



# ESTUDO DE IMPACTE AMBIENTAL AEROPORTO DO MONTIJO E RESPETIVAS ACESSIBILIDADES

## VOLUME III – ANEXOS TEMÁTICOS

### ANEXO 3 – ELEMENTOS DE PROJETO

JULHO 2019



GRUPO ANA

PROFICO AMBIENTE E ORDENAMENTO, LDA.

**Morada:** Rua Alfredo da Silva 11-B 1300-040 Lisboa

**E-mail:** ambiente@profico.pt

**Tel.:** (+351) 21 361 93 60

**Fax:** (+351) 21 361 93 69

[www.proficoambiente.pt](http://www.proficoambiente.pt)



PROFICO AMBIENTE E ORDENAMENTO, LDA.

EIA DO AEROPORTO DO MONTIJO E RESPETIVAS ACESSIBILIDADES • VOLUME III – ANEXOS TEMÁTICOS

ANEXO 3 – ELEMENTOS DE PROJETO

JULHO 2019 • VERSÃO 01



PROFICO AMBIENTE E ORDENAMENTO, LDA.

**Morada:** Rua Alfredo da Silva 11-B 1300-040 Lisboa

**E-mail:** ambiente@profico.pt

**Tel.:** (+351) 21 361 93 60

**Fax:** (+351) 21 361 93 69

**Capital social:** 30 000,00 €

**Contribuinte Nº:** 505 198 290

COM O AMBIENTE NA LIDERANÇA

Estudos de Impacte Ambiental

Avaliação Ambiental Estratégica

Auditorias Ambientais

Gestão / Desempenho Ambiental

Acompanhamento de Obras - Ambiente e Segurança

Planos e Relatórios Ambientais de Sustentabilidade

## ÍNDICE GERAL

### **VOLUME I – RESUMO NÃO TÉCNICO**

### **VOLUME II – RELATÓRIO TÉCNICO**

- A – Capítulos Introdutórios e Descrição do Projeto
- B – Caracterização da Situação de Referência e sua Evolução sem Projeto
- C – Impactes, Medidas de Minimização, Monitorização e Conclusões

### **VOLUME III – ANEXOS TEMÁTICOS**

- ANEXO 1 – Equipa Técnica
- ANEXO 2 – Elementos Base
- ANEXO 3 – Elementos de Projeto
- ANEXO 4 – Consulta às Entidades
- ANEXO 5 – Recursos Hídricos
- ANEXO 6 – Sistemas Ecológicos
- ANEXO 7 – Acessibilidades e Transportes
- ANEXO 8 – Ambiente Sonoro
- ANEXO 9 – Qualidade do Ar Ambiente
- ANEXO 10 – Socioeconomia
- ANEXO 11 – Saúde Humana - Qualidade do Ar
- ANEXO 12 – Património Cultural
- ANEXO 13 – Análise de Risco
- ANEXO 14 – Ordenamento do Território
- ANEXO 15 – Critérios de Avaliação de Impactes
- ANEXO 16 – Síntese de Impactes
- ANEXO 17 – Avaliação Global

### **VOLUME IV – ANEXO CARTOGRÁFICO**

- 1 – ENQUADRAMENTO
- 2 – SOLOS E CAPACIDADE DE USO DO SOLO
- 3 – RECURSOS HÍDRICOS
- 4 – SISTEMAS ECOLÓGICOS
- 5 – USO DO SOLO E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO
- 6 – PAISAGEM
- 7 – AMBIENTE SONORO
- 8 – PATRIMÓNIO CULTURAL

PROFICO AMBIENTE E ORDENAMENTO, LDA.

EIA DO AEROPORTO DO MONTIJO E RESPETIVAS ACESSIBILIDADES • VOLUME III – ANEXOS TEMÁTICOS

ANEXO 3 – ELEMENTOS DE PROJETO

JULHO 2019 • VERSÃO 01

*(Página intencionalmente deixada em branco)*



## ANEXO 3 – ELEMENTOS DE PROJETO



*(Página intencionalmente deixada em branco)*

## ÍNDICE

- Anexo 3.1 – Peças Desenhadas
- Anexo 3.2 – Hidrodinâmica e Transporte de Sedimentos
- Anexo 3.3 – Acesso Rodoviário
- Anexo 3.4 – Estudos DRota NAV



*(Página intencionalmente deixada em branco)*



## ANEXO 3.1 – PEÇAS DESENHADAS

*(Página intencionalmente deixada em branco)*

# ÍNDICE

- Anexo 3.1 – Peças Desenhadas
  - A. Airside
    - A.0 - Layout Geral (Existente);
    - A.1 - Layout Proposto - Fase Inicial;
    - A.2 - Layout Proposto - Fase Final;
    - A.3A – Alternativa 1 - Solução em Aterro - Perfis Longitudinais
    - A.3B – Alternativa 2 - Solução em Estrutura - Perfis Longitudinais
    - A.3C – Alternativa 3 - Solução Mista - Perfis Longitudinais
    - A.4 - Layout Lado Ar – Geometria;
    - A.5 - Limite Proposto do Aeroporto;
    - A.6A - Alternativa 1 - Solução em Aterro - Arranjo Geral - Planta;
    - A.6B - Alternativa 1 - Solução em Aterro – Tratamento dos Solos;
    - A.7 - Extensão da Pista Alt.1 - Proc. Construtivo;
    - A.8A - Alternativa 2 - Solução em Estrutura - Arranjo Geral - Planta;
    - A.8B - Alternativa 2 – Estrutura Porticada Fundada em Estaca
    - A.9A - Extensão da Pista Alt. 2 - Cortes e Porm. Estrutura (1/2);
    - A.9B - Extensão da Pista Alt. 2 - Cortes e Porm. Estrutura (2/2);
    - A.10A - Alternativa 3 - Solução Mista - Arranjo Geral - Planta;
    - A.10B - Alternativa 3 - Solução Mista – Estrutura e Aterro Tratado;
    - A.11 - Extensão da Pista Alt.3 - Estr. e Aterro Tratado;
    - A.12 - Drenagem - *Layout* Proposto;
    - A.13A - Drenagem - Pormenores Tipo (1/2);
    - A.13B - Drenagem - Pormenores Tipo (2/2);
    - A.14 – Sistema de Ajudas de Navegacao Proposto;
    - A.15 - Superfícies Limitadoras de Obstáculos.
  - B. Terminal
    - B.1 - Terminal – Arquitetura.
  - C. Landside
    - C.1 - Esboco Corografico;
    - C.2 - Planta Geral;
    - C.3 - Pavimentacao - Planta Geral;
    - C.4 - Paisagismo - Via Acesso Principal;
    - C.5 - Paisagismo - Parques e Terminal;
    - C.6 – Sistema de Abastastecimento de Água - Planta Geral;
    - C.7 - Sistema de Abastastecimento de Água - Planta Rede Distr. Agua;
    - C.8 - Sistema de Drenagem de Águas Residuais - Planta Geral;
    - C.9 - Sistema de Drenagem de Águas Residuais - Parques e vias serviços;
    - C.10 - Sistema de Drenagem de Águas Pluviais - Planta Geral.
  - D. GOC

- D.1 – GOC - Perspetivas 3D de Volumetrias
- D.2 – GOC - Plot Plan
- D.3 – GOC – Rede de Distribuição de Água Potável – P&ID Planimétrico
- D.4 - GOC – Rede de Drenagem das Águas Residuais Domésticas – P&ID Planimétrico
- D.5 – GOC - Sistema de Drenagem de águas Pluviais, Parques e Vias de Serviço – Planta
- D.6 – GOC - Redes de Drenagem das Águas Residuais Pluviais e Oleosas – PFD
- D.7 – GOC - Redes de Drenagem das Águas Residuais Pluviais e Oleosas – P&ID Planimétrico
- D.8 – GOC – Tratamento de Água Residual Oleosa – P&ID
- E. Acesso Rodoviário
  - E.1.A - Estudo Rodoviário – Solução Base – Fotoplano – Ligação à A12;
  - E.1.B – Estudo Rodoviário – Solução Alternativa – Fotoplano – Ligação à A12
  - E.2.A - Estudo Rodoviário – Solução Base – Planta e Perfil Longitudinal – Ligação à A12 (01/02);
  - E.2.B - Estudo Rodoviário – Solução Base – Planta e Perfil Longitudinal – Ligação à A12 (02/02);
  - E.3.A - Estudo Rodoviário – Solução Base – Planta Geral – Nó do Aeroporto;
  - E.3.B - Estudo Rodoviário – Solução Base – Perfil Longitudinal – Ramos A, B e C
  - E.4.A - Estudo Rodoviário – Solução Base – Planta Geral – Nó de Ligação Montijo-Alcochete
  - E.4.B - Estudo Rodoviário – Solução Base – Perfil Longitudinal – Ramos A e B
  - E.4.C - Estudo Rodoviário – Solução Base – Perfil Longitudinal – Ramos C e D
  - E.4.D - Estudo Rodoviário – Solução Base – Perfil Longitudinal – Restabelecimento 3
  - E.5.A - Estudo Rodoviário – Solução Base – Planta Geral – Nó da A12
  - E.5.B - Estudo Rodoviário – Solução Base – Perfil Longitudinal – Ramos A, B e C
  - E.5.C - Estudo Rodoviário – Solução Base – Perfil Longitudinal – Ramos A+B e D
  - E.5.D - Estudo Rodoviário – Solução Base – Perfil Longitudinal – Ramo E
  - E.6.A - Estudo Rodoviário – Solução Base – Planta e Perfil Longitudinal – Restabelecimento 1 – Estrada do Seixalinho
  - E.6.B - Estudo Rodoviário – Solução Base – Perfil Longitudinal – Restabelecimentos 3 e 4
  - E.6.C - Estudo Rodoviário – Solução Base – Perfil Longitudinal – Restabelecimentos 4A
  - E.7 - Estudo Rodoviário – Solução Alternativa – Planta e Perfil Longitudinal – Solução Alternativa
  - E.8.A - Estudo Rodoviário – Solução Alternativa – Planta Geral – Nó do Aeroporto;

- E.8.B - Estudo Rodoviário – Solução Alternativa – Perfil Longitudinal – Ramos A, B e C;
- E.9.A - Estudo Rodoviário – Solução Alternativa – Planta Geral – Nó de Ligação Montijo-Alcochete;
- E.9.B - Estudo Rodoviário – Solução Alternativa – Perfil Longitudinal – Ramos A e B;
- E.9.C - Estudo Rodoviário – Solução Alternativa – Perfil Longitudinal – Ramos C e D;
- E.9.D - Estudo Rodoviário – Solução Alternativa – Perfil Longitudinal – Restabelecimento 2;
- E.10.A - Estudo Rodoviário – Solução Alternativa – Planta Geral – Nó da A12;
- E.10.B - Estudo Rodoviário – Solução Alternativa – Perfil Longitudinal – Ramos A e A+B
- E.10.C - Estudo Rodoviário – Solução Alternativa – Perfil Longitudinal – Ramos B e C
- E.10.D - Estudo Rodoviário – Solução Alternativa – Perfil Longitudinal – Ramos D
- E.11.A - Estudo Rodoviário – Solução Alternativa – Planta e Perfil Longitudinal – Restabelecimento 1 – Estrada do Seixalinho
- E.11.B - Estudo Rodoviário – Solução Alternativa – Perfil Longitudinal – Restabelecimentos 3 e 4
- E.11.C - Estudo Rodoviário – Solução Alternativa – Perfil Longitudinal – Restabelecimentos 4<sup>a</sup>
- E.12.A - Estudo Rodoviário – Perfis Transversais Tipo – Ligação A12/Aeroporto
- E.12.B - Estudo Rodoviário – Perfis Transversais Tipo – Ramos dos Nós
- E.12.C - Estudo Rodoviário – Perfis Transversais Tipo – Ramos dos Nós
- E.12.D - Estudo Rodoviário – Perfis Transversais Tipo – Rotundas
- E.13 - Estudo Rodoviário – Perfis Transversais Tipo – Restabelecimentos
- E.14.A - Estudo Rodoviário – Solução Base – Alargamento da A12 – Planta Geral
- E.14.B - Estudo Rodoviário – Solução Alternativa – Alargamento da A12 – Planta Geral
- E.15.A - Estudo Rodoviário – Solução Base – Drenagem – Bacias Hidrográficas
- E.15.B - Estudo Rodoviário – Solução Alternativa – Drenagem – Bacias Hidrográficas
- E.16.A - Estudo Rodoviário – Solução Base – Sistema de Tratamento – Ligação à A12
- E.16.A - Estudo Rodoviário – Solução Alternativa – Sistema de Tratamento – Ligação à A12

*(Página intencionalmente deixada em branco)*



## ANEXO 3.2 – HIDRODINÂMICA E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

*(Página intencionalmente deixada em branco)*

**ANA – AEROPORTOS DE PORTUGAL, S.A.**  
**DDIA - Direcção de Desenvolvimento de Infraestruturas Aeroportuárias**

**ESTUDOS DE ENGENHARIA PARA A EXTENSÃO DA PISTA 01-19**  
**DO FUTURO AEROPORTO DO MONTIJO**

**CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA E IMPACTES –**  
**HIDRODINÂMICA E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

**RELATÓRIO FINAL**

**DEZEMBRO, 2017**



**CONSULMAR**  
Projectistas e Consultores, Lda.



**ANA – AEROPORTOS DE PORTUGAL, S.A.**  
**DDIA - Direcção de Desenvolvimento de Infraestruturas Aeroportuárias**

**ESTUDOS DE ENGENHARIA PARA A EXTENSÃO DA PISTA 01-19**  
**DO FUTURO AEROPORTO DO MONTIJO**

**CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA E IMPACTES –**  
**HIDRODINÂMICA E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

**RELATÓRIO FINAL**  
*(O.1708.00)*

## **CONTROLO**

### **VERSÃO INICIAL**

<b>Data do documento</b>	<b>Autor (sigla)</b>	<b>Responsável pela revisão (sigla)</b>	<b>Responsável pela verificação e aprovação (sigla)</b>
Dezembro 2017	HIDROMOD	EMM	AGC

## **ALTERAÇÕES**

<b>Versão n.º</b>	<b>Data</b>	<b>Responsável pela alteração (sigla)</b>	<b>Responsável pela revisão (sigla)</b>	<b>Responsável pela verificação e aprovação (sigla)</b>	<b>Observações</b>



**ANA – AEROPORTOS DE PORTUGAL, S.A.**  
**DDIA - Direcção de Desenvolvimento de Infraestruturas Aeroportuárias**

**ESTUDOS DE ENGENHARIA PARA A EXTENSÃO DA PISTA 01-19  
DO FUTURO AEROPORTO DO MONTIJO**

**CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA E IMPACTES –  
HIDRODINÂMICA E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

**RELATÓRIO FINAL**

**ÍNDICE DO TEXTO**

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. METODOLOGIA .....	2
2.1. Informação batimétrica.....	2
2.2. Malhas de cálculo .....	3
2.3. Validação do modelo numérico .....	6
3. CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA .....	7
3.1. Propagação da maré.....	7
3.2. Afluências de água doce ao Estuário .....	8
3.3. Padrões de Circulação à escala do estuário .....	8
3.4. Padrões de circulação na zona de interesse .....	9
3.4.1. Campos de correntes instantâneos .....	10
3.4.2. Campo de intensidade média e máxima de corrente .....	12
3.5. Prismas de maré .....	15
3.6. Tempos de renovação da água.....	16
3.7. Agitação marítima .....	16
3.8. Níveis de água extremos.....	19
3.9. Dinâmica sedimentar.....	21
4. IMPACTES .....	25
4.1. Alternativas .....	25
4.2. Níveis máximos atingidos junto à obra .....	26
4.3. Hidrodinâmica .....	27
4.3.1. Alternativa em Aterro.....	30
4.4. Alternativa em Estacas.....	33
4.5. Dinâmica sedimentar.....	35
5. CONCLUSÕES.....	39

6. REFERÊNCIAS .....	41
7. ANEXO I – IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO E DE SEDIMENTOS FINOS.....	43
7.1. Malhas de cálculo.....	43
7.2. Configuração do modelo hidrodinâmico .....	45
7.3. Validação .....	48
7.3.1. Nível do mar .....	48
7.3.2. Correntes.....	49
7.3.3. Turbidez e sedimentos finos.....	50



## Índice de Figuras

Figura 1. Informação batimétrica disponível para o estuário do Tejo. A informação batimétrica corresponde a uma compilação de levantamentos entre 1964 e 2015. ....	2
Figura 2. Modelo digital de terreno no referencial hidrográfico com uma resolução espacial de 2 m (fonte: DGT, MDT2m_2008).....	3
Figura 3. Domínio modelação implementado para geração da maré na Península Ibérica (6 km de resolução) e região centro/sul de Portugal para propagação da maré (1 km de resolução).....	4
Figura 4. Domínio do Estuário do Tejo (200 m de resolução). ....	4
Figura 5. Domínio que permite descrever os processos hidrodinâmicos à escala da Baía do Montijo com detalhe (25 m de resolução). ....	5
Figura 6. Domínio local que inclui a zona intertidal adjacente à base aérea do Montijo (10 m de resolução).....	5
Figura 7. Estações de monitorização com dados disponíveis no Estuário do Tejo (adaptado de Franz et al., 2014). ....	6
Figura 8. Amplitude da M2 calculada com o modelo MOHID. No gráfico XY as estações estão ordenadas de jusante (Cascais) para montante (Vila Franca de Xira). Neste mesmo gráfico são apresentados os resultados do modelo e análise harmónica baseada nos dados de nível de 1972 (Lemos, 1972). ....	8
Figura 9. Intensidade máxima das correntes obtidas pelo modelo MOHID 3D baroclínico entre Setembro de 2010 a Junho de 2011. O modelo foi forçado com maré, caudal do rio (do SNIRH) e fluxos atmosféricos.....	9
Figura 10. Variação da maré astronómica no marégrafo de Cascais. O período simulado está assinalado a cinzento. ....	10
Figura 11. Exemplo da distribuição do campo de correntes instantâneos representativos da situação de referência em situação de vazante de maré viva (figura inferior - detalhe do campo de correntes na zona de interesse).....	11
Figura 12. Exemplo da distribuição do campo de correntes instantâneos representativos da situação de referência em situação de enchente de maré viva (figura inferior - detalhe do campo de correntes na zona de interesse).....	12
Figura 13. Campo de intensidade média da corrente num ciclo de maré de maré viva equinocial na situação de referência. ....	13
Figura 14. Campo de intensidade máxima da corrente num ciclo de maré de maré viva equinocial na situação de referência.....	13
Figura 15. Campo de intensidade média da corrente num ciclo de maré de maré viva equinocial coincidente com uma sobrelevação com um tempo de retorno de 100 anos na situação de referência.....	14
Figura 16. Campo de intensidade máxima da corrente num ciclo de maré de maré viva equinocial coincidente com uma sobrelevação com um tempo de retorno de 100 anos na situação de referência. ....	14
Figura 17. Secções de controlo para cálculo dos caudais de enchente e vazante no Canal da Barra e na bacia do Montijo. ....	15
Figura 18. Caudais de enchente e vazante na secção de controlo da bacia do Montijo em um ciclo de marés vivas-mortas para uma situação de sobrelevação. ....	16

Figura 19. Altura significativa obtida para os meses de Julho e Agosto de 2012: figura da direita – valores médios, figura da esquerda – valores máximos. ....	17
Figura 20. Imagem de satélite disponibilizada pelo serviço Google Earth onde se pode observar um grupo de ondas com origem na esteira de um navio localizado no limite esquerdo da imagem. ....	18
Figura 21. Imagem captada no estuário do Tejo onde uma onda gerada de forma periódica pelos navios da Transtejo & Soflusa tem altura suficiente para ser surfada (fonte: youtube). ....	18
Figura 22. Variação Secular do Nível Médio do Mar em CASCAIS, Antunes (2016), referencial topográfico. ....	19
Figura 23. Localização de pontos para os quais se analisou a variação do nível do mar simulados pelo modelo hidrodinâmico para uma situação de maré viva equinocial. ....	20
Figura 24. Variação do nível do mar simulado pelo modelo hidrodinâmico MOHID para os pontos apresentados na Figura 23 para uma situação de maré viva equinocial com (período de retorno de 100 anos) e sem sobrelevação. ....	21
Figura 25. Estação de monitorização ST65 (Franz et al., 2014). ....	22
Figura 26. Concentração de sedimentos finos medidos na estação ST65 (Figura 25) função do percentil (50% - concentração mais frequente, 100% - concentração máxima). ....	22
Figura 27. Distribuição do tipo de sedimentos de fundo no estuário do Tejo. Dados (figura do lado esquerdo) Canário et al. (2007) e resultados de modelo (figura do lado direito) Franz et al. (2017). ....	23
Figura 28. Praias no estuário interno do Tejo (Freire et al., 2006). ....	23
Figura 29. Imagem de satélite disponibilizada pelo serviço Google Maps para a zona de interesse. ....	24
Figura 30. Localização do aterro previsto para as alternativas 1 e 2 (Alternativa Aterro). ....	25
Figura 31. Localização das estacas da alternativa 3 (ou Alternativa Estacas). ....	26
Figura 32. Corte transversal para a Alternativa 1. ....	26
Figura 33. Variação de nível no ponto 2 (ver Figura 23) em situação de maré viva equinocial para 3 cenários: linha vermelha –maré astronómica sem sobrelevação, linha cor de laranja - maré viva + sobrelevação com período de retorno de 100 anos, linha a verde – maré viva + sobrelevação com período de retorno de 100 anos + alterações climáticas no horizonte de 100 anos. ....	27
Figura 34. Intensidade média das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio atual (cenário 1). ....	28
Figura 35. Intensidade média das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio para um horizonte de 100 anos (cenário 2). ....	29
Figura 36. Intensidade máxima das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio atual (cenário 1). ....	29
Figura 37. Intensidade máxima das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio para um horizonte de 100 anos (cenário 2). ....	30
Figura 38. Alternativa em Aterro. Alteração da intensidade média das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio atual. ....	31
Figura 39. Alternativa em Aterro. Alteração da intensidade média das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio para um horizonte de 100 anos. ....	31

Figura 40. Alternativa em Aterro. Alteração da intensidade máxima das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio atual. ....	32
Figura 41. Alternativa em Aterro. Alteração da intensidade máxima das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio para um horizonte de 100 anos. ....	32
Figura 42. Alternativa em Estacas. Alteração da intensidade média das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio atual. ....	33
Figura 43. Alternativa em Estacas. Alteração da intensidade média das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio para um horizonte de 100 anos. ....	34
Figura 44. Alternativa em Estacas. Alteração da intensidade máxima das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio atual. ....	34
Figura 45. Alternativa em Estacas. Alteração da intensidade máxima das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio para um horizonte de 100 anos. ....	35
Figura 46. Sedimentação de finos ao fim de um mês de simulação. Unidades em cm/ano. ....	36
Figura 47. Diferenças de taxas de sedimentação de finos entre a alternativa em Aterro e a situação de referência para o cenário atual de frequência de navios de passageiros. ....	37
Figura 48. Diferenças de taxas de sedimentação de finos entre a alternativa em Aterro e a situação de referência para um cenário em que a frequência de navios de passageiros é 4 vezes superior à atual. ....	38
Figura 49. Domínio modelação implementado para geração da maré na Península Ibérica (6 km de resolução) e região centro/sul de Portugal para propagação da maré (1 km de resolução). ....	44
Figura 50. Domínio do Estuário do Tejo (200 m de resolução). ....	44
Figura 51. Domínio local que inclui os canais de navegação de acesso ao TCB (25 m de resolução). ....	45
Figura 52. Configuração da cascata de modelos utilizada para simular os processos no estuário do Tejo. O nível 3 corresponde a um modelo local para a zona do Barreiro com uma resolução de 25 metros. ....	48
Figura 53. Comparação entre o nível de maré medido no marégrafo de Cascais (pontos roxo) e o previsto pelo modelo MOHID (linha preta) para o período de 1 de janeiro a 31 de dezembro de 2012 (A), para um ciclo de maré viva-morta em agosto de 2012 (B) e para 3 dias em agosto de 2012 (C). ....	49
Figura 54. Comparação entre as correntes medidas no local B1 (pontos roxo) e os valores previstos pelo modelo MOHID (linha preta) para o período de 1 de julho a 31 de dezembro de 2012 (A), para um ciclo de maré viva-morta em agosto de 2012 (B), para 5 dias de marés vivas em agosto de 2012 (C) e 5 dias de marés mortas em agosto de 2012. ....	51
Figura 55. Comparação entre as medidas de turbidez no local B1 (pontos verde) e os sedimentos coesivos previstos pelo modelo MOHID (linha preta) para o período de 1 de janeiro a 31 de dezembro de 2012 (A), para um período de seis meses (1 de junho a 31 de dezembro de 2012, B), para um ciclo de maré viva-morta em julho de 2012 (C), para 15 dias de marés vivas em julho de 2012 (D) e 4 dias de marés vivas em julho de 2012 (E). ....	52
Figura 56. Comparação entre as medidas de turbidez no local B1 (pontos verde) e a Clorofila-a medida (linha verde) para um ciclo de maré viva-morta em julho de 2012 e 4 dias de marés vivas em julho de 2012 (A). ....	53
Figura 57. Comparação dos sedimentos coesivos simulados para o ano de 2012 e o mínimo, mediana e máximo mensal obtido com base nas medidas entre 2004 e 2012 nos locais ST12, ST21, ST23 e ST32. ....	54

