

INSTITUTO DA ÁGUA

Limites de Jusante dos Estuários Portugueses

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

Maio de 2001

Índice

1	Introdução	3
1.1	Trabalho prévio	4
2	Rationale do estudo.....	5
2.1	Importância ecológica dos estuários.....	5
2.2	Porque são os estuários zonas ecologicamente importantes?	6
3	Limites de um Estuário	9
3.1	Critérios de delimitação	9
3.2	O Limite de montante	10
3.3	O limite de Jusante.....	10
3.3.1	Dinâmica de uma ROFI	11
3.3.2	O que são as propriedades da água do mar?.....	13
3.4	Critério usar para definir o limite de jusante dos estuários.....	14
4	O Estuário do Tejo.....	15
4.1	Dados de Campo no Tejo.....	17
4.1.1	Resultados do projecto "Estudo Ambiental do Estuário do Tejo" relevantes para definir o limite de jusante do estuário	17
4.1.2	Salinidade na plataforma exterior do estuário.....	28
4.1.3	Circulação hidrodinâmica na embocadura e plataforma adjacente ao estuário 32	
4.2	Limite de jusante do estuário do Tejo	37
4.3	Conclusões	38
5	Outros Estuários Portugueses	40
5.1	Estuário do Minho	42
5.1.1	Descrição do estuário.....	42
5.1.2	Resultados de modelação	45
5.1.3	Limite de Jusante	51
5.2	Estuário do Lima	55
5.2.1	Dados de Campo	55
5.2.2	Resultados do modelo.....	57
5.2.3	Limite de jusante do estuário.....	64
5.3	Estuário do Cávado.....	65

5.3.1	Descrição do estuário e zona adjacente	65
5.3.2	Dados de Campo	67
5.3.3	Modelação.....	69
5.4	Estuário do Ave	76
5.4.1	Morfologia da bacia e do estuário.....	76
5.4.2	Dados de campo	77
5.4.3	Limite de Jusante do estuário do rio Ave	79
5.5	Estuário do Leça	81
5.5.1	Caracterização	81
5.5.2	Modelação Matemática	83
5.5.3	Resultados das simulações	83
5.5.4	O Limite de Jusante do Estuário.....	92
5.6	Estuário do Douro	93
5.6.1	Descrição do estuário.....	93
5.6.2	Resultados de modelação	95
5.6.3	Traçadores lagrangeanos.....	99
5.6.4	Limite de Jusante	101
5.7	A Ria de Aveiro	103
5.7.1	Dados disponíveis	104
5.7.2	Implementação do modelo	104
5.7.3	Validação do Modelo	106
5.7.4	Circulação média na Ria de Aveiro – a aproximação da maré M_2 e dos caudais médios	118
5.7.5	Distribuições espaciais	121
5.7.6	Limite de Jusante	128
5.8	Estuário do Mondego	130
5.8.1	Introdução	130
5.8.2	Dados de campo	130
5.8.3	Modelação.....	132
5.8.4	Limite a jusante	140
5.9	Estuário do Sado.....	141
5.9.1	Descrição do Estuário	141

5.9.2	Resultados da Modelação	146
5.9.3	Limite de Jusante	151
5.10	Estuário do Rio Mira	153
5.10.1	Bacia Hidrográfica	153
5.10.2	O Estuário	153
5.10.3	Regime de caudais do Rio.....	154
5.10.4	Modelo	155
5.10.5	Resultados das simulações	159
5.10.6	Limite Inferior do Estuário.....	165
5.11	Estuário do Arade	168
5.11.1	Morfologia	168
5.11.2	Resultados da Modelação	169
5.11.3	Limite de Jusante	176
5.12	Estuário do Guadiana	178
5.12.1	Descrição do Estuário	178
5.12.2	Resultados da Modelação	179
5.12.3	Limite de Jusante	184
6	Conclusões.....	188
7	Referências	189

Sumário

Neste documento são descritos os limites de jusante dos estuários Portugueses e a metodologia utilizada na sua definição, baseada no conhecimento dos processos de transporte obtido por modelação matemática. A modelação matemática constitui a forma mais eficiente de tomar decisões sobre sistemas cuja caracterização exhaustiva não é possível por insuficiência de dados de campo.

Esta metodologia foi validada no estuário do Tejo, para o qual estão disponíveis dados de campo suficientes para validar os critérios de delimitação usados neste trabalho. A metodologia, os critérios e os resultados da aplicação no estuário do Tejo foram objecto de um documento específico, integrado na documentação que suportou o pedido de derrogação do tratamento secundário do Sistema de Saneamento da Costa do Estoril, apresentado por Portugal à Comissão Europeia, nos termos do estabelecido no artigo 8º, nº 5, da Directiva 91/271/CEE – Tratamento de Águas Residuais Urbanas. Aliás com a realização do presente trabalho dá-se cumprimento ao disposto no artigo 2º, nº 12 da mesma Directiva comunitária. Por uma questão de uniformização e de facilidade de consulta da demonstração da metodologia utilizada, foi decidido incluir o caso do estuário do Tejo também neste documento.

Em termos de circulação hidrodinâmica podemos considerar cinco zonas na embocadura do estuário: (i) Zonas que não são afectadas, nem afectam o estuário, (ii) zonas afectadas pelo estuário, mas que não o afectam (ROFI), (iii) zonas que são afectadas pelo estuário e que o podem influenciar durante a enchente, (iv) zonas que afectam o estuário em enchente, mas que não são afectadas pelo estuário e (v) zonas que estão claramente no interior do estuário. A distribuição de velocidades residuais na embocadura constitui uma das principais ferramentas para a identificação daquelas zonas.

Tendo como objectivo a protecção do estuário, o seu limite deve incluir a zona (iii). A zona (iv) deve ser vista com precaução, pois a sua eventual contaminação teria consequências directas sobre o estuário. No caso dos estuários Portugueses essas zonas são normalmente balneares e por isso estão sujeitas a critérios de gestão mais restritivos que os aplicados no interior destes. Por outro lado, por uma questão de consistência com outros critérios (qualquer critério que não seja baseado na circulação coloca-as fora do estuário) e porque daí não advêm consequências nefastas para o estuário, por serem zonas balneares, foi decidido considerá-las zonas exteriores.

Para cada estuário é descrita a sua morfologia, a circulação transiente e a circulação residual. O escoamento é ainda visualizado usando traçadores lagrangeanos. A partir destes é identificado o movimento das massas de água e o seu tempo de residência no interior do estuário. A análise conjunta dos estuários mostra que os do Tejo, do Sado e do Vouga são os mais complexos e com maiores tempos de residência. Nos outros estuários a relação largura/comprimento é muito menor e os tempos de residência são normalmente baixos (da ordem dos dias).

Todos os estuários apresentam jactos de vazante bem identificados. No entanto, só no caso do Tejo e do Sado é que a probabilidade da água desses jactos voltar a entrar no estuário é grande. No caso destes estuários os jactos de vazante saem para pequenas baías, ficando fora da acção directa da corrente da plataforma. No caso dos estuários com embocaduras mais estreitas e descarregando directamente na plataforma costeira a probabilidade de a água se afastar da embocadura o suficiente para não voltar a entrar é grande. Os estuários do Lima e do Guadiana são estuários de transição entre aqueles dois tipos.

Para o estuário do rio Ave não estão disponíveis dados suficientes para implementar o modelo (não foi possível encontrar dados de batimetria). No entanto, a configuração da embocadura e o tipo de rio, permitem definir o limite por extrapolação dos outros estuários estudados.

1 Introdução

A Directiva 91/271/CEE – Tratamento de Águas Residuais Urbanas - obriga os países da União Europeia a fornecer à Comissão os limites de jusante dos seus estuários, acompanhados de documentação que suporte a sua identificação. Esta exigência decorre, naturalmente, do facto de a Directiva impor às descargas de águas residuais urbanas diferentes graus de tratamento, consoante a dimensão das aglomerações envolvidas e a sensibilidade do meio receptor (águas doces, estuários e águas costeiras), no local onde se efectua a descarga.

A aplicação da Directiva recomenda que os limites dos estuários sejam definidos com base nas distribuições de salinidade, mas ela própria não define exactamente quais os critérios a seguir. A utilização exclusiva deste parâmetro pressupõe a existência de séries temporais longas em pontos e profundidades suficientes para caracterizar as distribuições espaciais e temporais de água doce. Nos estuários para os quais essas séries não existem, uma resposta com base exclusiva na salinidade exigiria períodos de medição de anos, para que as medidas fossem significativas.

Efectivamente a salinidade é um traçador que permite quantificar a taxa de diluição da água doce na água do mar, mas não é um critério objectivo para o estabelecimento dos limites de jusante. Com efeito, a salinidade tem variações sazonais e verticais importantes e por conseguinte a salinidade de um ponto só pode ser caracterizada através de séries temporais longas, incluindo diferentes regimes de descarga fluvial.

A salinidade é um traçador cuja distribuição depende do caudal fluvial e dos processos de transporte no estuário. Os processos de transporte são uma consequência directa da hidrodinâmica, a qual é efectivamente o processo que determina os limites do estuário. O uso da salinidade para caracterizar os processos de transporte deve-se ao facto de ser uma propriedade conservativa (só depende das descargas e dos processos de transporte), à facilidade da sua medição e ainda ao facto de ter gradientes menores que os de velocidade podendo por isso ser caracterizada a partir de medidas em menor número de pontos.

Assim, quando a delimitação dos estuários tinha que ser feita exclusivamente com base em dados de campo, o recurso à salinidade era o mais adequado (especialmente se já existiam dados históricos). Actualmente a modelação matemática é uma ferramenta barata, de divulgação generalizada e de implementação rápida em novos sistemas. O recurso a esta ferramenta permite a definição dos limites dos estuários recorrendo directamente à circulação

hidrodinâmica podendo contribuir para tornar os pressupostos da Directiva menos subjectivos.

1.1 TRABALHO PRÉVIO

Ainda no ano de 2000, no âmbito do processo de avaliação do pedido de derrogação do tratamento secundário para a Costa do Estoril, foi necessário definir o limite de jusante do Estuário do Tejo. O estuário do Tejo é um dos maiores da Europa e um dos mais bem estudados em Portugal. Para este estuário foi possível recolher informação sobre salinidades e espécies biológicas suficientes para caracterizar a influência marinha e dulçaquícola em cada região.

Para este estuário foi também simulada a hidrodinâmica e foram usados traçadores lagrangeanos para visualizar o movimento das massas de água. As conclusões retiradas a partir dos dados de campo e dos resultados do modelo eram semelhantes, demonstrando a possibilidade de definir os limites do estuário a partir dos resultados do modelo hidrodinâmico. A comparação dos dois métodos mostrou ainda que a definição dos limites do estuário a partir dos resultados do modelo é mais objectiva (e mais detalhada) do que a partir dos dados de campo.

Com base no caso do estuário do Tejo foi decidido adoptar a modelação matemática como metodologia da definição dos limites para todos os estuários. Esta metodologia tem benefícios em termos de prazos de execução, de custos, e ainda de capacidade de reutilização do produto deste trabalho em estudos futuros. Com efeito os modelos agora implementados são uma ferramenta de grande utilidade para gestão daqueles estuários e para a coordenação de estudos de monitorização que venham a ser implementados.

Por uma questão de abrangência e de simplicidade de consulta, foi decidido incluir também neste estudo a definição dos limites do estuário do Tejo. Por uma questão de homogeneidade as figuras descrevendo os resultados do modelo foram refeitas utilizando o software gráfico mais recente usado nos outros estuários.

2 Rationale do estudo

O rationale deste estudo assenta no reconhecimento da importância ecológica e fragilidade dos estuários. Estes aspectos são analisados neste capítulo e relacionados com os processos de transporte, as descargas de nutrientes e de substâncias cujas propriedades ou quantidades, as convertam em contaminantes dos estuários.

Neste capítulo é ainda descrito o conceito de ROFI (*Region of Fresh water Influence*) e é mostrado que estas regiões são exteriores aos estuários, embora devam as suas características biogeoquímicas às descargas de água doce provenientes destes.

2.1 IMPORTÂNCIA ECOLÓGICA DOS ESTUÁRIOS

Os estuários fornecem alimento e *habitat* a uma gama muito grande de organismos bênticos, epi-bênticos e pelágicos com papel determinante na cadeia alimentar marinha. Essa razão seria suficiente para serem reconhecidos como zonas ecologicamente importantes, que devem ser preservadas.

A água doce descarregada pelos rios transporta grandes quantidades de nutrientes e de matéria orgânica para os estuários, criando condições para o desenvolvimento dos produtores primários e conseqüentemente de uma cadeia alimentar muito activa.

Os estuários fornecem também protecção contra predadores. As vastas zonas de baixa profundidade – incluindo sapais – localizadas no interior dos estuários oferecem protecção à ictiofauna juvenil. O tempo de residência da água no seu interior cria condições para que os ovos de peixes pelágicos ecludam no interior do estuário, permitindo às larvas desenvolverem-se em zonas mais protegidas e mais ricas em alimento.

O rio descarrega também grandes quantidades de materiais finos que se depositam em grande parte no interior do estuário formando zonas de baixa profundidade e fundos vazosos normalmente ricos em matéria orgânica, que constituem habitat para grande variedade de espécies bênticas e para aves. Apesar da turbidez elevada, a baixa profundidade permite produção primária elevada, quer de carácter bentónico (em particular nas espraiados de maré) quer na própria coluna de água, como consequência da turbulência vertical.

Os estuários são também o caminho para espécies aquáticas que passam uma parte das suas vidas nos rios e outra parte no mar. Perturbações nos estuários têm necessariamente consequências negativas para as suas migrações.

2.2 PORQUE SÃO OS ESTUÁRIOS ZONAS ECOLOGICAMENTE IMPORTANTES?

Os estuários são zonas ecologicamente importantes porque um grande número de organismos depende deles (pelo menos durante parte das suas vidas), podendo perturbações neste compartimento ecológico ter repercussões noutros, no seu exterior.

O tempo de residência da água no interior do estuário é simultaneamente a causa da sua riqueza e da sua fragilidade. Em estuários ricos o tempo de residência da água é da ordem das semanas a meses. Este tempo permite a deposição da matéria particulada e o consumo de grande parte dos nutrientes descarregados directamente pelo rio ou provenientes da mineralização da matéria orgânica depositada nos sedimentos.

2.2.1.1 O problema da eutrofização

As partes mais ricas dos estuários são em geral eutróficas. Isto significa que a produção primária estimulada pela disponibilidade de nutrientes é intensa, disponibilizando carbono que é respirado em grande parte por organismos heterotróficos consumindo oxigénio. A matéria orgânica não assimilada por estes organismos é mineralizada por bactérias dando também origem ao consumo de oxigénio.

As regiões eutróficas são por isso zonas com grandes oscilações em termos de oxigénio dissolvido. O oxigénio consumido na respiração é proveniente da fotossíntese e das trocas entre a coluna de água e a atmosfera. Durante períodos de fotossíntese intensa há grande produção de oxigénio, podendo ocorrer períodos de sobre - saturação e a coluna de água exporta oxigénio para a atmosfera. Pelo contrário, durante períodos com baixa intensidade luminosa a coluna de água tende a ser importadora de oxigénio para satisfazer as necessidades devidas à respiração da grande densidade de organismos. Se o grau de eutrofização for excessivo, períodos com concentração de oxigénio abaixo do limite crítico podem ocorrer, levando à morte de espécies por asfixia. Este períodos são mais prováveis durante:

- Épocas quentes, quando a solubilidade do oxigénio é mínima,
- Durante a noite, quando não há fotossíntese,
- Durante períodos sem vento, quando as trocas com a atmosfera e a difusão na coluna de água são mínimas,
- Após períodos de descargas fluviais de matéria orgânica e amónia elevadas, que estimulam a actividade bacteriana.

Em Portugal estes períodos são mais prováveis no início do Outono quando há maior variabilidade do estado do tempo, com alternância de períodos de chuva e de sol. Os nutrientes lixiviados nos terrenos agrícolas em dias de chuva estimulam a produção primária nos dias de sol subsequentes e limitações de oxigénio podem ocorrer se esses períodos de produtividade elevada forem seguidos por dias de pouca luminosidade (novos dias de chuva).

2.2.1.2 A descarga de poluentes

O tempo de residência elevado da água no interior dos estuários e a acumulação de materiais finos nos fundos vazosos pode tornar os estuários sensíveis aos poluentes. Os produtos químicos tendem a ser adsorvidos pela matéria particulada e a sedimentar no interior do estuário nas zonas vazosas e de sapal, as quais são as mais importantes em termos de zonas de reprodução e de desenvolvimento de juvenis e para as aves.

A descarga de poluentes – especialmente se podem ser adsorvidos pelo material particulado – deve por conseguinte ser minimizada no interior do estuário (e nos rios).

2.2.1.3 Sobre o tempo de residência

O tempo de residência (ou de retenção) da água no interior do estuário é definido como o tempo necessário para que a água doce proveniente do rio chegue ao mar. O tempo de residência da água doce no estuário pode ser calculado como a razão entre o volume de água doce existente no interior do estuário e o caudal do rio. O cálculo do tempo de residência a partir de dados de campo requer o conhecimento da distribuição espacial de salinidade, a assumpção de que toda a água doce existente no interior do estuário é proveniente do rio e que a distribuição de salinidade não dependia do tempo na altura em que foi medida. Em sistemas sujeitos a maré, o volume de dados de salinidade deve ser suficiente para filtrar as oscilações por ela induzidas. Este conjunto de requisitos é dificilmente satisfeito e por isso o valor do tempo de residência calculado a partir da distribuição de salinidade deve ser tomado como indicativo.

Como referido mais atrás, quanto maior o tempo de residência, mais produtivo, mas também mais sensível deve ser o estuário à descarga de contaminantes (pois mais difícil é a sua descarga destes produtos para o mar).

O tempo de residência foi durante muito tempo um dos padrões de comparação de estuários. O seu uso para tomar decisões de gestão é, no entanto, perigoso. Em estuários unidimensionais, o tempo de residência calculado com base na salinidade

é um majorante do tempo de residência da água descarregada entre o rio e o mar. Em estuários com formas mais complexas, a circulação residual pode ter recirculações importantes e o tempo de residência da água proveniente do rio pode ser inferior ao tempo de residência da água proveniente de outras descargas.

3 Limites de um Estuário

O conceito de estuário é claro: é uma bacia costeira semi-fechada onde a água do rio se mistura com água do mar. Sendo uma zona de mistura é de esperar que seja difícil de delimitar, pois as propriedades da água tendem assintoticamente para os valores nos seus extremos (marinhos a jusante e do rio a montante). Em zonas sujeitas a maré a dificuldade de delimitação é ainda maior por o escoamento na fronteira com o mar ser alternado (com excursões de maré, que podem ser da ordem da dezena de quilómetros).

3.1 CRITÉRIOS DE DELIMITAÇÃO

A salinidade é um traçador da água do mar e por isso pode ter um papel preponderante na delimitação do estuário. Ela não é no entanto o único parâmetro utilizável para esse fim, nem é sempre o mais adequado. Os estuários com caudais fluviais pequenos comportam-se como lagoas costeiras, sendo a água no seu interior sobretudo de origem marinha (é o caso do estuário do Sado, a sul de Lisboa). Um critério baseado exclusivamente na salinidade poderia colocar o limite de jusante no interior do próprio estuário. Pelo contrário, quando o caudal do rio é muito grande, uma parte importante da mistura ocorre já no exterior do estuário e então um critério baseado exclusivamente na salinidade poderia colocar o limite do estuário longe da zona de costa, de forma pouco realista.

Os limites do estuário devem ser fixados tendo em consideração o seu papel na ecologia costeira. O papel dos estuários resulta da grande produtividade biológica na coluna de água e nos sedimentos, a qual está intimamente ligada a tempos de residência elevados dos nutrientes recebidos de terra e da sua capacidade para os reciclar e reutilizar. Para proteger os estuários a eutrofização deve ser evitada na coluna de água e nos sedimentos e a concentração de poluentes deve ser mantida dentro dos limites tolerados pelas espécies que usam o estuário durante todo ou parte do seu ciclo de vida.

Os limites de um estuário devem ser tais que as zonas de tempo de residência elevado e zonas de deposição devem ser consideradas zonas interiores. Isto significa que alguma mistura pode ocorrer já fora do estuário. Estas zonas de mistura fora do estuário são as chamadas "ROFI's: Regions Of Fresh water Influence", Simpson (1997). O conceito de ROFI assenta no facto de a maioria da mistura ocorrer no interior do estuário, mas de uma parte ocorrer fora do estuário em zonas que podem atingir centenas de quilómetros de comprimento (e.g. Reno, Delaware, Mississippi).

3.2 O LIMITE DE MONTANTE

O limite de montante de um estuário é pouco importante em termos de gestão uma vez que, de qualquer modo, o estuário é o destino final da generalidade dos produtos transportados pelo rio.

Nos estuários sujeitos a maré, esta é normalmente sentida alguns quilómetros a montante da penetração salina gerando um escoamento alternado nesta zona, com tempos de residência que dependem do caudal do rio e da morfologia do canal. Admitindo o tempo de residência como um factor importante para a definição dos limites do estuário, é de esperar que o limite superior seja localizado entre o limite de propagação da maré dinâmica e o limite de propagação da maré salina.

A matéria particulada flocula em zonas de salinidade superior a 2‰ e por isso a montante da maré salina não há deposição de materiais finos, nem acumulação de poluentes no fundo. Assim, em termos de acumulação de poluentes, o limite superior de um estuário poderia ser o limite de penetração da água salgada. Contudo, a descarga de água de refrigeração ou de BOD na zona de propagação da maré dinâmica deve ter em consideração o movimento alternado da água naquela zona.

3.3 O LIMITE DE JUSANTE

O escoamento na zona da embocadura dos estuários portugueses é do tipo alternado devido à maré. Durante a enchente a água que entra no estuário é em parte água que saiu na vazante anterior e água do mar que se mistura com a água do estuário. Deste processo de mistura resulta a distribuição de salinidades no seu interior.

Na zona da embocadura podemos assim definir cinco zonas:

- A zona afastada do estuário, que não o afecta, nem é afectada por ele,
- Uma zona onde o escoamento é predominantemente de saída do estuário e que pode ser afectada por ele,
- A zona por onde o escoamento é predominantemente de entrada no estuário e que por isso não é afectada por ele, mas que o pode afectar,
- Uma zona de mistura com oscilações de salinidade importantes durante um ciclo de maré, que é afectada pelo estuário e que o pode afectar,
- Uma zona que está claramente dentro do estuário.

O limite de jusante do estuário deverá incluir a zona de mistura cuja água tem grande probabilidade de voltar a entrar no estuário durante a enchente. Estas

regiões são facilmente identificáveis através da circulação, mas dificilmente através das propriedades da água.

A definição dos limites do estuário com base nas propriedades da água dificilmente consegue distinguir entre as zonas de mistura cuja água volta a entrar no estuário e as zonas que são afectadas pelo estuário, mas cuja água já não volta a entrar no estuário, *ROFI's*. Uma *ROFI* é a zona costeira adjacente ao estuário sujeita à influência da água doce proveniente do rio, e por isso com salinidade inferior à da água do mar.

3.3.1 Dinâmica de uma ROFI

Durante a vazante a água proveniente do estuário desloca-se para a região costeira adjacente, formando a pluma de vazante do estuário. O gradiente vertical de densidade nesta região depende do caudal do rio e da mistura promovida pela maré no interior do estuário. Quanto menor for o caudal do rio, menor é a estratificação esperada. A quantidade de movimento do jacto de vazante tende a formar uma pluma alinhada com o canal de descarga (frequentemente o canal de navegação). A força de Coriolis tende a deflectir este jacto para a direita da embocadura no hemisfério norte, formando uma pluma paralela à costa. Esta pluma é a *ROFI*. A Figura 1 mostra as *ROFI* do Reno (Holanda) e do Delaware (EUA).

Quando a maré inverte e a enchente se inicia, parte da água que saiu do estuário durante a vazante volta a entrar. No caso de estratificação vertical importante, o gradiente de densidade reforça o papel do atrito de fundo e a enchente inicia-se pelo fundo. No caso de estuários verticalmente homogéneos, com velocidades de vazante fortes, a enchente inicia-se preferencialmente pelas zonas laterais entre o jacto de vazante e a costa. Estas correntes de enchente tendem a cortar o jacto de vazante na embocadura do estuário. Este mecanismo de transição de vazante para enchente é dominante nos estuários Portugueses.

A água descarregada pelo estuário entra nas correntes litorais, que a transportam paralelamente à costa. O escoamento litoral é forçado pela maré, pela estrutura vertical de densidade e pela interacção com a atmosfera. De qualquer modo, no hemisfério norte o deslocamento da pluma do estuário é predominantemente para a direita e, por conseguinte, na costa portuguesa ele é preferencialmente para norte.

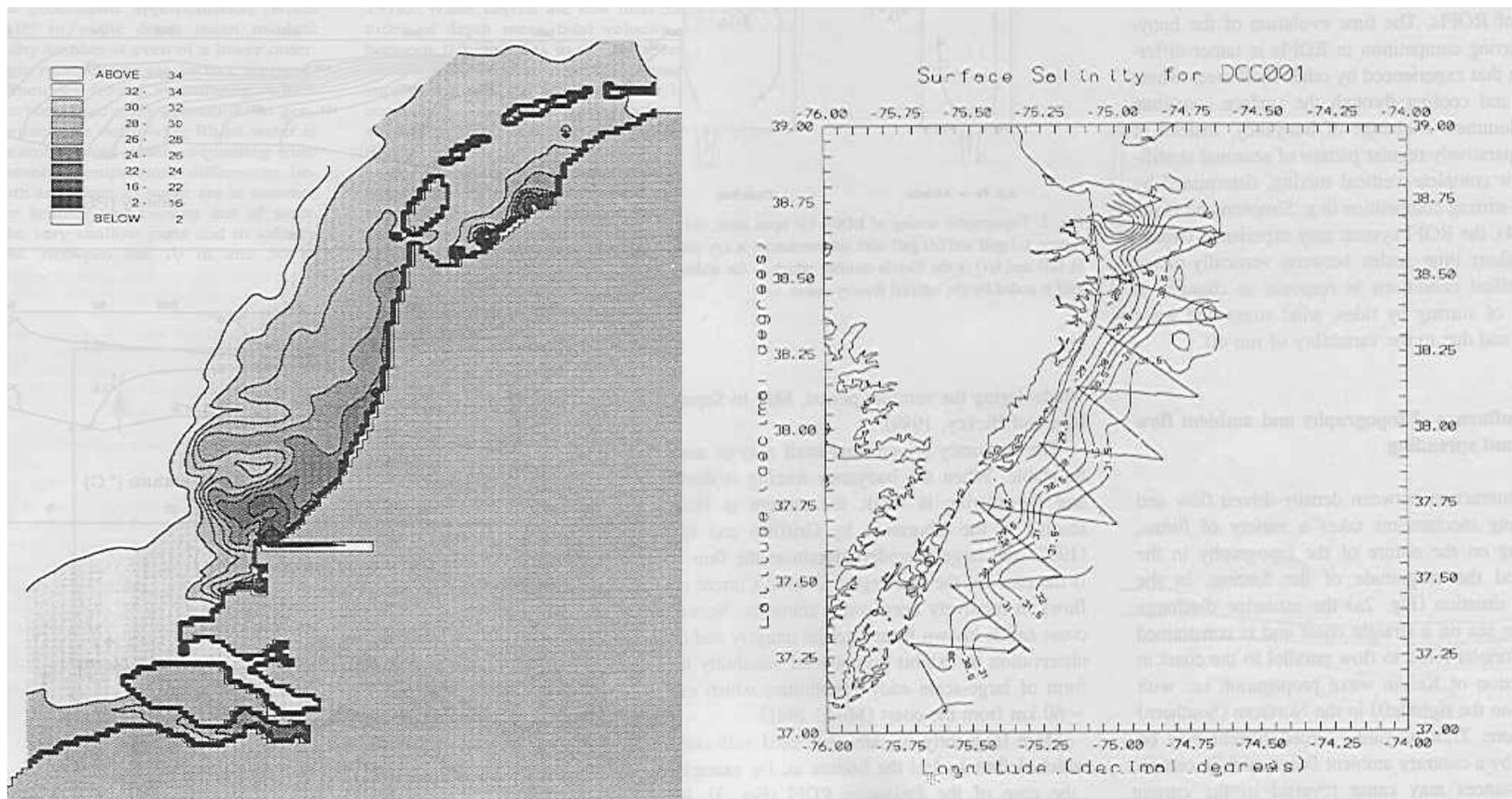


Figura 1 : ROFI dos rios Reno (Holanda) e Delaware (EUA). Adaptado de Lewis (1997).

Os estuários que descarregam para baías podem formar ROFIs onde a água descarregada em cada maré é identificável pela sua forma em “lente”. Estas “lentes” vão-se misturando umas com as outras e com a água da baía, antes de entrarem na circulação costeira global (este é o caso dos estuários do Tejo e do Sado em Portugal). Este efeito é visível noutros estuários, desde que a corrente litoral não esteja presente. Mais detalhes sobre a formação das ROFIs e da sua importância ecológica podem ser encontrados em Lewis (1997).

3.3.2 O que são as propriedades da água do mar?

O conceito de ROFI torna a definição de propriedades da água do mar mais objectivo. Em termos esquemáticos podemos distinguir três massas de água no exterior do estuário: (a) a ROFI, (b) a região misturada e (c) a região com estratificação térmica: Figura 2.

A zona de estratificação térmica corresponde à “zona de oceano aberto” ou seja à zona que não é afectada pelo estuário, nem o afecta. O efeito de corte reduzido típico das áreas de grande profundidade cria condições para estratificação vertical, máxima no Verão. A zona misturada corresponde à região de baixa profundidade onde o escoamento de maré é suficientemente forte para gerar turbulência capaz de promover a homogeneização da coluna de água, destruindo o gradiente vertical de temperatura típico do mar aberto e o gradiente vertical de salinidade típico da ROFI. As dimensões relativas das três regiões dependem da topografia local, do forçamento atmosférico e da descarga de água doce.

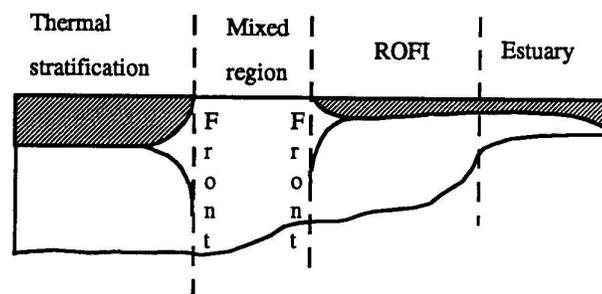


Figura 2: Massas de água no exterior de um estuário: ROFI, zona misturada e zona com estratificação térmica. Adaptado de Lewis (1997).

A água do mar é a água na zona de estratificação térmica da Figura 2. Contudo as águas na ROFI e na zona de mistura não entram no estuário e por isso devem ser consideradas águas exteriores. Para efeitos de gestão de estuários as águas exteriores devem ser consideradas como sendo água do mar.

3.4 CRITÉRIO USAR PARA DEFINIR O LIMITE DE JUSANTE DOS ESTUÁRIOS

O conceito de *ROFI* mostra que um estuário acaba antes de a água ter as propriedades da água do mar. Depois de deixar o estuário a água forma uma pluma com alguma estratificação devida à salinidade. Esta pluma é normalmente misturada verticalmente na zona costeira de baixa profundidade, por acção da turbulência devida ao escoamento forçado pela maré e pelo vento. Depois desta zona a água adquire finalmente as propriedades da água oceânica.

Assim, a salinidade por si só não é suficiente para distinguir as zonas que não fazem parte do estuário. O estudo das *ROFI's* mostrou que esta distinção deve ser feita com base na circulação. No caso do Estuário do Tejo são analisados também critérios baseados na sedimentologia e na ictiofauna. É mostrado que circulação permite a definição do limite jusante do estuário de forma mais objectiva que qualquer dos outros.

4 O Estuário do Tejo

O Estuário do Tejo (Figura 3) é o maior estuário Português e um dos maiores da Europa. Este estuário é também o mais bem estudado em Portugal e por isso foi escolhido para estuário de referência neste estudo.

O estuário do Tejo é composto por três partes principais:

- O Canal do Rio,
- O estuário Principal
- O corredor do estuário

Estas regiões são facilmente identificáveis na Figura 3. Na figura são também visíveis as áreas urbanizadas da região metropolitana de Lisboa.

O rio entra no estuário através do “canal do rio”. Nesta zona o estuário tem cerca de 200 metros de largura e é muito pouco profundo. A água é doce em praticamente toda esta zona, mas a amplitude da maré é ainda suficientemente importante para que o sentido do escoamento dependa da fase da maré. Neste canal a maré propaga-se ao longo de 30 km, para montante.

A superfície do “estuário principal” é da ordem dos 300 km², dos quais cerca de um terço são espraiaços de maré e sapais. Nesta região as actividades piscatórias têm ainda importância local. O padrão de circulação residual é complexo e responsável pela mistura intensa das massas de água. A actividade biológica é intensa, com níveis de produção primária elevados. Os espraiaços de maré são *habitat* de grandes comunidades de aves entre as quais os flamingos ocupam uma posição de relevo. A grande maioria dos espraiaços de maré e dos sapais da margem sul pertencem à “Reserva Natural do Estuário do Tejo”.

O “corredor do estuário” tem cerca de 4 km de largura e 40 metros de profundidade. Neste canal a velocidade do escoamento pode atingir os 2 m/s, formando recirculações associadas à topografia quer em enchente, quer em vazante. No extremo do canal, junto ao mar, a velocidade é normalmente superior a 1.5 m/s, podendo atingir os 2.5 em maré viva.

A jusante do “corredor do estuário” inicia-se a chamada “plataforma externa”. Nesta zona a largura aumenta subitamente e a profundidade diminui gradualmente, atingindo valores da ordem dos 5 metros no bordo da plataforma. O limite tradicional do estuário é localizado na secção “S. Julião da Barra – Bugio”, entre o corredor e a plataforma exterior (daí o nome da plataforma).



Figura 3: Vista aérea do Estuário do Tejo

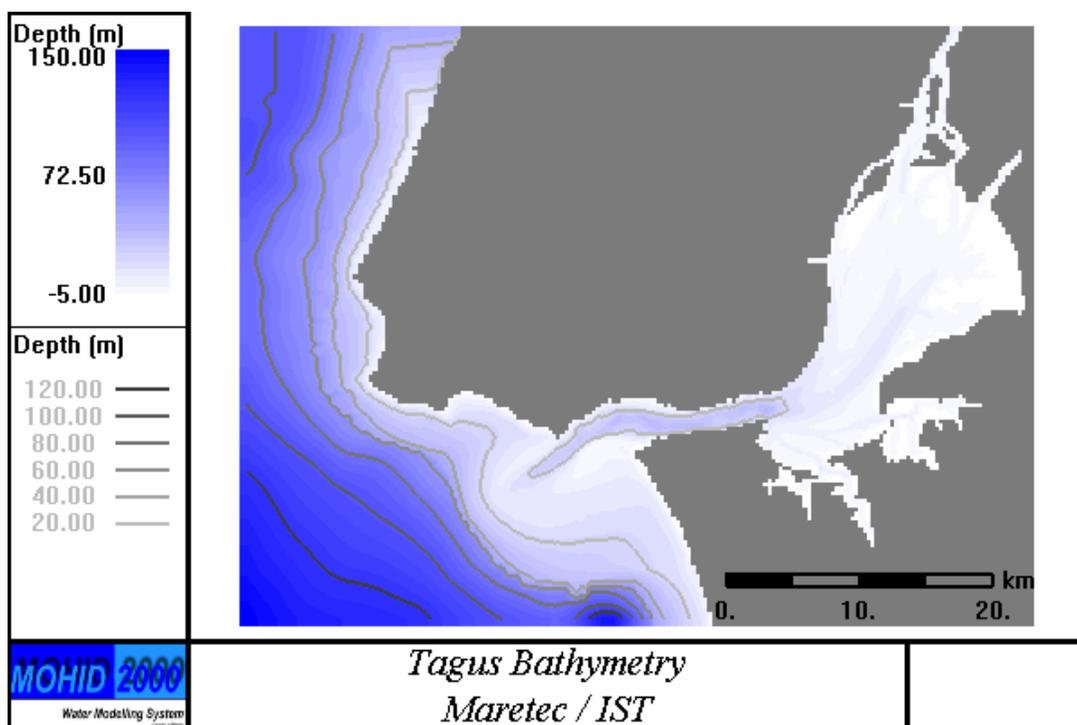


Figura 4: Batimetria do Estuário do Tejo

Medidas detalhadas do caudal do rio são efectuadas desde 1973. Entre 1973 e 1990 o caudal médio do rio Tejo foi de $300 \text{ m}^3/\text{s}$. Durante esse período o ano mais húmido foi 1978/79, quando o caudal médio foi de $5400 \text{ m}^3/\text{s}$ e o ano mais seco foi 1988/89,

quando o caudal médio foi 250 m³/s. O caudal médio mínimo mensal foi 28 m³/s e o caudal mínimo diário foi de 9 m³/s (dados fornecidos pela Electricidade de Portugal SA).

4.1 DADOS DE CAMPO NO TEJO

Os primeiros estudos efectuados no estuário do Tejo tinham como objectivo principal o conhecimento da circulação, sobretudo por questões de navegação. Em 1941 um estudo detalhado foi levado a cabo integrado num estudo mais vasto sobre as águas residuais da cidade de Lisboa (Oliveira, 1941).

O "Estudo Ambiental do Estuário do Tejo" iniciado em 1978 com financiamento da UNESCO e com quatro anos de duração é o estudo mais completo levado a cabo no estuário até ao momento. Este estudo caracterizou o estuário em termos físicos, biológicos, químicos e sedimentológicos e tornou-se uma referência para estudos posteriores. Depois deste um grande número de estudos sectoriais foi levado a cabo no estuário. Em Dezembro de 2000 concluiu-se o projecto comunitário OPCOM (<http://www.hydromod.de/projects/OPCOM/OPCOM.html>), no âmbito do qual foi efectuada modelação intensa da circulação e da qualidade da água no estuário. O projecto foi financiado pelo programa MASTIII da DG Investigação e envolveu também o estuário do Elba (Alemanha), a baía de Marennes-Oleron (França) e o "Mar Archipelago" ,na parte finlandesa do mar Báltico.

4.1.1 Resultados do projecto "Estudo Ambiental do Estuário do Tejo" relevantes para definir o limite de jusante do estuário

Para a definição dos limites do estuário são particularmente úteis os dados de salinidade, de sedimentos e de ictioplâncton. No "Estudo Ambiental do Estuário do Tejo", a secção "S. Julião da Barra – Bugio", que delimita o corredor do estuário, a jusante, foi implicitamente considerada o limite do estuário, tendo a generalidade da amostragem sido feita a montante desta secção.

4.1.1.1 Salinidade

Medidas de salinidade foram efectuadas para caracterizar a estrutura vertical e a distribuição horizontal das massas de água. Perfis verticais foram publicados nas secções representadas na Figura 5. A Figura 6 apresenta a distribuição de salinidade média de Verão e a Figura 7 a distribuição de salinidade média anual. Ambas as figuras mostram valores de salinidade muito baixos no "canal do rio", a montante do canal principal, e gradientes baixos no "corredor". Os maiores gradientes estão localizados no interior do estuário, mostrando que é nessa região que se faz a grande mistura das águas provenientes do rio e do mar.

A distribuição de salinidade no Verão e a distribuição média anual têm formas bastantes semelhantes, sugerindo que os períodos de chuva capazes de alterar substancialmente a distribuição de salinidades, são eventos de curta duração. Medidas efectuadas no exterior do estuário mostram poucos valores de salinidade inferiores aos típicos da água do mar, sugerindo também que reduções de salinidade no interior do estuário são episódios de curta duração. Em situação de cheia a salinidade no corredor pode descer abaixo de 20‰

No “corredor” as velocidades elevadas e as excursões de maré longas geram turbulência e difusão por efeito de corte responsáveis pela mistura intensa. Em ambos os extremos desta zona são visíveis gradientes elevados identificadores de zonas de mistura.

A estação III (Figura 8) é representativa da parte central do estuário. Nesta estação a salinidade varia entre 12‰ e 25 ‰ e os perfis verticais mostram alguma estratificação. A estação V (Figuras 9 e 10) mostra perfis verticais bastante homogêneos, com estratificação só perto da superfície. Em ambas as estações acontece que a salinidade pode ser máxima junto à superfície, mostrando que o transporte horizontal associado às correntes de densidade pode ser um factor adicional de mistura. A salinidade máxima na estação III (22.6 ‰) é semelhante à salinidade mínima na estação V (21.4 ‰), mostrando que a excursão de maré é da ordem de grandeza da distância entre estas estações. Esta conclusão foi verificada usando resultados do modelo de transporte (ver capítulo sobre circulação mais adiante).

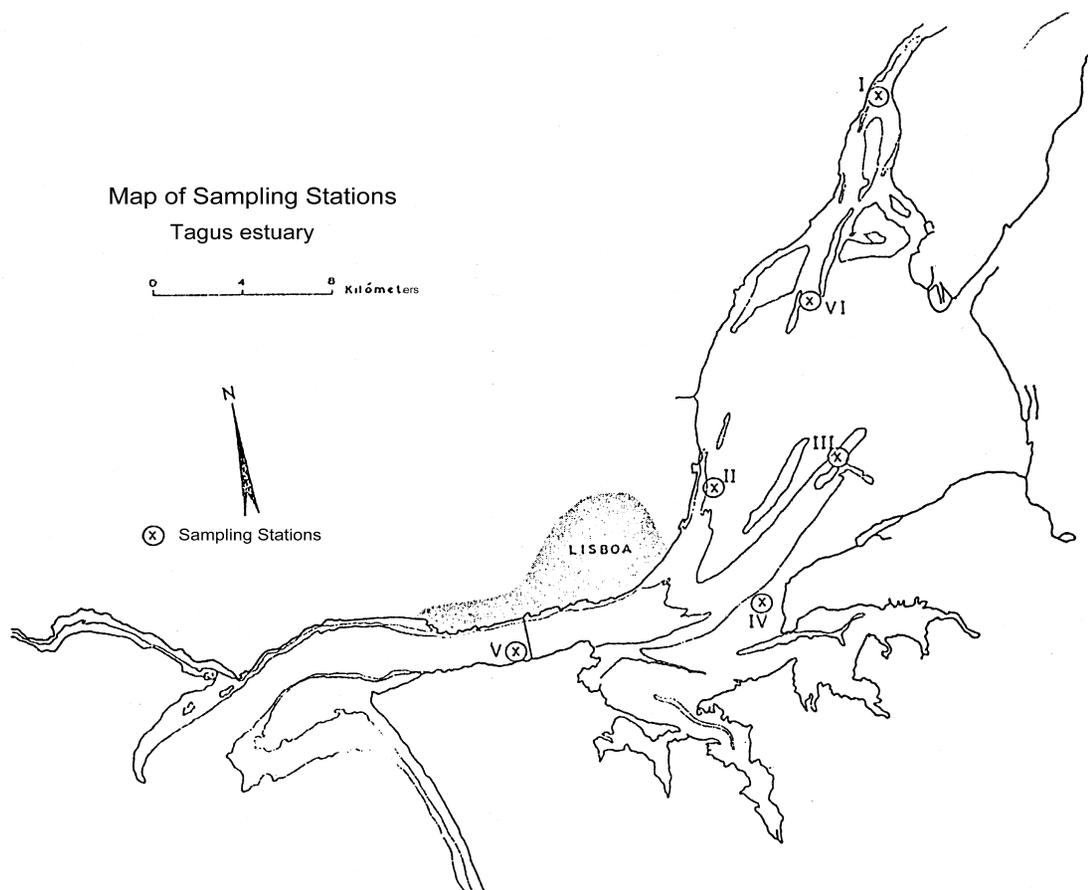


Figura 5: Localização das estações de medida de perfis verticais "Estudo Ambiental do Estuário do Tejo".

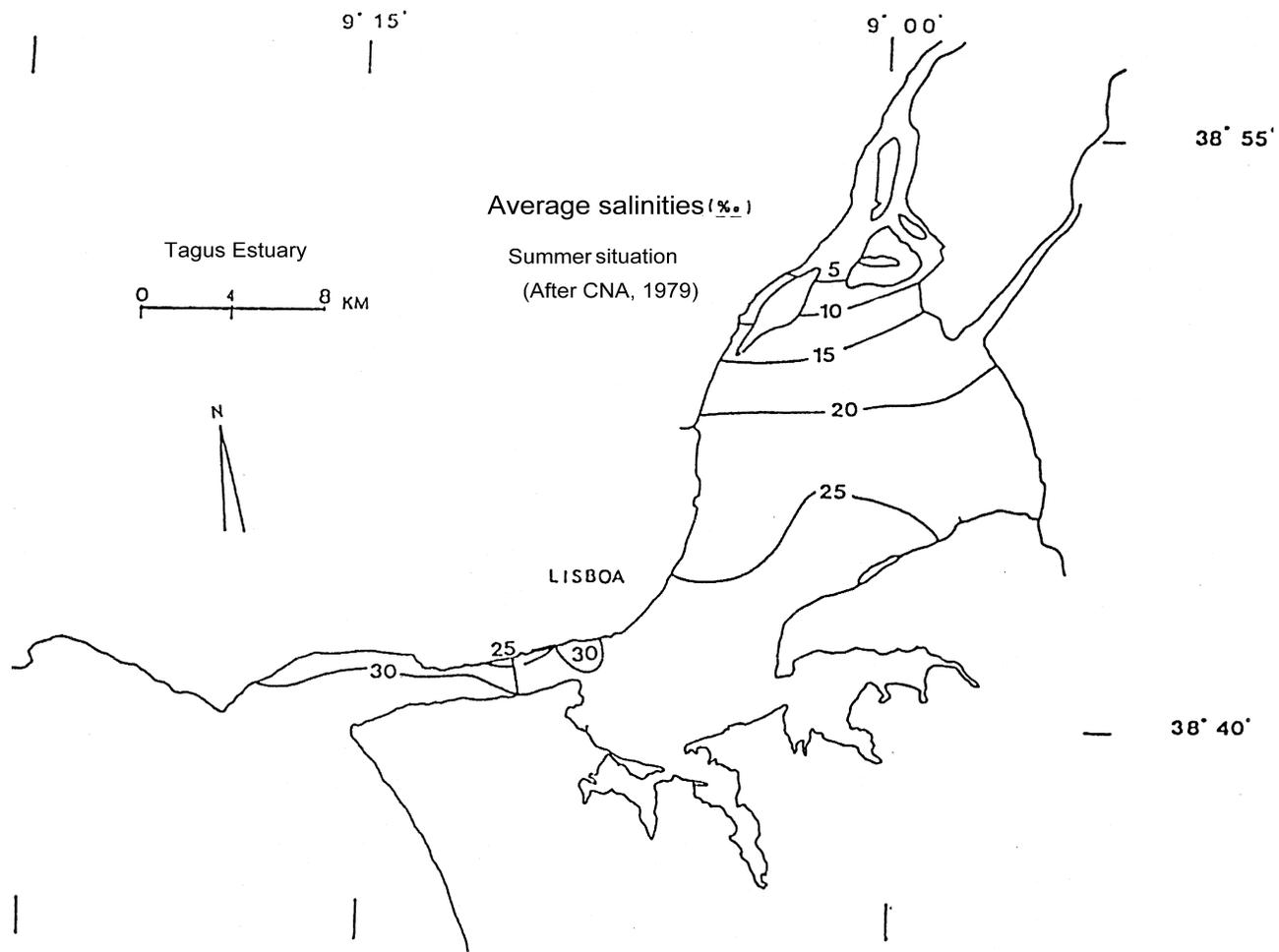


Figura 6: Distribuição de salinidade média de Verão.

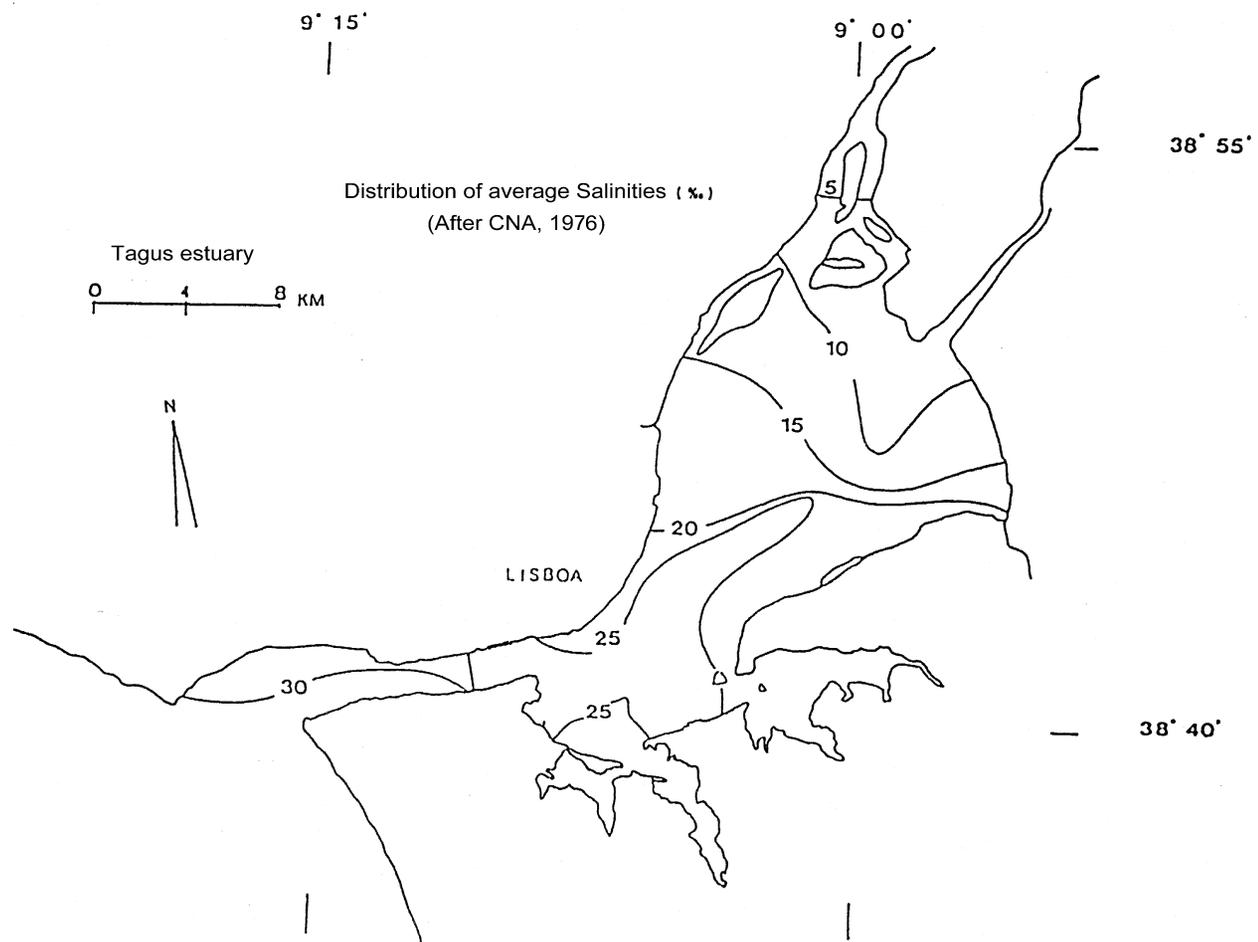


Figura 7: Distribuição de salinidade média anual

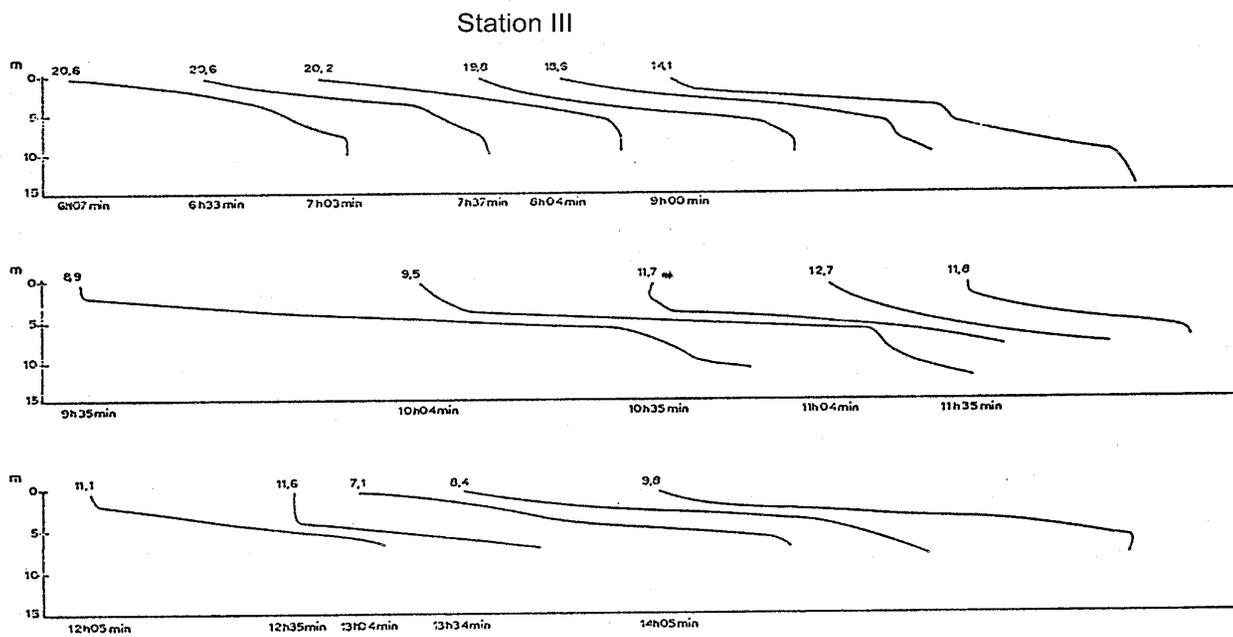


Figura 8: Perfis verticais de salinidade na estação III “Estudo Ambiental do Estuário do Tejo”.

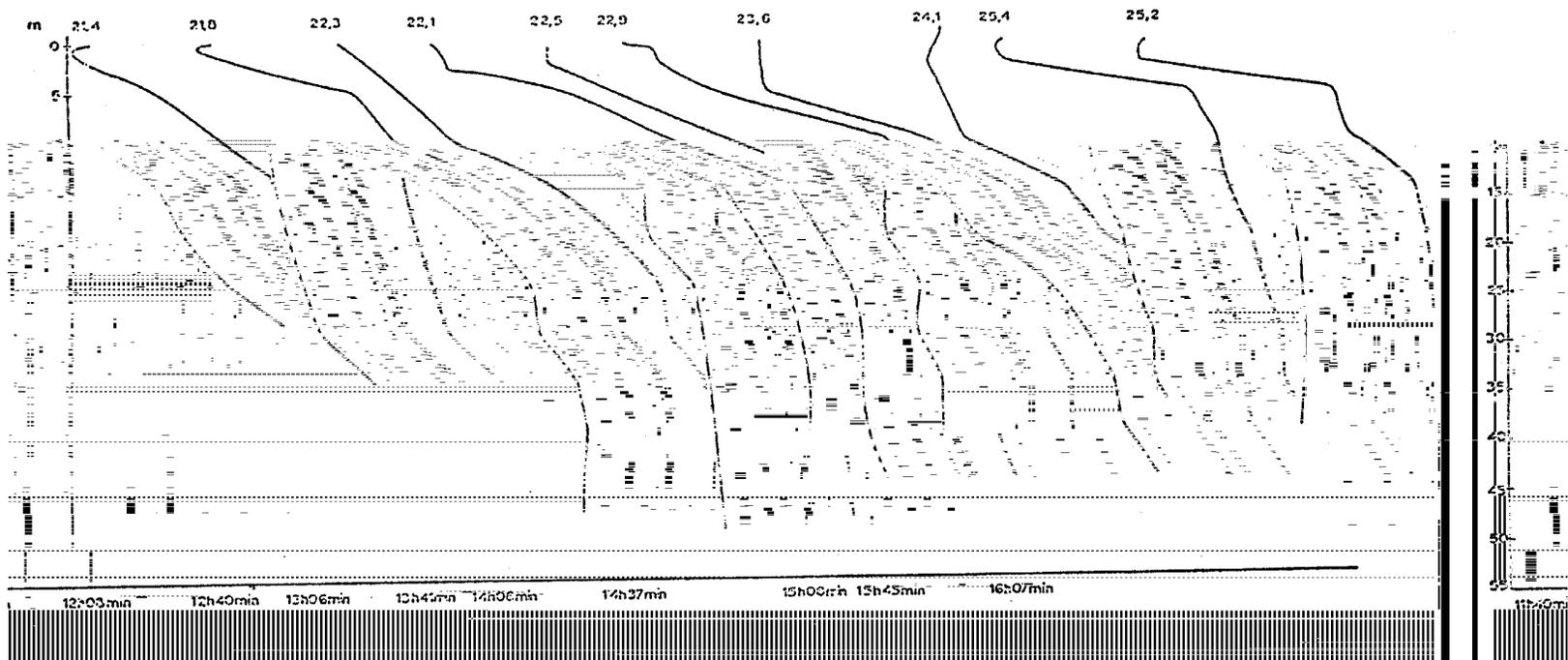


Figura 9: Perfis verticais de salinidade na estação V “Estudo Ambiental do Estuário do Tejo”.

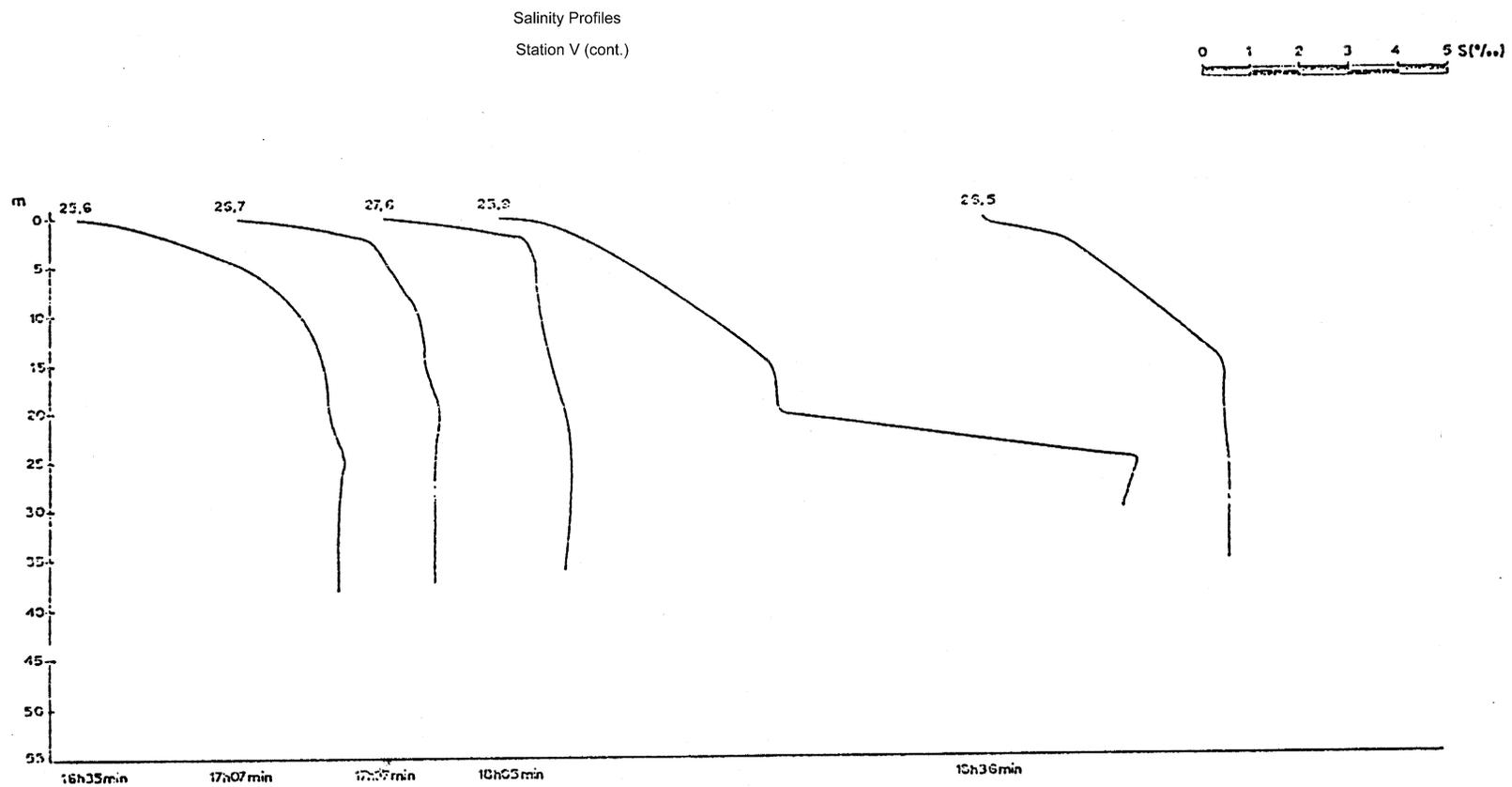


Figura 10: Perfis verticais de salinidade na estação V (cont.) "Estudo Ambiental do Estuário do Tejo".

4.1.1.2 ictioplâncton

A zona do limite de jusante de um estuário é também a zona de coexistência de espécies da ictiofauna que vivem exclusivamente no mar ou exclusivamente no estuário ou que vivem no estuário parte dos seus ciclos de vida. Assim, os peixes e as larvas respectivas podem ser de grande utilidade na definição dos limites de um estuário.

O projecto "Estudo Ambiental do Estuário do Tejo" incluiu um estudo do ictiofauna (Ré, 1982), cujas estações de amostragem são indicadas na Figura 11. As conclusões são apresentadas e discutidas tendo em mente a definição do limite de jusante do estuário.

4.1.1.2.1 Espécies dominantes

Sardina pilchardus: Passa todo o ciclo da sua vida no mar. Não usa o estuário, nem sequer para a reprodução.

Engraulis encrasicolus: Passa todo o ciclo de vida no mar. Entra no estuário durante o período de postura.

Syngnathus abaster: Passa todo o ciclo de vida no estuário.

Pomatoschistus minutus: Passa todo o ciclo de vida no estuário.

A jusante da estação E7 foram encontradas exclusivamente espécies marinhas; a montante da estação E7 a biomassa de ovos e de larvas é maior que a jusante, mas a diversidade é menor. A distribuição de ictioplâncton mostra que o limite de jusante do estuário pode ser fixado na vizinhança da estação E7

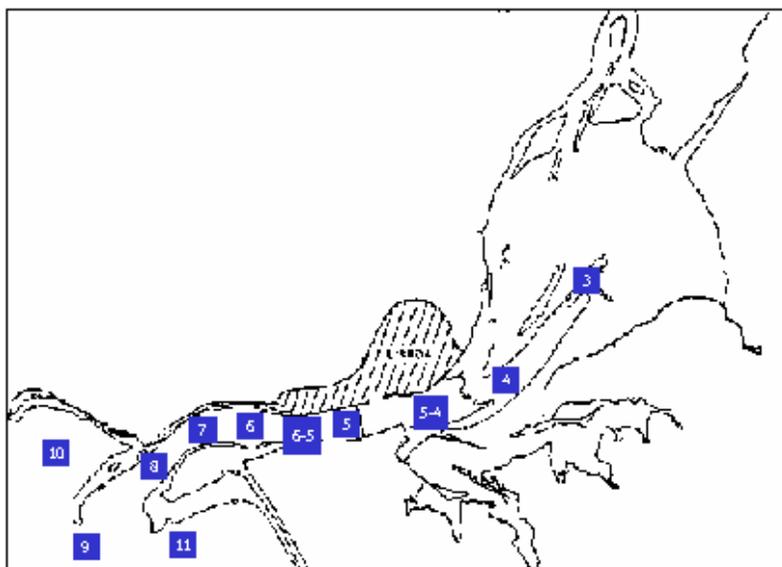


Figura 11: Estações de amostragem de ictiofauna no "Estudo Ambiental do Estuário do Tejo".

4.1.1.3 Sedimentos

O rio é a principal fonte de sedimentos, que são transportados ao longo do estuário até ao mar. Parte do material fino é depositado nos sapais e espraiados de maré e parte é exportado para o mar e depositado em áreas profundas, onde a turbulência gerada pelas correntes e pelas ondas não é suficiente para o ressuspender. Os materiais mais grosseiros são transportados sobre o fundo ao longo dos canais mais profundos.

Na embocadura do estuário, as ondas e as correntes de maré originam a movimentação quase permanente de sedimentos, misturando sedimentos grosseiros de origem terrestre e marinha. A Figura 12 agrupa os sedimentos de fundo no estuário, por classes de tamanho. Na embocadura o material é grosseiro. Os sedimentos exportados pelo estuário formam uma plataforma arenosa cuja dinâmica é determinada pelas correntes de maré e pelo clima de agitação marítima. A Figura 12 sugere que a embocadura do estuário está localizada na zona de S. Julião da Barra.

O alargamento súbito da secção transversal reduz a velocidade de vazante e cria condições para a deposição de sedimentos e formação dos bancos localizados em ambos os lados do canal, cuja assimetria é consequência das correntes e da agitação marítima. As ondas mais frequentes, de menor altura, propagam-se do quadrante norte, sendo as ondas de tempestade provenientes de sul.

No bordo da plataforma exterior a sedimentação é intensa. A profundidade natural é inferior a 10 metros, obrigando à dragagem do canal de navegação.

A Figura 13 mostra a distribuição de sedimentos na zona da plataforma continental vizinha do estuário do Tejo. Esta figura confirma a distribuição apresentada na Figura 12 e mostra que em regiões com profundidades superiores a 100 metros, se encontra de novo areia lódica. A inexistência de materiais finos a profundidades superiores a 100 metros parece ser uma consequência da acção das ondas.

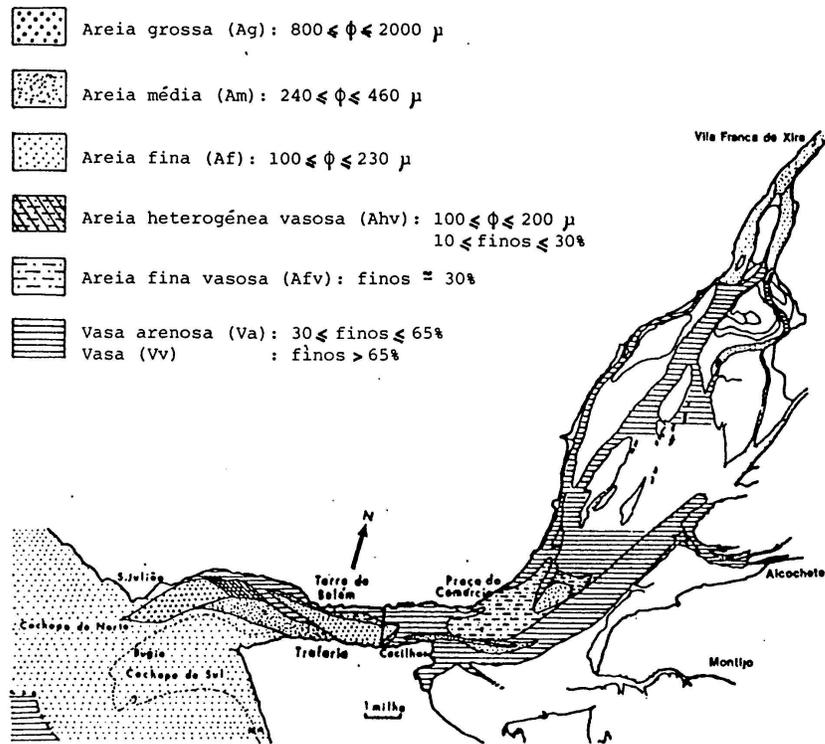


Figura 12: Sedimentos de fundo no estuário do Tejo por classes de tamanho.

4.1.1.4 Síntese dos resultados do “Programa Ambiental do Estuário do Tejo” relevantes para a definição do limite de jusante do estuário

As populações de ictioplâncton apresentam características marinhas na parte jusante do corredor do estuário. Nesta região os sedimentos são essencialmente areia de granulidade média, encontrando-se areia lodosa só em zonas de profundidade superior a 100 metros, onde a acção das ondas não se faz sentir. Vaza e areia vazosa encontram-se sobretudo na parte principal do estuário, a montante do corredor.

Os maiores gradientes de salinidade foram encontrados no estuário principal. No corredor do estuário os gradientes (horizontais e verticais) são baixos, denotando a existência de mistura intensa. Na parte final do corredor, a salinidade média é superior a 30‰. A salinidade foi medida só a montante de S. Julião da Barra, zona considerada implicitamente naquele projecto como o limite de jusante do estuário.

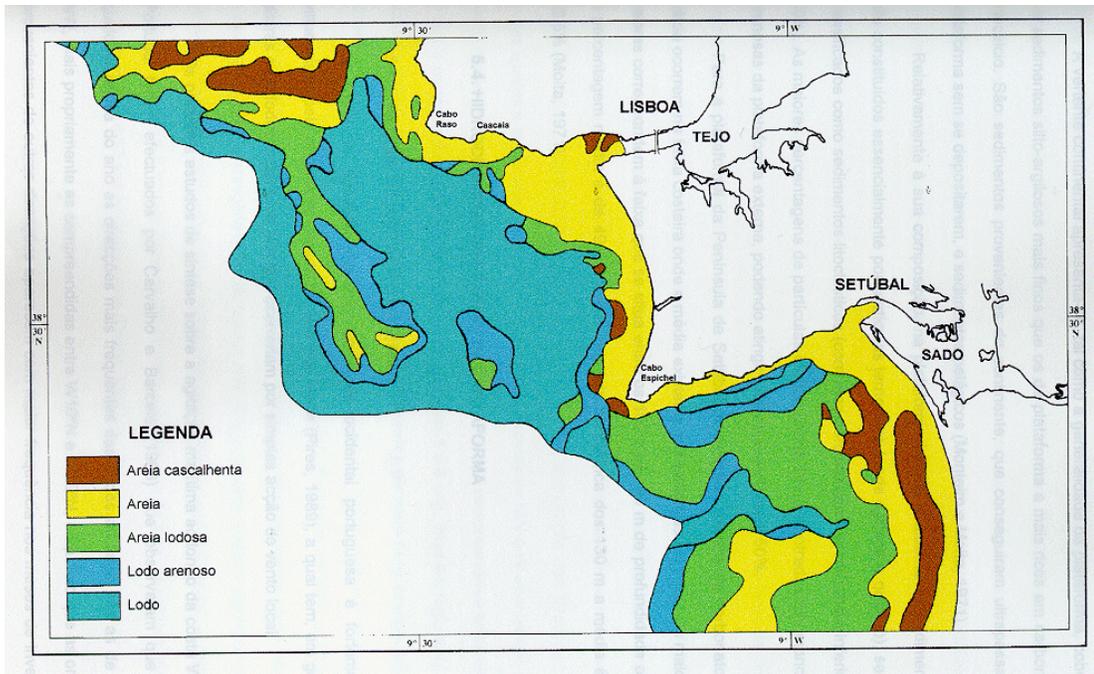


Figura 13: Distribuição de sedimentos na zona da plataforma continental vizinha do estuário do Tejo.

4.1.2 Salinidade na plataforma exterior do estuário

A caracterização da distribuição de salinidade na plataforma exterior é feita a partir de dados adquiridos pelo IPIMAR e pelo Instituto Hidrográfico no contexto das seus programas de investigação e por medidas efectuadas no contexto do programa de monitorização do emissário submarino da Guia. No seu conjunto os dados - Figura 14 a Figura 16 - são suficientes para caracterizar a distribuição de massas de água nesta região.

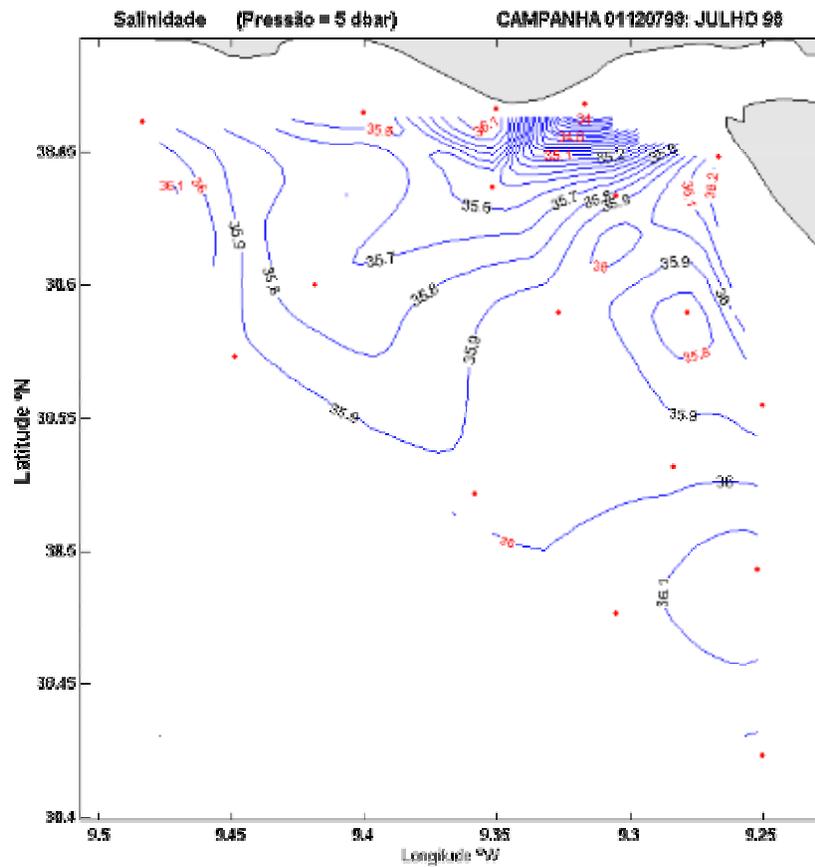
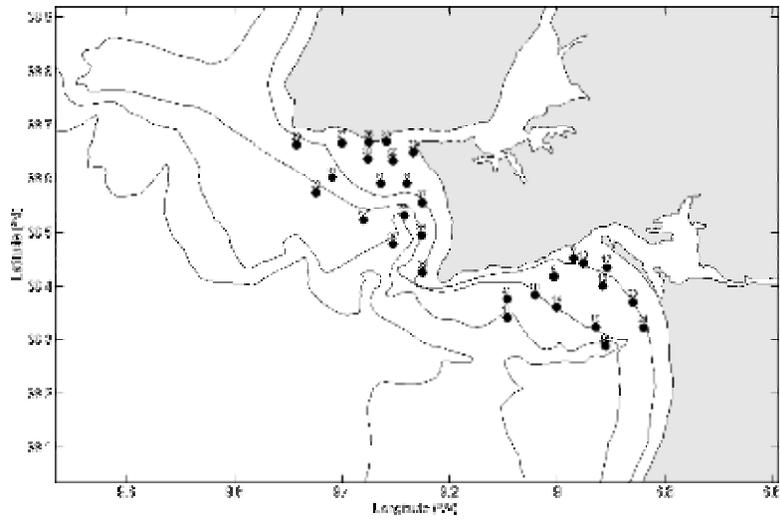


Figura 14: Salinidade na plataforma (medidas do IPIMAR).

