35	0,05
A4	4,114	31,94	33,06	1,12	14,65	14,76	0,11
A5	4,144	31,91	31,06	-0,85	14,84	14,49	-0,35
A6	4,081	29,61	30,82	1,21	14,44	14,51	0,07
A7	4,081	31,34	33,55	2,21	14,64	14,77	0,12
A8	4,076	33,05	34,38	1,33	14,80	14,77	-0,03

A9	4,151	32,28	32,60	0,32	14,79	14,53	-0,25
FUNDO							
A0	40,593	34,44	35,27	0,84	15,27	15,06	-0,21
A2	12,978	33,44	35,06	1,61	14,99	15,09	0,10
A3	7,2	29,12	32,85	3,74	14,73	14,70	-0,02
A4	30,035	34,24	35,31	1,08	15,22	15,12	-0,10
A5	14,787	33,25	35,13	1,88	15,14	15,08	-0,06
A6	11,937	32,95	35,01	2,07	14,96	15,07	0,11
A7	13,606	32,72	34,34	1,62	14,78	14,85	0,07
A8	29,829	33,88	35,26	1,38	15,07	15,07	0,00
A9	31,665	34,49	35,30	0,82	15,32	15,11	-0,22

Tabela 5.4: Resumo da variabilidade da salinidade e temperatura das estações CTD e do modelo (Teste 1), e o BIAS associado, para os dias 21 e 22 de junho, na superfície, 4 m e no fundo.

<i>Estação CTD</i>	<i>Profundidade (m)</i>	<i>Salinidade (psu)</i>	<i>Salinidade (psu)-Teste 1</i>	<i>BIAS</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Temperatura (°C)-Teste1</i>	<i>BIAS</i>
SUPERFÍCIE							
A0	0,29	35,67	35,57	-0,10	14,34	13,66	-0,68
A4	0,16	35,19	35,32	0,13	15,18	14,92	-0,26
A7	0,20	34,84	34,81	-0,04	17,60	16,87	-0,73
4 m							
A0	4,11	35,71	35,64	-0,08	13,54	12,87	-0,67
A4	4,08	35,64	35,45	-0,19	13,64	14,31	0,67
A7	4,18	35,40	35,24	-0,16	15,19	15,66	0,47
FUNDO							
A0	42,20	35,73	35,67	-0,06	12,33	12,03	-0,29
A4	31,34	35,77	35,66	-0,11	12,66	12,57	-0,09
A7	15,49	35,62	35,51	-0,10	14,00	14,21	0,21

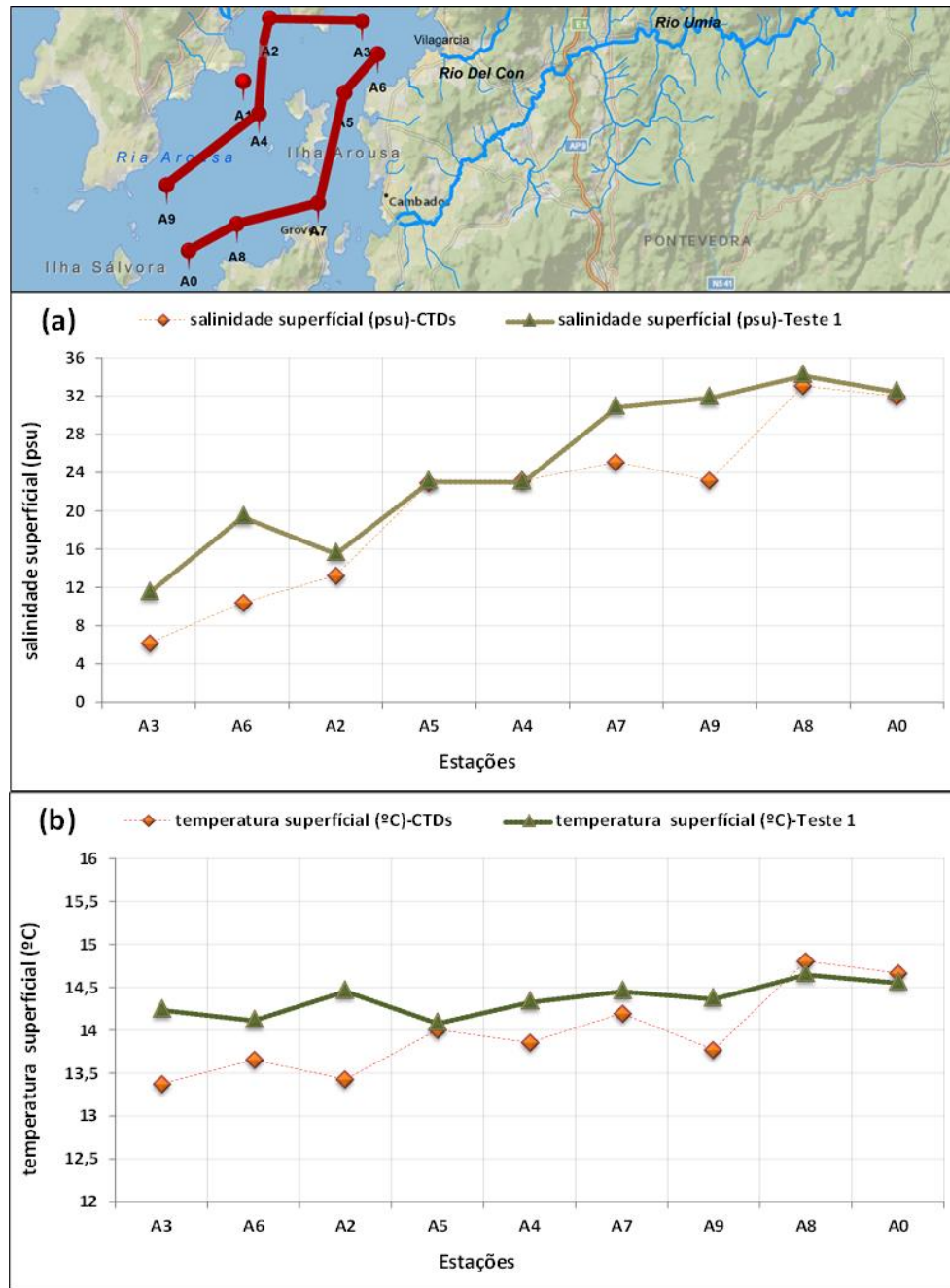
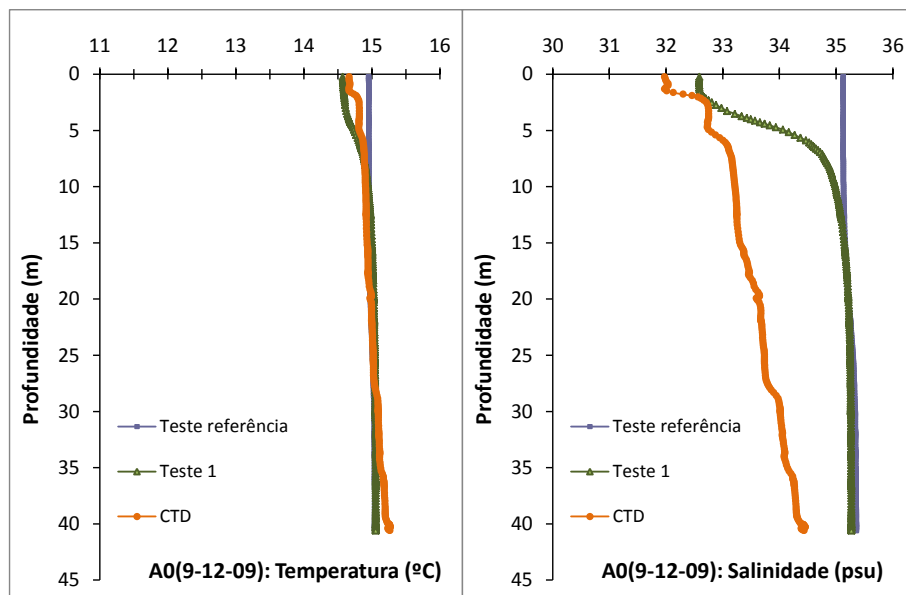


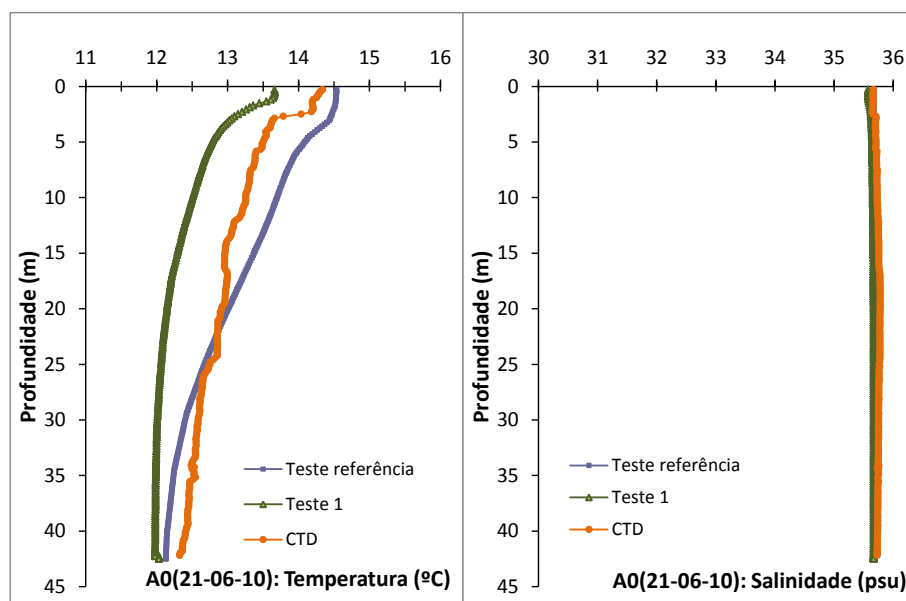
Figura 5.8: Variabilidade horizontal da salinidade superficial a) e temperatura superficial b), comparação entre as medidas em cada estação de CTD com o modelo (Teste 1), para os dias 9 e 10 de dezembro.