Figura 58. Comparação dos sedimentos coesivos simulados para o ano de 2012 e o mínimo, mediana e máximo mensal obtido com base nas medidas entre 2004 e 2012 nos locais ST41, ST43, ST51 e ST53. ....	55
Figura 59. Comparação dos sedimentos coesivos simulados para o ano de 2012 e o mínimo, mediana e máximo mensal obtido com base nas medidas entre 2004 e 2012 nos locais ST54, ST61, ST64 e ST65. ....	55
Figura 60. Comparação dos sedimentos coesivos simulados para o ano de 2012 e o mínimo, mediana e máximo mensal obtido com base nas medidas entre 2004 e 2012 nos locais ST71, ST73, ST74 e ST81. ....	56
Figura 61. Comparação dos sedimentos coesivos simulados para o ano de 2012 e o mínimo, mediana e máximo mensal obtido com base nas medidas entre 2004 e 2012 nos locais ST84, ST82, ST91. ....	56
Figura 62. Concentrações de sedimentos coesivos na coluna de água na zona de estudo na situação de referência. A concentração corresponde ao P90 das medidas (2004 a 2012) nos locais. ....	57

## **Índice de Tabelas**

Tabela 1. Prismas de maré (m <sup>3</sup> ) em marés mortas e marés vivas, na referência na secção de controlo da “bacia do Montijo”. As diferenças em percentagem nos prismas de maré entre as soluções de projeto e a referência também são apresentadas. ....	16
Tabela 2. Resumo do sistema de modelação que permite simular a hidrodinâmica e transporte de sedimentos no Estuário do Tejo. ....	47
Tabela 3. Parâmetros estatísticos obtidos entre as medidas do nível do mar e os valores previstos pelo modelo no local do mareógrafo de Cascais para o período de 1 de Janeiro a 31 de Dezembro de 2012. ....	49
Tabela 4. Parâmetros estatísticos obtidos entre as medidas de correntes e os valores previstos pelo modelo no local B1 para o período de 1 de julho a 31 de dezembro de 2012. ....	51



## 1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho enquadra-se no concurso promovido pela ANA Aeroportos de Portugal para a realização de Estudos de Engenharia para a Extensão da Pista 01-19 do Futuro Aeroporto do Montijo.

Este relatório visa a **caracterização da situação de referência e os impactes das várias alternativas construtivas propostas para extensão do aeroporto** para as seguintes componentes:

- Hidrodinâmica, designadamente correntes e variação do nível do mar;
- Dinâmica sedimentar.

Neste relatório é feita uma descrição da metodologia seguida. Esta encontra-se alicerçada no sistema de modelação MOHID (<http://www.mohid.com>), em dados de campo e publicações científicas. Numa segunda fase é feita uma descrição da situação de referência focada na área de interesse (zona intertidal adjacente à base aérea do Montijo). Por fim, são quantificados os impactes da obra sobre as componentes de hidrodinâmica e de dinâmica sedimentar.

## 2. METODOLOGIA

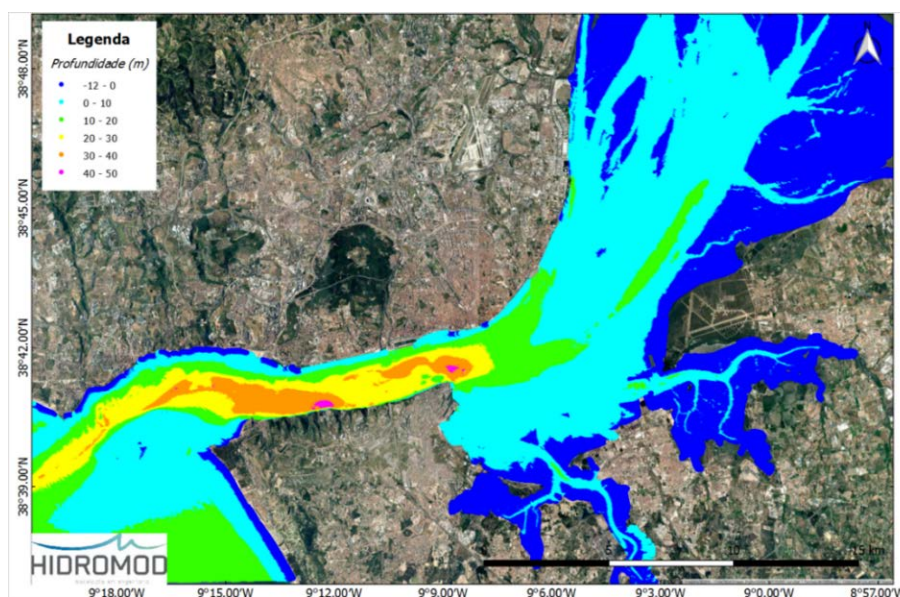
A caracterização da situação de referência e a quantificação dos impactos da obra (hidrodinâmica e dinâmica sedimentar) tem por base dados de campo e uma implementação do sistema de modelação MOHID ao estuário do Tejo. Esta caracterização é complementada com bibliografia focada na área de interesse.

Neste capítulo é feita uma descrição dos dados utilizados na validação/implementação do modelo e das malhas de cálculo assumidas. Em anexo é feita uma descrição detalhada da implementação e da validação do modelo (Anexo I – Implementação e validação do modelo hidrodinâmico).

### 2.1. Informação batimétrica

A informação batimétrica utilizada neste trabalho teve como base levantamentos batimétricos efetuados no Estuário do Tejo entre 1964 e 2009, na sua larga maioria constando das cartas hidrográficas do Instituto Hidrográfico, e dados disponibilizados pela APL relativos a dos levantamentos batimétricos efetuados nos canais de navegação entre 2003 e 2015.

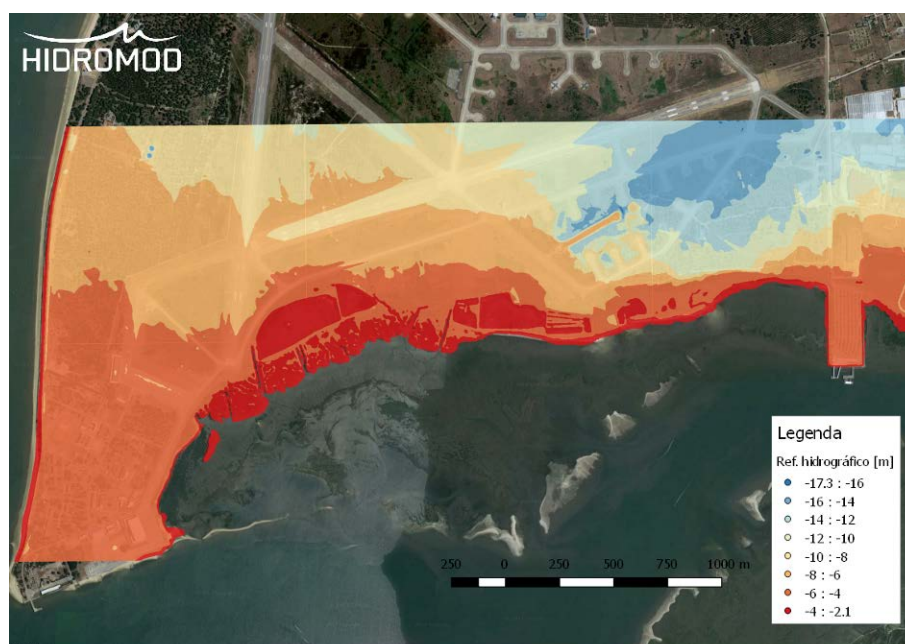
Os dados disponíveis foram compatibilizados tendo em atenção diferentes referenciais e resoluções disponíveis no sentido de criar uma compilação integrada de todos os levantamentos batimétricos (Figura 1). Esta compilação foi o ponto de partida para gerar as batimetrias da situação de referência.



*Figura 1. Informação batimétrica disponível para o estuário do Tejo. A informação batimétrica corresponde a uma compilação de levantamentos entre 1964 e 2015*



Adicionalmente para a zona de interesse (zona intertidal adjacente à base aérea do Montijo) a compilação anteriormente descrita foi complementada por dados disponibilizados pela Direção Geral do Território. Estes dados consistem num modelo digital de terreno com uma resolução de 2 m (MDT2m\_2008). Os dados disponibilizados no referencial topográfico foram convertidos para o referencial hidrográfico (Figura 2).



*Figura 2. Modelo digital de terreno no referencial hidrográfico com uma resolução espacial de 2 m (fonte: DGT, MDT2m\_2008)*

## 2.2. Malhas de cálculo

As malhas de cálculo foram efetuadas considerando 4 escalas de resolução:

- A escala regional (e.g., modelo da península ibérica e da região centro/sul de Portugal);
- A escala do Estuário do Tejo;
- A escala da “Baía do Montijo”;
- A escala local de interesse (zona intertidal adjacente à base aérea do Montijo).

Para estas 4 escalas foram adotadas respetivamente as resoluções de 6 km e 1 km para a escala regional (Figura 3), 200 m para a escala do Estuário do Tejo (Figura 4), 25 m para a escala da “Baía do Montijo” (Figura 5) e 10 m para a escala local (Figura 6).

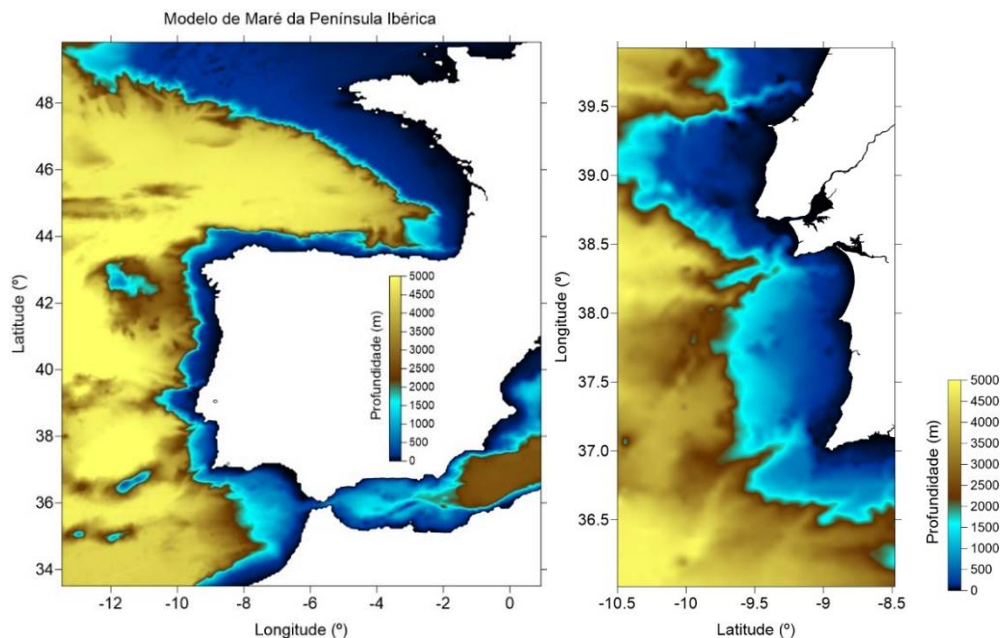


Figura 3. Domínio modelação implementado para geração da maré na Península Ibérica (6 km de resolução) e região centro/sul de Portugal para propagação da maré (1 km de resolução)

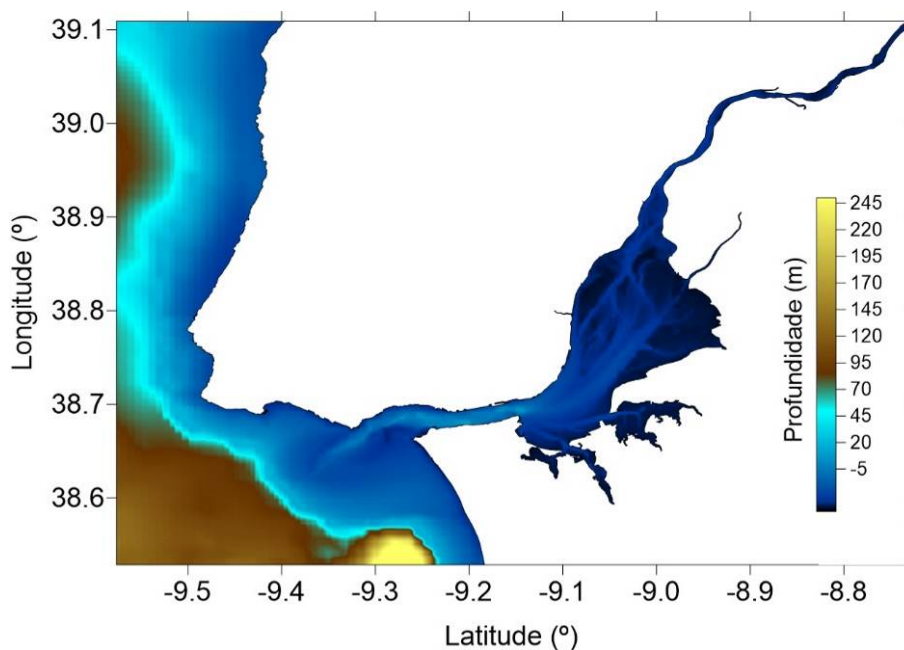


Figura 4. Domínio do Estuário do Tejo (200 m de resolução)

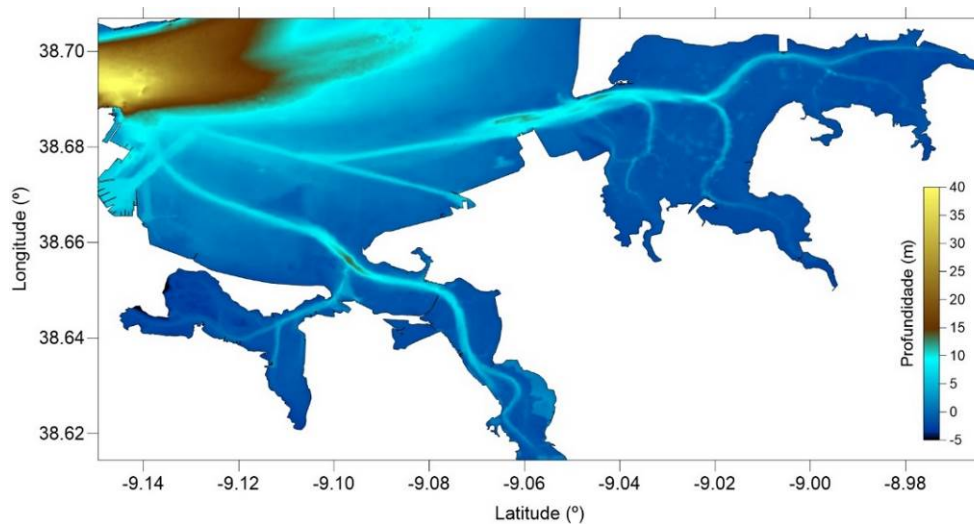


Figura 5. Domínio que permite descrever os processos hidrodinâmicos à escala da Baía do Montijo com detalhe (25 m de resolução)

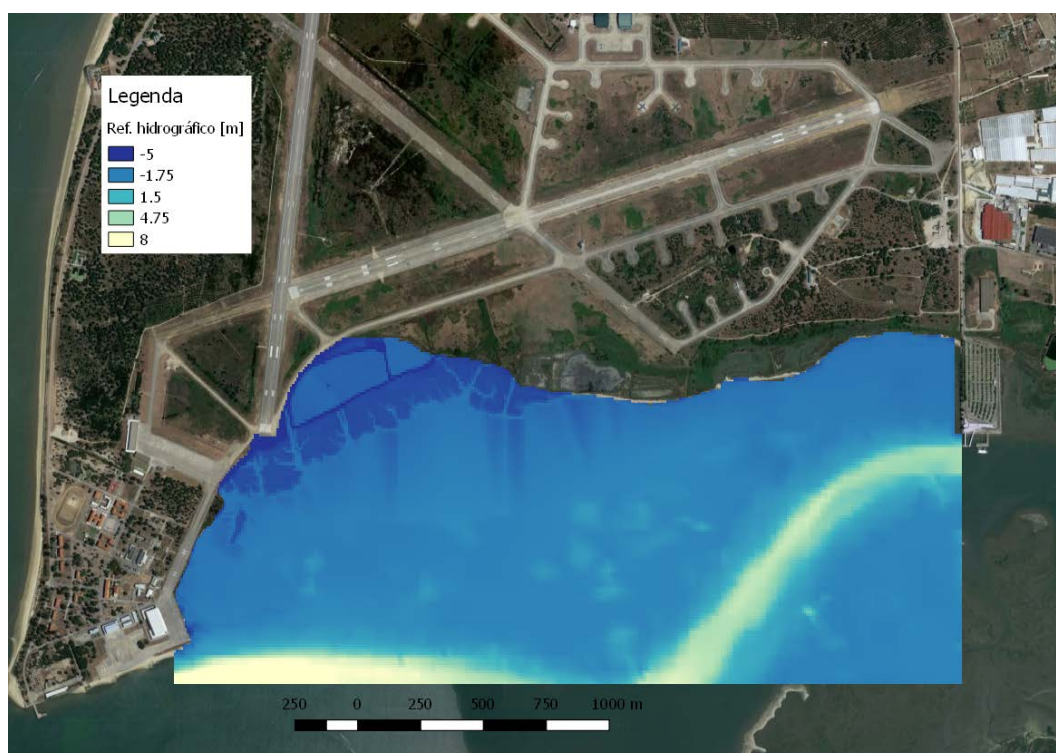


Figura 6. Domínio local que inclui a zona intertidal adjacente à base aérea do Montijo (10 m de resolução)

### 2.3. Validação do modelo numérico

A modelação numérica do Estuário do Tejo baseada no sistema MOHID tem sido alvo de diversas teses (e.g., Portela, 1996; Martins, 2000; Pina, 2001; Leitão, 2003) e artigos científicos (Vaz *et al.*, 2009, Canas *et al.*, 2009; Vaz *et al.*, 2011; Valentim *et al.*, 2013; Vaz *et al.*, 2014; Franz *et al.* 2014; Vaz *et al.*, 2015) onde se aborda de forma extensiva a componente relativa à validação.

No âmbito do “Estudo Prévio do Novo Terminal do Barreiro” foi efetuado pela HIDROMOD um trabalho validação focado nos processos hidrodinâmicos e sedimentares. Este trabalho de validação consistiu em repetir a validação apresentada por Franz *et al.* (2014) complementada com novas fontes de dados e uma análise mais detalhada dos resultados. Os dados utilizados para validação neste trabalho são referentes ao ano de 2012 e incluem:

- Níveis de maré no marégrafo de cascais (Figura 7, local Cascais) obtidos pelo programa de monitorização do GLOSS (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/>) para o período de 1 de Janeiro a 31 de Dezembro de 2012;
- Correntes obtidas por um ADCP (Figura 7, local B1) e turbidez por uma sonda multiparamétrica para o período de 26 de Junho a 31 de Dezembro de 2012. Os dados foram adquiridos através da empresa Simarsul no âmbito de um plano de monitorização (<http://www.apambiente.pt/index.php?ref=x76>, Franz *et al.* 2014);
- Concentrações de sedimentos coesivos no Estuário do Tejo (Figura 7, locais com designação “ST”) através de um programa de monitorização da SimTejo (Franz *et al.* 2014).

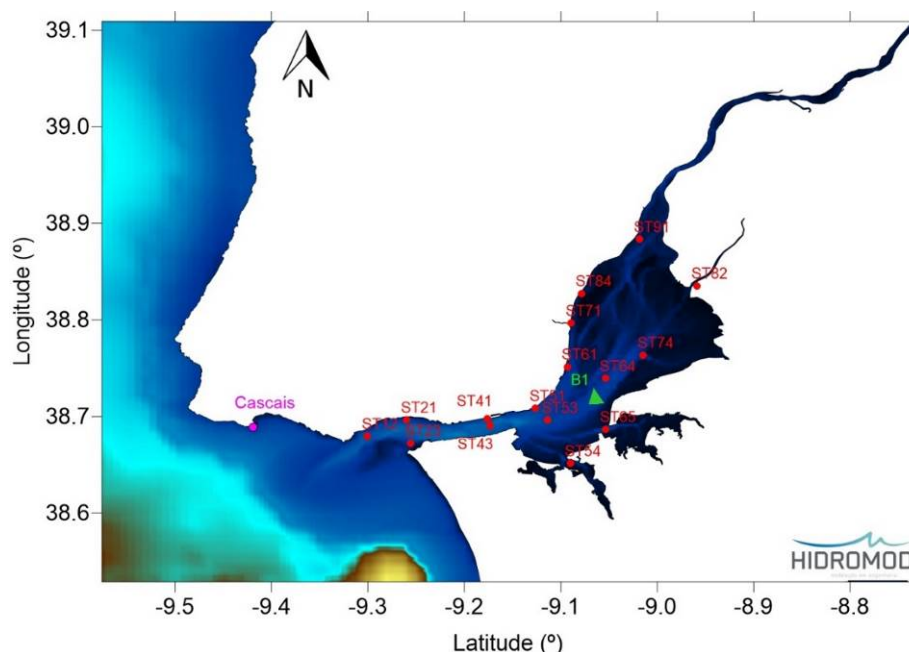


Figura 7. Estações de monitorização com dados disponíveis no Estuário do Tejo (adaptado de Franz *et al.*, 2014)



### 3. CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA

Na caracterização da situação de referência são abordados os seguintes temas:

- Propagação da maré astronómica;
- Afluência de água doce (ou fluviais);
- Padrões de circulação focados numa situação de maré viva equinocial;
- Prisma de maré e tempos de renovação de água à escala da Baía do Montijo;
- Agitação marítima no interior do estuário do Tejo;
- Níveis extremos de água;
- Dinâmica sedimentar.