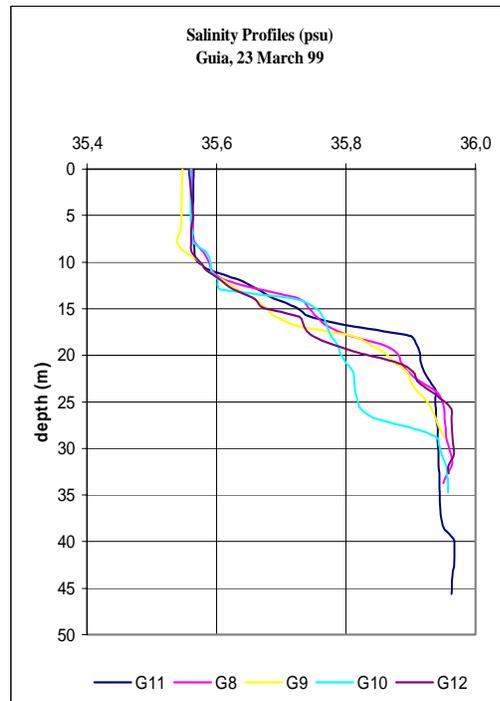
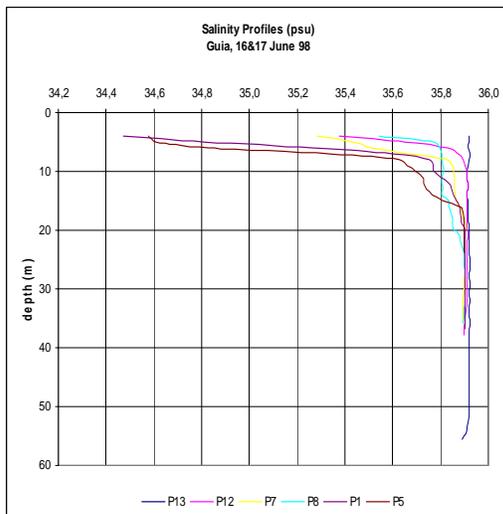
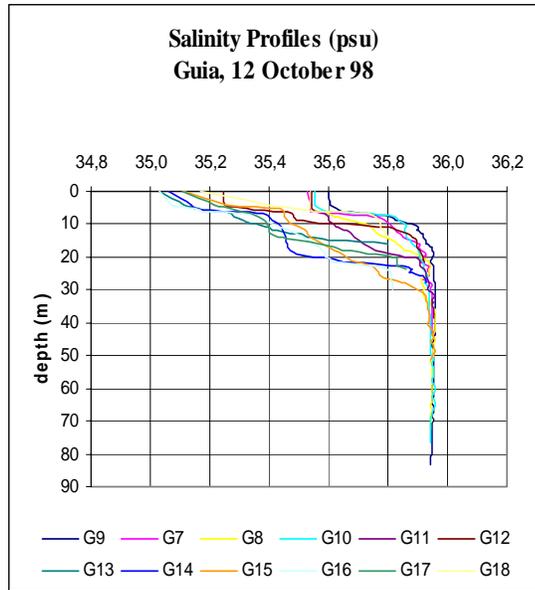
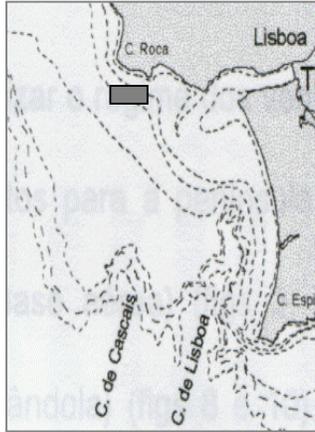


Figura 15: Salinidade na plataforma. Perfis verticais medidos na zona da Guia, a sul do Cabo da Roca (ver parte superior esquerda da figura).

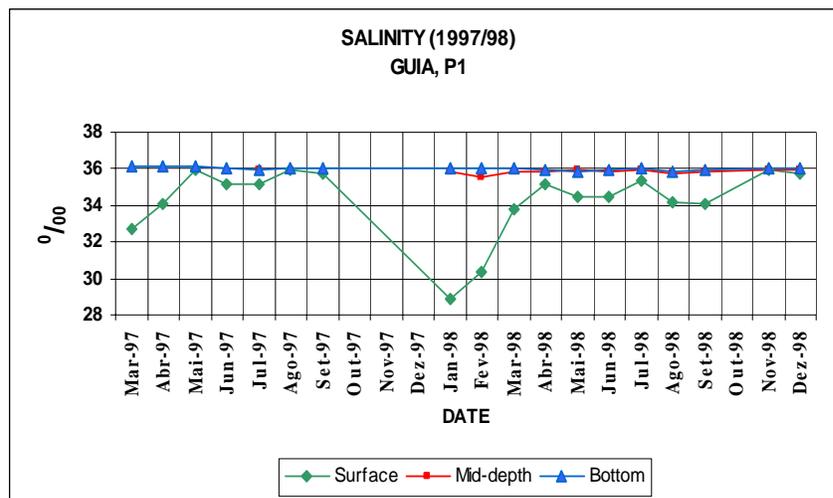
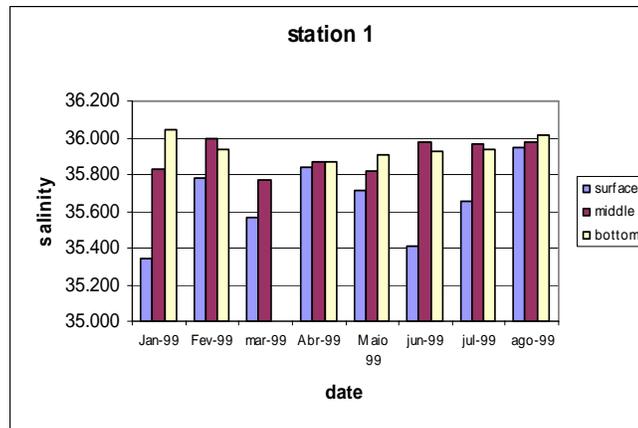
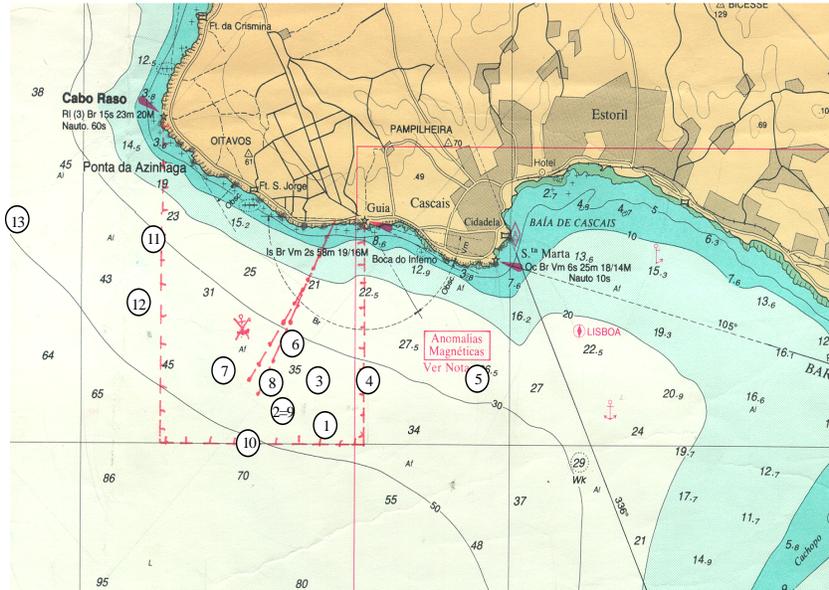


Figura 16: Salinidade na plataforma exterior. Séries temporais medidas na zona da Guia.

Na plataforma exterior a salinidade é geralmente alta (superior a 34‰). A mistura é intensa e o padrão de escoamento é tal que a água descarregada pelo estuário se move para norte por acção da força de Coriolis (escoamento típico de uma *ROFI*). A Figura 14 mostra a distribuição horizontal de salinidade produzida a partir de dados

do IPIMAR. Gradientes elevados registam-se na saída do corredor do estuário, sendo facilmente identificável um jacto de saída deflectido para a direita. Valores máximos em ambos os lados da sua raiz sugerem a existência de recirculação da água exterior do estuário em ambos os lados. A água lateral arrastada pelo jacto que sai do estuário, aumenta a sua salinidade. Este escoamento é mostrado pelos resultados do modelo hidrodinâmico descritos mais adiante.

A Figura 15 mostra perfis verticais de salinidade medidos na região da Guia (no âmbito do programa de monitorização do emissário submarino). Estes perfis mostram que massas de água localizadas abaixo dos 20 metros de profundidade têm sempre salinidade da ordem de 36‰. À superfície os valores estão tipicamente acima dos 34 ‰. A Figura 16 mostra séries temporais medidas na mesma região. A figura mostra que só excepcionalmente a salinidade desce abaixo dos 34 ‰.

Perfis verticais medidos no Canhão de Lisboa (profundidade da ordem dos 1000 metros) e junto à embocadura do estuário em situações de Verão, a sul do jacto de saída do estuário mostram que a salinidade no canhão de Lisboa, entre os 30 e os 100 metros de profundidade ser idêntica à registada entre os 600 e os 700 e de entre estas duas profundidades registar valores inferiores. Este perfil sugere a existência de um padrão vertical de transporte complexo. O transporte vertical - *upwelling* - foi adiantado como a explicação mais provável para o aumento da concentração de nutrientes no início do Verão, na Guia, junto ao fundo.

4.1.3 Circulação hidrodinâmica na embocadura e plataforma adjacente ao estuário

A circulação no estuário do Tejo é forçada essencialmente pela maré (semi-diurna). Na embocadura a amplitude média são 2 metros, aumentando até 2.7 em situação de maré viva média. No interior do estuário a maré amplificada, atingindo os 3.5 metros.

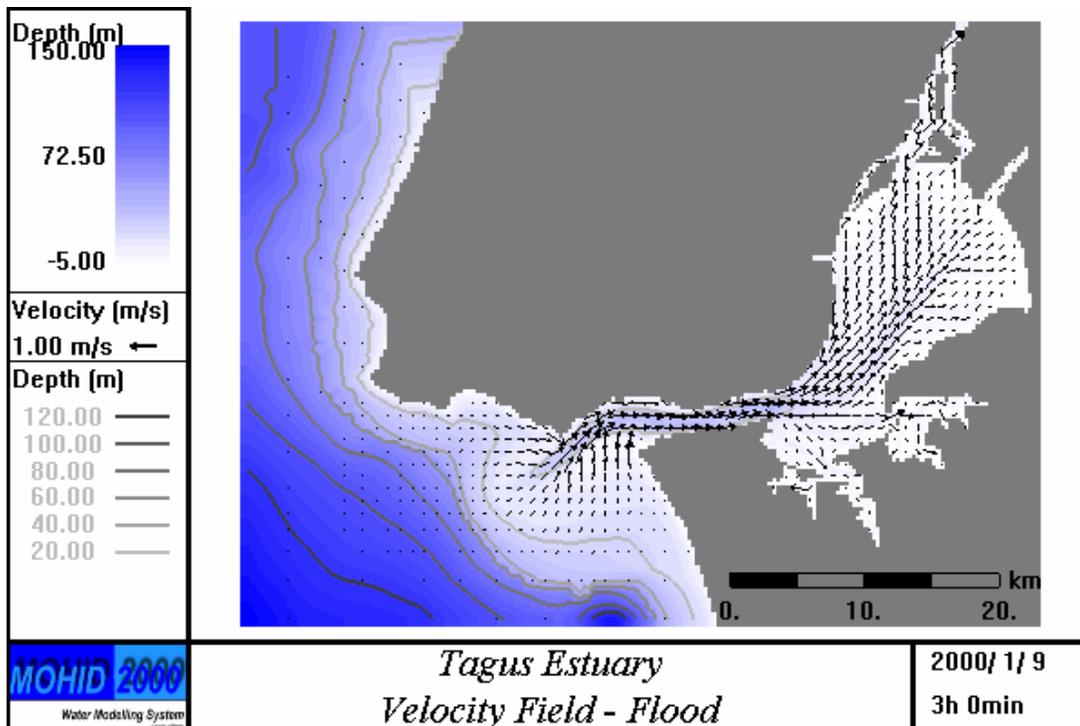


Figura 17: Distribuição de velocidades em enchente, numa maré média.

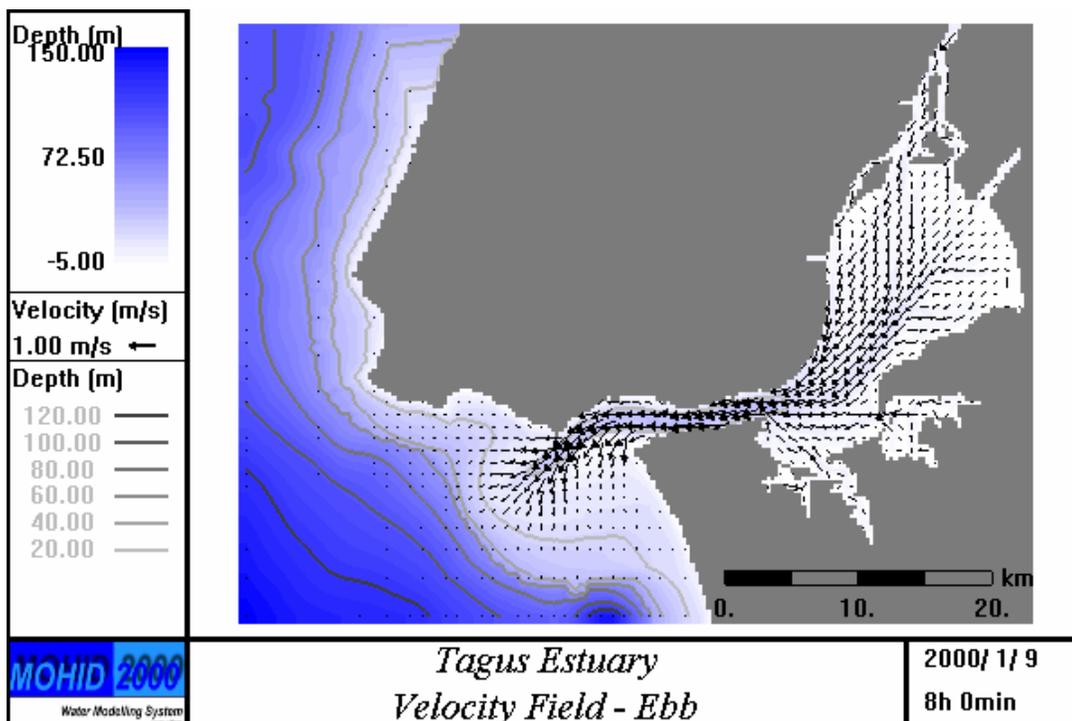


Figura 18: Distribuição de velocidades em vazante , numa maré média.

Velocidades típicas são da ordem de 1 m/s. As velocidades máximas registam-se no “corredor”, podendo atingir os 2.5 m/s em maré viva, junto à embocadura. A Figura

17 mostra uma distribuição de velocidades em enchente e a Figura 18 em vazante, numa situação de maré média. As figuras mostram que as velocidades máximas se registam no corredor. Em vazante em bem visível o jacto de saída do estuário. Este jacto induz um vórtice anticiclónico depois da embocadura, na margem norte. Este vórtice determina a circulação residual nesta região - Figura 19. A circulação residual é intensa, com valores máximos nos extremos do corredor, onde os efeitos não-lineares são mais importantes.

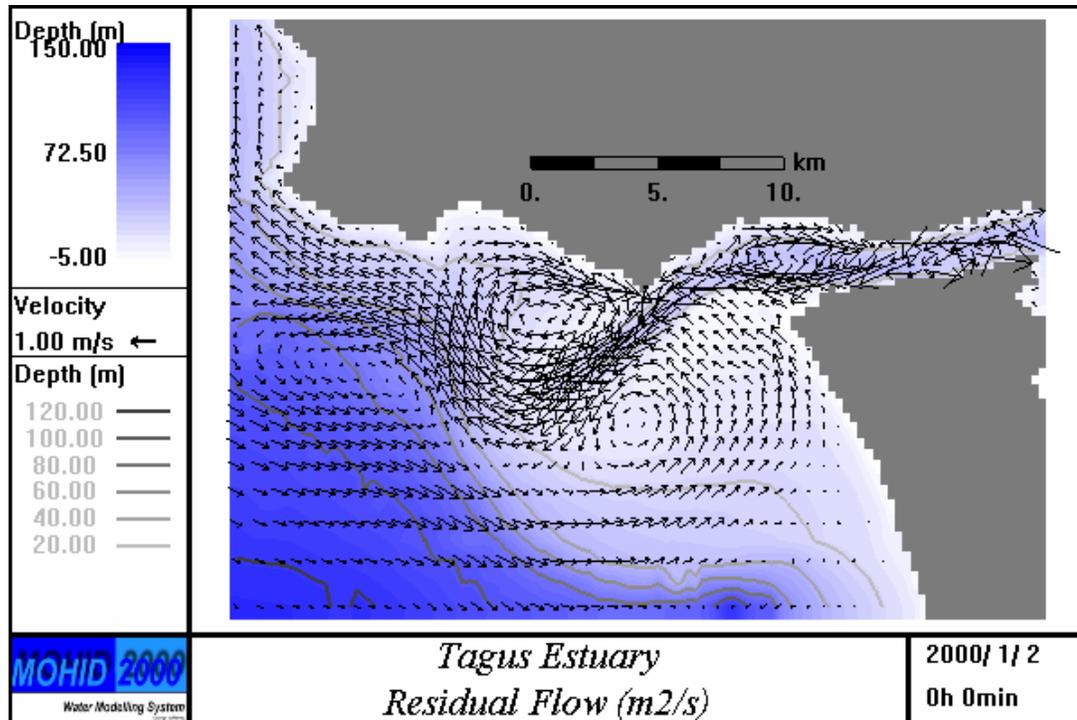


Figura 19: Circulação residual na embocadura do estuário do Tejo.

A figura representa os caudais residuais (velocidade vezes a profundidade). Esta propriedade representa efectivamente o deslocamento residual da massa de água, sendo a variação do módulo mais regular do que a da velocidade residual e por conseguinte mais fácil de representar graficamente. Um grande vórtice residual anticiclónico ocupa o extremo de jusante do corredor com velocidade no sentido do interior do estuário a norte e no sentido do mar a sul. No exterior do estuário pode ver-se o jacto de saída e dois vórtices adjacentes.

A água deixa o estuário pela parte sul do vórtice que ocupa a parte terminal do corredor do estuário, e entra no jacto exterior, o qual é formado pela água que deixa o estuário e pela água recirculada no exterior por acção dos dois vórtices adjacentes ao jacto, o qual é deflectido para oeste (efeito de Coriolis) formando uma corrente que contorna os Cabos Raso e da Roca e se dirige em seguida para norte.

O conjunto do jacto e dos dois vórtices residuais adjacentes é típico de estuários sujeitos a maré, com embocaduras estreitas (quando comparadas com a dimensão do estuário). A assinatura do jacto e dos vórtices residuais que lhe estão associados é facilmente identificável nas distribuições de salinidade (Figura 14).

A Figura 20 e seguintes mostram simulações de distribuições de traçadores lagrangeanos em três estofas de maré consecutivas. A comparação de figuras consecutivas permite visualizar a extensão da excursão de maré e a dispersão. As medidas de salinidade sugerem excursões de maré da ordem dos 10 a 15 km. A comparação da Figura 20 e da Figura 21 mostra deslocamentos dessa ordem de grandeza.

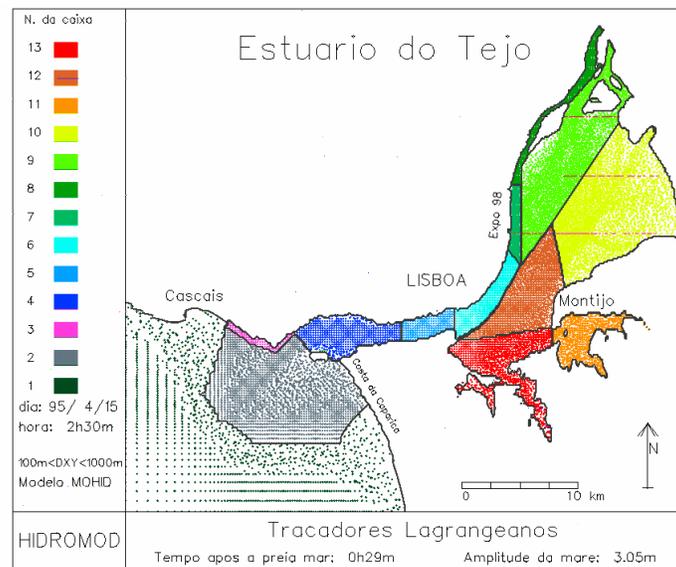


Figura 20: Localização inicial dos traçadores lagrangeanos (preia-mar).

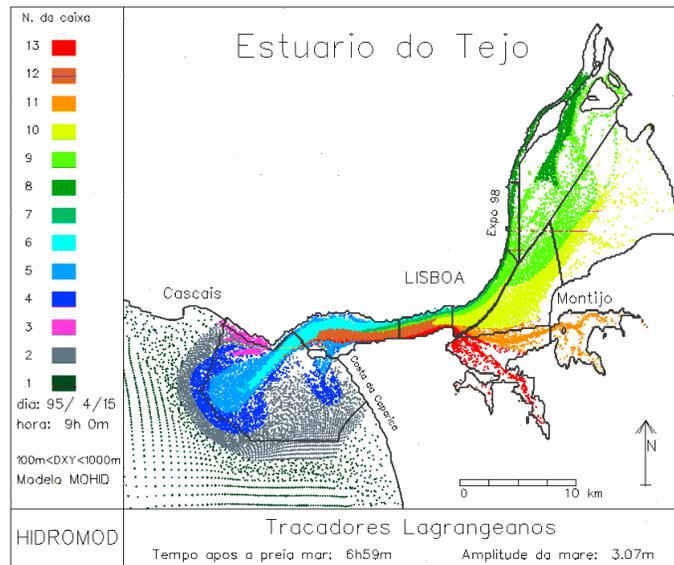


Figura 21: Localização dos traçadores lagrangeanos na baixa-mar depois da emissão. A comparação com a figura anterior mostra a excursão de maré.

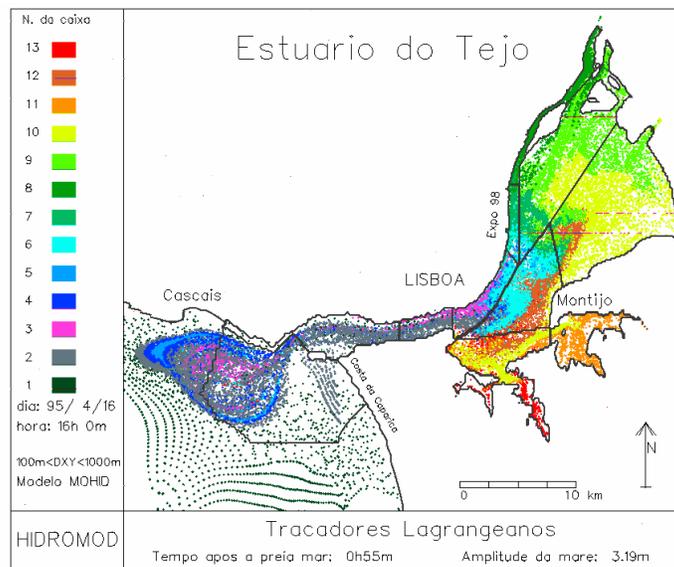


Figura 22: Localização dos traçadores lagrangeanos em preia-mar, um dia mais tarde.

A mistura é máxima no “corredor” e nas zonas vizinhas dos seus extremos. Toda a água localizada no interior do corredor em preia-mar (Figura 20) se move para o exterior em maré baixa, permitindo à água localizada em Preia-mar à entrada do corredor de se deslocar até perto da embocadura durante a vazante. A Figura 22 mostra a distribuição de traçadores em preia-mar, cerca de um dia mais tarde. A figura mostra que a água que se encontrava no corredor de saída se misturou com água do mar, estando parte dessa mistura no exterior do estuário, parte no interior. No exterior do estuário é bem visível a água que estava a norte do jacto de saída e o

deslocamento da mistura em direcção ao Cabo da Roca. No interior do estuário (estuário principal) a água de renovação entra pelo norte e a que sai, sai pela margem sul, fazendo uma rotação horária. No exterior, a pluma – em forma de cogumelo - cresce sobretudo por incorporação de água transportada pelos dois vórtices residuais adjacentes ao jacto (cor rosa e cinzenta). A razão entre o volume da água incorporada pelos vórtices adjacentes ao jacto e a água exportada num ciclo de maré é uma medida da diluição da água proveniente do estuário. A grande diluição sugerida pelas distribuições de traçadores está em bom acordo com as distribuições de salinidade produzidas pelo IPIMAR (Figura 14), onde os maiores gradientes estão localizados à saída do corredor.

4.2 LIMITE DE JUSANTE DO ESTUÁRIO DO TEJO

Tendo em consideração as distribuições de salinidade, a circulação, a distribuição de sedimentos de fundo e o ictioplâncton pode-se definir o limite de jusante do estuário, indicado na Figura 23, pelos pontos com as seguintes coordenadas geográficas:

Ponto	Latitude (N)	Longitude (O)
1	38° 40' 30"	9° 19' 24"
2	38° 38' 30"	9° 23' 30"
3	38° 36' 18"	9° 18' 48"
4	38° 39' 42"	9° 17' 54"
5	38° 39' 54"	9° 15' 24"

Este limite é um limite de segurança porque considera a zona de mistura da água do estuário como fazendo parte dele. Não está em contradição com o limite morfológico (secção S. Julião da Barra – Bugio) historicamente aceite como o limite do estuário, o qual pode ser visto como “simplista”, na medida em que admite que o material que sai do estuário não volta a entrar.

A circulação hidrodinâmica mostra que a água do estuário é renovada a partir da água localizada junto à costa, a qual entra no estuário durante a enchente. A análise comparativa da Figura 21 e da Figura 22 mostra que essa água se mistura com a água do corredor do estuário, voltando parte dela a sair na vazante seguinte. Esta mistura é responsável pelas propriedades da água no corredor próximas das do mar e pelos gradientes de salinidade baixos.

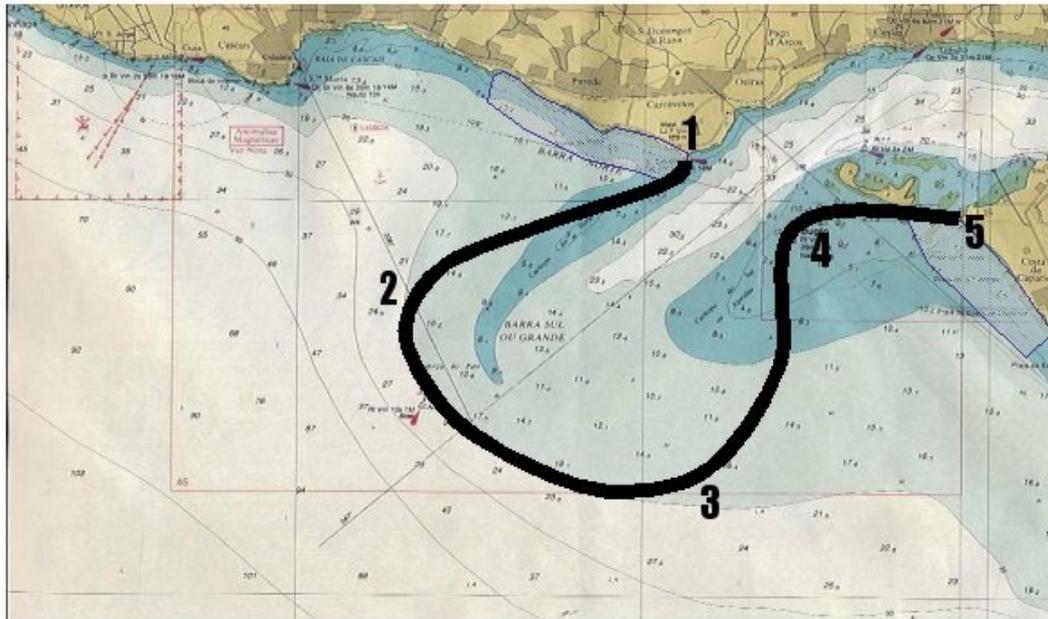


Figura 23: Limite de jusante proposto para o estuário do Tejo

Em termos de circulação podemos então considerar cinco zonas na embocadura do estuário: (i) Zonas que não são afectadas, nem afectam o estuário, (ii) zonas afectadas pelo estuário, mas que não o afectam (*ROFI*), (iii) zonas que são afectadas pelo estuário e que o podem influenciar durante a enchente, (iv) zonas que afectam o estuário em enchente, mas que não são afectadas pelo estuário e (v) zonas que estão claramente no interior do estuário.

O limite proposto acima inclui no interior do estuário a zona ocupada pelo jacto de vazante, a qual é uma zona afectada pelo estuário durante a vazante e que o pode afectar durante a enchente. As zonas adjacentes a terra, por onde entra a maioria da água de renovação do estuário foram consideradas no exterior do estuário pois em termos de ictioplâncton, salinidade e de sedimentologia não faria sentido considerá-las no seu interior. De qualquer modo, em termos ambientais isso não é um risco pois são zonas balneares e por isso a sua gestão está sujeitas a condicionalismos tão ou mais restritivos que os aplicados no interior do estuário.

4.3 CONCLUSÕES

A definição do limite de jusante de um estuário não é simples. A salinidade é o traçador da água doce mais simples de medir e pode ser uma informação preciosa para a definição daquele limite. O volume de dados necessário para caracterizar as

distribuições de salinidade é no entanto muito elevado. No caso do estuário do Tejo existe muita informação experimental e as conclusões fornecidas pela salinidade podem ser confrontadas com as fornecidas por outros parâmetros (ictiofauna, sedimentologia, circulação). Esta comparação elimina alguma da incerteza associada à salinidade, a qual pode apresentar variabilidade sazonal importante e gradientes verticais que retiram significado aos valores médios.

A circulação é de facto o processo que determina a distribuição das propriedades e por conseguinte o limite do estuário. No caso do estuário do Tejo as conclusões extraídas das distribuições de salinidade são facilmente reconhecidas como consequência da circulação. Assim, o recurso a um modelo de transporte validado tem um valor inestimável para preencher lacunas de dados de campo.

O limite do estuário foi definido como o limite do jacto de vazante usando toda a informação disponível. Este limite é um limite cauteloso, uma vez que inclui a zona de mistura associada ao jacto de vazante. De facto a zona de mistura mais intensa no estuário do Tejo inclui o jacto de vazante, o corredor e a parte do estuário principal adjacente ao corredor.

5 Outros Estuários Portugueses

As localizações dos estuários são indicadas na Figura 24. Os textos correspondentes a cada um deles são apresentados neste documento, sequencialmente, de Norte para Sul, seguindo a ordem indicada na figura 24.



Figura 24: Localização dos estuários Portugueses.

Em todos os estuários a delimitação é baseada na metodologia de modelação validada no estuário do Tejo, cujos resultados complementam os dados de campo disponíveis.

Em termos de caudais de água doce, os estuários podem ser divididos em dois grandes grupos (Norte e Sul do Tejo). Os estuários localizados a norte têm caudais médios elevados e são geralmente estreitos. Os estuários do sul (Tejo a Guadiana) têm caudais baixos e/ou relações volume/caudal elevadas. São exceções a esta regra o Vouga e o Guadiana.

Quando menor é a relação volume/caudal, menores são as salinidades típicas e menores são os tempos de residência da água doce. Nos estuários a norte do Tejo o tempo de residência é tipicamente inferior a 2 dias (com valor mínimo no estuário do

Minho), enquanto que nos estuários do sul, o tempo de residência é da ordem das semanas a 1 mês.

O estuário do Guadiana tem uma morfologia idêntica à dos estuários do norte, mas o regime de caudais é tipicamente mediterrânico. O caudal varia entre zero e mais de 2000 m³/s, sendo o valor médio de 80 m³/s. Assim, a salinidade média no Guadiana é também baixa, apresentando grande variabilidade sazonal. Neste estuário, quando o caudal do rio atinge os 700 m³/s, a água no seu interior é essencialmente doce.

As embocaduras de todos os estuários, com excepção do Tejo e do Sado estão expostas à acção das ondas, o que torna as condições de navegabilidade más em condições de tempestade. À excepção do Rio Minho, na fronteira com Espanha, todos os estuários albergam portos de dimensão variável no seu interior. Para melhorar a segurança de navegação e as condições de manutenção dos respectivos canais, todas as embocaduras (com excepção do Tejo, Sado e Mira) foram artificializadas através da construção de molhes. Estes molhes condicionam a propagação das ondas e o escoamento de maré, podendo influenciar a própria definição do limite do estuário.

5.1 ESTUÁRIO DO MINHO

O estuário do Minho tem sido objecto de poucos estudos, não sendo possível caracterizá-lo através de dados experimentais. A definição do limite de jusante do estuário assenta por isso essencialmente nos resultados do modelo matemático.

5.1.1 Descrição do estuário

O rio Minho nasce em Espanha na serra de Meira, e desagua entre Caminha e A Guarda, após um percurso de 300 km. Nos últimos 70 km delimita a fronteira entre Portugal e Espanha. O estuário do rio Minho (Figura 25 e Figura 26) constitui uma zona húmida de grande valor ecológico. Desde 1986 é reserva de caça e foi listada na convenção de RAMSAR (1971) para a conservação de zonas húmidas. Uma área total de 3,4 km², que compreende o estuário do rio Minho e a embocadura do rio Coura está incluída na lista de locais portugueses na Rede Natura 2000. A faixa litoral que se estende para a sul da foz (litoral de Moledo) corresponde a um espaço classificado como área de interesse para a conservação da natureza pelo projecto Biótopos/Corine (Costa Verde) e que tem sido igualmente proposto na lista nacional de sítios da Rede Natura 2000 (Costa de Viana) (INAG, 2000).

5.1.1.1 Morfologia

O limite médio de penetração da maré situa-se aos 35 km, a montante de Valença do Minho (Vilas & Somoza, 1984). O estuário alarga nos últimos 15 km e volta estreitar na embocadura pela presença do monte Santa Tegra e pelo desenvolvimento de um banco de sedimentos. Na zona mais larga (cerca de 2 km), tem lugar uma dinâmica complexa resultado da interacção de processos fluviais e marinhos. Nesta zona, a maior parte do escoamento concentra-se num canal principal sinuoso, limitado por bancos de areia de diferentes origens. Na embocadura do estuário, as ilhas Insua Nova e Insua Velha delimitam dois canais (norte e sul), que determinam a forma do escoamento. As profundidades máximas localizam-se na embocadura, onde o canal tem uma profundidade de 4 m abaixo do zero hidrográfico. Grande parte dos sapais e bancos de areia só são inundados nas preias-mares das marés vivas.

Os bancos de areia estão em continua evolução. A construção de barragens a montante desde os anos 60 limitou as pontas de cheia e incrementou a sedimentação no estuário. Após o estabelecimento duma linha de ferry entre as localidades de Caminha e O Pasaxe em 1994, realizam-se dragagens periódicas para permitir o tráfego, o que tem alterado a dinâmica sedimentar (Torres *et al.*, 1997 e 2000).

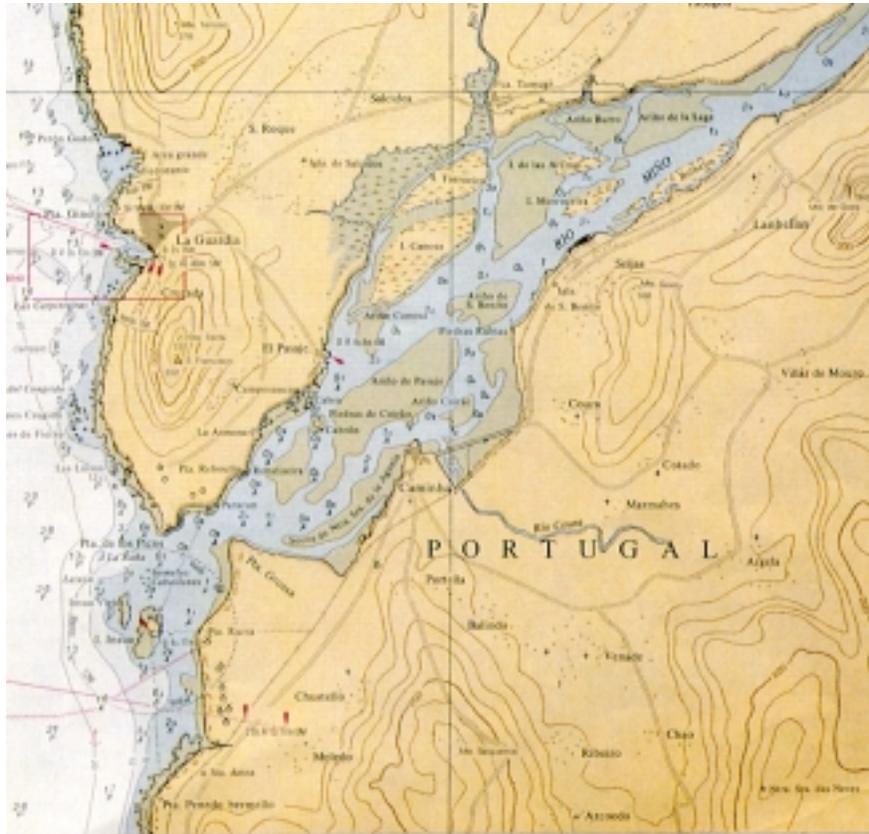


Figura 25: Estuário do Rio Minho, na fronteira entre Portugal e Espanha. As coordenadas do ponto central são: Longitude W 8° 46' 26" Latitude N 41° 55' 8".

Nas margens do estuário estão localizadas importantes manchas de vegetação (matas ripícolas, caniçais, juncais), que albergam uma avifauna muito diversificada. Na embocadura do rio Tamuxe, existem caniçais e barras de lama vegetadas (denominadas 'morras' na zona). As três maiores estão sujeitas a erosão, e as menores formaram-se recentemente (a partir de 1959) depois da construção de barragens a montante (Vilas & Somoza (1984)). Ao sul do estuário, na desembocadura do rio Coura, tem-se desenvolvido uma extensa zona de sapais.

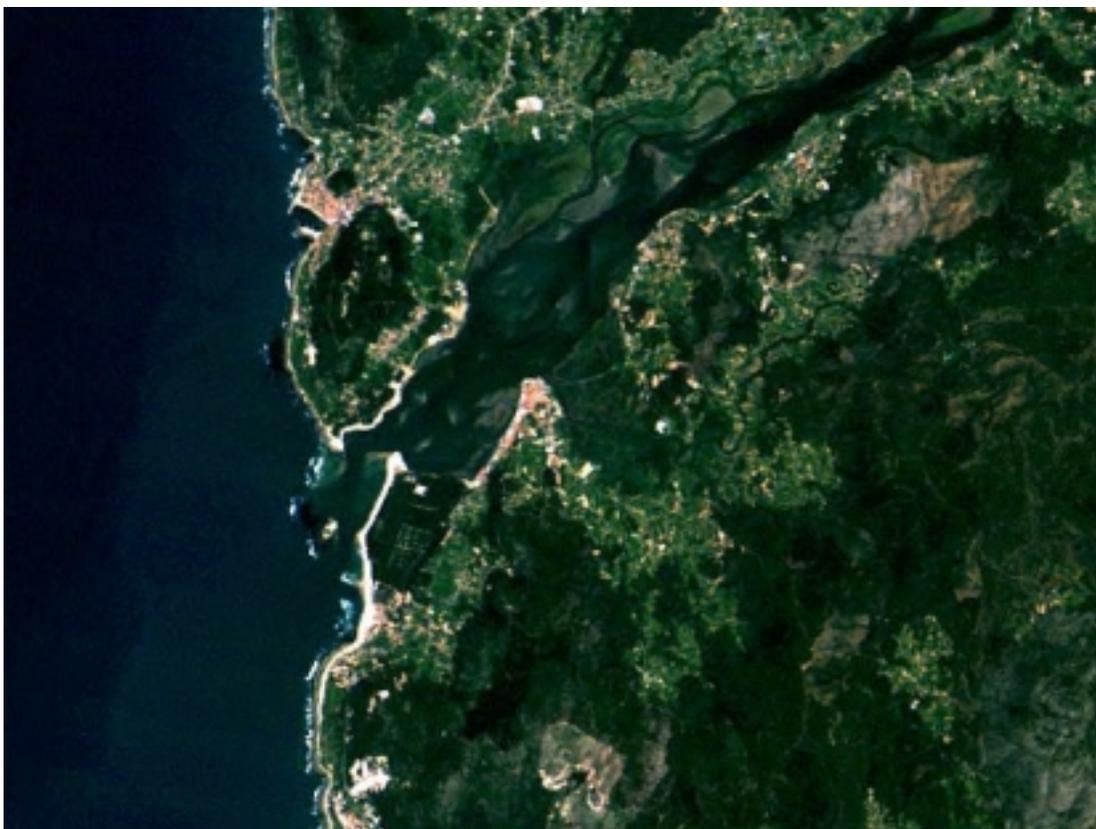


Figura 26: Fotografia de Satélite da Embocadura do estuário do Minho. Apesar da má qualidade da imagem são nítidas as zonas de deposição de sedimentos e os canais.

5.1.1.2 Dados de campo

Existem poucos dados de campo e estudos do estuário do Minho. Vilas e Somoza, 1984, realizam um estudo geológico, aonde identificaram as direcções principais do escoamento residual e descrevem sucintamente as estruturas geológicas na zona. Mediante imagens de satélite, o Laboratorio de Teledetección e SIG da Universidade de Vigo tem contribuído para a caracterização dos padrões de evolução das zonas de sedimentação desde o estabelecimento da linha de ferry (Torres *et al.*, 1997 e 2000)

O caudal fluvial médio anual obtido de dados na estação hidrométrica da Foz do Mouro varia entre $127 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com um valor médio de $300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (INAG, 2000). Não existem dados de caudais dos afluentes que desaguam na zona do estuário (Coura, Tamuxe, Louro...). Eles são no entanto muito inferiores aos do Minho.

Não foram localizadas medidas de maré específicas deste estuário, durante a recolha de dados para o presente estudo. No entanto, a partir das medidas em marégrafos a norte e a sul e a partir de modelos globais e regionais de propagação

da maré, pode-se dizer que a maré na zona é essencialmente semidiurna (semi-amplitude média da M2 em torno a 1 m), modulada no ciclo marés vivas – marés mortas principalmente pelas componentes harmónicas S2 e N2. O estuário pode por isso classificar-se como mesotidal. As baixas profundidades no estuário e a existência de zonas de descobertura induzem forte atrito, e a consequente deformação da onda de maré, sendo por isso de esperar que a duração da enchente seja menor do que a da vazante.

Não foram encontradas medidas de salinidade no estuário. No entanto, dado que o caudal excede em muito o prisma de maré, são de esperar salinidades baixas, com uma cunha salina na zona próxima da embocadura, cuja localização e estrutura vertical dependerá do caudal do rio e da amplitude da maré. As baixas profundidades retiram importância ao vento e aos fenómenos de upwelling - downwelling na plataforma costeira adjacente.

5.1.2 Resultados de modelação

A batimetria utilizada nas simulações numéricas mostra-se na Figura 27 e compreende o estuário e a plataforma adjacente até a batimétrica dos 70 m, com um passo espacial variável entre os 100 m no interior do estuário e os 650 m (300 m na direcção Y) na fronteira oeste. Os dados batimétricos e a linha de costa foram obtidos das cartas nº 924, do Instituto Hidrográfico de la Marina, Cádiz, Spain, 1989, com levantamentos do ano 1963), nº 51 e nº 24201 do Instituto Hidrográfico da Marinha, Lisboa, de 1978 e 1999 respectivamente.

A evolução das localizações das ilhas vegetadas e dos bancos de areia é evidente através da comparação das cartas. A carta nº 24201 de 1999 e o mapa traçado por Vilas e Somoza (1984) foram utilizados como referência na construção da batimetria. Para a zona a montante daquelas cartas não existem levantamentos detalhados. No modelo foi considerado um canal de entrada do Rio, de 20 km de comprimento, de modo incluir no modelo toda a região sujeita a maré, permitindo usar o caudal do rio como única condição nessa fronteira.

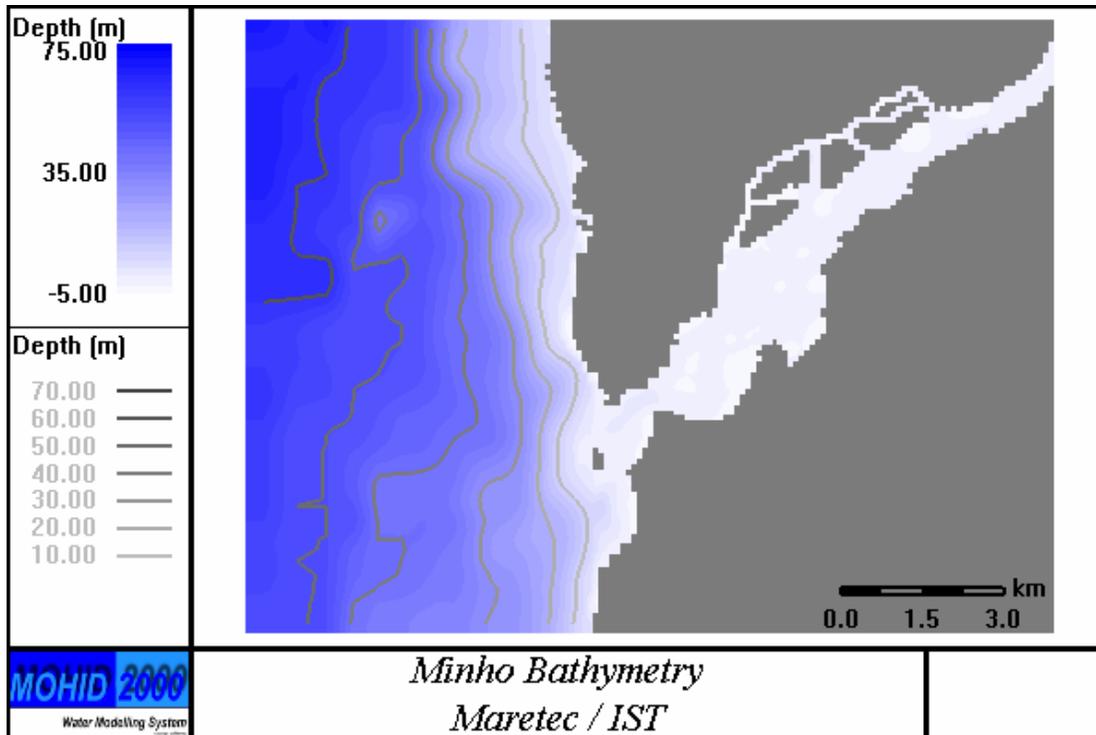


Figura 27: Batimetria do estuário utilizada no modelo hidrodinâmico.

A hidrodinâmica foi simulada para condições de caudal médio do rio ($300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), e maré média (M_2). As amplitudes e fases desta componente de maré na fronteira oceânica foram obtidas a partir de um modelo global de maré (Le Provost, 1998).

5.1.2.1 Hidrodinâmica do Estuário

Na Figura 28 mostra-se o campo de velocidade integrada em profundidade a meio da vazante e na Figura 29 a meio da enchente. As velocidades máximas registam-se em vazante, na zona da embocadura, onde podem atingir $1,3 \text{ ms}^{-1}$.

Uma série temporal da velocidade integrada em profundidade num ponto do canal principal é mostrada na Figura 30. A evolução da velocidade é típica de uma maré semi-diurna. A velocidade de vazante é superior à de enchente, e a duração da vazante é também superior à de enchente. Neste ponto a velocidade residual é claramente no sentido de vazante, o que é uma consequência da razão caudal do rio/prisma de maré.

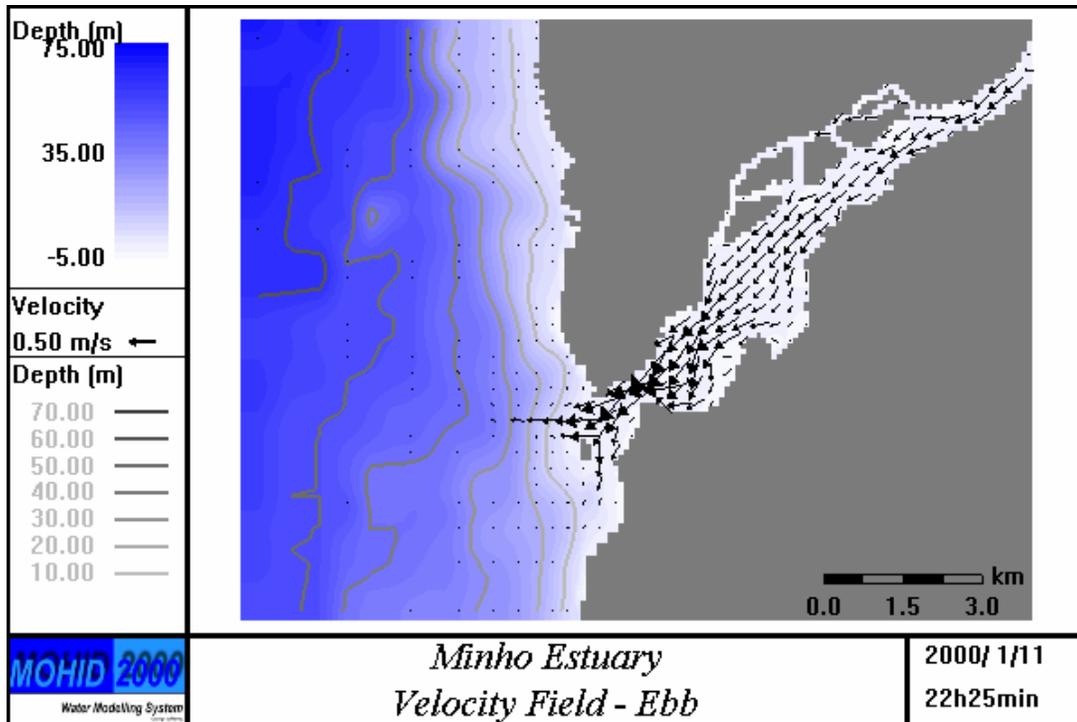


Figura 28: Velocidade a meio da vazante

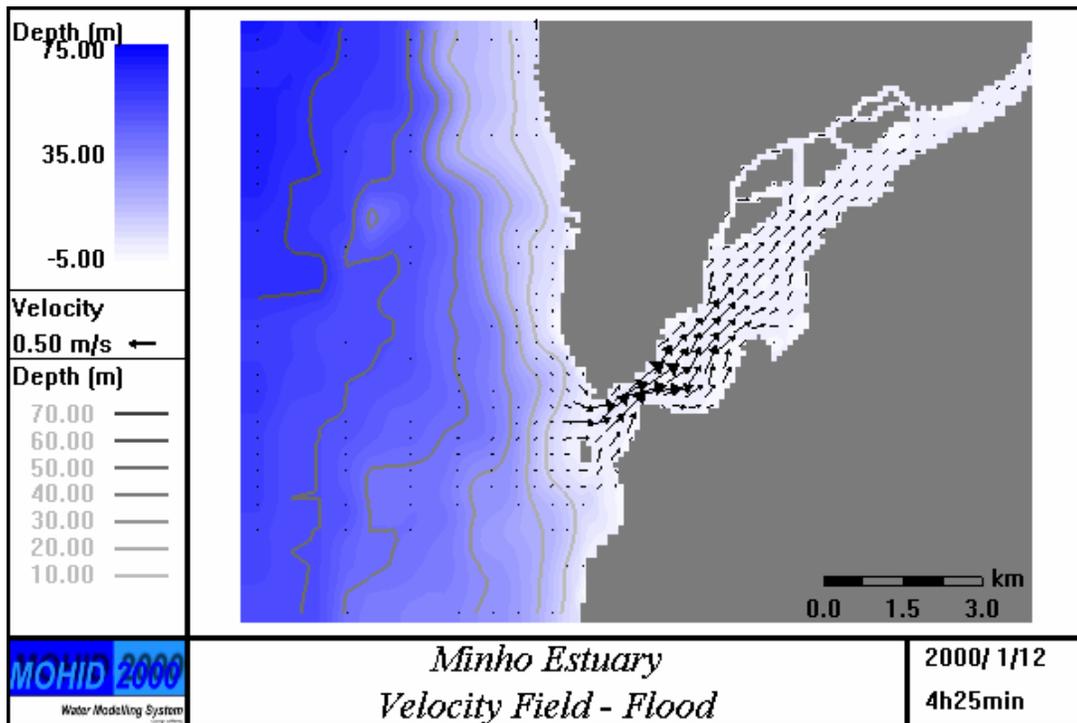


Figura 29: Velocidade no momento de máximas velocidades na enchente

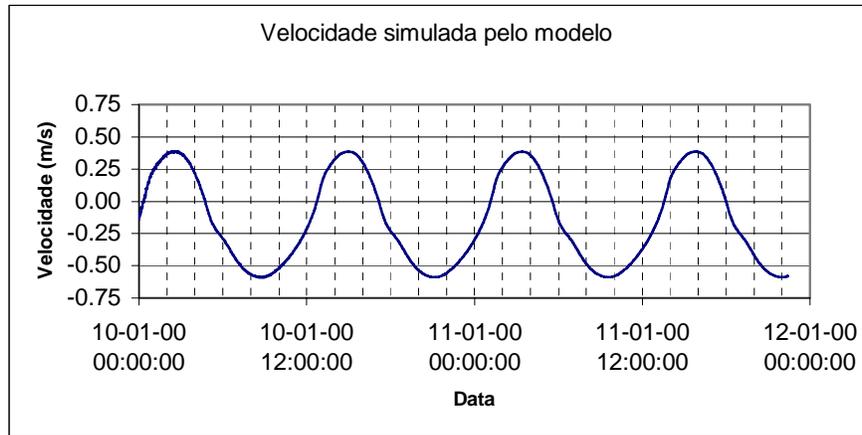


Figura 30: Série temporal de velocidade calculada pelo modelo num ponto do canal principal. A velocidade em vazante (negativa) é claramente superior à velocidade em enchente (positiva).

A Figura 31 mostra a circulação residual (fluxos) calculada por integração do fluxo transiente (caudal por unidade de largura). A figura mostra um escoamento contínuo dirigido para o exterior do estuário, que sugere tempos de residência reduzidos. Este escoamento era esperado depois da análise da Figura 30 e compreende-se se pensarmos que o rio Minho tem o mesmo caudal médio do Tejo, e o estuário deste último tem uma superfície cerca de 100 vezes superior.

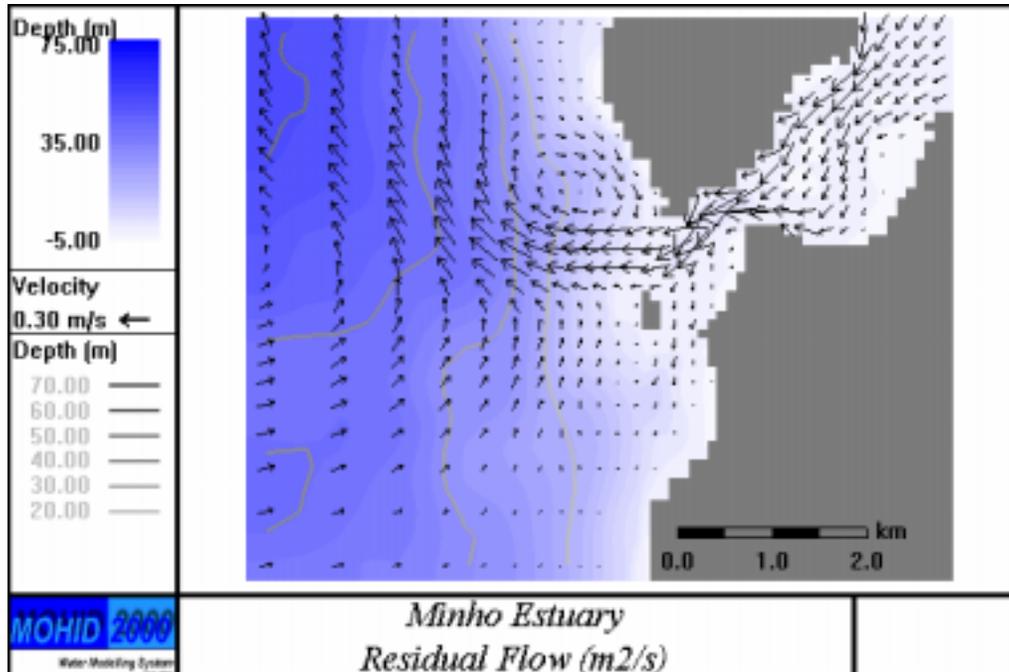


Figura 31: Circulação residual (fluxos) na embocadura do Estuário do Minho.

5.1.2.2 Salinidade

Distribuições de salinidade integrada em profundidade para enchente e vazante apresentam-se na Figura 32 e na Figura 33 em condições médias (caudal do rio de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ e semi-amplitude de maré de 1.01 m). A distribuição de salinidade depende da advecção de água doce proveniente do rio e da mistura com água oceânica promovida pela oscilação de maré.

O deslocamento residual da água para o mar pode ser inferido da circulação residual apresentada na Figura 31. Assim é de esperar que a água do rio atravesse o estuário a uma velocidade da ordem de 20 cm/s (cerca de 18 km/dia). Nestas condições a salinidade tem que ser baixa na generalidade do estuário, especialmente em maré vazia. As distribuições representadas nas figuras mostram que em maré vazia a generalidade do estuário é ocupado por água doce, penetrando a água salgada cerca de 6 km no interior do estuário (zona da afluência do rio Coura) em maré-cheia.

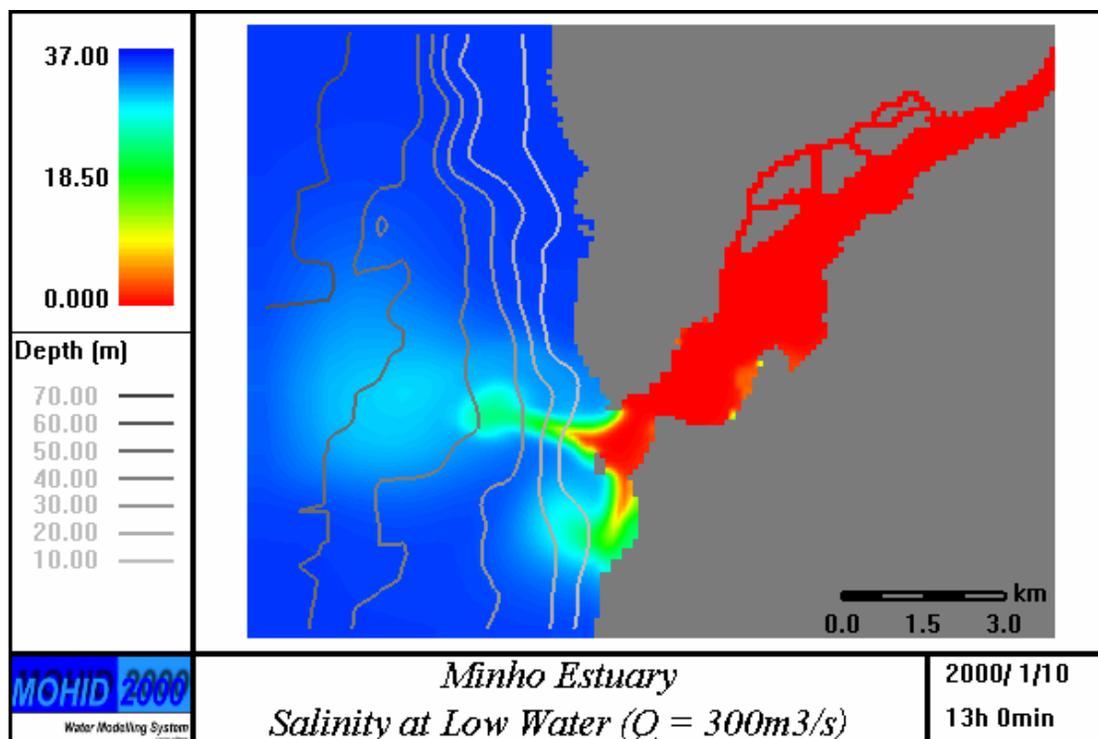


Figura 32: Distribuição de salinidade em baixa-mar, em maré média e com um caudal do rio de $300\text{m}^3/\text{s}$.

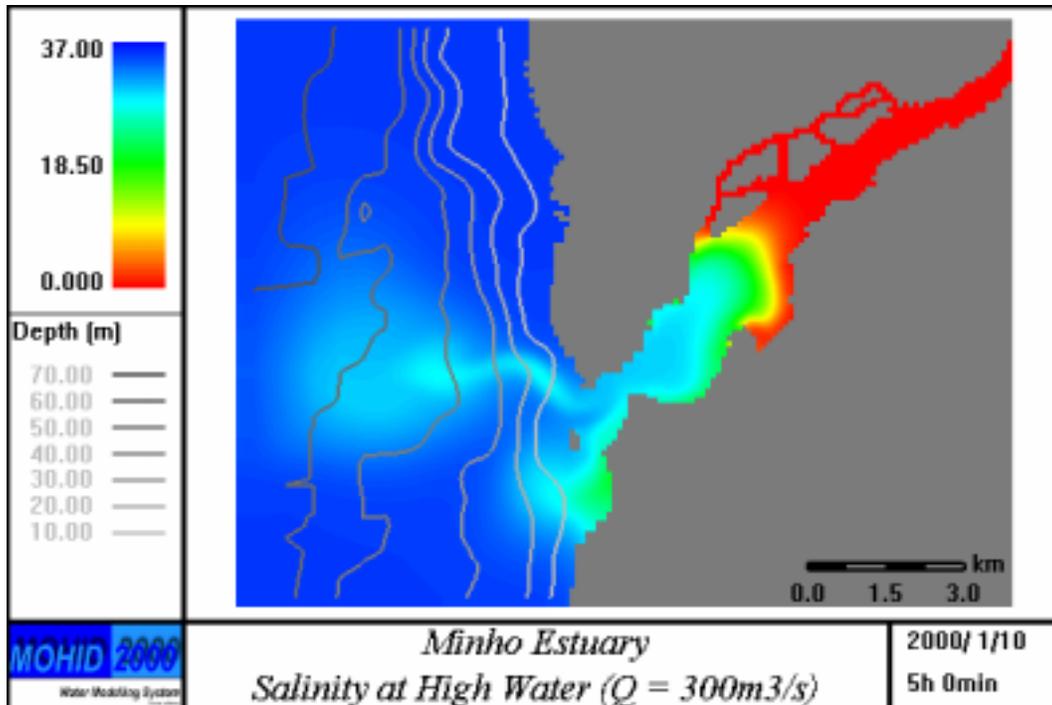


Figura 33: Distribuição de salinidade em preia-mar, em maré média e com um caudal do rio de $300\text{m}^3/\text{s}$.

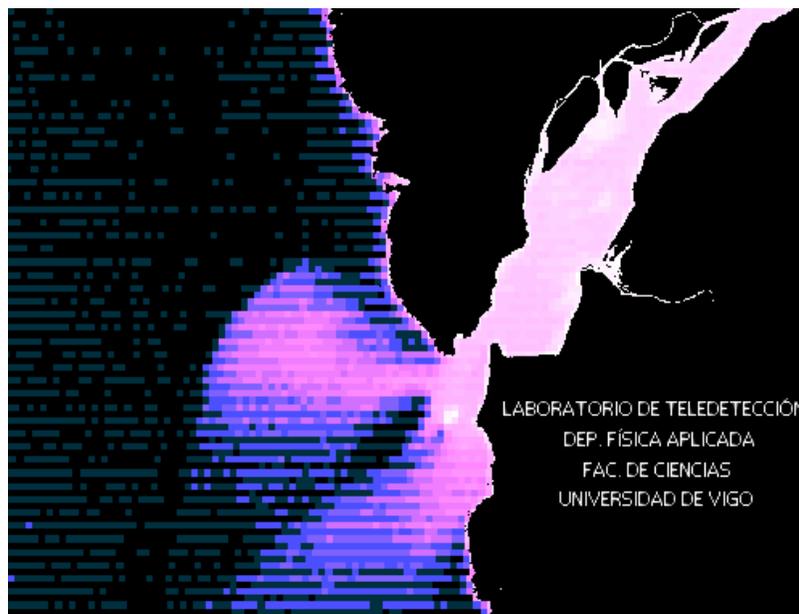


Figura 34: Pluma térmica do estuário obtida por imagem de satélite por (Torres et al. 1997). São visíveis os dois jactos de saída formados pela ilha Ínsua.

Em maré vazia são visíveis dois jactos de saída (um em direcção oeste e outro sudoeste) associados aos dois canais formados pela ilha Insua Nova. O jacto norte é mais longo, por aí ser maior a velocidade. A existência de dois jactos de saída

também foi identificada por (Torres et al. 1997), através de imagens de satélite da pluma térmica (

Figura 34). Em preia-mar é visível uma pequena massa de água, de menor salinidade no litoral do Moledo, a sul da embocadura. A retenção desta massa de água está associada aos baixos valores das velocidades residuais, consequência da topografia local, sendo parcialmente renovada em cada ciclo de maré.

5.1.2.3 Simulações com traçadores lagrangeanos

Para visualizar o escoamento foram usados traçadores lagrangeanos emitidos em caixas, em situação de preia-mar (Figura 35) e foi seguido o seu deslocamento ao longo de dois dias. A Figura 36 mostra a distribuição de traçadores em baixa-mar, 42 horas após o início da emissão e a Figura 37 a distribuição na preia-mar seguinte. A análise destas figuras mostra que toda a água no interior do estuário é renovada em menos de 42 horas. As duas últimas figuras mostram que a água que sai do estuário não volta a entrar. Este facto é consequência da intensidade do jacto de vazante, que expulsa a água proveniente do estuário para fora da acção do escoamento de enchente. A pouca água proveniente do estuário que volta a entrar vem muito diluída como mostra a grande distância entre as partículas localizadas no interior do estuário em preia-mar.

Se o escoamento costeiro devido ao vento tivesse sido considerado nas simulações, a probabilidade de a água de vazante voltar a entrar seria ainda inferior, por ser afastada mais rapidamente da embocadura do estuário.

5.1.3 Limite de Jusante

O limite de jusante do estuário é definido na Figura 38, como a linha que une Punta do Pico/Ilha Ínsua/Ponta Qinhondeiro, embora o limite tradicional do estuário, baseado num critério geográfico seja definido como a linha mais curta que une a ilha Ínsua a terra. A linha que une Punta do Pico/Ilha Ínsua/Ponta Qinhondeiro pode ser definida pelos pontos com as seguintes coordenadas geográficas:

Pontos	Latitude (N)	Longitude (O)
1	41° 52' 05"	8° 52' 21"
2	41° 51' 30"	8° 52' 24"
3	41° 51' 24"	8° 52' 24"
4	41° 50' 27"	8° 52' 28"

Os resultados do modelo mostram que a água que atravessa a secção Punta do Pico/ Ilha da Insua, na parte norte da embocadura, não volta a entrar no estuário.

Assim esta linha é parte do limite jusante, tal como considerado tradicionalmente. A salinidade média na baía de Moledo é muito inferior à salinidade do mar, por as correntes de enchente não serem suficientemente fortes para remover a água que para aí é transportada durante a vazante e por isso deve ser considerada parte integrante do estuário. Este critério é consistente com a classificação desta área pelo projecto Biótopos/Corine (Costa Verde) como sendo de interesse para a conservação da natureza e com o facto de ter sido incluída na lista de locais propostos para a Rede Natura 2000 (Costa de Viana) (*citado em INAG, 2000*).

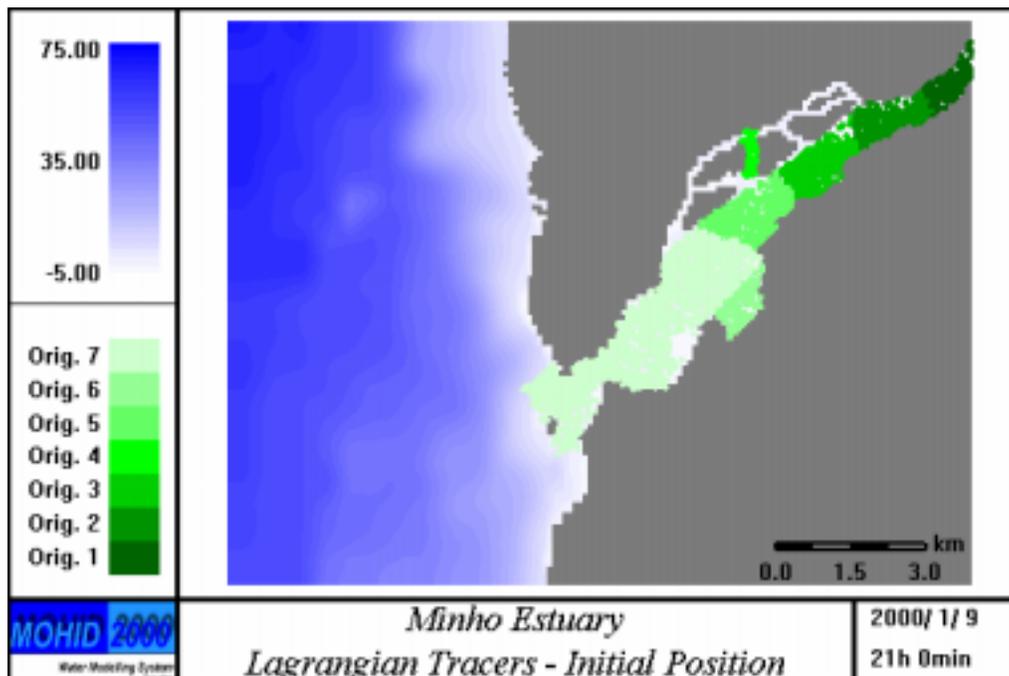


Figura 35: Distribuição inicial de traçadores (preia-mar)

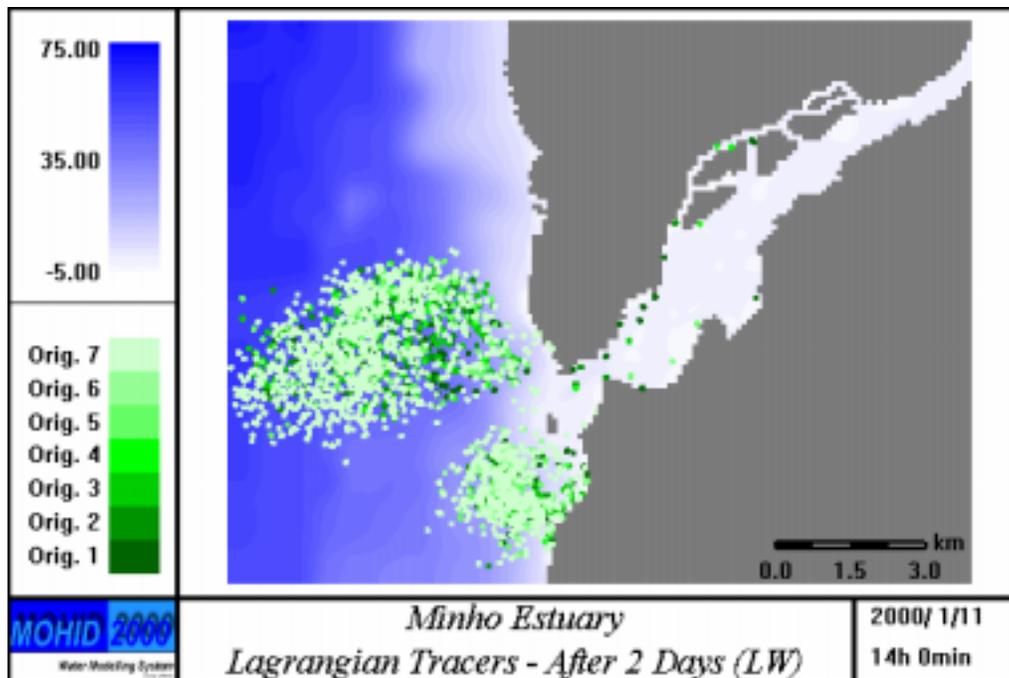


Figura 36: Distribuição de traçadores em preia mar, 3 ciclos de maré mais tarde.

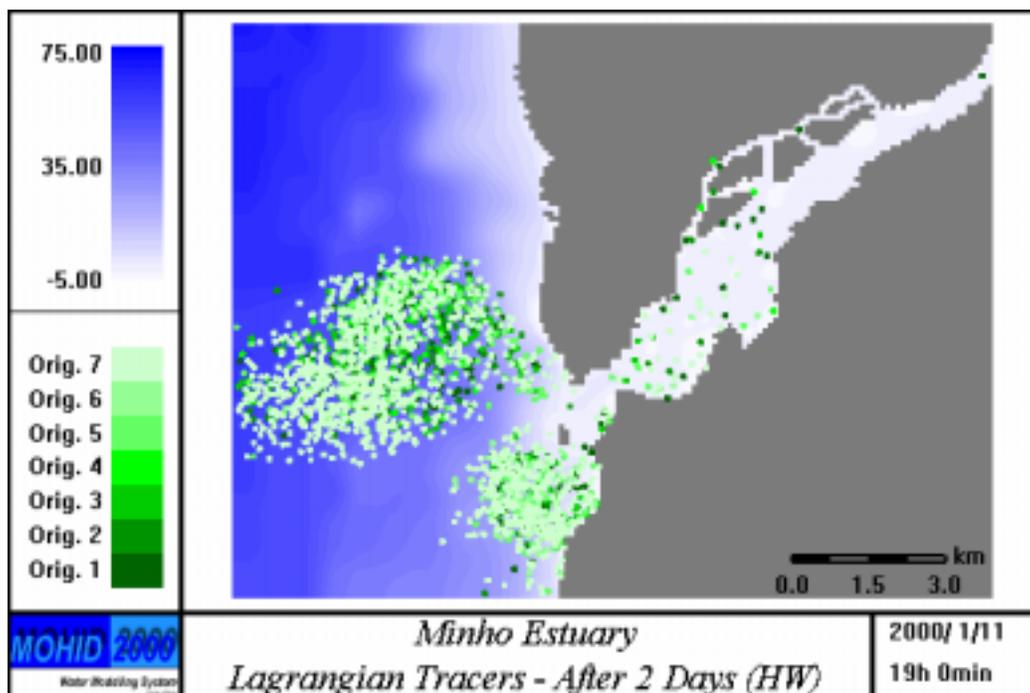


Figura 37: Distribuição de traçadores em baixa-mar após a preia-mar da figura anterior.

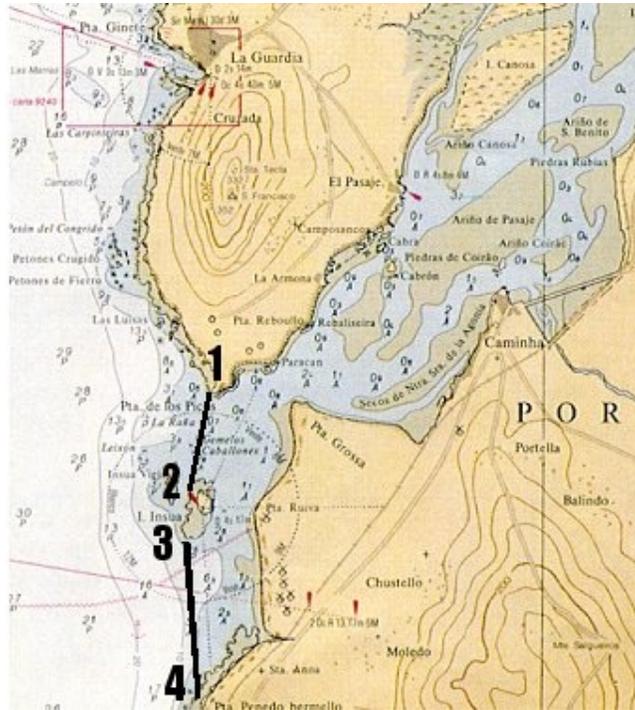


Figura 38: Limite jusante proposto para o estuário.