A Figura 5.8 evidencia a forte influência do rio Ulla, para o período de dezembro, na distribuição da salinidade e da temperatura superficial, os valores mais baixos são registados pelas estações que ficam mais perto da foz deste rio. Os resultados do modelo (Teste 1) acompanham a tendência das medidas, apresentando o maior bias para as estações A6 e A9, para a salinidade, e A2 e A9 para a temperatura, Tabela 5.3.

As figuras seguintes comparam os perfis medidos pelos CTDs³ com os resultados dos modelos do Teste 1 e de referência, pretende-se para além de avaliar o comportamento do modelo que as modificações introduzidas no Teste 1 se tenham traduzido em melhorias dos resultados.



(a)



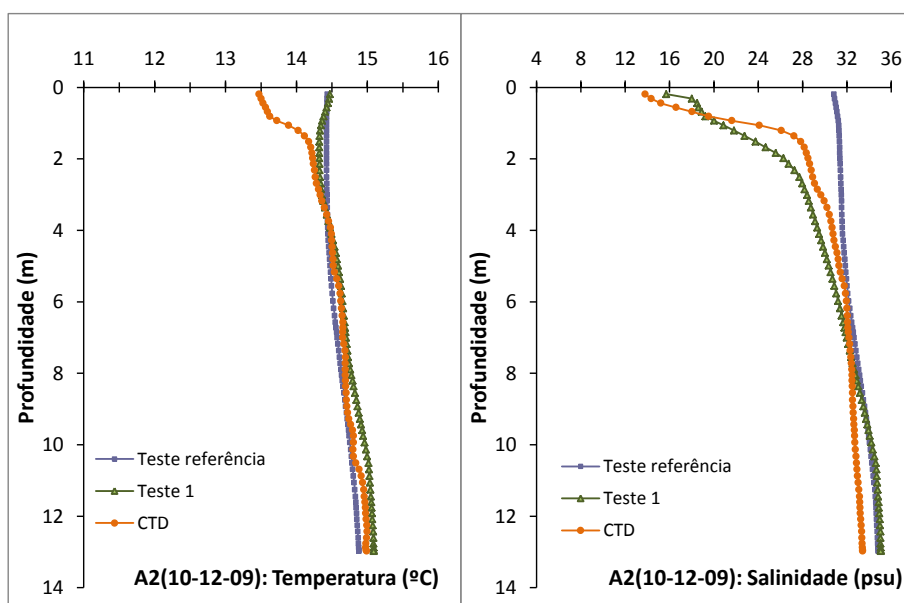
(b)

Figura 5.9: CTD A0 – dezembro (a); junho (b).

O CTD A0, situado na embocadura da ria, ver Figura 5.7, para o dia 9 de dezembro, mostra uma coluna de água praticamente homogénea, com uma salinidade em volta dos 32 psu, Figura 5.9. Devido à sua localização encontra-se influenciado pelas condições da

plataforma adjacente. As plumas de água doce dos rios a sul e os ventos predominantes SW, podem estar na origem da fraca estratificação.

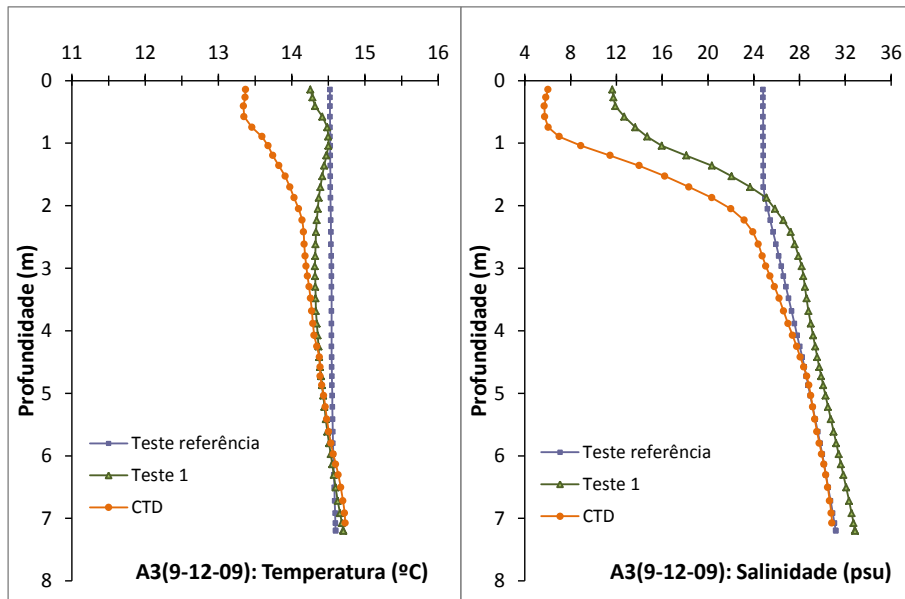
O modelo (Teste 1) consegue reproduzir o perfil de temperatura como de salinidade de forma razoável, nomeadamente à superfície, pelos 2 m começa a divergir em aproximadamente 2 psu. Para o dia 14 de junho, as medidas mostram que a estratificação da coluna de água é dada pela temperatura. Os resultados do modelo conseguem reproduzir esta tendência, no entanto para o Teste 1 verifica-se que modelo subestima a temperatura em aproximadamente 0.6 psu.



(a)

Figura 5.10: CTD A2, dezembro.

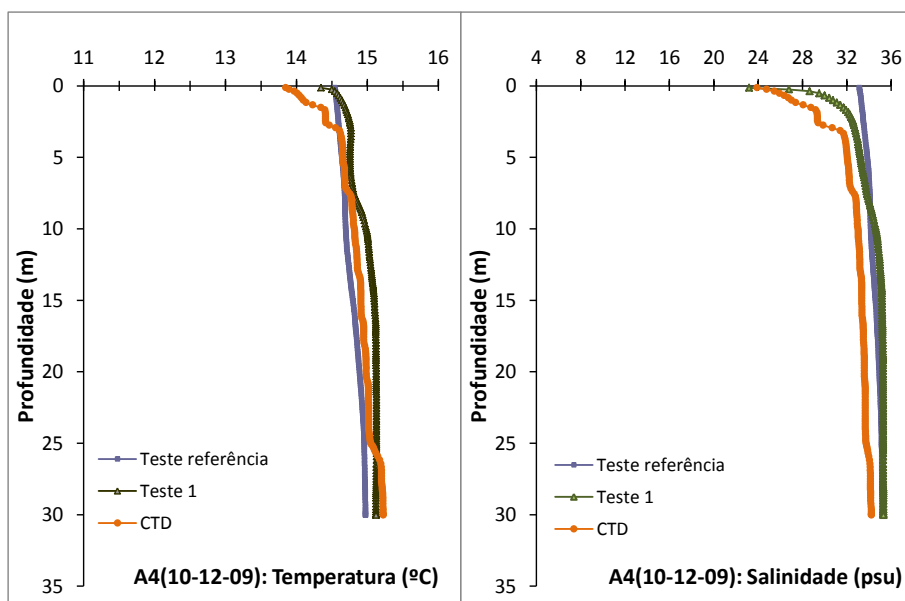
O CTD A2 está localizado na parte norte numa zona central, sujeito às descargas de água doce dos rios Ulla e dos rios mais pequenos, ver Figura 5.7. Para o dia 10 de dezembro, Figura 5.10, os resultados do teste 1 acompanham o perfil medido de salinidade, em termos de temperatura o modelo subestima em 1°C na superfície.



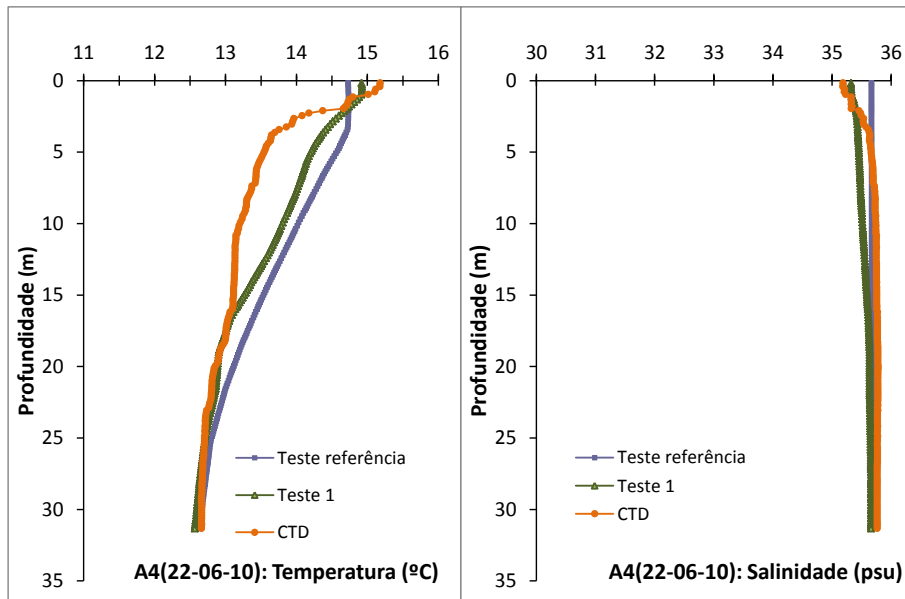
(a)

Figura 5.11: CTD A3, dezembro (a).