#### 3.1. Propagação da maré

O escoamento no estuário do Tejo é forçado principalmente pela maré semi-diurna. A componente harmónica M2 - devida à Lua - com 98 cm de amplitude e a componente harmónica S2 devida ao Sol - devida ao Sol - com 35 cm de amplitude (valores em Cascais) são as duas principais componentes da maré no estuário. A diferença de 25 minutos entre os períodos destas duas componentes de maré (respetivamente 12h e 25 minutos e 12 horas) é responsável pelo ciclo maré viva-morta<sup>1</sup> e as suas amplitudes incluem o estuário do Tejo no conjunto dos estuários mesotidais. A Figura 8 mostra a distribuição de amplitude da componente M2 no estuário pondo em evidência o aumento de amplitude até à entrada dos canais dos rios Tejo e Sorraia, até onde a amplitude pode aumentar cerca de 25% em relação à amplitude à entrada do estuário, decaindo em seguida para montante, como esperado.

No canto superior direito a Figura 8 mostra um gráfico que compara as amplitudes obtidas por análise harmónica de níveis medidos no estuário (Lemos, 1972) com as amplitudes obtidas, também por análise harmónica dos resultados do modelo do Tejo (Vaz *et al*, 2009) usando um passo espacial de cerca de 200 metros.

---

<sup>1</sup> A diferença de 25 minutos no período das duas componentes faz com que estejam aproximadamente em fase a cada 14 dias. Neste período a S2 completa 28 ciclos e a M2 completa 27.

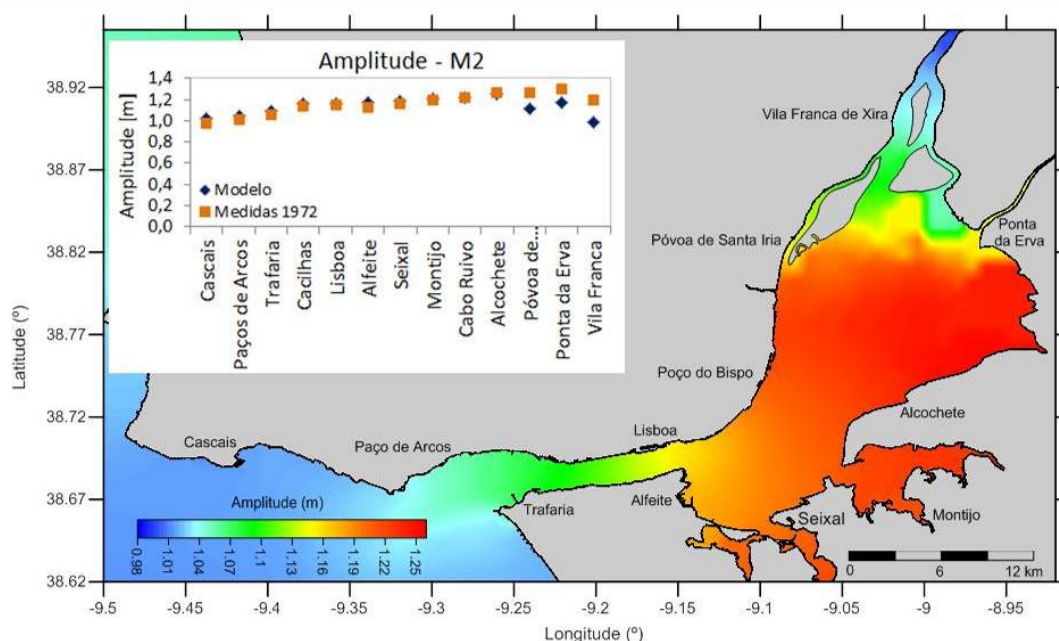


Figura 8. Amplitude da M2 calculada com o modelo MOHID. No gráfico XY as estações estão ordenadas de jusante (Cascais) para montante (Vila Franca de Xira). Neste mesmo gráfico são apresentados os resultados do modelo e análise harmónica baseada nos dados de nível de 1972 (Lemos, 1972)

### 3.2. Afluências de água doce ao Estuário

O Rio Tejo é a principal fonte de água doce do estuário. O caudal médio é de cerca de 300 m<sup>3</sup>/s. No Inverno são usuais eventos com caudais da ordem de 2000 m<sup>3</sup>/s. No Verão registam-se tipicamente caudais da ordem dos 50 m<sup>3</sup>/s. Os valores instantâneos são fortemente condicionados pelas descargas das barragens existentes na bacia hidrográfica.

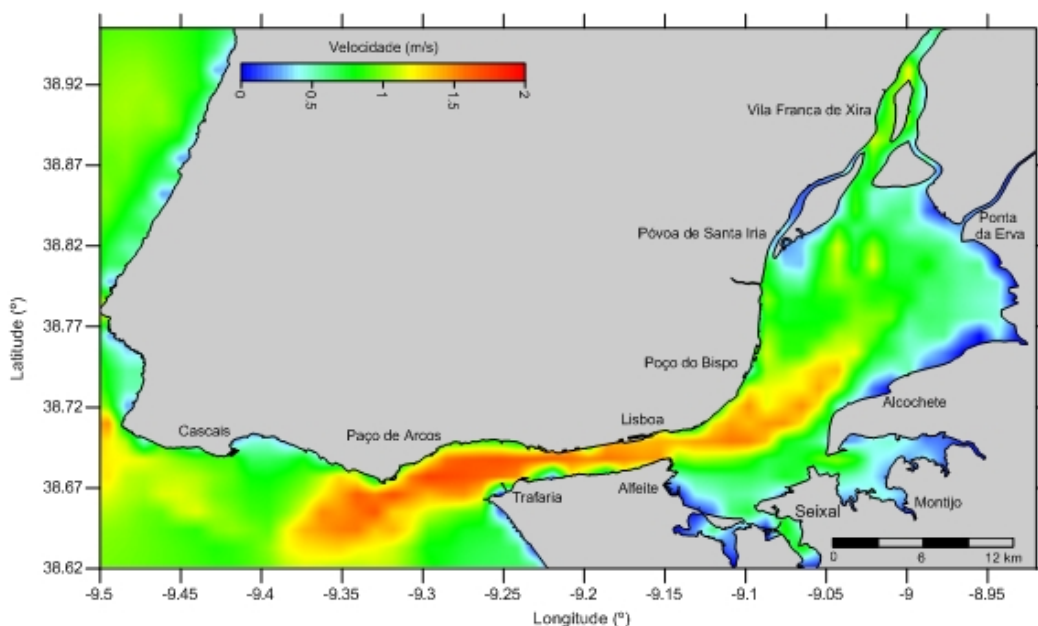
A afluência de água doce ao estuário é determinante para o tempo de residência no seu interior. As flutuações do caudal fluvial têm maior importância na zona montante do estuário interno do Tejo, decrescendo a influência deste fenómeno com o alargamento da secção de escoamento para jusante (Elias, 1992). Devido a este facto, Vargas et al. (2008) refere que é expectável que um grande aumento de caudal tenha pouca expressão na sobre-elevação do nível de superfície livre na região do Alfeite. Pode-se concluir o mesmo para a Baía do Montijo.

### 3.3. Padrões de Circulação à escala do estuário

O escoamento é forçado essencialmente pela maré e por isso tem carácter oscilatório. As velocidades máximas são registadas na região da embocadura, onde em vazante de maré viva, os valores são da ordem dos 2 m/s (Figura 9). Na metade de jusante do estuário as

velocidades máximas são da ordem de 1 m/s, baixando para o interior do estuário, mas mantendo valores da ordem de 1 m/s nos canais principais (Figura 9).

Como consequência das velocidades elevadas a excursão de maré no interior do estuário - a distância percorrida por uma partícula numa enchente ou numa vazante - é da ordem dos 15 km.



Fonte: IST/MARETEC

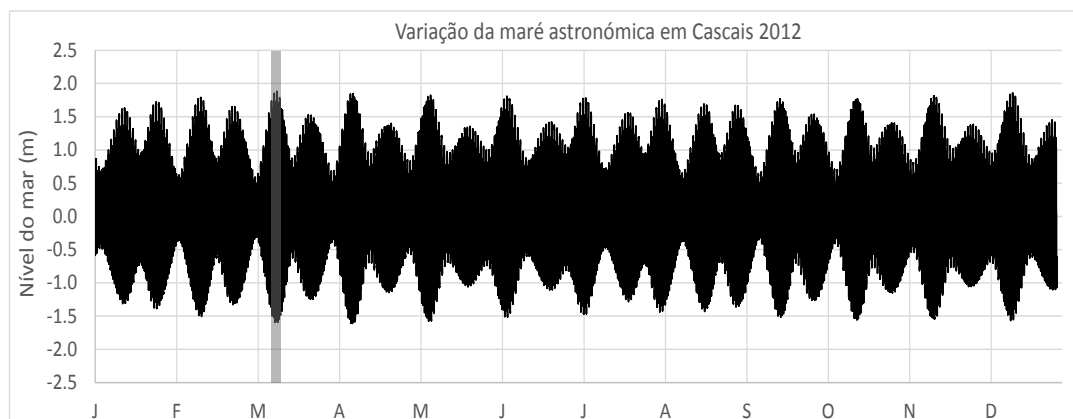
*Figura 9. Intensidade máxima das correntes obtidas pelo modelo MOHID 3D baroclínico entre Setembro de 2010 a Junho de 2011. O modelo foi forçado com maré, caudal do rio (do SNIRH) e fluxos atmosféricos*

### 3.4. Padrões de circulação na zona de interesse

Com base nos modelos atrás descritos foram simulados padrões de circulação de alta resolução para a zona de interesse (zona intertidal adjacente à base aérea do Montijo) para uma situação de maré viva equinocial<sup>2</sup> (Figura 10):

- Campos de correntes instantâneos (mapas instantâneos associados a situações de enchente e vazante);
- Intensidade média e máxima da corrente.

<sup>2</sup> A amplitude das marés vivas é ligeiramente mais intensa por ocasião dos equinócios (marés vivas equinociais). Tal facto é matematicamente explicado pela introdução de uma terceira constituinte (K2) que, perto dos equinócios, reforça o efeito do Sol.



*Figura 10. Variação da maré astronómica no marégrafo de Cascais.  
O período simulado está assinalado a cinzento*

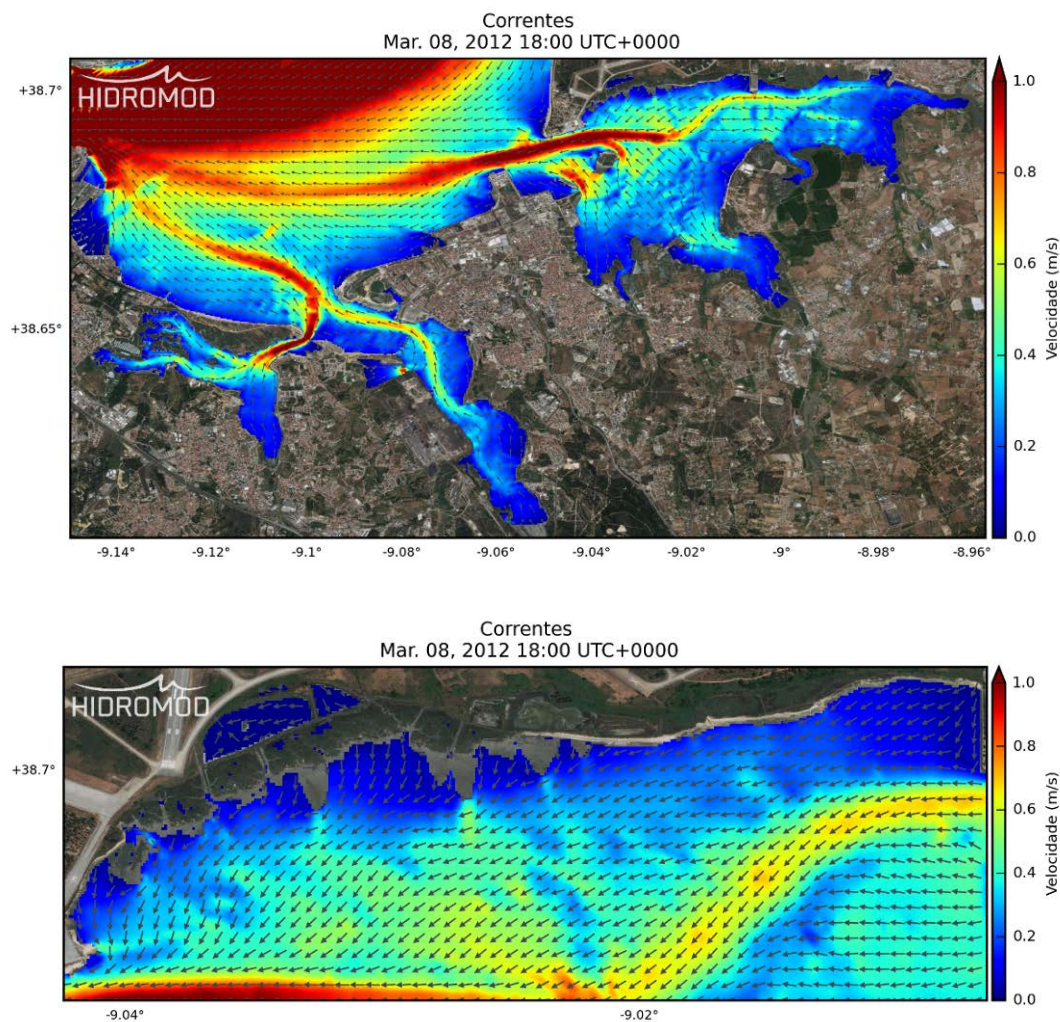
### 3.4.1. Campos de correntes instantâneos

Os campos de correntes obtidos com o modelo MOHID mostram que as correntes são mais intensas na vazante do que na enchente (Figura 11, Figura 12). As correntes tendem a ser mais intensas ao longo dos canais de navegação atingindo valores da ordem de 1 m/s. As correntes em situação de vazante convergem das zonas intertidais para os canais de navegação e na situação de enchente divergem dos canais para as zonas intertidais.

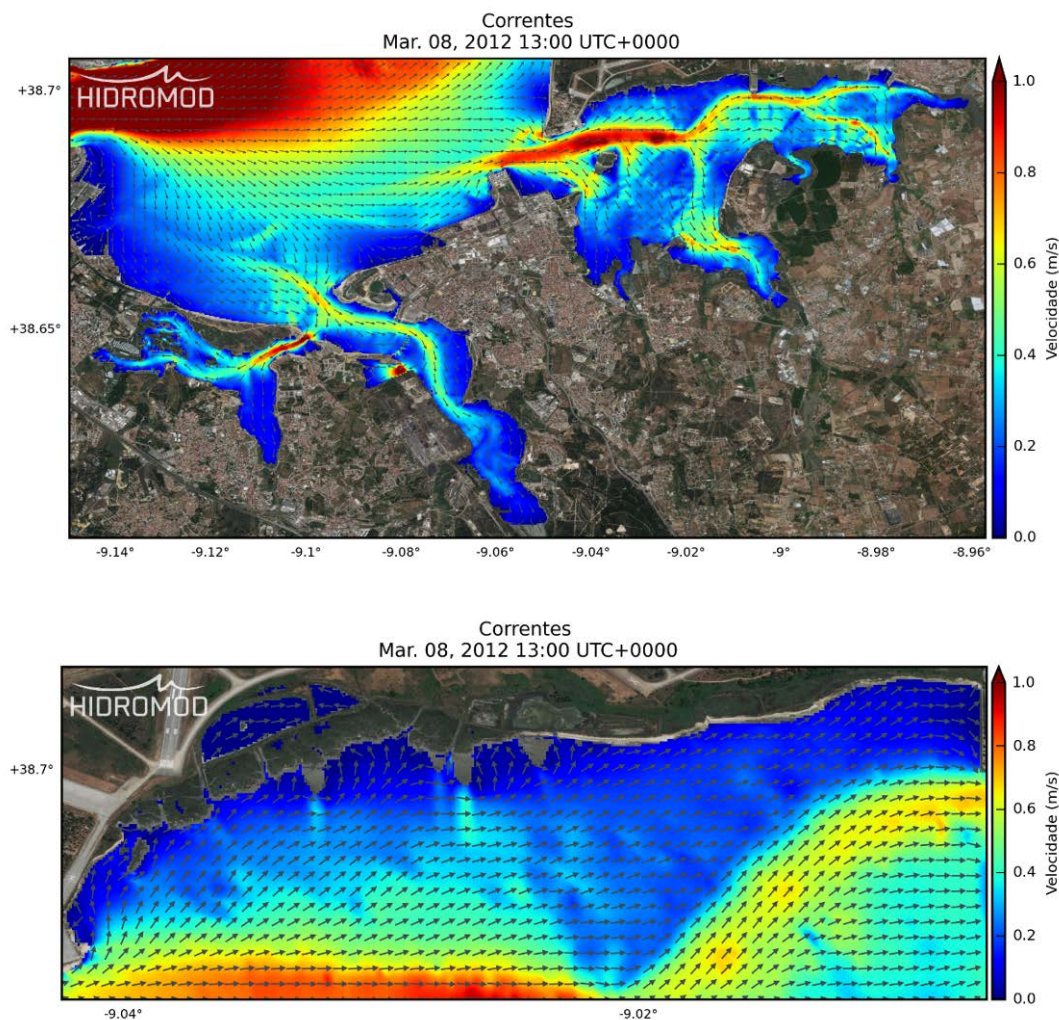
Na zona de interesse o escoamento tanto em vazante como em enchente apresenta uma direção tendencialmente paralela à costa, exceto na zona de sapal<sup>3</sup> imediatamente adjacente ao aeroporto onde tende a acompanhar a direção do sistema de pequenos canais que caracterizam estas estruturas.

<sup>3</sup> Sapal é a designação dada às formações aluvionares periodicamente alagadas pela água salgada e ocupadas por vegetação halofítica. O sapal é um ecossistema de grande importância ecológica, que possui um papel preponderante no equilíbrio do ciclo de matéria orgânica numa perspetiva de produtores primários.





*Figura 11. Exemplo da distribuição do campo de correntes instantâneos representativos da situação de referência em situação de vazante de maré viva (figura inferior - detalhe do campo de correntes na zona de interesse)*

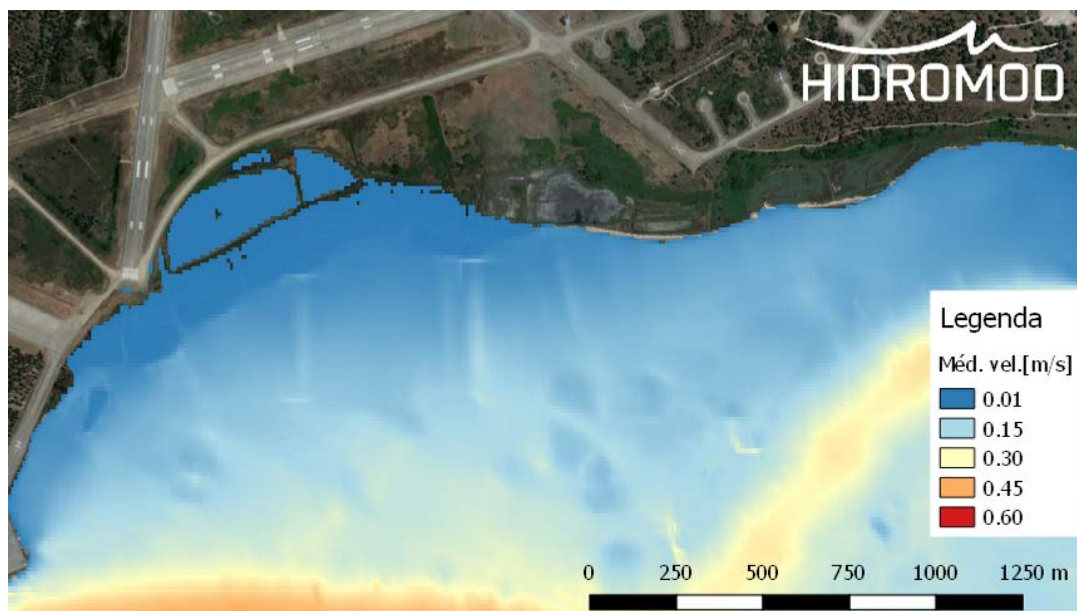


*Figura 12. Exemplo da distribuição do campo de correntes instantâneos representativos da situação de referência em situação de enchente de maré viva (figura inferior - detalhe do campo de correntes na zona de interesse)*

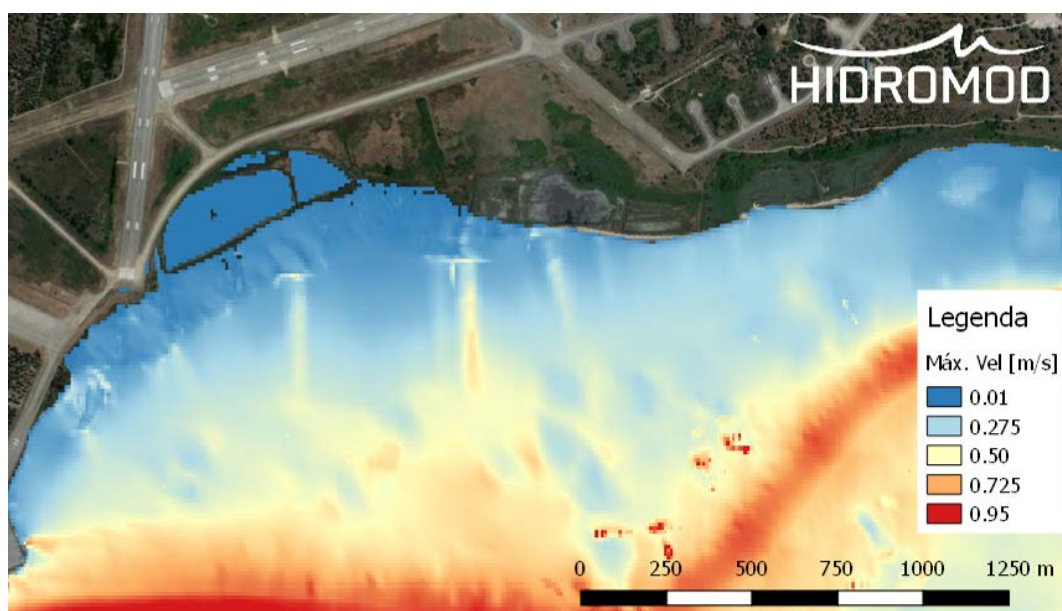
### 3.4.2. Campo de intensidade média e máxima de corrente

Para uma melhor caracterização da intensidade das correntes foram calculados os valores de intensidade média e máxima para cada ponto de cálculo ao longo do ciclo de maré viva. Este cálculo permitiu determinar um campo de intensidade média da corrente (Figura 13) e um campo que corresponde ao limite máximo da intensidade da corrente (Figura 14). Estes resultados permitem concluir que na zona adjacente à área de prolongamento do aeroporto as correntes médias apresentam valores entre 10-20 cm/s e as correntes máximas valores entre 30-50 cm/s.





*Figura 13. Campo de intensidade média da corrente num ciclo de maré de maré viva equinocial na situação de referência*



*Figura 14. Campo de intensidade máxima da corrente num ciclo de maré de maré viva equinocial na situação de referência*

A simulação de maré viva equinocial foi repetida assumindo um evento de sobrelevação com um tempo de retorno de 100 anos, que segundo Andrade et al. (2006) corresponde a um aumento do nível médio de 58 cm. Esta simulação teve por objetivo avaliar como eventos de sobrelevação podem condicionar a intensidades das correntes.

Tanto ao nível da intensidade média (Figura 15) como da máxima (Figura 16) existe uma ligeira intensificação ~15% e ~5% respetivamente.