5.2 ESTUÁRIO DO LIMA

O estuário do rio Lima é um dos maiores do norte de Portugal, albergando no seu interior o importante porto de Viana do Castelo. A hidrodinâmica da zona portuária é bem conhecida, mas os dados de campo são insuficientes para caracterizar completamente o estuário e para definir o limite de jusante. Os resultados do modelo permitiram a quantificação do campo de velocidades, a simulação da salinidade e identificação dos processos de transporte na zona da embocadura, necessários à definição do limite de jusante do estuário.

5.2.1 Dados de Campo

Existe informação batimétrica detalhada da zona inferior do estuário, proveniente de levantamentos efectuados em 1982. Para a zona de montante estão disponíveis secções transversais ao longo do estuário que são suficientes para definir a matriz de fundos a usar no modelo. A partir desta informação foi gerada a batimetria representada na Figura 39, correspondente à malha representada na Figura 40 (134*294 pontos). O passo espacial da malha é menor no interior do estuário (50 metros) e aumenta progressivamente na plataforma exterior, onde atinge os 250 metros. O domínio de simulação inclui toda a região sujeita a maré no interior do estuário e a zona da plataforma onde se dispersa a pluma.

O baixo estuário é constituído por uma bacia larga e pouco profunda, com extensas zonas de descobertura em ambos os lados do canal principal. O alto estuário é constituído por um canal estreito, cuja profundidade diminui gradualmente para montante. A comunicação com o mar faz-se através de um canal estreito e profundo (profundidade típica de cerca de 10 metros). A zona da embocadura está artificializada, com molhes de protecção das instalações portuárias existentes naquela zona. Estas instalações dispõem de bacias protegidas onde a água tem tempos de residência elevados.

A maré na embocadura do estuário é idêntica à dos outros estuários da região. Com semi-amplitude média da ordem de 1 metro (componente M2 1.04 m), e marés vivas médias com amplitudes de 2.8 metros. O caudal do rio médio de Verão varia entre 2.5 e 5 m³/s e o caudal médio anual são 62 m³/s. Foram feitas simulações em condições de maré médias, com o caudal típico de Verão e o caudal média anual.

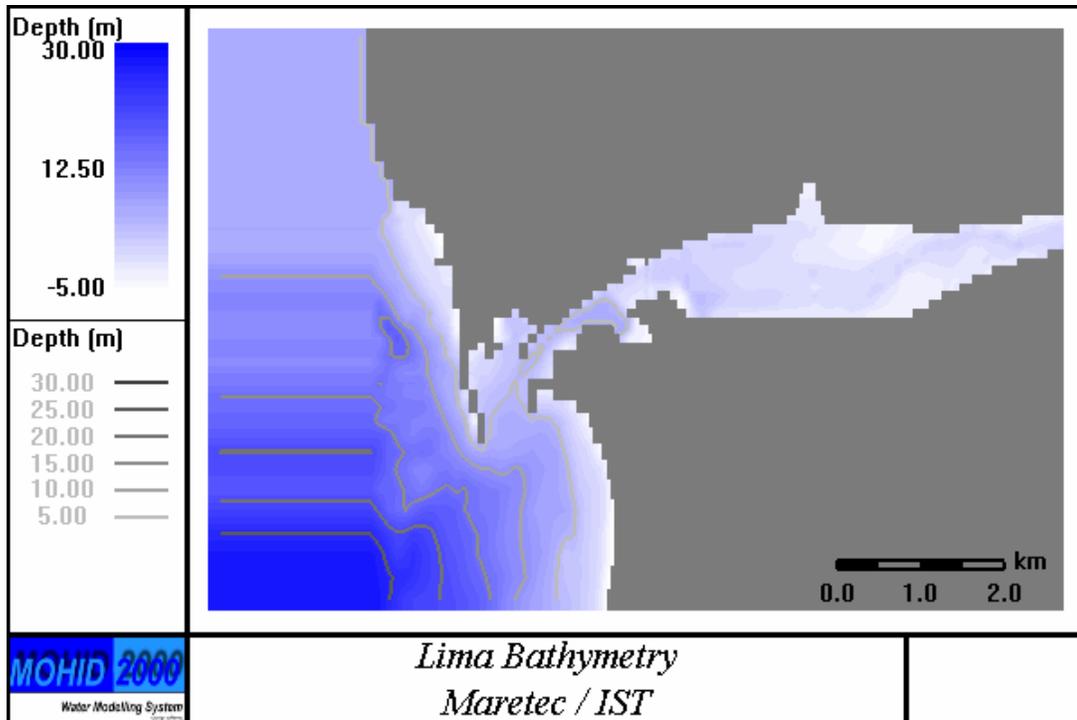


Figura 39: Batimetria do estuário do rio Lima usada nas simulações.

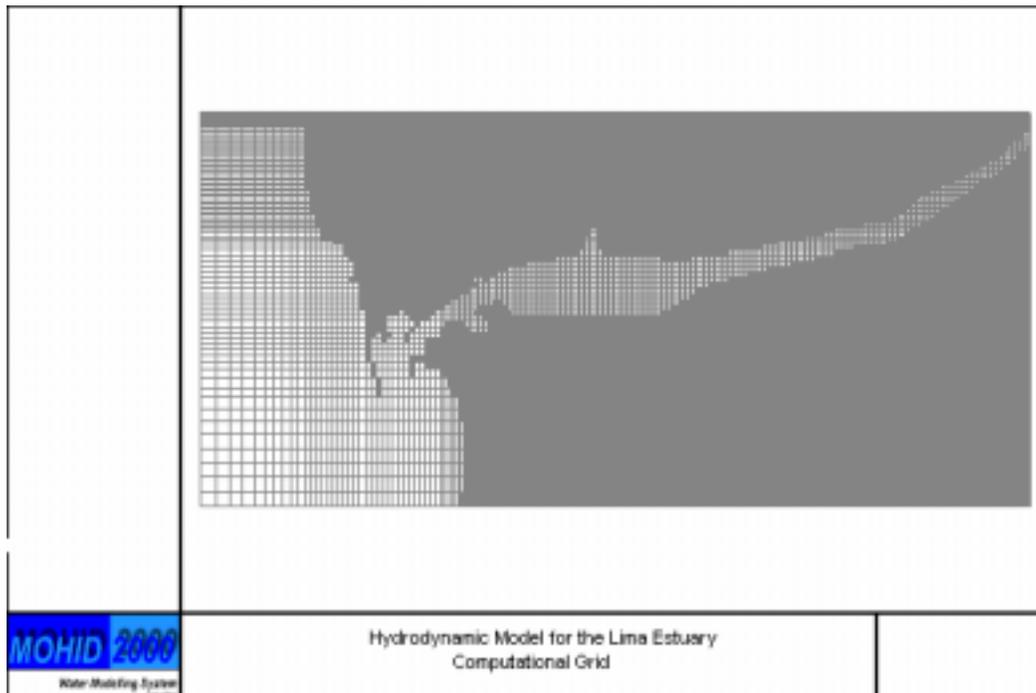


Figura 40: Malha usada no modelo. A malha é mais fina no interior do estuário (passo de 50 metros) e aumenta progressivamente na plataforma exterior onde atinge os 250 metros.

5.2.2 Resultados do modelo

Os resultados do modelo são apresentados na forma de séries temporais de níveis e de salinidades e na forma de distribuições espaciais de velocidade e de salinidade. O movimento das massas de água é visualizado recorrendo aos traçadores lagrangeanos. As simulações foram efectuadas em condições de maré média, para situações de caudal médio ($62 \text{ m}^3/\text{s}$) e de caudal típico de Verão ($3.4 \text{ m}^3/\text{s}$).

A Figura 41 mostra a evolução temporal dos níveis ao longo do estuário na situação de caudal médio. Esta figura mostra que a amplitude de maré diminui progressivamente para montante, o que aliado à pequena largura do estuário naquelas regiões mostra que o seu contributo para o prisma de maré, é reduzido. A Figura 42 apresenta evoluções de salinidade em regime de caudal de Verão e a Figura 43 em regime de caudal médio. A comparação das figuras mostra que em situação de caudal média a cunha salina se limita à zona do baixo estuário, podendo durante o período de estiagem atingir as regiões de montante.

A Figura 44 mostra a distribuição de velocidades em vazante e a Figura 45 em enchente. As figuras mostram velocidades máximas nas zonas de menor secção transversal, com valores da ordem dos 80 cm/s , em vazante. O jacto de vazante é menos marcado do que noutros estuários, devido ao aumento da área de passagem na zona da embocadura que está artificializada, à semelhança de outros estuários se pequenas dimensões que também albergam portos.

A Figura 46 mostra a distribuição de velocidades residuais. Também aqui as velocidades residuais são maiores na zona do canal de menor secção. Na embocadura as velocidades são da ordem dos 5 cm/s , sendo bem visível o jacto de saída e os dois vórtices adjacentes. O facto de o jacto de saída ser paralelo à costa gera (à semelhança do estuário do Mira) uma corrente paralela à costa dirigida de norte para sul. Devido ao efeito de Coriolis o jacto de saída inflecte para a direita à medida que se desloca para sul. No interior da zona artificializada da barra, são visíveis pequenos vórtices associados à irregularidade da topografia.

As distribuições de salinidade são apresentadas na Figura 47 e na Figura 48. Estas figuras mostram que com caudais de $62 \text{ m}^3/\text{s}$ a salinidade média do estuário é baixa. Em Baixa-mar a água salobra é confinada à zona do canal de saída e da embocadura. Em preia-mar, a salinidade nesta zona é da ordem dos 25‰ . Estas figuras mostram zonas onde a salinidade representada é igual à do mar. São zonas entre – marés que não são inundadas em maré média e por isso o valor da salinidade não é alterado durante a simulação, sendo mantido o valor da inicialização (o do mar, neste caso). Na pequena bacia em frente à embocadura a

amplitude da oscilação da salinidade é baixa. Este facto resulta de ser uma zona semi-fechada (é a bacia de um estaleiro de construção naval), na qual a advecção desempenha um papel secundário. Em baixa-mar é bem visível o jacto de saída e em preia-mar é claro o efeito da entrada predominante de água pelo lado norte, com retenção de água de vazante entre o molhe Oeste e terra.

5.2.2.1 Traçadores Lagrangeanos

Os traçadores lagrangeanos permitem visualizar o escoamento, facilitam a identificação das zonas de influência do estuário e ajudam a quantificar os tempos de residência no interior do estuário como um todo e em cada região do estuário. Tal como noutros estuários, os traçadores forma emitidos em caixas, no baixo estuário e o seu movimento foi seguido ao longo de dois dias. A Figura 49 mostra a localização inicial dos traçadores (em preia-mar), a Figura 50 mostra as localizações em preia-mar, dois dias mais tarde e a Figura 51 na baixa mar subsequente.

As zonas vazias no interior do estuário mostradas pela Figura 49 são zonas entre marés, que estão descobertas no momento da emissão (preia-mar de maré média). A figura de baixa-mar (Figura 51) mostra o jacto de vazante e mostra que dois dias depois da emissão, nesta situação de maré praticamente toda a água que ocupa o baixo estuário foi substituída (principalmente por água de montante). A Figura 50, referente à preia-mar, mostra que na enchente, muitos traçadores regressam à bacia do baixo estuário. A comparação desta figura com a Figura 49 mostra que os traçadores provenientes das várias caixas estão muito misturados e que a densidade de traçadores é muito menor do que a inicial. Estes dois aspectos são consequência da mistura intensa associada ao escoamento de maré. Esta mistura promove a redistribuição da água no interior do estuário (mistura das cores) e desta com a água do mar (diminuição da densidade dos traçadores). Para a diminuição da densidade dos traçadores contribui também a descarga de água doce do rio.

No exterior dos molhes de protecção da zona portuária, a comparação das figuras referentes a preia-mar e a baixa-mar, mostra que os traçadores que estão em frente à embocadura em baixa-mar têm grande probabilidade de voltar a entrar, facto que contribui para aumentar o tempo de residência no interior do estuário.

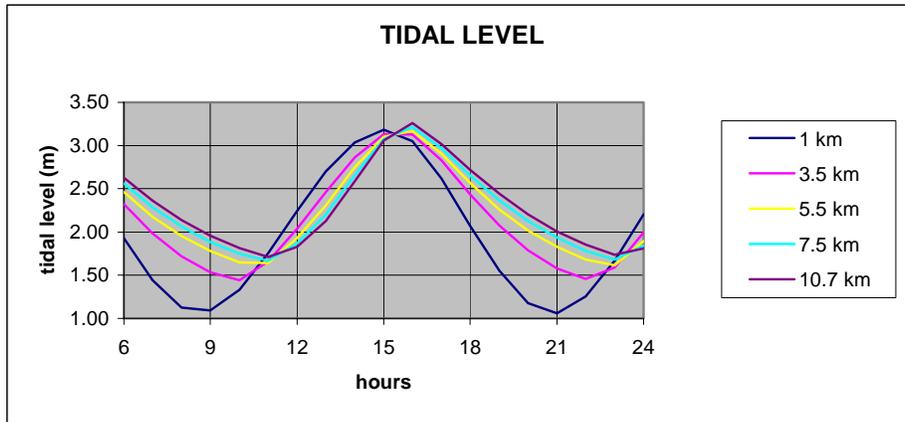


Figura 41: Evolução temporal dos níveis em diferentes pontos ao longo do estuário (caudal de 62 m³/s). É visível o decaimento da maré para montante.

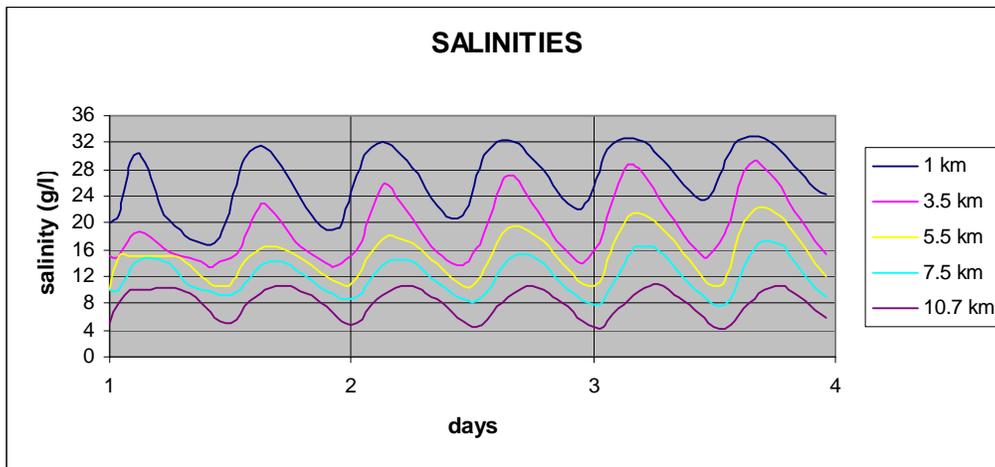


Figura 42: Evolução da salinidade ao longo do estuário em situação de caudal de Verão (3.4 m³/s) e maré média.

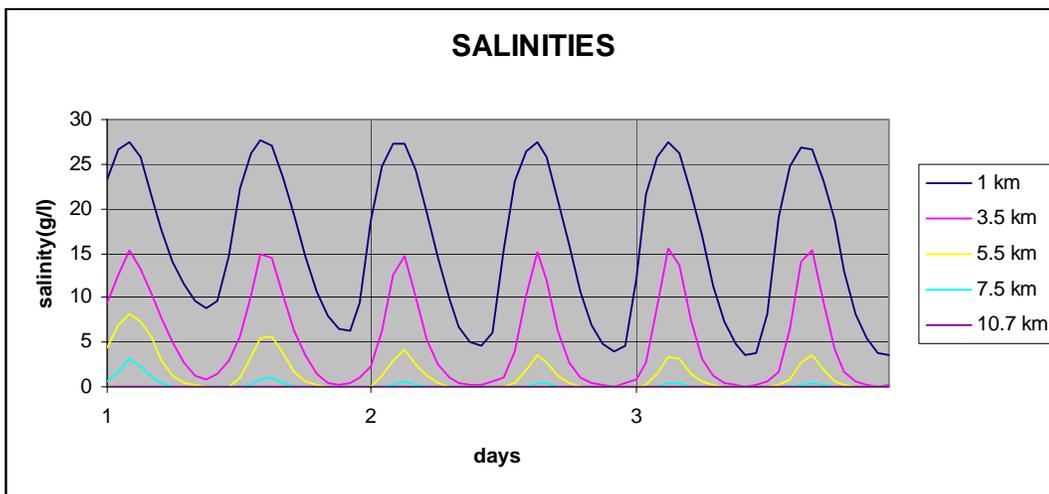


Figura 43: Evolução da salinidade ao longo do estuário em situação de caudal médio ($62 \text{ m}^3/\text{s}$) e maré média.

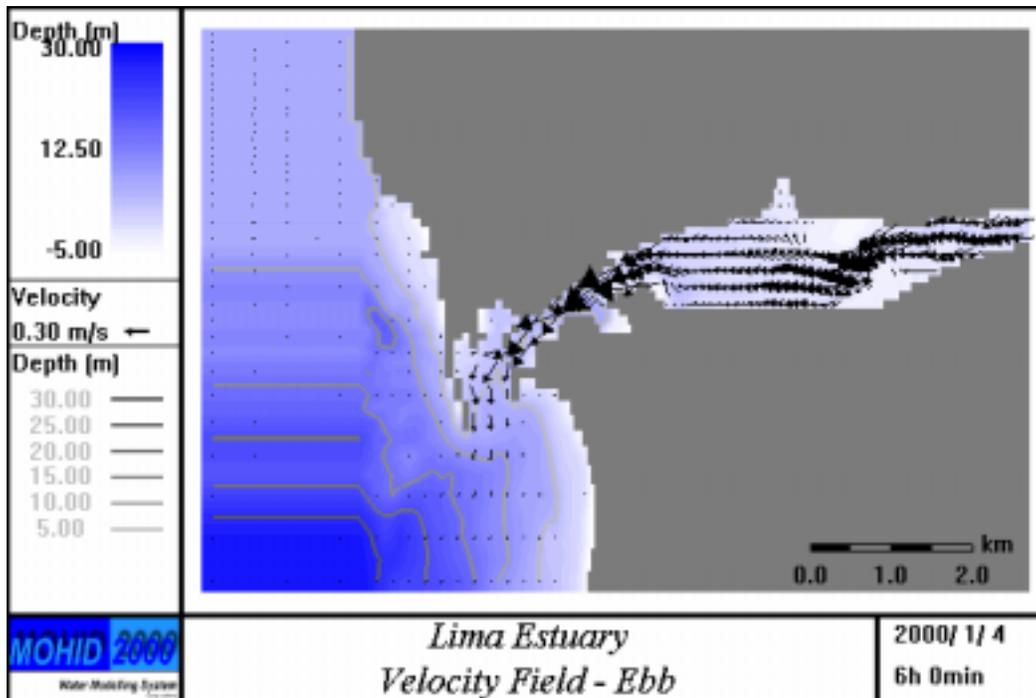


Figura 44: Distribuição espacial de velocidades em vazante, em situação de caudal e de maré média.

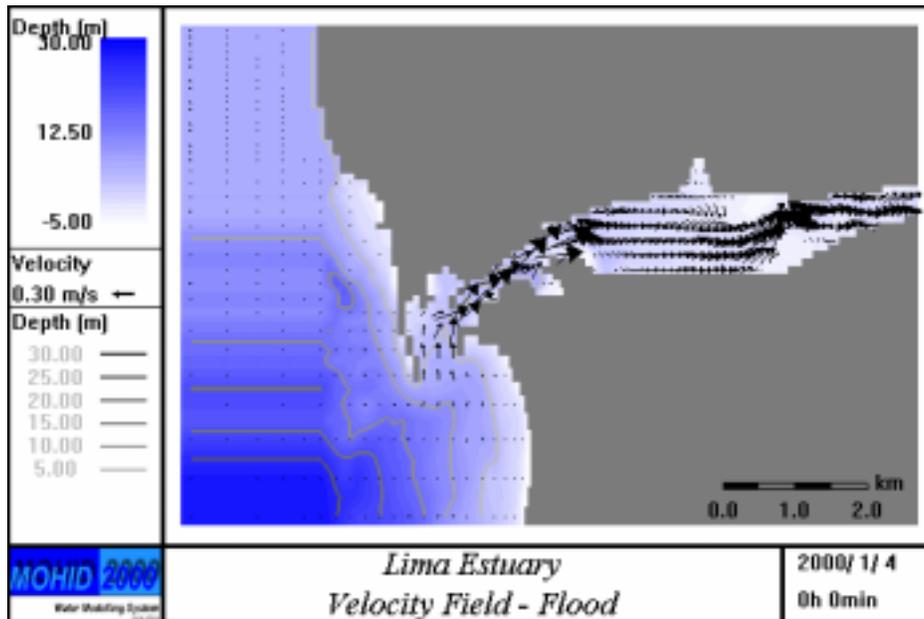


Figura 45: Distribuição espacial de velocidades em enchente, em situação de caudal e de maré média.

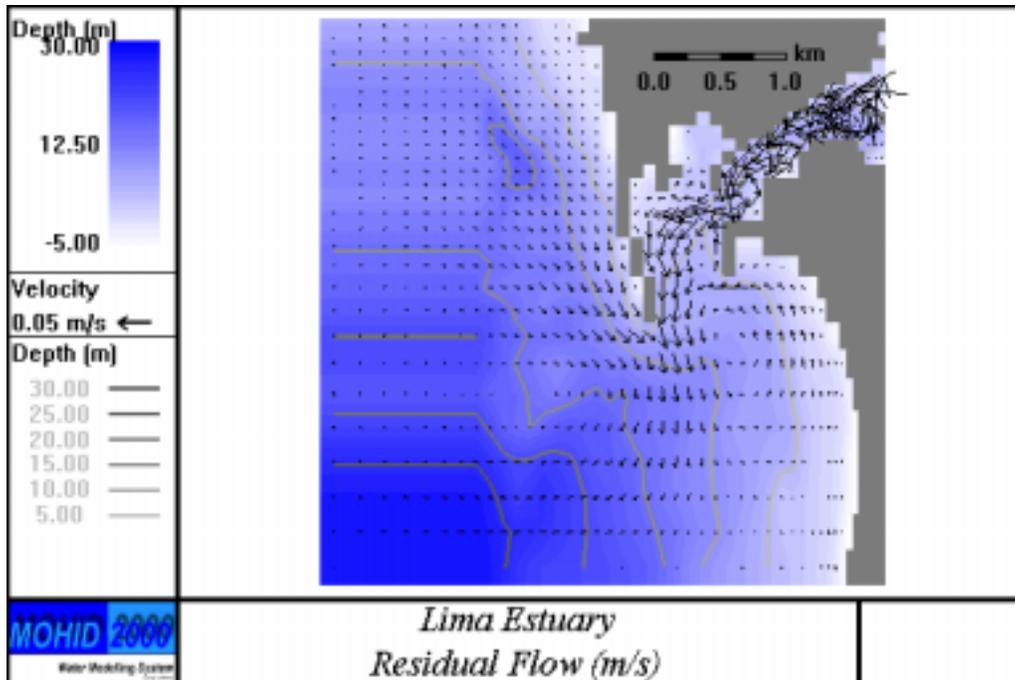


Figura 46: Distribuição de velocidade residual na zona da embocadura do estuário do Lima, em situação de caudal e de maré média.

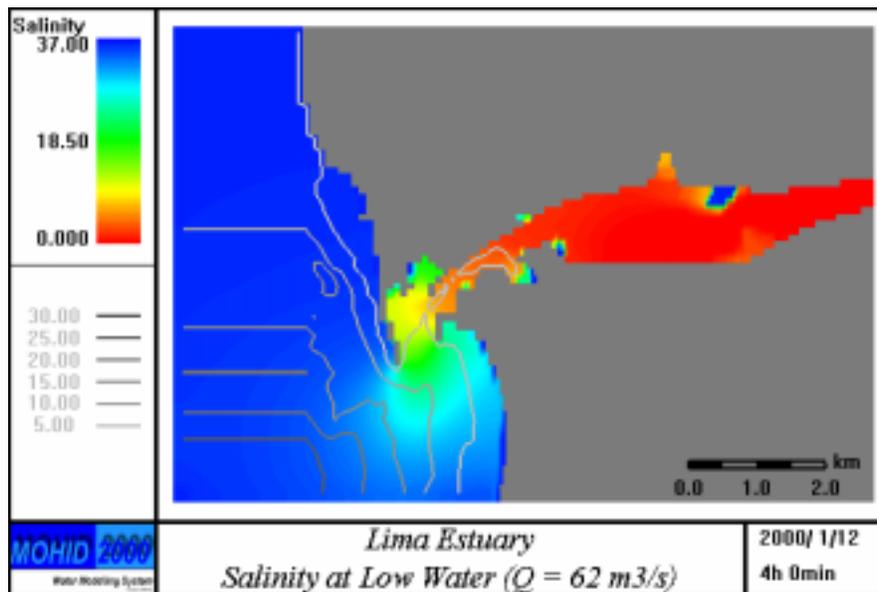


Figura 47: Distribuição de salinidade no estuário, em baixa-mar, em situação de maré e caudal médio ($62 \text{ m}^3/\text{s}$) A zona a azul no interior do estuário é uma zona entre - marés, que foi inicializada com salinidade igual à do mar e que não cobrindo em maré média, mantém o valor da salinidade com que foi inicializada.

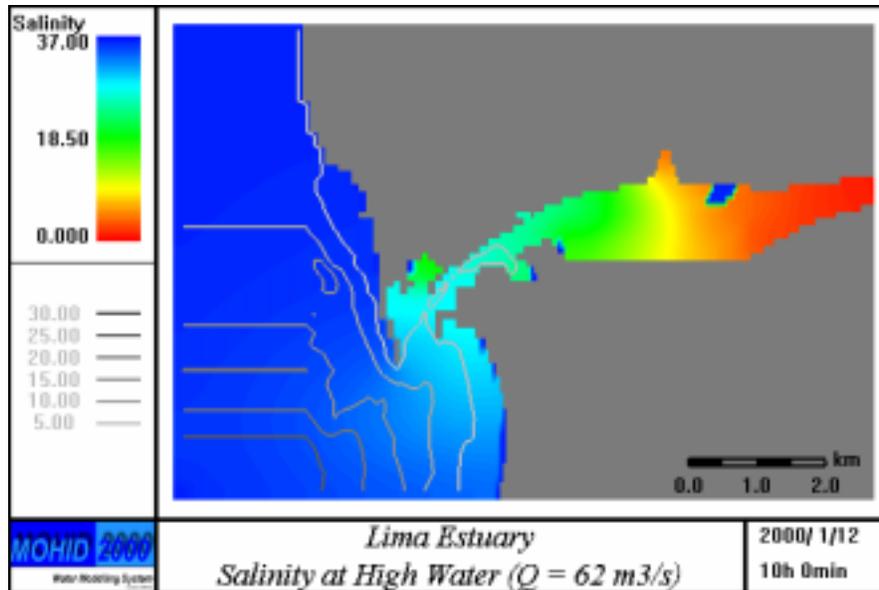


Figura 48: Distribuição de salinidade no estuário, em preia-mar, em situação de maré e caudal médio ($62 \text{ m}^3/\text{s}$) A zona a azul no interior do estuário é uma zona entre - marés, que foi inicializada com salinidade igual à do mar e que não cobrindo em maré média, mantém o valor da salinidade com que foi inicializada.

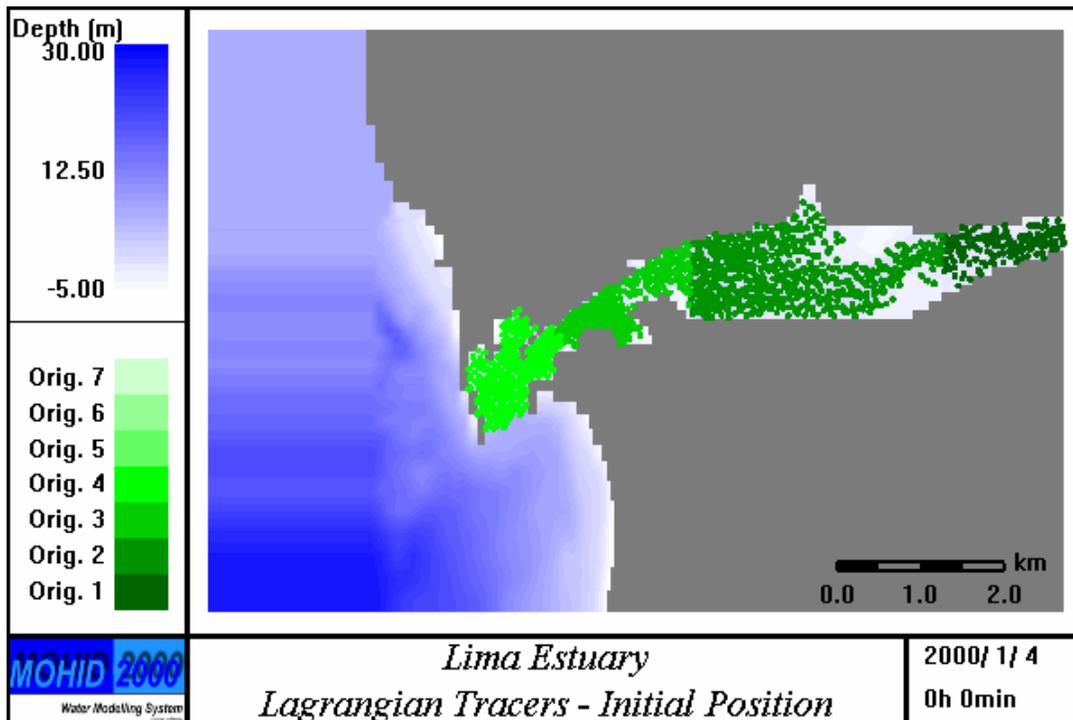


Figura 49: Localizações iniciais dos traçadores lagrangeanos.

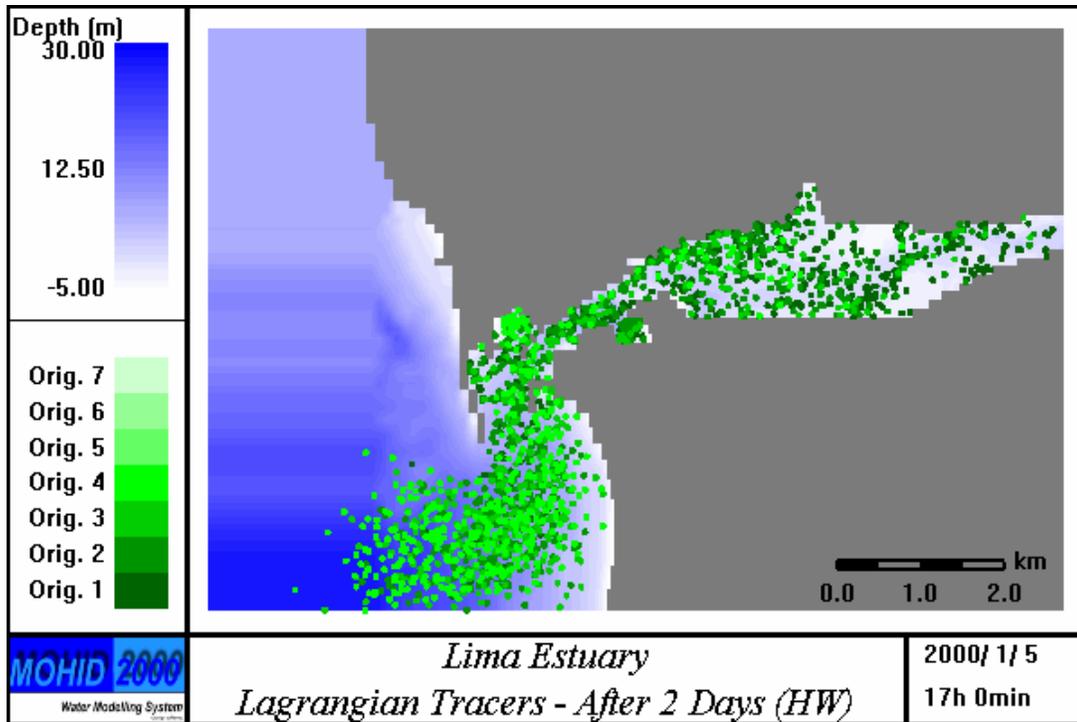


Figura 50: Posições dos traçadores, em preia-mar, dois dias depois da emissão.

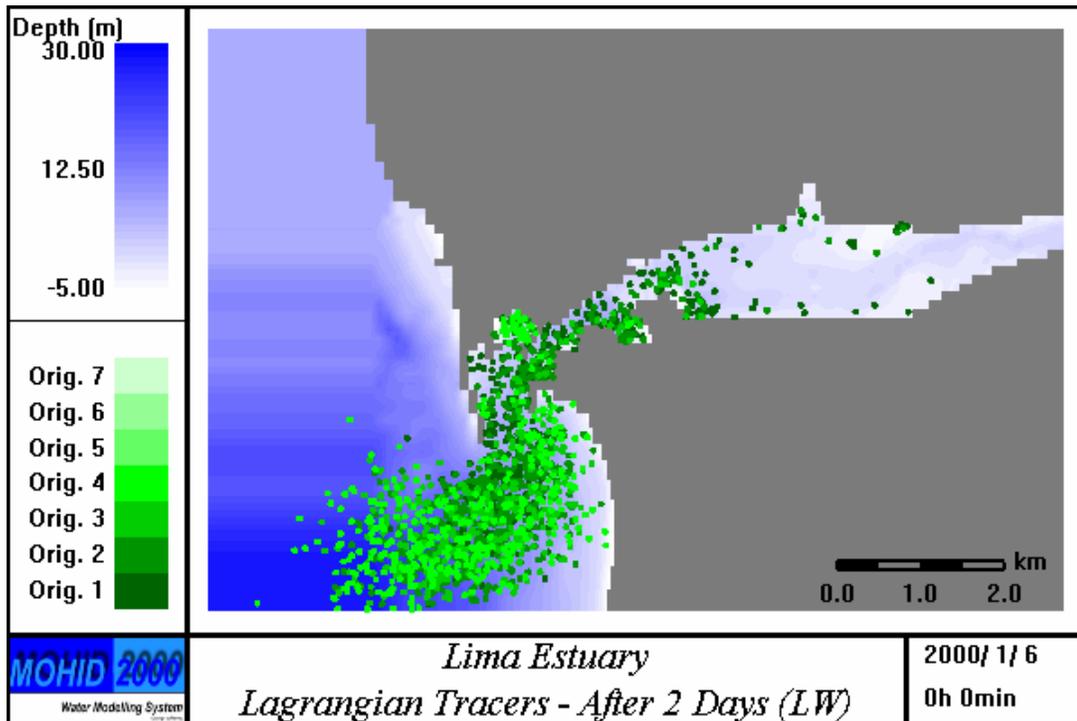


Figura 51: Posições dos traçadores, em baixa-mar, dois dias depois da emissão.

5.2.3 Limite de jusante do estuário

Dos resultados do modelo pode concluir-se que os processos de transporte na embocadura do estuário do Lima são qualitativamente idênticos aos que ocorrem noutros estuários. O jacto de saída é deflectido para a direita e origina a formação de dois vórtices residuais. O facto de ter orientação norte-sul induz uma corrente residual naquele sentido que aprisiona a água entre o jacto e terra, sendo a renovação da água do estuário proveniente sobretudo de oeste da embocadura. Como consequência deste escoamento, uma parte da água que sai do estuário durante a vazante volta a entrar na enchente.

Assim o limite de jusante do estuário (Figura 52) deve incluir o jacto de vazante e a região compreendida entre este e terra. O limite poderá ser definido pelos seguintes pontos geográficos:

Pontos	Latitude (N)	Longitude (O)
1	41° 40' 33"	8° 50' 45"
2	41° 39' 48"	8° 50' 12"
3	41° 39' 48"	8° 49' 36"

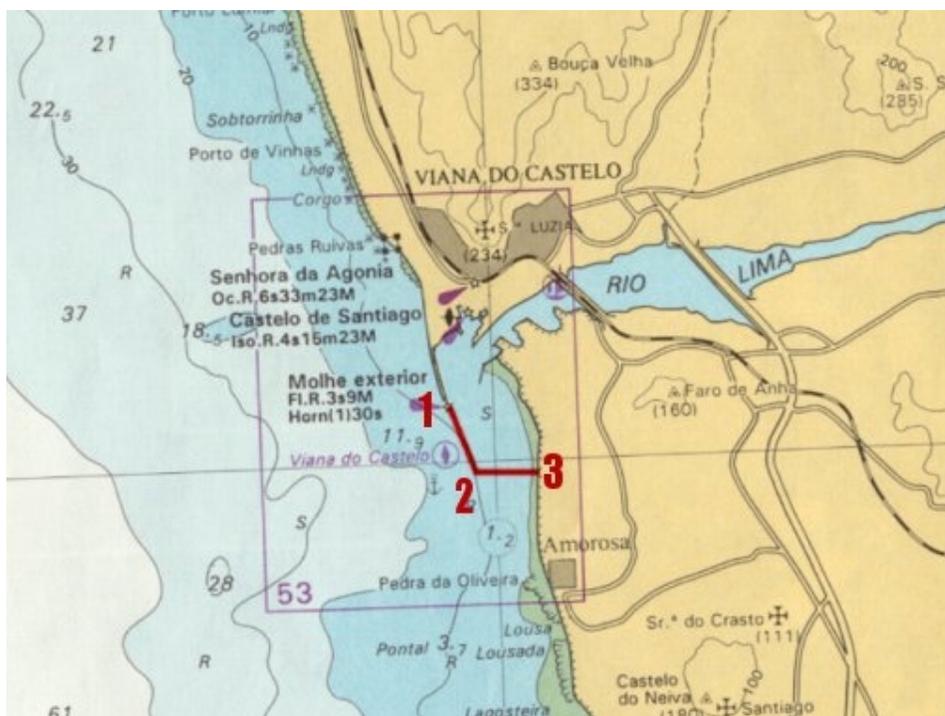


Figura 52: Limite inferior do estuário e principal zona que contribui para a renovação da água no estuário.

5.3 ESTUÁRIO DO CÁVADO

5.3.1 Descrição do estuário e zona adjacente

O rio Cávado, no norte de Portugal nasce na serra do Larouco e desagua em Esposende. O rio tem uma extensão de 135 km e a bacia hidrográfica tem uma área de cerca de 1600 km² entre as bacias dos rios Lima e do Ave.

O estuário está representado na Figura 53, representando a Figura 54 a zona terminal em detalhe. Na margem norte, junto à Vila de Esposende, existe uma vasta área de infra-estruturas portuárias, pesqueiras, de construção naval e recreativas, protegida por cerca de 2 km de quebra-mar (zona B na Figura 54). Na margem sul o estuário é separado do mar por uma longa restinga (zona C), a montante da qual existe a principal área de sapal do estuário (zona B). Na zona costeira, a norte da embocadura existe uma praia de areia e a sul da restinga são comuns formações rochosas.

A embocadura - Figura 55 – é estreita (cerca de 80 metros) e pouco profunda. Nesta zona o canal principal curva a 90º para Oeste. No oceano Atlântico, imediatamente em frente à embocadura existe um banco de areia que descobre em baixa-mar e dificulta o acesso de embarcações ao interior do estuário. No interior do estuário existem bancos de areia e pequenas ilhas, que separam canais de baixa profundidade.

A mobilidade dos sedimentos acumulados no canal, na restinga e no banco em frente à embocadura conferem a esta região um grande dinamismo com alterações intensas da morfologia por acção das ondas e das correntes de maré e devidas à descarga do rio. Como consequência do transporte intenso de sedimentos são necessárias dragagens frequentes para permitir a navegação, sendo os sedimentos usados para reforçar a restinga.

O estuário do Cávado, a zona de praias e o cordão dunar fazem parte da área de paisagem protegida do litoral de Esposende (APPLE), criada em 1987, com cerca de 10 km de extensão. Um dos objectivos do APPLE é proteger o sistema dunar da acção antropogénica, promovendo a fixação das areias através da protecção da vegetação cujas espécies dominantes são *Eryngium maritimum*, *Ammophila arenaria* e *Otanthus maritimus*.



Figura 53: Estuário e troço final do rio Cávado.

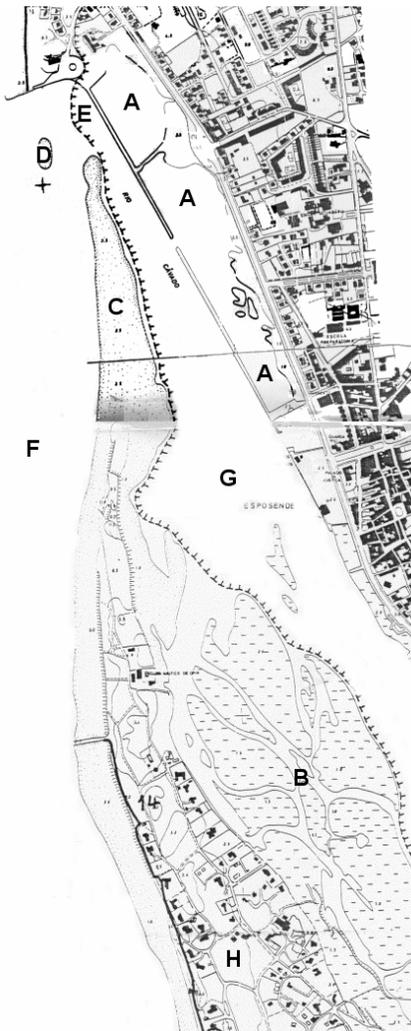


Figura 54: Zona terminal do estuário do Rio Cávado.



Figura 55: Fotografia aérea da embocadura do Cávado.

5.3.2 Dados de Campo

Para este estuário estão disponíveis dados de hidrodinâmica e alguns dados de ictio e avifauna.

5.3.2.1 Ictiofauna e avifauna

As espécies comuns de aves no estuário são principalmente anatídeos e limícolas: *Ardea cinerea*, *Larus argentatus*, *Anas platyrhynchos* e *Calidris alpina* [7].

A ictiofauna referenciada a jusante da ponte de Fão inclui *Petromyzon marinus*, *Anguilla anguilla*, *Dicentrarchus labrax*, *Mugil cephalus*, *Cerastoderma edule*, *Boops boops*, *Salmo salar*, *Alosa alosa*, *Alosa fallax*, *Mugilidae*, *Salmo trutta*, *Platichthys flesus* e *Pleuronectes platessa* [6, 9].

Os dados de avifauna e de ictiofauna existentes não são suficientemente detalhados em termos de distribuição espacial para permitirem tirar conclusões sobre os limites do estuário.

5.3.2.2 Hidrodinâmica

Os dados referentes à hidrodinâmica foram recolhidos em HP & Consulmar (1995a e b), PGIRH/N (1990) e FBO (1995). As duas primeiras referências dizem respeito às condições de navegabilidade na barra do Cávado e contêm dados de marés, correntes e ondulação. A monografia do PGIRH/N sobre a bacia hidrográfica do rio Cávado contém séries temporais de caudais do rio que permitem estimar o caudal médio do Cávado. O Plano de ordenamento da orla costeira preparado pela FBO contém dados adicionais sobre as marés na zona costeira em torno de Esposende.

5.3.2.2.1 Marés

As marés em Esposende foram analisadas com base em dados do Instituto Hidrográfico. A maré em Esposende é idêntica à registada nos outros portos ao longo da costa Portuguesa. A maré é semi-diurna, com amplitudes médias de cerca de 2 metros e amplitudes máximas um pouco abaixo dos 3 metros e propaga-se no

canal do rio até à zona de Marachão. A Figura 56 mostra-se a curva de densidade de ocorrência de níveis de baixa-mar e preia-mar em Esposende durante o período das medidas.

Os registos não são suficientes para extrair as componentes de maré. Por esse motivo, nas simulações efectuadas foram usados valores medidos em Viana do Castelo, cerca de 20 km a norte.

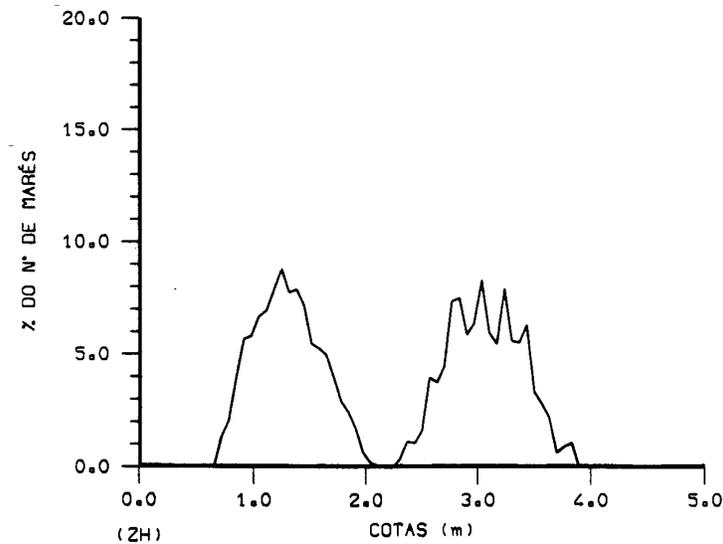


Figura 56: Curva de densidade de ocorrência de níveis de baixa-mar e preia-mar em Esposende.

5.3.2.2.2 Caudais do rio

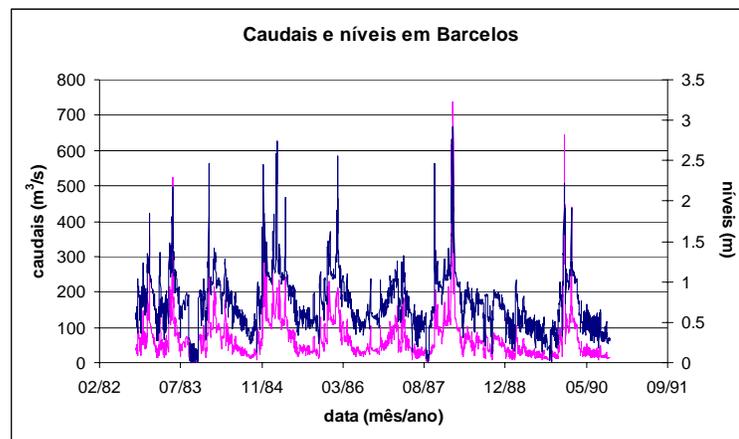


Figura 57: Caudais (curva magenta) e níveis (preto) em Barcelos no período 1982-1990.

Medidas do caudal do rio entre 1982 e 1990 na estação hidrométrica de Barcelos, Figura 57, mostram máximos anuais superiores a 200 m³/s e um caudal médio de 66 m³/s,

PGIRH/N (1990). Os caudais mínimos registam-se entre Julho e Setembro e os valores máximos entre Dezembro e Fevereiro.

5.3.3 Modelação

Tal como nos outros estuários foi usado um sistema de modelos para a hidrodinâmica e salinidade e ainda para visualizar o deslocamento das massas de água, usando traçadores lagrangeanos. Os dados de base para estes modelos são a batimetria, marés e caudal fluvial.

5.3.3.1 Batimetria

A batimetria - Figura 58 - foi gerada utilizando levantamentos da Direcção Geral de Portos e do Instituto Hidrográfico. A malha - 206x255 células - estende-se até à batimétrica dos 30 metros no exterior do estuário. O passo é variável entre 20 e 100 m, com maior resolução no interior do estuário.

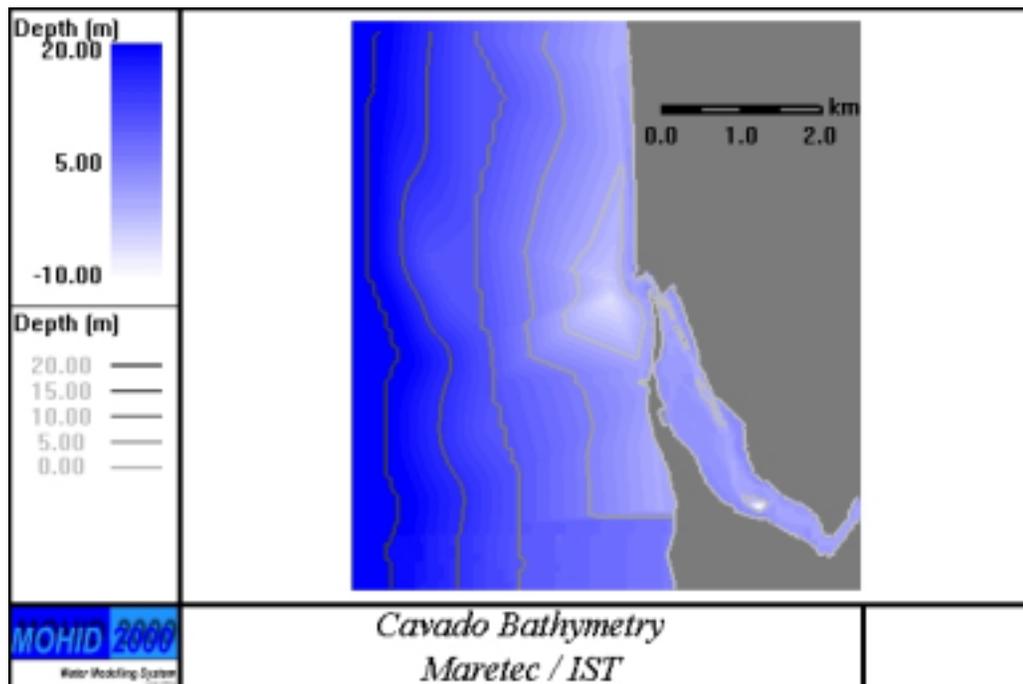


Figura 58: Batimetria do estuário do Cávado e zona envolvente, usada no modelo.

5.3.3.2 Condições de simulação

AS simulações foram efectuadas para condições médias. Assim, na fronteira com o mar foi considerado o forçamento pela componente M_2 (1.02 m de semi-amplitude) e na fronteira com o rio foi imposto o caudal médio, $66 \text{ m}^3/\text{s}$.

O modelo foi corrido até se atingirem condições periódicas, com um passo temporal de 10 segundos garantindo números de Courant de inferiores a 2, mesmo na zona da malha de menor passo (20 m). A simulação com os traçadores lagrangeanos foi

feita para esta condição periódica, tendo o deslocamento dos traçadores sido simulado durante 2 dias.

A simulação da salinidade partiu também dos resultados da hidrodinâmica estabilizados, tendo o modelo sido executado durante 6 dias até se obter uma solução de salinidade periódica. O pequeno período de simulação necessário para obter uma solução periódica para a salinidade é consequência dos baixos tempos de residência da água no estuário.

5.3.3.3 Hidrodinâmica do estuário – campos de velocidade

Campos de velocidades instantâneas são apresentados na Figura 59 em enchente e na Figura 60 em vazante nas condições de maré e caudais médios descritos acima. As velocidades são maiores na zona da embocadura, sendo máximas em vazante (da ordem dos 40 cm/s).

Na vazante depois de passar a embocadura, o escoamento é mais intenso no lado norte do banco de sedimentos localizado em frente da embocadura. Na enchente as velocidades são semelhantes a sul e a norte daquele banco. Como consequência a distribuição de velocidades residuais (Figura 61) mostra também intensidades maiores no canal norte. No interior do estuário as velocidades residuais são dirigidas na direcção da embocadura em toda a secção transversal do estuário, pondo em evidência a importância do caudal do rio para a circulação média no estuário.

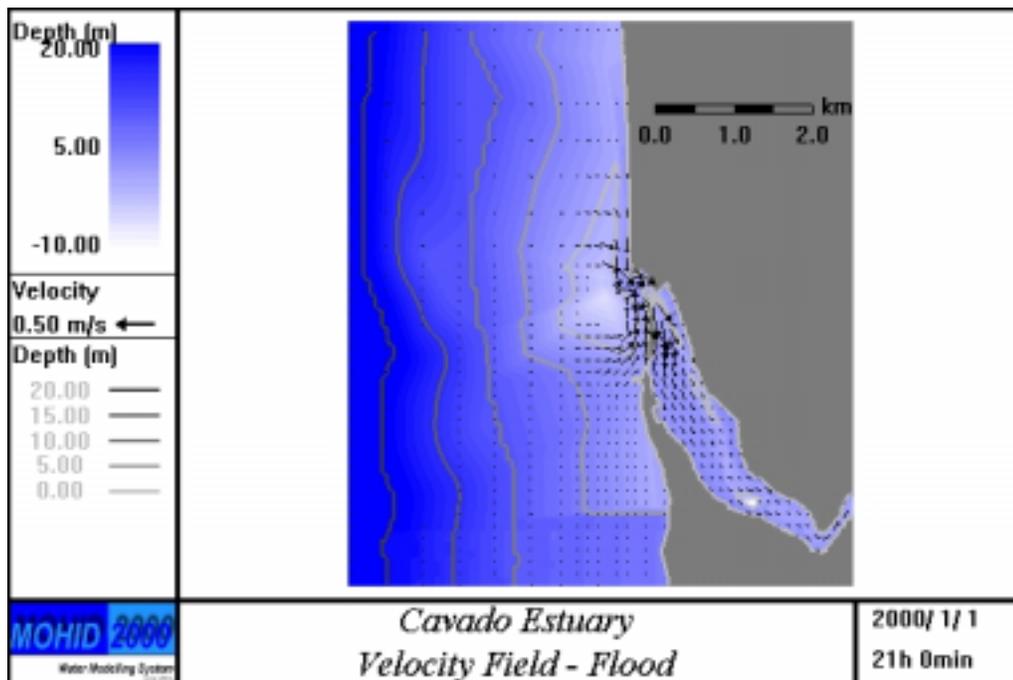


Figura 59: Velocidades instantâneas em enchente (maré média, caudal do rio de 66 m³/s).

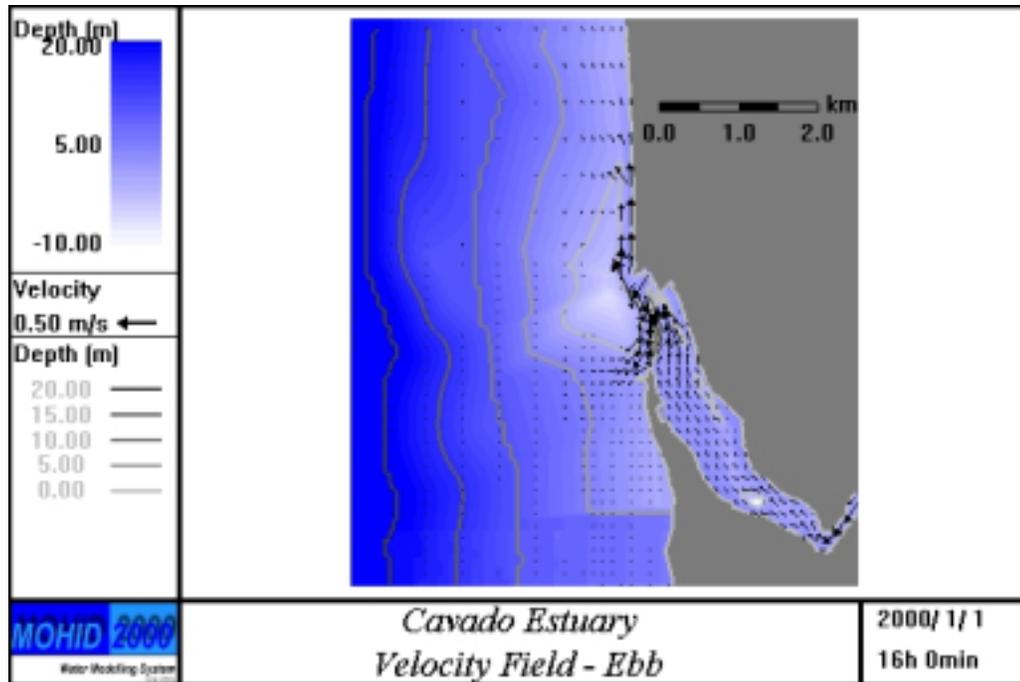


Figura 60: Velocidades instantâneas em vazante (maré média, caudal do rio de 66 m³/s).

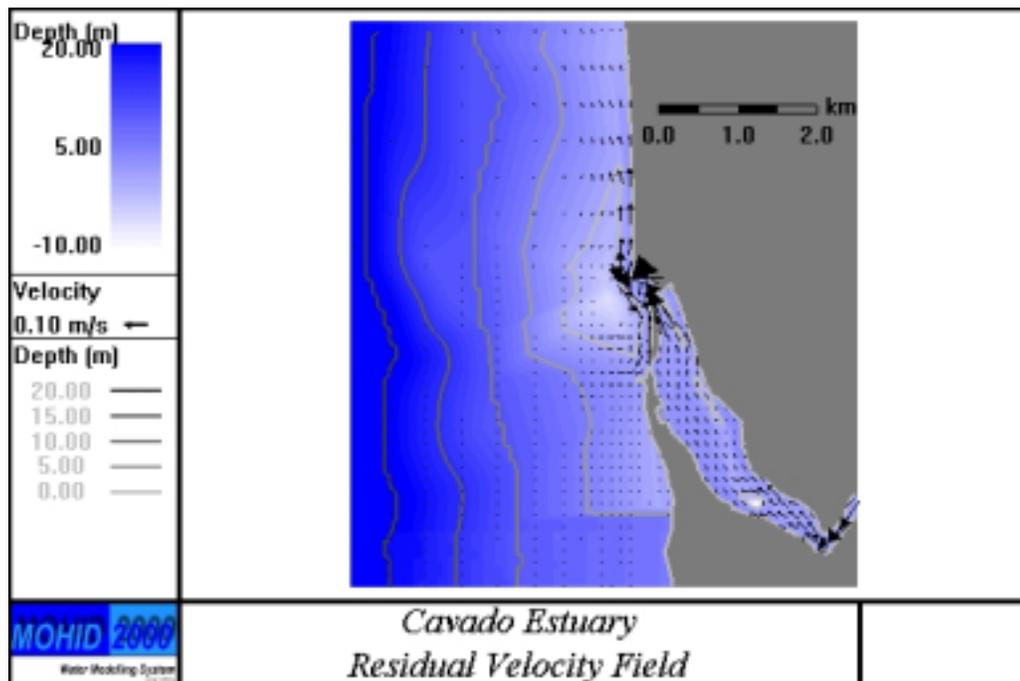


Figura 61: Velocidades residuais (maré média, caudal do rio de 66 m³/s).

5.3.3.3.1 Salinidade

A distribuição de salinidade no estuário depende essencialmente da hidrodinâmica e do caudal do rio, os quais determinam a circulação residual e o tempo de residência. No caso do estuário do Cávado (como no de outros estuários do norte de Portugal),

o caudal do rio é elevado (o valor médio são $66 \text{ m}^3/\text{s}$) e o volume residual, bem como o tempo de residência são baixos. Como consequência o estuário tem salinidades médias baixas.

A Figura 62 mostra a distribuição de salinidades em preia-mar em condições de maré e de caudal médios. e Figura 63 em baixa-mar, nas mesmas condições. As figuras mostram que (nestas condições de caudal), em baixa-mar a água doce ocupa a maioria do estuário, e que em preia-mar a água salgada penetra até cerca de meio do estuário. A água que deixa o estuário desloca-se para norte, paralelamente à costa, abandonando a zona de simulação.

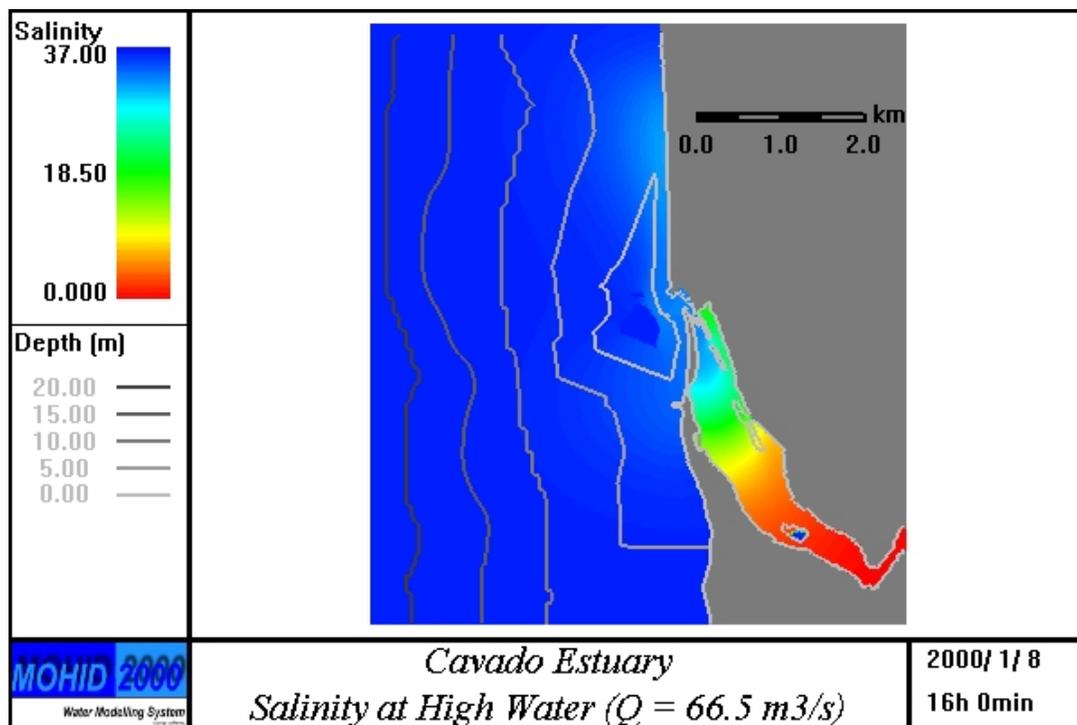


Figura 62: Campo de salinidade em preia-mar (maré média, caudal do rio $66 \text{ m}^3/\text{s}$)

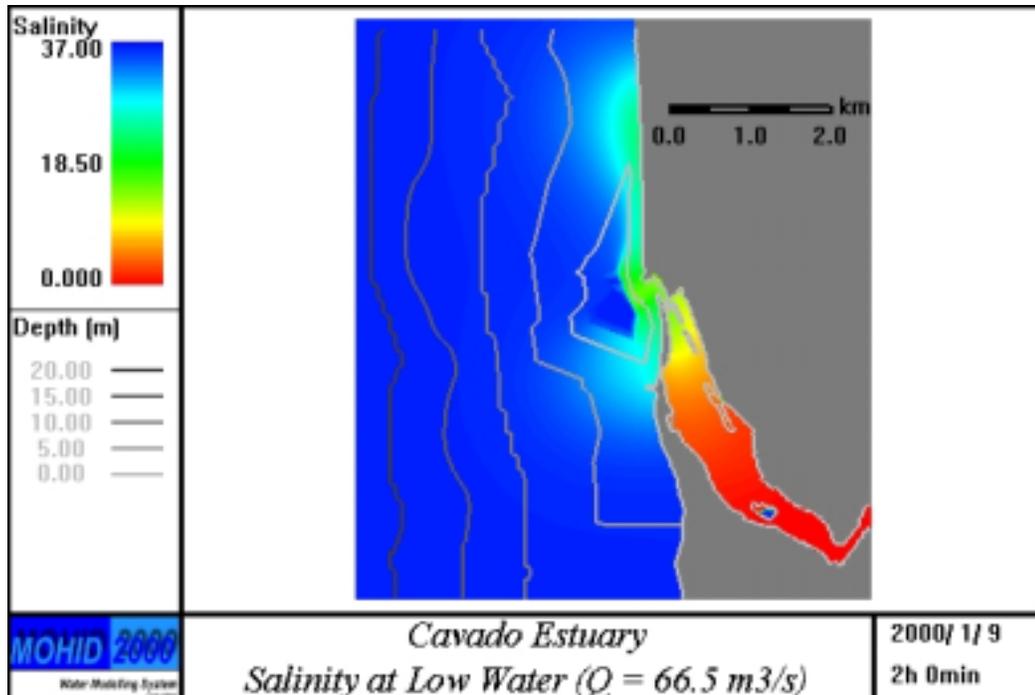


Figura 63: Campo de salinidade em baixa-mar (maré média, caudal do rio 66 m³/s)

5.3.3.3.2 Traçadores lagrangeanos

A Figura 64 representa a posição inicial dos traçadores lagrangeanos no interior do estuário. Foram preenchidas três caixas com traçadores de coloração diferente consoante a zona do estuário onde foram emitidos.

A Figura 65 mostra a distribuição de traçadores em baixa-mar dois dias depois da emissão. A figura mostra que a generalidade dos traçadores emitidos no interior do estuário já saíram. São exceção os emitidos no interior da zona portuária, protegida pelos molhes onde a circulação pouco intensa. A figura permite concluir que o tempo de residência é inferior a 2 dias e mostra que a água sai do estuário preferencialmente para norte.

O detalhe da dispersão no exterior do estuário depende das condições de forçamento do escoamento local. Nestas simulações foi considerada só a maré. Se um vento do quadrante sul fosse considerado, o deslocamento para norte seria ainda mais rápido e no caso de se considerar vento de norte parte da água poderá deslocar-se para sul, aumentando certamente a dispersão no exterior do estuário. Em qualquer dos casos a probabilidade de a água voltar a entra no estuário é baixa, atendendo à pequena largura da embocadura.

No caso deste estuário não é apresentada a figura com a localização dos traçadores na preia-mar seguinte, pois nas condições da Figura 65 já todos os traçadores abandonaram o estuário, devido ao baixo tempo de residência (inferior a 2 dias).

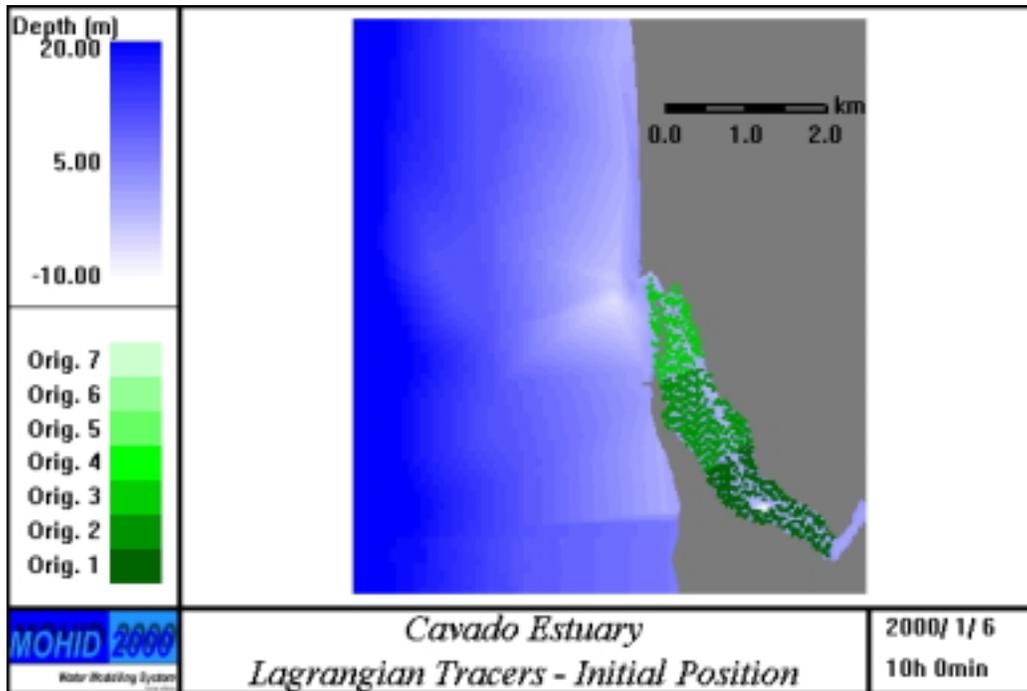


Figura 64: Posição inicial dos traçadores lagrangeanos.

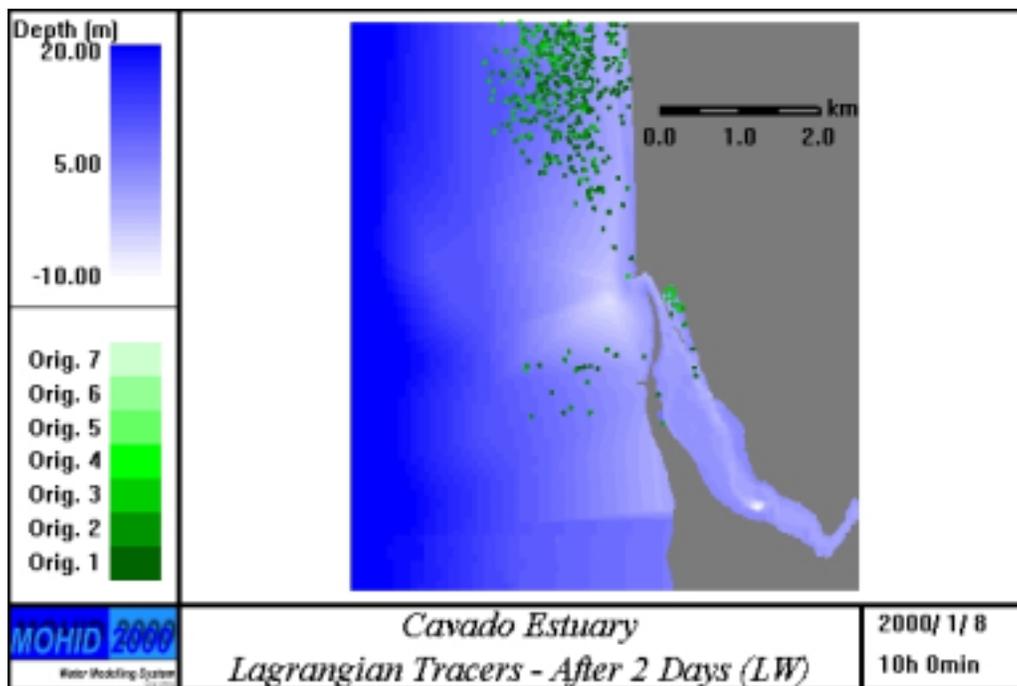


Figura 65: Posição dos traçadores lagrangeanos após 2 dias de simulação (baixa-mar).

5.3.3.4 Limite jusante do estuário

Tendo em conta os resultados de salinidade, circulação e dispersão, o limite jusante do estuário do Cávado pode ser definido, como indicado na Figura 66, pelas seguintes coordenadas geográficas:

Pontos	Latitude (N)	Longitude (O)
1	41° 32' 55"	8° 47' 30"
2	41° 32' 48"	8° 48'
3	41° 32' 20"	8° 48'
4	41° 32' 10"	8° 47' 20"

O limite proposto inclui o banco de sedimentos localizado em frente à barra e os canais existente entre este e as margens. Nesta região a salinidade em baixa-mar (e condições médias de escoamento) é da ordem de 18‰ e a água que aí se encontra em baixa-mar volta a entrar no estuário. A generalidade da água que atravessa esta linha abandona definitivamente o estuário, sendo a água de renovação proveniente da região a Oeste do banco de sedimentos.

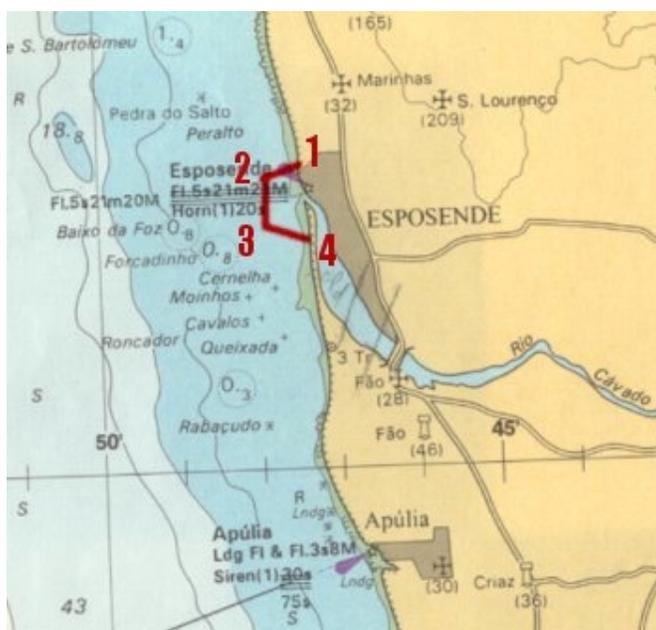


Figura 66: Definição do limite jusante do estuário do Cávado.

5.4 ESTUÁRIO DO AVE

5.4.1 Morfologia da bacia e do estuário

A bacia hidrográfica do rio Ave ocupa cerca de 1400 km² confinando a norte com a bacia do Cávado, a oriente com a bacia do Douro e a sul com a bacia do rio Leça (Figura 67). O rio Ave tem como afluentes mais importantes os rios Este, na margem direita e Vizela na margem esquerda, cujas bacias drenam 250 km² e 340 km² respectivamente.

O rio Ave desenvolve-se numa direcção Este-Oeste percorrendo uma extensão de cerca de 94 km desde a nascente na serra da Cabreira até à foz localizada a sul de Vila do Conde (Figura 68). O caudal médio do rio Ave na foz é de 40 m³/s de acordo com dados apresentados no seu plano de bacia hidrográfica HIDRORUMO *et al* (2000).

A elevada quantidade de efluentes urbanos e indústrias não tratados que chegavam ao Ave, deu origem à classificação das águas como impróprias para consumo e em vários troços do rio como inadequadas para recreio ou contacto e sem qualidade para a vida aquática. Na zona do estuário o interesse e riqueza biológicas são muito baixos, fruto das más condições físico-químicas e biológicas da água do rio durante anos. As águas costeiras têm qualidade compatível com exigências legais para fins conquícolas (classe A) PGIRH/N (1990).

Na foz, junto a Vila do Conde, existe um porto que vai desde a ponte da EN113 até à barra. O porto, para além de instalações portuárias de pesca contém um dos estaleiros de reparação e construção de barcos de pesca mais importantes de Portugal.

A Figura 68 mostra uma representação cartográfica do troço final do rio Ave e da zona costeira envolvente à escala 1:25 000. Neste mapa é visível a orientação NE-SW do estuário do Ave, cuja embocadura se encontra protegida por pontões de ambos os lados. A cidade de Vila do Conde situa-se na margem norte do estuário. Na fotografia aérea do estuário (Figura 69), é visível uma estrutura portuária do lado sul do estuário e a existência de um banco de sedimentos de grandes dimensões no meio da embocadura ainda a montante dos dois pontões que protegem a navegação na zona da embocadura.

5.4.2 Dados de campo

Os estudos existentes sobre o estuário do rio Ave são escassos. Os dados que se recolheram são insuficientes para definir a batimetria condição essencial para que se possa efectuar a modelação deste estuário. Os poucos dados de salinidade existentes não são suficientes para descrever a sua distribuição.