Localizado na parte superior da ria, o CTD A3, sofre a forte influência das descargas dos rios, nomeadamente do rio Ulla. Para o dia 9 de dezembro, Figura 5.11, apresenta uma forte estratificação com a haloclina pelos 2 m. Os valores de salinidade à superfície são muito baixos, da ordem dos 6 psu, aumentando depois a salinidade nas camadas de fundo. Os resultados do Teste 1 acompanham bem essa tendência do perfil de salinidade, no entanto à superfície sobrestima o valor em 5.5 psu. Quanto ao perfil de temperatura, o Teste 1 consegue seguir a tendência, mas na superfície sobrestima em 0.9°C.



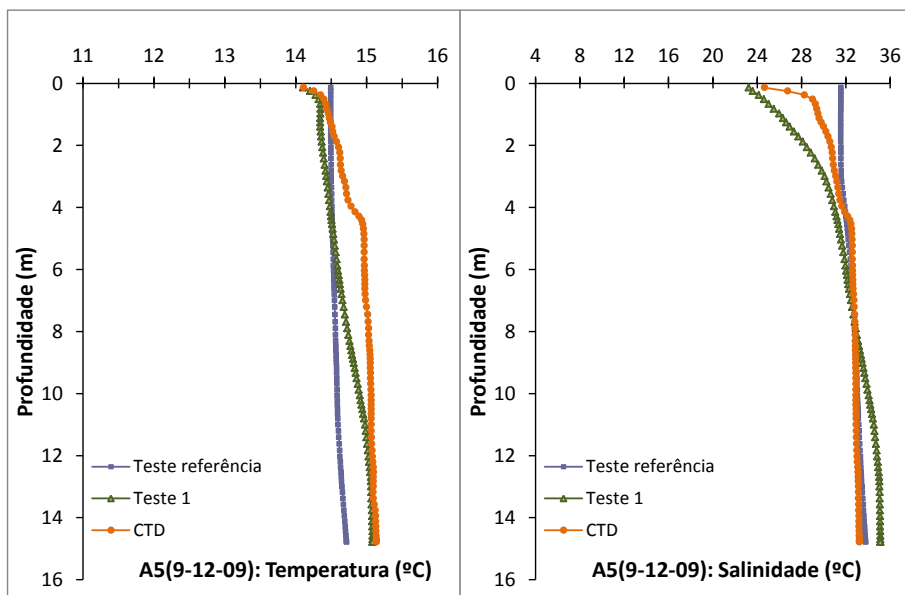
(a)



(b)

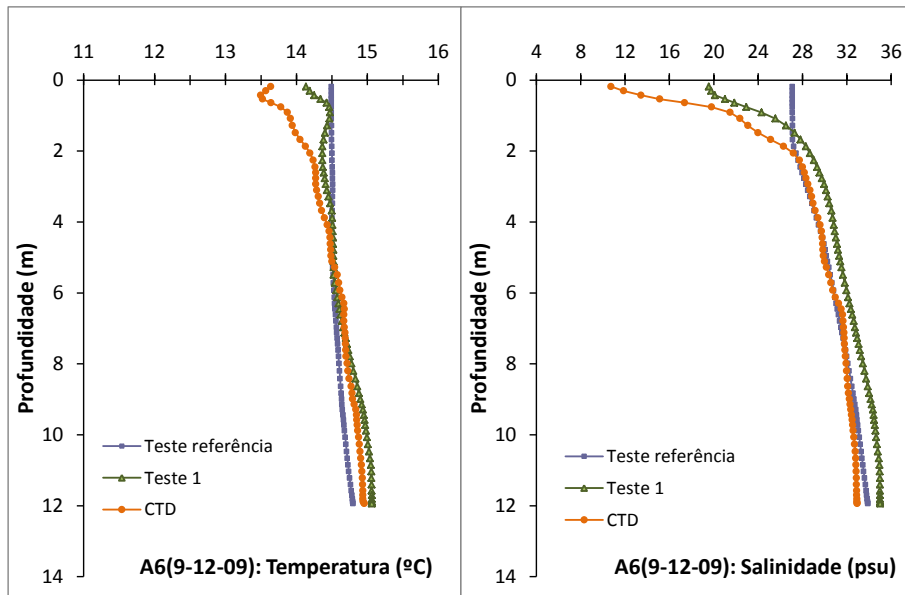
Figura 5.12: CTD A4, dezembro (a); junho (b).

O CTD A4, localizado no canal central da ria, encontra-se sujeito às influências, tanto das descargas dos rios como das condições de plataforma. Em geral o modelo (Teste 1) acompanha as medidas, tanto no perfil de salinidade como de temperatura para o dia 10 de dezembro. Para o dia 22 de junho, ambos os testes mostram uma boa concordância com as medidas, apresentando uma fraca estratificação.



(a)

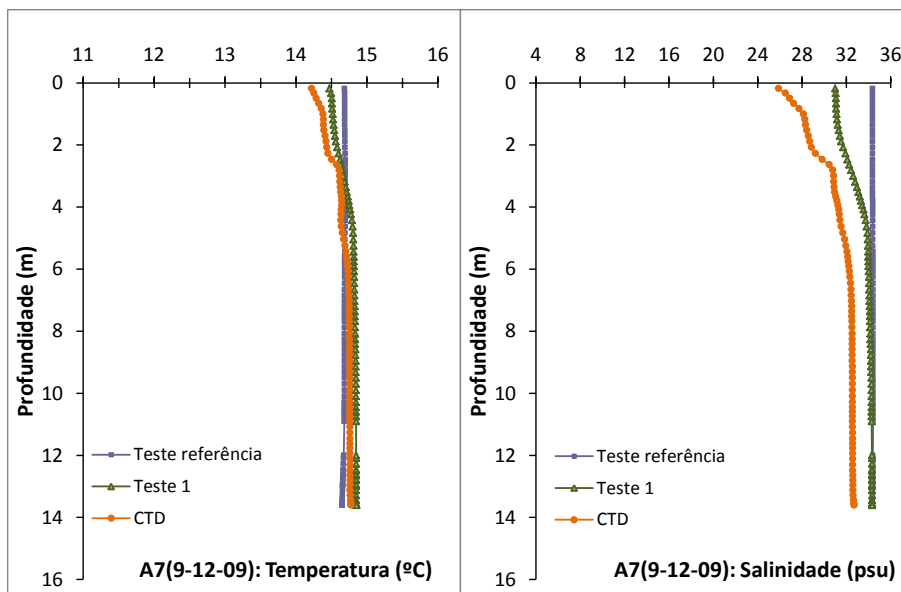
Figura 5.13: CTD A5, dezembro (a).



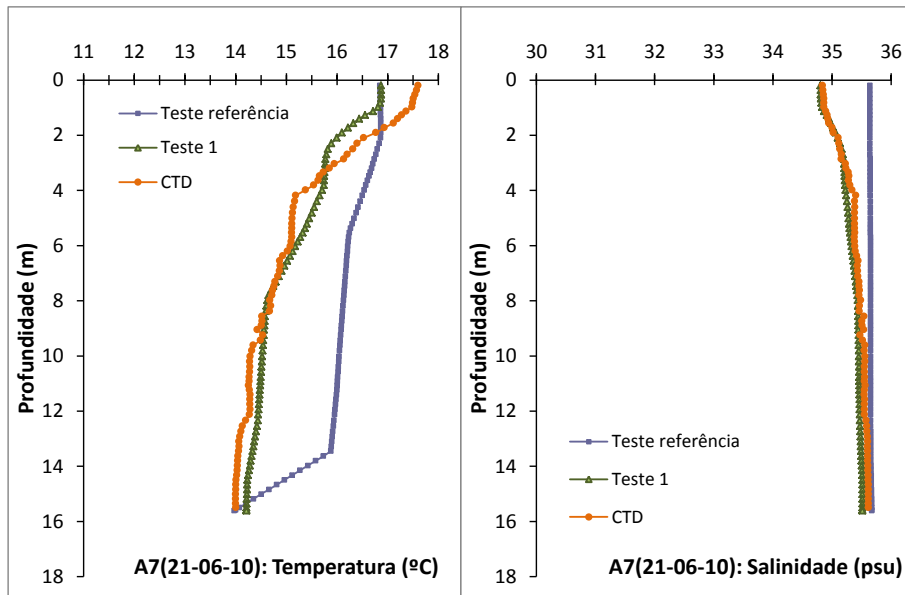
(a)

Figura 5.14: CTD A6, dezembro (a).