Figura 15. Campo de intensidade média da corrente num ciclo de maré de maré viva equinocial coincidente com uma sobrelevação com um tempo de retorno de 100 anos na situação de referência

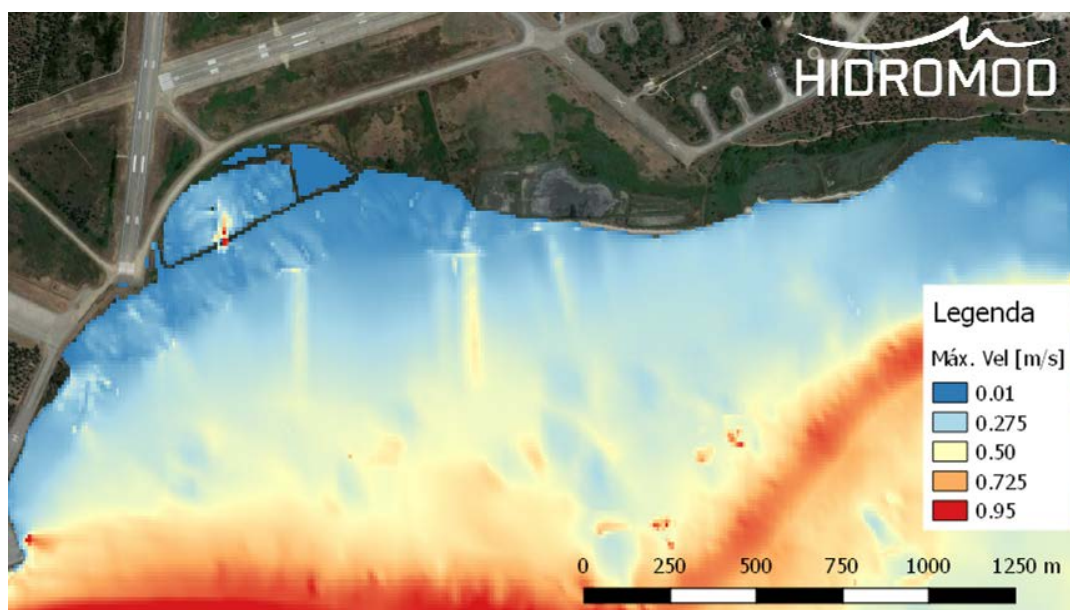


Figura 16. Campo de intensidade máxima da corrente num ciclo de maré de maré viva equinocial coincidente com uma sobrelevação com um tempo de retorno de 100 anos na situação de referência



### 3.5. Prismas de maré

Os prismas de maré foram estimados em duas secções de controlo, nomeadamente, uma secção no “Canal da Barra” e outra secção na “Bacia do Montijo” (Figura 17). A secção no “Canal da Barra” permite validar os prismas estimados pelo modelo tendo como base várias referências bibliográficas e a secção na “Bacia do Montijo” permite caracterizar o prisma de maré da zona de interesse relativamente ao prisma global do estuário.

De acordo com os resultados das simulações efetuadas o prisma de maré obtido na secção no “Canal da Barra” é da ordem de  $5.2 \times 10^8$  em marés mortas e  $7.9 \times 10^8$  em marés vivas. Estes valores são concordantes com os descritos na literatura por Dias *et al.* (2013) e Neves (2010) que relatam prismas médios da ordem de  $6.8 \times 10^8$  m<sup>3</sup> e máximos da ordem de  $7.5\text{-}8.0 \times 10^8$  m<sup>3</sup>.

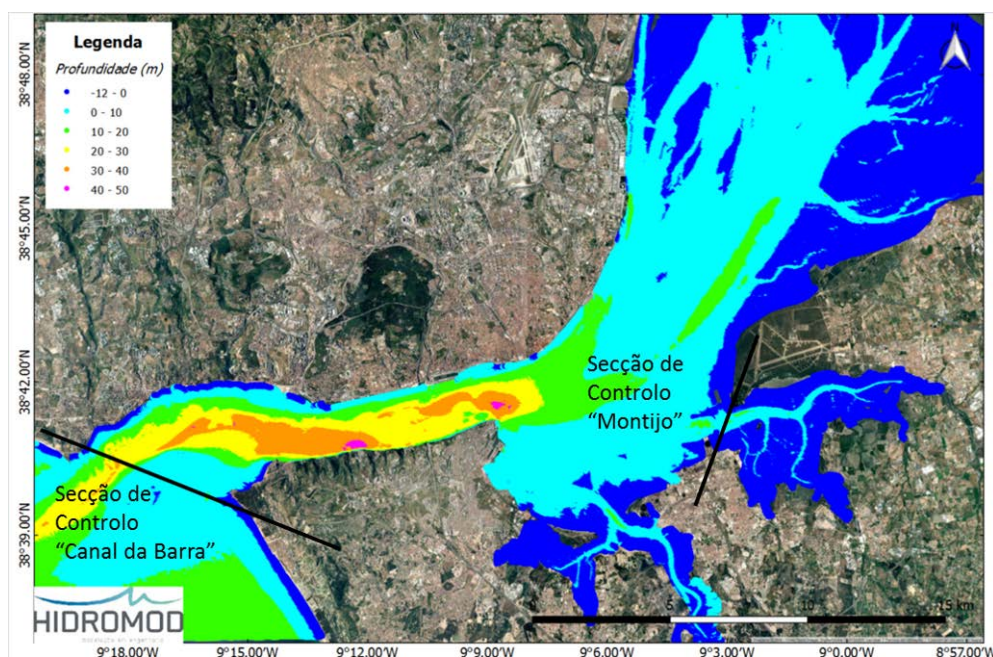


Figura 17. Secções de controlo para cálculo dos caudais de enchente e vazante no Canal da Barra e na bacia do Montijo

No caso da secção da “Bacia do Montijo” a análise da evolução dos caudais de enchente e vazante na (Figura 18) permite verificar que em maré viva, os caudais máximos de enchente e vazante correspondem respetivamente a valores da ordem de 2000 e 4000 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> e que as variações percentuais quer em enchente quer em vazante são inferiores a 1%.

Os prismas de maré da “Bacia do Montijo” são aproximadamente 5% dos prismas de maré estimados para o “Canal da Barra” (Tabela 1).

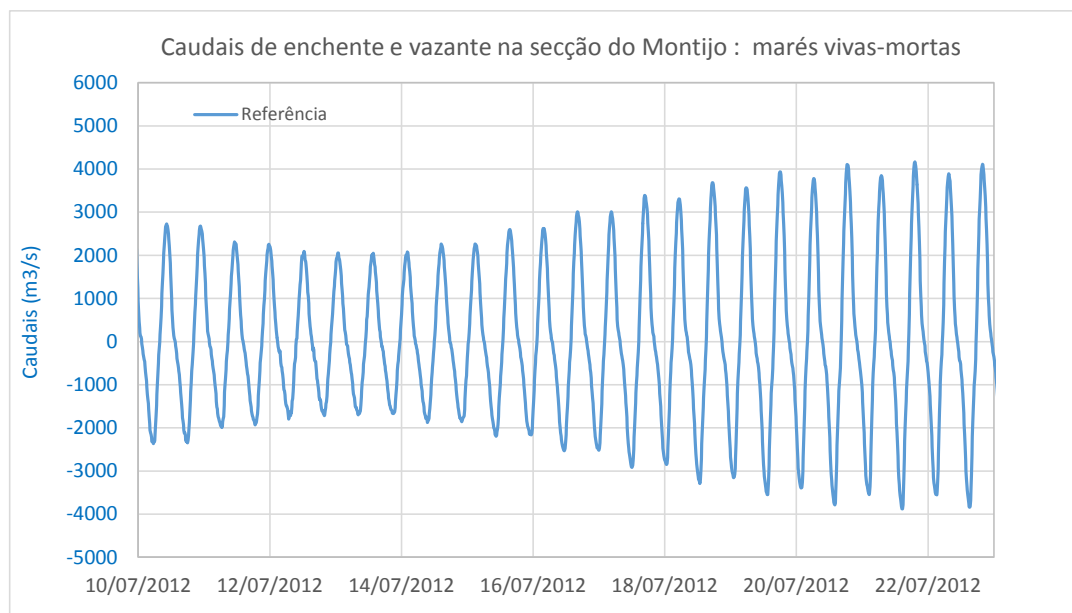


Figura 18. Caudais de enchente e vazante na secção de controlo da bacia do Montijo em um ciclo de marés vivas-mortas para uma situação de sobrelevação

Tabela 1. Prismas de maré ( $m^3$ ) em marés mortas e marés vivas, na referência na secção de controlo da “bacia do Montijo”. As diferenças em percentagem nos prismas de maré entre as soluções de projeto e a referência também são apresentadas

Soluções	Maré Morta	Maré Viva
Referência ( $m^3$ )	$3.0 \times 10^7$	$4.0 \times 10^7$

### 3.6. Tempos de renovação da água

Os tempos de renovação na zona de estudo são um importante indicador para a qualidade ambiental. A metodologia utilizada para o cálculo do tempo de renovação da água tem como base a emissão de parcelas “virtuais” lagrangianas (Braunschweig *et al.*, 2003) de forma instantânea em áreas. Os tempos de renovação estimados para a “Bacia do Montijo” são da ordem dos 30-31 dias.

### 3.7. Agitação marítima

As condições mais energéticas em termos de agitação no interior do estuário do Tejo ocorrem nos meses de Verão. Neste período o vento tende a ser dominante do quadrante N-NW que é o mais favorável em termos de geração de agitação porque tem associado um *fetch* mais longo.

Simulações feitas pela HIDROMOD para os meses de Julho e Agosto de 2012 com o modelo SWAN<sup>4</sup> com uma resolução espacial de 100 m permitiram estimar valores médios e máximos de altura significativa para um período típico de Verão (Figura 19). Os resultados obtidos em frente ao Alfeite são consistentes com a descrição apresentada em Vargas et al. (2008) “O regime de agitação marítima anual médio em frente ao Alfeite caracteriza-se por ondas com  $H_{rms}$ <sup>5</sup> entre 0,05 e 0,40 m propagando-se do quadrante Norte”.

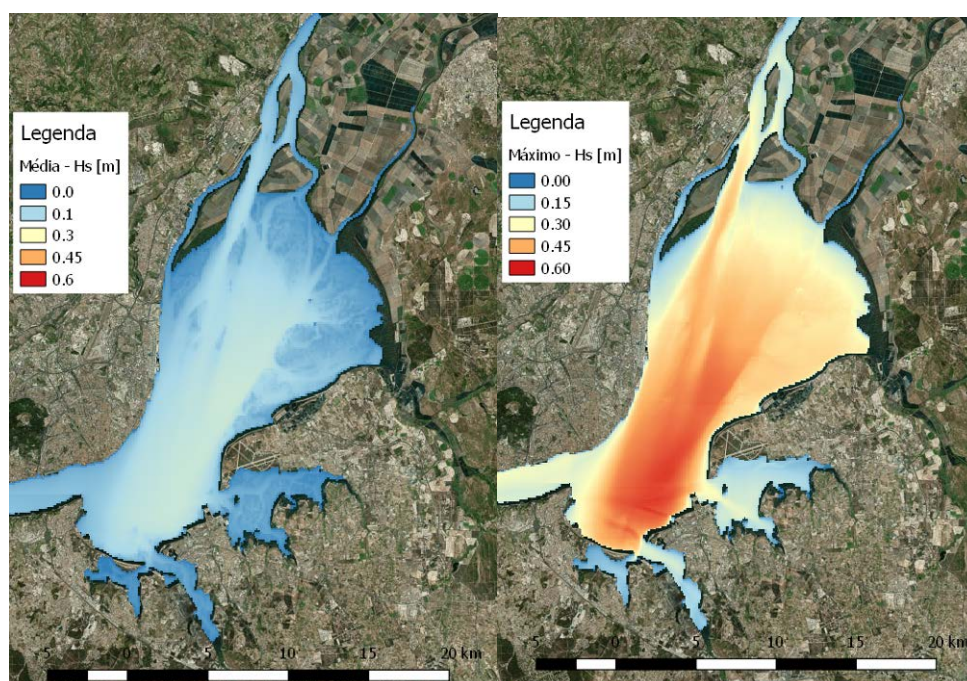


Figura 19. Altura significativa obtida para os meses de Julho e Agosto de 2012: figura da direita – valores médios, figura da esquerda – valores máximos

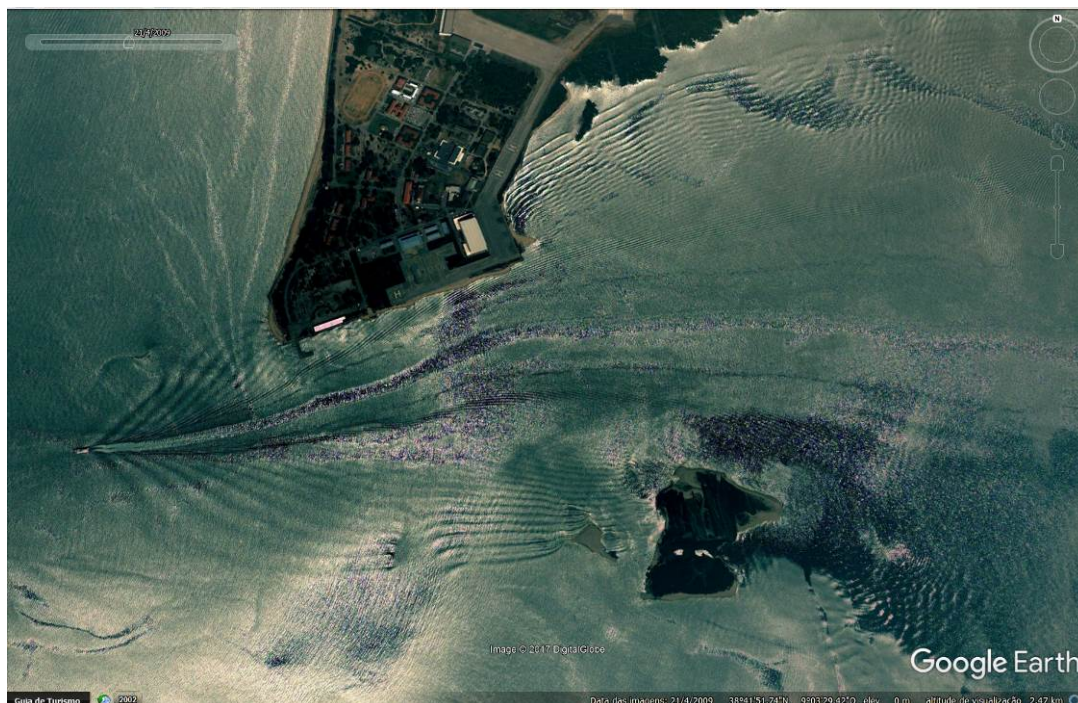
Os resultados do modelo SWAN mostram que a zona de interesse é bastante abrigada da agitação que ocorre no interior do estuário ao contrário do que ocorre em zonas menos abrigadas como é caso da praia do Alfeite que é onde a ondulação gerada no interior do estuário é relevante.

Na zona de interesse os valores máximos de altura significativa são da ordem dos 15 cm para a agitação gerada pelo vento (Figura 19). Adicionalmente esta a zona é também afetada por agitação gerada pelo movimento dos navios de transporte de passageiros. Na Figura 20 é claramente visível um grupo de ondas com origem num navio cuja posição está no limite esquerdo da imagem. Este tipo de ondas de origem antropogénica apresenta valores de altura da ordem das dezenas de centímetros (estimativa visual, Figura 21).

<sup>4</sup> SWAN - Simulating WAves Nearshore - é um modelo numérico de agitação marítima desenvolvido pela Universidade de Delft baseado na equação de ação de balanço espectral que modela a geração, propagação e dissipação da energia das ondas do mar. É um modelo computacional de agitação espectral de terceira geração de código aberto.

<sup>5</sup>  $H_{rms}$  – Raiz quadrada da média da altura da onda. Este parâmetro estatístico é aproximadamente igual à altura significativa.





*Figura 20. Imagem de satélite disponibilizada pelo serviço Google Earth onde se pode observar um grupo de ondas com origem na esteira de um navio localizado no limite esquerdo da imagem*



*Figura 21. Imagem captada no estuário do Tejo onde uma onda gerada de forma periódica pelos navios da Transtejo & Soflusa tem altura suficiente para ser surfada (fonte: youtube)*

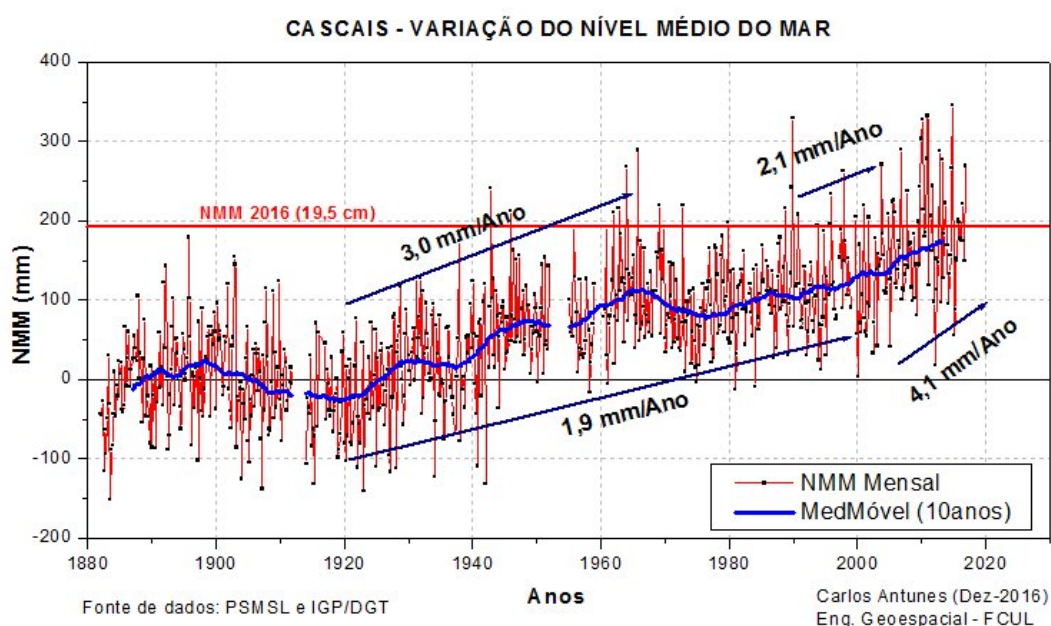


### 3.8. Níveis de água extremos

Os níveis de água extremos na zona de interesse podem ser decompostos em quatro componentes principais:

- Maré astronómica;
- Sobrelevação meteorológica;
- Subida do nível médio do mar devido a alterações climáticas;
- Agitação marítima gerada no interior do estuário por processos naturais (vento) antropogénicos (navios de transporte de passageiros que ligam a margem Norte ao Montijo).

O modelo hidrodinâmico anteriormente descrito foi corrido assumindo na fronteira aberta um nível médio do mar igual a 2.28 m, ou seja, 20 cm acima do nível médio do mar assumido como igual ao zero topográfico. Este é o valor proposto por Antunes (2016) para o ano de 2016 tendo por base os valores medidos no marégrafo de Cascais (Figura 22).



*Figura 22. Variação Secular do Nível Médio do Mar em CASCAIS, Antunes (2016), referencial topográfico.*

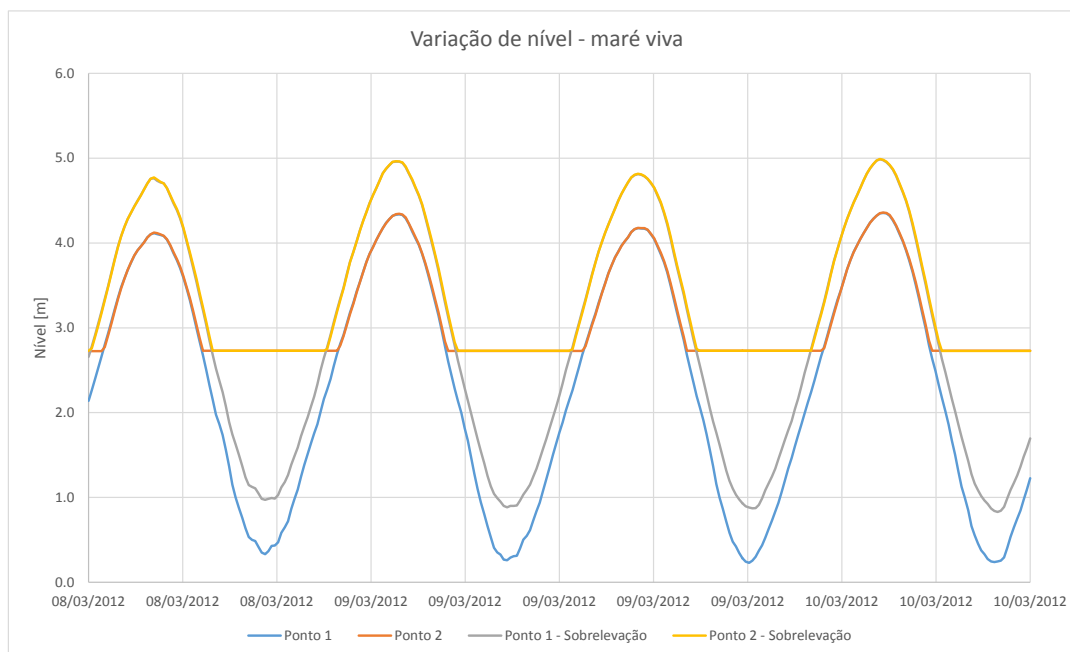
Os valores de nível considerando apenas a maré astronómica para dois pontos localizados na zona de interesse (zona intertidal e canal principal) (Figura 23), apresenta um valor máximo de nível do mar de 4.36 m no referencial hidrográfico (Figura 24) o que corresponde a 2.28 m no referencial topográfico.

Andrade et al. (2006) propõe os valores de sobrelevação de 0.54 e 0.58 m para os períodos de retorno 50 e 100 anos estimados com base nos níveis medidos em Cascais. O modelo hidrodinâmico foi também corrido considerando uma sobrelevação de 0,58 m. Neste caso para os pontos já considerados o nível máximo atingido é 4.99 m no referencial hidrográfico (Figura 24) o que corresponde a 2.91 m no referencial topográfico.

As projeções de acréscimo do nível médio do mar, num horizonte de 50 e 100 anos, em relação ao nível médio do mar de 2017, com base num ajustamento exponencial feito por Dias e Taborda (1988), são de 0.24 e 0.66 m, respetivamente.



*Figura 23. Localização de pontos para os quais se analisou a variação do nível do mar simulados pelo modelo hidrodinâmico para uma situação de maré viva equinocial*



*Figura 24. Variação do nível do mar simulado pelo modelo hidrodinâmico MOHID para os pontos apresentados na Figura 23 para uma situação de maré viva equinocial com (período de retorno de 100 anos) e sem sobrelevação*

### 3.9. Dinâmica sedimentar

De acordo com Vale e Sundby (1987), a quantidade de sedimentos erodidos/sedimentados ao longo de um ciclo de maré viva/maré morta no estuário do Tejo corresponde à afluência total de sedimentos finos ao longo de um ano médio. A massa estimada de sedimento em suspensão varia entre  $0,27 \times 10^5$  t em marés mortas e  $3,9 \times 10^5$  t em marés vivas, enquanto o caudal sólido de sedimentos finos médio anual do rio Tejo é de  $4 \times 10^5$  t. No entanto este valor apresenta uma grande variabilidade interanual. Por exemplo para as cheias extremas de 1979 Vale (1981) estimou uma descarga de  $10^6$  t de sedimentos finos durante um período de 10 dias com origem no rio Tejo.

Vale e Sundby (1987), com base em medidas feitas ao longo do estuário, mostraram que a zona de máxima turbidez não está presente em situações de maré morta, mas em marés vivas a zona de turbidez máxima é claramente identificada no estuário superior. Através da análise de dados de deteção remota do satélite Modis-Aqua, Valente e Silva (2009) mostraram que a pluma de turbidez do estuário apresenta um claro ciclo de maré viva (turbidez mais intensa) / maré morta (turbidez menos intensa).