A partir das estações hidrométricas existentes ao longo da bacia do Ave obtiveram-se dados de caudais do rio que compreendem o período entre 1941 e 1991 (dados do INAG). Uma síntese mensal desses resultados para a foz do rio está patente na Figura 70. A Figura 71 apresenta em detalhe o escoamento mensal na década de 80 medido na estação mais a jusante da rede hidrométrica.



Figura 67: Localização da bacia do rio Ave relativamente às bacias vizinhas do norte de Portugal.



Figura 68: Carta militar de Portugal : Instituto Geográfico do Exército. Vila do Conde. Escala 1:25 000 (1997).



Figura 69: Fotografia aérea da foz do rio Ave.

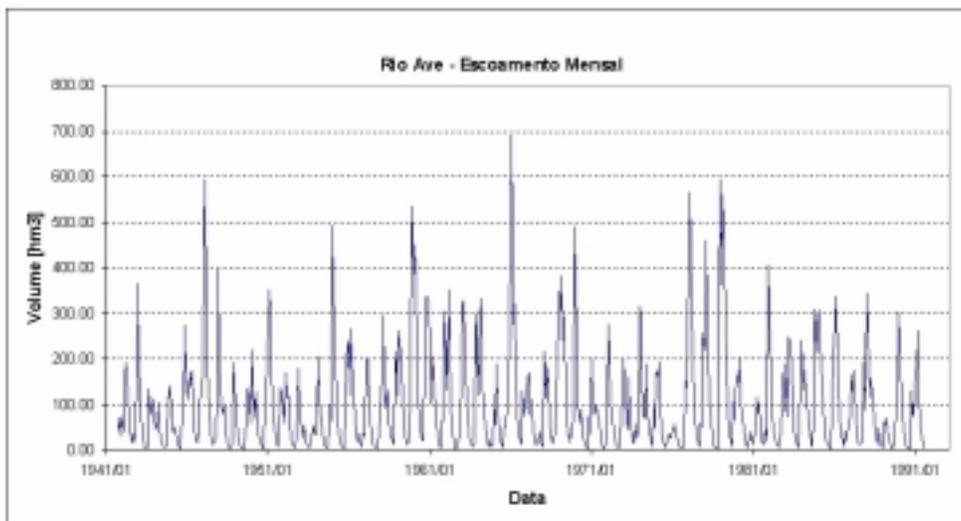


Figura 70: Escoamento Mensal à entrada do estuário do Rio Ave (hm^3).

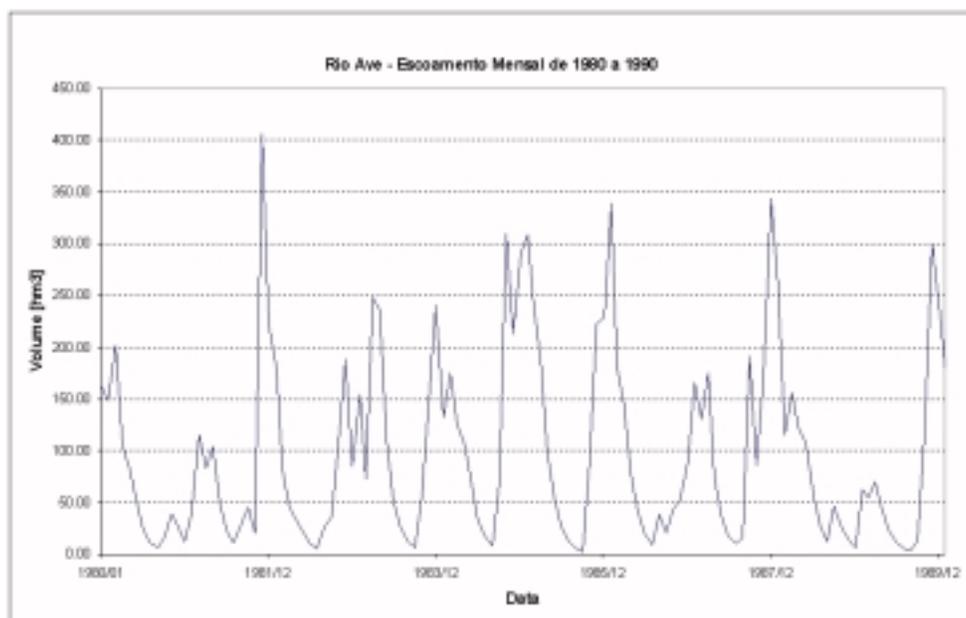


Figura 71: Escoamento mensal medido na estação mais a jusante do Rio Ave na década de 80.

5.4.3 Limite de Jusante do estuário do rio Ave

Os dados existentes não permitem por si só definir o limite inferior deste estuário. Esse limite pode no entanto ser definido extrapolando os resultados obtidos em estuários semelhantes (especialmente Lima, mas também o Mondego e o Mira). A

relação caudal/prisma de maré é elevada neste estuário, o que pressupõe velocidades residuais elevadas e um jacto de vazante intenso. Os molhes orientam este jacto paralelamente à costa, o que deverá originar um escoamento para sul no exterior do estuário e um vórtice residual entre o jacto e terra. Nestas condições o limite indicado na Figura 72 pode ser considerado um limite de segurança, definido pela linha que une os pontos com as seguintes coordenadas geográficas:

Pontos	Latitude (N)	Longitude (O)
1	41° 20' 24"	8° 44' 51"
2	41° 20'	8° 44' 51"
3	41° 20'	8° 44' 12"

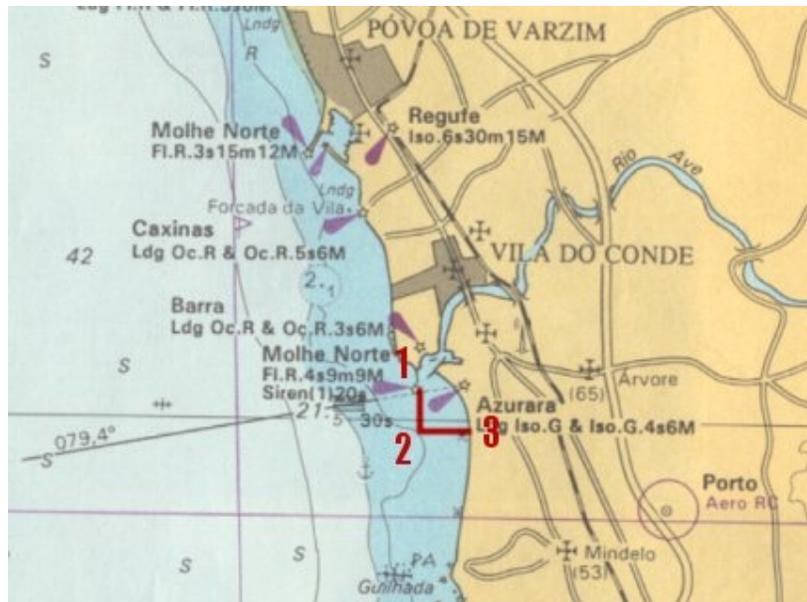


Figura 72: Limite do estuário definido com base na morfologia e na circulação em estuário semelhantes.

5.5 ESTUÁRIO DO LEÇA

5.5.1 Caracterização



Figura 73: Pormenor da embocadura do estuário do rio Leça (IGeoE, 2001)



Figura 74: Imagem de satélite do estuário do rio Leça (SNIG, 2001)

A bacia hidrográfica do rio Leça, com cerca de 50 km de comprimento está orientada na direcção Este - Oeste e é limitada a Norte pela bacia do rio Ave e a Sul e Este pela bacia do rio Douro. O rio nasce no Monte de St^a. Luzia, a cerca de 420 metros de altitude e desagua em Leixões, a norte da cidade do Porto. Os seus principais tributários a Ribeira do Arquinho (bacia de 33 km²) e a Ribeira de Leandro (bacia de 20 km²). O estuário do Leça (Figura 73 e Figura 74) é de pequenas dimensões e está muito artificializado, sendo ocupado na sua quase totalidade pelo porto de Leixões, o maior da região norte de Portugal.

O escoamento anual total na foz do rio Leça é, em média, de 107 hm³, a que corresponde um caudal médio de 3.4 m³/s. O afluente que mais contribui para o caudal na foz é a ribeira do Arquinho contribui para o escoamento médio com 13.3 hm³ (INAG, 2001)

A Figura 75 apresenta uma perspectiva tridimensional da bacia do rio Leça e a Figura 76, mostra o perfil longitudinal do rio (DRA-Norte, 2000). As figuras mostram baixos declives nos primeiros 42 km de percurso (a partir da foz). Os últimos 6 km do percurso do rio efectuam-se em zonas de relevo acidentado - Serra da Agrela – variando as cotas, desde os 120 metros até aos 420 metros de altitude.



Figura 75: Perspectiva tridimensional da bacia do rio Leça (DRA–Norte, 2000).

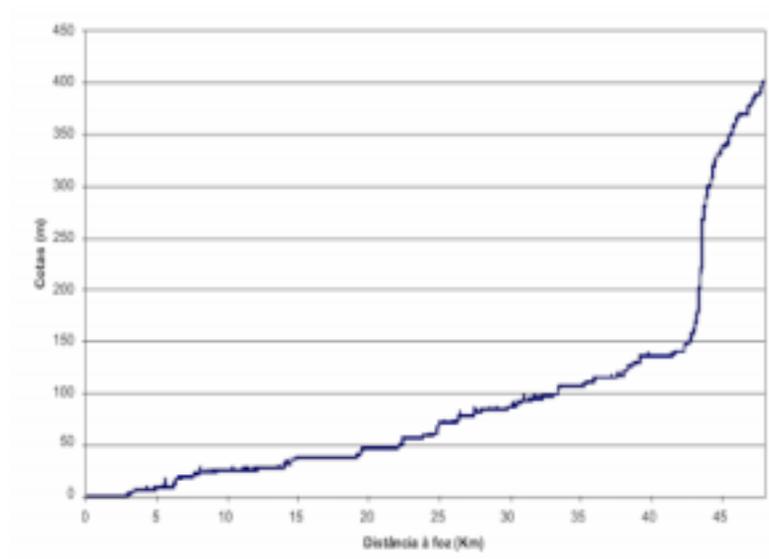


Figura 76: Perfil longitudinal do rio Leça (DRA–Norte, 2000).

O escoamento no estuário do Leça é determinado pela maré e pelo caudal do rio, podendo a corrente do rio Leça fazer-se sentir até ao anteporto em situações de chuva intensa.

A maré é essencialmente do tipo semi-diurno, sendo as componentes mais importantes a M_2 , S_2 , e a N_2 . Na zona exterior ao porto, a corrente dominante é paralela à costa, predominantemente de Norte para Sul com velocidades inferiores a 1 nó (50 cm/s).

Devido à sua pequena dimensão e importância económica e ecológica, este estuário está muito pouco estudado, com excepção dos aspectos relevantes para as actividades do porto de Leixões.

5.5.2 Modelação Matemática

A hidrodinâmica do estuário foi simulada utilizando o modelo MOHID2000 para a região compreendida entre a batimétrica dos 25 metros, na plataforma continental e o limite de propagação da maré situado 3.5 km a montante do porto de Leixões. O passo espacial do modelo é variável tendo um mínimo de 20 m na zona do estuário e 250m na fronteira oceânica.

As simulações foram feitas para condições médias de maré e de caudal do rio. Na fronteira oceânica foi imposta a variação da superfície livre devida à componente M_2 da maré e na fronteira fluvial onde foi imposto o caudal médio do rio Leça, $3.4 \text{ m}^3/\text{s}$. A Figura 77 mostra a batimetria usada no modelo, na zona terminal do estuário e plataforma continental adjacente.

5.5.3 Resultados das simulações

Com o modelo foram simuladas a hidrodinâmica e a distribuição de salinidades. O movimento da água foi visualizado usando traçadores lagrangeanos emitidos em caixas, numa situação de preia-mar. Os resultados são apresentados na forma de séries temporais, nos pontos representados na Figura 78 e de distribuições espaciais no baixo estuário (o relevante para definição do limite de jusante).

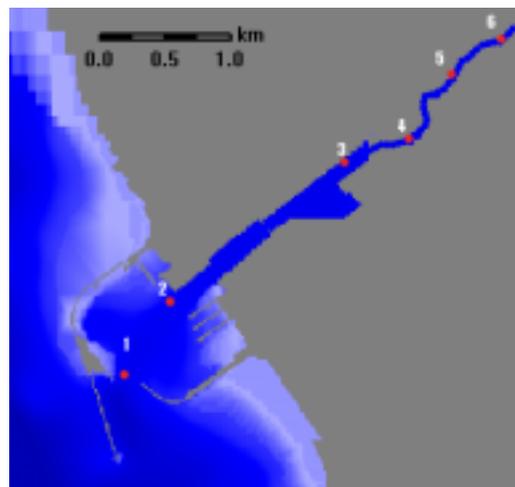
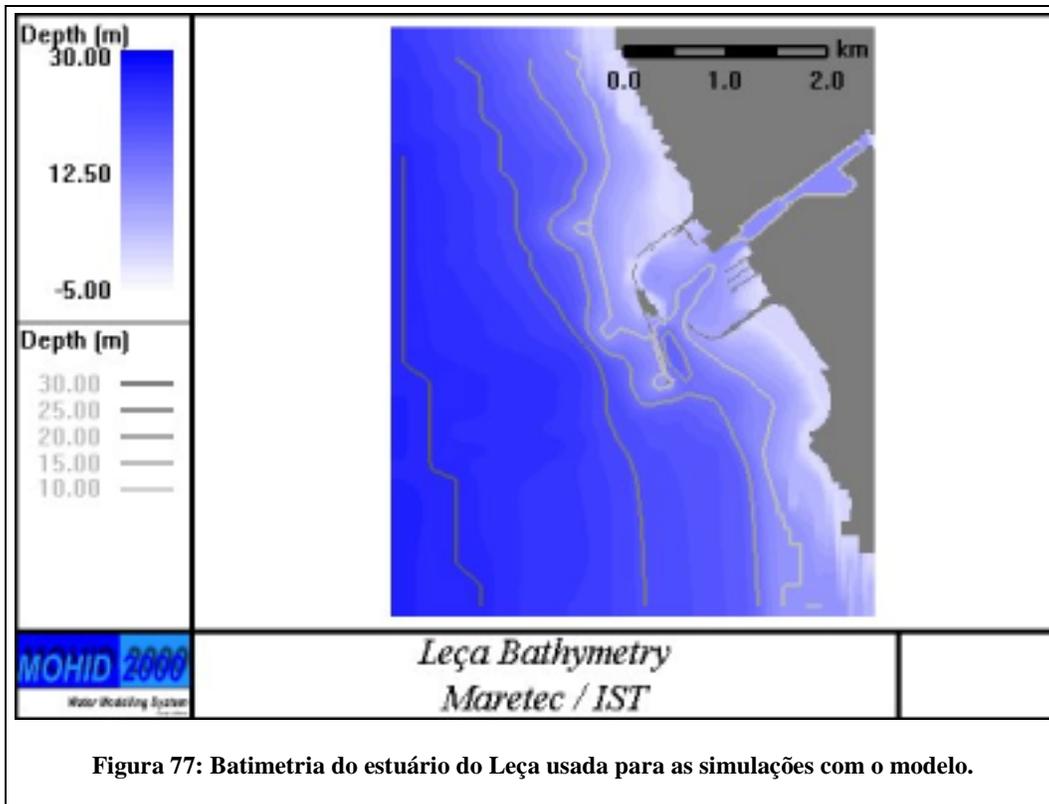


Figura 78 Posição das séries temporais

5.5.3.1.1 Hidrodinâmica

Na Figura 79 representam-se as elevações nos pontos 1 e 6 indicados na Figura 78. No ponto 1 observa-se o carácter semi-diurno da maré com uma amplitude de cerca

de 1,65 m e uma variação do tipo sinusoidal. O ponto 6 só é inundado pela maré durante o período de níveis mais altos. Durante esse período o nível varia também de forma sinusoidal. Quando o nível da maré baixa abaixo dos 2.5 metros o nível torna-se constante, sendo o seu valor imposto pelo caudal do rio.

A Figura 80 mostra o campo de velocidades em enchente e a Figura 81 em vazante. Em ambos os casos as velocidades instantâneas são reduzidas (inferiores a 5 cm/s). Os valores baixos das velocidades são consequência do valor reduzido da área do estuário e do caudal do rio. A velocidade máxima regista-se à saída do porto onde a área da secção transversal é mínima. As figuras mostram que o escoamento se faz preferencialmente pelo canal mais profundo e põe em evidência o papel do molhe que protege o porto da acção das ondas provenientes de NW.

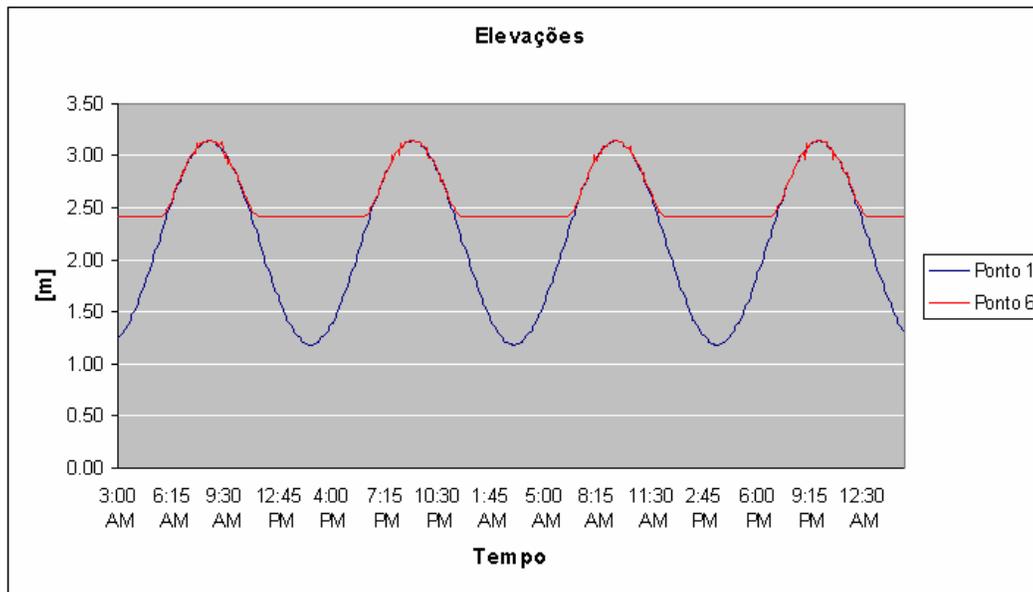


Figura 79: Séries temporais dos níveis nos pontos 1 e 6 indicados na Figura 78.

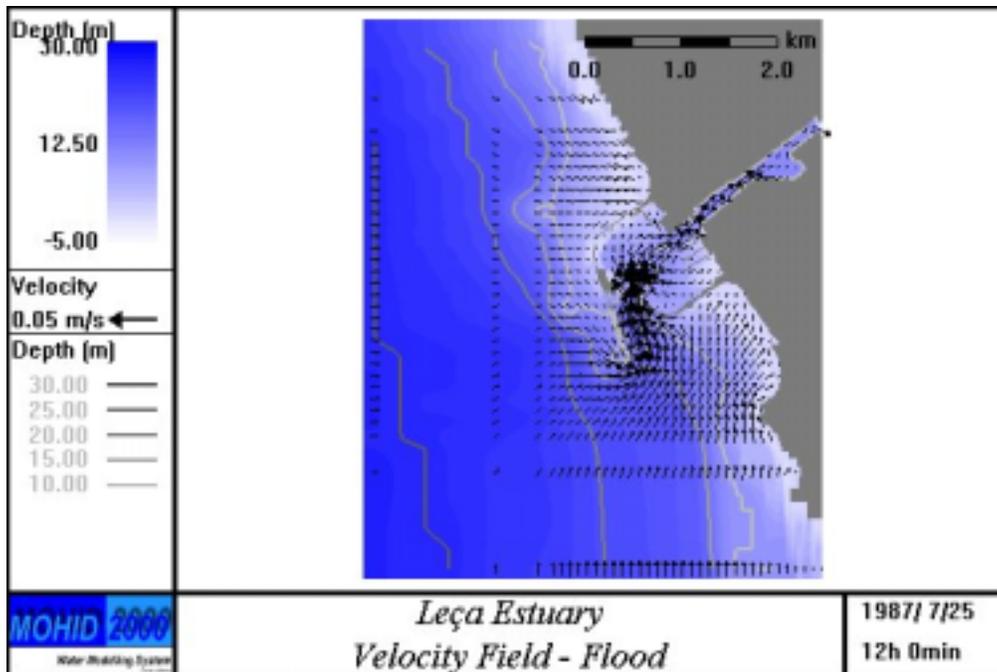


Figura 80: Campo de velocidades calculado pelo modelo numa situação de enchente.

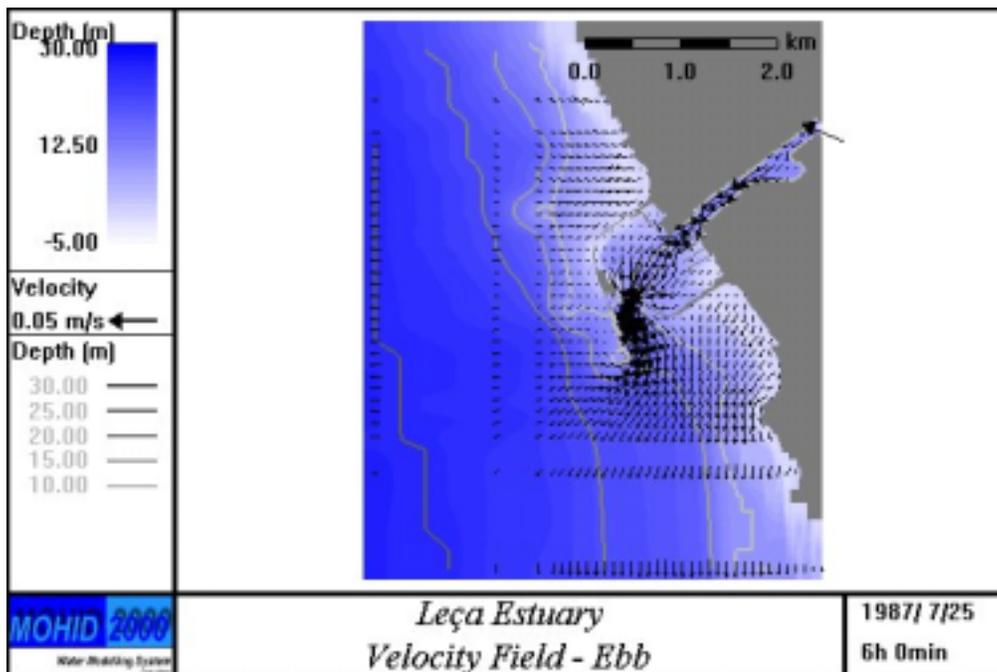


Figura 81: Campo de velocidades calculado pelo modelo numa situação de vazante.

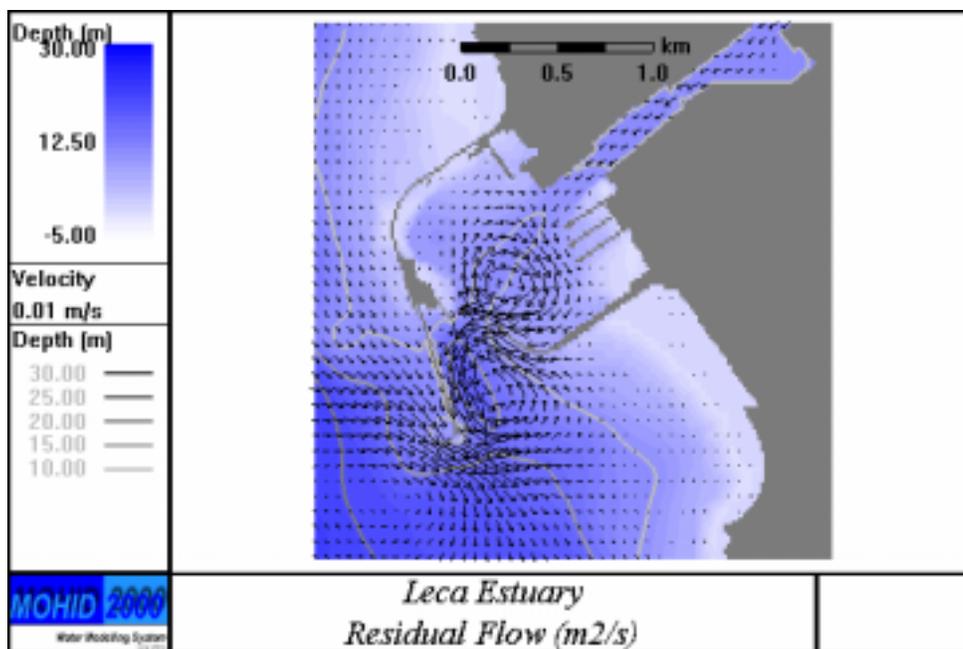


Figura 82 Campo de fluxos residuais integradas para um ciclo de maré

A Figura 82 mostra o campo de fluxos residuais obtidos por integração das velocidades instantâneas integradas na vertical. O escoamento residual representa o deslocamento preferencial da água e resulta dos efeitos não lineares associados ao escoamento instantâneo e do caudal do rio. Assim e o escoamento residual está associado ao efeito da aceleração do escoamento na entrada do porto. Deste efeito resultam os vórtices existentes quer no interior do porto quer no exterior da entrada do porto. A inclinação do jacto de vazante induz um escoamento residual dirigido de norte para sul em frente à embocadura. O valor reduzido do caudal do rio e o vórtice existente no interior do porto são responsáveis pelo elevado tempo de residência da água no interior do estuário.

5.5.3.2 Salinidade

A salinidade foi simulada para condições de caudal média ($3.4 \text{ m}^3/\text{s}$). Nas figuras Figura 83 e Figura 84 observam-se distribuições em situações de vazante e de enchente respectivamente. As figuras mostram que a bacia do porto de Leixões e o canal do rio tem condições de salinidade muito diferentes. Este resultado é também mostrado na Figura 85 onde são representadas séries temporais de salinidade nos pontos indicados na Figura 78. O baixo gradiente de salinidade na bacia do porto é uma consequência do vórtice residual existente naquela região, que promove a recirculação da água proveniente do rio e a sua diluição na água do mar que entra durante a enchente.

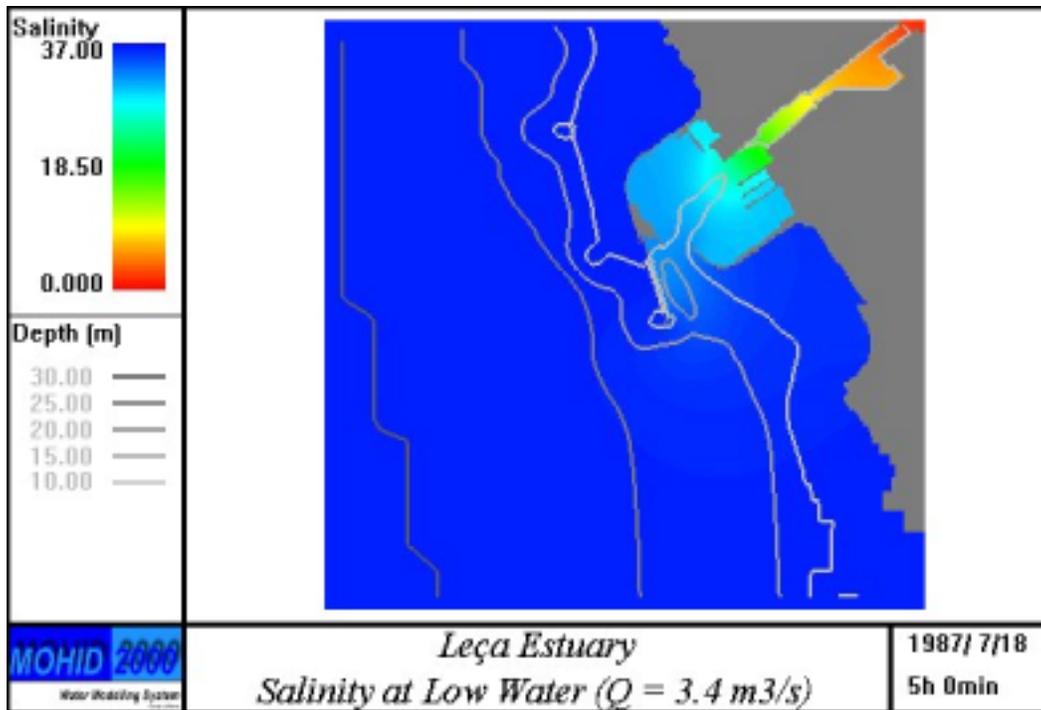


Figura 83: Distribuição de salinidade numa situação de vazante.

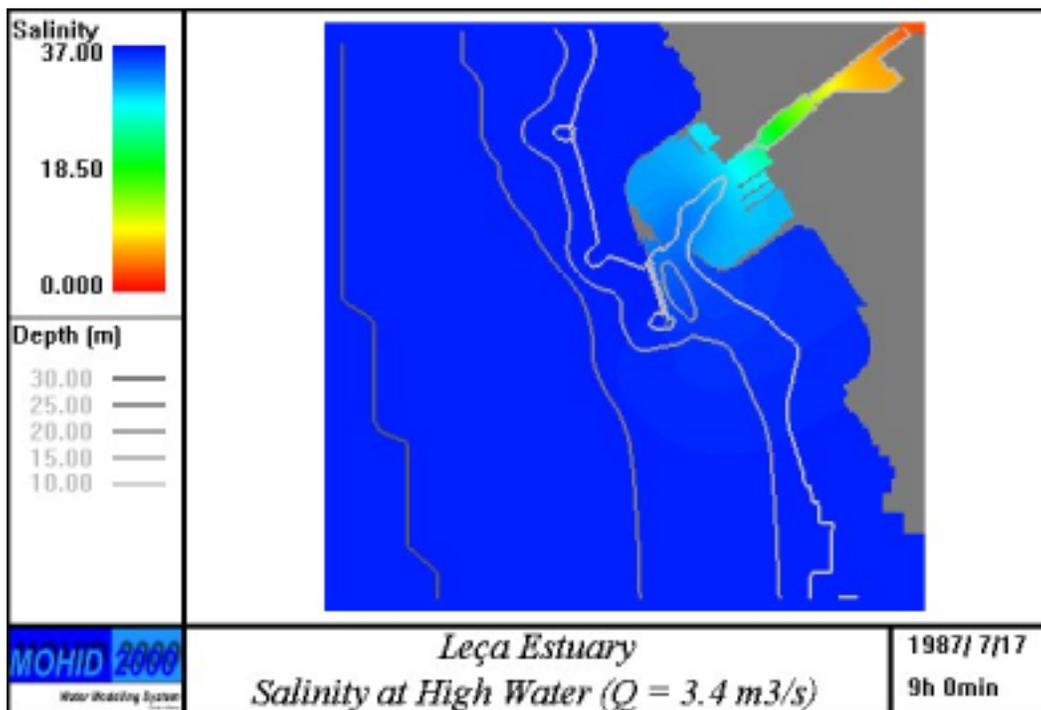


Figura 84: Distribuição de salinidade numa situação de enchente.

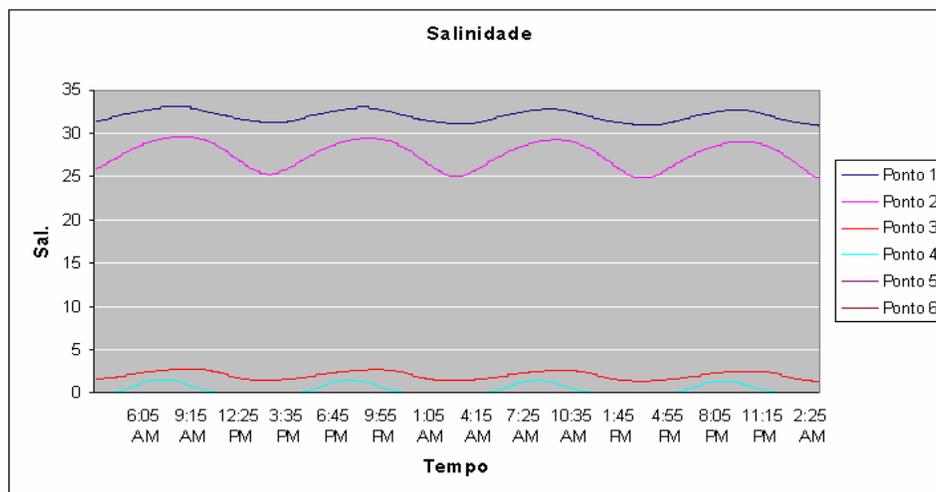


Figura 85: Evoluções temporais da salinidade nos 6 pontos do domínio representados na Figura 78.

O ponto 1 representado na Figura 85, apesar de se encontrar na zona de maior influência oceânica mostra o efeito do elevado tempo de residência na salinidade. À medida que nos deslocamos para montante a salinidade diminui. A figura mostra também a grande diferença de salinidades entre os pontos localizados na bacia do porto e os localizados no canal de entrada do rio.

5.5.3.3 Traçadores Lagrangeanos

Os traçadores lagrangeanos são usados para visualizar o movimento da água. Depois de emitidos estes traçadores deslocam-se à velocidade da água, calculada pelo modelo hidrodinâmico, permitindo identificar o seu deslocamento e mistura. Os traçadores foram emitidos em preia-mar, agrupados em caixas, como mostra a Figura 86. O seu movimento permite visualizar o escoamento e compreender a dinâmica do sistema.

A Figura 87 e a Figura 88 mostram as posições dos traçadores emitidos na Figura 86, após dois dias de simulação, em baixa-mar e em preia-mar respectivamente. As velocidades baixas já observadas nos resultados da hidrodinâmica fazem com que o deslocamento dos traçadores seja também pouco intenso. Continuando a simulação por mais tempo verificou-se que só ao fim de 3 dias de simulação (Figura 89) é que os traçadores começam a sair da bacia do porto. A continuação da simulação mostra que os traçadores que atravessam a embocadura do porto deixam o estuário quando contornam o molhe que protege o canal de acesso ao porto.

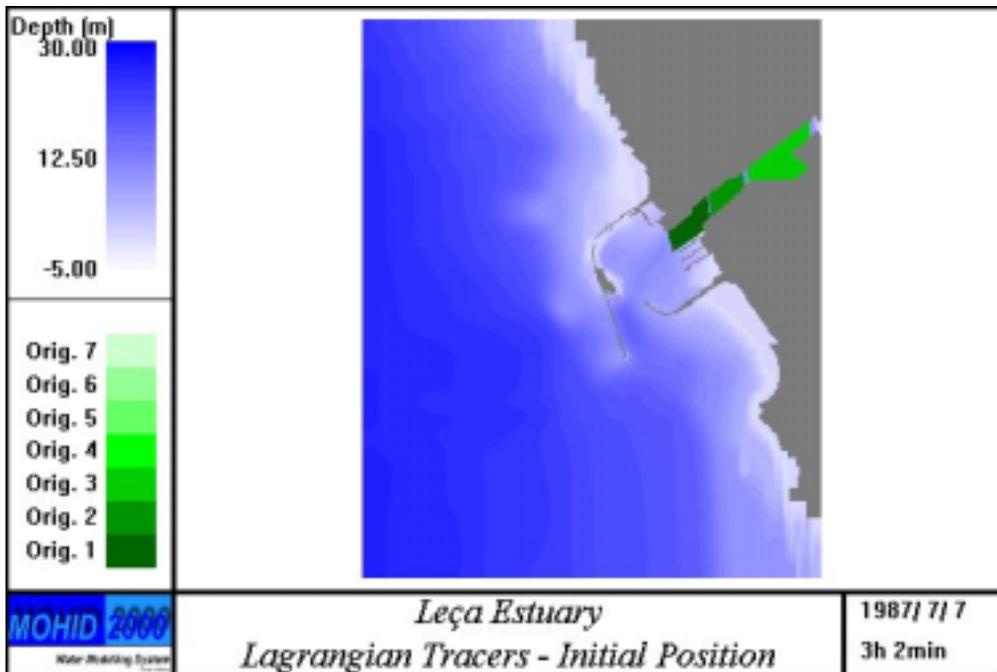


Figura 86: Posição inicial dos traçadores lagrangeanos.

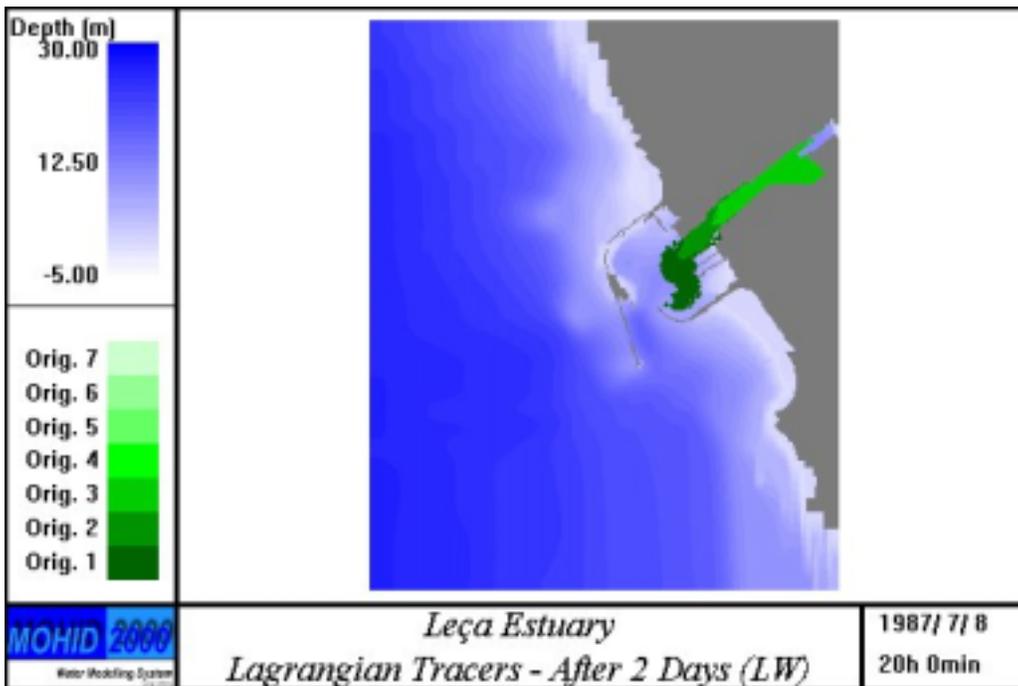


Figura 87: Posição dos traçadores lagrangeanos após dois dias de simulação numa situação de baixa-mar.

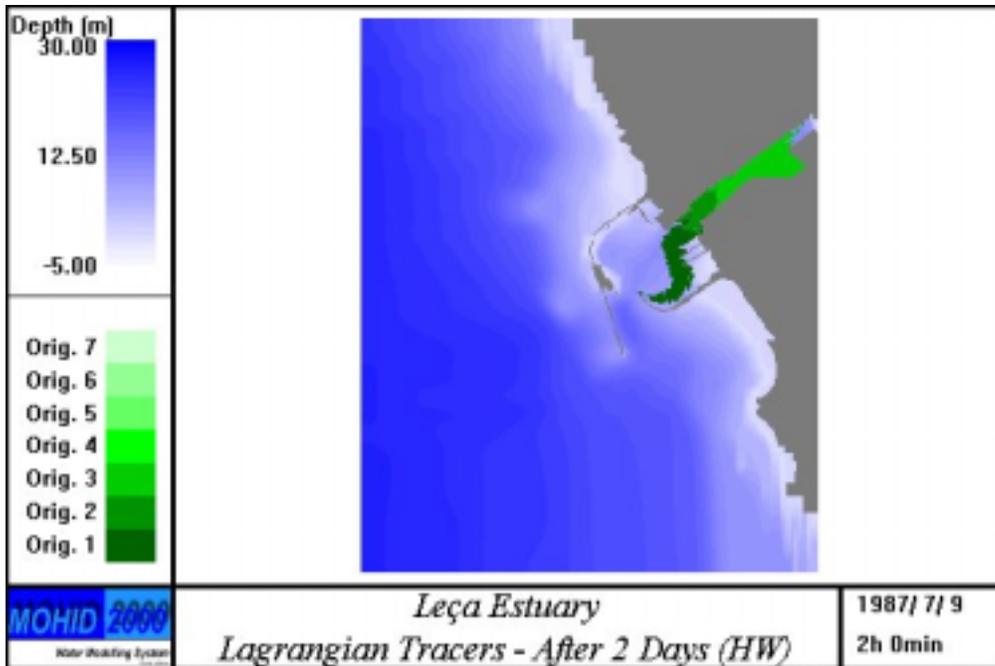


Figura 88: Posição dos traçadores lagrangeanos após dois dias de simulação numa situação de preia-mar

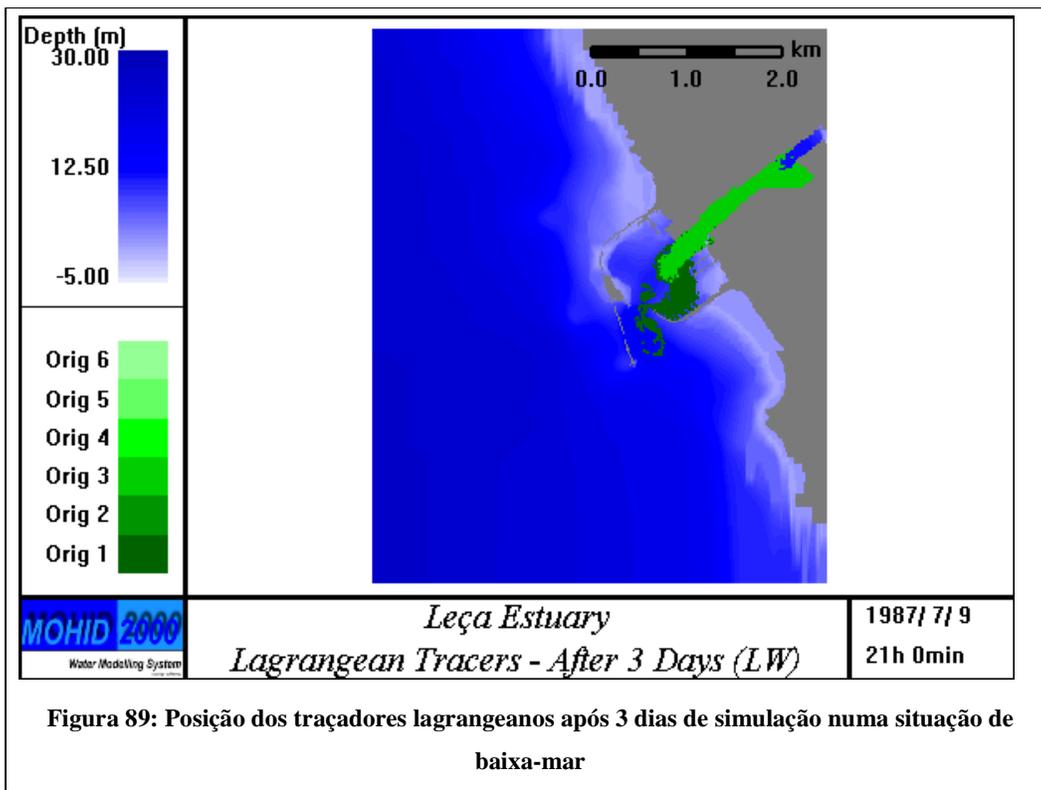


Figura 89: Posição dos traçadores lagrangeanos após 3 dias de simulação numa situação de baixa-mar

5.5.4 O Limite de Jusante do Estuário

Este estuário é de todos os analisados neste estudo aquele que tem menor dinamismo. Este facto deve-se à pequena área do estuário e ao seu declive, que reduz a propagação da maré a um troço de cerca de 3.5 km de extensão. A não existência de zonas entre-marés também contribui para o baixo caudal de enchente. A zona da foz sofre a forte influência dos molhes de protecção que protegem o porto da acção das ondas e contribuem também para obter uma zona de correntes de baixa intensidade. A intensidade do jacto de vazante é bastante reduzida. Enquanto a água de vazante não abandona a zona do canal de acesso protegida pelo pontão, fica sujeita ao movimento oscilatório da maré. A partir dessa altura é tomada pelo escoamento existente sobre a plataforma. Esta zona deve por isso ser o limite do estuário. Na Figura 90 é apresentado esse limite, definido pelos pontos com as seguintes coordenadas geográficas:

Ponto	Latitude (N)	Longitude (O)
1	41° 10' 26"	8° 42' 23"
2	41° 10' 27"	8° 42' 07"
3	41° 10' 32"	8° 41' 58"
4	41° 10' 38"	8° 42' 02"

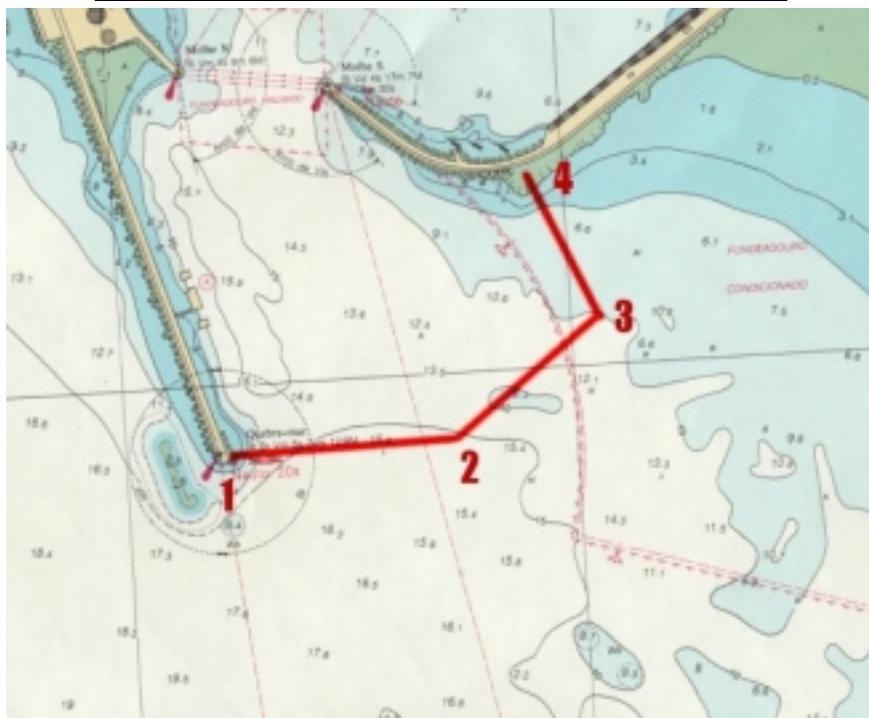


Figura 90 Proposta para o limite do estuário do Leça

5.6 ESTUÁRIO DO DOURO

A bacia hidrográfica do rio Douro é uma das mais extensas e mais pluviosas da península Ibérica. No leito do Rio estão construídas barragens de “fio de água” com pequena capacidade de armazenamento de água. As margens do estuário são também elevadas e por isso a secção transversal é pequena. Nestas condições, o rio está sujeito a grandes cheias tendo as albufeiras nele construídas pequena capacidade de as modelar.

As cidades de Porto e Gaia situam-se respectivamente nas margens norte e sul da parte terminal do estuário. Em ambas as cidades, as zonas ribeirinhas estão sujeitas a inundações frequentes devidas às características do estuário e da bacia de drenagem do rio.

O estuário tem 22 km, de comprimento, sendo a propagação da maré limitada a montante pela barragem de Crestuma. A penetração salina depende do caudal do rio e da amplitude da maré e só pode atingir a barragem em condições de caudal excepcionalmente baixo.

5.6.1 Descrição do estuário

5.6.1.1 Morfologia

O estuário do Douro (Figura 91 e Figura 92) é constituído por um vale estreito, com largura mínima de 135 m na ponte D. Luís (a 6 km da embocadura). A jusante da ponte da Arrábida, o estuário alarga atingindo a largura máxima de 1300 m. Na embocadura, o banco de areia do Cabedelo disposto perpendicularmente ao eixo do estuário, confina o escoamento ao canal estreito junto à margem norte. O Cabedelo é um banco arenoso cuja forma é modulada pelo regime de agitação e pelo escoamento devido ao rio e à maré. Em situações de cheia, para caudais da ordem dos 10 000 m³/s o banco é galgado e destruído pelo escoamento (Silva, 1995), sendo reconstruído progressivamente pelo escoamento depois de terminada a cheia. A cota da parte central do Cabedelo é da ordem dos 5 m acima do nível médio do mar (Peixeiro & Silva, 1999).

O estuário superior o é estreito e a profundidade e tem normalmente superior a 10 metros. No estuário inferior a largura aumenta e a profundidade diminui, só ultrapassando os 10 metros excepcionalmente no canal principal, o qual permanece confinado à margem norte.

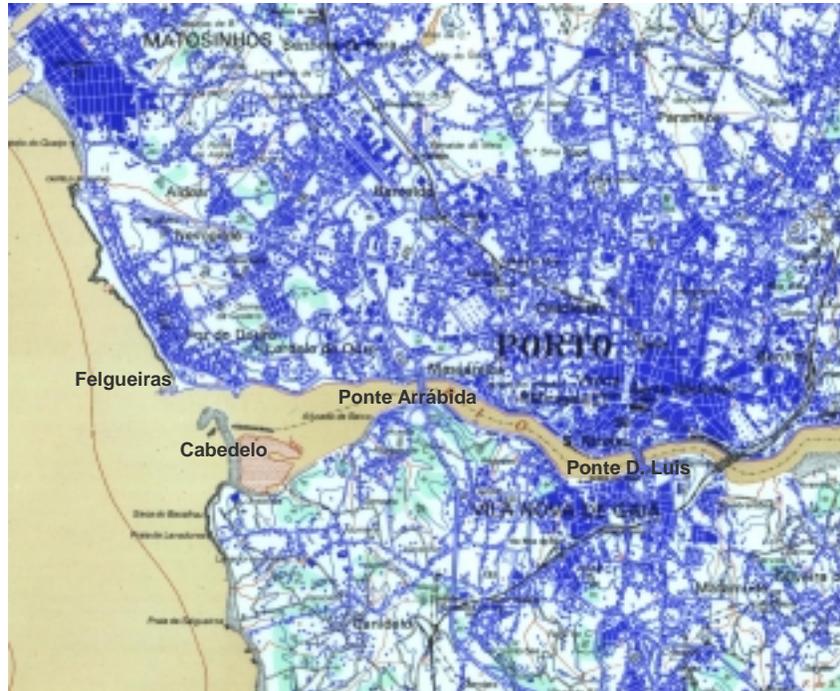


Figura 91: Mapa do estuário do Rio Douro

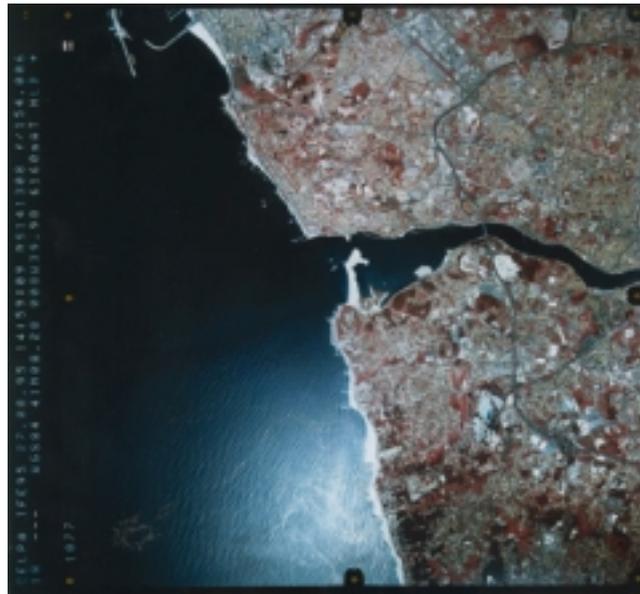


Figura 92: Vista aérea do estuário do Rio Douro

5.6.1.2 Dados de campo

Para o estuário do Douro estão disponíveis dados de campo suficientes para caracterizar a hidrodinâmica e a propagação salina. Durante o projecto Estudos das obras necessárias à melhoria da acessibilidade e das condições de segurança na barra do Douro, (APLD, 1994), foram efectuadas campanhas de medição de

parâmetros físico - químicos em pontos do interior do estuário entre os dias 5 de Setembro e 3 de Outubro de 1994. As séries temporais de salinidade, níveis e correntes obtidas caracterizam o escoamento em condições de caudal médio e foram suficientes para validar um modelo de circulação e de salinidade. Naquele estudo também foram efectuadas medidas de transporte de sedimentos e velocidades junto ao fundo, além de uma caracterização dos sedimentos no fundo, com o objectivo de estudar a dinâmica sedimentar na zona da embocadura. Aqueles estudos limitaram-se à zona interior do estuário, pelo que são insuficientes para definir o seu limite exterior. Estes dados são no entanto suficientes para validar os modelos de circulação e de salinidade no estuário, que produziu os elementos usados na definição daquele limite.

O caudal médio anual num ano típico na barragem de Crestuma situa-se em torno aos $450 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ($700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em anos húmidos e secos respectivamente). Este caudal apresenta uma marcada variabilidade entre os meses de Inverno e os de Verão, podendo em situações de cheia exceder os $10\,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (INAG, 2000).

Em termos de mistura vertical, o estuário pode normalmente ser considerado como verticalmente homogéneo, apresentando no entanto uma cunha salina em situações de caudal elevado. Para condições médias, o estuário é parcialmente misturado com uma modulação na estratificação de marés vivas a mortas. Existe intrusão salina de águas oceânicas, que pode alcançar a ponte da Arrábida para caudais baixos do rio (Bordalo, 1991; HIDROMOD, 1995).

O escoamento é forçado pela maré e pelo caudal do rio. A maré é do tipo semi-diurno. Em Leixões, (na embocadura do estuário do Leça) a semi-amplitude da M_2 é 1.04 m, sendo a modulação do ciclo maré - morta, maré - viva devido sobretudo às componentes S_2 e N_2 respectivamente com 0.42 m e 0.23 m de semi-amplitude. As velocidades observadas são também semi-diurnas ainda que o forte atrito no fundo e as zonas de descobertura determinem uma forte distorção, aumentando a intensidade e a duração das correntes de vazante.

5.6.2 Resultados de modelação

A batimetria usada pelo modelo (Figura 93) no presente estudo baseia-se na preparada por HIDROMOD para o estudo APDL (1994), a qual sintetiza levantamentos históricos e um levantamento levado a cabo especificamente para aquele estudo pelo IHM (IHM, 1994). Desde a batimétrica dos 30 m na plataforma adjacente ao estuário, até à ponte D. Luís existe um levantamento detalhado. A montante da ponte D. Luís a batimetria foi construída por interpolação das secções transversais medidas também no âmbito do estudo da APDL. A resolução máxima

no interior do estuário é de 25 m na direcção N-S e de 50 m na direcção E-W. De forma a otimizar o número de pontos de cálculo, a batimetria a montante da ponte D. Luís foi estirada, tendo o cuidado em preservar as secções e a continuidade do canal principal.

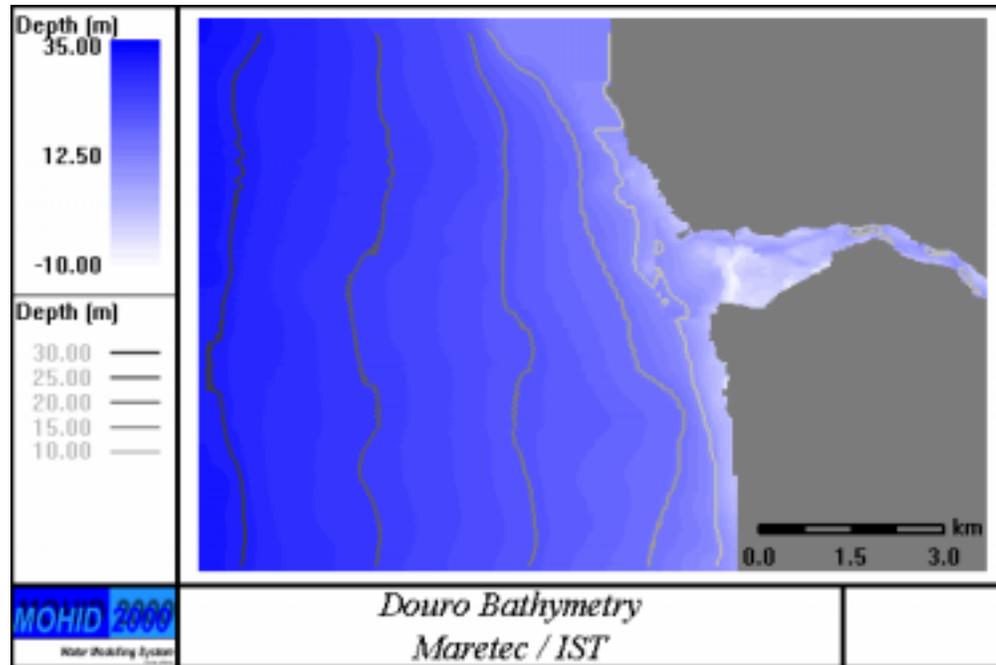


Figura 93: Batimetria utilizada nas simulações.

5.6.2.1 Hidrodinâmica do Estuário

Na Figura 94 e na Figura 95 apresentam-se velocidades respectivamente em vazante e enchente para a situação de maré e caudal do rio médios (450 m³/s). As velocidades máximas (cerca de 2 ms⁻¹ no pico da vazante) ocorrem na zona do Cabedelo, na parte mais profunda do canal.

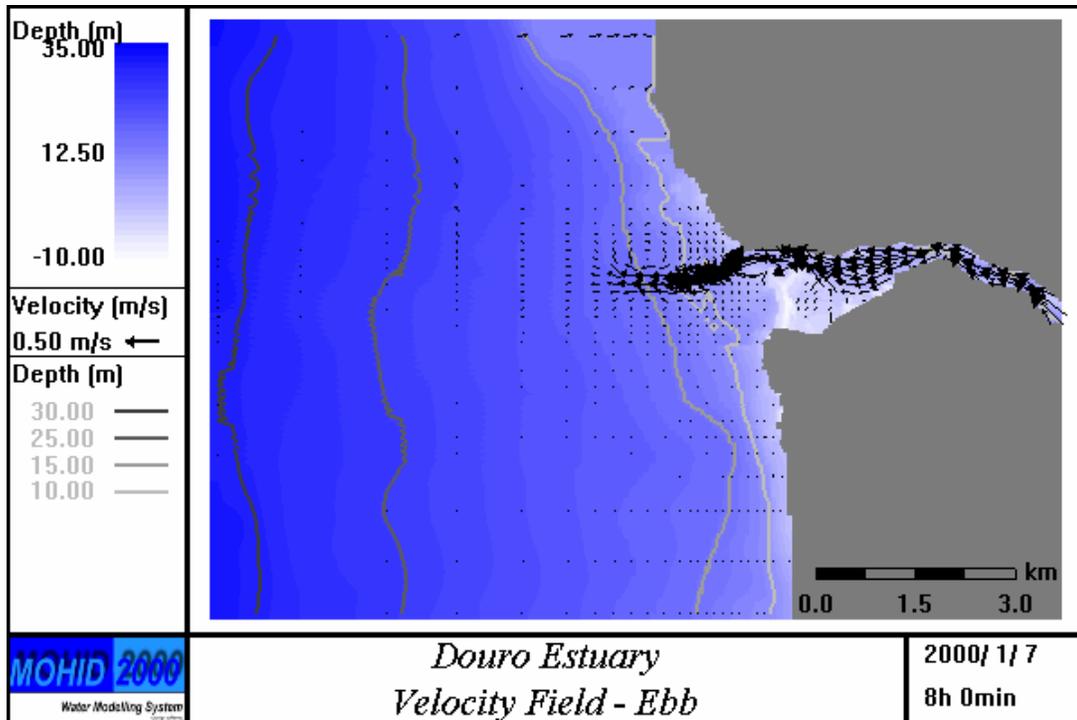


Figura 94: Distribuição de velocidades em vazante (maré média e caudal do rio 450 m³/s)

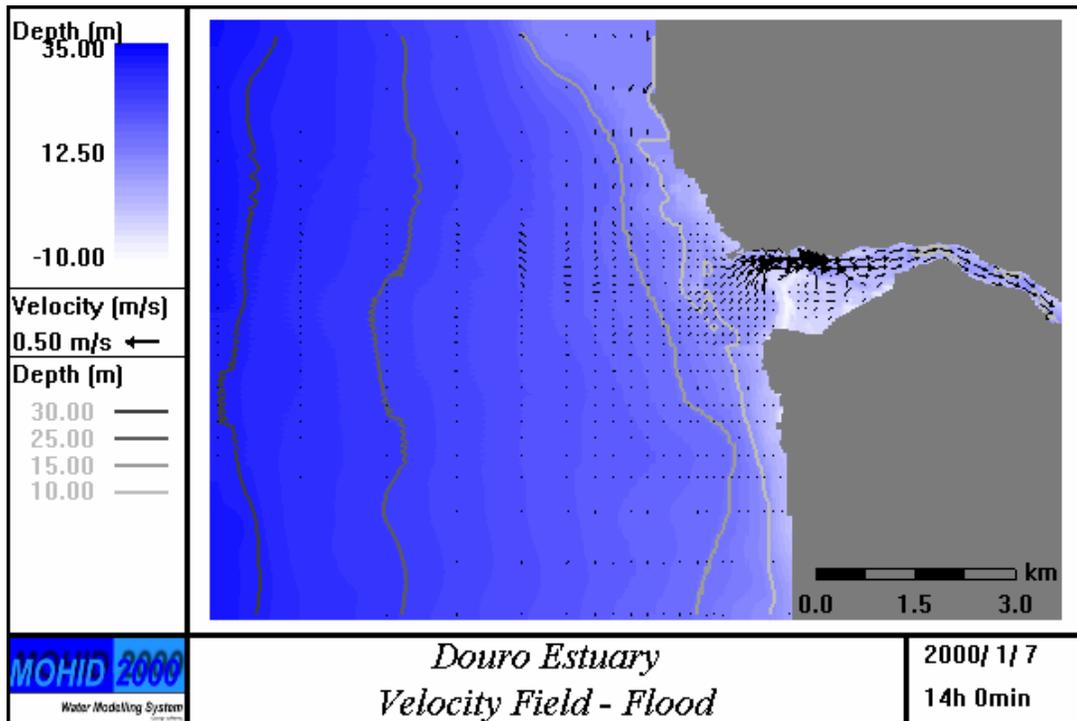


Figura 95: Distribuição de velocidades em enchente (maré média e caudal do rio 450 m³/s)

A Figura 94 mostra como o jacto de saída no pico da vazante induz dois vórtices, um a norte anticiclónico e outro a sul ciclónico. Estes vórtices facilitam o início da enchente pelas zonas junto a terra, enquanto que a quantidade de movimento

transportada pelo jacto de saída dificulta a transição para o escoamento de enchente na zona por ele ocupada. O padrão de escoamento representado na Figura 95 mostra esses efeitos. Na zona do jacto o escoamento continua a ser para o largo (embora com menor intensidade), enquanto que nas zonas adjacentes a água se desloca para o interior do estuário.

Na Figura 97 mostra-se a velocidade residual gerada pela maré M_2 numa situação em que o caudal do rio é $450 \text{ m}^3/\text{s}$ (condições médias). Pode observar-se como a circulação é essencialmente de saída com velocidades superiores a 20 cm/s . O padrão de circulação residual e a intensidade das velocidades são consequência essencialmente do caudal elevado e da pequena capacidade de armazenamento do estuário. Como consequência do caudal do rio e da geometria do estuário os tempos de residência no seu interior são baixos (da ordem dos dias).

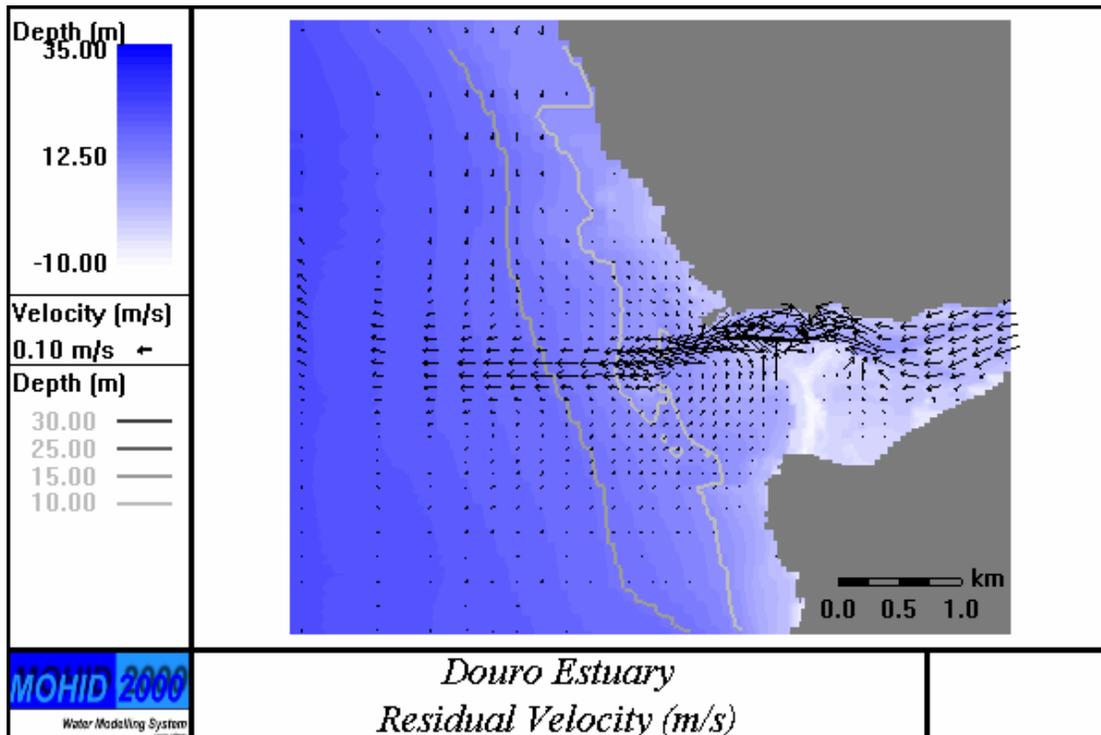


Figura 96: Circulação residual no estuário do Douro (caudal do rio $450 \text{ m}^3/\text{s}$)

Na zona interior do Cabedelo, o transporte residual é baixo, tal como o era o transporte transiente, o que explica que esta região seja uma região de deposição de material particulado. A circulação residual na zona de saída com um jacto e dois vórtices adjacentes era de esperar, tendo em consideração que o próprio escoamento de vazante já apresenta este tipo de padrão de escoamento.

5.6.2.2 Salinidade

A salinidade no interior do estuário, à semelhança dos outros estuários na região norte de Portugal é baixa. Mesmo com caudais de $100 \text{ m}^3/\text{s}$, em baixa-mar a salinidade na região do Cabedelo, à superfície pode ser inferior a 5 ‰ e em preia-mar a cunha salina não ultrapassa a zona da Ponte da Arrábida.

A Figura 97 mostra resultados do modelo em baixa-mar para uma situação de maré média e caudal de $450 \text{ m}^3/\text{s}$ e a Figura 98 mostra a situação em preia-mar nas mesmas condições de simulação. As figuras mostram distribuições consistentes com a informação disponível e põem em evidência os processos de mistura no interior e no exterior do estuário. Na zona de baixa profundidade, do lado de dentro do Cabedelo, a salinidade em Preia-Mar é menor do que em Baixa-Mar, como consequência da topografia local. Com efeito esta zona é inundada através de um vórtice que transporta água de montante, de salinidade menor do que a que está a entrar proveniente do mar.

5.6.3 Traçadores lagrangeanos

A Figura 99 mostra a localizações de traçadores lagrangeanos emitidos em preia-mar e a Figura 100 mostra as localizações dos traçadores 43 horas mais tarde. As figuras mostram que o tempo de residência da água no estuário é inferior a 2 dias e que a água que sai em vazante não volta a entrar. A análise da hidrodinâmica (especialmente da circulação residual) sugeria já este resultado. A intensidade do jacto de vazante desloca a água de vazante para zonas suficientemente afastadas da embocadura do estuário, para que não volte a entrar.

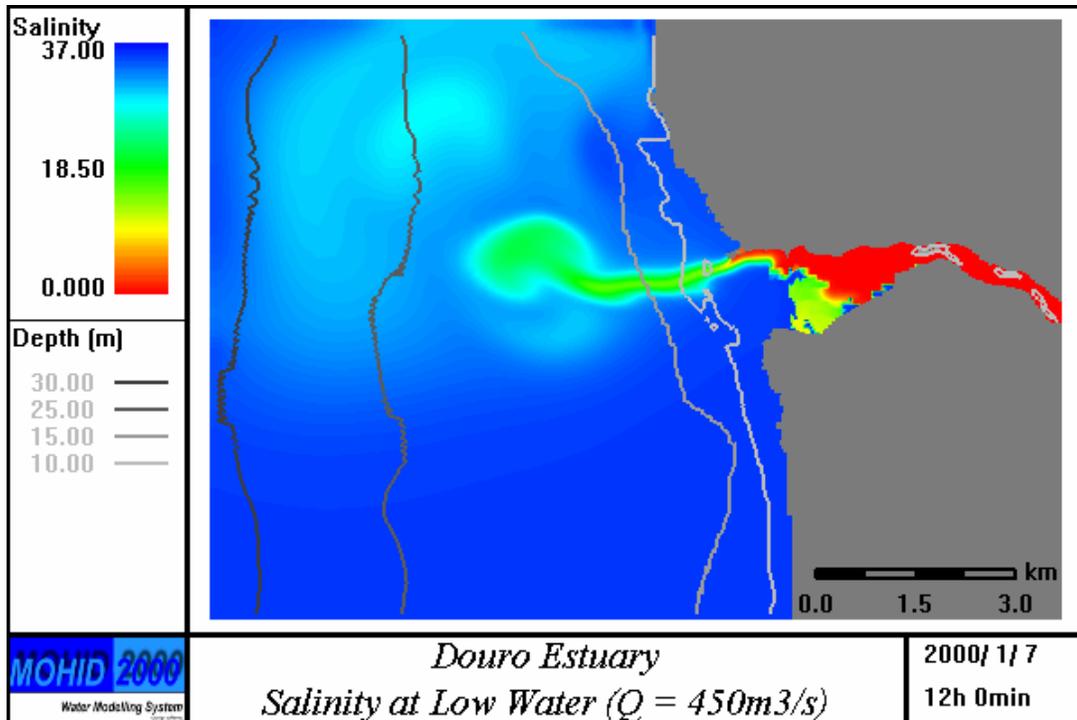


Figura 97: Salinidade em baixa-mar (caudal do rio 450 m³/s)

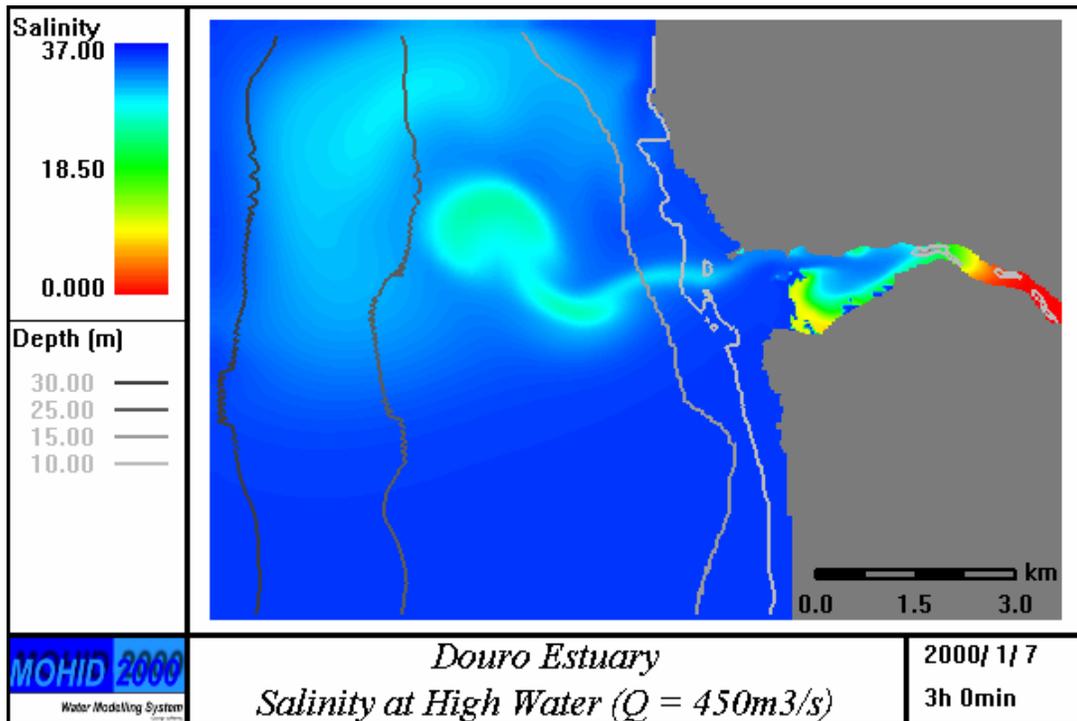


Figura 98: Salinidade em preia-mar (caudal do rio 450 m³/s)

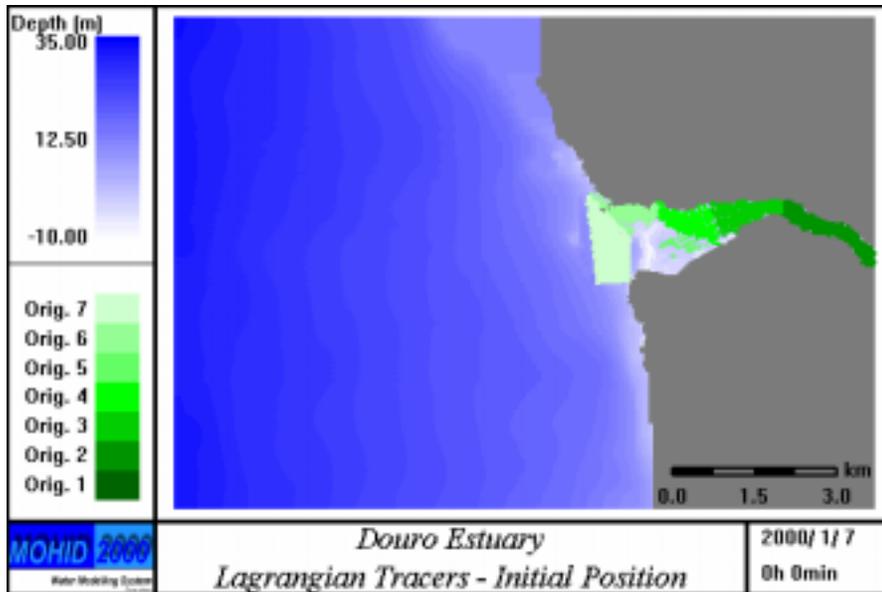


Figura 99: Posições iniciais dos traçadores lagrangeanos.