Os CTDs³ A5 e A6, Figura 5.13 e Figura 5.14 encontram-se localizados na parte sul da ria, na parte interna, ambos sujeitos a plumas de água doce vindas de terra e ao efeito de maré enchente. O CTD A6 mostra-se mais afetado por estas plumas, com valores de salinidade à superfície para o dia 9 de dezembro de 10 psu. O modelo (Teste 1), consegue acompanhar a tendência nos dois perfis de CTD, no entanto para o CTD A6, sobrestima a salinidade na superfície em 9.2 psu, sugerindo que nesse local se encontra alguma descarga de água doce significativa que não tenha sido contabilizada no modelo.



(a)

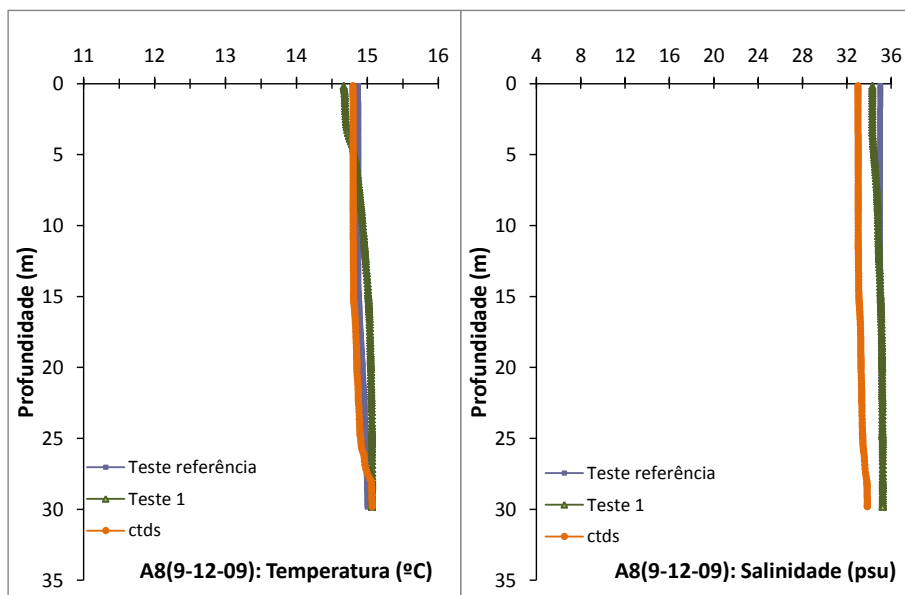


(b)

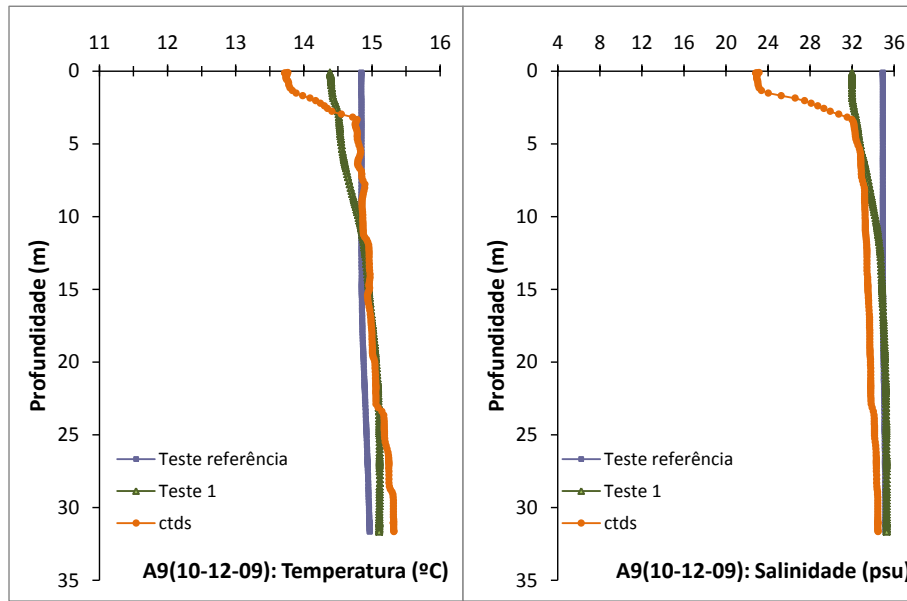
Figura 5.15: CTD A7, dezembro (a); junho (b).

Localizado na parte média do lado sul da ria, o CTD A7, Figura 5.7, encontra-se sobre a influência dos rios Umia e Chanca, este ultimo de menor dimensão. Pela Figura 5.15, no geral verifica-se que os resultados do modelo (Teste 1) apresentam uma boa concordância com os perfis de salinidade e temperatura. No entanto para o dia 9 de dezembro o modelo, mais uma vez sobrestima a salinidade à superfície em aproximadamente 6 psu.

Para o dia 21 de junho, o Teste 1 acompanha os perfis medidos de temperatura e salinidade. Na superfície verifica-se que o modelo subestima a temperatura em 0.6°C, sugerindo que possa haver algum problema nos fluxos de calor.



(a)

Figura 5.16: CTD A8, dezembro (a).

(a)

Figura 5.17: CTD A9, dezembro (a).

Os CTDs³ A8 e A9, situados na parte sul e norte respectivamente, ambos na zona de influência oceânica. Para o dia 9 de dezembro, A8 mostra um comportamento similar ao A0, uma coluna de água homogênea, enquanto que em A9 já apresenta estratificação, com haloclinas nos 2 e 4 m. O CTD A9 sofre o efeito do rio Ulla e das plumas que possam vir da plataforma adjacente. Os resultados do Teste 1 no geral conseguem reproduzir os perfis de ambos, de temperatura e salinidade, no entanto para o perfil A9 sobrestima a salinidade em aproximadamente 8 psu.

As figuras anteriores, para estes períodos de simulação, evidenciam que o caudal do rio de Ulla é o que mais contribui na distribuição da salinidade na ria. O rio Umia possui uma influência mais fraca ainda que significativa, afetando principalmente a margem sul da ria. As plumas dos tributários adquirem no período chuvoso, uma importância mais local, como se pode observar por exemplo nas estações A5, A6 e A7. É visível que a estratificação da ria de Arousa, em períodos chuvosos, será mais forte quanto maiores forem as descargas de água doce, e mais fraca para pequenas descargas de água doce.

No geral em todas as estações de CTD, foi verificado que os resultados do Teste 1 melhoravam significativamente os resultados do Teste de referência, nomeadamente para a de salinidade no mês de Dezembro. No entanto o modelo continua apresentar certas limitações,

tanto nos perfis de salinidade como nos perfis de temperatura. As diferenças entre os resultados do modelo e as medidas, podem estar relacionadas com diversos problemas inerentes à configuração, nomeadamente às condições de fronteira. A água doce pode não estar devidamente contabilizada, tanto no modelo do nível 2, como no modelo da ria de Arousa. Para os perfis de temperatura, o bias pode estar relacionado, por um lado com a temperatura da água dos rios, que é difícil de validar devido a falta de medidas, por outro com os fluxos de calor e a resolução do modelo atmosférico ser de 4 km. Outros problemas que interferem na qualidade dos resultados, é a resolução da malha da ria de Arousa ser demasiado grosseira para reproduzir adequadamente a dinâmica complexa desta ria, e o facto de não se cumprir a regra de nesting recomendada de 1/3 entre os modelos, estas questões estão condicionadas pelo custo computacional associado.

Apesar das limitações mencionadas, pode-se concluir que as modificações introduzidas evidenciaram um resultado bastante positivo na performance do modelo.

Capítulo 6. Conclusão

No presente trabalho foi aplicado um modelo hidrodinâmico, baroclínico, para estudar o efeito das plumas de água doce no estuário da ria de Arousa. O principal objetivo é melhorar as previsões da hidrodinâmica para esta ria pelo facto de ser uma zona altamente sensível.

Adicionalmente foi aplicado um modelo hidrológico para simular o caudal proveniente dos vários afluentes da região adjacente.

Usa-se como ponto de partida a que se considera como solução de referência a configuração do modelo operacional da MeteoGalicia²². As melhorias introduzidas nestes resultados do presente trabalho provaram ser eficazes, conseguindo haloclinas e termoclinas mais definidas e por conseguinte mais próximas da realidade. Apesar de algumas limitações comprova-se que o modelo é capaz de reproduzir a estratificação mantida pela salinidade devido aos eventos de *run-off*.

Outro aspecto importante, analisado neste trabalho é a importância das plumas de água doce no controle dos padrões de salinidade dentro da ria, interferindo de forma significativa na dinâmica e na biogeoquímica do estuário como já é conhecido. Tornando-se por isso essencial uma correta contabilização das descargas de água doce no meio. O modelo SWAT mostrou ser uma ferramenta de grande utilidade, principalmente quando não há medidas disponíveis nas embocaduras dos rios. Este modelo permitiu reproduzir de forma aceitável a variabilidade das épocas secas e húmidas, no entanto possuindo uma tendência para subestimar os picos de caudal.