Com base em dados de campo recolhidos entre 2004 e 2012 (46 valores) na estação ST65 (Figura 25) e publicados em Franz et al. (2014) pode-se concluir que na zona de interesse a concentração máxima de sedimentos finos em suspensão é da ordem de 100 mg/l e o valor mais frequente é da ordem de 20 mg/l (Figura 26).

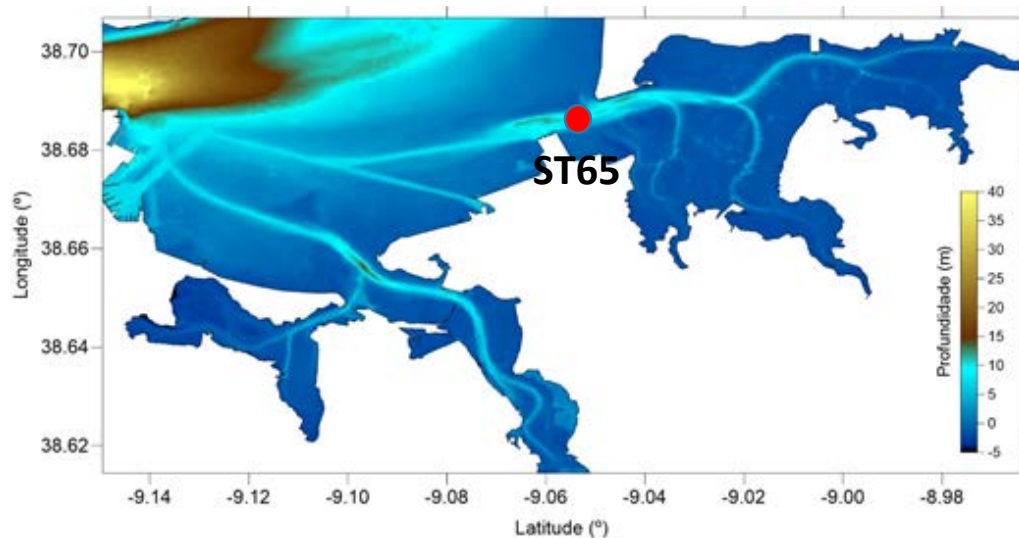


Figura 25. Estação de monitorização ST65 (Franz et al., 2014)

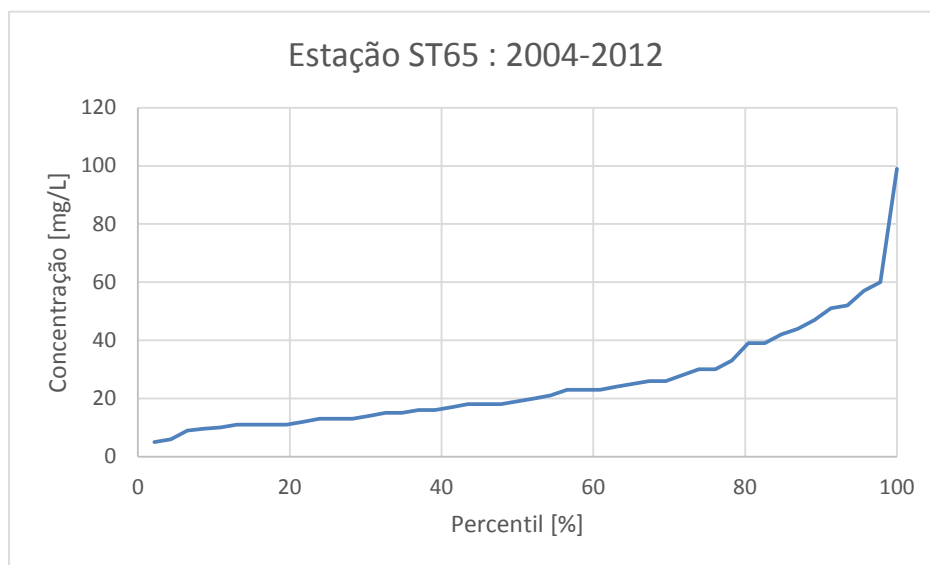


Figura 26. Concentração de sedimentos finos medidos na estação ST65 (Figura 25) função do percentil (50% - concentração mais frequente, 100% - concentração máxima)

A caracterização dos sedimentos de fundo feita por Canário et al. (2007) com base em dados de campo e por Franz et al. (2017) com base no modelo MOHID indiciam que na “Baía do Montijo” nos canais de navegação o sedimento de fundo tenderá a ser areia fina e na zona intertidal sedimentos fino (ou vaza) (Figura 27).



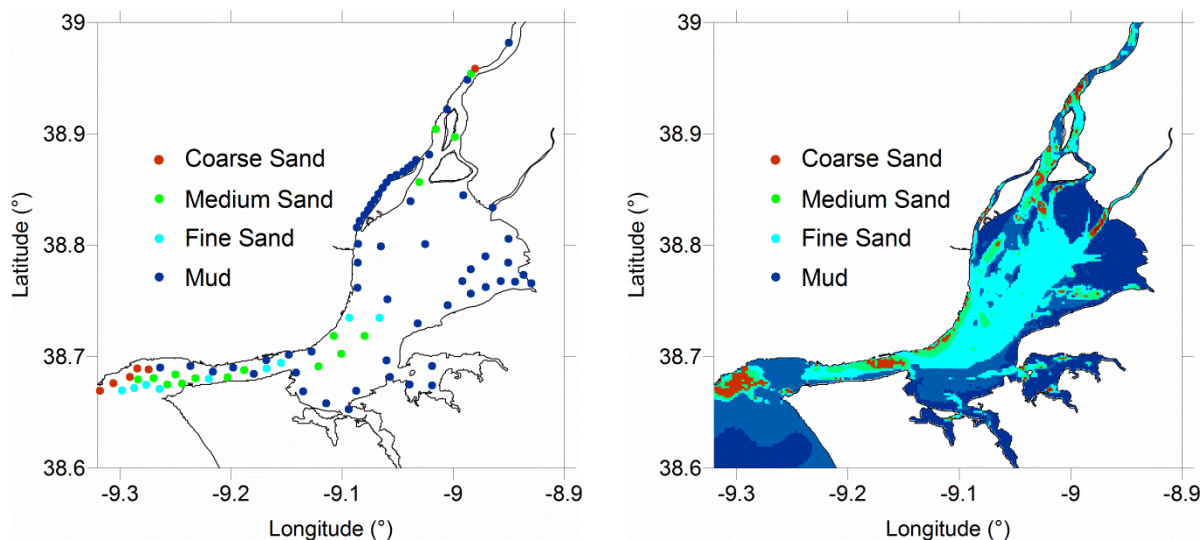


Figura 27. Distribuição do tipo de sedimentos de fundo no estuário do Tejo. Dados (figura do lado esquerdo) Canário et al. (2007) e resultados de modelo (figura do lado direito) Franz et al. (2017)

Segundo Freire et al. (2006) a Baía do Montijo encontram-se alguns depósitos arenosos pouco desenvolvidos, como o Seixalinho, limitados inferiormente por um raso de maré vasoso (Figura 28). A zona que intercepta a área de expansão do aeroporto é ocupada por um sapal claramente visível na imagem de satélite disponibilizada pelo serviço Google Maps (Figura 29).

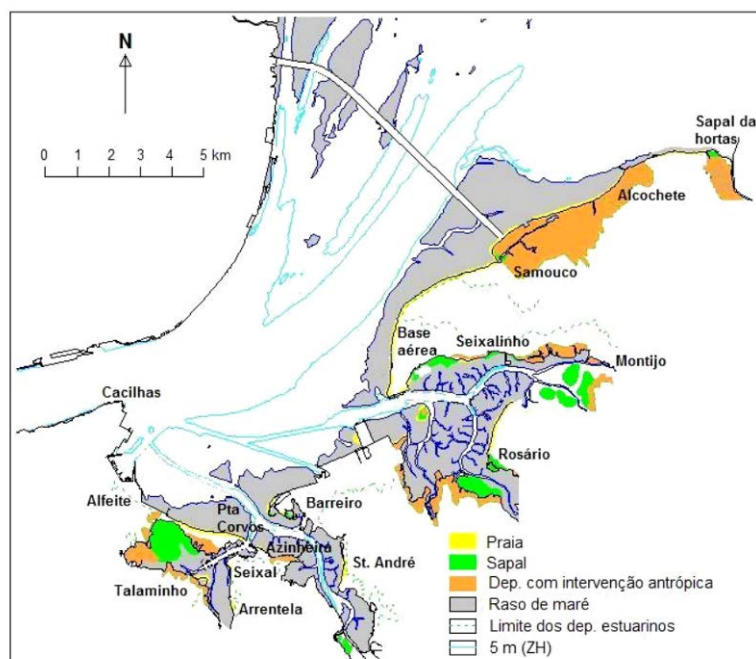
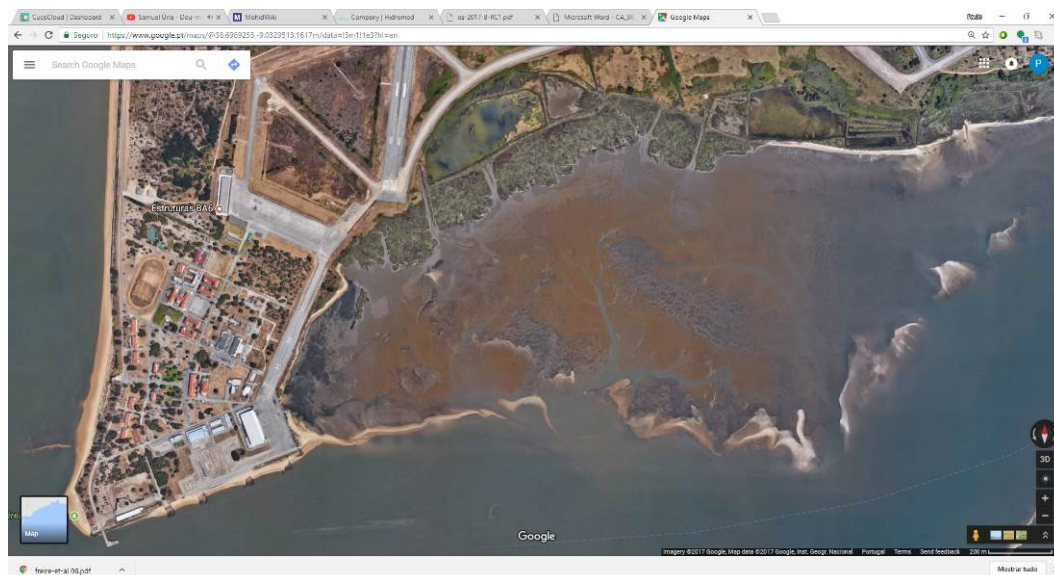


Figura 28. Praias no estuário interno do Tejo (Freire et al., 2006)



*Figura 29. Imagem de satélite disponibilizada pelo serviço Google Maps para a zona de interesse*

## 4. IMPACTES

Os impactes da obra sobre a hidrodinâmica e dinâmica sedimentar do estuário foram avaliados para duas alternativas construtivas (aterro e estrutura sobre estacas). Para cada alternativa foi quantificado o respetivo impacte sobre a intensidade média e máxima das correntes para uma maré viva equinocial considerado o atual nível médio e o nível médio previsto para um horizonte de projeto de 100 anos. Em termos de dinâmica sedimentar foram quantificadas as taxas de sedimentação para um mês de simulação assumindo as correntes e a agitação gerada pelos navios de transporte de passageiros como os principais agentes forçadores.

### 4.1. Alternativas

Foram consideradas 3 alternativas construtivas (duas em aterro e uma em estrutura). Do ponto de vista hidrodinâmico e de dinâmica sedimentar as alternativas 1 e 2 (em aterro) podem ser consideradas iguais. Ambas as alternativas propõem que a extensão da pista seja feita sobre um aterro que irá ocupar a área apresentada na Figura 30. Esta é denominada neste relatório por “Alternativa Aterro”. A terceira alternativa propõe que a extensão pista seja feita sobre estacas (Figura 31). Esta alternativa é denominada neste documento por “Alternativa Estacas”.



Figura 30. Localização do aterro previsto para as alternativas 1 e 2 (Alternativa Aterro)





Figura 31. Localização das estacas da alternativa 3 (ou Alternativa Estacas)

Em termos topográficos todas as alternativas propõem que a pista na extensão proposta fique localizada a uma cota da ordem dos 5 m no referencial topográfico ou seja 7.08 m no referencial hidrográfico (Figura 32).

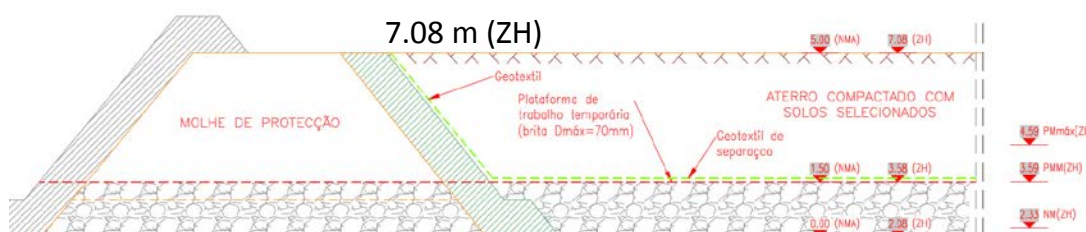


Figura 32. Corte transversal para a Alternativa 1

#### 4.2. Níveis máximos atingidos junto à obra

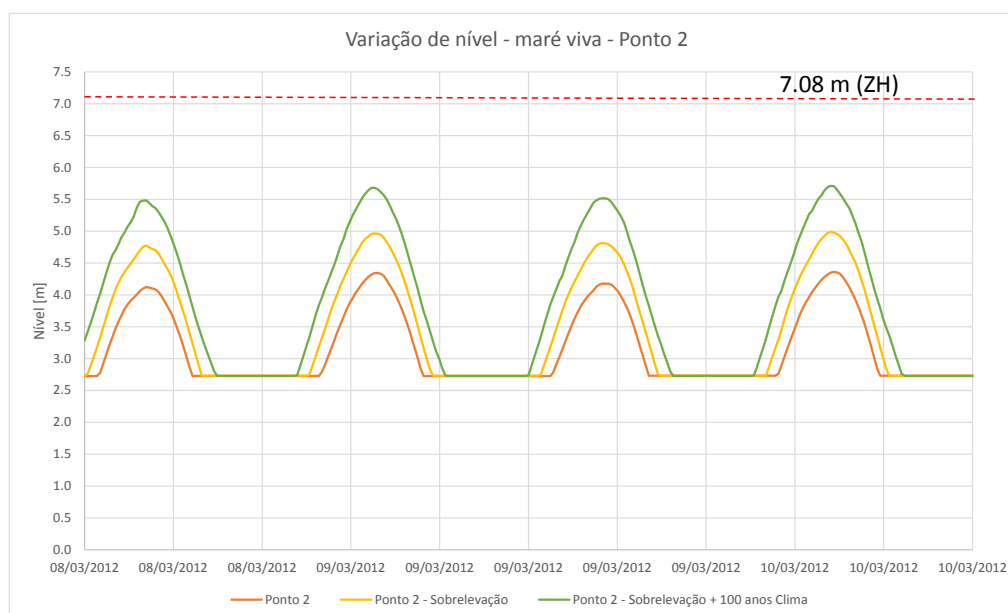
Os resultados de nível obtidos para o ponto 2 (ver Figura 23) localizado na zona intertidal junto à nova extensão do aeroporto apresentam os seguintes valores máximos (ver Figura 33):

- **Cenário 1:** Maré viva equinocial: 4.36 ZH (ou 2.28 referencial topográfico);
- **Cenário 2:** Maré viva equinocial + sobrelevação com um período de retorno de 100 anos: 4.99 ZH (ou 2.91 referencial topográfico);



- **Cenário 3:** Maré viva equinocial + sobrelevação com um período de retorno de 100 anos + projeção de acréscimo do nível médio do mar num horizonte de 100 anos: 5.71 m ZH (ou 3.63 referencial topográfico).

O cenário 3 é aquele que conduz naturalmente a níveis máximos extremos. Trata-se de um cenário extramente conservativo porque tem em conta os efeitos previstos pelas alterações climáticas num horizonte de 100 anos e considera que uma maré viva equinocial coincide temporalmente com um evento de sobrelevação com um período de retorno de 100 anos. O nível máximo para este cenário é de 5.71 m (ZH) ou seja ~1.3 m abaixo da cota prevista para a pista (7.08 m - ZH). Esta folga permite acomodar as perturbações de nível induzidas por agitação marítima (~ 20-60 cm).



*Figura 33. Variação de nível no ponto 2 (ver Figura 23) em situação de maré viva equinocial para 3 cenários: linha vermelha –maré astronômica sem sobrelevação, linha cor de laranja - maré viva + sobrelevação com período de retorno de 100 anos, linha a verde – maré viva + sobrelevação com período de retorno de 100 anos + alterações climáticas no horizonte de 100 anos*

#### 4.3. Hidrodinâmica

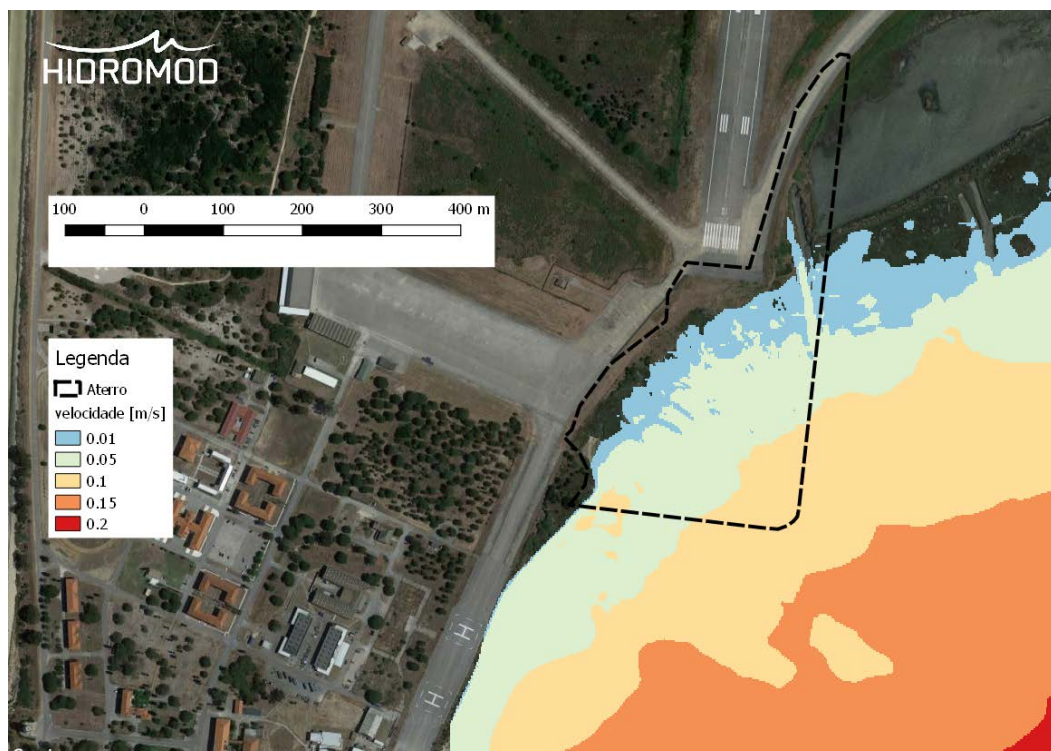
O impacto em termos hidrodinâmicos foi quantificado refinando para a zona de interesse a malha do modelo focado na área de Montijo (Figura 6). Considerou-se uma malha de passo variável que na zona de interesse tem 2 m e 10 m nas zonas limítrofes do domínio do modelo.

Com base nos resultados do modelo foram quantificadas as diferenças induzidas pelas alternativas Aterro e Estacas sobre a intensidade média e máxima das correntes numa situação de maré viva equinocial para dois cenários de nível médio (batimetria atual):

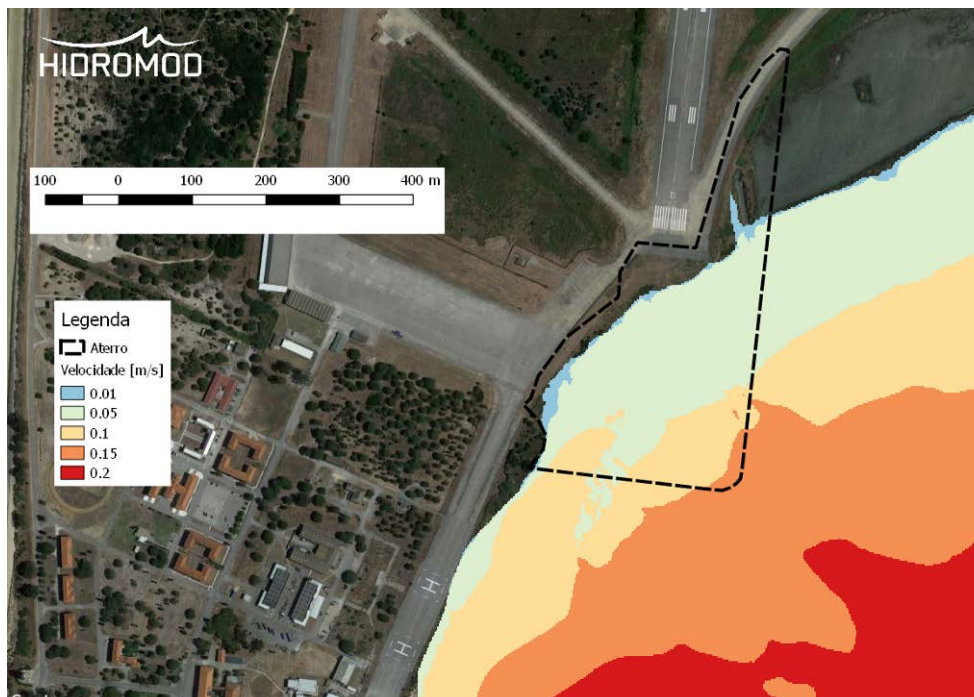
- Cenário 1: Nível médio atual;
- Cenário 2: Nível médio previsto para um horizonte de 100 anos.

O cenário 2 deve ser visto com um exercício de análise sensibilidade aos resultados do modelo uma vez que num horizonte a 100 anos será razoável prever que a batimetria irá sofrer alterações de origem natural (e.g. acreção nos sapais) e antropogénica (e.g. dragagens). Resultados apresentados por Silva (2013) mostram que os sapais do estuário do Tejo têm atualmente uma taxa de sedimentação de 1 a 2 cm/ano.