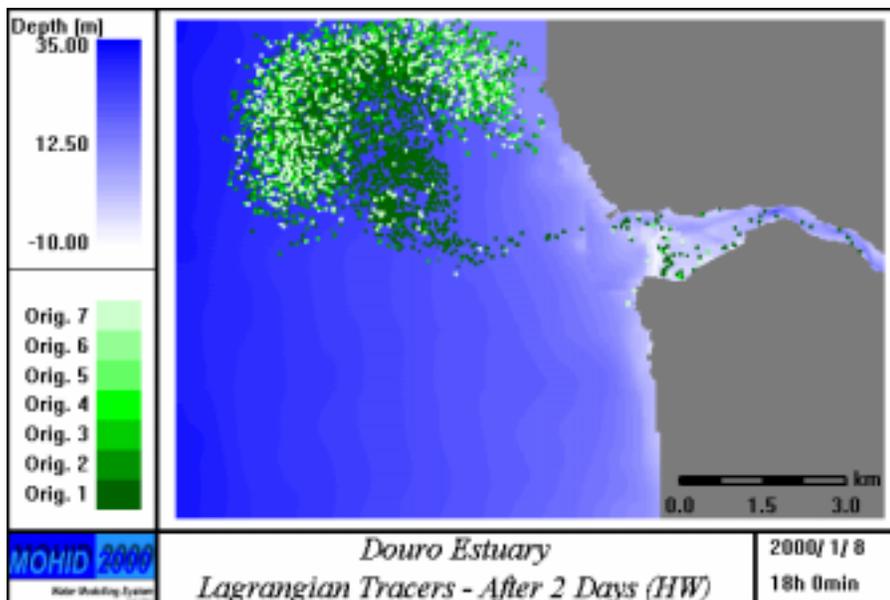


Figura 100: Posições dos traçadores representados na Figura 99, 42 horas mais tarde.

5.6.4 Limite de Jusante

Os resultados do modelo hidrodinâmico, dos traçadores lagrangeanos e as distribuições de salinidade mostram que a água que atravessa a secção “Cabedelo - Felgueiras” não volta a entrar no estuário, devendo por conseguinte ser considerada

como o seu limite de jusante (Figura 101). Este limite pode ser definido pela linha que une os seguintes pontos:

Pontos	Latitude (N)	Longitude (O)
1	41° 08' 42"	8° 40' 36"
2	41° 08' 36"	8° 40' 06"

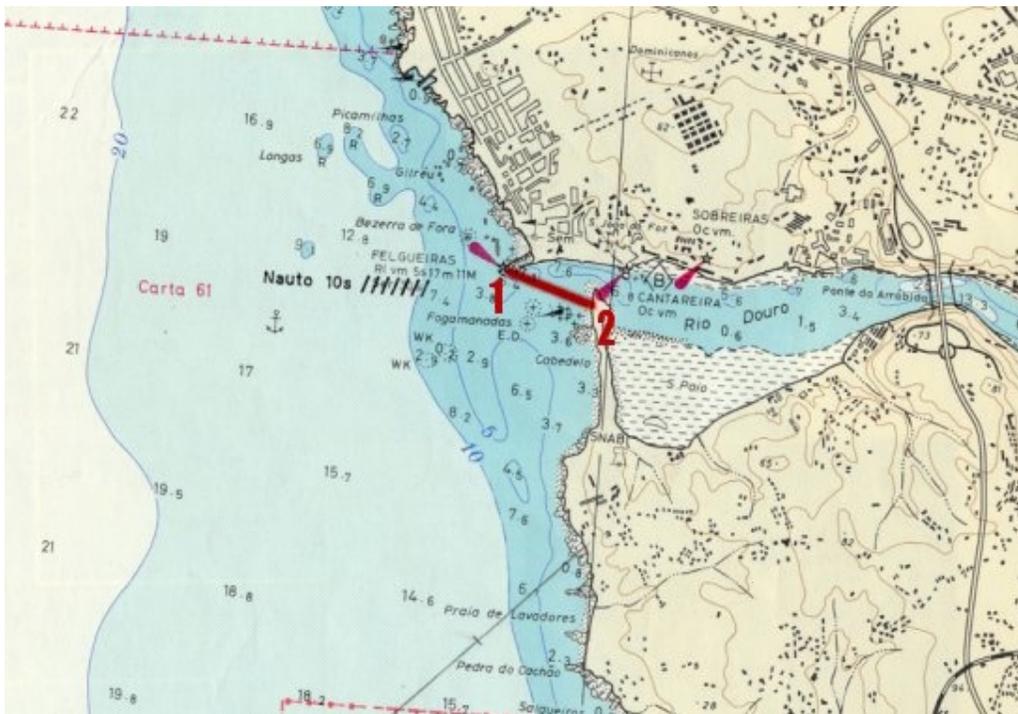


Figura 101: Limite jusante proposto para o estuário.

5.7 A RIA DE AVEIRO

A Ria de Aveiro é uma lagoa costeira de baixa profundidade e extensas zonas entre marés. A Ria estende-se por 45 km ao longo da costa Ocidental de Portugal desde Ovar até Mira (latitude média 38° 5 N). A área total da Ria são coberta durante a preia-mar varia entre 83 km² em maré viva e 66 km² maré morta (Dias *et al*, 1999). A profundidade média é de cerca de um metro e a profundidade máxima, é mantida artificialmente nos canais de navegação entre os 4 e os 7 metros. A comunicação com o oceano faz-se através do canal da Barra com 1,3 km de comprimento, 350 m de largura e 20 m de profundidade.

A lagoa pode ser dividida em três zonas principais: A zona Sul inclui os Canais de Ílhavo e Mira, respectivamente com 7 e 14 km de comprimento e 200 e 300 metros de largura máxima. O Canal de S. Jacinto - Ovar na zona norte tem 25 km de comprimento. No seu extremo norte este canal é muito pouco profundo dando origem a uma rede complexa de pequenos canais e bacias. A terceira zona, com uma geografia muito complexa, termina em frente à foz do rio Antuã e é designada por Ria Murtosa.

Até há cerca de 10 séculos a lagoa não existia, desaguando os rios directamente no oceano. Nessa altura, iniciou-se o desenvolvimento de duas línguas de areia, uma a Norte em Espinho e outra a Sul próximo do Cabo Mondego. Ao longo do tempo a localização da barra foi variando entre Torreira e Mira, com períodos em que a lagoa estava completamente isolada do oceano. Em 1808 foi construída a actual barra, fixada por dois molhes.

O caudal médio de água doce que aflui à Ria é cerca de 40 m³/s. Os rios Vouga e Antuã constituem as principais fontes de água doce, com caudais médios anuais de 24 m³/s e 2.4 m³/s, respectivamente (GRIA, 1990;Hall, *et al.*, 1985).

A circulação no interior da lagoa é dominada pela maré, cuja amplitude varia entre 3.3 m em maré viva e 1.0 em maré morta. O prisma de maré para uma amplitude de 2.8 m é 70×10⁶ m³ com um caudal médio na barra de 4700 m³/s. A partir das variações de nível medidas por marégrafos, Vicente (1985), estimou que 20% do prisma de maré é desviado para a Zona Sul (Canais de Mira e Ílhavo) e o resto do volume distribui-se em partes iguais entre a Zona Norte (canal S. Jacinto – Ovar) e a Ria Murtosa, na zona central. Cerca de 2/3 do volume que vai para esta zona escoar-se pelo canal de Espinheiro.

Na costa ocidental de Portugal a onda de maré propaga-se de Sul para Norte. A maré penetra no interior da Ria através do canal da Barra e propaga-se a baixa

velocidade ao longo dos canais. A velocidade de propagação é tão baixa que em alguns locais o estado de fase pode ser oposto àquele que se verifica no oceano. Os atrasos de fase são maiores em maré baixa podendo atingir 5 horas, nos extremos dos canais de Mira e de S. Jacinto - Ovar (Vicente, 1985). As velocidades máximas da ordem de 1 m/s ocorrem na zona da barra, nos canais mais estreitos e profundos. O forçamento do vento é mais importante nas zonas pouco profundas onde as correntes de maré são muito baixas Dias, *et al.* (1996^a).

5.7.1 Dados disponíveis

A batimetria utilizada pelo modelo foi determinada a partir das medições feitas pelo Instituto Hidrográfico entre 1986 e 1990. Durante essas campanhas o Instituto Hidrográfico realizou também medidas do nível do mar em 10 estações e velocidade em 5 estações, nos locais indicados na Figura 102, cujas designações, coordenadas e períodos de amostragem são apresentadas na Tabela 1.

Os dados de salinidade e temperatura foram obtidos em perfis verticais durante duas campanhas hidrográficas realizadas em Junho de 1996 e Julho de 1997 em 31 estações distribuídas por 8 secções (Dias *et al.*, 1999). Estes perfis mostram que o canal de Mira é bem misturado e que os canais de S. Jacinto, Espinheiro e Ílhavo são parcialmente misturados ou homogéneos. O nível de estratificação depende do principalmente dos caudais dos rios Vouga, Antuã e Boco (na extremidade sul do canal de Ílhavo).

5.7.2 Implementação do modelo

Uma vez que a lagoa tem boa mistura vertical, o modelo tridimensional foi implementado com uma única camada vertical, reservando o recursos de cálculo para maximizar a resolução horizontal, de modo a otimizar a resolução dos canais estreitos por onde se faz a generalidade do escoamento na Ria.

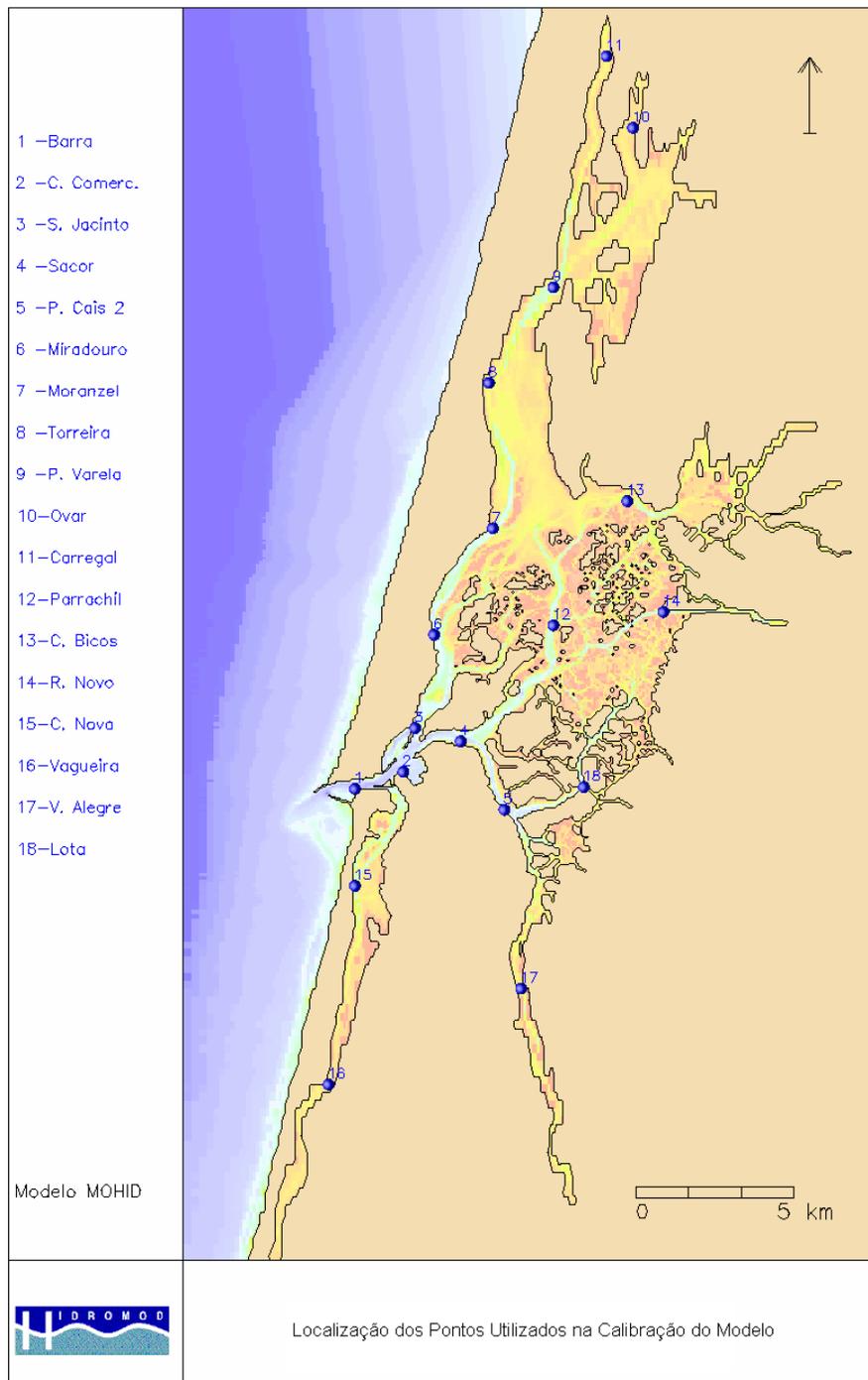


Figura 102: Estações de amostragem do IH, nas campanhas de 1986 a 1989.

Tabela 1: Estações e períodos de medida do nível do mar e da velocidade.

Nome da estação	Período de medidas	Tipo de dados:
Barra	Desde 03/07/1987 às 22:53 até 10/07/1987 às 22:53	Níveis
São Jacinto	Desde 03/07/1987 às 22:53 até 10/07/1987 às 22:53	Níveis
	Desde 04/09/1990 às 03:53 até 04/09/1990 às 20:53	Correntes
Costa Nova	Desde 03/07/1987 às 22:53 até 10/07/1987 às 22:53	Níveis
Miradouro	Desde 03/07/1987 às 22:53 até 10/07/1987 às 22:53	Níveis
Moranzel	Desde 03/07/1987 às 22:53 até 10/07/1987 às 22:53	Níveis
Torreira	Desde 03/07/1987 às 22:53 até 10/07/1987 às 22:53	Níveis
Ponte da Varela	Desde 03/07/1987 às 22:53 até 10/07/1987 às 22:53	Níveis
	Desde 06/04/1989 às 05:53 até 06/04/1989 às 18:53	Correntes
Cais do Bico	Desde 03/07/1987 às 22:53 até 10/07/1987 às 22:53	Níveis
	Desde 04/04/1989 às 5:53 até 04/04/1989 às 18:53	Correntes
Vista Alegre	Desde 20/09/1988 às 22:53 até 23/09/1988 às 22:53	Níveis
	Desde 01/06/1989 às 04:23 até 01/06/1989 às 17:23	Correntes
	Desde 08/06/1989 às 04:23 até 08/06/1989 às 17:23	Correntes
Sacor	Desde 04/09/1990 às 03:53 até 04/09/1990 às 20:53	Correntes

O modelo cobre todo o interior da Ria e a plataforma continental adjacente. O passo horizontal do modelo é variável para permitir uma melhor resolução no interior da lagoa. O passo espacial horizontal mínimo é 50 m e o máximo é 500 m na plataforma continental. Com esta discretização horizontal o modelo usa uma matriz de cerca de 103000 pontos (316 na direcção Este-Oeste e 326 na direcção Norte-Sul).

A viscosidade horizontal foi mantida constante em todo o domínio com o valor de 5.0 m²/s. O coeficiente de atrito no fundo é calculado a partir da rugosidade de Manning:

$$C_d = gM^2(H)^{\frac{1}{3}},$$

onde C_d é o coeficiente de atrito no fundo, g é a aceleração da gravidade, M é a rugosidade de Manning e H é a profundidade da local. O modelo foi calibrado ajustando a rugosidade de Manning, tendo sido usados valores entre 0.015 e 0.018 m^{-1/3}s.

Na fronteira com o mar foi imposto o nível de maré. As componentes harmónicas foram obtidas a partir das séries temporais medidas pelo Instituto Hidrográfico junto da barra. Nas fronteiras com os rios foram impostos os respectivos caudais médios. O passo temporal é 15 s.

5.7.3 Validação do Modelo

O modelo foi validado simulando alguns períodos das campanhas do IH de 1987 e 1989. Foram consideradas na fronteira oceânica 25 componentes harmónicas da

maré e os caudais dos rios Vouga, Boco, Caster, Antuã e Mira, típicos dos períodos que estavam a ser simulados.

Os resultados do modelo foram também validados por comparação com as simulações Simultaneamente os resultados do modelo foram também comparados com os resultados obtidos por uma modelo 2D da Hidromod (1998).

5.7.3.1 Nível do mar

A Figura 103 ilustra a comparação entre os níveis simulados pelos dois modelos e observados na Barra. O ajustamento é muito bom nesta estação. A figura também mostra que o modelo 3D aqui usado apresenta um melhor desempenho que o modelo 2D.

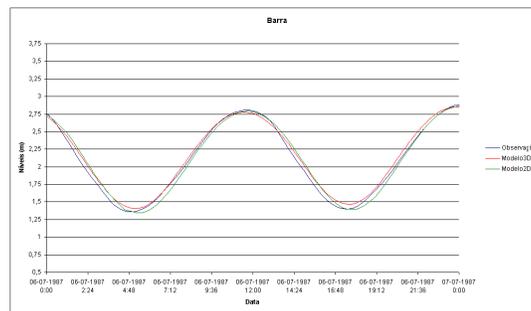


Figura 103: Comparação entre o nível do mar simulado e observado na Barra para 2 ciclos de maré. Vermelho representa o modelo 3D, verde para o modelo 2D e azul para observações.

A Figura 104 e a Figura 105 mostram comparações semelhantes em duas outras estações – S. Jacinto e Costa Nova - respectivamente. Os resultados ajustam-se muito bem com os dados particularmente para a fase. As pequenas discrepâncias na amplitude são da ordem de 2% e são maiores na Costa Nova.

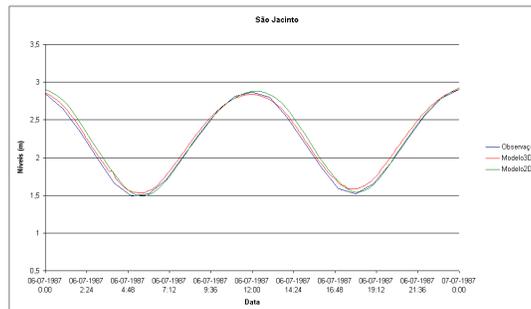


Figura 104: Comparação entre o nível do mar simulado e observado em S. Jacinto para 2 ciclos de maré. Vermelho representa o modelo 3D, verde para o modelo 2D e azul para observações.

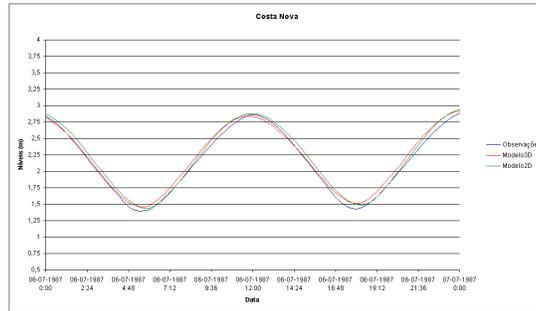


Figura 105: Comparação entre o nível do mar simulado e observado em Costa Nova para 2 ciclos de maré. Vermelho representa o modelo 3D , verde para o modelo 2D e azul para observações.

Ao longo do canal de Ovar existem 3 estações com dados de nível do mar: Miradouro, Moranzel e Torreira. Globalmente, os resultados do modelo e os dados ajustam-se para estas estações, com as maiores discrepâncias observadas em Moranzel (ver Figura 106 a Figura 108)

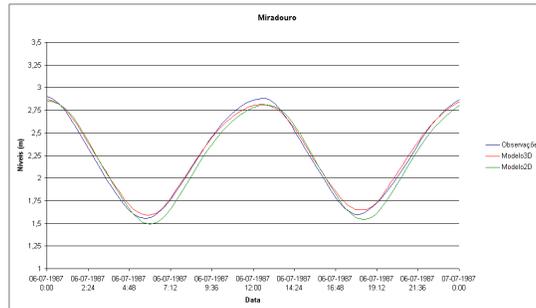


Figura 106: Comparação entre o nível do mar simulado e observado em Miradouro para 2 ciclos de maré. Vermelho representa o modelo 3D , verde para o modelo 2D e azul para observações.

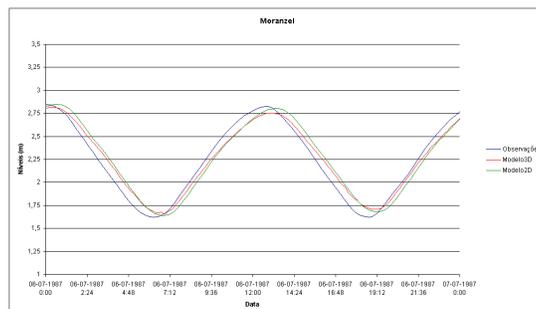


Figura 107: Comparação entre o nível do mar simulado e observado em Moranzel para 2 ciclos de maré. Vermelho representa o modelo 3D , verde para o modelo 2D e azul para observações.

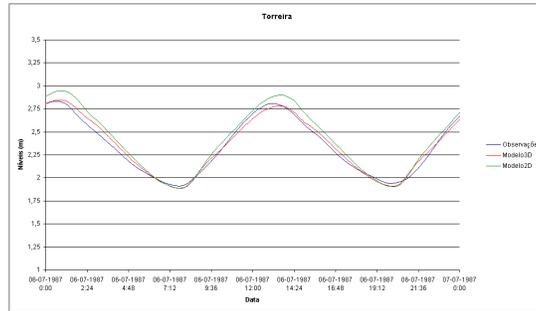


Figura 108: Comparação entre o nível do mar simulado e observado em Torreira para 2 ciclos de maré. Vermelho representa o modelo 3D , verde para o modelo 2D e azul para observações.

Finalmente, a Figura 109 e a Figura 110 ilustram as comparações em Cais do Bico e Ponte da Varela. Na Ponte da Varela, como na maior parte das localizações, o ajustamento entre o modelo e as observações é muito bom, ainda mais quando esta estação é a mais distante da barra. No Cais do Bico as diferenças entre o modelo e as observações são maiores do que em qualquer outra estação analisada. Este aspecto é particularmente reforçado na maré vazante onde as diferenças são aproximadamente de 10%. Este resultado foi atribuído a problemas locais da batimetria.

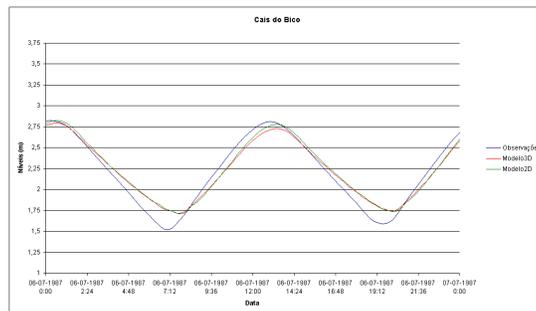


Figura 109: Comparação entre o nível do mar simulado e observado em Cais do Bico para 2 ciclos de maré. Vermelho representa o modelo 3D , verde para o modelo 2D e azul para observações.

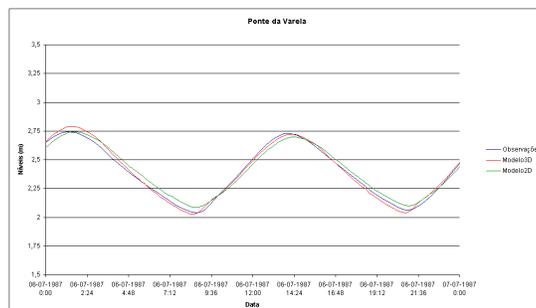


Figura 110: Comparação entre o nível do mar simulado e observado em Ponte da Varela para 2 ciclos de maré. Vermelho representa o modelo 3D, verde para o modelo 2D e azul para observações.

5.7.3.2 Correntes

As correntes foram analisadas em 5 estações distribuídas ao longo dos principais canais da Ria de Aveiro: Vista Alegre, Cais do Bico, Ponte da Varela, S. Jacinto e Sacor. Tal como nos níveis, as correntes simuladas são comparadas as correntes observadas e em alguns casos com os resultados obtidos com o modelo 2D da Hidromod (1988) já mencionado.

A comparação das correntes obtidas com o modelo e os dados de campo apresentam aspectos não é tão simples como a comparação de níveis. O modelo foi forçado impondo as componentes harmónicas da maré no oceano. As séries temporais nos locais dos marégrafos foram reconstituídas utilizando as mesmas componentes harmónicas impostas na fronteira. Por outro lado os níveis não apresentam variações locais importantes. Deste modo a comparação de níveis obtidos a partir do modelo e a partir das observações é um problema objectivo.

Pelo contrário, as correntes calculadas pelo modelo são comparadas com os valores medidos, sem qualquer filtragem. Assim, o vento é responsável por parte dos eventuais desvios entre os valores medidos e os observados. Por outro lado a velocidade tem variabilidade espacial em escalas muito menores que os níveis. Com efeito a velocidade numa secção depende essencialmente do caudal e da área da secção. Entre duas secções contíguas, o caudal mantém-se aproximadamente constante, mas velocidade pode apresentar variações importantes, se variar a profundidade, ou a largura do canal. Os correntómetros medem as velocidades num ponto. Pelo contrário os resultados do modelo são a velocidade média numa face cuja área é o passo local do modelo vezes a profundidade local. Aumentar a estas dificuldades acrescem ainda as devidas ao perfil vertical de velocidades. Melhor que a comparação das velocidades medidas e calculadas seria a comparação de caudais. Estes não são no entanto fáceis de medir.

O volume de água que entra numa zona da Ria e a taxa a que entra afecta directamente as amplitudes e as fases da maré. Se os níveis medidos e calculados comparam bem em amplitude e fase, isso significa que os caudais estão a ser bem calculados.

A Figura 111 e a Figura 112 ilustram a comparação entre as correntes simuladas e observadas em Vista Alegre em dois períodos diferentes. Globalmente, o ajustamento pode ser considerado bom se tivermos em mente as considerações

prévias. O mesmo tipo de resultados é obtido em Cais do Bico, Ponte da Varela e Sacor (Figura 113 a Figura 115). Em ambos os casos a tendência simulada com o modelo 3D acompanha os dados e também as correntes do modelo 2D.

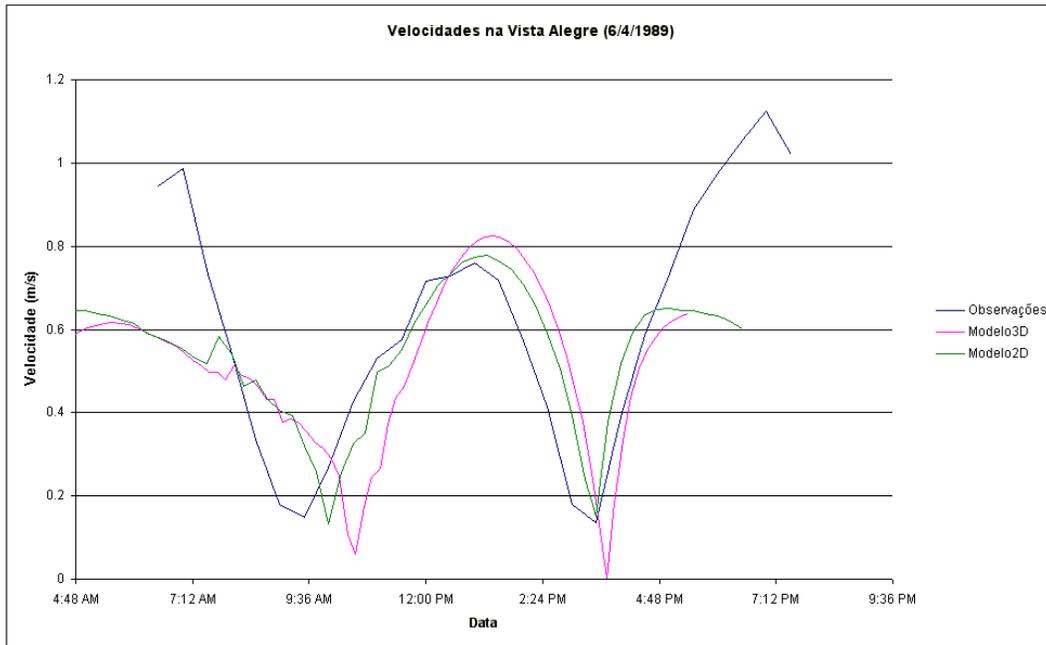


Figura 111: Comparação entre velocidades simuladas e observadas em Vista Alegre. Vermelho representa o modelo 3D, verde o modelo 2D e azul as observações.

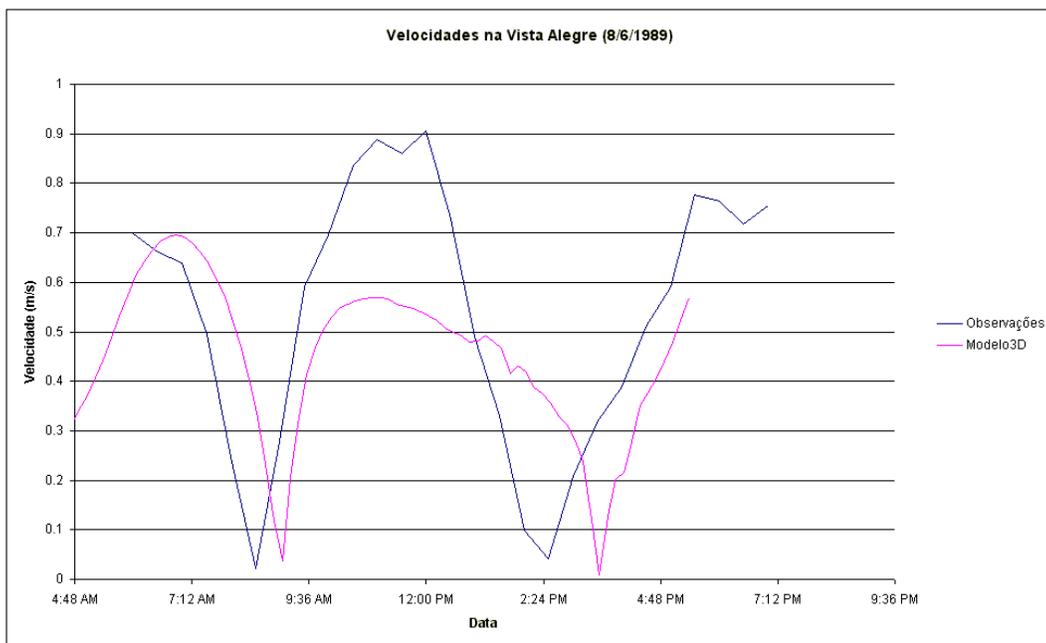


Figura 112: Comparação entre velocidades simuladas e observadas em Vista Alegre. Vermelho representa o modelo 3D e azul as observações.

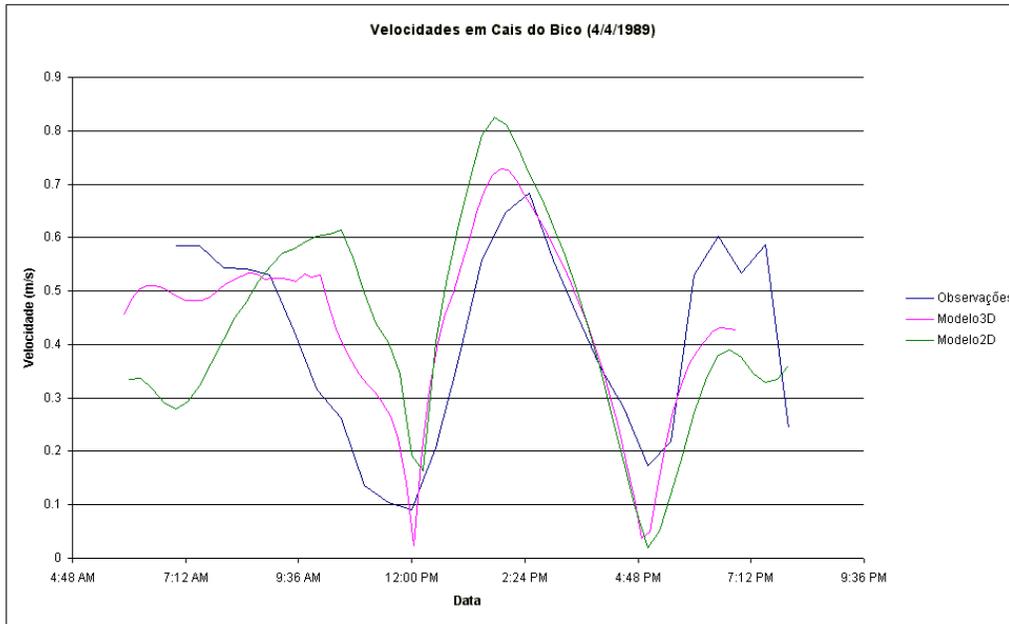


Figura 113: Comparação entre velocidades simuladas e observadas em Cais do Bico entre 4 e 5 de Abril 1989. Vermelho representa o modelo 3D, verde o modelo 2D e azul as observações.

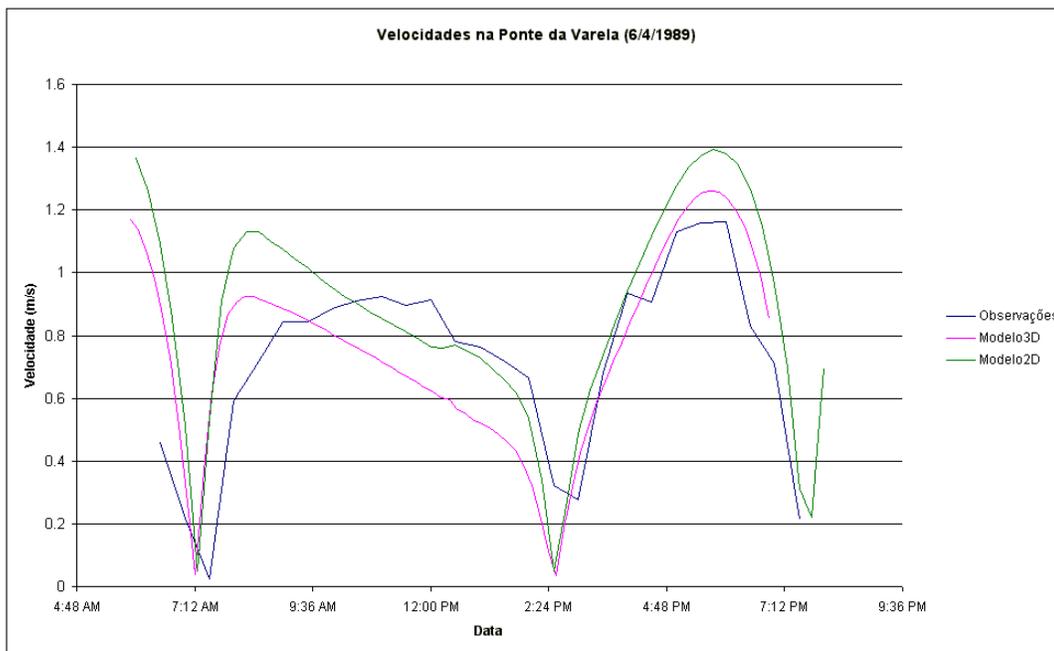


Figura 114: Comparação entre velocidades simuladas e observadas em Ponte da Varela entre 6 e 7 de Abril 1989. Vermelho representa o modelo 3D, verde o modelo 2D e azul as observações.

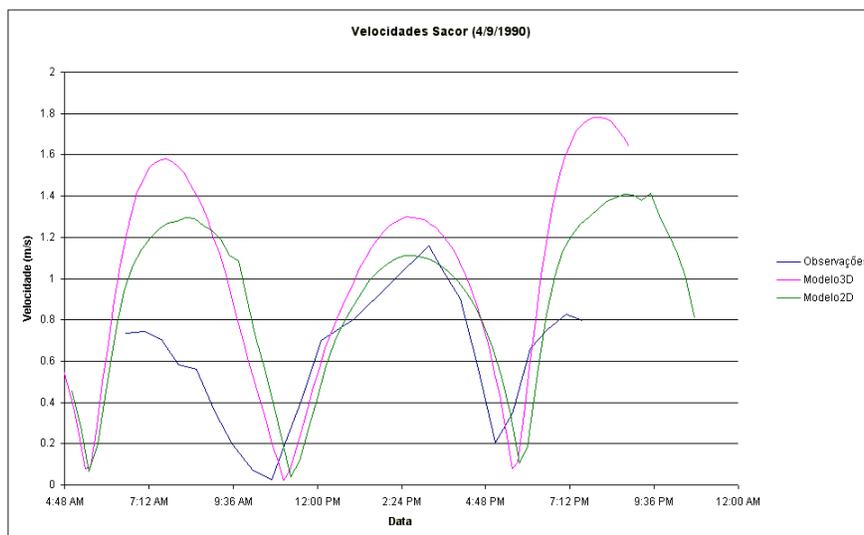


Figura 115: Comparação entre velocidades simuladas e observadas em Sacor entre 4 e 5 de Setembro 1990. Vermelho representa o modelo 3D, verde o modelo 2D e azul as observações.

Finalmente para S. Jacinto (Figura 116) as correntes simuladas são substancialmente diferentes dos dados. Suspeita-se que o efeito das dragagens próximas da barra entretanto efectuada seja muito significativo para a explicação das discrepâncias encontradas nas correntes.

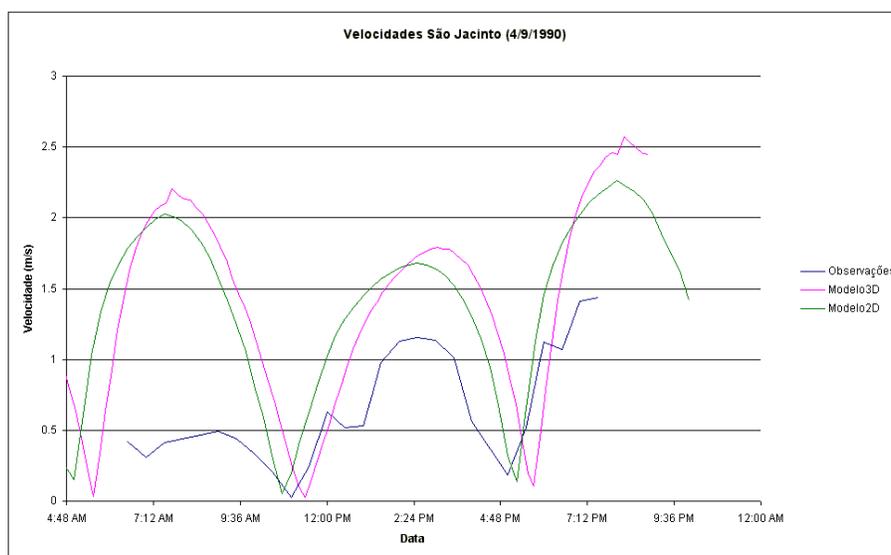


Figura 116: Comparação entre velocidades simuladas e observadas em S. Jacinto para 3 ciclos de maré entre 4 e 5 de Setembro 1990. Vermelho representa o modelo 3D, verde o modelo 2D e azul as observações.

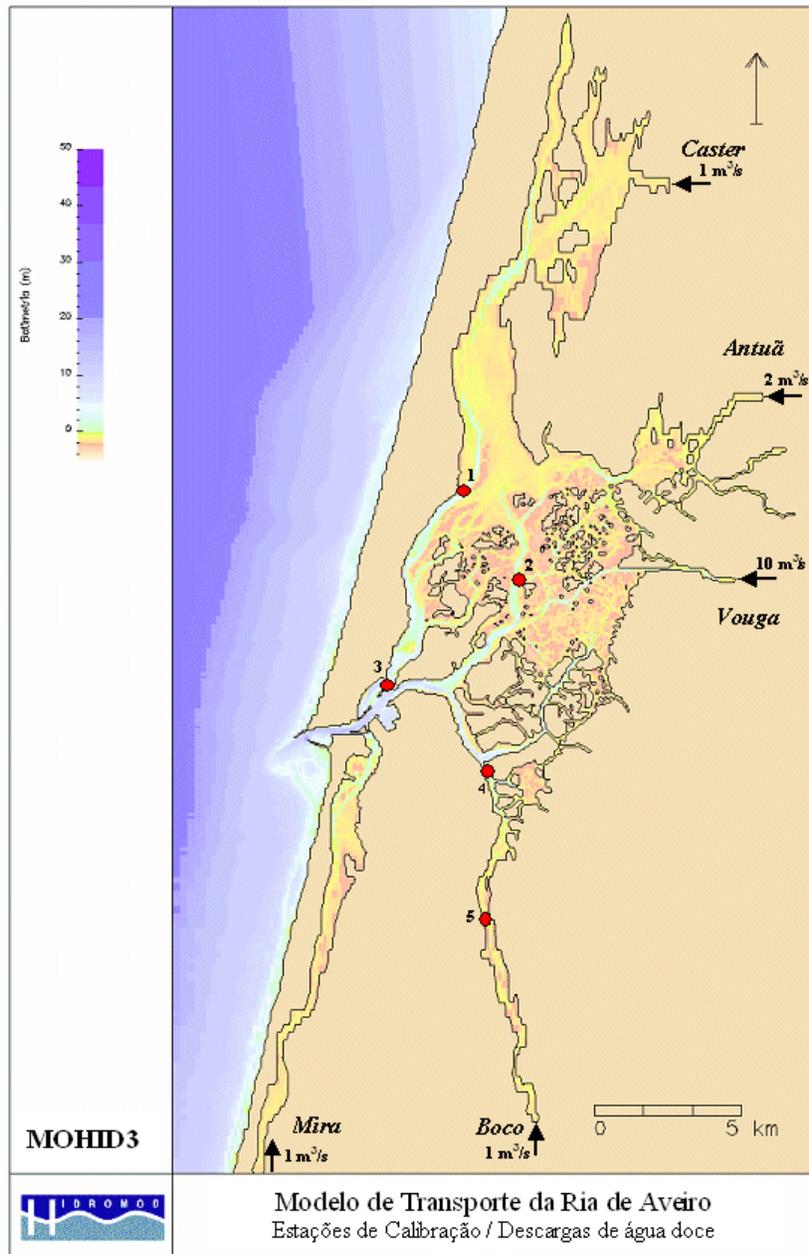


Figura 117: Localização das estações de salinidade: 1- Monrazel, 2- Parrachil, 3 – São Jacinto, 4- Ponte da FrioPesca, 5- Vista Alegre. Os valores e localização de fontes de água doce estão também representados.

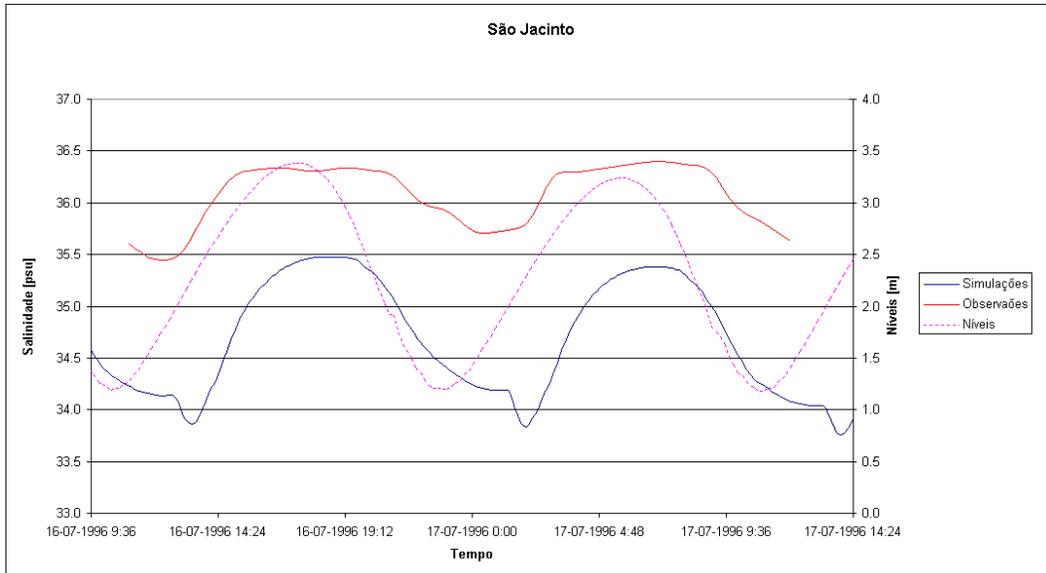


Figura 118: Séries temporais de salinidade em S. Jacinto in Julho 1996. Azul representa os resultados do modelo e vermelho as observações. A linha pontuada representa o nível do mar.

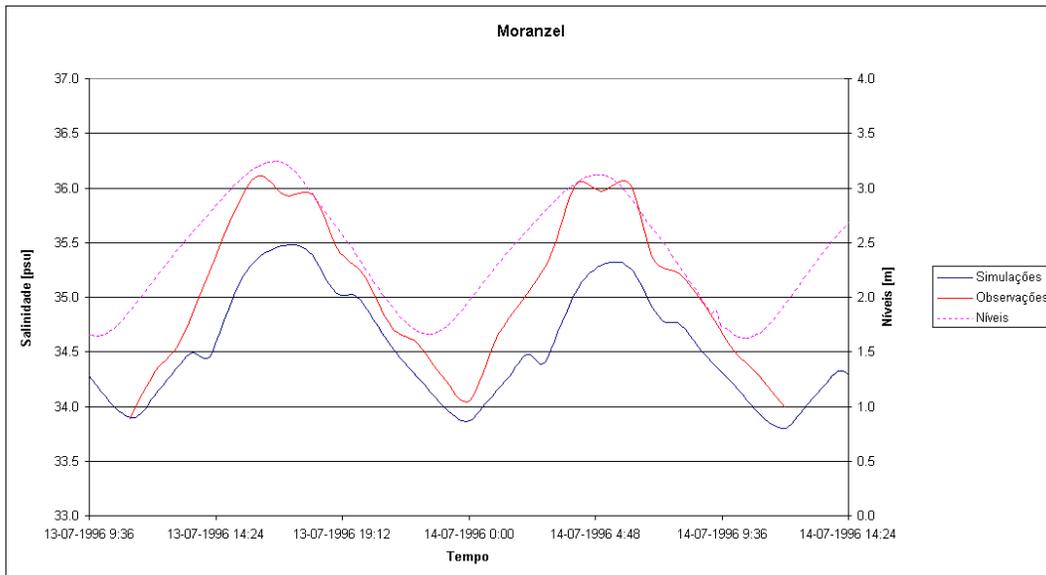


Figura 119: Séries temporais de salinidade em Julho 1996. Azul representa os resultados do modelo e vermelho as observações. A linha pontuada representa o nível do mar.

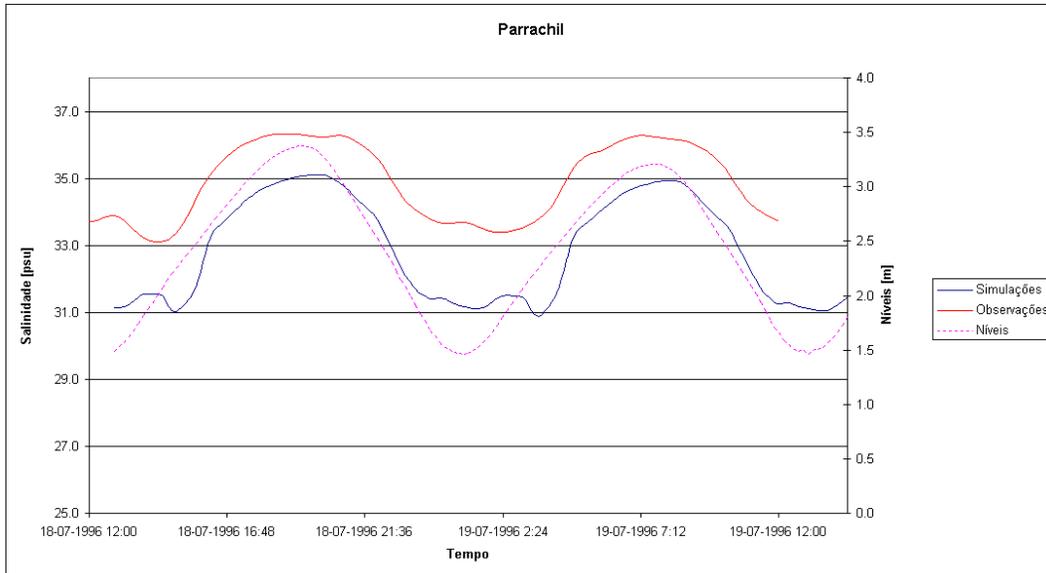


Figura 120: Séries temporais de salinidade em Parrachil em Julho 1996. Azul representa os resultados do modelo e vermelho as observações. A linha pontuada representa o nível do mar.

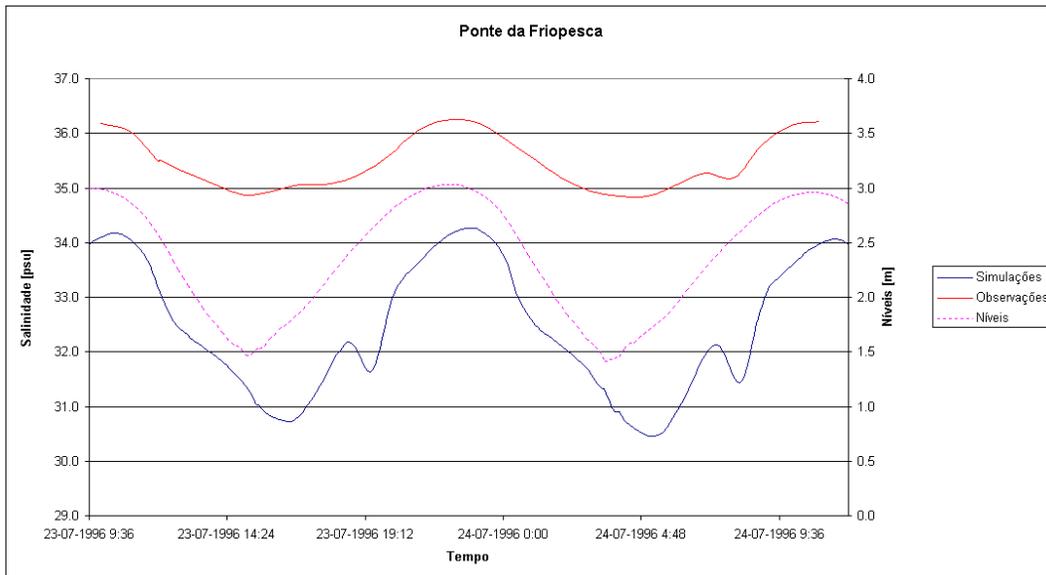


Figura 121: Séries temporais de salinidade em Ponte da FrioPesca em Julho 1996. Azul representa os resultados do modelo e vermelho as observações. A linha pontuada representa o nível do mar.

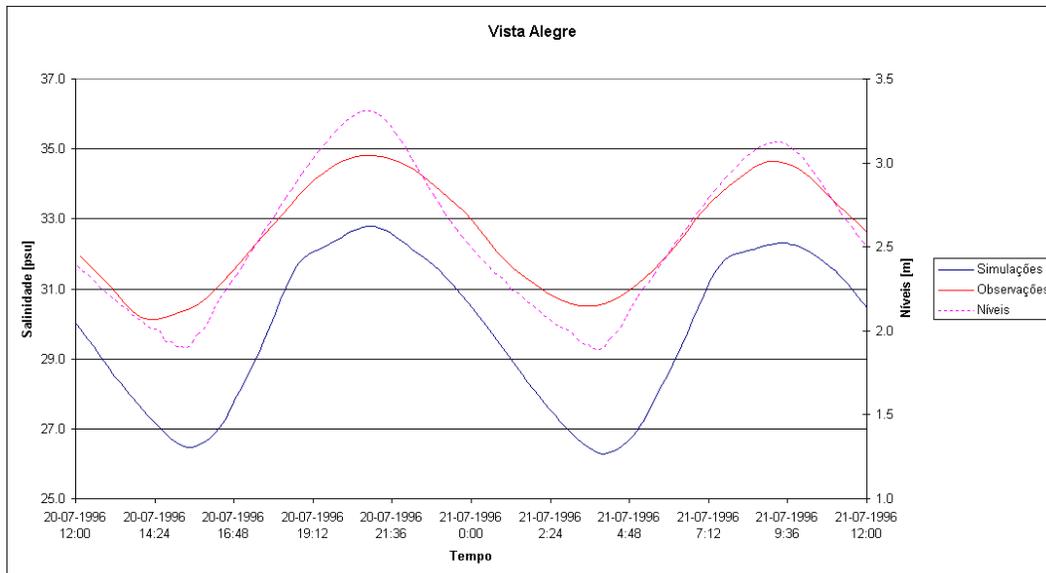


Figura 122: Séries temporais de salinidade em Vista Alegre em Julho 1996. Azul representa os resultados do modelo e vermelho as observações. A linha pontuada representa o nível do mar.

5.7.3.3 Salinidade

Como mencionado atrás, a maior fonte de água doce para a Ria de Aveiro é o Rio Vouga. As contribuições dos rios Antuã, Caster, Mira e Boco são no entanto essenciais para a simulação da salinidade na Ria. A condição de fronteira com o oceano é imposta usando dados climatológicos de salinidade. As trocas com a atmosfera (evaporação e precipitação) são estimadas usando os dados disponíveis para a região. Os resultados do modelo foram validados com dados de Julho de 1996.

As fontes de água doce e o caudal correspondente são as seguintes (ver também Figura 117): Vouga, 10 m³/s; Antuã, 2 m³/s; Caster, 1 m³/s; Boco, 1 m³/s; Mira, 1 m³/s. A distribuição inicial de salinidade foi obtida por interpolação espacial das médias temporais medidas por Dias et al. (1998) em Julho de 1996.

Os resultados do modelo boa concordância na fase (ver Figura 118 a Figura 122). As diferenças nos valores obtidos são também pequenas. Em S. Jacinto o valor médio do desvio entre as observações e o modelo é 1 psu, enquanto que em Moranzel é 0.25 psu e em Parrachil é 0.5 psu. Os desvios aumentam ao longo do canal de Ílhavo, em Vista Alegre e Ponte da FrioPesca. Estes desvios são presumivelmente causados por incertezas nas condições de fronteira. De facto é muito difícil estimar a quantidade de água doce que entra no sistema e conseqüentemente impor correctamente a condição de fronteira. Com efeito os erros produzidos numericamente produzem difusão numérica, diminuindo a amplitude das

oscilações simuladas. Ora, nestes resultados a diferença é exactamente ao contrário. Os resultados das simulações apresentam amplitudes menores do que as calculadas.

5.7.4 Circulação média na Ria de Aveiro – a aproximação da maré M_2 e dos caudais médios

A análise dos campos de velocidade horizontal revela dois aspectos da circulação na Ria de Aveiro: As velocidades máximas são registadas na zona da barra, e no interior da Ria as velocidades são baixas, distribuindo-se o caudal por uma rede complexa de canais (ver Figura 123 à Figura 125).

Os resultados apresentados acima, para calibração e validação do modelo foram obtidos considerando 25 componentes harmónicas de maré. No entanto, para estabelecer os limites do estuário, as condições médias são mais objectivas. Assim, adiante serão descritos os resultados obtidos usando apenas a componente M_2 da maré na fronteira com o oceano e os caudais médios anuais dos rios– Vouga, $24 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; Antuã, $4.0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; Mira, $2.0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; Caster, $2.0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, Boco, $2.0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

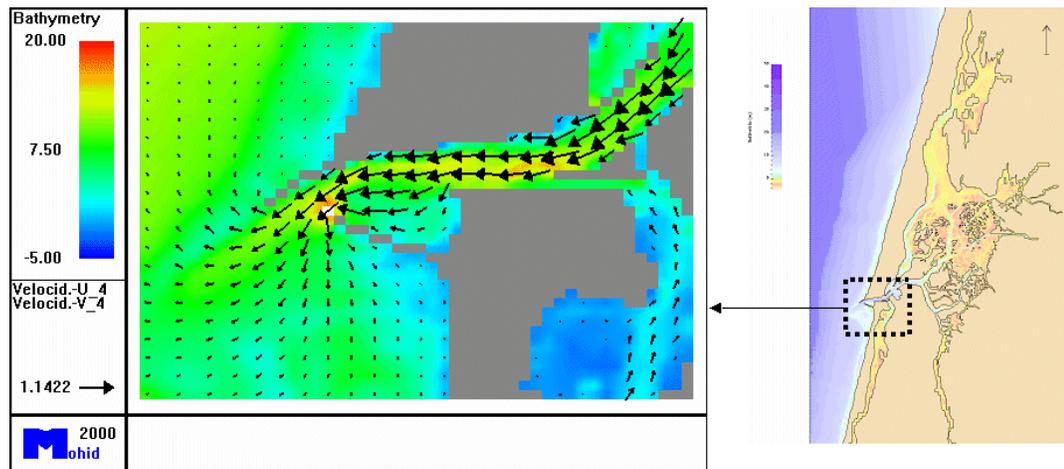


Figura 123: Campo de velocidades próximo da barra durante a vazante. A velocidade está em ms^{-1} .

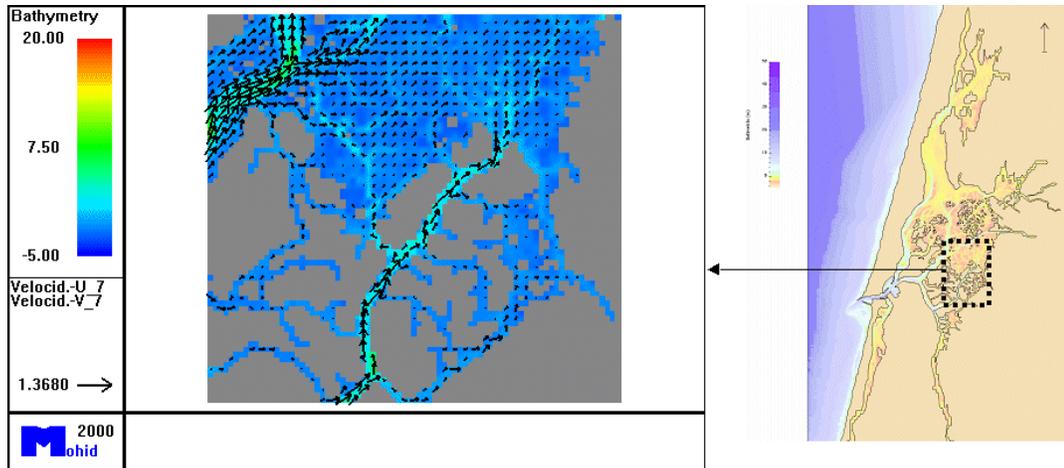


Figura 124: Campo de velocidades no interior da ria durante a enchente. A velocidade está em ms^{-1} .

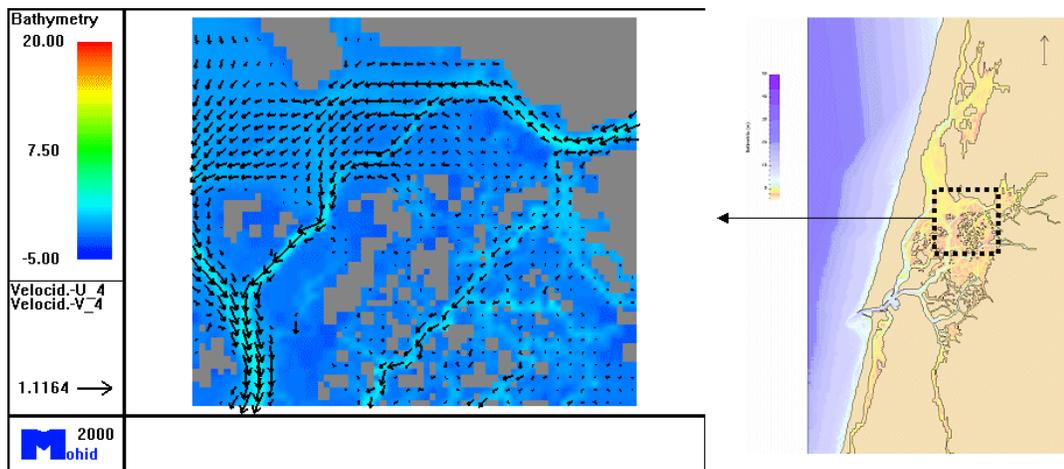


Figura 125: Campo de velocidades próximo do Cais do Bico durante a enchente. A velocidade está em ms^{-1} .

A comparação de resultados obtidos com a maré real e com a maré média mostra os mesmos padrões de circulação e por isso que as conclusões a retirar da hidrodinâmica são as mesmas. A Figura 126 mostra os resultados para a estação próxima da Barra e a Figura 127 na Costa Nova, no canal de Mira. A maré média mostra evolução com a mesma forma, estando naturalmente os valores compreendidos entre os obtidos em maré morta e maré viva.

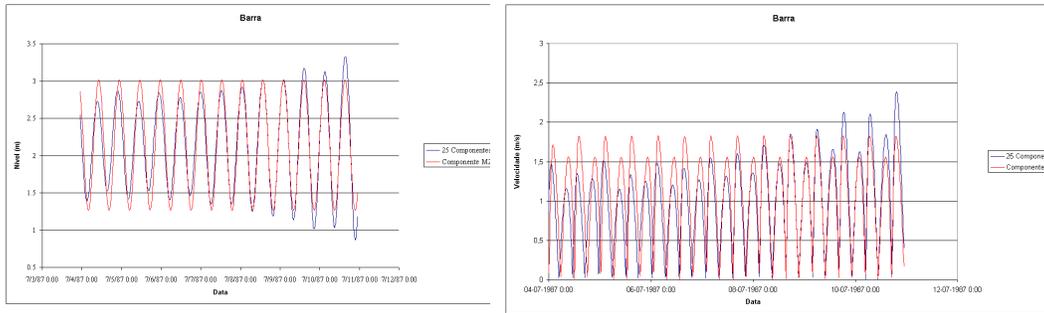


Figura 126: Comparação de resultados (níveis e velocidades) na Barra obtidos com a maré real e com a maré média. A curva a vermelho representa a simulação usando apenas a M2.

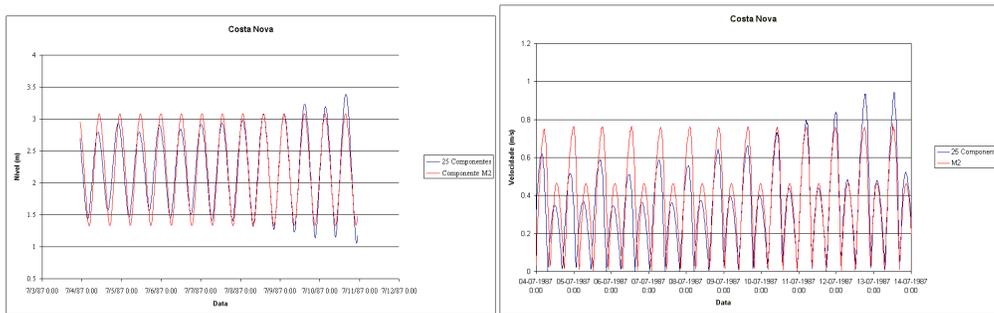


Figura 127: Comparação de resultados (níveis e velocidades) na Costa Nova obtidos com a maré real e com a maré média. A curva a vermelho representa a simulação usando apenas a M2.

Em Torreira – no canal de Ovar – a diferença no nível médio é de cerca de 4% e a diferença das velocidades é de cerca de 8% (ver também Figura 128). No Cais do Bico (Figura 128) as diferenças nos valores médios de cerca de 5% para o nível do mar e para a velocidade.

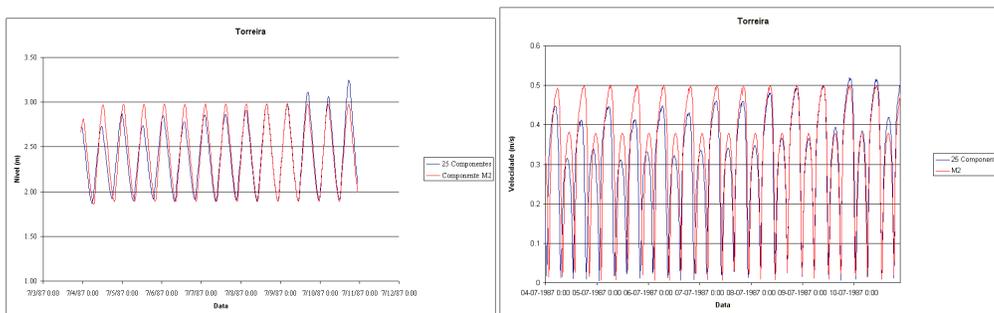


Figura 128: Comparação de resultados (níveis e velocidades) na Torreira obtidos com a maré real e com a maré média. A curva a vermelho representa a simulação usando apenas a M₂.

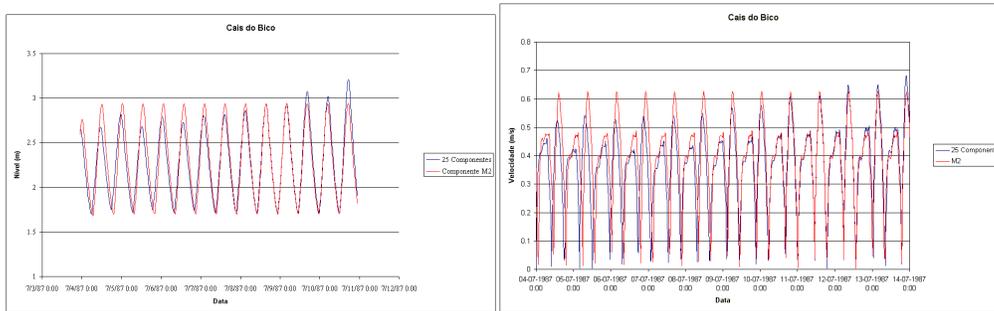


Figura 129: Comparação de resultados (níveis e velocidades) no Cais do Bico obtidos com a maré real e com a maré média. A curva a vermelho representa a simulação usando apenas a M_2 .

Destas comparações pode concluir-se que as diferenças entre as simulações com maré média e com as 25 componentes de maré são pequenas e que as conclusões a extrair de qualquer das simulações são idênticas. A consideração de uma maré média torna a análise mais objectiva uma vez que evita a subjectividade associada à “quási -periodicidade” do ciclo maré - morta maré - viva. Assim, pode também concluir-se que a abordagem é válida para o objectivo deste estudo que é o de estabelecer os limites de jusante do estuário, cuja definição depende da capacidade de definir a zona de mistura da água do estuário e do oceano costeiro.

5.7.5 Distribuições espaciais

O modelo é corrido nas condições de maré e caudais médios descritos acima durante 4 dias para se obter uma circulação periódica, a partir da qual foi calculada a circulação residual. O escoamento e os processos de mistura foram visualizados a partir do deslocamento de traçadores lagrangeanos, cujo deslocamento foi seguido durante 2 dias. Estes traçadores facilitam a visualização das trocas entre as diferentes regiões da Ria e o oceano. Para simular as distribuições de salinidade o modelo foi executado a partir do mesmo ponto durante 30 dias, período suficientemente longo para garantir uma solução independente das condições iniciais. Os resultados são apresentados nas secções que se seguem.

5.7.5.1 **Campos de velocidade**

A Figura 130 mostra uma distribuição de velocidades em vazante. As velocidades são máximas nos canais principais, nomeadamente no canal de S. Jacinto - Ovar, no canal da cidade e na extremidade norte do canal de Ílhavo. Nestes canais assim como no canal da barra as velocidades instantâneas durante a vazante podem ser superiores a 1 ms^{-1} . Na restante área da Ria as velocidades são em geral muito baixas. Na região costeira as correntes de maré são também relativamente baixas, excepto na região muito próxima da embocadura, onde as velocidades aumentam

por acção do jacto de vazante. Na Figura 131 mostram-se as velocidades em enchente. O cenário é muito semelhante ao descrito para a vazante, circulando a água em sentido contrário.

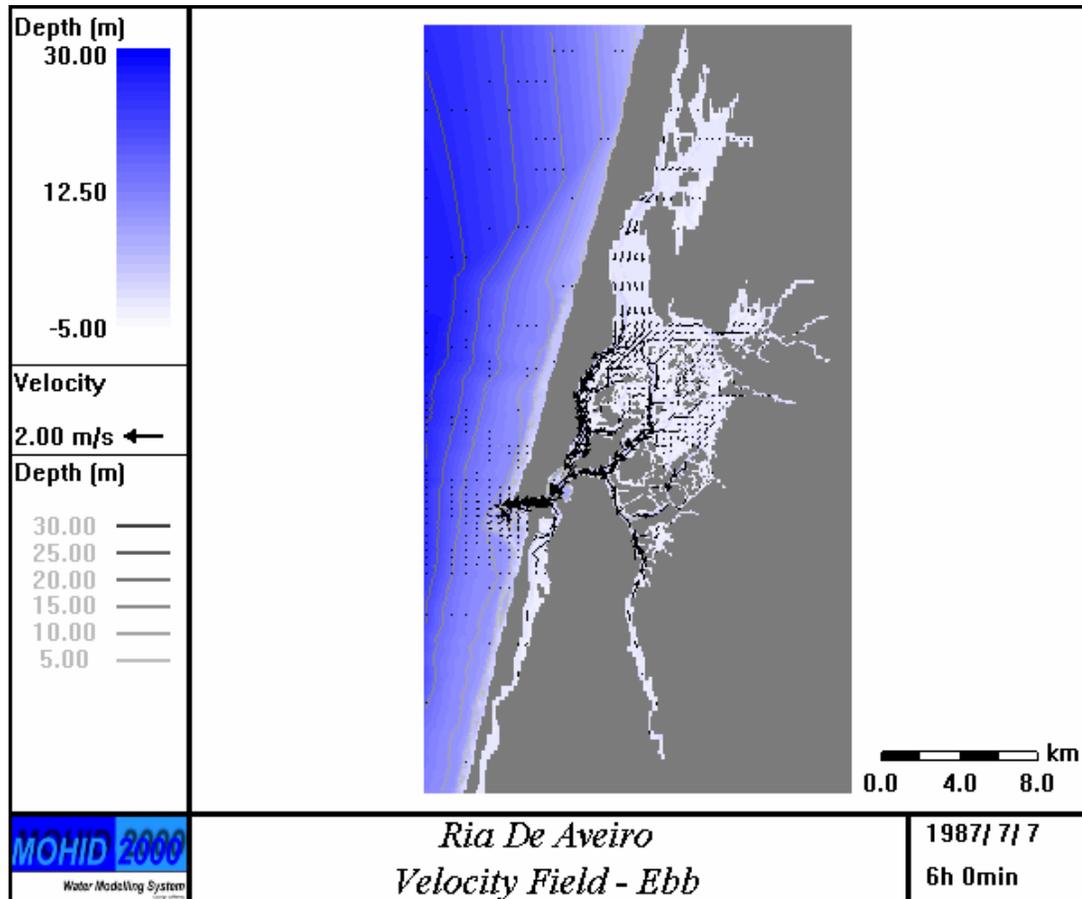


Figura 130: Distribuição de velocidades durante a vazante.

Na Figura 132 estão representadas as velocidades residuais calculadas integrando as velocidades instantâneas no tempo. A velocidade residual calculada deste modo não tem divergência nula. Ela dá o sentido preferencial do deslocamento dos sedimentos sobre o fundo. Os valores máximos ocorrem nos canais mais profundos, onde as velocidades instantâneas são também máximas. Duma forma geral as velocidades residuais são no sentido do oceano mostrando que a assimetria da maré é essencial em termos de transporte de sedimentos sobre o fundo. Junto à embocadura existem pequenos vórtices, mas o escoamento é preferencialmente de saída. A Figura 133 mostra os fluxos residuais obtidos por integração temporal do produto da velocidade pela profundidade (fluxo volúmico por unidade de largura). Esta figura mostra distribuições semelhantes, mas põe em evidência o papel dos canais no transporte de massa. Embora as velocidades residuais possam ser

elevadas nas zonas de baixa profundidade, os fluxos residuais nessas zonas são baixos.

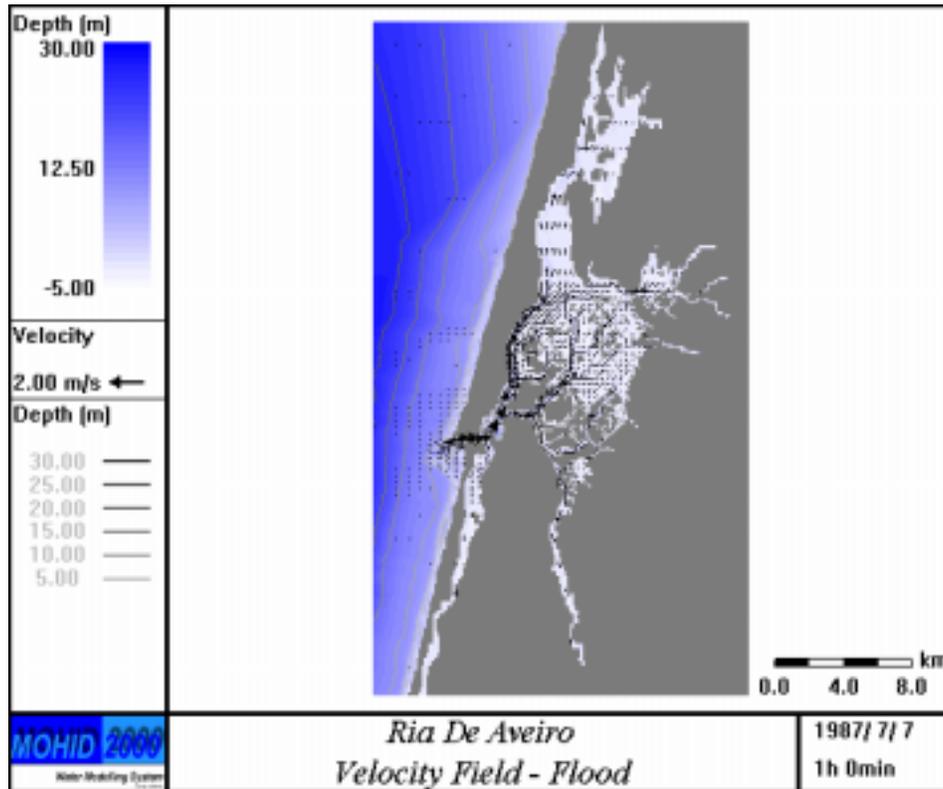


Figura 131: Distribuição de velocidades durante a enchente.

5.7.5.2 Salinidade

O facto de os rios que desaguam na Ria de Aveiro possuírem caudais relativamente baixos implica que a distribuição de salinidade na Ria tenha gradientes baixos, com excepção das zonas próximas das desembocaduras dos rios. De facto a Figura 135 e a Figura 136, mostram que somente o Vouga faz sentir a sua influência a alguma distância do seu ponto de encontro com a Ria. O Mira e o Boco fazem sentir a sua influência ao longo dos canais de Mira e Ílhavo, respectivamente, mas não atingem o corpo central da Ria. Nas zonas próximas da embocadura as salinidades sofrem oscilações muito num ciclo de maré (~0.5 psu).