Embora a ria de Arousa apresente uma hidrodinâmica complexa, o modelo hidrodinâmico mostrou habilidade para reproduzir a circulação estuarina descrita na literatura, de um estuário parcialmente misturado com circulação em 2 camadas, típico da região das Rias Baixas. Desta forma este trabalho contribui para melhorar o sistema de previsão hidrodinâmica para a ria de Arousa, sem aumentar proibitivamente os custos computacionais.

Este sistema com os modelos devidamente calibrados e com soluções em tempo real e capacidade de previsão tornam-se numa importante ferramenta de gestão destas áreas. Para além de que é extrema utilidade para estudar o comportamento das rias, permitindo a elaboração de diversos cenários.

Como sugestão para trabalho futuro, considera-se importante avaliar o grau de influência que o vento provoca no transporte das plumas de água doce, tanto no interior da rias como na região oceânica costeira. Assim como a utilização dos resultados deste modelo em outro tipo de aplicações, como por exemplo em processos bio-geoquímicos. Outro

trabalho de grande interesse para a ria de Arousa, seria incluir um modelo de qualidade da água, onde também fossem contabilizadas as descargas das águas residuais, de modo a que permitisse avaliar o seu impacto no meio e na fisiologia dos bivalves.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOT R.H., LANE D.W., SINCLAIR M. J., SPRUING, T.A., (1996). “Lasers chart the waters of Australia’s Great Barrier Reef”, in *Proceedings of the Society of Photographic Instrumentation Engineers* Vol. 2964, pp. 72-90.
- ADCROFT, A., HILL, C., & MARSHALL, J. (1997). Representation of topography by shaved cells in a height coordinate ocean model. *Monthly Weather Review*, 125(9), 2293-2315.
- ALVAREZ-SALGADO, X. A., J. GAGO, B. M. MIGUEZ, M. GILCOTO, AND F. F. PÉREZ. (2000). “Surface Waters of the NW Iberian Margin: Upwelling on the Shelf versus Outwelling of Upwelled Waters from the Rías Baixas”, in *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 51, pp. 821-837.
- ARNOLD, J. G., WILLIAMS, J. R., & MAIDMENT, D. R. (1995). Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(2), 171-183.
- BECKERS, P., (1991). CAD Technology in Optimal Design in Computer Aided Optimal Design: Structural and Mechanical Systems. NATO ASI Series, Series F: Computer Systems Sciences, vol.27, Ed. Carlos Mota Soares, Springer-Verlag, 1987, second edition 1991.
- BLANTON, J. O., ATKINSON, L. P., DE CASTILLEJO, F. F., & MONTERO, A. L. (1984). Coastal upwelling off the Rias Bajas, Galicia, northwest Spain I: hydrographic studies. *Rapp. PV Reun. Cons. Int. Explor. Mer*, 183, 79-90.
- BLANTON, J. O., TENORE, K. R., CASTILLEJO, F., ATKINSON, L. P., SCHWING, F. B., & LAVIN, A. (1987). The relationship of upwelling to mussel production in the rias on the western coast of Spain. *Journal of Marine Research*, 45(2), 497-511.
- CAMERON W.M., PRITCHARD D.W., (1963). “Estuaries”, in “HILL, M. N. *The Sea. Vol. 2*” (Ed.). Edição Harvard University Press - ISBN 9780674017283, Vol. 2, pp. 306-324
- CARRACEDO P., BALSEIRO C.F., PENABAD E., GÓMEZ B., PÉREZ-MUÑUZURI V., (2005). “One year validation of wave forecasting at Galician coast.”, in *Journal of Atmospheric and Ocean Science* Vol. 10, No. 4, December 2005, pp. 407-419.
- CASTRO, C. G., F. F. PÉREZ, X. A. ALVAREZ-SALGADO, G. ROSÓN, A. F. RÍOS, (1994). “Hydrographic conditions associated with the relaxation of an upwelling event off the Galician coast (NW Spain)”, in *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, No. C3, pp. 5135-5147.
- COSTA, P., GÓMEZ, B., VENÂNCIO, A., PÉREZ, E., MUÑUZURI, V., (2012). Using the Regional Ocean Modeling System (ROMS) to improve the sea surface temperature from MERCATOR Ocean System. *Advanced in Spanish Physical Oceanography. Sci. Mar.* 76 S1.
- DECYK, V. K., NORTON, C. D., & SZYMANSKI, B. K. (1997, April). Expressing object-oriented concepts in Fortran 90. In *ACM SIGPLAN Fortran Forum* (Vol. 16, No. 1, pp. 13-18). ACM.
- DYER, K.R. (1997). *Estuaries: a physical introduction*. 2nd edition. John Wiley and Sons/Wiley & Sons: Chichester. ISBN 0-471-9741-4. xiv, 195 pp

- FERNANDES, R. M., (2005). Modelação Operacional no estuário do Tejo. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia do Ambiente Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, pp. 95.
- FERNANDES, R. M., (2001) Modelação de Derrames de Hidrocarbonetos. Trabalho de final de curso (Licenciatura em Engenharia do Ambiente). Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- FLATHER, R. A. (1976). {A tidal model of the northwest European continental shelf}. *Mem. Soc. R. Sci. Liege*, 10(6), 141-164.
- FIÚZA, A. F. G., M. HAMANN, I. AMBAR, G. DEL RIO, N, GONZÁLEZ, J. CABANAS (1998). “Water masses and their circulation off western Iberia during May 1993”, in *Deep-Sea Research*. 45, pp. 1127 – 1160.
- FRAGA F., (1981). “Upwelling off the Galician Coast, Northwest Spain”, in *Coastal Upwelling*, American Geophysical Union, Washington DC, USA, pp. 176-182.
- FRAGA F., MARGALEF R., (1979). “LAS RÍAS GALEGAS”, in “*Estudio y Explotación del Mar en Galicia*” (Ed.). Edição Universidad de Santiago de Compostela - ISBN 9788-4719-113-77, pp. 101-121.
- KJERFVE, B., & KNOPPERS, B. A. (1991). Tidal choking in a coastal lagoon. *Tidal hydrodynamics*, 169-181.
- LEENDERTSEE J. AND LIU S., (1978). A three-dimensional turbulent energy model for non-homogeneous estuaries and coastal sea systems, in: Nihoul J. (Ed.). *Hydrodynamics of Estuaries and Fjords*, Elsevier, Amsterdam, pp. 387-405.
- LARGE, W. G., & POND, S. (1981). Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *Journal of physical oceanography*, 11(3), 324-336.
- LEITÃO, P., (2003). Integração de Escalas e de Processos na Modelação do Ambiente Marinho. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia do Ambiente. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, pp.279.
- MATEUS M., RIFLET, G., CHAMBEL, P., FERNANDES, L., FERNANDES, R., JULIANO, M., CAMPUZANO, F., DE PABLO, H., AND NEVES, R. (2012). An operational model for the West Iberian coast: products and services. *Ocean Science Discussion*, 9, 1651–1689.
- MARTINS, F., (1999) Modelação Matemática Tridimensional de Escoamentos Costeiros e Estuarinos usando uma Abordagem de Coordenada Vertical Genérica. Thesis (Ph. D.) - Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- MARTINS, F., LEITÃO, P., SILVA, A., & NEVES, R. (2001). 3D modelling in the Sado estuary using a new generic vertical discretization approach. *Oceanologica Acta*, 24, 51-62
- MCCLAIN, C. R., S. CHAO, L. P. ATKINSON, J. O. BLANTON, AND F. DE CASTILLEJO, (1986). “Winddriven upwelling in the vicinity of Cape Finisterre, Spain”, in *Journal of Geophysical Research*, Vol. 91, No. C7, pp. 8470–8486.
- MCCLAIN, C. R., S. CHAO, L. P. ATKINSON, J. O. BLANTON, AND F. DE CASTILLEJO, (1986). “Winddriven upwelling in the vicinity of Cape Finisterre, Spain”, in *Journal of Geophysical Research*, Vol. 91, No. C7, pp. 8470–8486.
- MIRANDA, R., BRAUNSCHWEIG, F., LEITAO, P., NEVES, R., MARTINS, F., & SANTOS, A. (2000). MOHID 2000, a coastal integrated object oriented model. *Southampton, UK: WIT Press, Hydraulic Engineering Software VIII*.