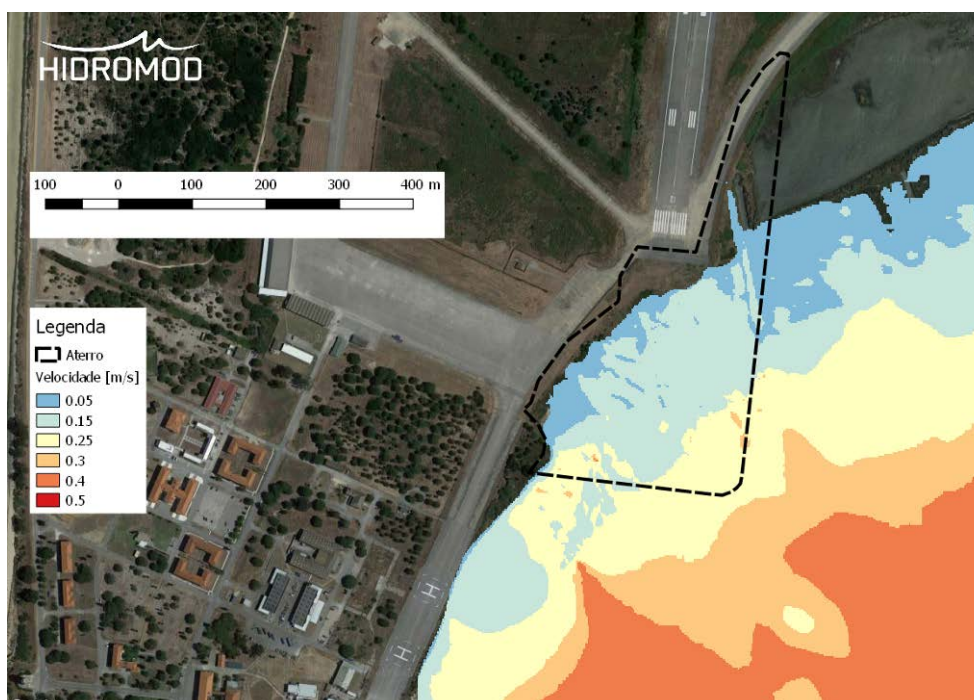
Na situação de referência as intensidades média na área intersetada pela extensão do porto variam entre 1 e 10 cm/s para o cenário 1 (Figura 34) e 1 e 15 cm/s para o cenário 2 (Figura 35). No caso das velocidades máximas estas variam entre 5 e 30 cm/s para o cenário 1 (Figura 36) e 5 e 40 cm/s para o cenário 2 (Figura 37). A zona de corrente média e máxima mais intensa localiza-se no canto inferior direito (SE) da área intersetada pela extensão do aeroporto.



*Figura 34. Intensidade média das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio atual (cenário 1)*

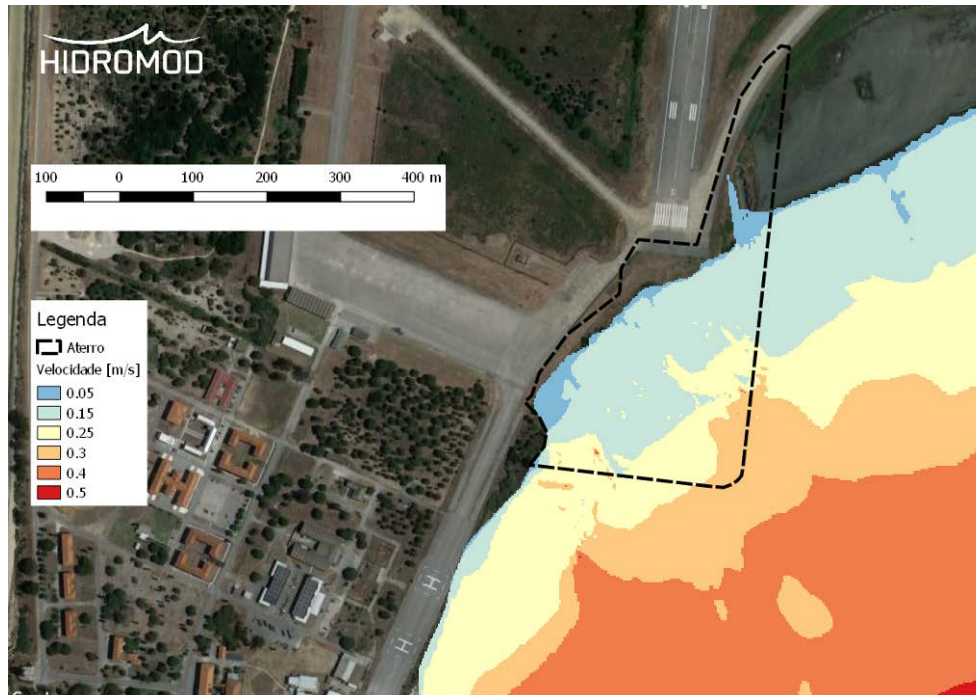


*Figura 35. Intensidade média das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio para um horizonte de 100 anos (cenário 2)*



*Figura 36. Intensidade máxima das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio atual (cenário 1)*





*Figura 37. Intensidade máxima das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio para um horizonte de 100 anos (cenário 2)*

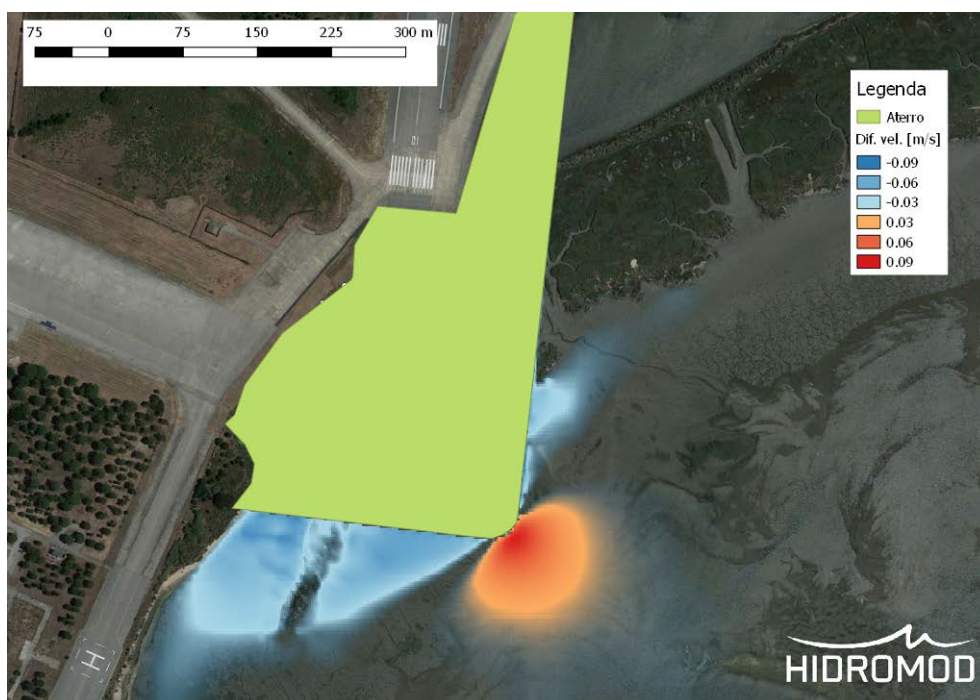
#### 4.3.1. Alternativa em Aterro

A alternativa em Aterro induz para o nível médio atual uma redução da intensidade média imediatamente a sul da ordem de 3 cm/s (Figura 38). A única zona onde ocorre uma intensificação da intensidade média da corrente localiza-se junto ao canto inferior direito (direção Sul-Norte) do aterro. A intensificação referida é 3-6 cm/s e está restringida a uma área de  $\sim 75 \times 75 \text{ m}^2$ . Este padrão espacial repete-se nas diferenças obtidas para o cenário 2 de nível médio, no entanto, neste caso a área onde ocorre uma intensificação da corrente ocupa uma área de  $\sim 150 \times 150 \text{ m}^2$ .

Em termos de diferenças de intensidade máxima de corrente o padrão espacial é semelhante para cada um dos cenários de nível (nível médio atual - Figura 40 e cenário 2 - Figura 41). Tanto as reduções como os acréscimos são  $\sim 10 \text{ cm/s}$ .



*Figura 38. Alternativa em Aterro. Alteração da intensidade média das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio atual*



*Figura 39. Alternativa em Aterro. Alteração da intensidade média das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio para um horizonte de 100 anos*



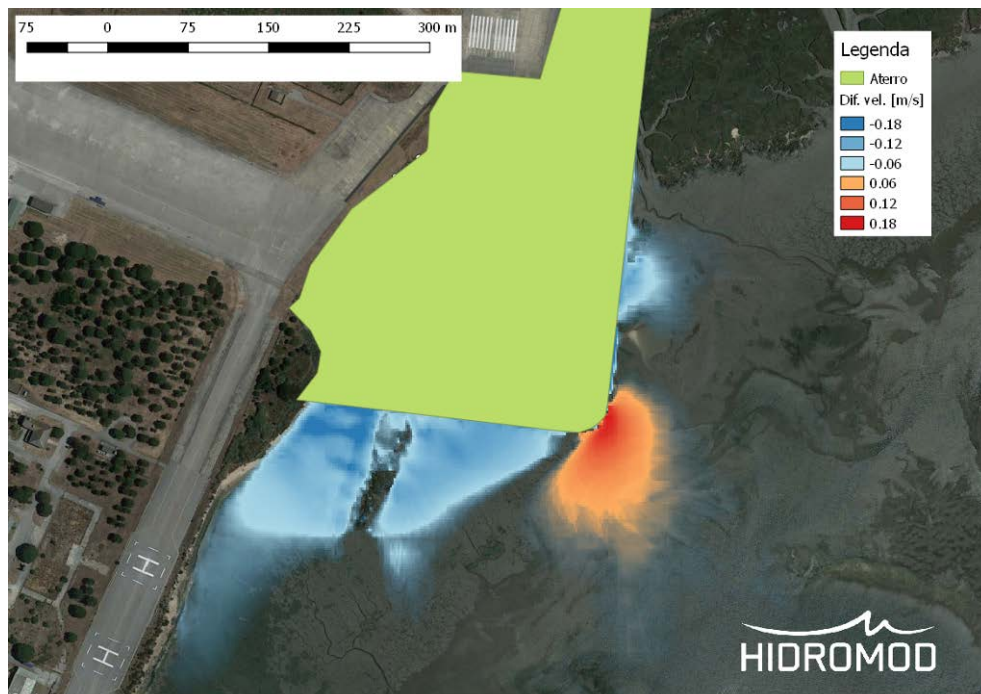


Figura 40. Alternativa em Aterro. Alteração da intensidade máxima das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio atual



Figura 41. Alternativa em Aterro. Alteração da intensidade máxima das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio para um horizonte de 100 anos

#### 4.4. Alternativa em Estacas

Relativamente à alternativa em Aterro a alternativa em Estacas como seria expectável tem um impacto menor sobre as correntes. De uma forma geral existe na zona intersetada pelas estacas uma redução da intensidade média inferior a 3 cm/s tanto no cenário 1 (Figura 42) como no cenário 2 (Figura 43). Em termos de intensidade máxima para a mesma zona a redução é inferior a 6 cm/s no cenário 1 (Figura 44) e igual ~6 cm/s no cenário 2 (Figura 45). A zona imediatamente a Sul da extensão da pista apresenta também reduções semelhantes às já descritas.



*Figura 42. Alternativa em Estacas. Alteração da intensidade média das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio atual*





Figura 43. Alternativa em Estacas. Alteração da intensidade média das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio para um horizonte de 100 anos



Figura 44. Alternativa em Estacas. Alteração da intensidade máxima das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio atual





*Figura 45. Alternativa em Estacas. Alteração da intensidade máxima das correntes em situação de maré viva equinocial com o nível médio para um horizonte de 100 anos*

#### 4.5. Dinâmica sedimentar

O impacte sobre a dinâmica sedimentar tem por base o modelo de sedimentos finos descrito anteriormente (ver “2.3 - Validação do modelo numérico”, para uma descrição mais detalhada ver “7 - Anexo I – Implementação e validação do modelo hidrodinâmico e de sedimentos finos”). A solução deste modelo para o mês de Agosto de 2012 foi refinada para área de interesse utilizando a malha do Montijo que tem uma resolução horizontal de 10 m.

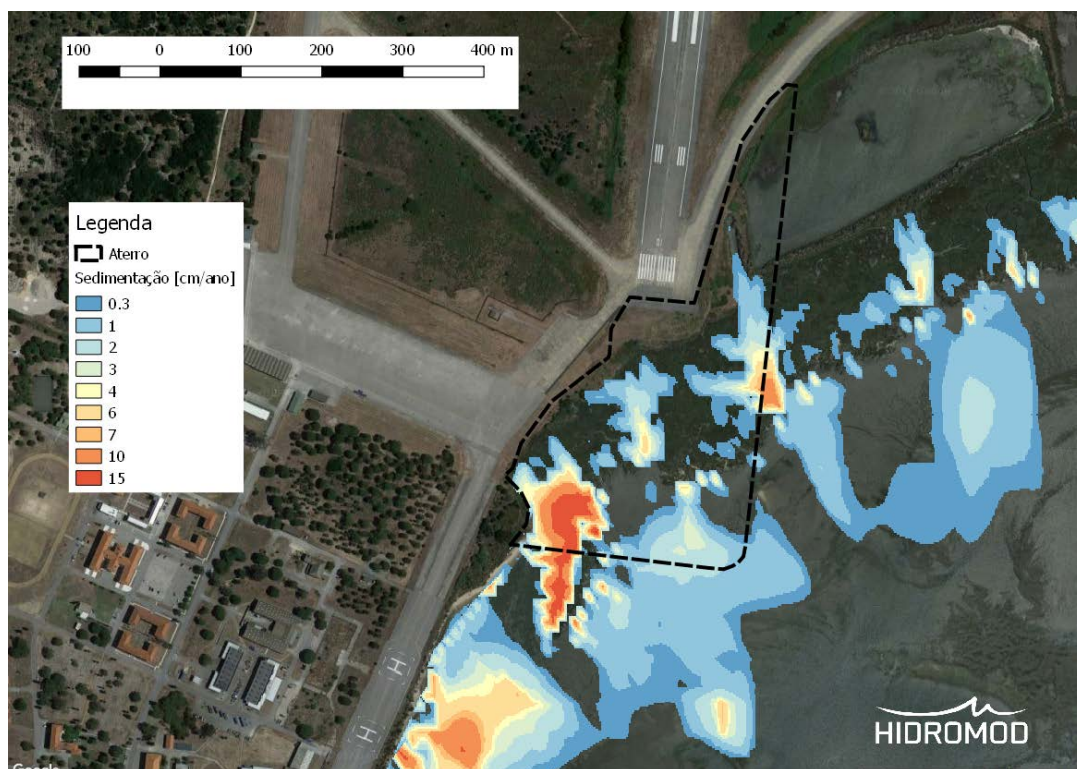
Este modelo foi corrido com e sem aterro. No transporte de sedimentos finos para além do efeito das correntes foi tido em conta a agitação induzida pelos navios de transporte.

Para efeitos de consideração do efeito do tráfego marítimo, foi efetuada uma análise de sensibilidade considerando que, na situação atual, existe uma cadência de um navio a cada meia hora<sup>6</sup> que gera um trem de ondas conceptual. Para efeitos de análise qualitativa do potencial impacte dum aumento do tráfego, foi considerado um cenário alternativo em que se considera que os atuais navios passam a circular com uma frequência 4 vezes superior o que faz com que haja uma geração de um trem de ondas a cada 7.5 minutos.

<sup>6</sup> <http://www.transtejo.pt/clientes/horarios-ligacoes-fluviais/ligacao-montijo-cais-do-sodre/>

Chama-se a atenção para o facto deste cenário alternativo não ter por base qualquer estudo de tráfego associado à nova extensão do aeroporto, visando apenas avaliar a sensibilidade do modelo em termos de impacte da extensão do porto ao tráfego de passageiros (potencial ordem de magnitude do impacte). Com base em bibliografia (Kurennoy et al., 2009) e na observação visual definiu-se que as ondas geradas ao longo da trajetória dos navios de transporte têm uma altura significativa de 40 cm e um período de 3 s. A propagação desta onda para a zona de interesse foi simulada pelo modelo SWAN para a mesma malha do modelo de dinâmica sedimentar ao longo do ciclo de maré.

Os resultados mostram para a situação de referência, ao fim de um mês de simulação, taxas máximas de sedimentação na zona intertidal de 10 cm/ano e na zona de sapal 1-2 cm/ano (Figura 46). Os valores obtidos para a zona de sapal são consistentes com as observações de Silva (2013) para vários sapais do estuário do Tejo. Na zona intertidal e canais adjacentes aos sapais as taxas de sedimentação são mais intensas mas também têm uma natureza mais transiente.



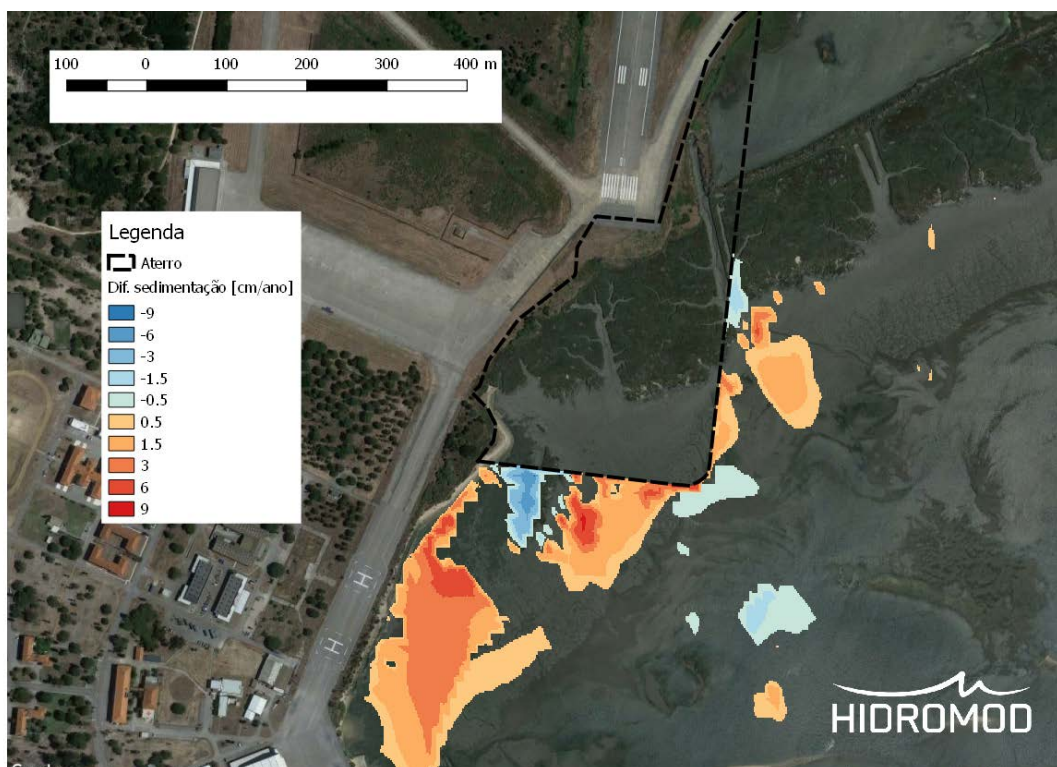
*Figura 46. Sedimentação de finos ao fim de um mês de simulação. Unidades em cm/ano*

As diferenças de taxa de sedimentação entre a situação com aterro e sem aterro para a situação atual de tráfego de passageiros mostra alterações apenas na zona limítrofe do aterro e ao longo da margem do estuário localizada a sul do aterro (Figura 47).

Na zona de sapal localizada a Este do aterro não ocorrem alterações significativas nas taxas de sedimentação. As alterações das taxas de sedimentação estão restringidas à zona intertidal.

Ao longo da zona limítrofe do aterro não existe uma tendência definida. Existem zonas alternadamente de aumento e redução das taxas de assoreamento da ordem de 1-3 cm/ano.

Na margem do estuário localizada a sul do aterro existe claramente um aumento das taxas de sedimentação de 1-3 cm/ano ao longo de uma faixa com ~300m de comprimento por ~100 m de largura.



*Figura 47. Diferenças de taxas de sedimentação de finos entre a alternativa em Aterro e a situação de referência para o cenário atual de frequência de navios de passageiros*

Quando se considera o cenário onde a frequência dos navios de passageiros é multiplicado por 4 o impacto do aterro tende a diminuir. Relativamente ao cenário atual de tráfego o padrão espacial de aumentos e reduções mantém-se mas o valor absoluto das diferenças reduz-se de forma acentuada (Figura 48), por exemplo, o aumento de sedimentação ao longo da margem localizada a sul passa a ser ~0.5 cm/ano.

Não foi simulado o impacto referente à alternativa com estacas uma vez que esta opção tem um impacto muito reduzido sobre as correntes e sobre as ondas. Logo não se prevê, em



termos de dinâmica sedimentar, que haja qualquer impacto significativo a não ser um ligeiro aumento da taxa de sedimentação induzido pelas estacas mas de carácter muito local.



*Figura 48. Diferenças de taxas de sedimentação de finos entre a alternativa em Aterro e a situação de referência para um cenário em que a frequência de navios de passageiros é 4 vezes superior à atual*

## 5. CONCLUSÕES

Com base na descrição da situação de referência apresentada pode-se concluir que para a zona de interesse:

- As correntes têm uma intensidade média de 10-20 cm/s e máxima de 30-50 cm/s;
- Os níveis de águas máximos atingidos em maré viva numa situação sobre-elevação nula são de ~4.4 m (referencial hidrográfico). Quando se considera uma sobre-elevação com um tempo de retorno de 100 anos este valor acresce ~60 cm ou seja o nível máximo passa a ser ~5 m (em referencial hidrográfico);
- As projeções de variação de nível médio devido a alterações climáticas poderão induzir num horizonte de 50 anos um acréscimo de ~30 cm no nível e de ~70 cm num horizonte de 100 anos;
- A agitação marítima com origem no vento pode-se considerar residual. No entanto, os navios de transporte de passageiros geram grupos de ondas periódicos com alturas da ordem das dezenas de centímetros (~20-50 cm, estimativa visual);
- A concentração de sedimentos finos em suspensão apresenta valores mais frequentes de 20 mg/l e máximos de 100 mg/l;
- A zona que intercepta a área de expansão do aeroporto é ocupada por um sapal que por sua vez é limitada por uma zona intertidal vasosa.

Em termos de impactos pode-se concluir que a extensão do aeroporto com base num aterro:

- **Hidrodinâmica:** irá gerar uma redução de correntes a sul do aterro de ~5 cm/s de intensidade média e de ~10 cm/s de intensidade máxima. Haverá uma ligeira intensificação da intensidade média e máxima no canto inferior direito (SE) ~5 cm/s e ~10 cm/s respetivamente;
- **Dinâmica sedimentar:** em termos de taxas de sedimentação de finos irão ocorrer pequenas alterações (~1-3 cm/ano) todas restringidas à zona intertidal localizada na zona limítrofe do aterro e na margem do estuário localizada a sul. Ao longo da zona limítrofe do aterro não existe uma tendência definida, existem zonas alternadamente de aumento e redução das taxas de assoreamento da ordem de 1-3 cm/ano.

Na margem do estuário localizada a sul do aterro existe claramente um aumento das taxas de sedimentação de 1-3 cm/ano ao longo de uma faixa com ~300m de comprimento por ~100 m de largura. O aumento da frequência dos navios não tenderá a agravar significativamente o impacto do aterro sobre a dinâmica sedimentar;

Em termos de impactos pode-se concluir que a extensão do aeroporto com base em estacas:

- **Hidrodinâmica:** dará origem a uma redução da intensidade de correntes de velocidades médias e máxima negligenciável ( $< 5 \text{ cm/s}$ ) na zona das estacas e ao longo da margem localizada a sul;
- **Dinâmica sedimentar:** um ligeiro aumento da taxa de sedimentação induzido pelas Estacas mas de carácter muito local.