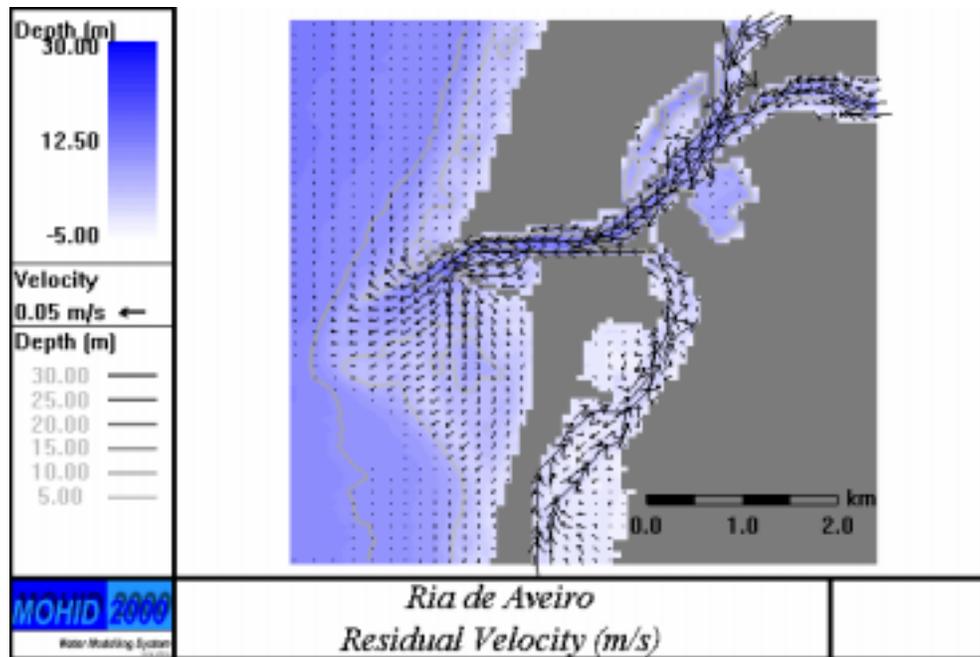


Figura 132: Distribuição de velocidades residuais obtidas por integração da velocidade instantânea.

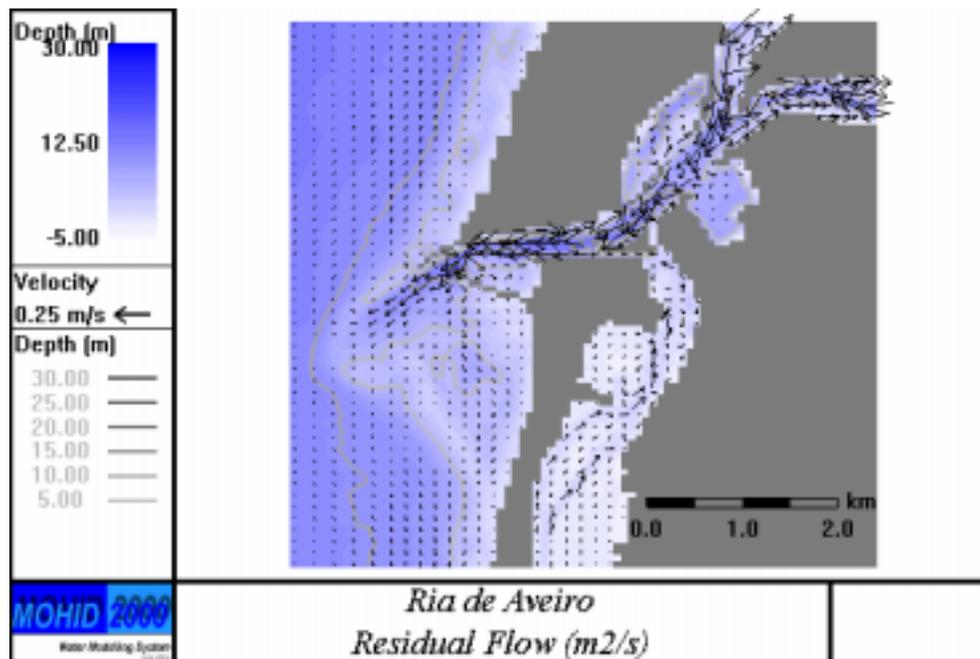


Figura 133: Distribuição de fluxos residuais obtidos por integração do fluxo por unidade de largura.

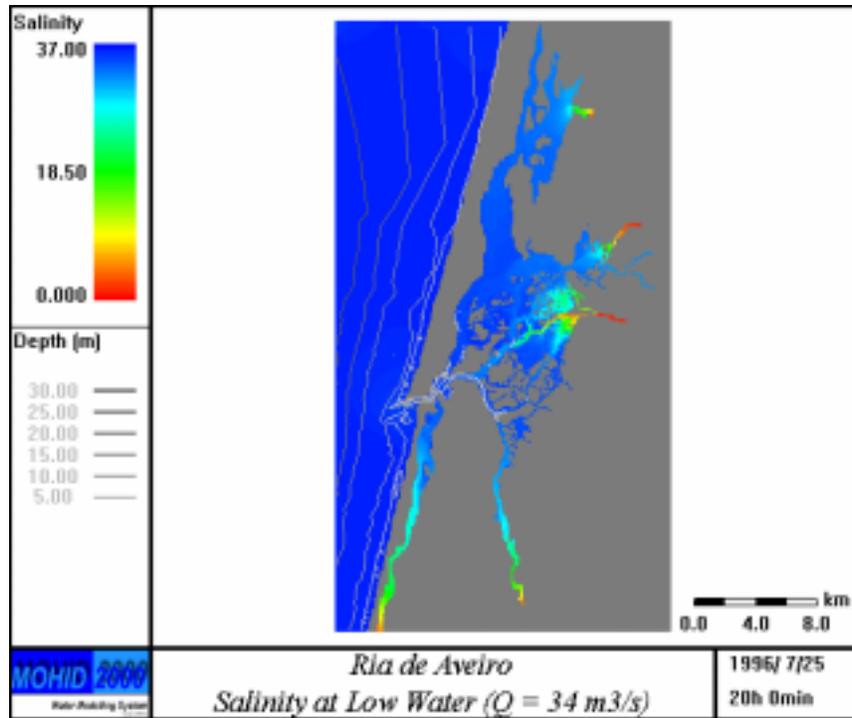


Figura 134: Distribuição de salinidade no final da vazante.

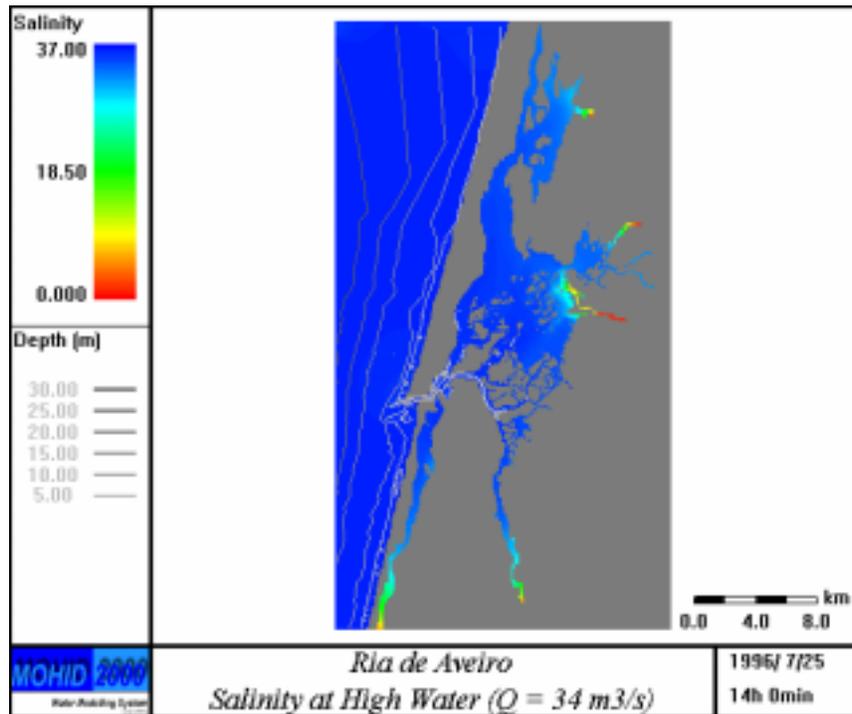


Figura 135: Distribuição de salinidade no final da enchente.

5.7.5.3 Traçadores Lagrangeanos

Para obter uma melhor visualização dos movimentos das massas de água bem como das trocas entre a ria e o oceano, utilizaram-se traçadores lagrangeanos. Os traçadores foram emitidos nas 7 caixas representadas na Figura 136.

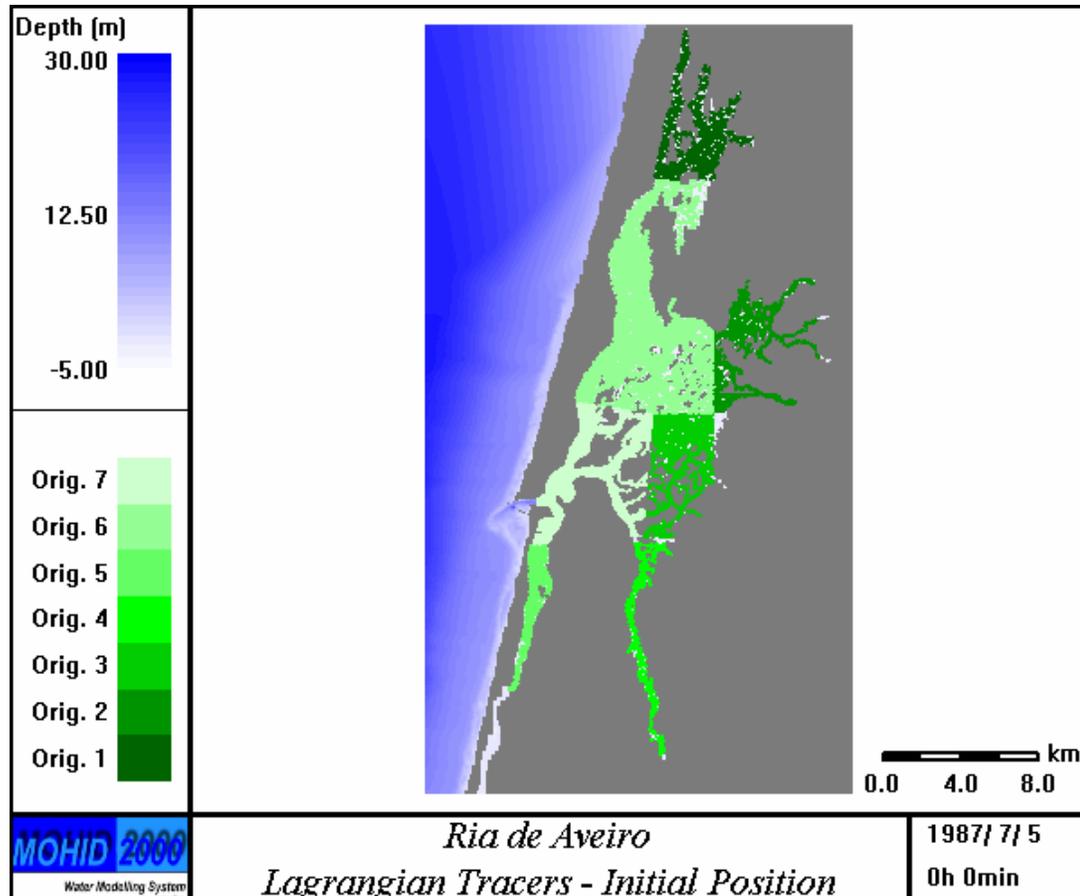


Figura 136: Distribuição inicial de traçadores na Ria de Aveiro pelas 7 caixas consideradas.

Os traçadores foram emitidos em preia-mar. A Figura 137 mostra a distribuição em 3 ciclos de maré mais tarde e a Figura 139 na baixa-mar seguinte. As Figuras mostram com clareza que os tempos de residência nos canais da zona Norte da Ria assim como no canal de Ílhavo são muito superiores a 2 dias. Os canais por onde se escoa a água descarregada por rios de maior caudal têm naturalmente menores tempos de residência. É o caso do canal da cidade e do canal de Mira. Este resultado é consistente com o facto de o modelo de transporte de salinidade requerer 1 mês de simulação para se obter uma solução periódica.

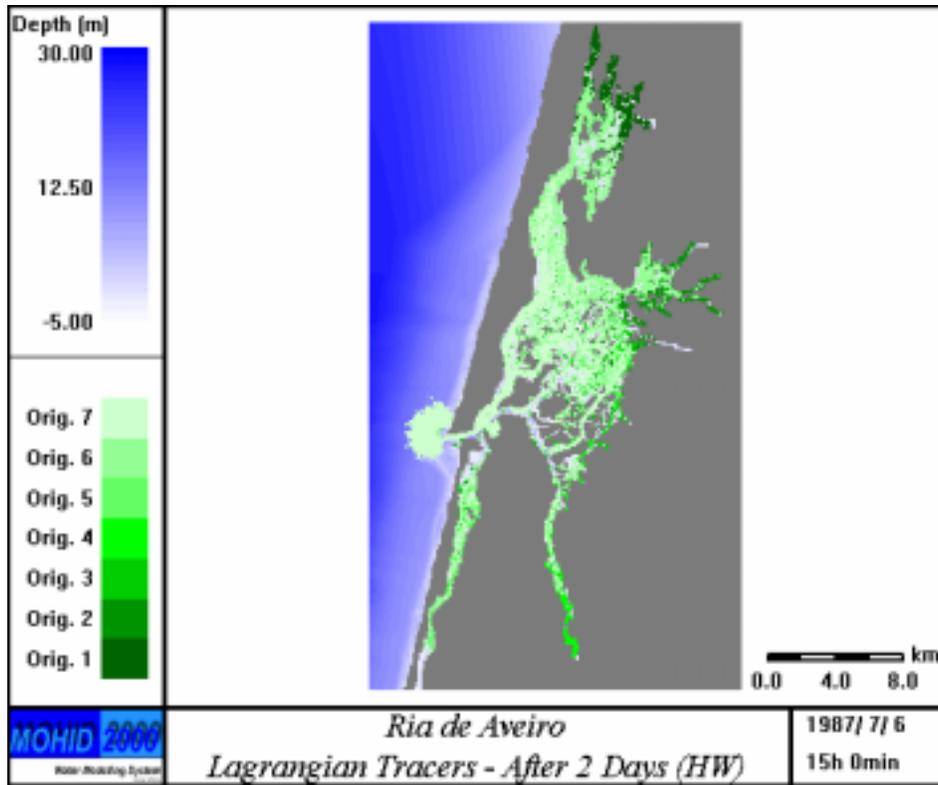


Figura 137: Posição dos traçadores no final da enchente, 39 horas após a libertação.

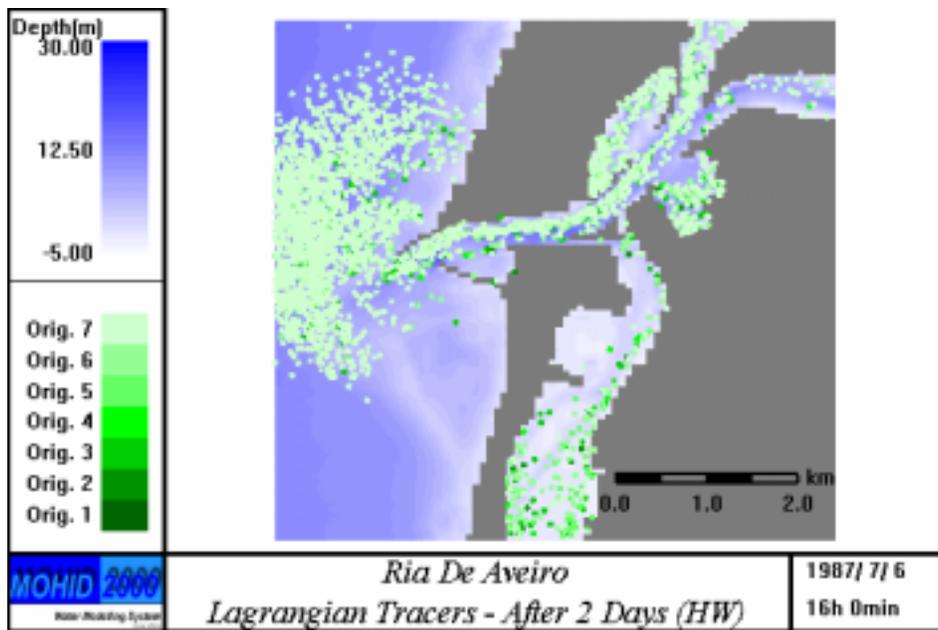


Figura 138: Detalhe da posição dos traçadores representados na Figura 137

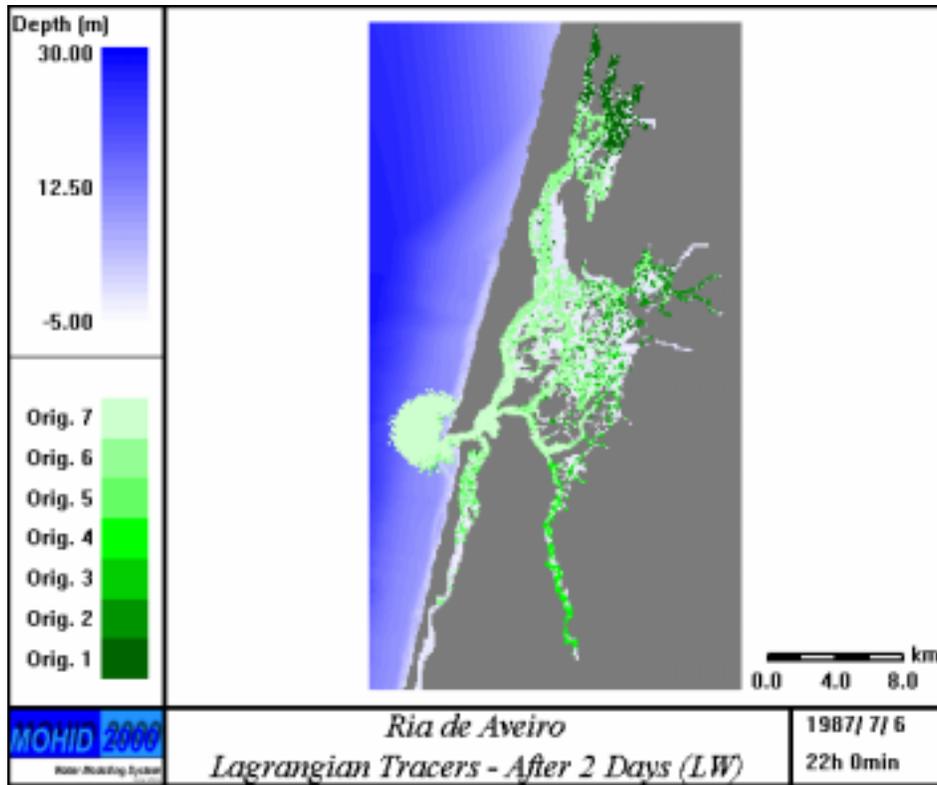


Figura 139: Posição dos traçadores no final da vazante, 46 horas após a libertação.

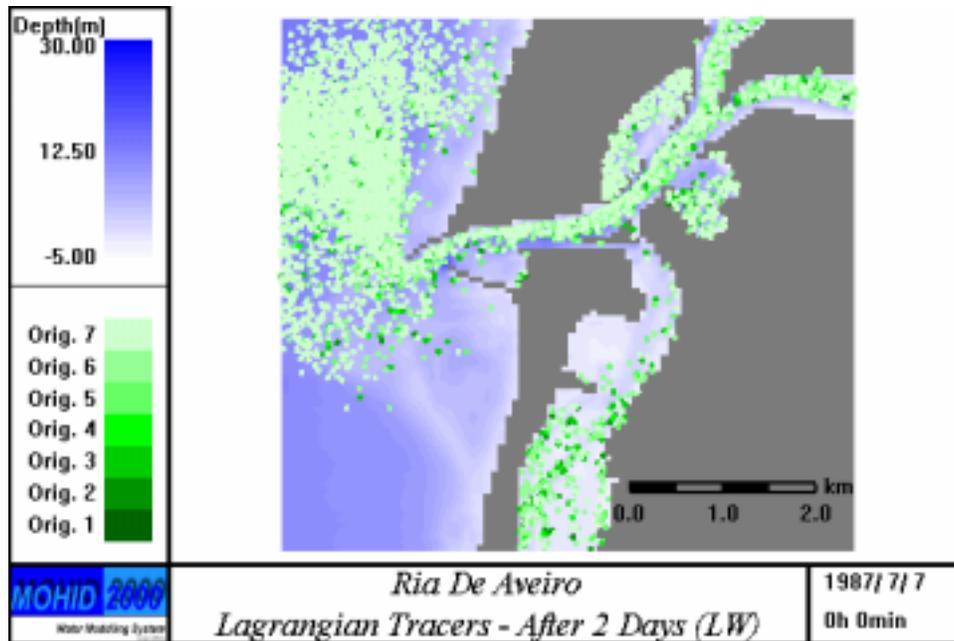


Figura 140: Detalhe da posição dos traçadores representados na Figura 139

5.7.6 Limite de Jusante

Os resultados mostram que os traçadores que saem da barra deslocam-se preferencialmente para norte, podendo parte deles voltar a entrar na enchente

seguinte, depois de se misturarem com água do mar (na ausência de escoamento litoral). As distribuições de salinidade mostram que na zona da embocadura a água é essencialmente água do mar. A circulação residual mostra que a água não volta a entrar sugerindo que este pode ser definido como o limite de jusante do estuário. Apesar de uma parte importante da água que sai da Ria poder reentrar, os valores elevados da salinidade e o facto de a situação normal nesta zona ser a existência de uma corrente litoral que afasta da embocadura o material que sai em vazante, o limite de jusante do estuário deve ser definido como a linha mais curta que une os extremos dos molhes (Figura 141), definidos pelos pontos com as seguintes coordenadas geográficas:

Pontos	Latitude (N)	Longitude (O)
1	40° 38' 40"	8° 45' 42"
2	40° 38' 36"	8° 45' 24"

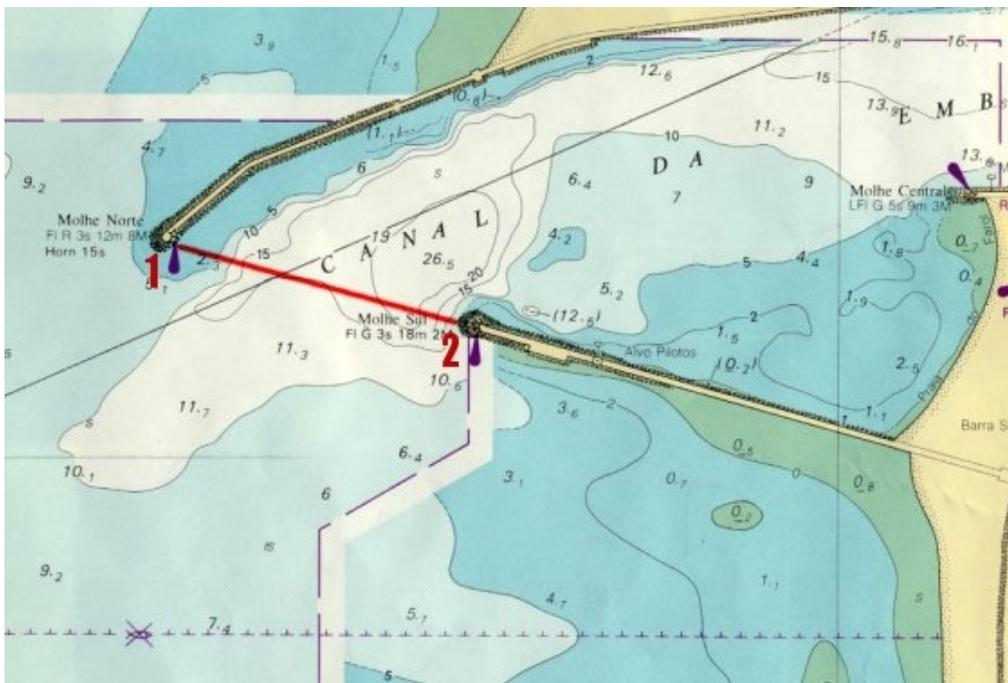


Figura 141: Limite de jusante do estuário.

5.8 ESTUÁRIO DO MONDEGO

5.8.1 Introdução

O Rio Mondego drena uma bacia hidrológica de cerca de 6670 km² na faixa costeira ocidental de Portugal. O estuário do Mondego - Figura 142- tem uma área de 3.4 km², uma profundidade média de cerca de 2 metros e uma profundidade típica de cerca de 4, nas zonas subtidais. A deposição de sedimentos na zona de jusante levou à formação de uma ilha que individualiza dois braços – braço Norte e braço Sul – cerca de 7 km de comprimento. O braço Norte com profundidades máximas de 10 m é o mais profundo e mais dinâmico. O Canal Sul está particularmente assoreado nas zonas de montante. Como consequência das diferenças morfológicas, propagação muito diferente nos dois canais, podendo o nível atingir os 5 metros em preia-mar no canal norte, enquanto que no canal sul não ultrapassa os 4 (Marques, 1990).

O nível da maré na embocadura tem uma variação idêntica à de outros estuários Portugueses, variando entre 0.35 e 3.3 metros, com uma semi-amplitude média da ordem de 1 metro. O caudal médio do rio são 79 m³/s. Em anos húmidos o caudal médio pode ultrapassar os 140 m³/s e em anos secos pode ser inferior a 27 m³/s. Os tempos de residência foram estimados em 2 dias no braço Norte e são um pouco superiores no braço Sul. A Tabela 2 resume as características físicas do Estuário do Mondego.

Tabela 2: Síntese dos parâmetros físicos do estuário do Mondego

Parâmetro físico	Valor
Comprimento e largura (km)	10 ; 0.3
Área (km ²)	3.4
Profundidade média (m)	2
Variação do nível de maré (m)	0.35 – 3.3
Área da bacia hidrográfica (km ²)	6670
Caudal do rio (m ³ /s)	270
Tempo de residência (dias)	2
Temperatura (°C) (máximo e mínimo anuais)	7 – 32

5.8.2 Dados de campo

Os dados que existem não permitem a caracterização exaustiva do estuário. Eles são no entanto suficientes para implementar o modelo e para o verificar.

5.8.2.1 Batimetria

A informação batimétrica utilizada é proveniente das cartas hidrográficas de levantamentos efectuados em 1995 e 1996 pela Direcção Geral de Portos e de informação cedida pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC). A Figura 142 mostra a batimetria usada pelo modelo na zona do baixo estuário e na plataforma exterior. A figura mostra também a localização dos pontos para os quais são apresentados resultados do modelo na forma de séries temporais. Na figura são visíveis as maiores profundidades no braço norte do estuário e o assoreamento do canal sul na zona de montante, responsável pelas menores caudais e velocidades neste canal.

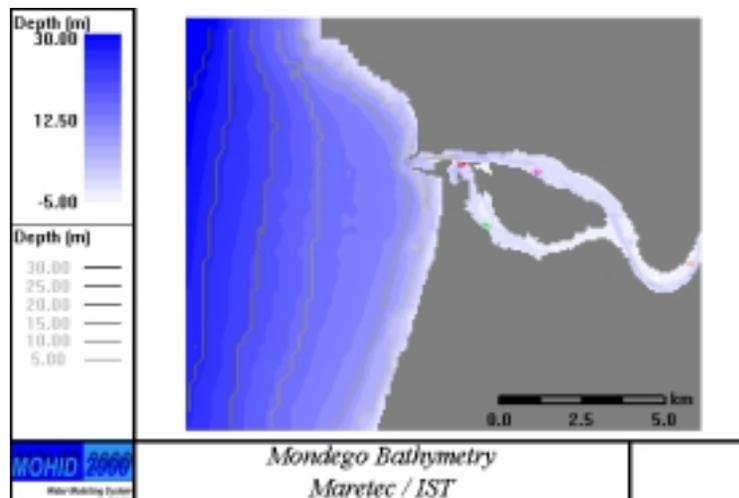


Figura 142: Batimetria do Mondego e localização dos pontos para o qual são apresentados resultados do modelo na forma de séries temporais.

5.8.2.2 Níveis de maré e salinidades

Níveis de maré e salinidades estão disponíveis nos pontos três pontos mais próximos da barra representados na Figura 142 (campanhas de medida da FCTUC, Marques, 1990) e salinidades nos dois pontos dos canais norte e sul. O ponto 1 situa-se perto da barra do rio, na zona dos estaleiros navais. Os pontos 2 e 3 estão situados respectivamente no braço norte e sul. Para o ponto 4 a montante da bifurcação são também apresentados resultados do modelo. As medições foram efectuadas em situação de Verão (Julho de 1989) e de Inverno, em Dezembro do mesmo ano. As medidas efectuadas nestes pontos são comparadas com os resultados do modelo no parágrafo seguinte.

5.8.3 Modelação

5.8.3.1 Considerações gerais

Foi estabelecido o modelo hidrodinâmico do estuário com base no módulo de hidrodinâmica tridimensional, MOHID 2000. Este modelo resolve as equações primitivas, usando um algoritmo semi-implícito, baseado em volumes finitos, e permite a simulação de escoamentos produzidos por diferentes agentes forçadores (maré, o vento densidade). Com este modelo foi simulado o escoamento e o transporte de salinidade em condições de maré e caudal do rio médios. O escoamento e o tempo de residência foram visualizados usando traçadores lagrangeanos.

O modelo foi corrido considerando todas as componentes de maré disponíveis, de modo a gerar o escoamento de maré nos períodos para os quais estão disponíveis medidas (Julho e Dezembro de 1989).

5.8.3.2 Malha de cálculo

A malha de calculo tem passo variável entre os 20 e os 100 metros, com um total de cerca de 42000 pontos. O passo espacial menor é usado na zona da embocadura e da parte inferior do estuário onde a batimetria é mais complexa e são esperados maiores gradientes de velocidade. O passo espacial aumenta gradualmente para o interior do estuário, em direcção ao rio e para o exterior em direcção ao oceano.

5.8.3.3 Verificação do modelo

O modelo foi verificado usando as medidas de níveis e de salinidades nos 4 pontos apresentados na Figura 142. As Figuras 144 até à Figura 148 apresentam comparações entre os valores medidos e calculados naqueles pontos.

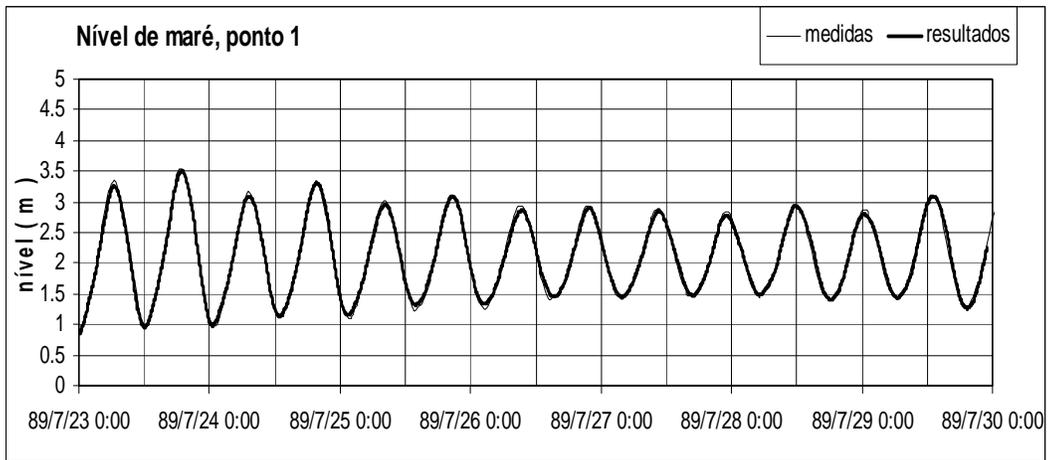


Figura 143: Comparação entre níveis medidos calculados no ponto 1 (ponto mais próximo da embocadura na Figura 142). Situação de Julho de 1989.

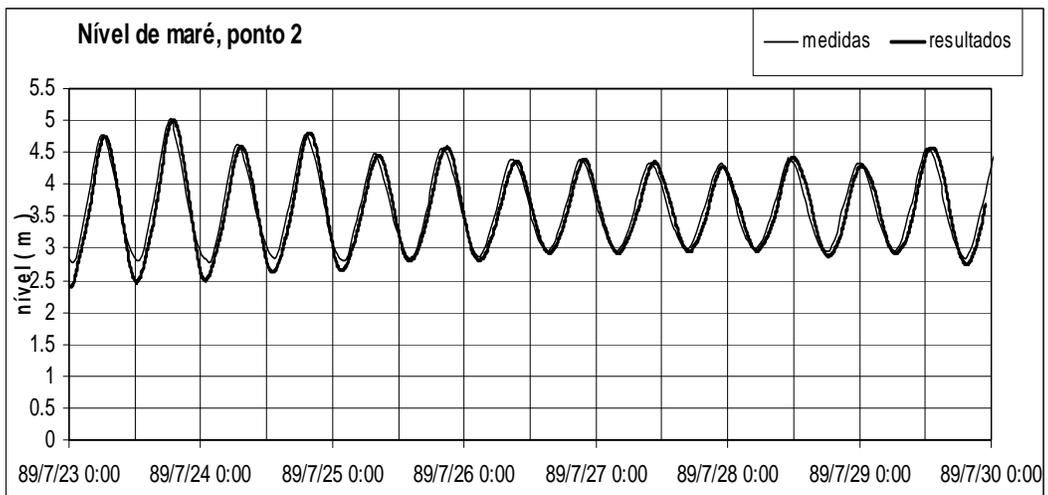


Figura 144: Comparação entre níveis medidos calculados no ponto 2 (ponto no braço Norte na Figura 142). Situação de Julho de 1989.

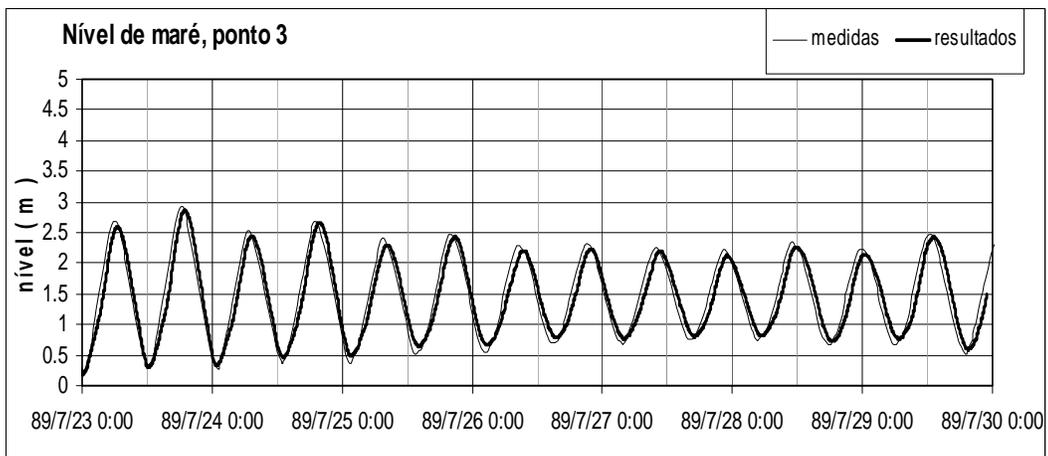


Figura 145: Comparação entre níveis medidos calculados no ponto 3 (ponto no braço sul na Figura 142). Situação de Julho de 1989.

As figuras mostram que os resultados das simulações comparam bem com os valores medidos em todos os pontos, quer em maré viva, quer em maré morta. As comparações são feitas com os dados em bruto, que incluem o efeito de todos os agentes forçadores. Pequenos desvios em alturas específicas podem ser atribuídas a esse facto. As séries temporais medidas são no entanto insuficientes para fazer uma análise harmónica para extrair o escoamento devido exclusivamente à maré. A comparação com os dados em bruto tem no entanto a vantagem de mostrar que a maré efectivamente o principal agente forçador do escoamento.

A salinidade foi simulada usando o módulo de transporte euleriano do sistema MOHID2000. Nesta simulação foi resolvido explicitamente o transporte horizontal e implicitamente o vertical. A discretização espacial pode usar diferenças centradas, upwind ou Quick. Nestas simulações foi usado o método upwind, tirando partido do facto de a malha ter passos muito finos (20 metros na zona principal do estuário).

As salinidades calculadas são comparadas com as medidas efectuadas na situação de Verão. Os valores exactos do caudal do rio naquela altura não é conhecido, mas é da ordem de grandeza do usado nas simulações, $30\text{m}^3/\text{s}$. Os resultados são apresentados nas

Figura 146 à Figura 148. As figuras mostram boa concordância no canal principal (norte) e no canal sul. No canal sul a amplitude da variação da salinidade é muito baixa, pondo em evidência as baixas velocidades neste canal. Os resultados mostram que a repartição de caudais entre os canais simulada pelo modelo está de acordo com as medidas.

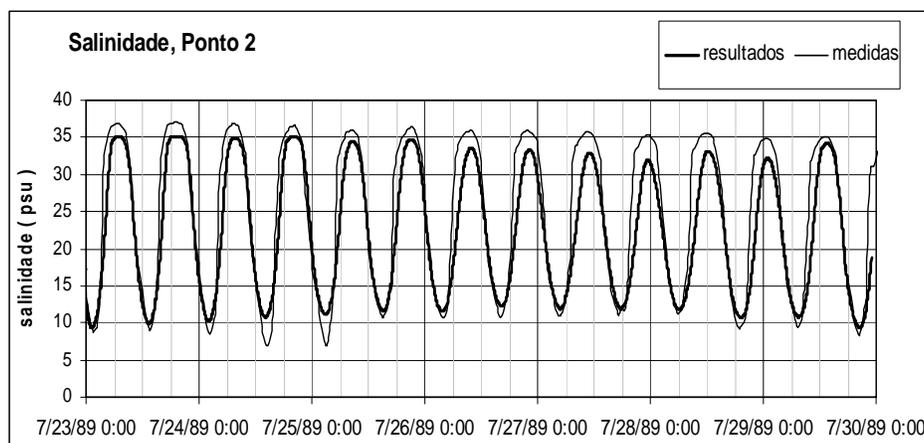


Figura 146: Comparação entre as medidas de salinidade e resultados do modelo no ponto. 2 da Figura 142 (ponto no braço norte).

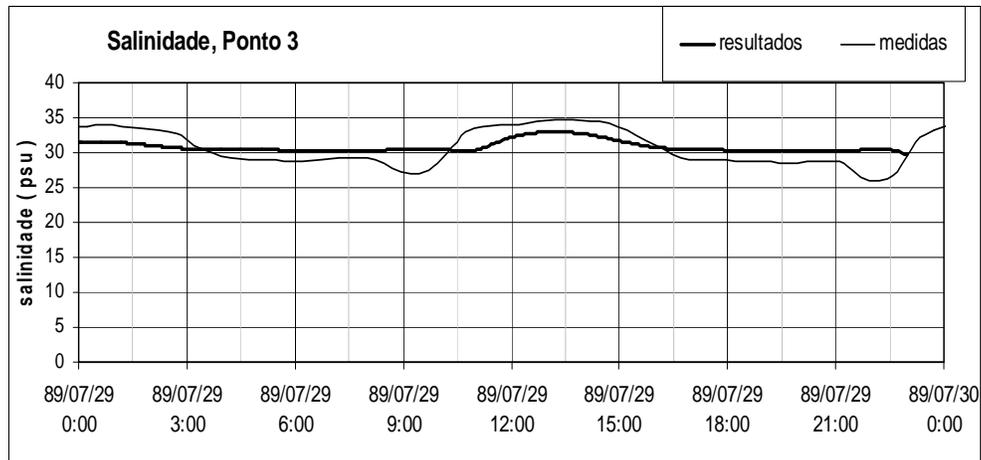


Figura 147: Comparação entre as medidas de salinidade e resultados do modelo no ponto. 1 da Figura 142 (ponto mais próximo da embocadura).

A Figura 148 mostra séries temporais nos quatro pontos indicados na Figura 142. A análise da figura mostra que nestas condições de caudal o ponto 4 é aproximadamente o limite de penetração da cunha salina.

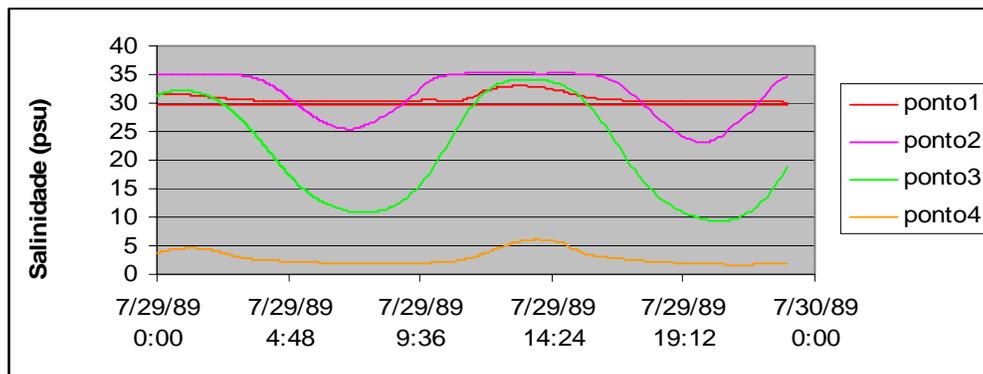


Figura 148: Séries temporais de salinidade nos quatro pontos indicados na Figura 142.

5.8.3.4 Hidrodinâmica do estuário

A Figura 149 e a Figura 150 mostram os escoamentos em vazante e em enchente respectivamente e põem em evidência as diferenças de velocidades entre os dois canais, com velocidades muito mais intensas no canal norte. As salinidades medidas e calculadas mostram evoluções que põem em evidência as consequências no transporte desta assimetria do escoamento.

A Figura 149 mostra também o jacto de vazante típico dos estuários sujeitos a maré e com embocaduras estreitas. Este jacto é o principal responsável pelo escoamento residual apresentado na Figura 151. As velocidades instantâneas ultrapassam 1 m/s e as velocidades residuais os 10 cm/s.

O escoamento residual mostra o jacto de saída, os dois vórtices associados e a deflexão para norte e um vórtice intensa na bacia artificial construída na embocadura para proteger o porto de pesca localizado no interior do estuário. A intensidade deste jacto (que está associada ao estrangulamento da embocadura) dificulta a reentrada da água de vazante no estuário, sendo o principal responsável pela rápida renovação da água no seu interior.

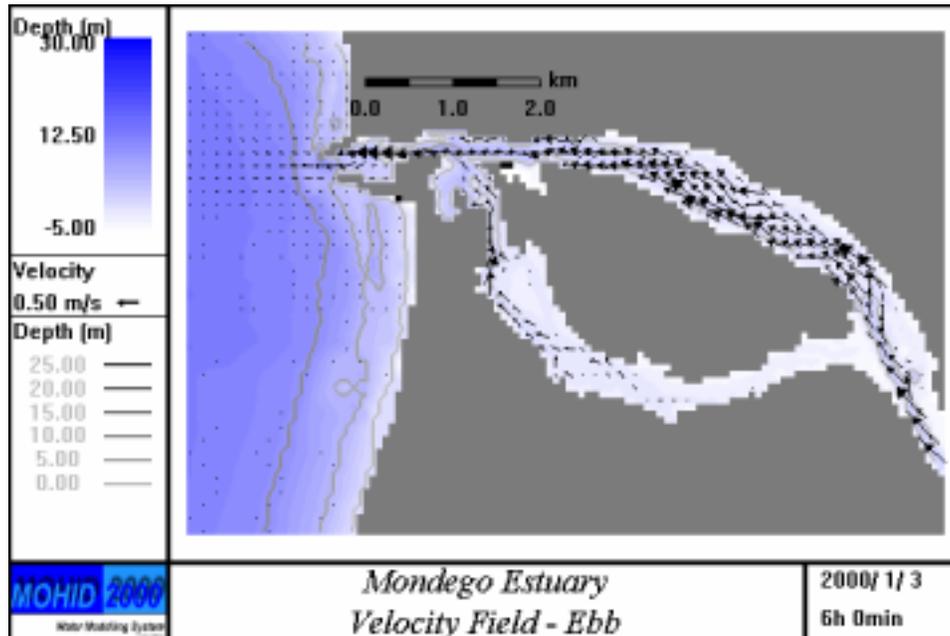


Figura 149: Campo de velocidades na vazante (caudal de $79 \text{ m}^3/\text{s}$, maré média).

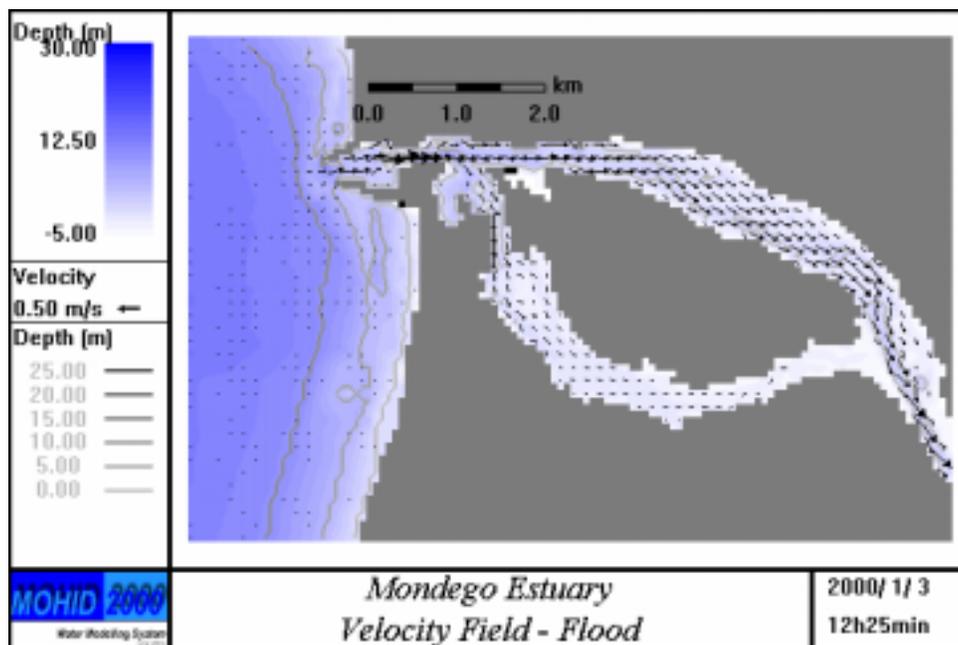


Figura 150: Campo de velocidades na enchente (caudal de $79 \text{ m}^3/\text{s}$, maré média).

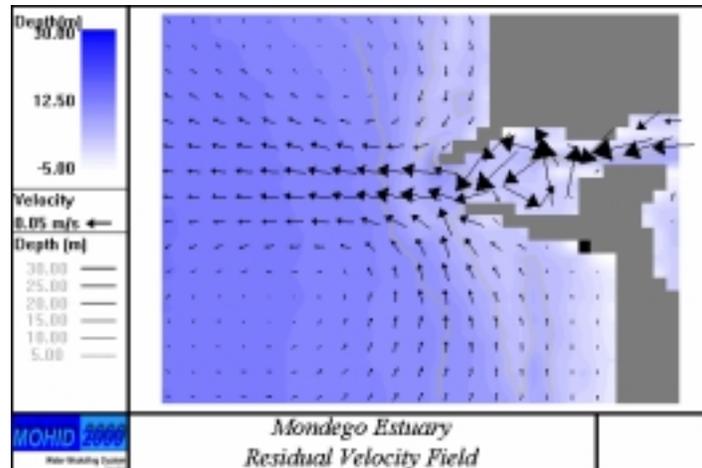


Figura 151: Campo das velocidades residuais na zona da embocadura (caudal de $79 \text{ m}^3/\text{s}$, maré média).

5.8.3.5 Distribuições espaciais de salinidade

A Figura 152 e a Figura 153 apresentam distribuições espaciais de salinidade em vazante e em enchente numa situação em que o caudal do rio é $79 \text{ m}^3/\text{s}$ (caudal médio). As figuras mostram as diferenças de escoamento entre os canais norte e sul, com excursões de maré muito maiores no primeiro, o qual é quase completamente ocupado pela água doce em vazante. A figura referente à vazante põe também em evidência o jacto à saída e a de enchente mostra a assinatura da água doce deixada for a do estuário.

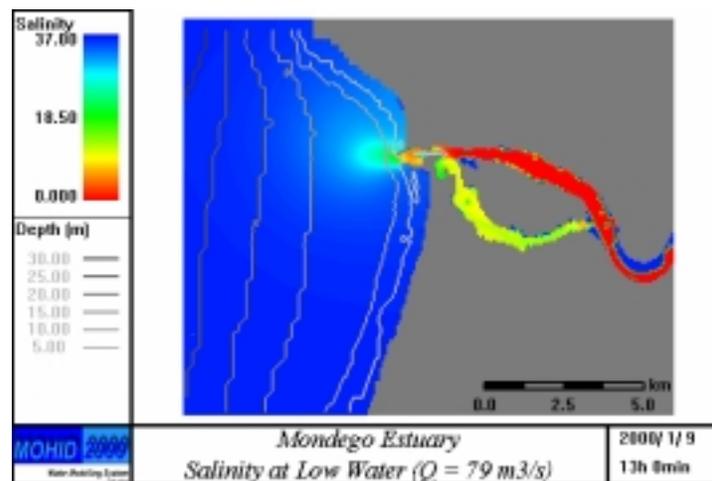


Figura 152: Campo de salinidade na vazante (caudal de $79 \text{ m}^3/\text{s}$, maré média).

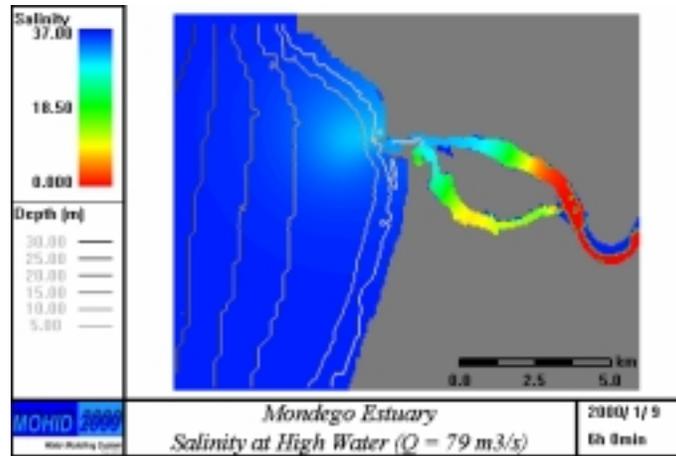


Figura 153: Campo de salinidade na enchente (caudal de $79 \text{ m}^3/\text{s}$, maré média).

5.8.3.6 Traçadores Lagrangeanos

Os traçadores lagrangeanos permitem visualizar o deslocamento das massas de água onde na qual foram emitidos. Os traçadores foram emitidos em preia-mar, em caixas que permitem identificar as grandes zonas do baixo estuário (canais norte e sul, embocadura). A Figura 154 mostra a localização inicial dos traçadores, a Figura 155 a localização em preia-mar dois dias depois da emissão e a Figura 156 na baixa-mar seguinte.

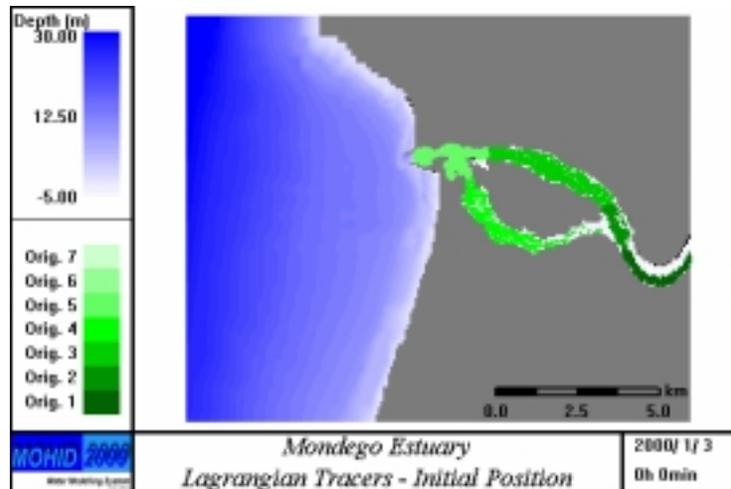


Figura 154: Posições iniciais dos traçadores lagrangeanos (em preia-mar).

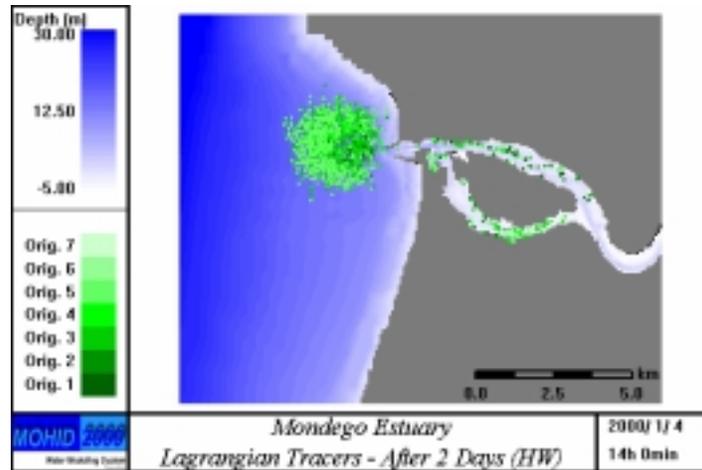


Figura 155: Posição dos traçadores após dois dias de simulação em preia-mar

As figuras põem em evidência os baixos tempos de residência da água no interior do estuário. As figuras mostram que, numa situação de caudal fluvial de $79 \text{ m}^3/\text{s}$, o tempo de residência da água no canal norte é da ordem de dois dias e no canal sul é superior. No Canal Norte, em preia-mar, dois dias depois da emissão ainda há alguns traçadores, mas na baixa-mar seguinte já não. Pelo contrário os traçadores existentes no canal sul têm um movimento oscilatório que com deslocamento residual pouco intenso.

Os traçadores que saem a barra não voltam a entrar no estuário. No caso destas simulações foi considerado só o escoamento de maré. Se se tivesse considerado o escoamento de deriva litoral, a probabilidade de virem a entra no estuário seria ainda inferior.

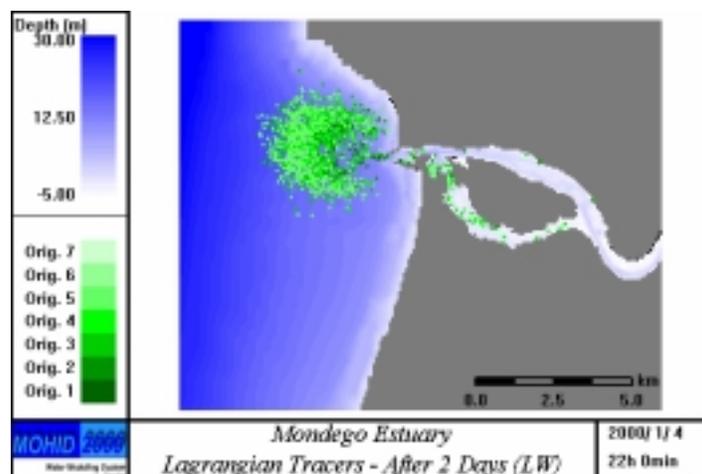


Figura 156: Posição dos traçadores após dois dias de simulação em baixa-mar

5.8.4 Limite a jusante

A hidrodinâmica do estuário e os processos de transporte que lhe estão associados mostram que a água que sai do estuário através da embocadura não volta a entrar, em consequência das fortes correntes de vazante devidas à pequena largura da barra artificial de protecção ao porto de pesca existente no interior do estuário.

Assim, o limite do estuário deve ser definido como a linha que une os dois molhes de protecção da embocadura. A jusante desta linha está a zona afectada pelo estuário (jacto de vazante) e as zonas através das quais a água entra no estuário, imediatamente a sul e a norte deste, junto a terra.

A Figura 157 mostra o limite jusante do estuário, a região afectada por este através do jacto de vazante e as zonas que mais o afectam durante a enchente. O limite pode ser definido pela linha que une os pontos com as seguintes coordenadas geográficas:

Pontos	Latitude (N)	Longitude (O)
1	40° 08' 38"	8° 52' 25"
2	40° 08' 30"	8° 52' 19"

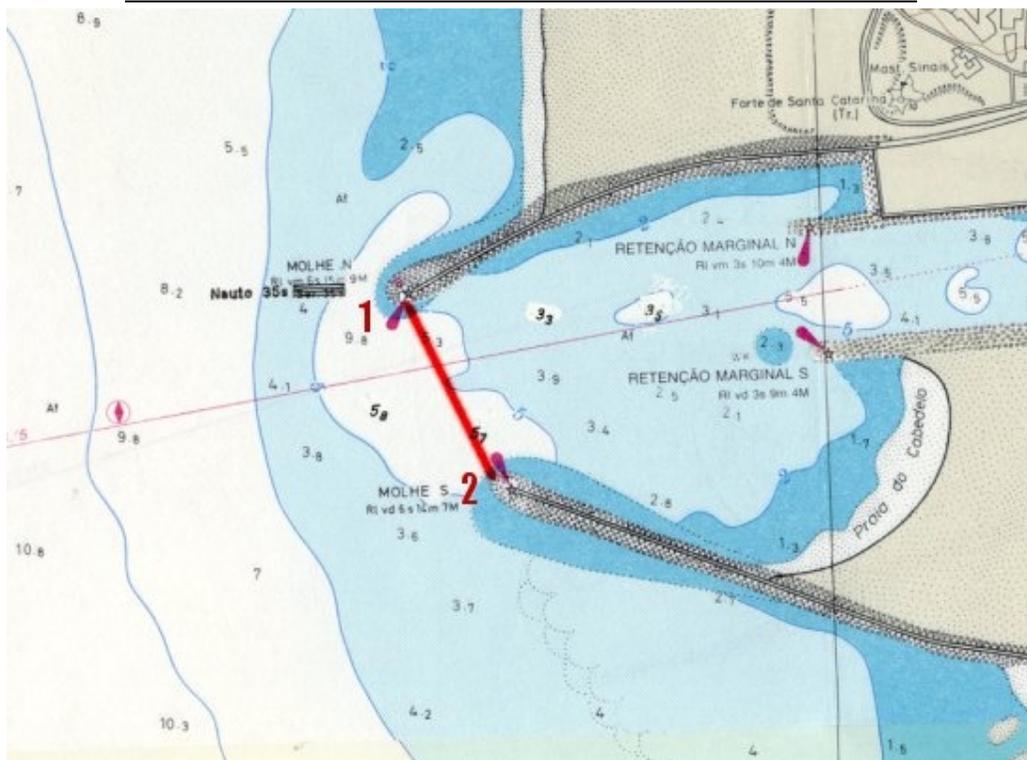


Figura 157: Limite jusante do estuário.

5.9 ESTUÁRIO DO SADO

5.9.1 Descrição do Estuário

5.9.1.1 Morfologia

O estuário do Sado - Figura 158 - possui uma área de aproximadamente 160 km² com um comprimento de 20 km e uma largura média de 8 km. A profundidade média é 8 m, sendo a máxima da ordem dos 50 m.

Do ponto de vista morfológico o estuário pode-se dividir em duas regiões de características distintas: o estuário propriamente dito e o Canal de Alcácer. A região do estuário propriamente dito apresenta uma topografia complexa, de acentuada curvatura, com extensas zonas de espraiados de maré e sapais a montante e dois canais a jusante separados por bancos de areia. Estes bancos de areia individualizam um canal Norte e um canal Sul com características hidrodinâmicas diferentes.

Os espraiados de maré e sapais de montante ocupam cerca de 1/3 do estuário e estão na sua grande maioria integrados na Reserva Natural do Estuário do Sado. Bem como a maioria do Canal de Alcácer e região envolvente, a qual é constituída essencialmente por zonas agrícolas e florestais. Nesta zona a pesca e a aquacultura são actividades económicas importantes. O rio Sado entra no estuário através do Canal de Alcácer, ao longo do qual a maré se propaga por cerca de 20 km.

A cidade de Setúbal, na margem norte, com cerca de cem mil habitantes e intensas actividades portuária e industrial é responsável por uma grande pressão antropogénica sobre o sistema. A margem Sul é constituída por dunas pouco povoadas, possuindo apenas algumas estruturas turísticas próximo da barra.

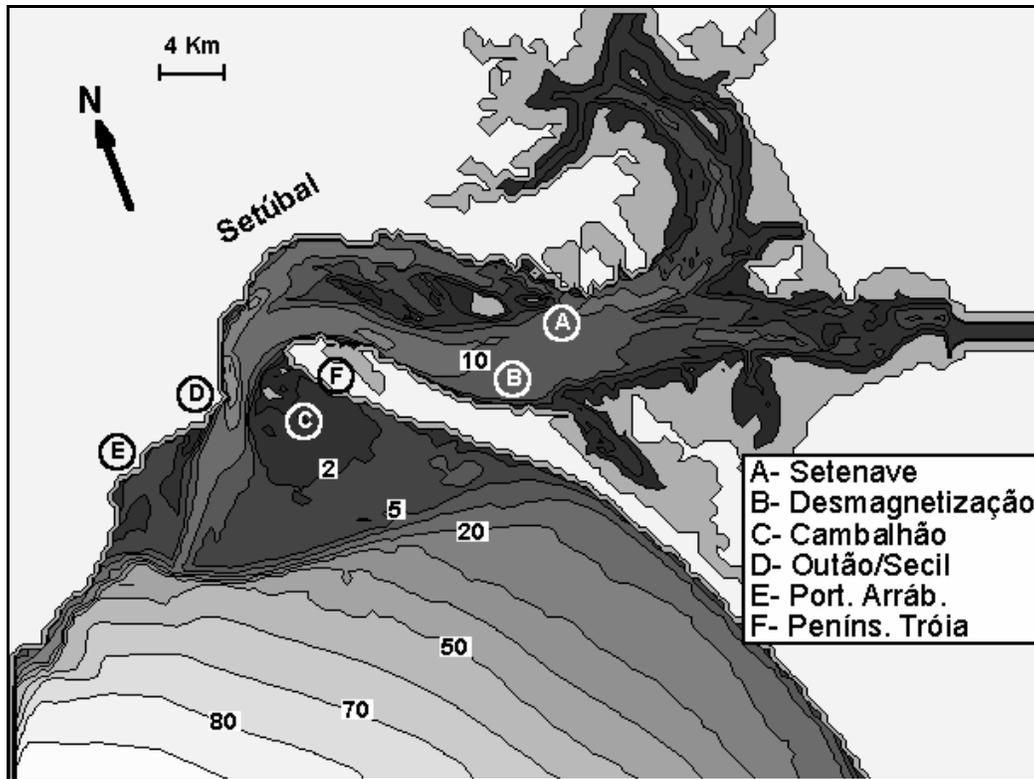


Figura 158: Batimetria do Estuário do Sado.

O escoamento é forçado principalmente pela maré. A maré é do tipo semi-diurno com alturas na barra que variam de 3.2 m em maré viva a 1.2 m em maré morta. O caudal médio anual do rio é de cerca de $40 \text{ m}^3/\text{s}$, apresentando forte variabilidade sazonal, com valores médios diários inferiores a $1 \text{ m}^3/\text{s}$ no Verão e superiores a $150 \text{ m}^3/\text{s}$ no Inverno, (Cabeçadas, 1993). O estuário pode ser classificado como fracamente estratificado segundo o critério de Hansen e Rattray (Ambar et al., 1980).

5.9.1.2 Dados de Campo e Calibração do modelo

O estuário tem sido objecto de diversos estudos caracterizadores (Wollast, 1978, 1979); (Ambar et al., 1980); (Ribeiro e Neves, 1982); (Neves, 1985). Estes estudos permitiram a caracterização geral das condições físicas do estuário, e fornecem dados para a calibração e validação do modelo hidrodinâmico e de transporte.

Na Figura 159 representam-se as direcções típicas das correntes de enchente e vazante em diversos pontos no interior do estuário (Ribeiro e Neves, 1982). Estes resultados mostram elevada concordância com os campos de velocidade instantânea obtidas com o modelo para as mesmas condições de maré (Figura 163 e Figura 164).

Na Figura 160 e na Figura 161 representam-se os campos de salinidade. A primeira figura apresenta medidas no início de enchente, em Junho de 1979 e a segunda no início da vazante, em Novembro. As figuras mostram que a parte principal do estuário se comporta como uma lagoa costeira, com salinidades sempre acima dos 28 ‰. Diagramas T-S apresentados por Wollast *et al* (1978) mostram duas rectas de diluição uma para o estuário principal e outra para o canal de Alcácer.

O modelo hidrodinâmico foi calibrado utilizando dados de elevação de sete marégrafos localizadas no interior do estuário e dados de velocidade de 6 estações (Ribeiro e Neves, 1982). Na Figura 162 compara-se uma série temporal de elevações para uma estação situada frente aos estaleiros da Setenave com os resultados do modelo. Tanto nesta como nas outras estações os resultados apresentam uma elevada concordância.

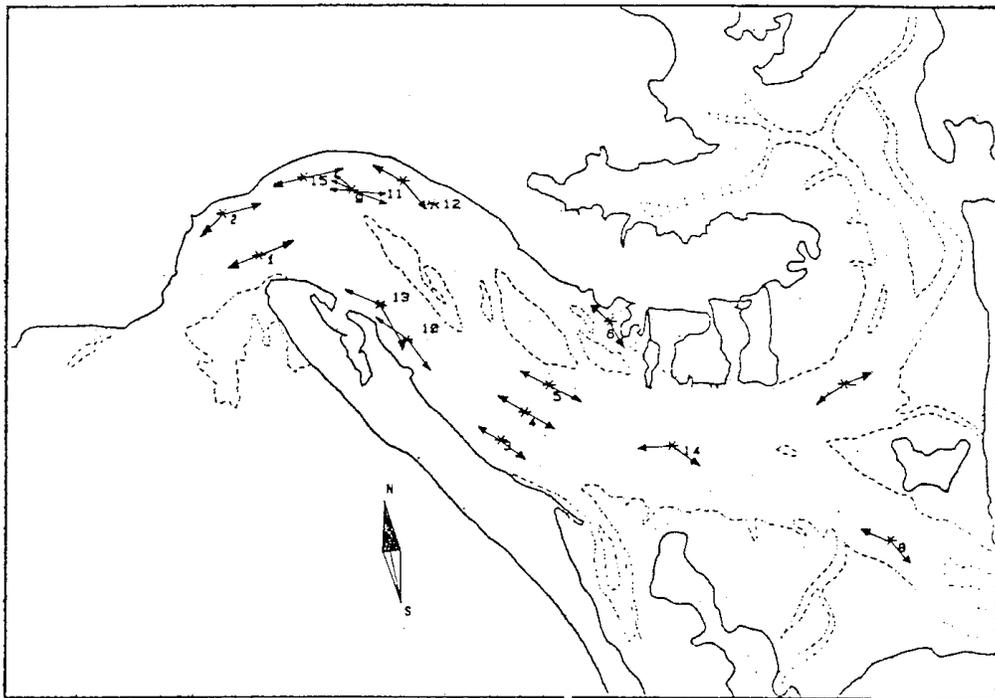


Figura 159: Direcções das velocidades em enchente e vazante nas estações de medida de Ribeiro e Neves, (1982)

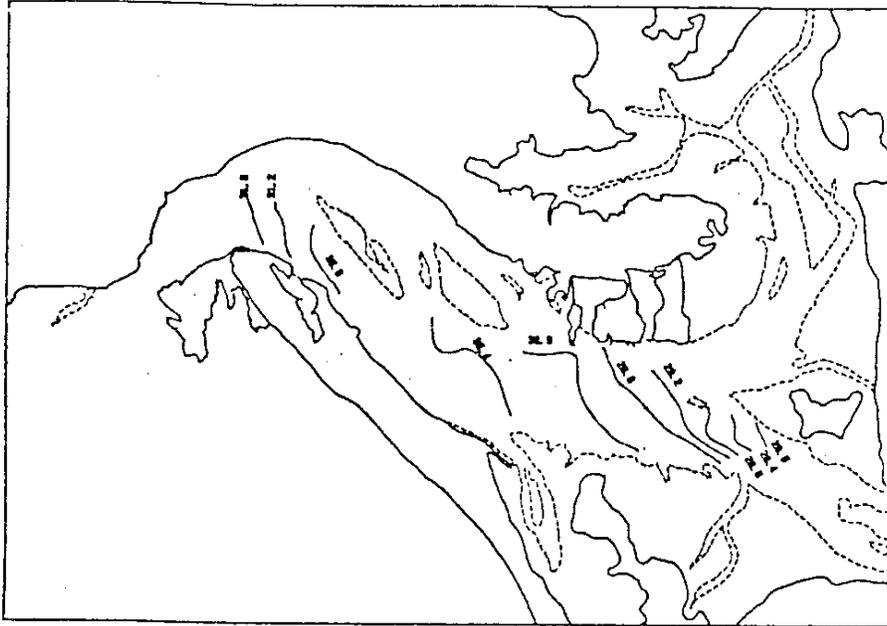


Figura 160: Isolinhas de salinidade no início da enchente, no mês de Junho 1979 (Ribeiro e Neves, 1982). Valores compreendidos entre 32‰ (junto à embocadura e 28 ‰à entrada do canal de Alcácer.

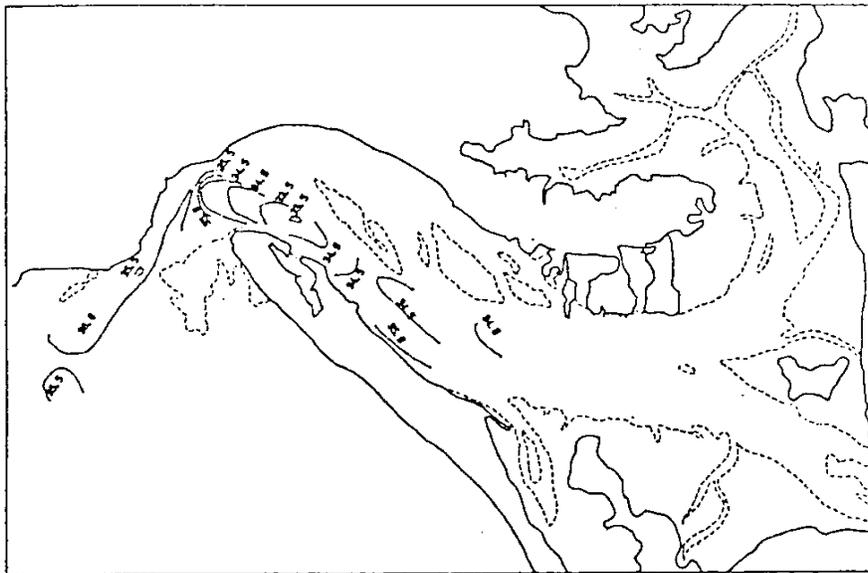


Figura 161: Isolinhas de salinidade no início da vazante, no mês de Novembro de 1979 (Ribeiro e Neves, 1982). Valores compreendidos entre 36 ‰ (no exterior) e 34.5 ‰ no interior do estuário.

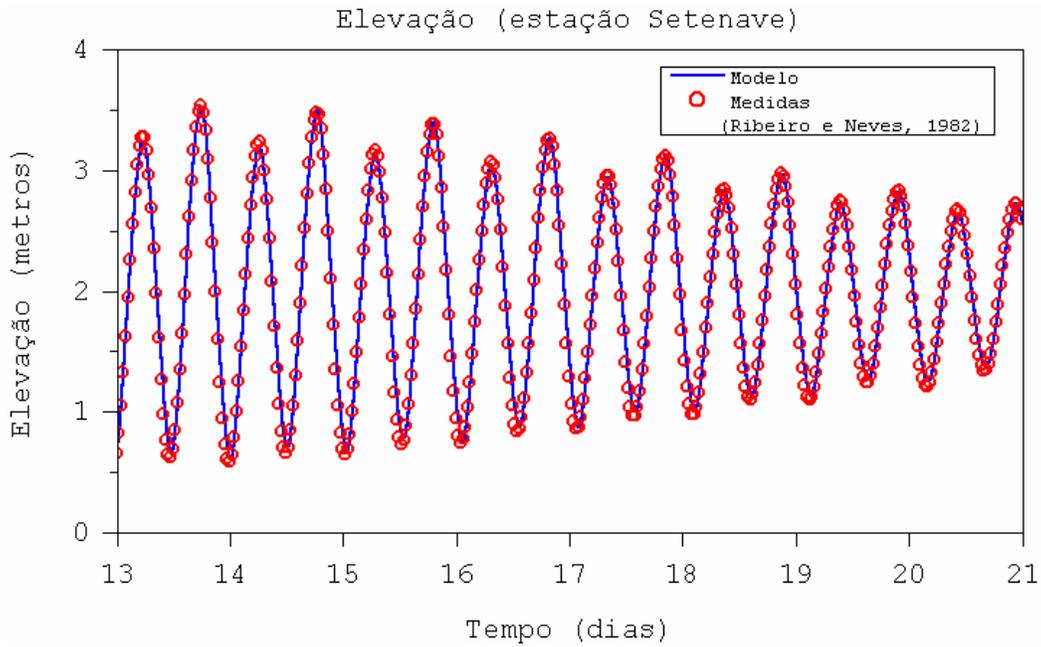


Figura 162: Calibração do modelo hidrodinâmico: comparação dos níveis para a estação ao largo da Setenave

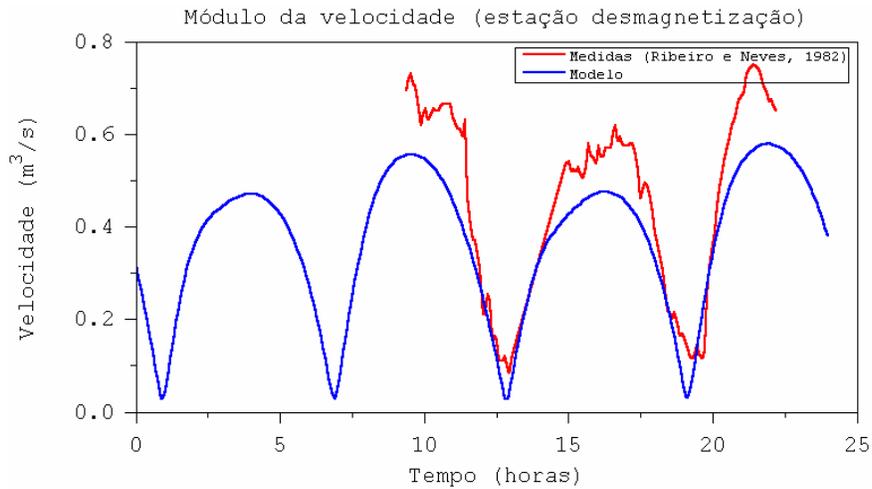


Figura 163: Calibração do modelo hidrodinâmico: comparação do módulo da velocidade para a estação da desmagnetização

Na Figura 163 compara-se o valor do módulo da velocidade para a estação da desmagnetização situada no canal Sul do lado da península de Tróia e um pouco a jusante da Setenave. Apesar da grande variabilidade e pequena duração dos registos os resultados numéricos aproximam-se das medidas tanto em ordem de grandeza como na previsão dos instantes de inversão de maré. As maiores velocidades das medidas podem ser atribuídas ao facto de o correntómetro medir

num ponto, enquanto que as medidas são valores médios para uma célula de cálculo (200x200 m²).

5.9.2 Resultados da Modelação

5.9.2.1 Hidrodinâmica

A modelação permitiu uma caracterização hidrodinâmica do domínio recorrendo a campos de velocidades instantâneas e a campos de velocidades residuais. Na Figura 164 apresenta-se um campo de velocidades em enchente e na Figura 165 e em vazante. No interior do estuário pode-se verificar que o escoamento se efectua alinhado com os canais principais (canal da Marateca a montante e canais Norte e Sul a jusante).