- MOURIÑO, C., F. FRAGA & F. FERNÁNDEZ PÉREZ, (1984). Hidrografía de la Ría de Vigo, 1979-80. Cuadernos da Área de Ciencias Mariñas, Seminario de Estudos Galegos, 1, Edicións do Castro, A Coruña, pp. 91-103.
- NEITSCH, S. L., ARNOLD, J. G., KINIRY, J. R., WILLIAMS, J. R., & KING, K. W. (2005). Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2000. *Texas, USA*.
- OTERO P, RUIZ-VILLARREAL M, PELIZ A (2008). “Variability of river plumes off Northwest Iberia in response to wind events”, in *Journal Marine Syst* 72 (1–4) pp. 238–255.
- OTERO, P., RUIZ-VILLARREAL, M., & PELIZ, A. (2009). River plume fronts off NW Iberia from satellite observations and model data. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, 66(9), 1853-1864.
- OTTO, L., (1975). Oceanography of the Ría de Arosa (NW Spain). Koninklijk Ned. Meteor. Inst. Mededelingen en Verhandelingen, 96, pp. 210.
- OTTO, C. J., YASSIR, N. J., (1997). “Hydrodynamic assessment of fault seal integrity: ramifications for exploration and production”, in *Conference Paper*, pp. 129-132 - *Geofluids II: contributions to the Second International Conference on Fluid Evolution, Migration and Interaction in Sedimentary Basins and Orogenic Belts*, Belfast, N. Ireland, Mar. 10-14, 1997.
- PELIZ, Á., ROSA, T. L., SANTOS, A. M. P., & PISSARRA, J. L. (2002). Fronts, jets, and counter-flows in the Western Iberian upwelling system. *Journal of Marine Systems*, 35(1), 61-77.
- PREGO, R., FRAGA F., (1992). “A simple model to calculate the residual flows in a Spanish Ria. Hydrographic consequences in the Ria of Vigo”, in *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 34, pp. 603-615.
- PRITCHARD, D.W., (1952). “Estuarine hydrography.”, in “*H.E. Landsberg, Advances in Geophysics*” (Ed.). Edição Academic Press Inc, New York, Vol. 1, pp. 243-280.
- RÍOS A., PEREZ F., FRAGA F., (1992). “Water masses in the upper and middle North Atlantic Ocean east of the Azores”, in *Journal Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, Vol 39, no. 3-4, pp. 645-658.
- ROSÓN G., X.A, ÁLVAREZ-SALGADO AND FF. PÉREZ (1997). “A Non stationary box model to determine residual fluxes in partially mixed estuary, based on both thermohaline properties: application to the ria de arousa (nw spain)”. *Estuar. Coast. Shelf sci.*, 44: pp. 249-262
- SANTOS, A. M. P., PELIZ, A., DUBERT, J., OLIVEIRA, P. B., ANGÉLICO, M. M., & RÉ, P. (2004). Impact of a winter upwelling event on the distribution and transport of sardine (< i> *Sardina pilchardus*</i>) eggs and larvae off western Iberia: a retention mechanism. *Continental Shelf Research*, 24(2), 149-165
- SHARPLEY, A. N., & WILLIAMS, J. R. (1990). EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation. *Technical Bulletin-United States Department of Agriculture*, (1768 Pt 1).
- SRINIVASAN, R., & ARNOLD, J. G. (1994). INTEGRATION OF A BASIN-SCALE WATER QUALITY MODEL WITH GIS1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 30(3), 453-462

- STEFAN, H. G., & PREUD'HOMME, E. B. (1993). STREAM TEMPERATURE ESTIMATION FROM AIR TEMPERATURE¹. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 29(1), 27-45
- TILSTONE G.H., FIGUEIRAS F.G., FRAGA F., (1994). "Upwelling-downwelling sequences in the generation of red tides in a coastal upwelling system", in *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 112, pp. 241-253.
- TORRES, R., & BARTON, E. D. (2007). Onset of the Iberian upwelling along the Galician coast. *Continental shelf research*, 27(13), 1759-1778.
- WOOSTER W.S., BAKUN A., MCLAIN D.R. (1976). "The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic.", in *Journal of Marine Research*, Vol. 34, No. 2, pp. 131-141.

ANEXOS

Anexo A

Relatórios das condições meteorológicas para os períodos de estudo, dezembro de 2009 e de junho de 2010, elaborados pela Meteogalicia²².



XUNTA DE GALICIA
CONSELLERÍA DE MEDIO AMBIENTE,
TERRITORIO E INFRAESTRUTURAS

METEOGALICIA
Informe climatolóxico
Mes de decembro 2009

1.- Resumo

Mes chuvioso e frío en toda a Comunidade

O mes de Decembro estivo caracterizado pola gran variabilidade no tempo. Esta variabilidade foi ocasionada pola circulación meridional, que deixou períodos de sur, con temperaturas altas e chuvias, moi seguidos de entradas de aire frío con tempo máis seco pero temperaturas baixas. Estes últimos períodos predominaron sobre os primeiros para deixar unha media de temperatura baixa para o mes de decembro. Porén os intensos períodos de chuva dos días máis cálidos deixaron un mes húmido en toda a Comunidade. Os primeiros 10 días do mes corresponderon a circulación do sur, e polo tanto estiveron caracterizados por temperaturas suaves e chuvias en xeral en toda a Comunidade. O período máis chuvioso foi o correspondente ós días 5 e 6, particularmente nesta última data. Os días 10 e 11 tivo lugar unha transición entre a situación de sur e a situación de norte, e non entanto disfrutamos de tempo seco, soleado e con altas temperaturas, que localmente chegaron a rozar ou superar os 20°C. A partir do 12 o tempo seguiu sendo seco, pero as temperaturas descenderon bruscamente ata o día 16, cando a chegada dunha fronte dende o sur ocasionou chuvias e un período de temperaturas algo máis suaves. O choque destas dúas masas de aire provocou a aparición de neve en cotas baixas na madrugada do 16. Na xornada do 18 novamente chegou aire frío e seco a Galicia que tivo a súa culminación na madrugada do 20, cando os termómetros descenderon en puntos de alta montaña por debaixo dos -10°C, rexistrándose xeadas en xeral en toda a Comunidade. Na xornada do 21 tivemos un novo choque de masas de aire: frío preexistente e máis cálido que chegaba dende o sur, provocando polo tanto a aparición de neve tamén en cotas baixas. A partir do 22 a circulación foi en xeral do sur, co conseguinte aumento nas temperaturas e aparición de chuvias, que nos días 27, 28 e 29 foron particularmente intensas. Nesta última xornada a inestabilidade atmosférica propiciou a formación dun tornado nos arredores de Santiago de Compostela. A cota de neve descendeu por debaixo dos 1000 metros de altura novamente na derradeira xornada do ano.

Temperaturas:

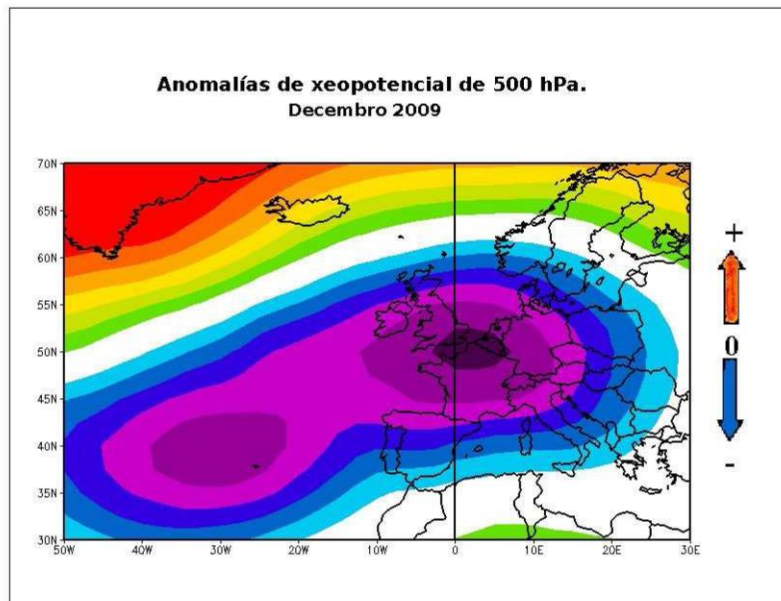
As temperaturas foron baixas en xeral en toda a Comunidade. A media das temperaturas quedou marcada polo tanto polos períodos fríos que vivimos na segunda e terceira semana do mes. Apareceron as xeadas que non tiveramos en Novembro, destacando os 11 días con temperaturas mínimas por debaixo dos 0°C en Lugo.

Chuvias:

Ó contrario que as temperaturas, o mes no tocante ás precipitacións queda marcado polos períodos de circulación do sur, que foron particularmente chuviosos. Destacan os valores de chuva acadados os días 5 e 6 e tamén os do período 27, 28 e 29.



3.2.- Anomalías de xeopotencial a 500 hPa





1.- Resumo

Mes chuvioso, con temperaturas próximas á media, pero con moita variabilidade.

Dende un punto de vista meteorolóxico o mes de xuño estivo caracterizado pola variabilidade. Esencialmente as situación sinópticas desenvolvéronse en tres etapas diferentes. Os primeiros 4 días do mes comezamos cunha situación anticiclónica, moi estable, caracterizada polos ceos despexados e as altas temperaturas, con máximas rondando ou superando os 30°C en moitos lugares. Entre os días 4 e 6 este anticiclón foi perdendo influencia e as temperaturas comezaron a baixar. Entre os días 7 e 12 un centro de baixas presións situouse moi preto de Galicia deixando 5 xornadas de chuvia e baixas temperaturas. A este respecto destacan as xornadas do 9 e 10 de xuño no norte de Lugo, onde puntualmente se rexistraron valores superiores os 200 l/m² en 48 horas con valores máximos que en 12 horas superaron os 100 l/m². Estas intensas precipitacións estiveron ocasionadas polo feito de que as baixas presións quedaron estacionarias no Cantábrico rodeadas por dous anticiclóns, un deles no Atlántico e outro no Mediterráneo, polo que constantemente estiveron chegando frentes de chuvias ás áreas cantábricas. A partir do día 13 o tempo comezou a mellorar debido á entrada do anticiclón atlántico. A semana entre o 13 e o 20 o tempo foi seco, pero a posición do anticiclón propiciou a entrada de aire frío, de forma que as temperaturas foron baixas para e época do ano, sempre con máis nubes no norte que no sur. Entre os días 20 e 22 as altas presións situáronse ó norte da península Ibérica de forma que o tempo continuou sendo seco, pero desta volta comezou a chegar unha masa de aire procedente do sur da Península, de forma que as temperaturas subiron de xeito moi importante, quedando esta situación practicamente estacionaria ata finais do mes. Co paso dos días esta situación de calor derivou en inestabilidade atmosférica que propiciou a formación de treboadas no interior entre o 23 e o 27, particularmente importantes na provincia de Lugo na xornada do 25, cando se rexistraron 22 l/m² en Lugo capital en soamente 10 minutos.