## 6. REFERÊNCIAS

- Andrade, C., Pires, H.O., Silva, P., Taborda, R. & Freitas, M.C., 2006. *Zonas Costeiras*. In: F.D. Santos e P. Miranda (eds.), *Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação - Projecto SIAM II*, Gradiva, Lisboa
- Antunes C., 2016. [http://www.dgterritorio.pt/cartografia\\_e\\_geodesia/geodesia/redes\\_geodesicas/rede\\_maregrafica/](http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/geodesia/redes_geodesicas/rede_maregrafica/)
- Canário J, Vale C, 2007. *Monitoring program for the Tagus Estuary and tributaries*, Scientific Report, IPIMAR, June 2007, p. 78.
- Canas, A., A. dos Santos e P. Leitão, 2009. *Effect of large scale atmospheric pressure changes on water level in the Tagus Estuary*, Journal of Coastal Research, SI 56 ICS2009 (Proceedings), pp. 1627 – 1631, ISSN 0749-0258.
- Dias J.M., Valentim J.M., Sousa M.C., 2013. *A Numerical Study of Local Variations in Tidal Regime of Tagus Estuary, Portugal*. Plos One. 8, 12, 80-450.
- Dias, J.M.A. e Taborda, R., 1988. *Evolução recente do nível médio do mar em Portugal*. Anais do Instituto Hidrográfico, 9, 88-97.
- Elias, N.T.P., 1992. *Nova ponte do Tejo em Lisboa. Caracterização das condições hidrodinâmicas e de estabilidade dos canais*. Rel. 212/92 – NET, LNEC, Lisboa, Portugal. (não publicado).
- Franz, G.; Leitão, P.; Pinto, L.; Jauch, E.; Fernandes, L.; and Neves, R., 2017, *Development and validation of a morphological model for multiple sediment classes*. International Journal of Sediment Research, 5 2017.
- Franz, G.; Pinto, L.; Ascione, I.; Mateus, M.; Fernandes, R.; Leitão, P.; and Neves, R., 2014, *Modelling of cohesive sediment dynamics in tidal estuarine systems: Case study of Tagus estuary, Portugal*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 151: 34-44. 2014.
- Freire, P.; Taborda, R.; Andrade, C., 2006. *Caracterização das praias estuarinas do Tejo*. 12p., Atas do 8º Congresso da Água, APRH – Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, Lisboa, Portugal. Available at: [http://www-ext.lnec.pt/LNEC/bibliografia/DHA/freire-et-al\\_06.pdf](http://www-ext.lnec.pt/LNEC/bibliografia/DHA/freire-et-al_06.pdf)
- Kurennoy D., T. Soomere e K.E. Parnell, 2009. *Variability in the Properties of Wakes Generated by High-Speed Ferries*. Journal of Coastal Research, SI 56, 519-523, ICS2009 Proceedings.
- Leitão, P., 2003. *Integração de Escalas e de Processos na Modelação no Ambiente Marinho*. PhD. Thesis Ms. Sc. Thesis, Instituto Superior Técnico Universidade Técnica de Lisboa. (<http://maretec.mohid.com/MaretecManagement/Thesis.asp>)
- Lemos, P.A.F. 1972. *Estuário do Tejo*. Administração Geral do Porto de Lisboa, Lisboa.
- Martins, F., 2000. *Modelação Matemática Tridimensional de escoamentos costeiros e estuarinos usando uma abordagem de coordenada vertical genérica*. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico. Tese de Doutoramento, 2000.
- Neves, F. J., 2010. *Dynamics and Hydrology of the Tagus Estuary: Results from In Situ Observations*. PhD thesis, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 210 pp.

Pina, P., 2001. *An integrated approach to study the Tagus Estuary water quality*. MsC Thesis. Technical University of Lisbon.

Portela, L.I., 1996. *Modelação Matemática da Hidrodinâmica e dos Processos de Qualidade da Água no Estuário do Tejo*, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Silva, T.A.A., 2013. Sedimentologia e morfodinâmica de sapais do estuário do Tejo em cenários de alteração climática. Mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.

Vale, C. & B. Sundby, 1987. *Suspended sediment fluctuations in the Tagus estuary on semidiurnal and fortnightly time scales*, Estuarine, Coastal and Shelf Science 27: 495-508.

Vale, C., 1981. *Input of suspended particulate matter in the Tagus estuary during the flood of February 1979*. Recur. Hidricos 2, 37-45.

Valente, A.S. and da Silva, J.C.B., 2009. *On the observability of the fortnightly cycle of the Tagus estuary turbid plume using MODIS ocean colour images*. Journal of Marine Systems, 75(1-2): 131-137.

Valentim, J.M., Vaz, L., Vaz, N., Silva, H., Duarte, B., Caçador, I. and Dias, J.M., 2013. *Sea level rise impact in residual circulation in Tagus estuary and Ria de Aveiro lagoon*. Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65, pp. 1981-1986, ISSN 0749-0208.

Vargas C., F. Oliveira, A. Oliveira e N. Charneca (2008). *Análise da Vulnerabilidade de uma Praia Estuarina à Inundação: Aplicação à Restinga do Alfeite (Estuário do Tejo)*. Revista da Gestão Costeira Integrada 8(1):25-43 (2008).

Vaz N., Dias J.M., 2014. *Residual currents and transport pathways in the Tagus estuary, Portugal: the role of freshwater discharge and wind*. Journal Of Coastal Research. 610-615.

Vaz N., Mateus M., Dias J.M., 2011. *Semidiurnal and spring-neap variations in the Tagus Estuary: Application of a process-oriented hydro-biogeochemical model*. Journal Of Coastal Research. SI64, 1619-1623.

Vaz N., Mateus M., Plecha S., Sousa M.C., Leitao P.C., Neves R., Dias J.M., 2015. *Modeling SST and chlorophyll patterns in a coupled estuary-coastal system of Portugal: The Tagus case study*. Journal Of Marine Systems. 147, 123-137.

Vaz, N., M. Mateus e J.M. Dias, 2009. *Semidiurnal and spring-neap variations in the Tagus Estuary: Application of a process-oriented hydro-biogeochemical model* SI 64 (Proceedings of the 10th International Coastal Symposium), 1619 - 1623.



## **7. ANEXO I – IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO E DE SEDIMENTOS FINOS**

### **7.1. Malhas de cálculo**

A metodologia seguida para gerar as malhas de cálculo incluiu 3 fases de trabalho. Numa primeira fase foi feita uma avaliação dos dados batimétricos e topográficos de modo a assegurar que:

- A informação está homogeneizada uma vez que existem fontes heterogéneas de informação;
- Os domínios de estudo abrangem as zonas de interesse;
- A resolução horizontal na área de interesse é suficiente para visualizar os canais de navegação;
- Existe continuidade entre os diferentes levantamentos batimétricos;
- Toda a informação está referenciada ao mesmo sistema de coordenadas e datum vertical.

Numa segunda fase todos os dados foram harmonizados através do uso de coordenadas geográficas *datum* WGS84 e *datum* vertical zero hidrográfico (ZH). Estes dados foram posteriormente combinados começando no nível mais básico com os dados do EMODNET que foram sendo complementados com dados de maior qualidade sempre que esses dados existiam (tipicamente a informação batimétrica compilada para o local de estudo).

As malhas de cálculo foram efetuadas considerando 3 escalas de resolução:

- A escala regional (e.g., modelo da península ibérica e da região centro/sul de Portugal);
- A escala do Estuário do Tejo;
- A escala local (e.g., TCB).

Para estas 3 escalas foram adotadas respetivamente as resoluções de 6 km e 1 km para a escala regional (Figura 49), 200 m para a escala do Estuário do Tejo (Figura 50) e 25 m para a escala local (Figura 51).

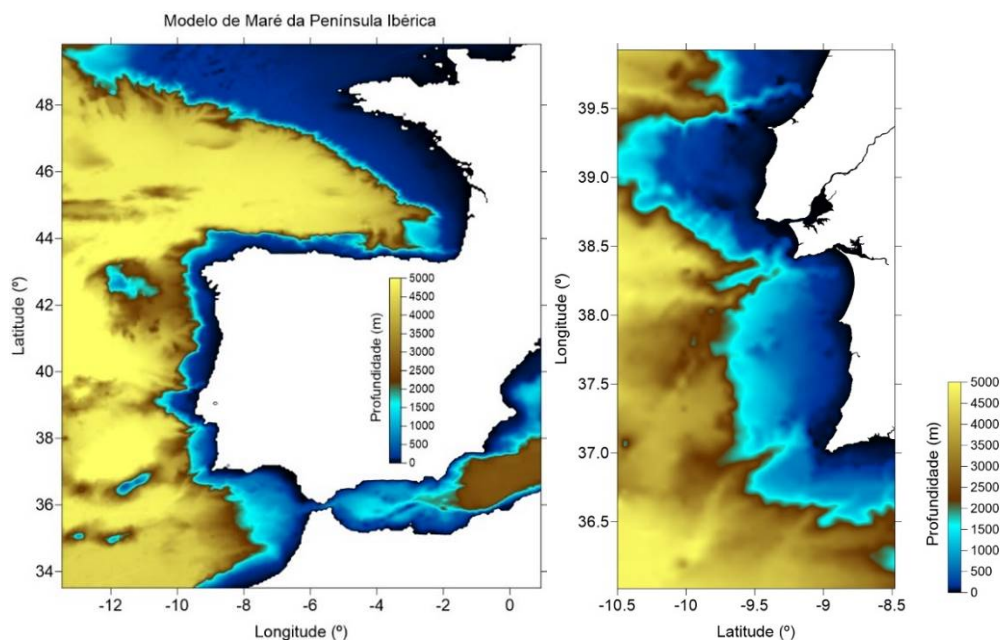


Figura 49. Domínio modelação implementado para geração da maré na Península Ibérica (6 km de resolução) e região centro/sul de Portugal para propagação da maré (1 km de resolução)

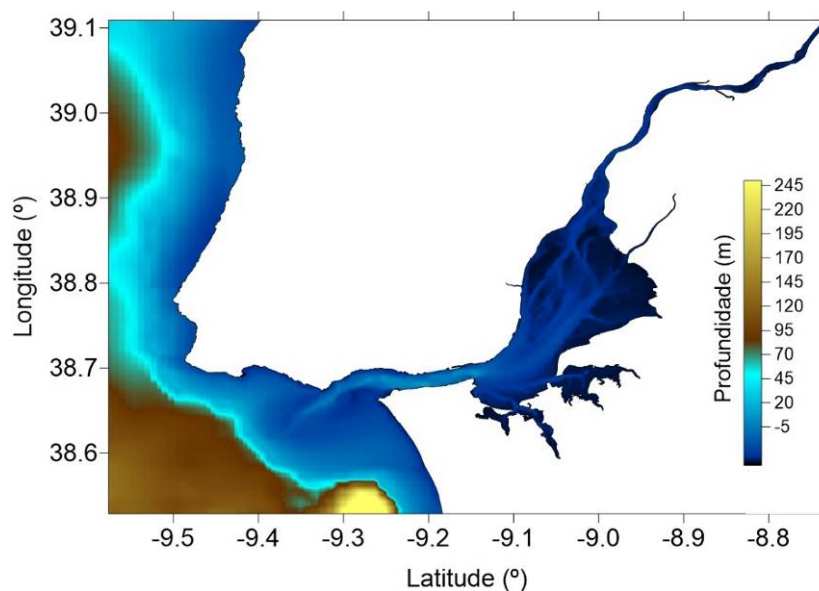


Figura 50. Domínio do Estuário do Tejo (200 m de resolução)

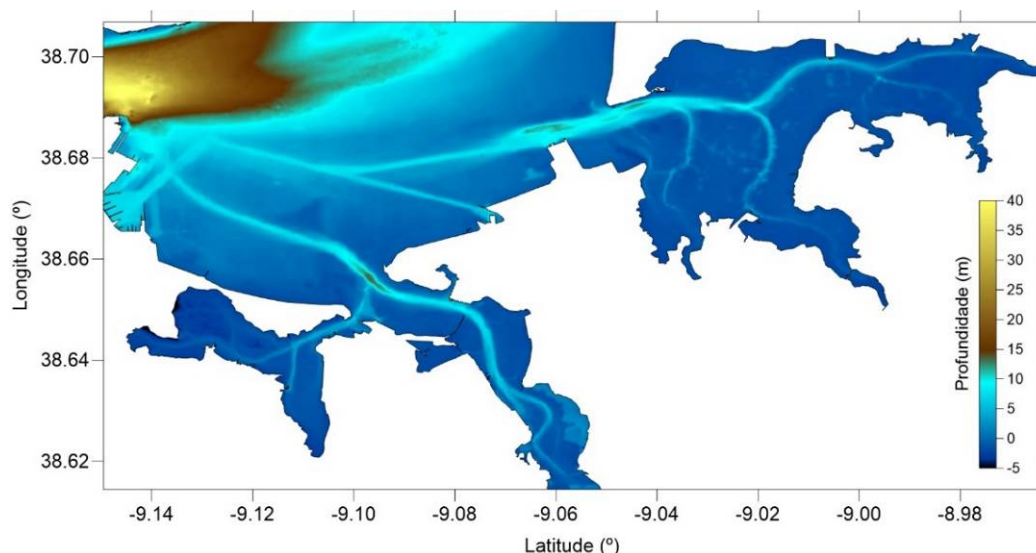


Figura 51. Domínio local que inclui os canais de navegação de acesso ao TCB (25 m de resolução)

## 7.2. Configuração do modelo hidrodinâmico

O modelo do Estuário do Tejo, baseado no sistema MOHID (<http://www.mohid.com>), utiliza uma metodologia baseada numa filosofia de modelos encaixados. Esta metodologia tem sido utilizada em diversos estudos e aplicações do modelo MOHID ao Estuário do Tejo (Leitão et al., 2004, Leitão et al., 2005, Vaz et al., 2009, Canas et al., 2009, Vaz et al., 2011, Vaz et al., 2014), ao Estuário do Sado (Martins et al., 2001), à Lagoa de Óbidos (Malhadas et al., 2009), à Ria de Aveiro (Vaz et al., 2007) e à Costa Portuguesa (Malhadas et al., 2015, Mateus et al., 2012).

A metodologia desenvolvida representa uma solução eficiente na resolução dos problemas das diferentes escalas, porque permite fazer *downscaling* a partir duma solução de menor resolução e incluir nos modelos locais os processos de grande escala. Desta forma é possível integrar processos desde a escala dos quilómetros, como é o caso da maré, com processos da escala dos metros, como é o caso dos processos que ocorrem nos canais. A comunicação entre modelos é feita *one-way*, ou seja, os modelos de maior escala influenciam os modelos de menor escala, mas o contrário não ocorre. Os modelos “pai” vão transmitir a informação para os seus “filhos” e assim sucessivamente permitindo que a informação de uns seja a condição de fronteira dos outros.

Para este projeto foi considerado um sistema com 3 níveis encaixados (Figura 52) inseridos no modelo de maré da Península Ibérica<sup>7</sup> (Malhadas et al., 2015).

<sup>7</sup> O domínio do modelo abrange a Península Ibérica e tem uma dimensão de 241x273 células de cálculo e resolução espacial de cerca de 6 km. A maré imposta na fronteira aberta foi obtida a partir da solução global de maré FES 2012 (Carrere et al., 2012). Na vertical assume que o fluxo é barotrópico (a coluna de água corresponde a uma única camada) porque tem como único objetivo simular a propagação da maré para domínios mais pequenos.

O modelo de maré da Península Ibérica é um modelo bidimensional que simula a propagação da maré na Costa Portuguesa e corre em modo operacional na Hidromod. Tem uma malha de resolução de cerca de 6 km de resolução espacial e inclui o efeito da maré através da utilização do modelo global de maré FES 2012 (Carrere *et al.*, 2012).

O nível 1 compreende a Costa Algarve - Lisboa com resolução de 1 km x 1 km e recebe as condições de fronteira do nível anterior (modelo de maré da Península Ibérica). Este modelo serve para propagar as condições de oceano aberta para o modelo do Estuário do Tejo.

O nível 2 abrange o Estuário do Tejo com resolução de 200 metros. Este domínio de modelação recebe condições de fronteira do nível anterior. Este nível inclui igualmente as descargas fluviais (caudal e concentração de sedimentos coesivos) nos rios Tejo, Trancão e Sorraia e a ação das ondas.

Os valores de caudal considerados para o Rio Tejo correspondem a dados horários medidos na estação de Almourol (<http://snirh.apambiente.pt>) e a concentração de sólidos é estimada a partir da equação  $CSC = 0.0043 * Caudal^{1.45}$  obtida com base no histórico de medidas de 1984 a 1992 (Franz *et al.*, 2014). Para os Rios Sorraia e Trancão são impostas médias mensais de caudal e concentrações obtidas com base no histórico de monitorização (<http://snirh.apambiente.pt>).

O campo de ondas produzido por ação do vento local pode ser gerado com base no conceito de campo de *fetch* incluído no sistema MOHID que assume os pressupostos de Seymour (1977) e Kang *et al.* (1982) ou recorrendo ao modelo de geração/propagação SWAN. Em qualquer dos casos o forçamento do vento local é imposto com os dados de intensidade e direção do vento gerados com o modelo WRF de 4 km. Como condição de fronteira no *fundo* é imposta uma tensão de corte e uma distribuição inicial de sedimentos coesivos de  $100 \text{ kg.m}^{-2}$ .

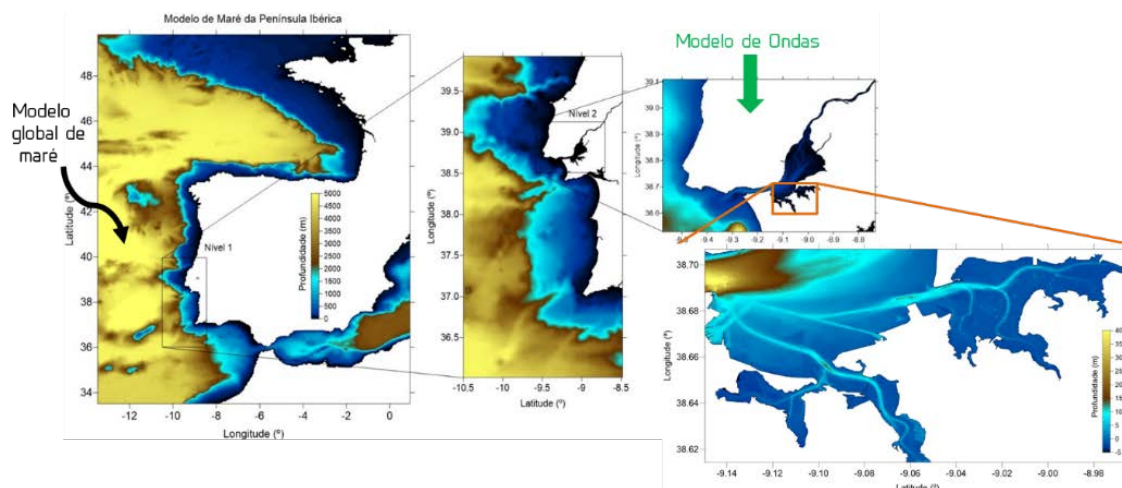
O nível 3 abrange a zona do Barreiro e tem uma resolução de 25 m. Este domínio de modelação recebe condições de fronteira do nível anterior e simula a hidrodinâmica à escala local assumindo o efeito dos canais de navegação na batimetria e os processos de transporte de sedimentos coesivos e não-coesivos. O modelo assume o forçamento do vento e o efeito das ondas locais.

Na *Tabela 2* apresenta-se um resumo do sistema de modelação implementado para simular a hidrodinâmica e transporte de sedimentos no Estuário do Tejo.

*Tabela 2. Resumo do sistema de modelação que permite simular a hidrodinâmica e transporte de sedimentos no Estuário do Tejo.*

<b>Características</b>	<b>Modelo de maré Península Ibérica</b>	<b>Costa Algarve-Lisboa</b>	<b>Estuário do Tejo</b>	<b>Barreiro</b>
Pontos de Cálculo	241x273	122x235	335x212	768x376
Resolução Espacial	6 km	1 km	200 m	25 m
Passo Temporal (s)	90	45	15	5
Discretização Vertical	1 camada	1 camada	1 camada	1 camada
Propriedades Simuladas	Nível e correntes	Nível e correntes <sup>e</sup>	Nível e correntes	Nível, correntes, sedimentos coesivos e não-coesivos
Fluxo	Barotrópico	Barotrópico	Barotrópico	Barotrópico/Baroclínico*
Maré Imposta	Global Tide FES 2012	Sub-modelo	Sub-modelo	Sub-modelo
Esquema de Advecção	TDV - Superbee	TDV Superbee	TDV - Superbee	TDV - Superbee
Fronteira Aberta	Maré (Fes 2012)	Modelo Península Ibérica	Costa Algarve-Lisboa	Barreiro
Ondas	-	-	Campos gerados pelo modelo SWAN que assume o forçamento do vento local do modelo WRF de 4 km	Campos gerados pelo modelo de SWAN que assume o forçamento do vento local do modelo WRF de 4 km

\* O nível de modelo encaixado correspondente ao TCB pode simular os processos em modo bidimensional ou tridimensional dependendo dos parâmetros a simular. No caso dos sedimentos coesivos assumiu-se uma configuração tridimensional e nos não-coesivos bidimensional.



*Figura 52. Configuração da cascata de modelos utilizada para simular os processos no estuário do Tejo. O nível 3 corresponde a um modelo local para a zona do Barreiro com uma resolução de 25 metros*

### 7.3. Validação

#### 7.3.1. Nível do mar

Os níveis previstos pelo modelo e sua comparação com os níveis medidos no marégrafo de Cascais para o período de 1 de Janeiro a 31 de Dezembro de 2012 são apresentados na Figura 53. Na

Tabela 3 apresentam-se os parâmetros estatísticos obtidos entre as medidas e as previsões do modelo. Os níveis previstos pelo modelo são concordantes com os níveis medidos apresentando erros relativos da ordem de 3% que se traduz num erro médio de 9 cm. Os resultados mostram ainda uma boa correlação com as medidas indicando que os valores previstos pelo modelo seguem a tendência média das medidas.



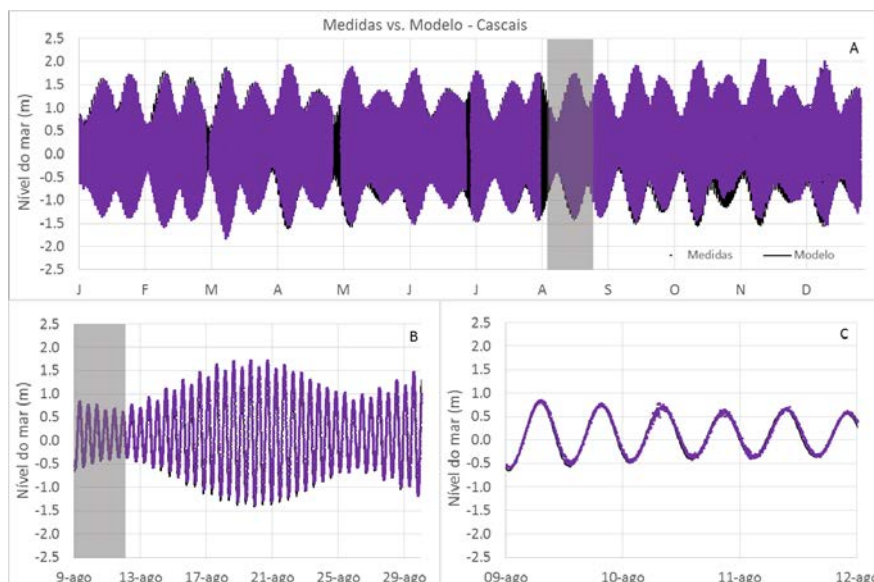


Figura 53. Comparação entre o nível de maré medido no marégrafo de Cascais (pontos roxo) e o previsto pelo modelo MOHID (linha preta) para o período de 1 de janeiro a 31 de dezembro de 2012 (A), para um ciclo de maré viva-morta em agosto de 2012 (B) e para 3 dias em agosto de 2012 (C)

Tabela 3. Parâmetros estatísticos obtidos entre as medidas do nível do mar e os valores previstos pelo modelo no local do marégrafo de Cascais para o período de 1 de Janeiro a 31 de Dezembro de 2012.

Marégrafo	Nº dados	R	RMSE (m)	NRMSE (%)
Cascais	43539	0.993	0.09	3

### 7.3.2. Correntes

As correntes previstas pelo modelo para o período de 26 de Junho a 31 de Dezembro de 2012 e comparação com as medidas obtidas através do ADCP instalado no local B1 (Figura 7) apresentam-se na Figura 54. Na Tabela 4 apresentam-se os parâmetros estatísticos obtidos entre as medidas e as previsões do modelo.