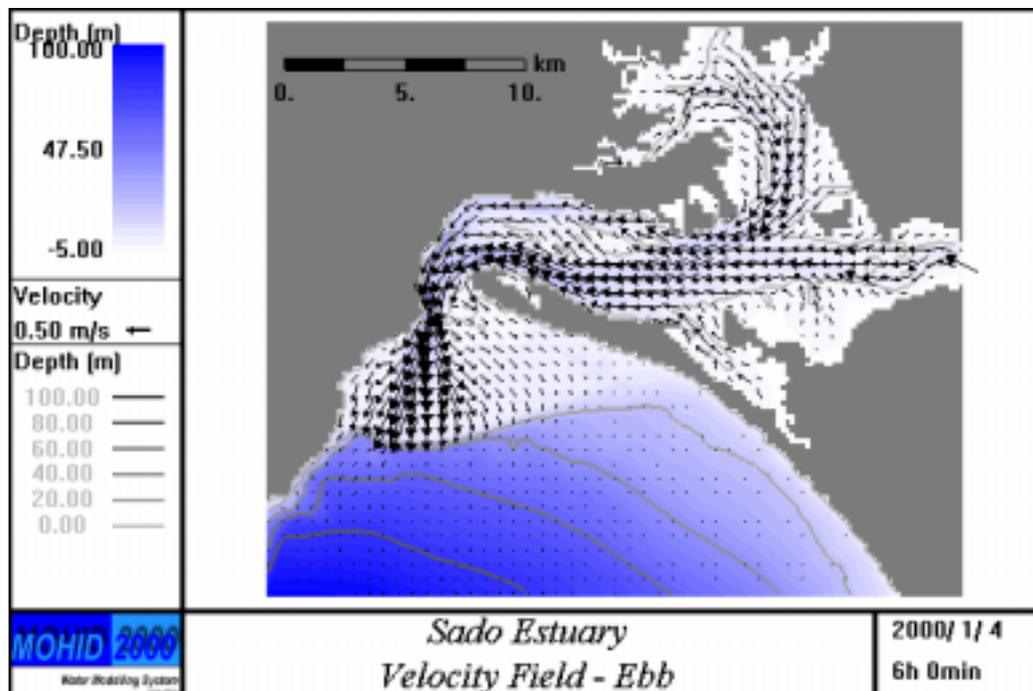


Figura 164: Campos de velocidades instantâneas no Estuário do Sado (Vazante)

Durante a vazante o escoamento efectua-se preferencialmente pelo canal Sul. A enchente inicia-se primeiro no canal Norte (com água de vazante do cana Sul) e só depois neste canal. Na região exterior à barra o escoamento de vazante caracteriza-se por um jacto intenso desenvolvendo-se para Este do canal de navegação e por uma região de divergência com menores velocidades a Este desse jacto englobando os bancos de areia do Cambalhão e a região ao largo das praias de Tróia. A Oeste do Jacto identifica-se também uma zona de menores velocidades na zona entre a Secil e o Portinho da Arrábida. Durante a enchente estas regiões de menores velocidades invertem primeiro o escoamento, passando a ter o sentido de enchente

enquanto na região do jacto, devido à maior inércia o escoamento se processa por mais tempo no sentido de vazante.

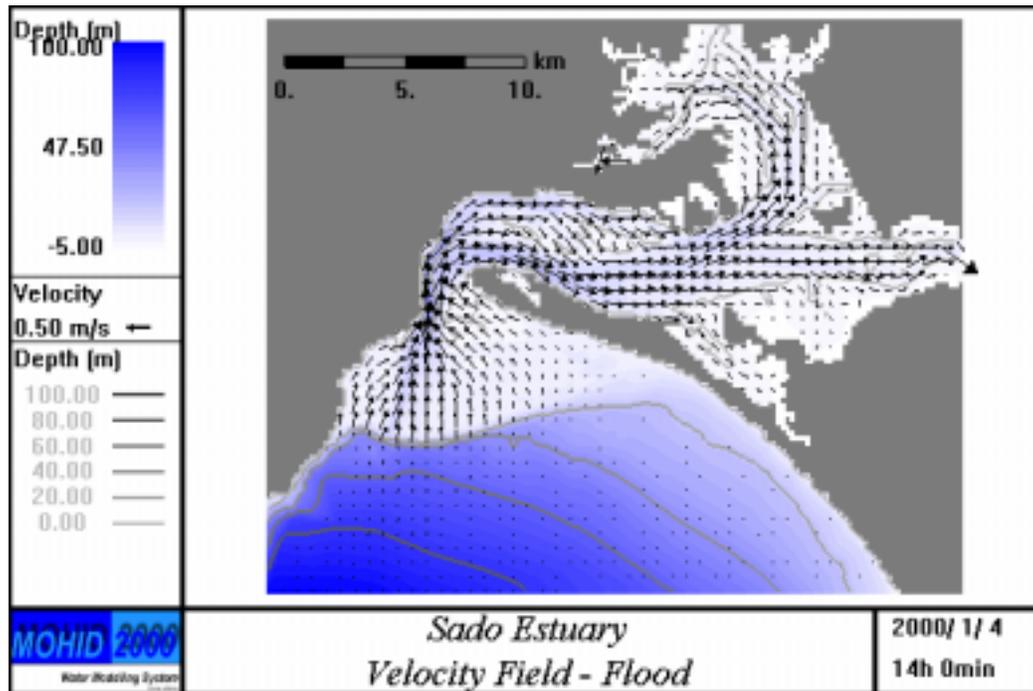


Figura 165: Campos de velocidades instantâneas no Estuário do Sado (Enchente)

O campo de velocidades residuais eulerianas foi calculado por integração dos campos de velocidades instantâneas durante um período maré viva - maré morta: Figura 166. O campo de velocidades residuais permite analisar os padrões de transporte de longo prazo.

Entre o canal Norte e Sul forma-se um vórtice residual com sentido anticiclónico que evidencia um escoamento preferencial pelo canal Sul durante a vazante e pelo canal Norte durante a enchente, pondo em evidência a tendência para que materiais que descem o canal Sul durante a Vazante entrem e subam o canal Norte durante a enchente seguinte. A sul deste vórtice forma-se um outro ciclónico que se estende até à entrada dos canais da Marateca e Alcácer (truncado na figura), com escoamento no sentido descendente a norte e no sentido ascendente a sul. Estes dois vórtices ocupam cerca de metade do estuário sendo responsáveis por tempos de residência elevados.

No canal de navegação forma-se um jacto e dois vórtices adjacentes. O vórtice ciclónico, localizado a Este, sobre a zona do Cambalhão é de maiores dimensões e apresenta maiores velocidades. Estes dois vórtices põem em evidência a entrada da água no estuário pelas zonas junto a terra. A água que sai do estuário forma um jacto junto à margem norte.

O padrão de circulação residual na região da embocadura do estuário do Sado é semelhante ao registado no estuário do Tejo. No interior da embocadura existe um vórtice anticiclónico e no exterior um jacto, com dois vórtices adjacentes. Este jacto abandona a região formando uma pluma junto à margem norte.

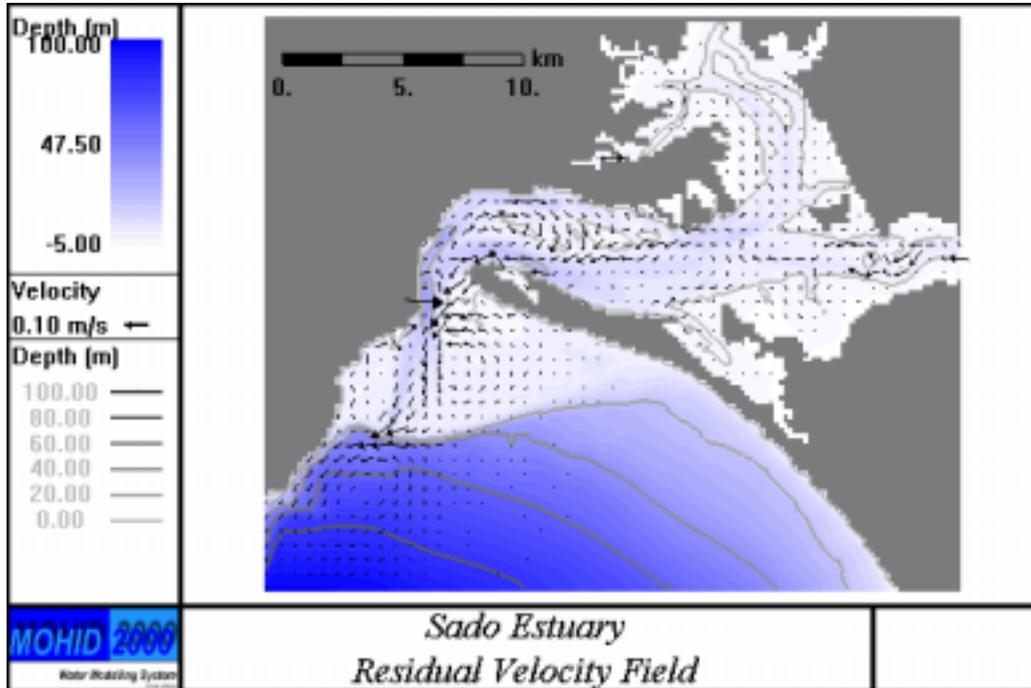


Figura 166: Campo de velocidades residuais para um período maré viva – maré morta

5.9.2.2 Salinidade

A salinidade é um traçador por excelência da proporção entre a água do mar e a água doce. A parte principal do estuário do Sado comporta-se efectivamente como uma lagoa costeira, com salinidades elevadas (cujo valor depende do caudal do rio). O caudal médio do Rio Sado é do tipo torrencial, com uma média anual da ordem dos $40 \text{ m}^3/\text{s}$, e valores muito baixos no Verão (da ordem de $1 \text{ m}^3/\text{s}$). A Figura 167 e a Figura 168 mostram distribuições de salinidade respectivamente em preia e em baixa-mar, num situação em que o caudal do rio era de $40 \text{ m}^3/\text{s}$.

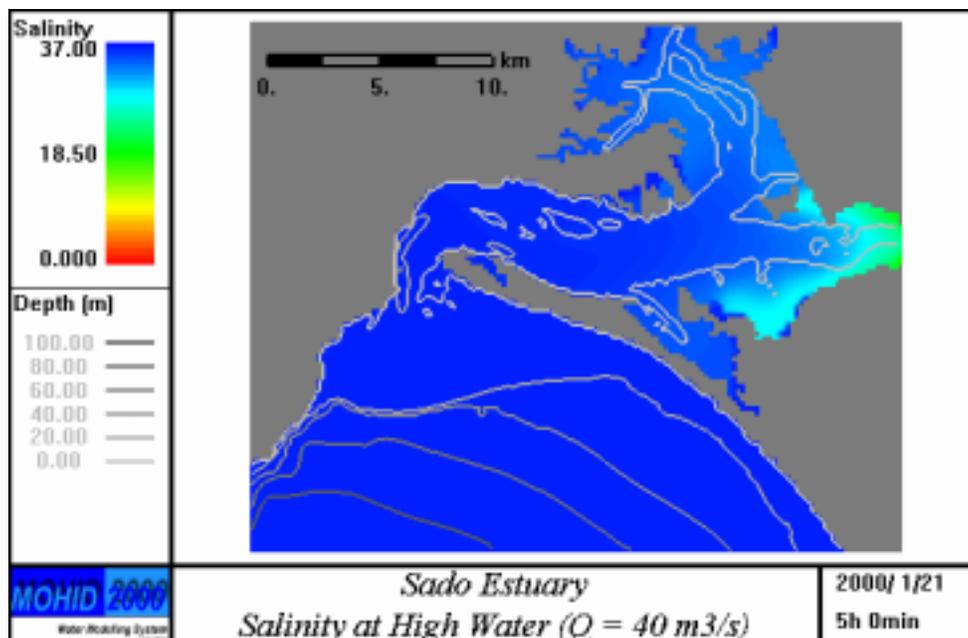


Figura 167: Campos de salinidade no Estuário do Sado (Preia-mar)

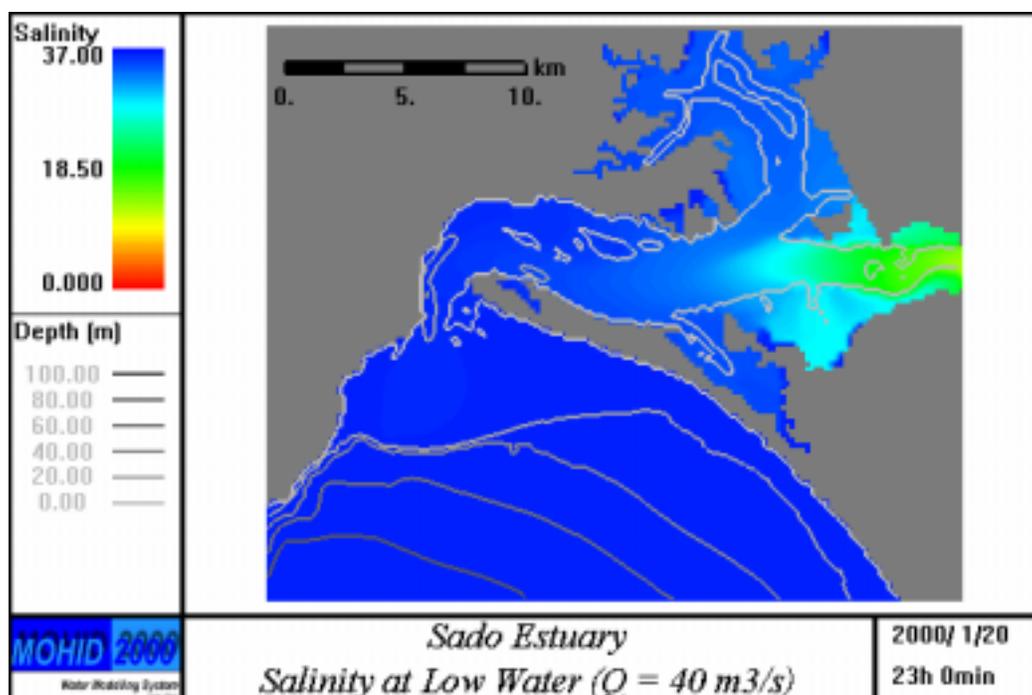


Figura 168: Campos de salinidade no Estuário do Sado (Baixa-mar)

As figuras mostram gradientes muito baixos na parte principal do estuário, sendo a influência da água doce confinada à região do canal de Alcácer, à entrada do qual a salinidade atinge valores da ordem dos 30 em Preia-Mar. Em baixa mar é visível o deslocamento preferencial da água do rio pela parte norte do canal.

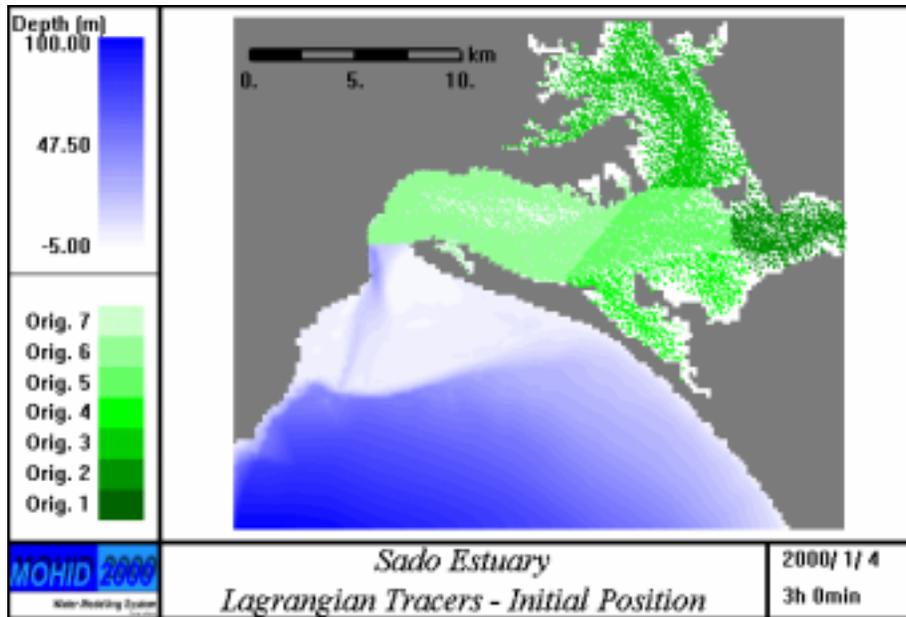


Figura 169: Traçadores Lagrangeanos no Estuário do Sado (Posição inicial)

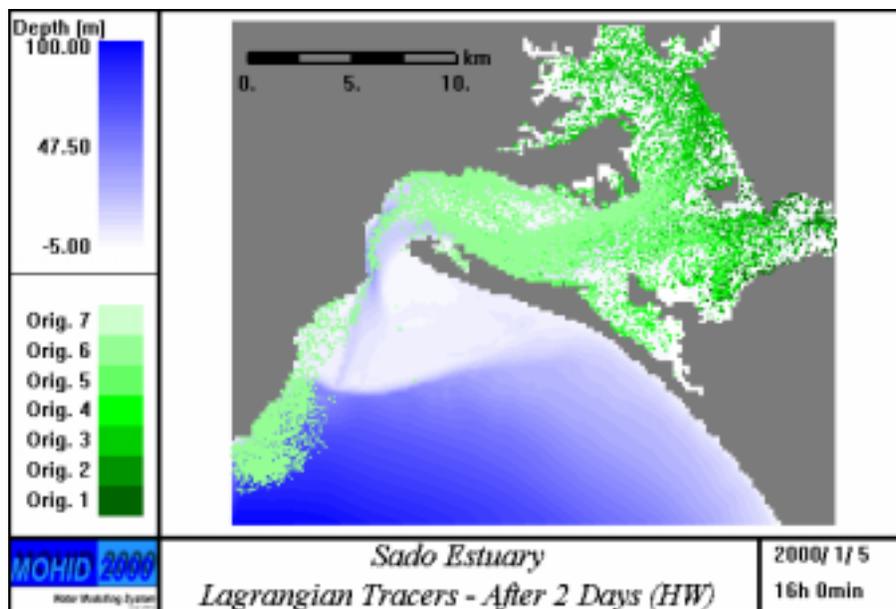


Figura 170: Traçadores Lagrangeanos no Estuário do Sado (Preia-mar depois de dois dias de transporte)

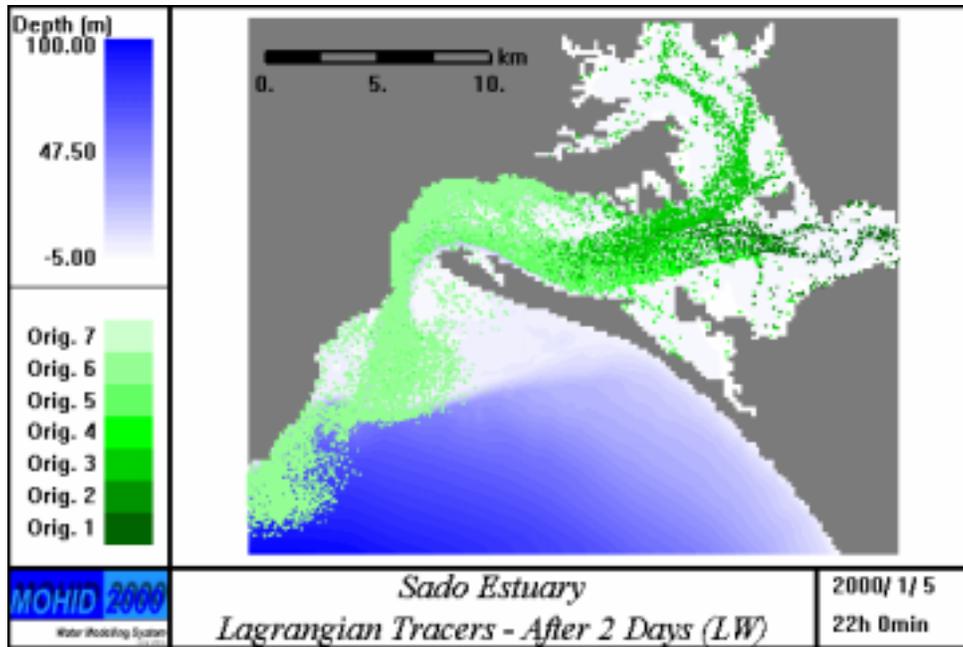


Figura 171: Traçadores Lagrangeanos no Estuário do Sado (Baixa-mar depois de dois dias de transporte)

5.9.2.3 Traçadores Lagrangeanos

Para se determinar a trajectória e a dispersão de massas de água utilizaram-se traçadores lagrangeanos. Os traçadores foram colocados em “caixas” cobrindo todo o estuário: Figura 169. O movimento dos traçadores foi simulado durante dois dias, sendo representadas na Figura 171 a distribuição em preia-mar e na figura seguinte a distribuição na baixa-mar seguinte.

Pode-se verificar que a expulsão da água do estuário se efectua ao longo do jacto de vazante e que esta abandona a região da embocadura junto à costa Oeste. A água que entra no estuário junto a Tróia desloca-se ao longo do Canal Sul. Nas marés seguintes esta água descerá o canal para progressivamente se ir deslocando em direcção ao canal Norte.

Na Figura 171 é fácil identificar a água proveniente de dois ciclos de maré seguidos na zona da barra. Quando sai, a água segue pelo canal de navegação e depois chega-se para a margem norte.

5.9.3 Limite de Jusante

Os resultados do modelo hidrodinâmico e as simulações de salinidade e de deslocamento de traçadores lagrangeanos mostram que os processos de transporte Estuário do Sado são muito semelhantes aos que se observam na embocadura do

estuário do Tejo. Utilizando o mesmo critério, o limite do estuário deve ser a linha vermelha na Figura 172, definida pelos seguintes pontos:

Pontos	Latitude (N)	Longitude (O)
1	38° 29' 18"	8° 56'
2	38° 28' 36"	8° 56' 54"
3	38° 28' 24"	8° 56' 24"
4	38° 28' 45"	8° 55' 48"
5	38° 29' 24"	8° 55' 06"
6	38° 29' 42"	8° 54' 24"

A água que atinge esta linha dificilmente volta a entra no estuário, e se o faz é por acção dos dois vórtices adjacentes ao jacto de saída. Nesse caso a comprimento da trajectória é suficientemente grande para adquirir as propriedades da água do mar.

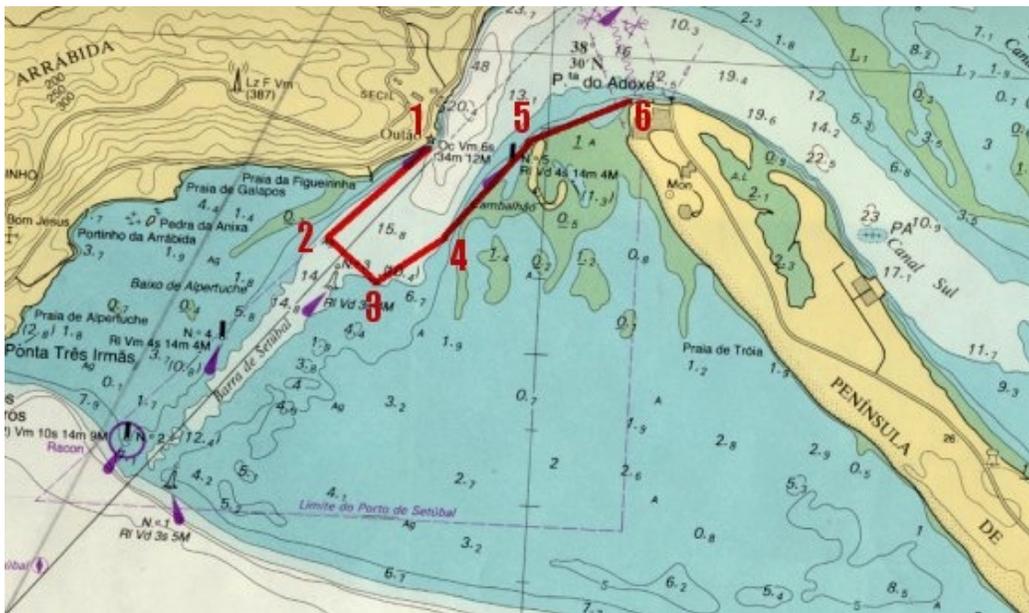


Figura 172: Limite de jusante do estuário do Sado e regiões de influência

5.10 ESTUÁRIO DO RIO MIRA

5.10.1 Bacia Hidrográfica

O rio Mira nasce na Serra do Caldeirão, a uma altitude de 470 m. O seu curso tem um comprimento total de 145 km e vai desaguar junto a Vila Nova de Milfontes, 30 km a Sul de Sines. Na maioria do seu curso, o desnível é baixo, podendo por isso o rio ser considerado envelhecido (Andrade, 1986). A bacia hidrográfica do Rio Mira, localizada no Sudoeste de Portugal, tem uma área total de 1600 km². A Norte é limitada pela bacia hidrográfica do Rio Sado, a Sul pelas bacias hidrográficas das ribeiras provenientes da Serra de Monchique, a Leste pela bacia hidrográfica do rio Guadiana e a Oeste pela orla costeira.

Entre os principais afluentes do Mira destacam-se a ribeira do Torgal, os rios Luzianes, Perna Seca, na margem direita e Macheira, Guilherme e Telhares na margem esquerda. Na orla costeira, as linhas de água correm perpendicularmente à costa e drenam directamente para o mar.

5.10.2 O Estuário

O Estuário do Mira, Figura 173, Figura 174 e Figura 175 tem cerca de 32 km de comprimento e uma largura máxima de 150 m, sendo o maior da costa Alentejana. A profundidade média é de 6 m e a máxima de 11 m. Na zona terminal, junto a Vila Nova de Milfontes, ao longo de cerca de 2 km, a batimetria é complexa, apresentando bancos de areia que descobrem em baixa-mar e formam um sistema de canais. A montante desta região, existe um canal único de 8 a 10 m de profundidade que diminui até ao limite de propagação da maré, cerca de 40 km a montante da embocadura. Ao longo das margens, até cerca de 20 km a montante da embocadura, existem espraiaços de maré, a maioria dos quais alberga zonas de sapal.

A maré é a principal força promotora do escoamento no estuário. A maré é essencialmente do tipo semi-diurno, sendo as componentes mais importantes a M₂, S₂, e N₂. A amplitude de maré varia entre 1 m em maré morta e 3.2 m em maré viva. O padrão do escoamento é mais complexo na zona próxima da embocadura, onde a velocidade à superfície pode atingir valores superiores a 1 m/s. A maré é amplificada na primeira parte do estuário devido à diminuição da largura e da profundidade e diminui na zona de montante devido ao atrito.

chuvosos de Inverno e Primavera (Blanton, Andrade e Ferreira, 2000). O caudal médio é de $2.9 \text{ m}^3/\text{s}$ (valor obtido a partir de séries temporais medidas pelo INAG).

Em Verões médios o caudal do Rio Mira é baixo e só se anula durante períodos curtos, transportando água drenada em zonas irrigadas. Pelo contrário, as linhas de água de menores dimensões existentes na bacia não têm normalmente caudal natural durante períodos da ordem dos 3 meses.

5.10.4 Modelo

A hidrodinâmica do estuário foi simulada utilizando o modelo MOHID 2000 para a região compreendida entre a batimétrica dos 20 metros e o limite de propagação da maré situado sensivelmente 40 km a montante de Vila Nova de Mil Fontes. O passo espacial do modelo é variável 20 m na zona entre a embocadura e a ponte de Vila Nova de Milfontes e um máximo de 1000 metros nos troços do rio mais a montante. A Figura 175 mostra a batimetria usada pelo modelo na zona de jusante do estuário. São apresentados resultados do modelo para condições de maré e de caudal médios. Na fronteira oceânica foi imposta a componente M_2 da maré (1.02 m) e na fronteira com o rio o caudal de $2.86 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para este estuário estão disponíveis dados de correntes medidos entre Dezembro de 1992 e Janeiro de 1993 pela Direcção Geral de Portos. A Figura 176, até à Figura 182 mostram comparações entre velocidades medidas e calculadas (intensidades e direcções) para dois períodos de maré média: 16-18 de Dezembro de 1992 e 8-10 de Fevereiro de 1993. As velocidades foram medidas em dois pontos designados por “Pólo 1” e “Pólo 3”, os únicos para os quais estão disponíveis dados de campo.

As figuras mostram boa concordância entre os valores medidos e os valores calculados, quer em termos de intensidades, quer em direcções. A concordância entre velocidades medidas e calculadas dificilmente poderia ser melhor do que a apresentada pelas figuras. Por um lado as medidas são pontuais e os resultados do modelo são valores médios para uma célula da malha (da ordem de $30 \times 30 \text{ m}^2$, neste caso). Por outro lado, o modelo está a ser forçado só pela componente M_2 da maré, enquanto que na natureza (apesar de ser uma condição de maré média), estão presentes outras componentes. O facto de o caudal do rio durante o período das medidas não ser o usado nas simulações tem pouca importância devido à sua pequena contribuição para o escoamento.

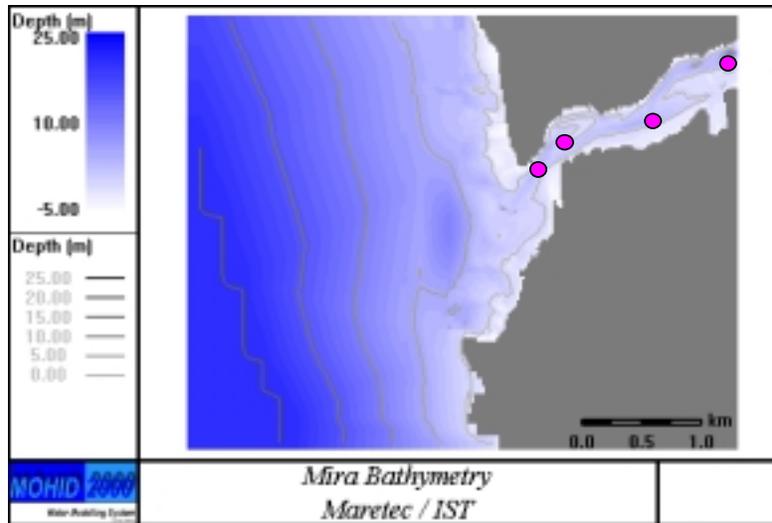


Figura 175: Batimetria do estuário do Mira usada para as simulações com o modelo. Os pontos indicam a localização dos locais para os quais são apresentadas séries temporais. O ponto 1 é o mais próximo da barra e o 4 o mais afastado.

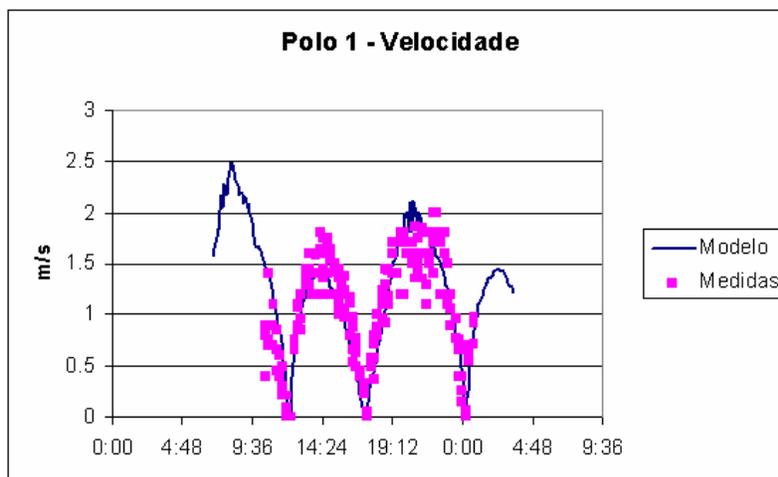


Figura 176: Comparação entre velocidades medidas e resultados do modelo no dia 8 de Fevereiro de 1993 no Pólo 1.

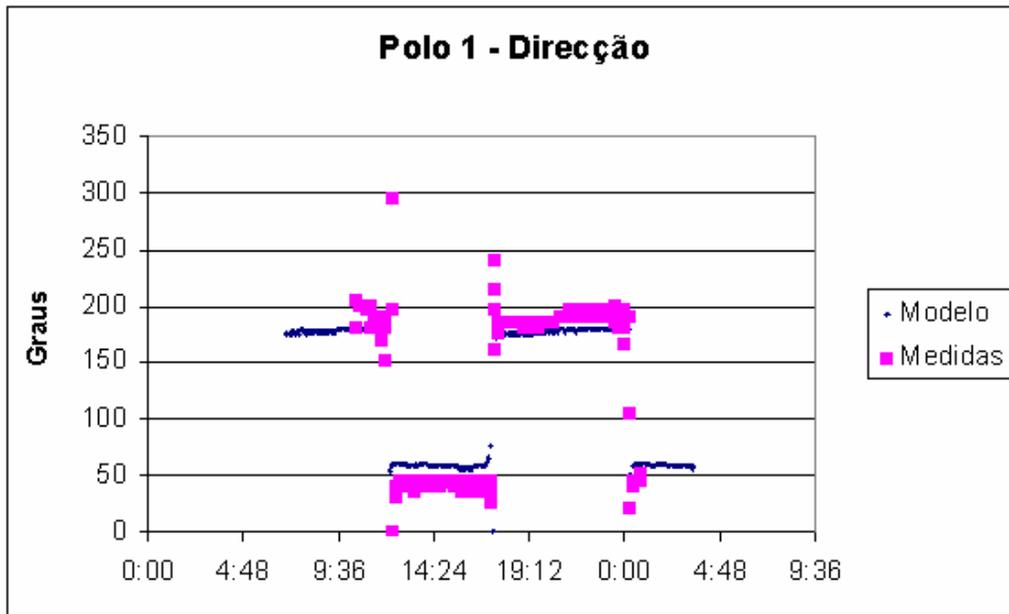


Figura 177: Comparação entre a direcção do escoamento medida e resultados do modelo no dia 8 de Fevereiro de 1993 no Pólo 1.

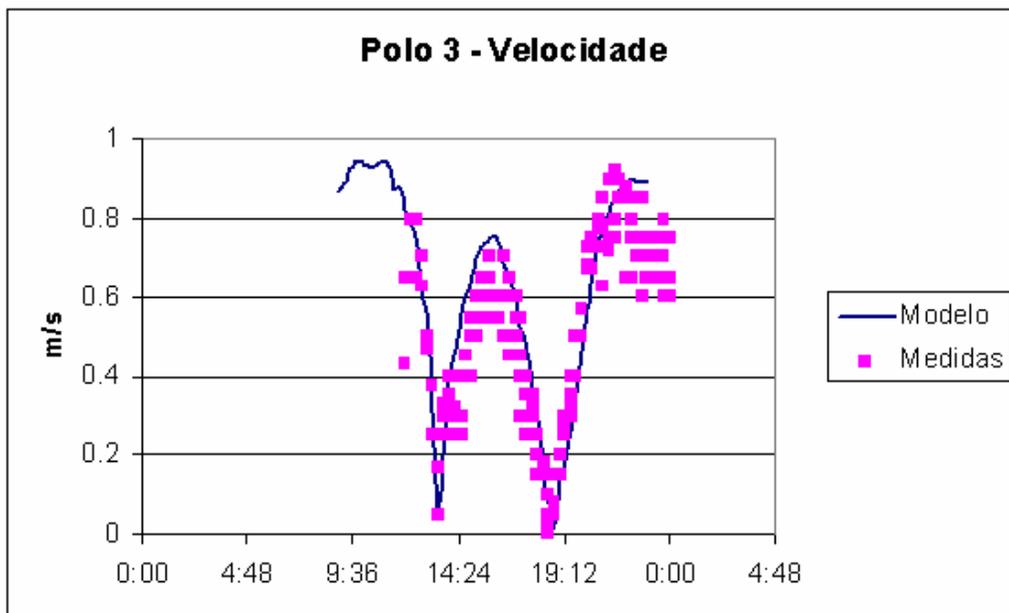


Figura 178: Comparação entre velocidades medidas e resultados do modelo no dia 7 de Fevereiro de 1993 no Pólo 3.

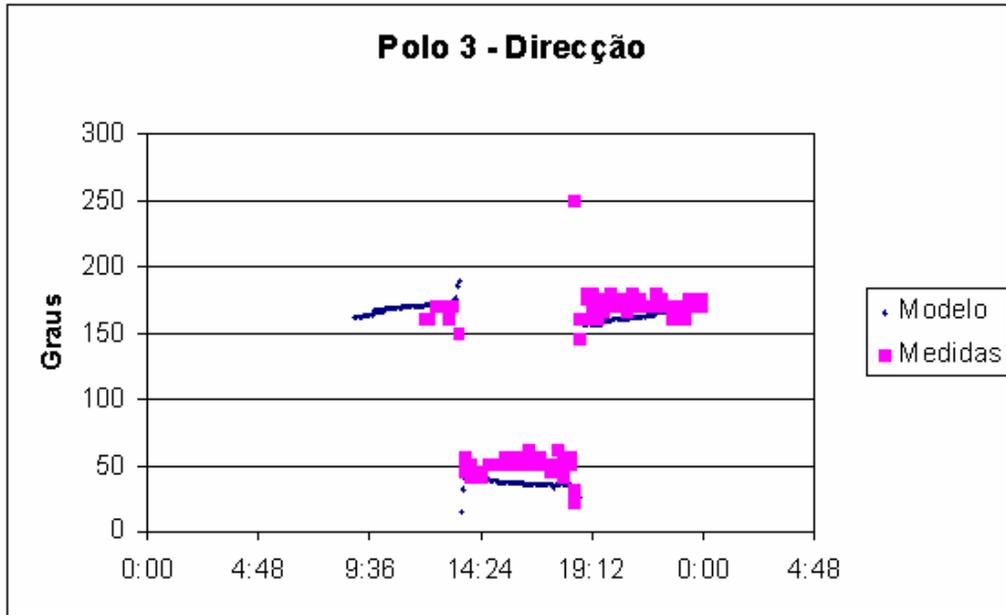


Figura 179: Comparação entre a direcção do escoamento medida e resultados do modelo no dia 7 de Fevereiro de 1993 no Pólo 3.

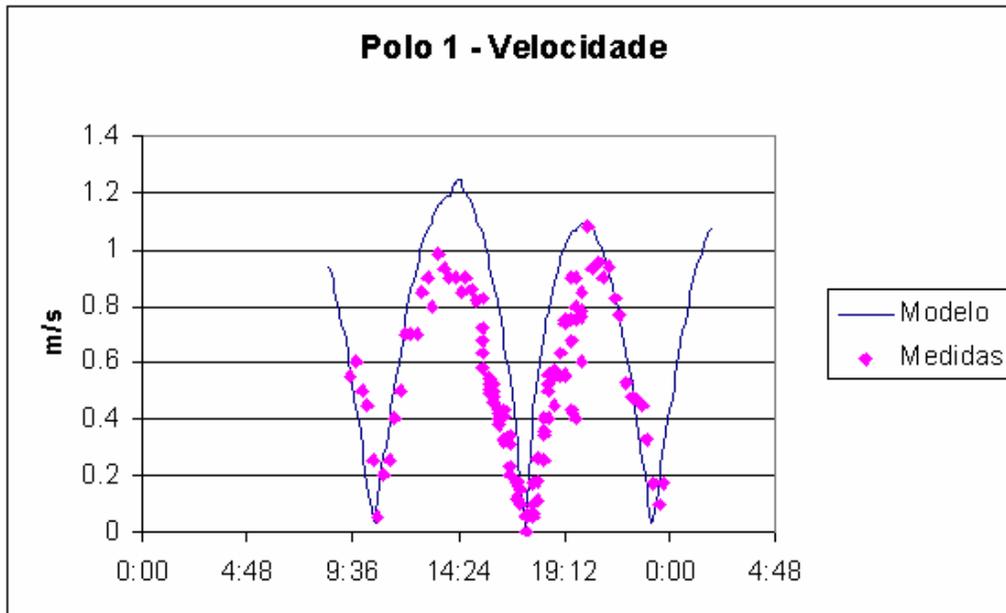


Figura 180: Comparação entre velocidades medidas e resultados do modelo no dia 18 de Dezembro de 1992 no Pólo 1.

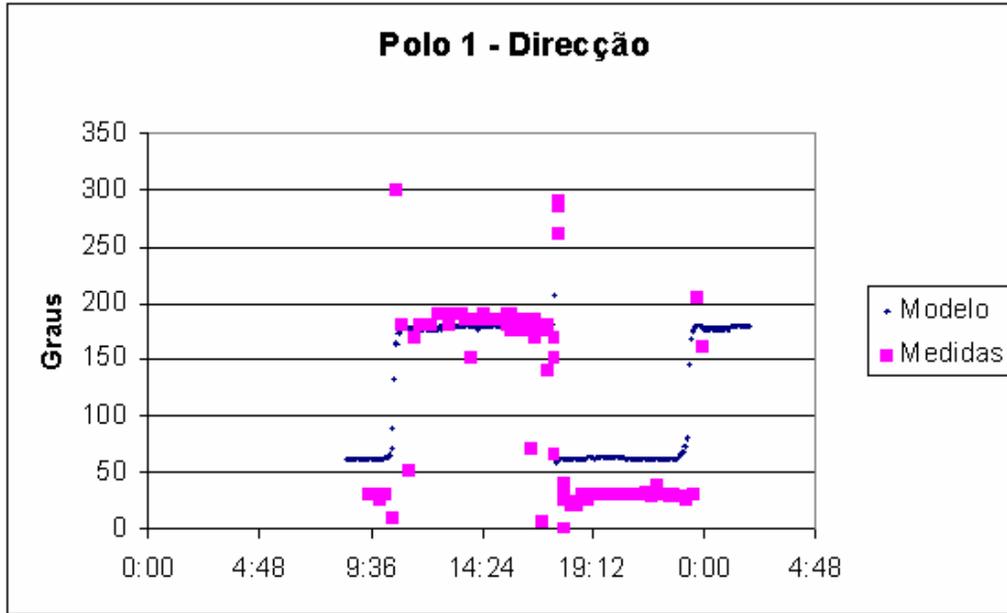


Figura 181: Comparação entre a direcção do escoamento medida e resultados do modelo no dia 18 de Dezembro de 1992 no Pólo 1.

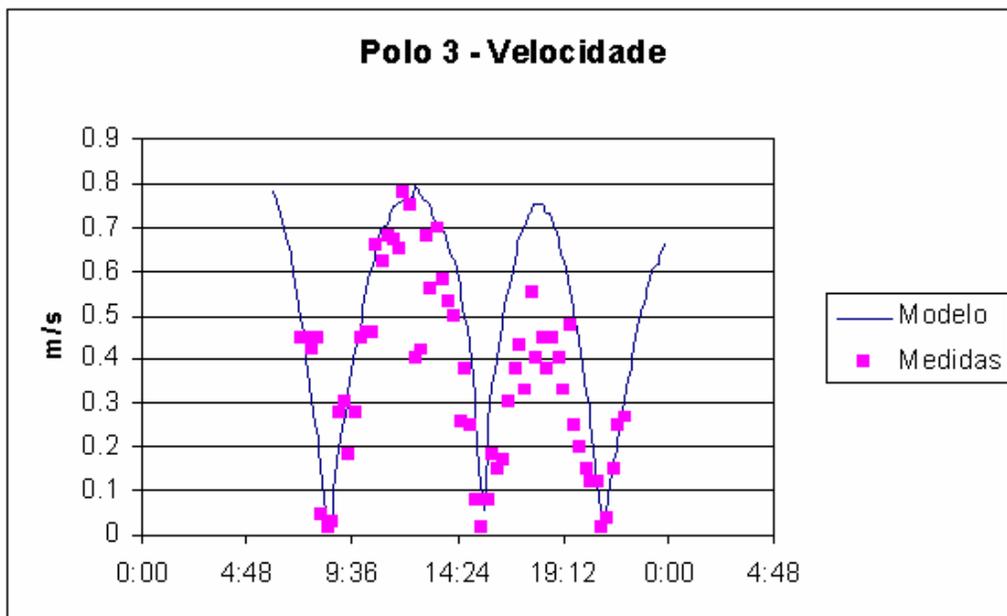


Figura 182: Comparação entre velocidades medidas e resultados do modelo no dia 16 de Dezembro de 1992 no Pólo 3.

5.10.5 Resultados das simulações

Os resultados do modelo são analisados na forma de séries temporais em alguns pontos do estuário e de distribuições espaciais em instantes particulares. Na **Figura**

183 observam-se séries temporais de elevações da superfície livre em vários pontos ao longo do estuário. Em todos os pontos, à excepção do último mais afastado da embocadura, é visível o carácter semi-diurno da maré. A figura mostra também a redução da amplitude da maré e o atraso de fase, mais marcado em baixa-mar devido ao aumento do efeito do atrito com a redução da profundidade.

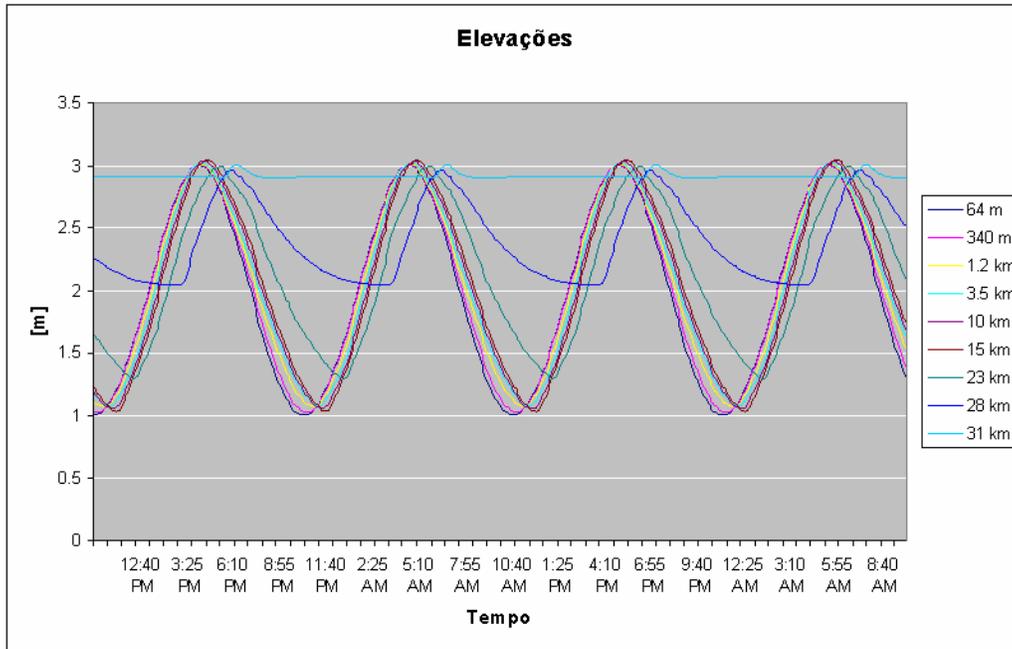


Figura 183 Séries temporais das elevações da superfície livre em vários pontos ao longo do eixo do estuário.

Hidrodinâmica

A Figura 184 e a Figura 185 mostram o campo de velocidades na zona da embocadura do estuário, junto a Vila Nova de Mil Fontes, respectivamente a meio da vazante e a meio da enchente. Em ambos os casos as velocidades instantâneas são intensas, chegando a atingir 1.3 m/s na zona da embocadura. O volume de água que transita durante um ciclo de maré é elevado, quer devido à elevada excursão da maré (cerca de 40 km) quer devido ao perfil do leito e extensão das zonas de descobertura. O estrangulamento existente na embocadura gera o aumento local da velocidade através da redução da área de passagem. A Figura 184 mostra um jacto de vazante dirigido para sudoeste e rodando progressivamente para norte, à medida que diminui a velocidade (efeito topográfico e força de coriolis). Na situação de enchente apresentada na Figura 185, observa-se que o fluxo de entrada no estuário é alimentado principalmente por água que vem de norte. Este efeito observa-se na generalidade dos estuários descritos neste trabalho e é uma consequência da inércia do escoamento produzido durante a vazante.

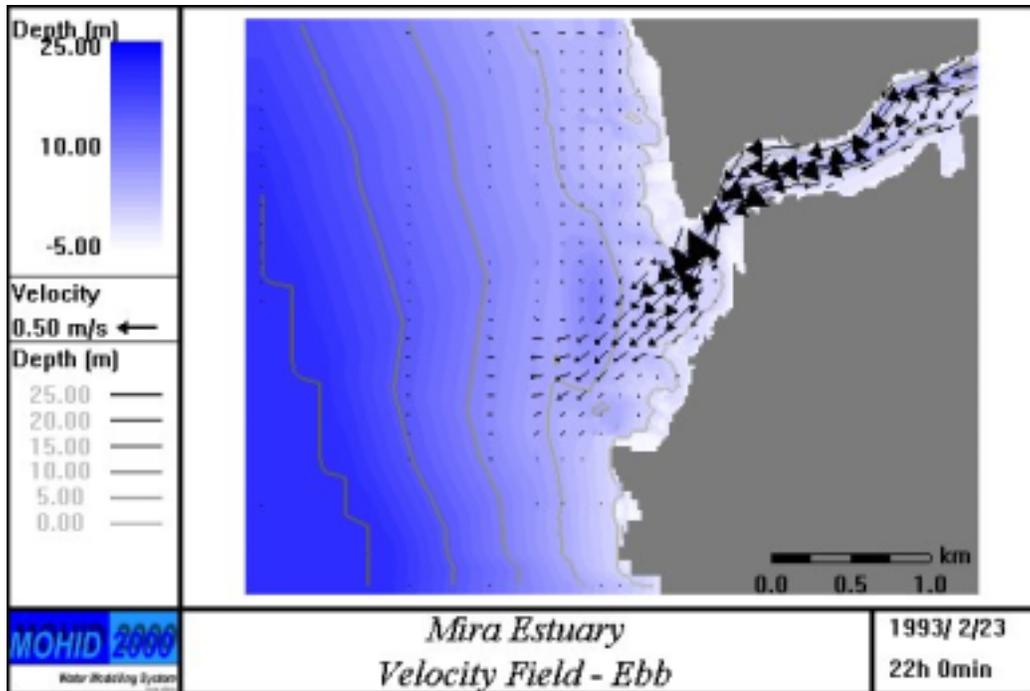


Figura 184 Campo de velocidades calculado pelo modelo para uma situação de baixa-mar.

A Figura 186 mostra o campo de velocidades residuais, obtido por integração temporal das velocidades instantâneas durante um ciclo de maré. Esta figura mostra a tendência média do escoamento. A figura mostra que a saída oblíqua do jacto de vazante produz um escoamento paralelo à costa, no sentido norte-sul. A figura mostra também recirculações intensas no interior do estuário correlacionadas com a batimetria local. Estes vórtices são gerados pela curvatura local do escoamento e são os principais responsáveis pela formação de bancos de areia nesta zona do estuário. As pequenas dimensões do estuário reduzem a importância destes vórtices em termos de qualidade da água. Eles permitem no entanto identificar a trajectória preferencial da água que deixa o estuário.

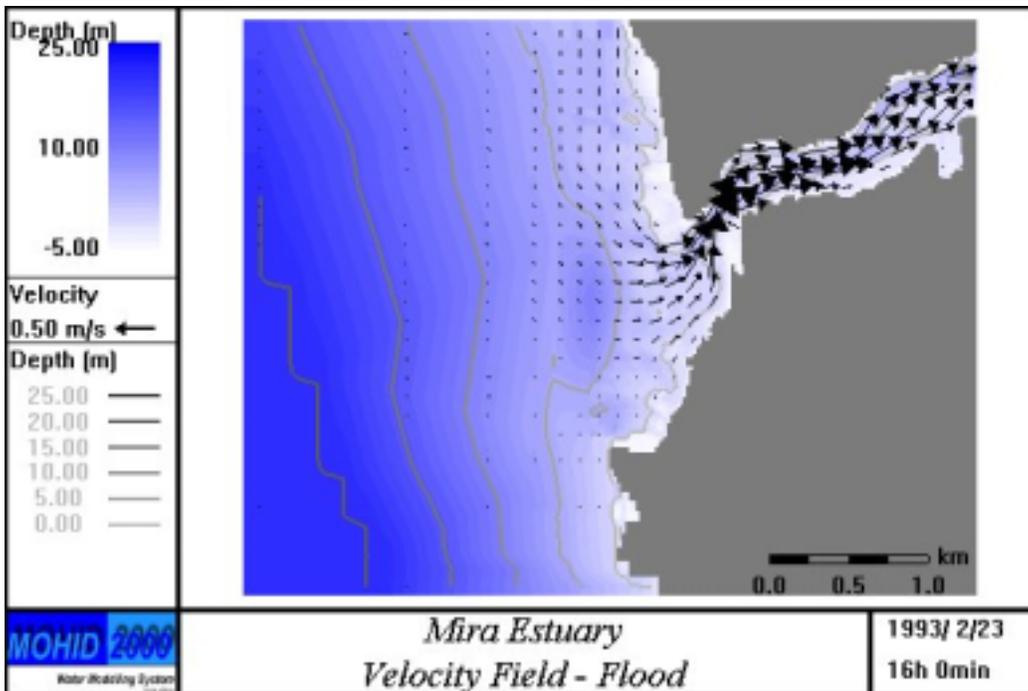


Figura 185 Campo de velocidades calculado pelo modelo para uma situação de preia-mar

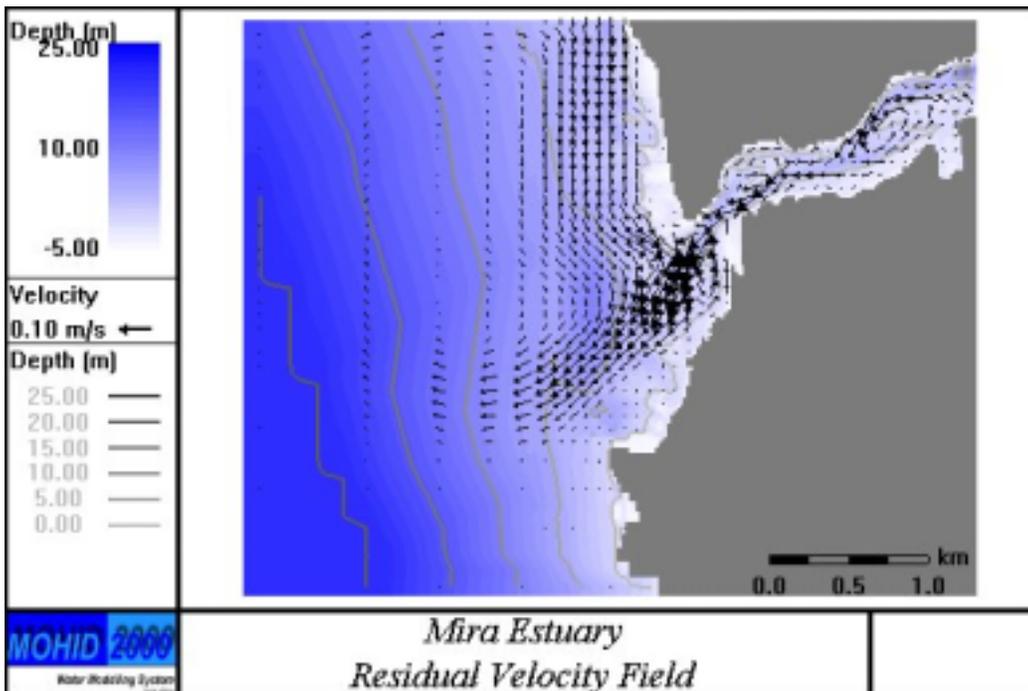


Figura 186 Campo de velocidades residuais integradas para um ciclo de maré.

5.10.5.1 Salinidade

A salinidade no estuário é também analisada em termos de séries temporais e de distribuições espaciais. Nas figuras 16 e 17 observa-se a distribuição de salinidade na zona de jusante do estuário em situação de baixa-mar e de preia-mar respectivamente.

As figuras mostram gradientes espaciais baixos. A salinidade oscila entre 33 em baixa-mar e 36 ‰ em preia-mar. O jacto de vazante é bem visível durante na distribuição de salinidades em baixa-mar e a sua assinatura ainda está presente em preia-mar. A mistura por efeito de corte no exterior do estuário da água proveniente do seu interior e da água do mar é bem visível no aumento progressivo da salinidade.

Na Figura 189 apresentam-se séries temporais de salinidade em vários pontos ao longo do eixo do estuário. A figura mostra o transporte oscilatório de água oceânica no estuário. À medida que entramos no estuário a salinidade diminui, passando este parâmetro a ser um bom indicador do escoamento. A partir de cerca de 30 km da embocadura a água é doce.

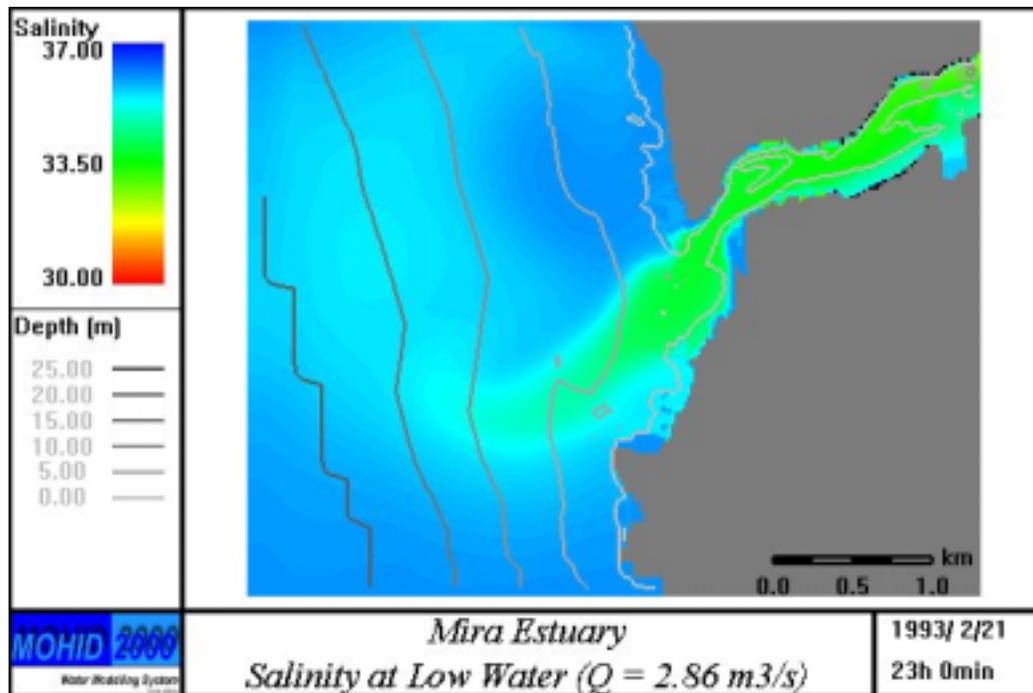


Figura 187 Distribuição de salinidade numa situação de baixa mar.

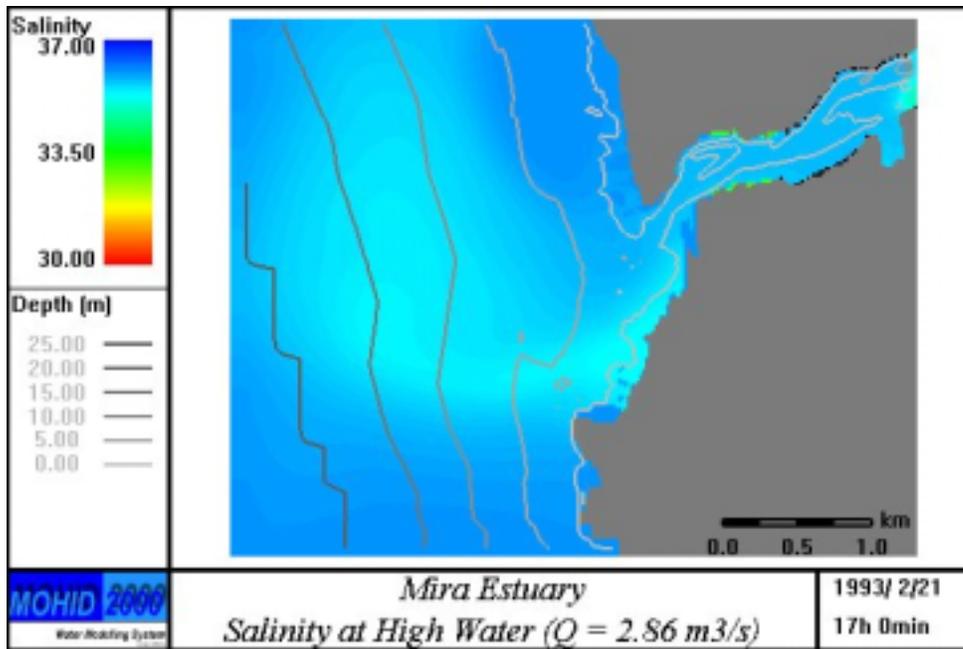


Figura 188: Distribuição de salinidade numa situação de preia-mar.

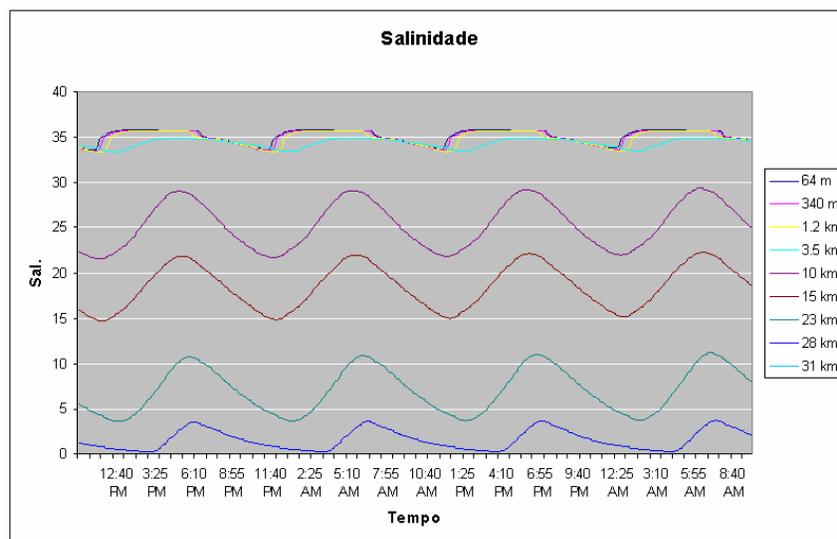


Figura 189 Séries temporais da salinidade em pontos ao longo do eixo do estuário. O limite de propagação da salinidade é cerca de 30 km da embocadura (caudal do rio: 2.9 m³/s)

5.10.5.2 Traçadores Lagrangeanos

Os traçadores lagrangeanos são usados para visualizar o movimento da água. Depois de emitidos estes traçadores deslocam-se à velocidade da água, calculada pelo modelo hidrodinâmico, permitindo identificar o seu deslocamento e mistura. Os traçadores foram emitidos em preia-mar, agrupados em caixas, como mostra a

Figura 190, onde cada cor representa uma caixa. A velocidade é calculada pelo modelo hidrodinâmico em cada instante de tempo.

A Figura 191 e Figura 192 apresentam-se as posições dos traçadores após dois dias de simulação em baixa-mar e preia-mar respectivamente. Como era de esperar as velocidades intensas já descritas nos resultados da hidrodinâmica fazem com que o deslocamento das partículas seja muito rápido. Os traçadores foram emitidos só no interior do estuário, podendo a renovação da água ser identificada pela existência de zonas sem traçadores. As figuras mostram que o tempo de residência da água nesta zona do estuário é inferior a dois dias e que, depois de sair, esta água se mistura com água do mar numa zona de grandes dimensões. Na pluma localizada no exterior do estuário são visíveis estruturas em forma de “lente”. Cada uma destas estruturas corresponde a à água expulsa durante um ciclo de maré¹. No caso de se ter considerado o forçamento devido ao vento, a pluma deveria afastar-se-ia mais rapidamente da embocadura do estuário, sendo mínima a probabilidade de a água de vazante voltar a entrar no estuário (mesmo que entrasse, entraria alguns ciclos de maré mais tarde, muito diluída, como mostravam as distribuições de salinidade).

5.10.6 Limite Inferior do Estuário

Os resultados do modelo demonstram que a água sai do estuário através de um escoamento em forma de jacto, o qual se mistura com a água do mar ao longo de uma região de grandes dimensões. Este jacto é dirigido para sudoeste, podendo a água de vazante localizada junto à margem sul reentrar no estuário durante a enchente. A água do mar entra no estuário sobretudo ao longo da margem norte. O tempo de residência da água na zona do estuário a montante da embocadura é muito baixo e o valor médio da salinidade é elevado. Definindo o limite jusante do estuário como a linha que delimita a zona onde se localiza a água de vazante que ainda pode reentrar no estuário na enchente seguinte, propõe-se a delimitação indicada na Figura 193 definida pelos seguintes pontos:

Pontos	Latitude (N)	Longitude (O)
1	37° 43' 15''	8° 47' 24''
2	37° 43'	8° 47' 40''
3	37° 42' 48''	8° 47' 24''

¹ Este tipo de estruturas é descrito por Simpson (1997) com sendo típica das ROFIS.

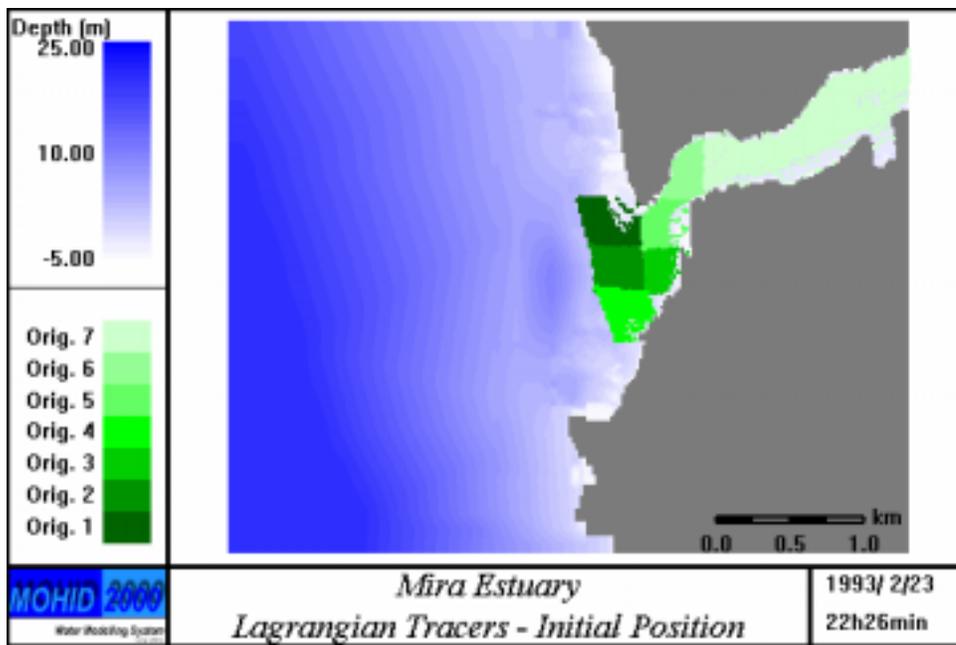


Figura 190: Posição inicial dos traçadores lagrangeanos emitidos em preia-mar.

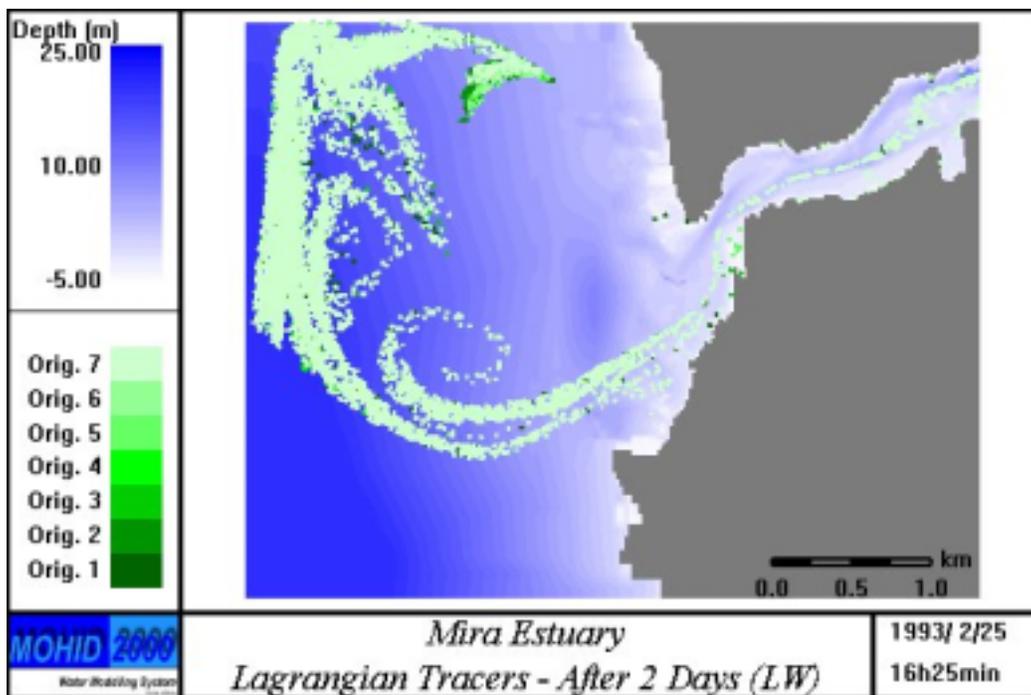


Figura 191: Posição dos traçadores lagrangeanos após dois dias de simulação numa situação de baixa-mar.

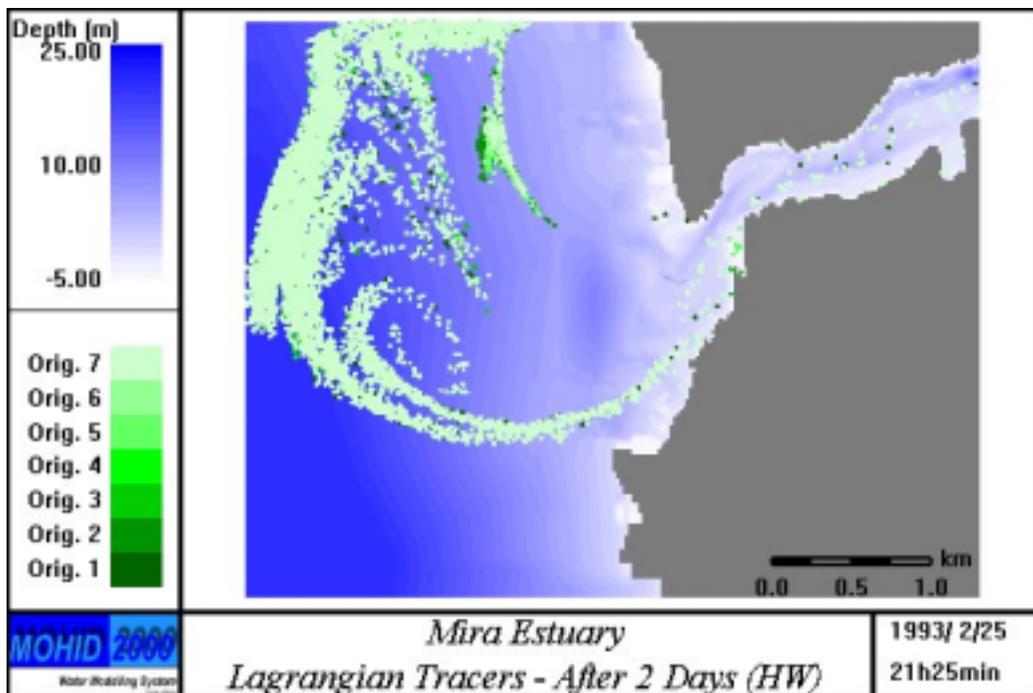


Figura 192: Posição dos traçadores lagrangeanos após dois dias de simulação numa situação de preia-mar



Figura 193: Proposta para o limite do estuário do Mira.

5.11 ESTUÁRIO DO ARADE

5.11.1 Morfologia

O estuário do Arade - Figura 194 - é um estuário de pequenas dimensões que recebe água do Rio Arade e das ribeiras de Odelouca e de Boina. O seu comprimento é de cerca de 8 km e possui uma largura média inferior a 1 km.

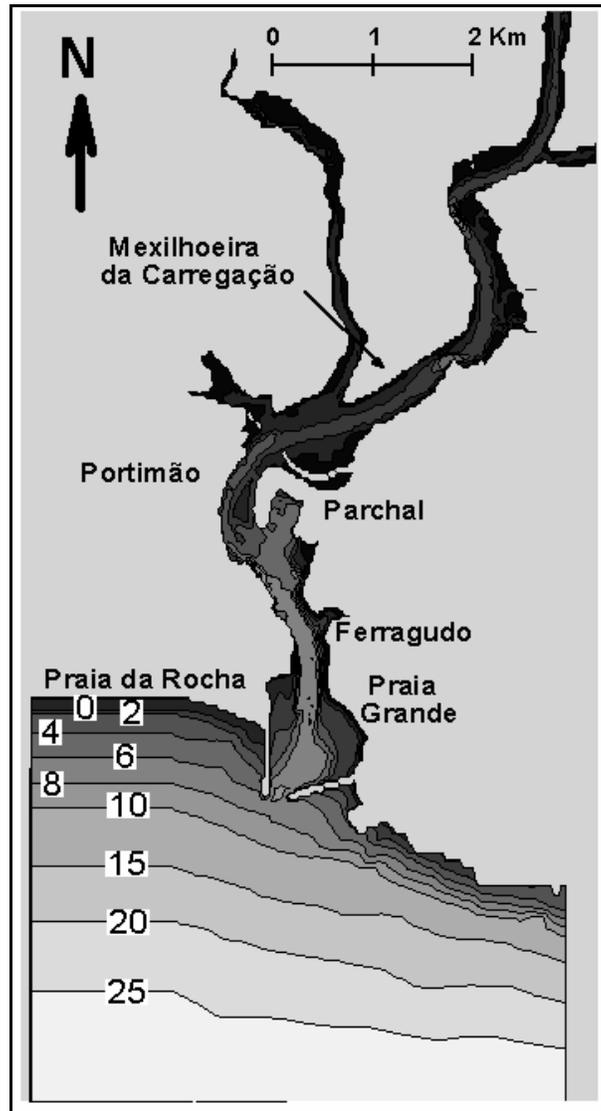


Figura 194: Batimetria do Estuário do Arade

Na margem Oeste do estuário encontram-se a cidade de Portimão, a segunda maior cidade do Algarve, com 20 mil habitantes, e os complexos turísticos da Praia da Rocha que fazem duplicar a população durante o Verão. No interior do estuário está instalado um dos principais portos de pesca da região. Ao longo das bacias hidrográficas dos rios a ocupação demográfica é moderada e resulta essencialmente

da actividade turística e da agricultura. Assim, pressão urbana é moderada e encontra-se principalmente na zona do estuário.

A região é do tipo semi-árido, com pouca chuva durante o Verão. Os rios nesta região têm um regime do tipo torrencial que é modelado pela construção de barragens para fornecimento de água à agricultura e consumo urbano. Tanto o Rio Arade como as ribeiras são pouco caudalosos devido às condições hidrológicas da região e à retenção das barragens do Funcho e do Arade. Desta forma a salinidade do estuário é normalmente elevada.

A profundidade média do estuário é cerca de 6 m e a profundidade máxima não excede os 10 m, encontrando-se os pontos de profundidade máxima junto da cidade de Portimão e também entre os pontões que protegem a entrada do estuário.