Temperaturas:

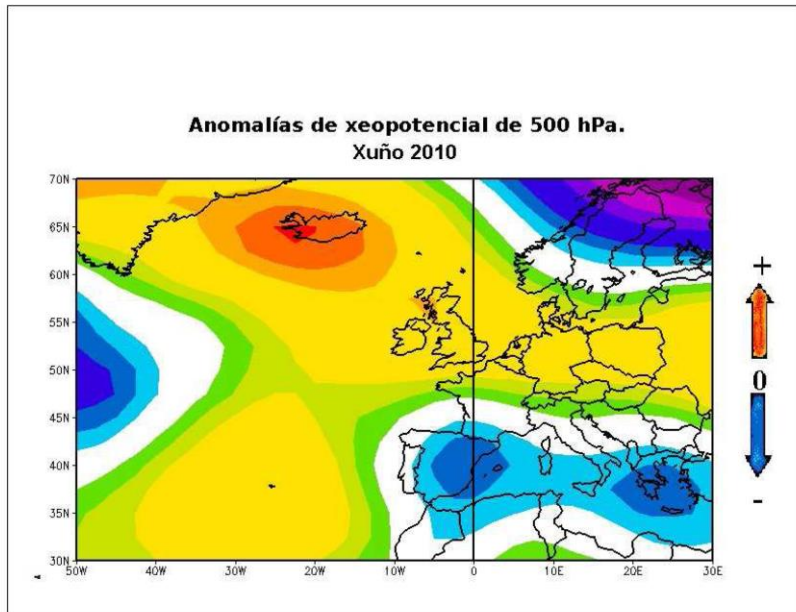
As temperaturas estiveron en xeral moi preto dos valores agardados nun mes de xuño, aínda que cunha importante variabilidade. A primeira semana e os derradeiros 10 días as temperaturas foron claramente superiores ás normais, mentres que entre os días 7 e 20 os valores estiveron ben por debaixo. Neste sentido podemos destacar por exemplo que en Santiago nese período soamente o día 18 e o propio día 20 se superaron os 20°C de temperatura máxima.

Chuvias:

As chuvias foron normais na franxa Atlántica e superiores no resto, destacando especialmente neste aspecto o norte de Lugo. Porén, o número de días de chuvia está lixeiramente por debaixo do normal, rexistrándose en xeral entre 4 e 5 días de chuvia durante o mes, cando o normal serían en torno ós 7, demostrando que as chuvias tiveron en xeral unha intensidade superior á normal.



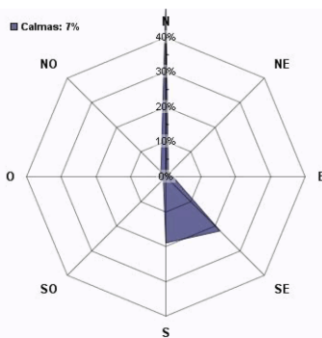
3.2.- Anomalías de xeopotencial a 500 hPa



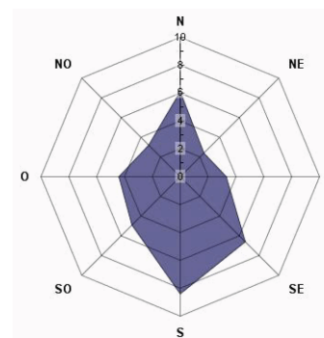
	VV	GT	TMED	TMAX	TMIN	HRMED	HRMAX	HRMIN
	m/s	m/s	°C	°C	°C	%	%	%
01/12/2009	4.4	11.1	12.0	14.9	7.5	92	94	90
02/12/2009	5.2	14.9	13.4	14.6	11.2	81	93	68
03/12/2009	1.8	8.2	11.2	13.5	9.4	80	91	56
04/12/2009	4.7	13.1	12.6	14.7	10.6	82	92	74
05/12/2009	9.1	19.6	15.7	16.6	14.3	89	93	86
06/12/2009	5.8	19.5	13.9	14.4	10.5	90	94	85
07/12/2009	4.9	16.3	12.6	14.5	9.6	81	94	62
08/12/2009	5.7	13.6	14.6	15.4	13.4	74	87	68
09/12/2009	2.7	9.4	15.2	16.6	13.6	83	92	72
10/12/2009	4.3	8.1	13.1	16.3	9.8	90	95	78
11/12/2009	6.5	9.9	10.2	15.9	6.3	88	95	66
12/12/2009	8.4	16.1	11.1	14.6	8.6	73	83	62
13/12/2009	11.3	20.5	9.7	12.1	6.6	61	73	46
14/12/2009	5.3	16.5	7.0	9.7	5.2	66	79	53
15/12/2009	4.4	11.0	5.8	10.3	2.7	69	86	44
16/12/2009	7.0	14.7	6.9	10.9	4.7	80	93	52
17/12/2009	5.8	15.7	9.1	11.1	4.9	77	91	55
18/12/2009	7.7	18.4	6.8	11.3	3.7	70	87	47
19/12/2009	5.9	12.6	5.8	9.4	3.8	67	81	50
20/12/2009	5.6	9.7	4.0	8.5	0.3	69	90	37
21/12/2009	7.6	20.6	10.9	15.2	4.0	83	93	50
22/12/2009	2.9	9.3	8.6	10.4	5.0	85	93	66
23/12/2009	5.3	10.3	7.7	10.4	4.6	79	94	61
24/12/2009	5.3	22.2	10.0	10.9	5.8	79	91	66
25/12/2009	6.3	10.5	6.1	11.0	2.5	82	96	62
26/12/2009	4.5	12.1	7.4	12.4	3.9	72	86	48
27/12/2009	4.4	25.9	9.4	15.9	5.9	77	90	60
28/12/2009	10.2	25.1	15.9	16.7	14.0	87	93	78
29/12/2009	7.4	16.5	14.7	15.8	11.5	81	90	72
30/12/2009	6.0	19.6	12.3	12.9	9.5	78	92	68
31/12/2009	3.6	17.9	8.5	11.2	6.9	83	94	65

Resumo mensual:

Velocidade vento media: 5.80 m/s
Velocidade refacho media: 25.85 m/s
Temperatura media: 10.61 °C
T° Máxima absoluta: 16.74 °C
T° Mínima absoluta: 2.48 °C
T° Máxima media: 13.30 °C
T° Mínima media: 7.70 °C
Humidade Relativa media: 79.00 %
Humidade Máxima media: 90.00 %
Humidade Mínima media: 63.00 %



Rosa dos ventos



Velocidade media do vento por sector

	<i>Datos Superficie</i>				<i>Datos Fondo</i>			
	TMax°C	TMin°C	SMax	SMin	TMax°C	TMin°C	SMax	SMin
01/12/2009	14.23	12.01	21.23	18.86	14.83	12.83	23.64	18.70
02/12/2009	13.23	12.11	18.80	15.19	13.94	12.55	19.24	14.68
03/12/2009	13.84	12.37	16.65	14.64	14.49	12.52	16.54	13.79
04/12/2009	14.02	12.47	16.87	15.41	14.75	12.80	18.79	13.72
05/12/2009	13.78	12.76	16.47	15.14	13.81	13.16	16.65	12.88
06/12/2009	14.05	13.19	15.13	11.48	14.10	13.70	12.82	6.72
07/12/2009	14.00	12.67	11.94	10.44	14.22	13.85	13.44	7.57
08/12/2009	13.27	12.59	10.44	6.79	14.23	14.18	15.10	8.03
09/12/2009	13.56	12.72	6.78	6.32	14.29	14.15	16.06	8.46
10/12/2009	14.37	13.07	7.01	6.26	14.56	14.26	16.72	8.97
11/12/2009	14.74	13.09	8.63	6.51	14.91	14.53	18.39	9.49
12/12/2009	14.83	13.19	7.34	6.59	15.02	14.71	20.15	9.90
13/12/2009	14.54	11.82	7.72	6.80	15.16	14.55	20.94	10.22
14/12/2009	15.07	12.14	8.89	7.34	15.48	14.39	23.35	10.68
15/12/2009	14.98	11.64	10.83	8.80	15.51	13.92	25.34	11.25
16/12/2009	14.54	11.44	12.52	10.71	15.56	13.90	27.05	11.87
17/12/2009	14.90	11.25	14.03	12.50	15.39	13.44	29.04	12.69
18/12/2009	14.72	11.08	14.90	13.83	15.03	12.87	28.25	13.16
19/12/2009	14.66	11.09	16.04	14.51	15.17	13.08	28.40	14.01
20/12/2009	14.48	11.11	16.80	15.52	15.10	14.01	28.90	14.83
21/12/2009	14.86	11.20	17.97	16.60	15.15	13.87	29.38	16.01
22/12/2009	13.98	11.31	18.08	16.55	14.23	13.88	29.06	17.18
23/12/2009	14.16	11.71	18.67	17.66	14.30	14.10	28.70	17.98
24/12/2009	14.01	11.87	19.05	18.14	14.23	13.88	28.95	19.02
25/12/2009	14.25	10.54	19.64	18.10	14.17	13.83	28.03	20.18
26/12/2009	14.26	11.50	19.94	18.37	14.51	14.16	27.67	20.25
27/12/2009	14.20	10.78	20.05	18.40	14.41	12.54	30.18	20.46
28/12/2009	12.64	11.19	19.91	18.75	12.85	11.68	30.02	20.70
29/12/2009	12.93	11.94	19.86	10.27	13.19	12.81	26.97	19.30
30/12/2009	12.94	11.48	10.76	4.83	13.35	12.92	27.36	18.91
31/12/2009	13.14	10.57	6.49	4.86	13.55	13.23	26.20	18.50

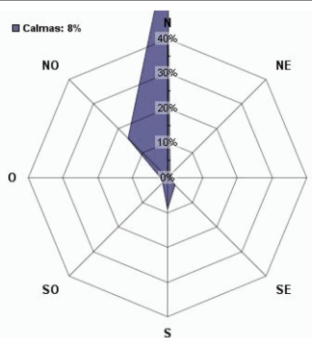
Resumo mensual:	Anomalia Densidade Fondo:	Kg/m3
	Anomalia Densidade Superficie:	9.76 Kg/m3
	Conductividade Fondo:	23.33 mS/cm
	Conductividade Superficie:	17.09 mS/cm
	Presión Columna de Auga:	6.77 dBar
	Salinidade Fondo:	18.46
	Salinidade Superficie:	13.46
	Temperatura Fondo:	14.18 °C
	Temperatura Superficie:	13.07 °C

Informe mensual da estación **Plataforma de Cortegada** Data: **01/06/2010** Sección: **Atmósfera** WMO: **6201038**

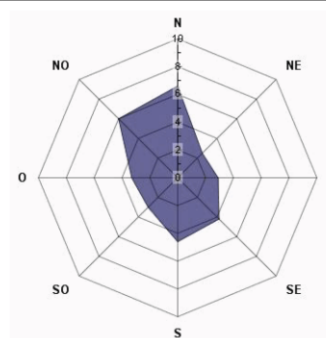
	VV m/s	GT m/s	TMED °C	TMAX °C	TMIN °C	HRMED %	HRMAX %	HRMIN %
01/06/2010	6.3	14.2	20.4	23.5	18.0	-9999	-9999	-9999
02/06/2010	6.1	11.4	21.7	28.0	17.0	-9999	-9999	-9999
03/06/2010	5.5	9.9	18.8	21.7	16.4	-9999	-9999	-9999
04/06/2010	4.5	11.9	18.6	23.3	15.7	-9999	-9999	-9999
05/06/2010	5.8	10.3	18.0	19.5	16.3	-9999	-9999	-9999
06/06/2010	4.8	8.7	17.9	22.5	13.7	-9999	-9999	-9999
07/06/2010	4.4	11.4	16.3	18.4	13.0	-9999	-9999	-9999
08/06/2010	4.6	10.7	15.6	16.9	14.5	-9999	-9999	-9999
09/06/2010	3.7	8.7	15.8	17.5	14.7	-9999	-9999	-9999
10/06/2010	2.7	9.1	15.9	18.0	14.3	-9999	-9999	-9999
11/06/2010	2.8	8.6	16.5	17.6	15.6	-9999	-9999	-9999
12/06/2010	3.8	12.0	17.1	20.1	14.3	-9999	-9999	-9999
13/06/2010	7.0	14.2	16.9	18.9	14.5	-9999	-9999	-9999
14/06/2010	7.6	17.3	16.0	18.2	13.8	-9999	-9999	-9999
15/06/2010	6.7	16.7	16.7	19.1	13.6	-9999	-9999	-9999
16/06/2010	6.8	12.5	16.2	18.4	13.8	-9999	-9999	-9999
17/06/2010	6.6	14.0	15.9	19.6	11.6	-9999	-9999	-9999
18/06/2010	8.1	14.1	17.5	22.6	13.9	-9999	-9999	-9999
19/06/2010	5.2	11.8	17.5	20.8	14.5	-9999	-9999	-9999
20/06/2010	6.5	16.4	18.3	22.4	14.7	-9999	-9999	-9999
21/06/2010	5.3	12.6	18.5	25.1	13.9	-9999	-9999	-9999
22/06/2010	4.3	9.6	18.8	23.4	14.8	-9999	-9999	-9999
23/06/2010	2.1	6.3	18.2	21.6	16.0	77	88	59
24/06/2010	3.0	8.4	16.5	17.8	15.4	89	93	82
25/06/2010	2.8	8.5	17.3	19.1	15.5	86	93	76
26/06/2010	6.0	12.8	20.0	25.0	17.1	77	89	62
27/06/2010	7.7	12.9	21.3	26.2	17.6	69	80	54
28/06/2010	6.0	12.7	21.4	26.2	17.8	67	75	54
29/06/2010	7.2	12.4	21.6	27.4	17.4	62	75	40
30/06/2010	6.1	12.6	21.5	28.0	16.9	67	81	44

Resumo mensual:

Velocidade vento media: 5.30 m/s
Velocidade refacho media: 17.25 m/s
Temperatura media: 18.09 °C
T° Máxima absoluta: 28.00 °C
T° Mínima absoluta: 11.62 °C
T° Máxima media: 21.60 °C
T° Mínima media: 15.20 °C
Humedade Relativa media: -9999.00 %
Humedade Máxima media: -9999.00 %
Humedade Mínima media: -9999.00 %



Rosa dos ventos



Velocidade media do vento por sector

	<i>Datos Superficie</i>				<i>Datos Fondo</i>			
	TMax°C	TMin°C	SMax	SMin	TMax°C	TMin°C	SMax	SMin
01/06/2010	19.79	17.98	34.13	22.27	19.58	17.41	34.87	29.05
02/06/2010	20.22	17.43	33.92	24.56	18.91	17.02	34.95	30.20
03/06/2010	20.57	17.05	34.35	25.81	20.00	16.52	35.16	31.89
04/06/2010	22.39	18.82	33.28	24.64	19.98	18.50	34.39	31.79
05/06/2010	20.34	17.81	34.22	25.59	19.26	17.43	35.10	33.82
06/06/2010	18.94	16.77	34.84	27.32	17.61	15.46	35.62	34.54
07/06/2010	18.10	16.37	34.85	27.90	18.01	15.55	35.51	33.76
08/06/2010	18.03	17.36	34.09	26.76	17.98	17.35	34.24	30.72
09/06/2010	17.87	17.14	33.85	24.89	17.69	17.22	34.37	32.04
10/06/2010	17.96	17.04	33.87	23.70	17.82	17.21	34.39	28.22
11/06/2010	17.73	16.74	32.21	18.17	17.51	17.03	33.95	25.39
12/06/2010	18.97	16.58	32.55	17.44	17.98	16.54	34.10	21.94
13/06/2010	17.35	16.14	34.28	16.85	17.04	15.64	35.12	20.24
14/06/2010	16.61	15.01	34.92	18.47	16.19	14.82	35.01	20.92
15/06/2010	16.82	14.63	34.86	18.41	16.30	14.45	35.20	20.81
16/06/2010	16.28	14.48	34.84	18.29	15.82	14.35	35.25	23.63
17/06/2010	16.62	14.09	34.89	19.48	16.18	14.11	35.34	23.27
18/06/2010	17.21	14.19	35.54	20.87	16.51	14.06	35.28	26.62
19/06/2010	16.89	14.82	34.73	22.02	15.97	14.28	35.23	26.73
20/06/2010	17.45	14.63	34.70	23.95	16.21	14.02	35.50	30.75
21/06/2010	17.04	14.19	34.00	24.01	16.54	13.77	35.54	31.16
22/06/2010	18.39	14.68	33.92	25.75	17.75	14.10	35.67	32.10
23/06/2010	19.91	16.89	32.75	24.63	19.40	15.45	34.75	31.15
24/06/2010	20.24	17.98	32.52	23.82	19.68	16.22	34.14	30.82
25/06/2010	20.79	18.65	31.54	22.05	20.40	18.03	32.63	29.92
26/06/2010	21.00	17.94	29.41	25.07	20.07	16.82	32.81	30.24
27/06/2010	19.64	16.79	29.85	25.24	19.30	15.44	33.50	32.21
28/06/2010	20.83	15.62	30.35	27.37	19.46	14.59	33.87	32.14
29/06/2010	19.65	15.73	30.05	28.98	18.75	14.89	33.78	32.76
30/06/2010	19.65	15.31	30.77	29.19	18.60	14.26	34.32	33.58

Resumo mensual:	Anomalia Densidade Fondo:	24.16 Kg/m3
	Anomalia Densidade Superficie:	21.13 Kg/m3
	Conductividade Fondo:	42.46 mS/cm
	Conductividade Superficie:	38.79 mS/cm
	Presión Columna de Auga:	4.72 dBar
	Salinidade Fondo:	33.13
	Salinidade Superficie:	29.42
	Temperatura Fondo:	16.71 °C
	Temperatura Superficie:	17.47 °C