No interior do estuário existem alguns sapais que constituem *habitat* para diversas espécies de aves e são local de desova e de crescimento de juvenis para algumas espécies de peixe.

A pequena dimensão do estuário e a sua pequena importância económica não têm estimulado o seu estudo. Os principais estudos levados a cabo no estuário tiveram como objectivo a optimização da sua navegabilidade e sendo por conseguinte dirigidos para a hidrodinâmica.

5.11.2 Resultados da Modelação

5.11.2.1 Hidrodinâmica

A batimetria usada no modelo hidrodinâmico está representada na Figura 194. O modelo usa uma matriz de 244x190 pontos, com passos espaciais variáveis entre 25 e 210 metros. Na Figura 195 e na Figura 196 apresentam-se os resultados em enchente e vazante, respectivamente. As figuras mostram velocidades máximas da ordem dos 50 cm/s, no interior do estuário.

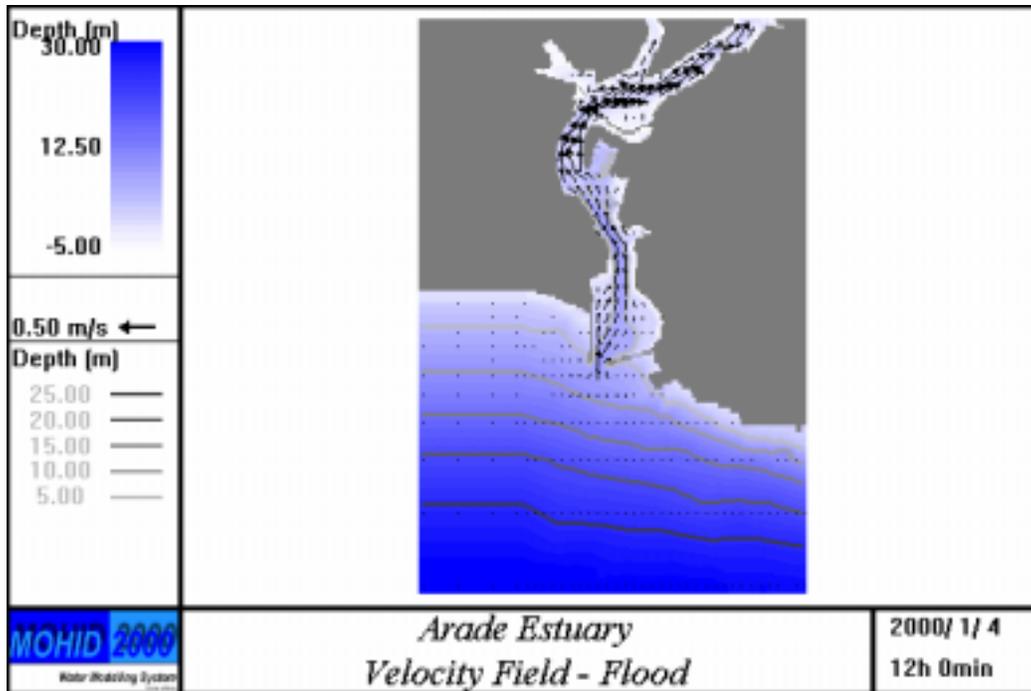


Figura 195: Campo instantâneo de velocidades no estuário do Arade (Enchente)

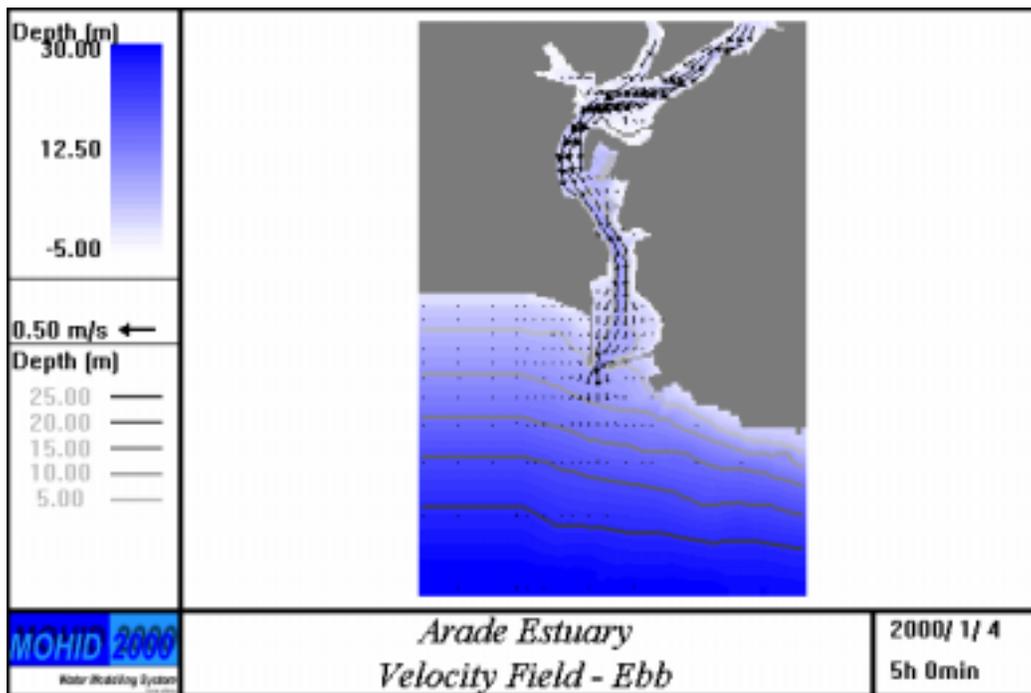


Figura 196: Campo instantâneo de velocidades no estuário do Arade (Vazante)

De uma forma geral o escoamento orienta-se segundo o eixo dos canais principais, com intensidade máxima nas regiões de maior profundidade. Como consequência, nas alturas das estofas, as transições enchente - vazante e vazante – enchente mostram padrões de circulação complexos, vórtices na zona da barra.

Na transição enchente – vazante, forma-se uma recirculação de sentido anticiclónico no interior do estuário, imediatamente a montante do pontão. Logo que o escoamento de vazante se estabelece este vórtice é desfeito e o escoamento de vazante passa a ocupar toda a largura do estuário. A jusante da embocadura forma-se um jacto de vazante com velocidades máximas da ordem dos 0,3 m/s (Figura 196). A velocidade máxima no entanto ocorre no interior do estuário, no canal principal, entre Portimão e Mexilhoeira da Carregação. O jacto de vazante induz a formação de dois vórtices a jusante da embocadura com velocidades máximas em baixa-mar. Devido ao efeito de coriolis, o vórtice anticiclónico do lado Oeste do jacto, ao largo da costa da Praia da Rocha, é mais intenso do que o vórtice ciclónico de Este e ocorre mais perto de terra.

Estes vórtices arrastam água das regiões costeiras adjacentes à barra na pluma de saída, promovendo a mistura da água proveniente do estuário e criando condições para que a enchente se inicie junto ao terra, entrando no estuário pelas zonas imediatamente adjacentes aos pontões. O escoamento de enchente no interior do estuário ocorre inicialmente com maior intensidade junto à margem Oeste, estendendo-se depois progressivamente a toda a largura do estuário.

O campo de velocidades residuais - Figura 197 -reflecte a complexidade dos escoamentos de enchente e de vazante na zona da barra, a qual resulta da complexidade da geometria do estuário, que induz gradientes de velocidade elevados. Na figura Figura 197 representa-se o campo de velocidades residuais, obtido da integração dos campos instantâneos durante um período de 15 dias.

Identifica-se facilmente o efeito dos dois vórtices que se formam durante a vazante associados ao jacto de saída do estuário. No interior da barra desenvolve-se um vórtice anticiclónico na região de jusante evidenciando o transporte para montante junto à margem Oeste e a recirculação para jusante ao largo da Praia Grande. Identifica-se também um vórtice ciclónico na região mais a montante do estuário em frente à cidade de Portimão e sobre o Sapal a Jusante da povoação do Parchal. Este campo de velocidades confirma a tendência da água ao largo da Praia da Rocha e da costa exterior a Este da barra para incorporar o jacto de saída.

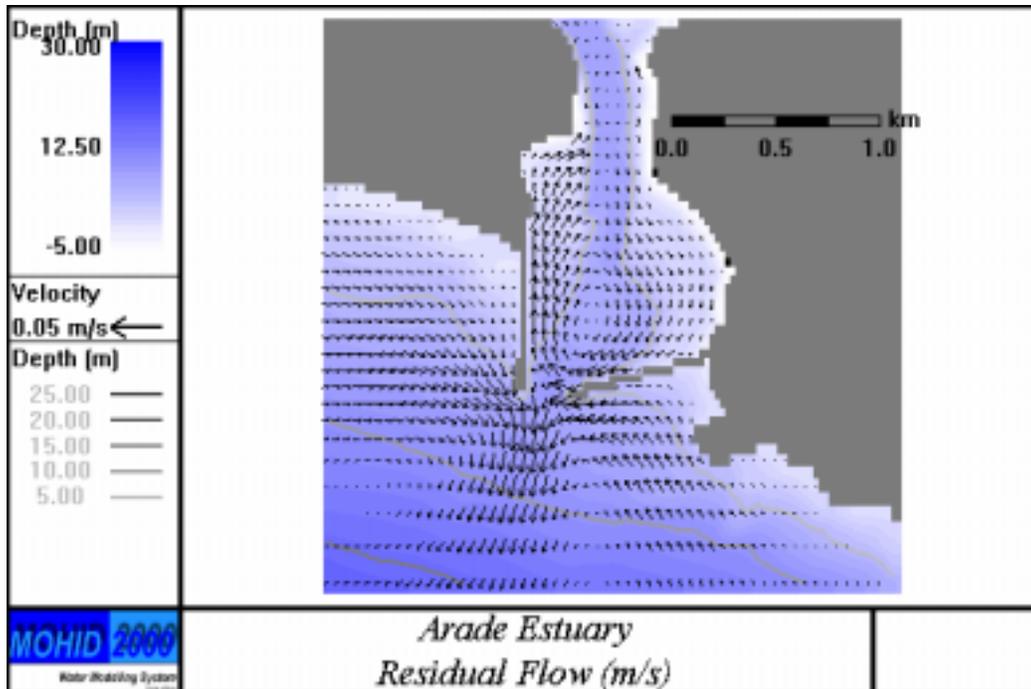


Figura 197: Campo de velocidades residuais no Estuário do Arade.

5.11.2.2 Salinidade

A distribuição de salinidade no interior do estuário é uma consequência da hidrodinâmica e do caudal dos rios. No caso do estuário do Arade, o caudal de água doce é reduzido e por conseguinte são de esperar valores elevados da salinidade no interior do estuário. Deste modo a assinatura da água doce no exterior do estuário é baixa, não sendo a salinidade um bom elemento para definir o limite de jusante do estuário.

A Figura 198 e a Figura 199 mostram distribuições de salinidade respectivamente em preia-mar e em baixa-mar, numa situação em que o caudal afluxo total de água doce é de 0.4 m³/s (0.3 do rio Arade e o restante das ribeiras). Este caudal, apesar de baixo, ele ocorre em mais de 70 % do ano (INAG, BD).

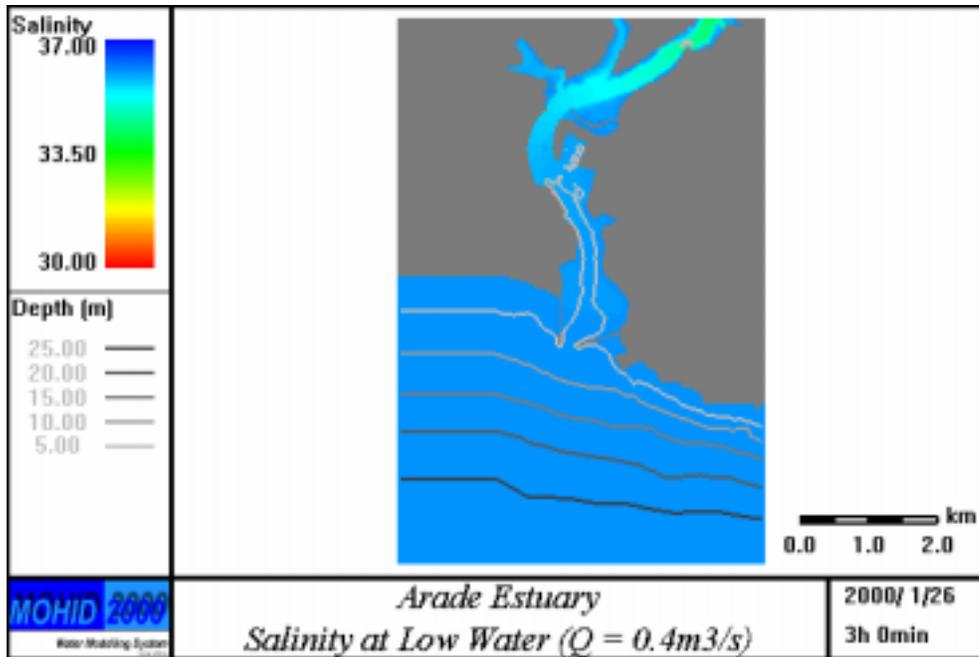


Figura 198: Distribuição de salinidade no estuário do Arade em baixa-mar (caudal total água doce: 0.4 m³/s).

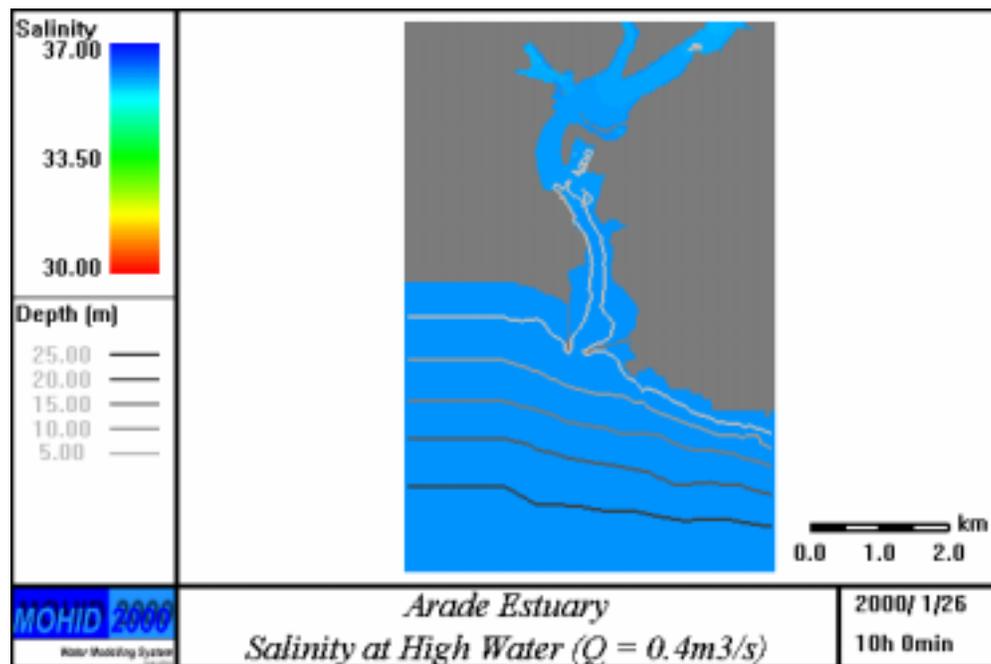


Figura 199: Distribuição de salinidade no estuário do Arade em preia-mar (caudal total água doce: 0.4 m³/s).

5.11.2.3 Traçadores Lagrangeanos

As simulações efectuadas com o modelo de transporte Lagrangeano permitem determinar e visualizar com clareza o percurso das massas de água no estuário.

Com este objectivo a água localizada no interior do estuário em preia-mar foi identificada com traçadores e seguida durante dois dias (quatro ciclos de maré).

A Figura 200 mostra as localizações iniciais dos traçadores. A Figura 201 mostra a localização dos traçadores em baixa-mar, cerca de dois dias depois da emissão e a Figura 202 em preia-mar. A comparação das figuras no interior do estuário mostra o comprimento da excursão de maré e o escoamento preferencial pelas zonas mais profundas dos canais.

Durante a vazante forma-se uma pluma bem definida no exterior do estuário, associada ao jacto de vazante (Figura 201) Esta pluma é impedida de atingir a costa pelos dois vórtices criados pelo jacto.

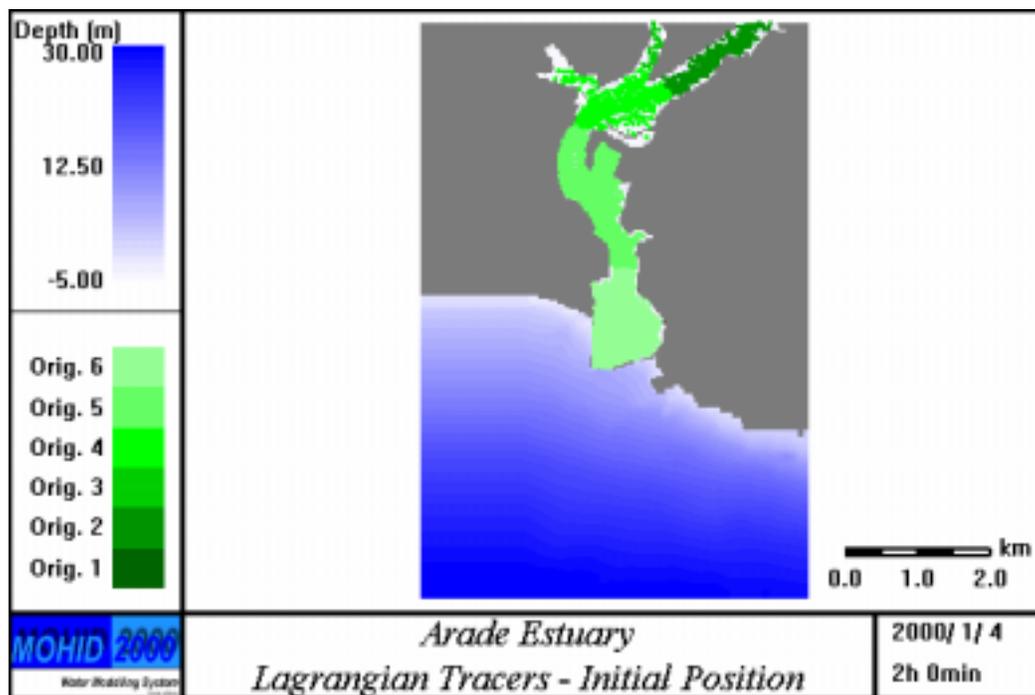


Figura 200: Traçadores Lagrangeanos no Estuário do Arade (Posição inicial)

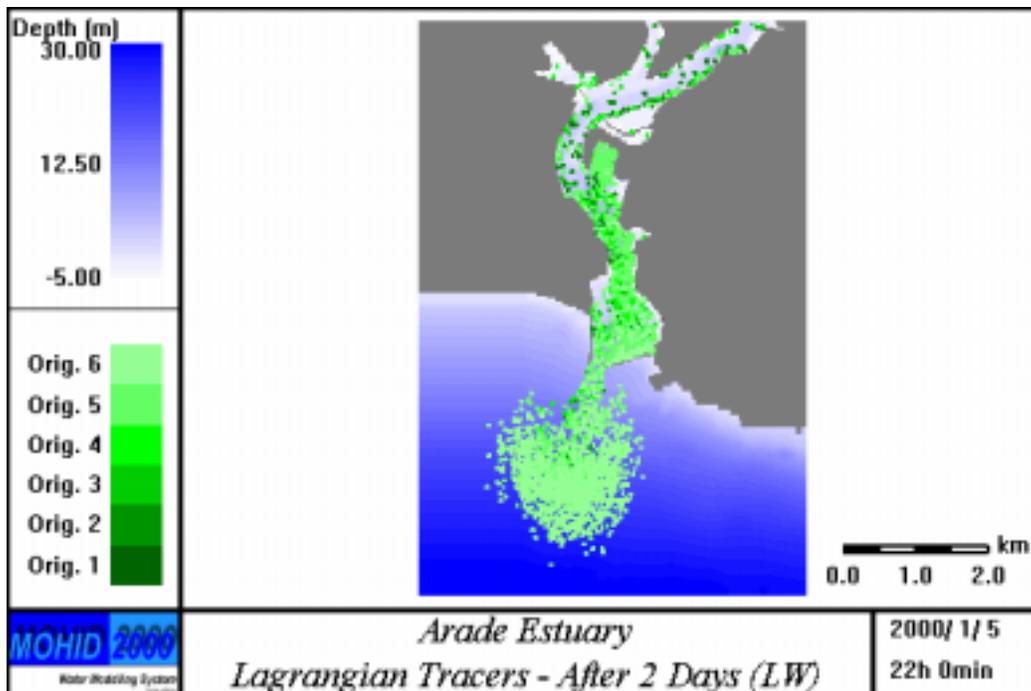


Figura 201: Traçadores Lagrangeanos no Estuário do Arade (Baixa-mar dois dias depois da emissão)

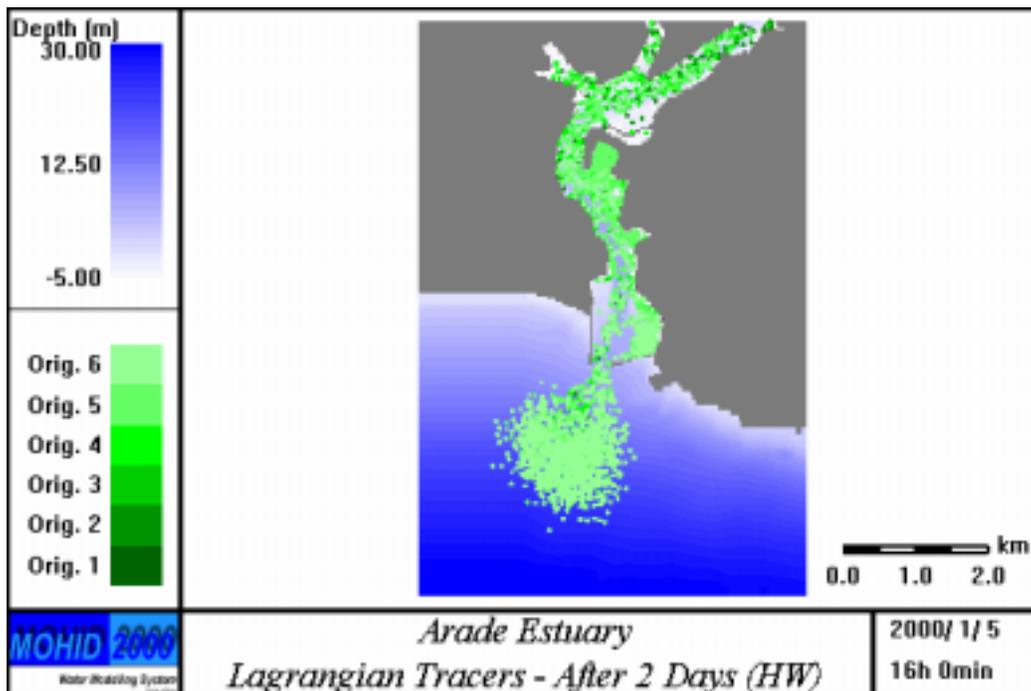


Figura 202: Traçadores Lagrangeanos no Estuário do Arade (Preia-mar dois dias depois da emissão)

Durante a enchente estas massas de água costeira introduzem-se no estuário junto aos pontões dos dois lados da barra juntamente com alguma da água que saiu do estuário durante a vazante. A quantidade de água que reentra no estuário é no entanto reduzida, como se pode ver pela pequena dimensão da zona coberta pelos traçadores no interior do estuário (note-se que parte dos traçadores que estão na zona pouco profunda a Este da embocadura são provenientes da vazante anterior).

O modelo considera unicamente o forçamento de maré, que é efectivamente o mais importante. A existência de vento contribuiria para criar uma corrente litoral que afastaria os traçadores da embocadura, diminuindo ainda mais a probabilidade de eles voltarem a entrar no estuário.

Esta análise permite definir a região de influência do estuário (zona ocupada pelos traçadores que saíram), a zona preferencial de proveniência da água que entra no estuário durante a enchente e a zona pouco afectada pelo estuário.

5.11.3 Limite de Jusante

Os resultados obtidos com os traçadores Lagrangeanos mostram uma pequena parte da água expulsa do estuário em cada vazante reentra na enchente. O movimento dos traçadores e a distribuição de velocidade residual permitiu também identificar com clareza a zona directamente afectada pelo estuário e a zona de proveniência da água de enchente. A distribuição de salinidades mostra que em toda esta região a água tem a salinidade da água do mar. Em condições normais de escoamento é alguma deriva litoral que transporta a água de vazante para longe da barra. Assim o limite de jusante deste estuário é a linha que une os extremos dos dois molhes (Figura 203). Por essa zona passa o jacto de vazante, sendo a maioria da água de enchente proveniente das zonas adjacentes ao jacto. O limite é definido pelos pontos com as seguintes coordenadas geográficas:

Pontos	Latitude (N)	Longitude (O)
1	37° 06' 35"	8° 31' 40"
2	37° 06' 35"	8° 31' 32"

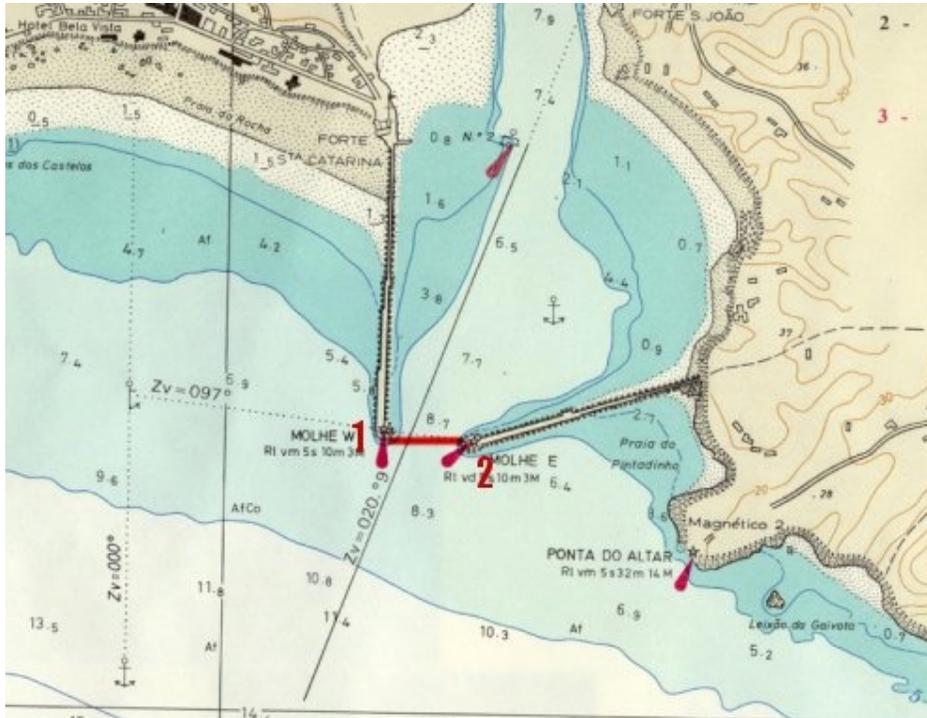


Figura 203: Regiões de influência do estuário do Arade e limite de jusante.

5.12 ESTUÁRIO DO GUADIANA

5.12.1 Descrição do Estuário

5.12.1.1 Morfologia

O estuário do Guadiana - Figura 204 - é um estuário longo e estreito, típico de um rio do tipo vale encaixado. Na região da foz possui no entanto regiões de sapal tanto na margem Portuguesa (sapal de Castro Marim) como na margem espanhola (sapal de Ayamonte). O limite de penetração da água salgada no interior do estuário depende do caudal do rio. De Verão, quando o caudal do rio é menor, o limite de propagação situa-se na região de Alcoutim a 40 km da foz e coincide com o máximo de turbidez. Naquelas condições o sinal de maré ainda pode ser sentido em Mértola a 65 km da Foz. As estruturas reguladoras do rio aí existentes impedem a sua propagação mais para montante.

A largura média do estuário na zona da embocadura é cerca de 2 km, diminuindo progressivamente para montante, sendo a largura média da ordem de 1km. A profundidade média é da ordem dos 3 metros. O estuário apresenta meandros suaves, com gradientes de profundidade elevados, podendo atingir profundidades de 10 metros a jusante das curvas.

A região do sapal de Castro Marim na Costa na margem Portuguesa e o de Ayamonte na margem espanhola são zona protegidas com estatutos de reservas naturais. Estes sapal são locais de invernada importantes para numerosas espécies limícolas (que se alimentam nos fundos) e locais privilegiados para a reprodução de peixes, moluscos e crustáceos.

O Rio Guadiana possui um caudal muito variável tanto na escala sazonal como inter-anual, como consequência do clima e da natureza do solo, muito impermeável, da sua bacia hidrográfica. A actividade agrícola de regadio existente nas suas margens (especialmente no troço Espanhol) conduz ainda à retenção de grande quantidade de água e condiciona a qualidade da água escoada. Em situações de tempestade o caudal pode exceder os 10000 m³/s, mas de Verão são frequentes situações de caudal praticamente nulo. O caudal médio é da ordem dos 80 m³/s tendo-se usado este valor nas simulações (PBH Guadiana, 2000).

A estrutura vertical da coluna de água varia de verticalmente homogénea a parcialmente misturada em função das condições de maré, vento e principalmente do caudal do rio.

5.12.2 Resultados da Modelação

5.12.2.1 Hidrodinâmica

O sistema de modelos foi aplicado a este domínio de forma a caracterizar a hidrodinâmica e o transporte na região. Para isso criou-se uma batimetria com 598x207 pontos com um passo espacial variável entre 50 e 120 metros como representado na Figura 204.

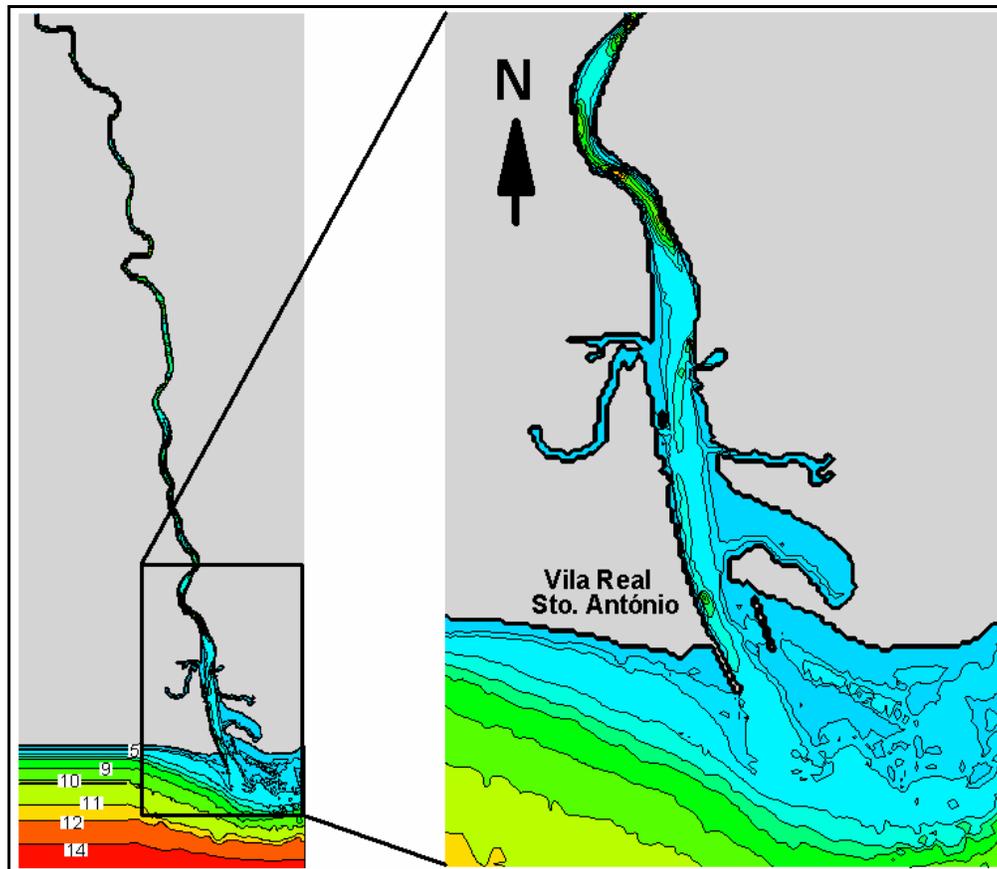


Figura 204: Batimetria do estuário do Guadiana

Na fronteira com o mar foi imposta uma maré média (componente M2 da maré, com 0.98 m de semi-amplitude). A Figura 205 e a Figura 206 mostram campos de velocidade instantânea respectivamente em vazante e enchente.

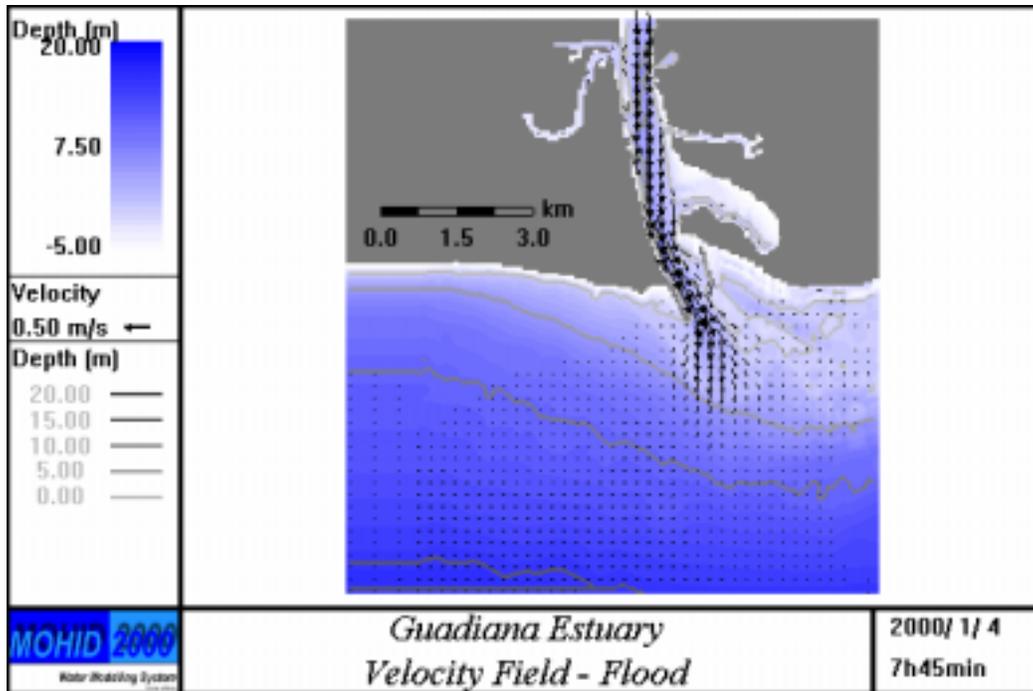


Figura 205: Campo de velocidades horizontais no Estuário do Guadiana (Vazante, caudal do rio $80 \text{ m}^3/\text{s}$ e maré M_2).I

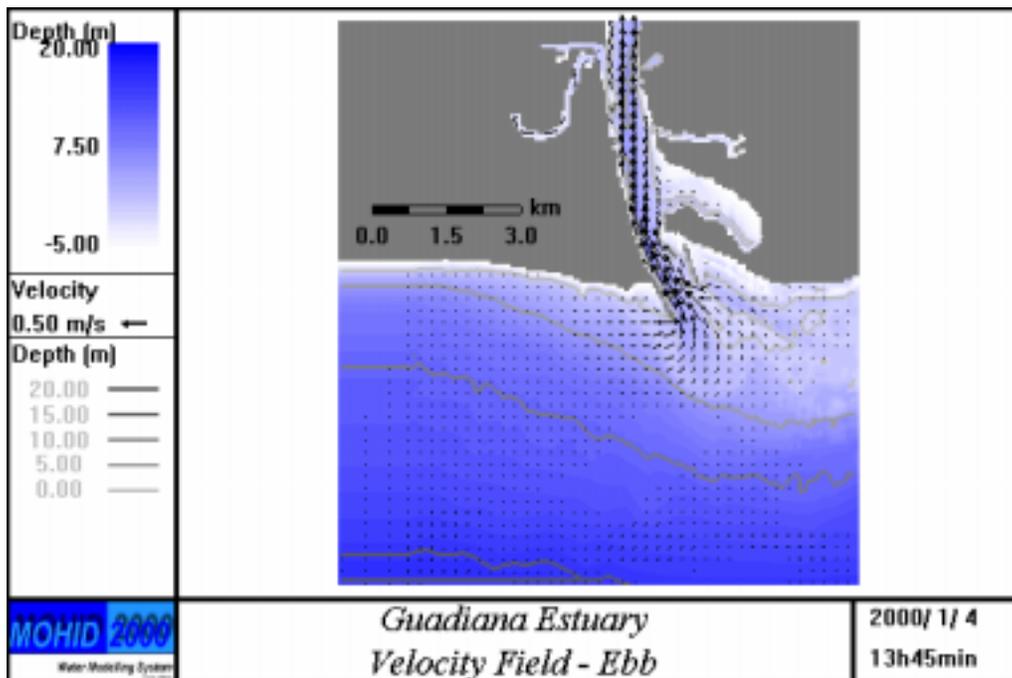


Figura 206: Campo de velocidades horizontais no Estuário do Guadiana (Enchente, caudal do rio $80 \text{ m}^3/\text{s}$ e maré M_2).

As figuras mostram que o escoamento se faz com maiores velocidades nos canais mais profundos. Na zona terminal do estuário, o escoamento de vazante inicia-se

nas zonas de menor profundidade junto à margem Este do estuário, onde a inércia é menor, drenando primeiro o sapal de Ayamonte e só se propagando depois ao resto da secção do estuário. Na região da barra forma-se um jacto de vazante visível na Figura 205 que transporta a massa de água para o largo onde se mistura com a água do mar. Este jacto induz a formação de um vórtice anticiclónico ao largo de Vila Real de Santo António que faz com que a na transição de vazante para enchente água inicie a entrada no estuário pela margem Oeste. Para este facto contribuem também os bancos de areia existentes ao largo de Ayamonte que dificultam a entrada quando os níveis da água são menores.

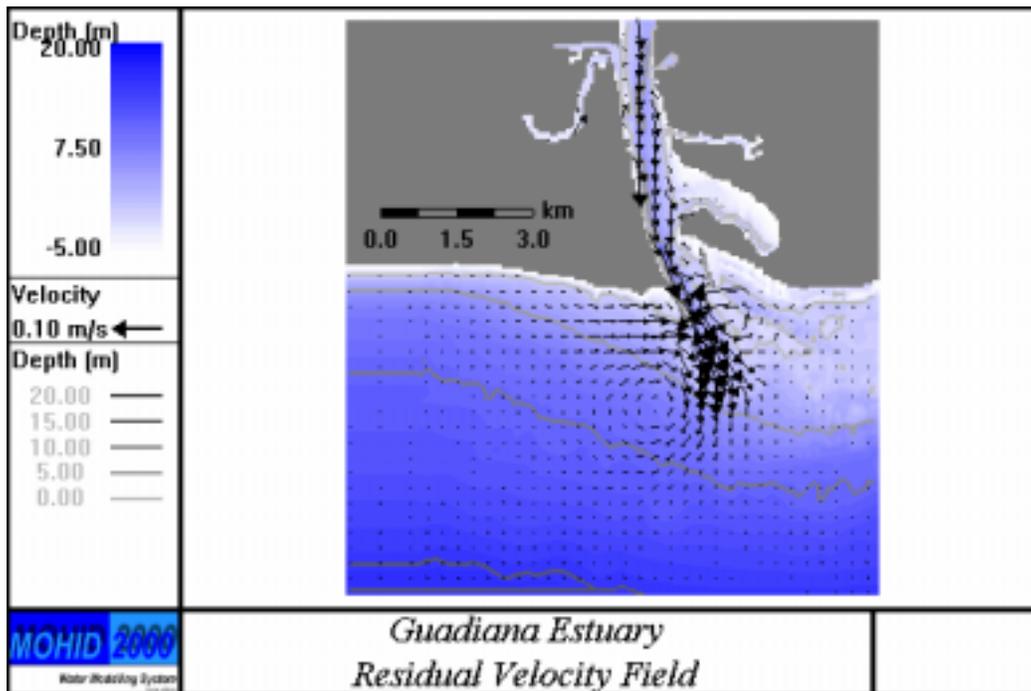


Figura 207: Campo de velocidades residuais (Caudal do rio de 80 m³/s)

O campo de velocidades residuais - Figura 207 - permite uma análise integrada dos processos de transporte. A figura mostra uma distribuição de velocidades típica de uma embocadura estreita, com um jacto de saída do estuário e dois vórtices associados, sendo o da direita mais intenso. Nestas condições o caudal do rio a descarga é suficientemente importante para impedir a formação de vórtices residuais no interior do canal. Só junto à raiz do molhe da margem direita se pode identificar um pequeno vórtice que deverá estar na génese do pequeno banco de sedimentos localizado no seu centro. O facto de o vórtice do lado da margem Oeste ser mais intenso está também na origem de o início da enchente se fazer por aquele lado do estuário.

5.12.2.2 Salinidade

A estratificação de densidade no estuário do Guadiana é mínima para caudais baixos e aumenta com o caudal do Rio, podendo a água doce escoar-se pela superfície até ao mar para caudais da ordem dos milhares de m^3 . Em condições de caudal médio ($80 \text{ m}^3/\text{s}$), a estratificação é suficientemente baixa para permitir usar uma malha integrada na vertical. Esta opção deixa liberto recursos computacionais para refinar a malha na horizontal, tendo por isso sido adoptada. A Figura 208 mostra a distribuição de salinidade em Preia-Mar e a Figura 209 em Baixa-Mar. As figuras mostram que com um caudal de $80 \text{ m}^3/\text{s}$ a água doce pode atingir a região de Ayamonte. A comparação das figuras sugere que a excursão de maré é da ordem dos 8 km. Os valores das salinidades apresentados pelas figuras nos sapais de Marim e de Ayamonte não são realistas. Estes valores dependem das descargas de água doce nessas zonas e, no caso de Ayamonte de detalhes da batimetria que não estavam disponíveis para estas simulações. Os valores representados nas regiões descobertas são arbitrários (são efectivamente o valor da salinidade da última água que lá esteve). Valores desse tipo estão representados nas margens dos sapais que só cobrem nas águas vivas de preia-mar, onde a última água que as inundou tinha salinidades da ordem de 36 ‰.

A simulação foi feita com o caudal médio. A simulação do caudal referente à moda dos caudais daria salinidades mais concordantes com os valores medidos mais frequentemente. No caso de se ter optado pela moda do caudal as salinidades obtidas seriam mais elevadas do que as apresentadas. Preferimos no entanto simular este caudal por a salinidade mau melhor traçador quando os caudais são baixos. No caso dos $80 \text{ m}^3/\text{s}$ o jacto de vazante deixa uma assinatura clara no campo de salinidades, auxiliando o estabelecimento do limite de jusante do estuário.

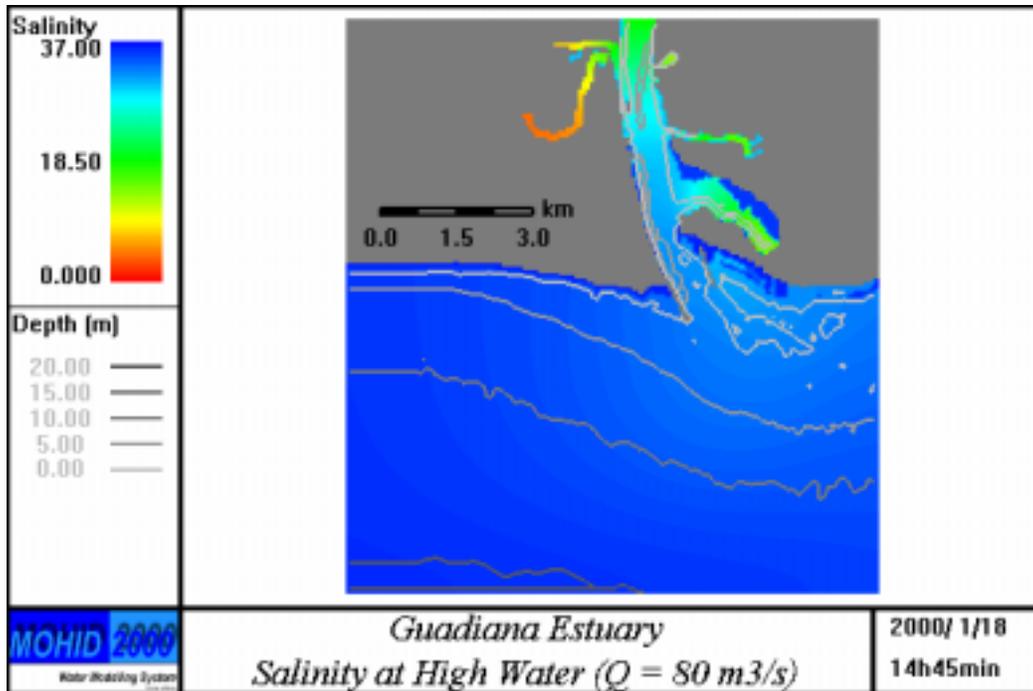


Figura 208: Campo de salinidade no Estuário do Guadiana (preia-mar)

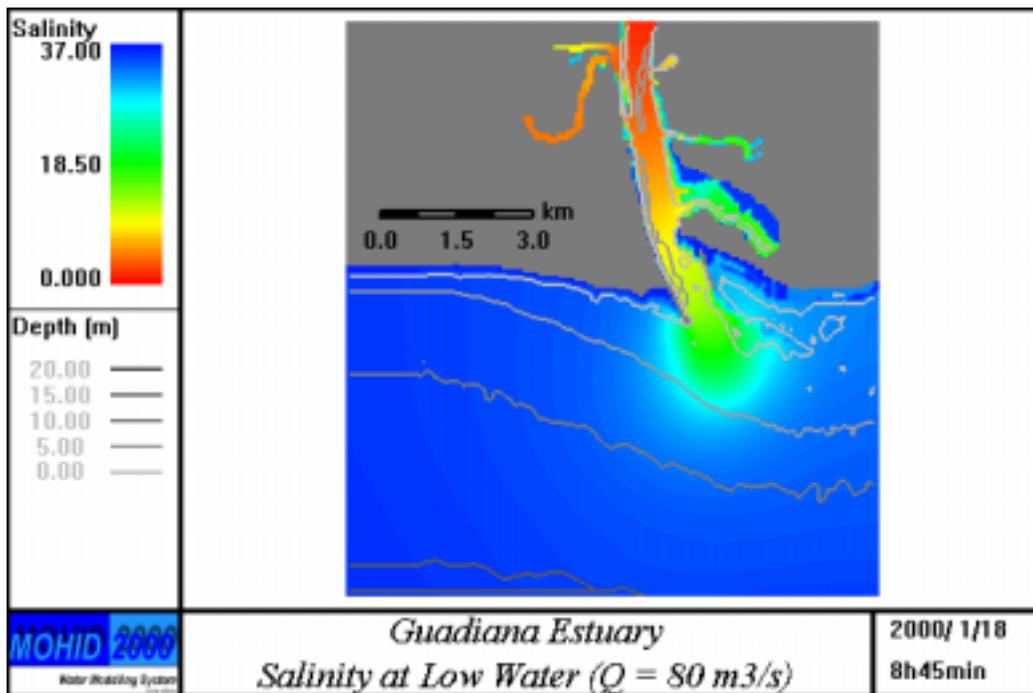


Figura 209: Campo de salinidade no Estuário do Guadiana (baixa-mar)

5.12.2.3 Traçadores Lagrangeanos

O modelo de transporte Lagrangeano foi utilizado para visualizar o movimento das massas de água e identificar a origem e destino das massas de água do estuário. Os traçadores foram emitidos em preia-mar nas localizações indicadas na Figura 210. A Figura 211 mostra a distribuição dos traçadores em preia-mar dois dias mais tarde. A figura mostra que a generalidade dos traçadores já saiu do estuário e que a água no canal principal foi substituída por água que inicialmente não estava identificada por traçadores (água de jusante). A Figura 212 mostra os traçadores na baixa-mar seguinte. A figura é semelhante à anterior, mas mostra que em cada ciclo de maré a quantidade de traçadores expulsos aumenta e que estes saem preferencialmente pelo canal mais profundo.

O vórtice ao largo de Vila Real forma-se no fim da vazante fazendo com que a água de enchente seja preferencialmente água do mar mais próxima de terra. Este mecanismo dificulta a reentrada no estuário de água que saiu na vazante. Na margem Este (à esquerda do jacto) o padrão de circulação é semelhante, mas o vórtice residual é menos intenso, permitindo que alguns traçadores reentrem no estuário.

Estes resultados permitem identificar a zona de influência do estuário ao largo da barra e verificar que a região exterior que mais influencia o interior é a região ao largo da costa de Vila Real até às praias de Monte Gordo.

5.12.3 Limite de Jusante

Com base nos resultados das simulações hidrodinâmicas, de transporte de salinidade e dos traçadores Lagrangeanos é possível identificar a região de influência do estuário e a região que o influencia e deste modo o seu limite de jusante.

Na Figura 213 é indicado o limite de jusante do estuário, definido pelos seguintes pontos:

Pontos	Latitude (N)	Longitude (O)
1	37° 09' 48"	7° 24'
2	37° 08' 30"	7° 23' 36"
3	37° 09' 12"	7° 22' 40"
4	37° 10'	7° 23' 36"

Este limite inclui a parte do jacto de saída que reentra no estuário, e onde a salinidade pode ser reduzida em condições de caudal superior ao de estiagem. No

caso de se considerar a corrente litoral esta água afasta-se rapidamente da embocadura, sendo mínima a probabilidade de reentrar. Assim o limite definido pode ser considerado um limite de segurança.

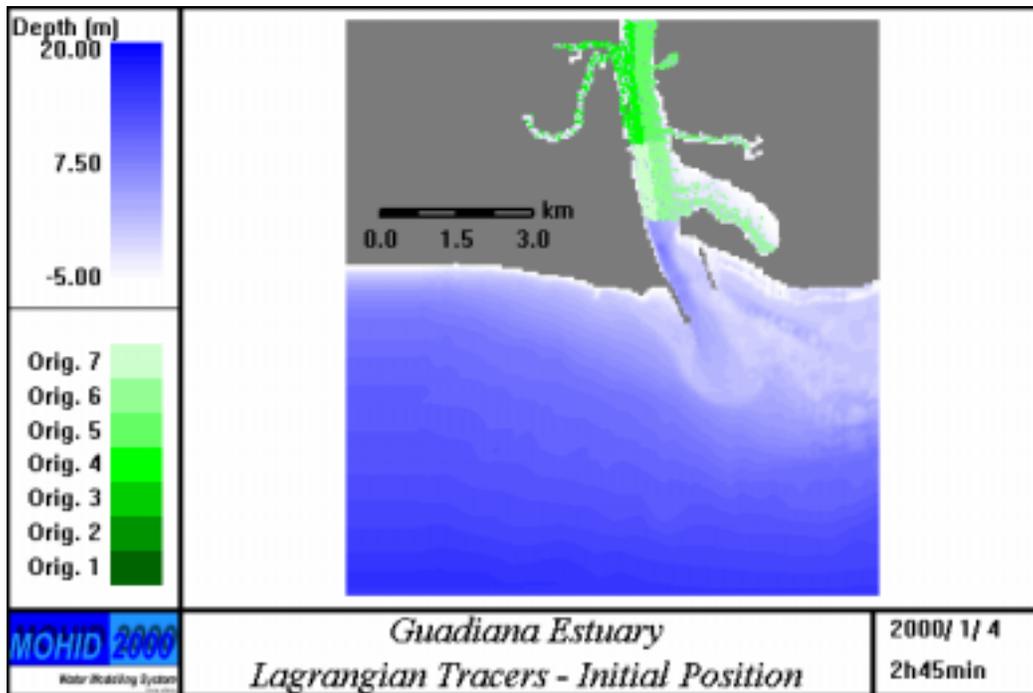


Figura 210: Traçadores Lagrangeanos no Estuário do Guadiana (Posição inicial, caudal do rio 80 m³/s)

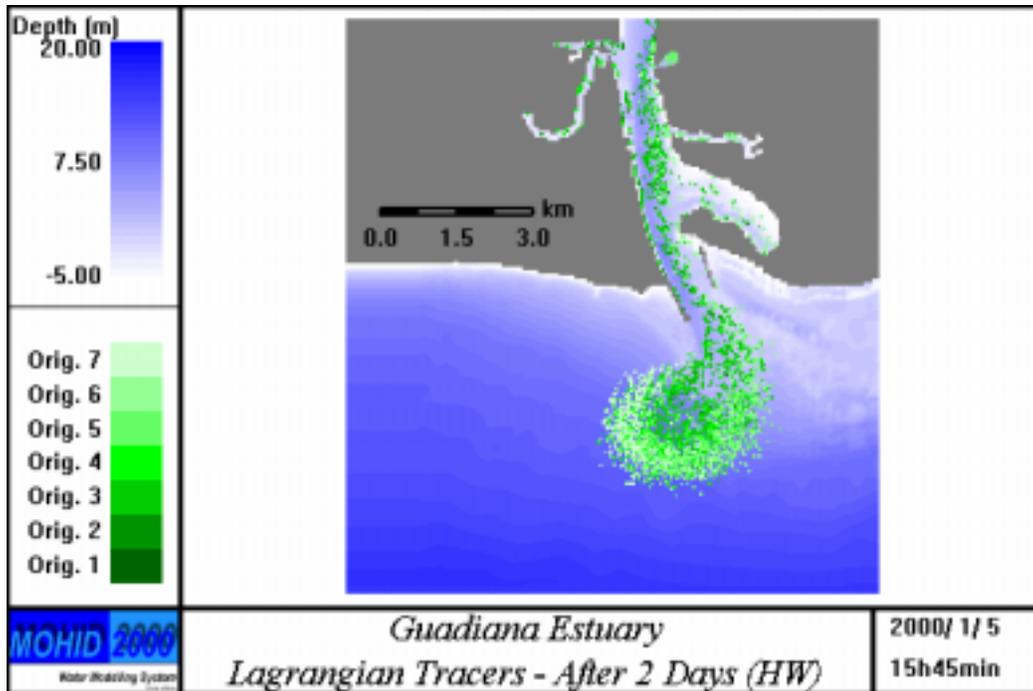


Figura 211: Traçadores Lagrangeanos no Estuário do Sado (preia-mar depois de dois dias de transporte, caudal do rio $80 \text{ m}^3/\text{s}$)

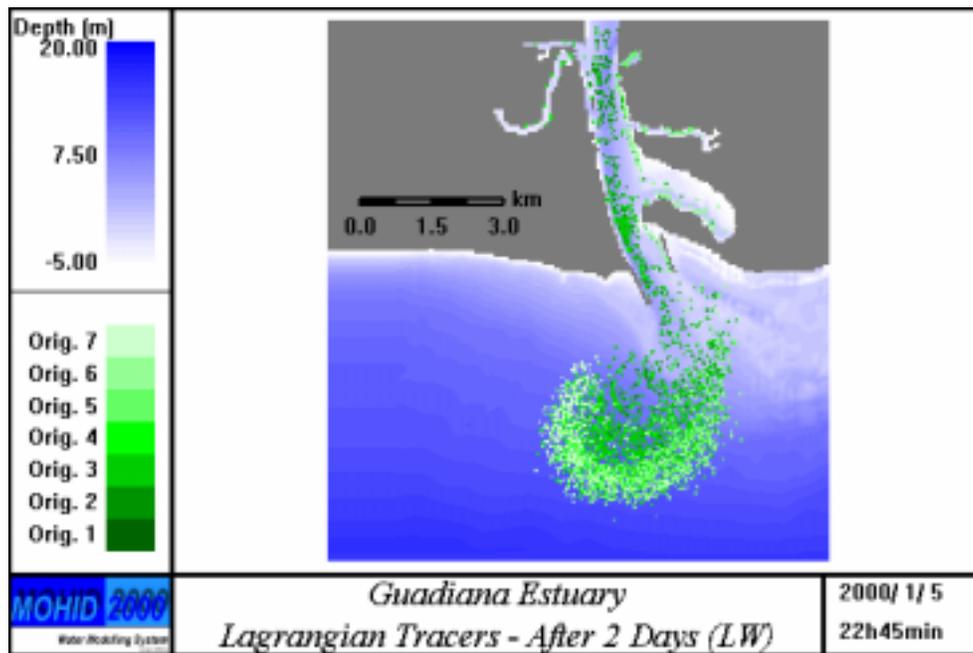


Figura 212: Traçadores Lagrangeanos no Estuário do Sado (baixa-mar depois de dois dias de transporte, caudal do rio $80 \text{ m}^3/\text{s}$)

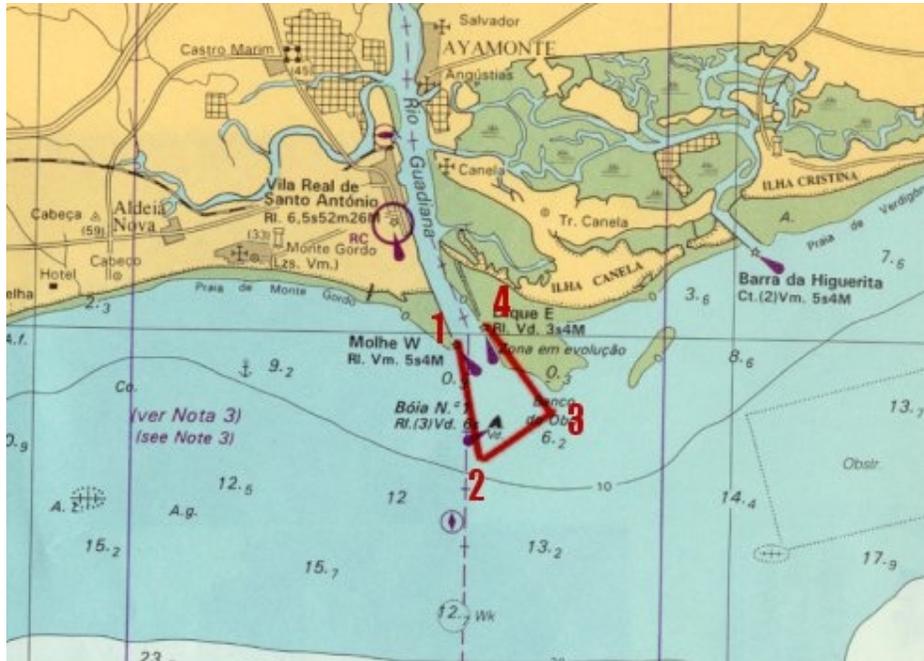


Figura 213: Limite de jusante do estuário do Guadiana e regiões de influência

Os resultados dos traçadores Lagrangeanos e de velocidade residual identificaram a região (B) ao longo das praias de Vila Real de S^{to}. António e Monte Gordo como a região que mais influencia o estuário. Este facto é consequência do desenvolvimento de um vórtice anticiclónico nesta região durante o fim da vazante e das suas implicações na entrada dessa água no estuário durante a enchente.

6 Conclusões

Neste documento são descritos os limites de jusante dos estuários Portugueses e a metodologia utilizada na sua definição, baseada no conhecimento dos processos de transporte obtidos por modelação matemática. A modelação matemática constitui a forma mais eficiente de tomar decisões sobre sistemas cuja caracterização exaustiva não é possível por insuficiência de dados de campo.

Como a caracterização exaustiva de um sistema através de dados de campo não é possível, a modelação matemática deve ser sempre utilizada na caracterização de sistemas naturais complexos, como é o caso dos sistemas costeiros. A modelação matemática tem ainda a vantagem de ajudar a definir planos de monitorização e de permitir o estudo de cenários de gestão.

Por todas estas razões a modelação matemática deve ser encarada como uma ferramenta de gestão logo que os dados de campo sejam suficientes para definir as condições de fronteira. À medida que novos dados de campo forem ficando disponíveis, a segurança no uso dos resultados do modelo e a qualidade dos mesmos vai aumentando. Este aspecto é particularmente importante no caso de modelos de substâncias não conservativas, como é o caso das envolvidas na qualidade da água.

7 Referências

- Almeida, M. João (2000). Estudo dos fluxos de nutrientes azotados nos sapais do estuário do Mira (Portugal). Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa para obtenção do grau de Doutor, Lisboa.
- Andrade, F.A. L.(1986) O Estuário do Mira: Caracterização Geral e Análise Quantitativa da Estrutura dos Macropovoamentos Bentónicos. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- APLD, Administração dos portos de Douro e Leixões, 1994. Caracterização do regime fluvial. Estudo da influência dos caudais de cheia na dinâmica do trecho fluvial do rio Douro, Relatório técnico do projecto “Estudos das obras necessárias à melhoria da acessibilidade e das condições de segurança na barra do Douro” (APLD, Administração dos portos de Douro e Leixões), 51 pp.
- Blanton, J. O., F. A. Andrade, And M. A. Ferreira. Effect of a Broad Shallow Sill on Tidal Circulation and Salt Transport in the Entrance to a Coastal Plain Estuary (Mira-Vila Nova de Milfontes, Portugal), *Estuaries*, 23,3 pp. 293-304.
- Bordalo e Sá, A.G.D., 1991, Ecologia do Estuário do rio Douro. Abordagem da Evolução Espaço Temporal e Inter-Relações na Componente Planctónica do Compartimento Microbiológico, Tese de doutoramento, Instituto de Ciências Biomédicas Abel Salazar, Porto.
- Decreto-Lei n.º 357/87, 17 de Novembro 1987; Criação da paisagem protegida do litoral de Esposende. Ministério do planeamento e da administração do território.
- DGP (1993), “ Medição de Velocidade de Correntes de Maré no Rio Mira”. Relatório. DGP. Maio de 1993.

- Dias, J. M., J. F., Lopes, I. Dekeyser, 1998, Caracterização da Distribuição de Salinidade e Temperatura na Ria de Aveiro, Portugal" - Proceedings do I Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica, CD-ROM, ISBN: 84-95172-10-0.
- Dias, J. M., J. F., Lopes, I. Dekeyser, 1999, *Hydrological characterization of Ria de Aveiro, Portugal, in early Summer*. *Oceanological Acta*, 22, 473-485.
- DRA – Norte (2000) - Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Leça 1ª Fase –Volume III - Análise (Rev.1 -2000/02/15). <http://www.dra-n.pt/tematicas/pbh/CDROM/body.html>
- DRA –Alentejo (2000) Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Mira
- Es. Carvalho, G.S., Gomes, F.V., Pinto, F.T. ; 2000; “Os estuários de Portugal e os planos de bacia hidrográfica”; EUROCOAST, Lisboa, Portugal.
- FBO Consultores; Tecnopor consultores; Idad- instituto do ambiente e desenvolvimento; 1995; Plano de Ordenamento da Orla Costeira: Caminha-Espinho: Estudos de Base; Dinâmica Costeira e Obras de Defesa; Instituto da Água/Ministério do Ambiente e Recursos Naturais. Pp. 110.
- Flindt, M., Nielsen, S., Marques, J., Pardal, M., Bocci, M., Bedoricchio, G., Salomonsen, J., Nielsen, S. & Jorgensen, S., 1997, Description of three shallow estuaries: Mondego River (Portugal), Roskilde (Denmark) and the Lagoon of Venice (Italy), *Ecological Modelling*, 102: 17-32
- Hidromod, 1995, *Estudos de Modelação Hidromorfológica do Estuário do Douro e zona Costeira Adjacente*. Relatório técnico do projecto ‘Estudos das Obras Necessárias à Melhoria da Acessibilidade e das Condições de Segurança na Barra do Douro’. (APLD, Administração dos Portos de Douro e Leixões)
- Hidromod, 1998, *Plano de Ordenamento da Ria de Aveiro, Caracterização da Situação de Referência, Estudos de Modelação Matemática*.
- Hidromod, Modelação em Engenharia, Lda., 1999, Estuário do Mondego: Modelação hidrodinâmica e hidromorfológica.

Hidorumo, ProceSl, Hidro4 and Prosistemas, 2000. Plano de bacia hidrográfica do Cávado. Volume síntese revisto. Pp. 110.

Hidorumo, ProceSl, Hidro4 and Prosistemas, 2000. Plano de bacia hidrográfica do rio Ave. Volume síntese revisto. Pp. 110.

HP- Hidrotécnica Portuguesa and Consulmar; 1995; “Alternativas para a melhoria da barra do Cávado - estudo base - Vol. 1”; Direcção Geral de Portos, navegação e transportes marítimos and ICN- Instituto de conservação da natureza. Pp. 90.

HP- Hidrotécnica Portuguesa and Consulmar; 1995; “fixação e correcção da barra do rio Cávado – estudo base - Vol. 2”; Direcção Geral de Portos, navegação e transportes marítimos and ICN- Instituto de conservação da natureza. Pp. 85.

<http://geocid-snig.cnig.pt/ImagensS/final/frames.html>

<http://geocid-snig.cnig.pt/ImagensS/final/frames.html>

<http://www.drarn-a.pt/pbh/index.html>

<http://www.igeoe.pt/Geral/Portugues/catalogo/cpapel/papel2.html>

IGeoE (2001) Instituto Geográfico do Exército

IGeoE (2001) Instituto Geográfico do Exército

<http://www.igeoe.pt/Geral/Portugues/catalogo/cpapel/papel2.html>

IHM, Instituto Hidrográfico da Marinha, 1994. Campanha de campo hidromorfológica para o estudo da barra do Douro, Relatório técnico do projecto “Estudos das obras necessárias à melhoria da acessibilidade e das condições de segurança na barra do Douro” (APLD, Administração dos Portos de Douro e Leixões), 123 pp.

INAG (2000), Plano de bacia hidrográfica do rio Minho,. Instituto Nacional da Agua, Lisboa.

INAG (2001) – Instituto da Água www.inag.pt

INAG, Instituto Nacional da Agua, 2000. Plano de bacia hidrográfica do rio Douro.

- Instituto da Conservação da Natureza (ICN); - APPLE. Problemas litorais da área de paisagem protegida do litoral de Esposende.
- Instituto Hidrográfico, 1987, *Levantamento Hidrográfico Costeiro do Cabo Mondego à Praia de Paramos.*
- Instituto Hidrográfico, 1987, *Levantamento Hidrográfico da Ria de Aveiro*, Tomos I,II e III
- Instituto Hidrográfico, 1987, *Recolha e Processamento de Dados de Marés, Correntes, Temperaturas e Salinidades da Ria de Aveiro. Anexo I- Apêndice 7. Marés no Canal de Mira em Maio de 87.*
- Instituto Hidrográfico, 1988, *Levantamento do Passo da Barra de Aveiro.*
- Instituto Hidrográfico, 1988, *Levantamento Hidrográfico da Ria de Aveiro*, Tomos IV e V.
- Instituto Hidrográfico, 1988, *Recolha e Processamento de Dados de Marés, Correntes, Temperaturas e Salinidades da Ria de Aveiro. Anexo I- Apêndice 5. Marés no Cais do Bico no Período de Jun87/Nov88.*
- Instituto Hidrográfico, 1988, *Recolha e Processamento de Dados de Marés, Correntes, Temperaturas e Salinidades da Ria de Aveiro. Anexo I- Apêndice 8. Marés nos Canais de S. Jacinto e Ovar no Período de Jun87/Set87.*
- Instituto Hidrográfico, 1988, *Recolha e Processamento de Dados de Marés, Correntes, Temperaturas e Salinidades da Ria de Aveiro. Anexo I- Apêndice 10. Marés no Rio Vouga no Período de Jan88/Mai88.*
- Instituto Hidrográfico, 1988, *Recolha e Processamento de Dados de Marés, Correntes, Temperaturas e Salinidades da Ria de Aveiro. Anexo I- Apêndice 12. Marés nos canais de Ovar e do Carregal a montante da Ponte da Varela no Período de Out87/Dez87.*
- Instituto Hidrográfico, 1989, *Correntes em S. Jacinto - Ria de Aveiro. Anexo II- Apêndice 6.*

- Instituto Hidrográfico, 1989, *Correntes na Ponte Cais 2 - Ria de Aveiro. Anexo II- Apêndice 8.*
- Instituto Hidrográfico, 1989, *Correntes na Sacor - Ria de Aveiro. Anexo II- Apêndice 7.*
- Instituto Hidrográfico, 1989, *Marés na Costa Nova e na Barra de Aveiro, Observações de 1Mai87 a 10Mai88. Anexo I- Apêndice 2.*
- Instituto Hidrográfico, 1989, *Recolha e Processamento de Dados de Marés, Correntes, Temperaturas e Salinidades da Ria de Aveiro. Anexo I- Apêndice 3. Marés na Ponte Cais 2 no Período de Jul87/Jul88.*
- Instituto Hidrográfico, 1989, *Recolha e Processamento de Dados de Marés, Correntes, Temperaturas e Salinidades da Ria de Aveiro. Anexo I- Apêndice 4. Marés no Parrachil no Período de Mai87/Nov88.*
- Instituto Hidrográfico, 1989, *Recolha e Processamento de Dados de Marés, Correntes, Temperaturas e Salinidades da Ria de Aveiro. Anexo I- Apêndice 6. Marés na Varela no Período de Jun87/Mai88.*
- Instituto Hidrográfico, 1989, *Recolha e Processamento de Dados de Marés, Correntes, Temperaturas e Salinidades da Ria de Aveiro. Anexo I- Apêndice 9. Marés nos Canais de Ílhavo e da Cidade nos Períodos de Mar88/Mai88 e Set88/Nov88.*
- Instituto Hidrográfico, 1989, *Recolha e Processamento de Dados de Marés, Correntes, Temperaturas e Salinidades da Ria de Aveiro. Anexo I- Apêndice 11. Marés na Bacia do Laranjo no Período de Jun88/Out87.*
- Instituto Hidrográfico, 1989, *Recolha e Processamento de Dados de Marés, Correntes, Temperaturas e Salinidades da Ria de Aveiro. Anexo II- Apêndice 2. Medição de Correntes na Barra.*
- Instituto Hidrográfico, 1989, *Recolha e Processamento de Dados de Marés, Correntes, Temperaturas e Salinidades da Ria de Aveiro. Anexo II- Apêndice 9. Medição de Correntes na Vista Alegre (Ponte da Gafanha).*

- Instituto Hidrográfico, 1989, *Recolha e Processamento de Dados de Marés, Correntes, Temperaturas e Salinidades da Ria de Aveiro. Anexo II- Apêndice 10. Medição de Correntes na Lota (Clube Naval).*
- Instituto Hidrográfico, 1989, *Recolha e Processamento de Dados de Marés, Correntes, Temperaturas e Salinidades da Ria de Aveiro. Anexo II- Apêndice 11. Medição de Correntes no Cais do Bico.*
- Instituto Hidrográfico, 1989, *Recolha e Processamento de Dados de Marés, Correntes, Temperaturas e Salinidades da Ria de Aveiro. Anexo II- Apêndice 12. Medição de Correntes na Varela.*
- Instituto Hidrográfico, 1989, *Recolha e Processamento de Dados de Marés, Correntes, Temperaturas e Salinidades da Ria de Aveiro. Anexo II- Apêndice 13. Medição de Correntes no Rio Novo do Príncipe.*
- Instituto Hidrográfico, 1989, *Recolha e Processamento de Dados de Marés, Correntes, Temperaturas e Salinidades da Ria de Aveiro. Anexo II- Apêndice 14. Medição de Correntes em Cacia (Ponte do Outeiro).*
- Instituto Hidrográfico, 1989, *Recolha e Processamento de Dados de Marés, Correntes, Temperaturas e Salinidades da Ria de Aveiro. Anexo II- Apêndice 14. Medição de Correntes em Cacia (Ponte do Outeiro).*
- Instituto Hidrográfico, 1990, *Propagação da Maré na Ria de Aveiro com base nas Observações de 1987 e 1988.*
- Instituto Hidrográfico, 1990, *Propagação da Maré na Ria de Aveiro com base nas Observações de 1987 e 1988.*
- Le Provost, C., F. Lyard, J.M. Molines, M.L. Genco and F. Rabilloud, 1998. *A Hydrodynamic Ocean Tide Model Improved by assimilating a satellite altimeter derived dataset. J. Geophys. Res. Vol. 103 N. C3, 1998.*
- Marques, (1990) J. Amphipoda (Crustacea) bentónicos da Costa Portuguesa: estudo taxonómico, ecológico e biogeográfico. Tese de doutoramento em Ecologia Animal, FCT, Universidade de Coimbra, 394 pp.

- Oliver, M. A. e R. Webster, 1990: "*Kriging: a method of interpolation for geographical information system*", *INT. J. Geographical Information Systems*, 1990, VOL. 4, No. 3, 313-332
- Peixeiro, L.; A. Silva, ,1999. Melhoria da acessibilidade e as condições de segurança na barra do Douro, 1ª Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, AIPCN-PIANC, Associação internacional de navegação, pp. 119-134.
- PGIRH/N (1990) Projecto de gestão integrada dos recursos hídricos do norte; "Monografias sobre as bacias hidrográficas do norte de Portugal – a bacia hidrográfica do rio Cávado"; Direcção geral dos recursos naturais, Ministério do ambiente e recursos naturais. Pp. 70.
- PGIRH/N (1990) Projecto de gestão integrada dos recursos hídricos do norte; "Monografias sobre as bacias hidrográficas do norte de Portugal – a bacia hidrográfica do rio Ave"; Direcção geral dos recursos naturais, Ministério do ambiente e recursos naturais. Pp. 70.
- Pinho, J.L.S.; (2000); Aplicação de modelação matemática ao estudo da hidrodinâmica e da qualidade da água em zonas costeiras. Universidade do Minho; Dissertação para o grau de doutor em engenharia civil. Pp. 395.
- Portaria nº 565/90, 19 de Julho 1990; Regulamento de pesca no rio Cávado. Ministério da agricultura, pescas e alimentação.
- Silva, A. "Implementação de um modelo hidromorfológico para a barra do Douro. Contribuição para a compreensão do sistema"
- SNIG (2001) Sistema Nacional de Informação Geográfica
- Torres, J.M., I.M. Bravo, J. Martín, L. Fernandes, (1997) Estudio del estuario y pluma del río Miño utilizando imágenes landsat-tm y ers-1, Em: Teledetección aplicada a la gestión de recursos naturales y medio litoral marino, Ed. Carlos Hernández Sande, Juan E. Arias Rodríguez, Asociación Española de Teledetección, Universidade de Santiago de Compostela, (Santiago de Compostela : Tórculo) pp. 139-142.

- Torres, J.M., M.M. Sacau, A. Rodríguez and I. Bravo, (2000) Estudio batimétrico del estuario del río Miño utilizando imágenes Landsat-TM, Proceedings of the 3º Simposio sobre a margem ibérica atlántica, Faro, pp. 59-60.
- Valente, A.; Cruz, M.J.; Pinho, S.; Silva, R.; Serpa, D.; 1999. As artes de pesca profissional no rio Cávado. 4º congresso nacional de áreas protegidas. Lisboa.
- Vieira, N., M. Mateus and H. Coelho, 2000: *Temperature, Salinity and Geostrophic Currents, Distributions in the Iberian Atlantic Margin. Proceedings of the 3^d Symposium on the Iberian Atlantic Margin.*
- Vilas, F. and L. Somoza, (1984) El estuario del río Miño: Observaciones previas de su dinámica, Thalassas, Vol. 2, n. 1, pp. 87-92.