Os resultados obtidos para a comparação do módulo da velocidade mostram que existe uma boa correlação ( $R \sim 0.8$ ) com os dados medidos no local B1 (Figura 7). O erro (RMSE) estimado para cerca de um período de 6 meses corresponde a  $0.16 \text{ m.s}^{-1}$ . A comparação das velocidades mostra que mostra que as correntes naquele local têm uma grande oscilação ao ciclo maré viva-maré morta. As intensidades de mais elevadas ocorrem nas vazantes quando o nível de água diminui, com valores de pico na ordem de  $1.0 \text{ m.s}^{-1}$  na maré viva e  $0.4 \text{ m.s}^{-1}$  na maré morta.

### 7.3.3. Turbidez e sedimentos finos

Para verificar a variação diária, quinzenal e mensal dos sedimentos coesivos foram comparados resultados do modelo com os dados de turbidez medidos no local B1 durante um período contínuo de mais de um ano e noutros pontos do estuário recorrendo a amostragens pontuais (Figura 7).

Começando pelas medidas realizadas no ponto B1 são apresentadas na Figura 55 comparações para o 2º semestre de 2012 (6 meses de dados). Neste caso, como a turvação está diretamente relacionada com a concentração de sedimentos em suspensão (Fink, 2005) e os dados de turbidez foram registados com uma frequência de 20 min, é possível avaliar a variação diária, quinzenal e mensal dos resultados do modelo. De facto, a correlação obtida entre as concentrações de sedimentos coesivos simuladas pelo modelo e a turbidez medida foi da ordem de 0.70 o que mostra que estes dois parâmetros estão fortemente correlacionados.

Analisando a série temporal de turbidez e de concentração de sedimentos observa-se que existe similaridade na fase e nos picos de amplitude, embora, com o modelo a subestimar alguns picos observados (Figura 55). O ciclo de maré explica, quase na sua totalidade a variabilidade temporal observada (Figura 55, janela A, B e C). A única exceção são os picos diurnos em marés-vivas de turbidez (Figura 55, janela D e E).

Quando se analisam os resultados na escala dos dias, observa-se que o modelo reproduz corretamente os picos noturnos em maré viva mas tem mais dificuldade em reproduzir os picos diurnos (diferenças de amplitude) registados nas medidas de turbidez. Este sinal diurno que origina o pico de turbidez (Figura 55, janela E) em marés vivas está muito provavelmente associado ao ciclo de produção do fitoplâncton. O aumento de turbidez na coluna de água está associado a um incremento da Clorofila-a. Nas medidas de Clorofila-a (Figura 56) observa-se uma sincronização entre o pico de turbidez e o aumento de Clorofila-a durante o período diurno (Figura 56, janela A).

No estudo levado a cabo por Fielding *et al.*, (1991) foi observada uma forte correlação entre turbidez e partículas em suspensão na coluna de água e entre este último e a Clorofila *a*. As mesmas conclusões foram obtidas por Joint & Pomroy (1981) e Randall & Day (1987) onde encontraram uma correlação entre Clorofila-a e turbidez.

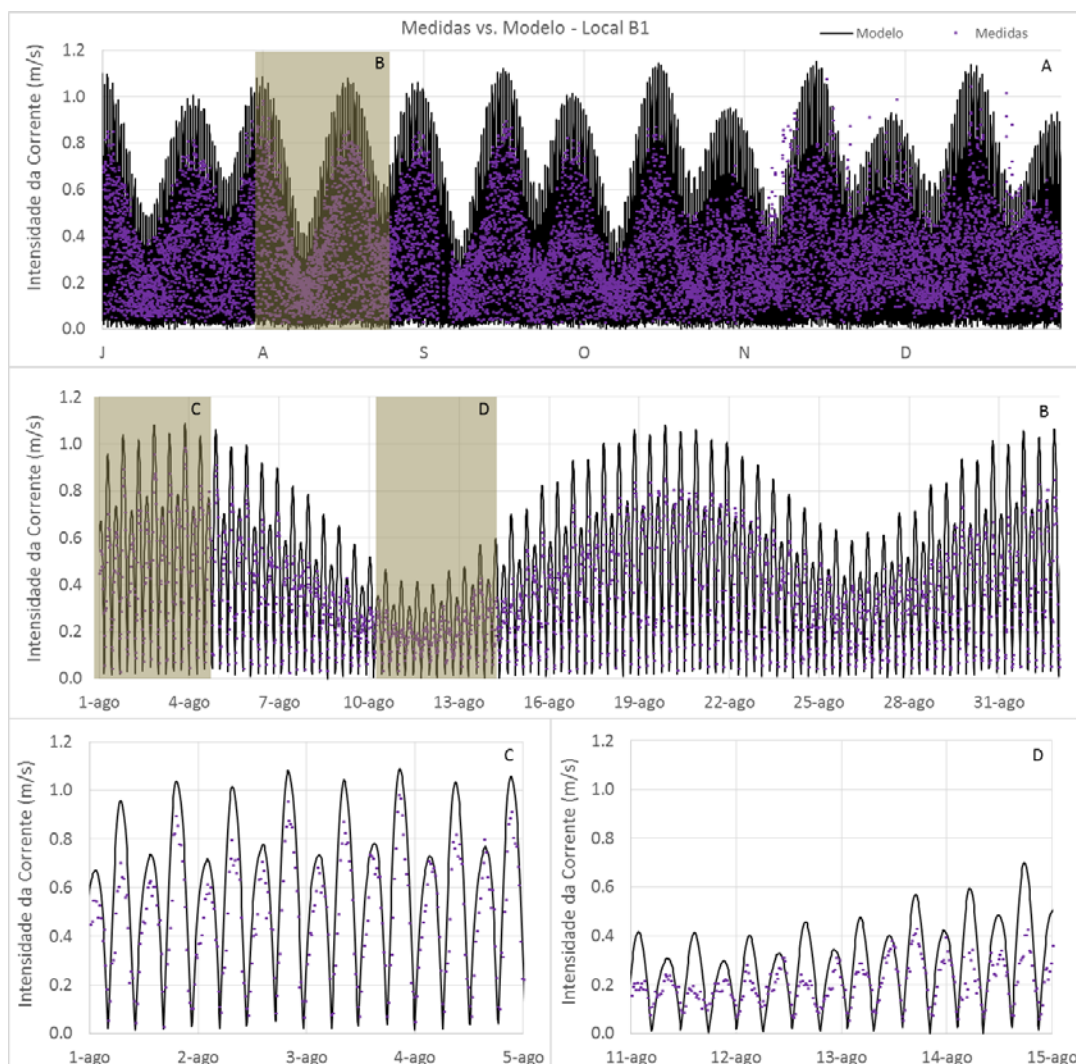


Figura 54. Comparação entre as correntes medidas no local B1 (pontos roxo) e os valores previstos pelo modelo MOHID (linha preta) para o período de 1 de julho a 31 de dezembro de 2012 (A), para um ciclo de maré viva-morta em agosto de 2012 (B), para 5 dias de marés vivas em agosto de 2012 (C) e 5 dias de marés mortas em agosto de 2012.

Tabela 4. Parâmetros estatísticos obtidos entre as medidas de correntes e os valores previstos pelo modelo no local B1 para o período de 1 de julho a 31 de dezembro de 2012.

ADCP	Nº dados	R	RMSE ( $\text{m.s}^{-1}$ )	NRMSE (%)
Local B1	13294	0.797	0.16	22

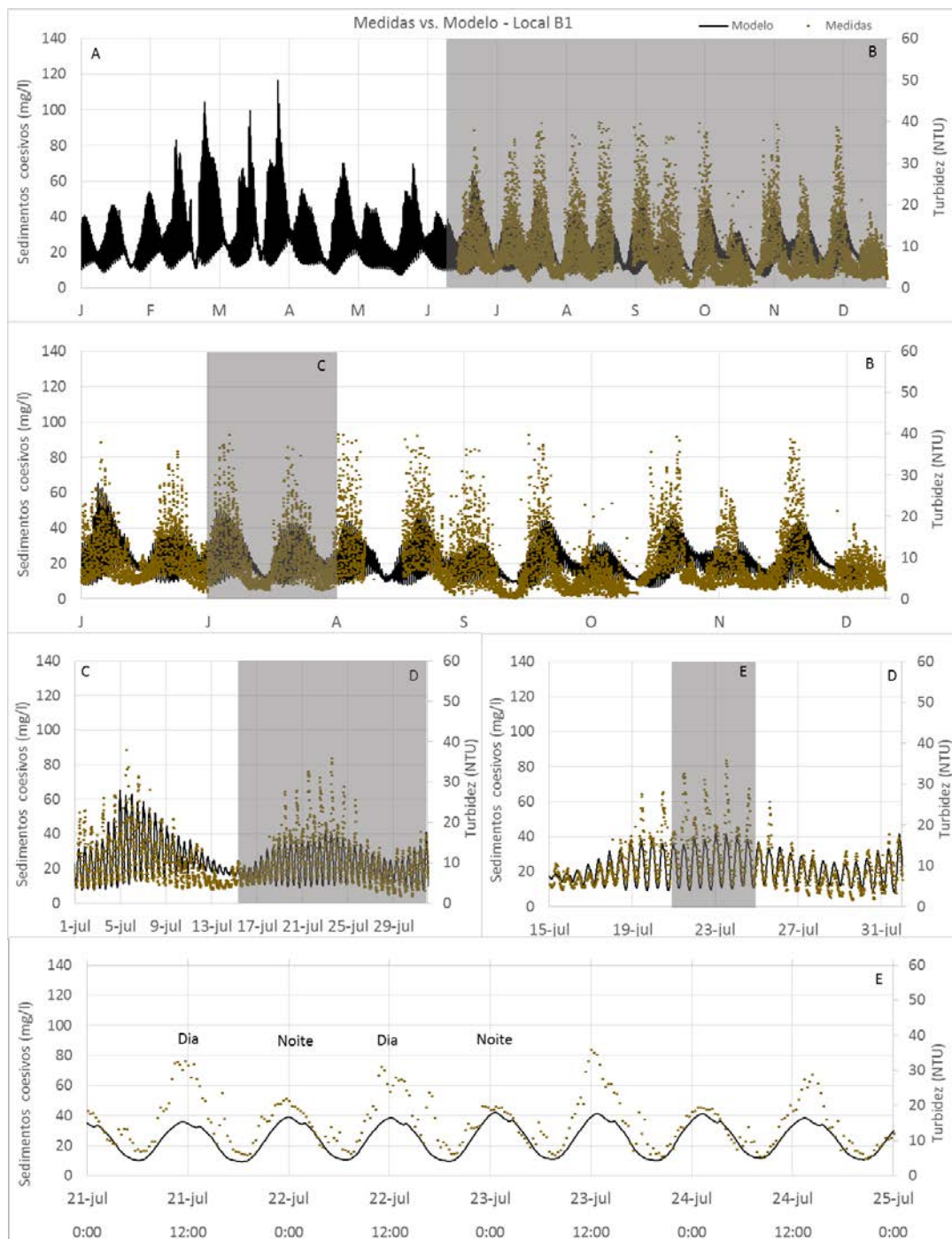
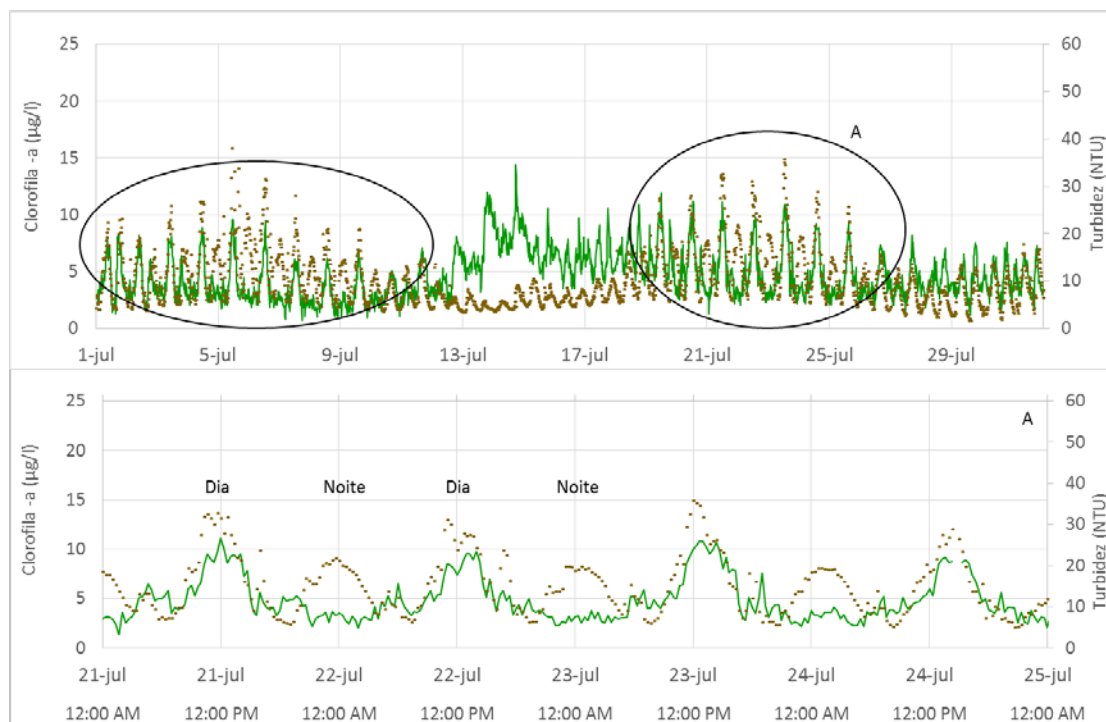


Figura 55. Comparação entre as medidas de turbidez no local B1 (pontos verde) e os sedimentos coesivos previstos pelo modelo MOHID (linha preta) para o período de 1 de janeiro a 31 de dezembro de 2012 (A), para um período de seis meses (1 de junho a 31 de dezembro de 2012, B), para um ciclo de maré viva-morta em julho de 2012 (C), para 15 dias de marés vivas em julho de 2012 (D) e 4 dias de marés vivas em julho de 2012 (E)



*Figura 56. Comparação entre as medidas de turbidez no local B1 (pontos verde) e a Clorofila-a medida (linha verde) para um ciclo de maré viva-morta em julho de 2012 e 4 dias de marés vivas em julho de 2012 (A)*

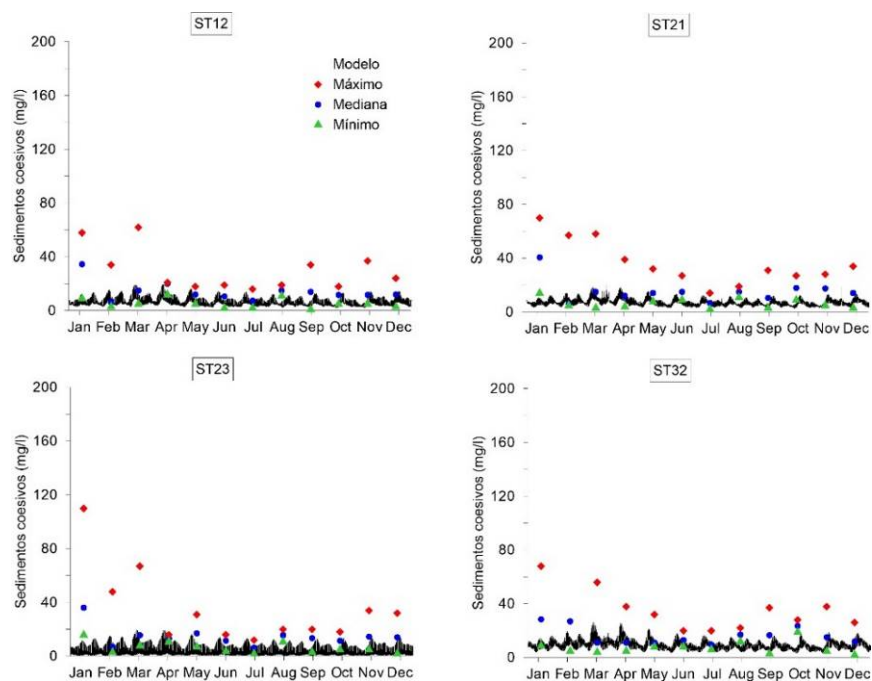
Para além desta análise, foi igualmente feita uma avaliação da consistência das concentrações calculadas com o modelo para o ano de 2012 e os valores disponíveis para diferentes pontos do estuário. Para estes casos foram determinados parâmetros estatísticos (máximo, médio e mínimo) calculados a partir do mês de cada ano das séries medidas entre 2004 a 2012 que são apresentados da Figura 57 à Figura 61. Optou-se por considerar o ano de 2012 como o ano de referência para comparação porque corresponde ao ano em que o modelo convergiu para as concentrações de sedimentos em suspensão observados ao longo do estuário do Tejo após dois anos de simulação.

De um modo geral observa-se que o modelo representa com sucesso as bandas médias, máximas e mínimas da distribuição de sedimentos em suspensão observada ao longo do estuário. As concentrações durante as marés vivas são muitas vezes superior a  $50 \text{ mg.l}^{-1}$  nas estações localizadas em áreas de menores profundidades e nas zonas mais profundas, nomeadamente perto da foz do estuário, as concentrações são inferiores a  $50 \text{ mg.l}^{-1}$  (ST12, ST21 e ST23).

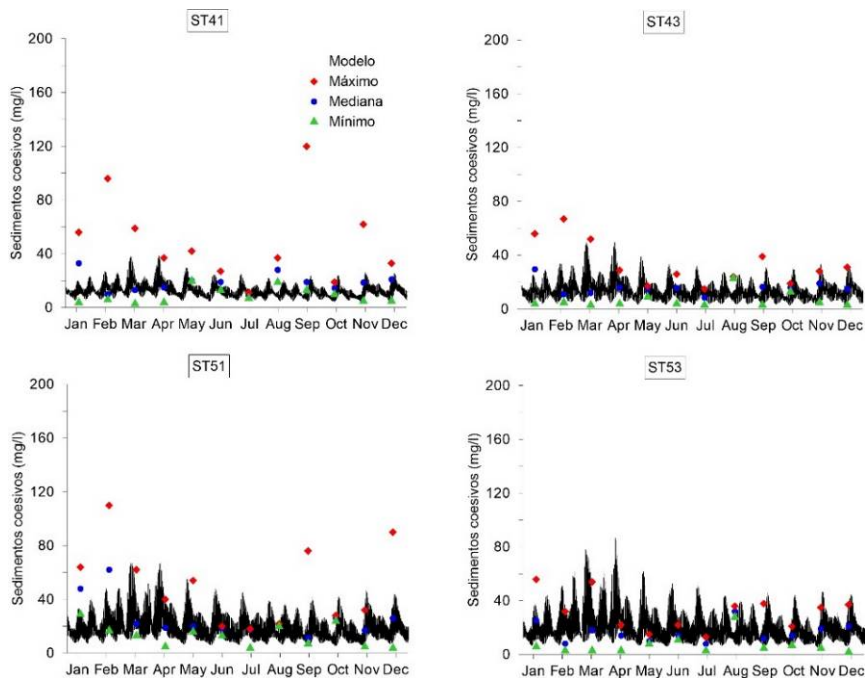
Na área de estudo propriamente dita (loais ST53, ST54, ST65), observa-se que o modelo reproduz bem a banda estatística obtida através das medidas com mínimos da ordem de  $10 \text{ mg.l}^{-1}$  e máximos da ordem de  $100 \text{ mg.l}^{-1}$ . Nestas condições, assume-se que o modelo



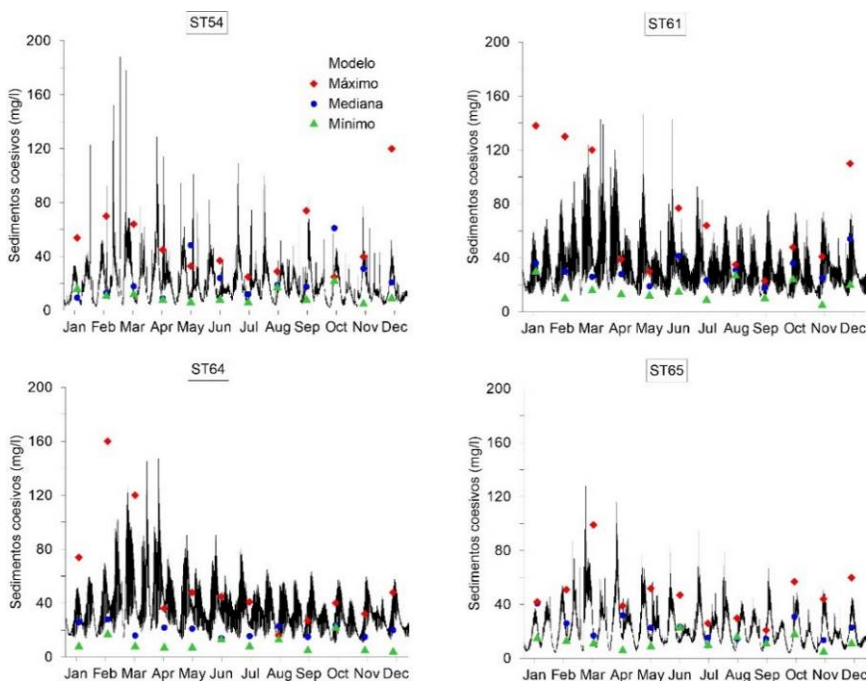
reproduz de uma forma geral a variabilidade observada em termos de concentração de sedimentos coesivos em suspensão no estuário do Tejo a uma escala anual.



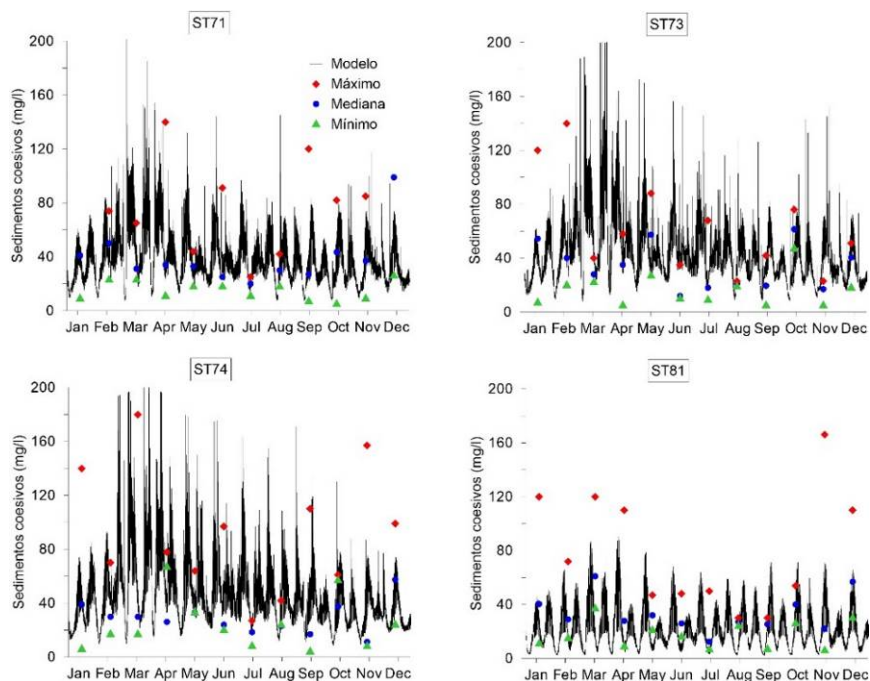
*Figura 57. Comparação dos sedimentos coesivos simulados para o ano de 2012 e o mínimo, mediana e máximo mensal obtido com base nas medidas entre 2004 e 2012 nos locais ST12, ST21, ST23 e ST32*



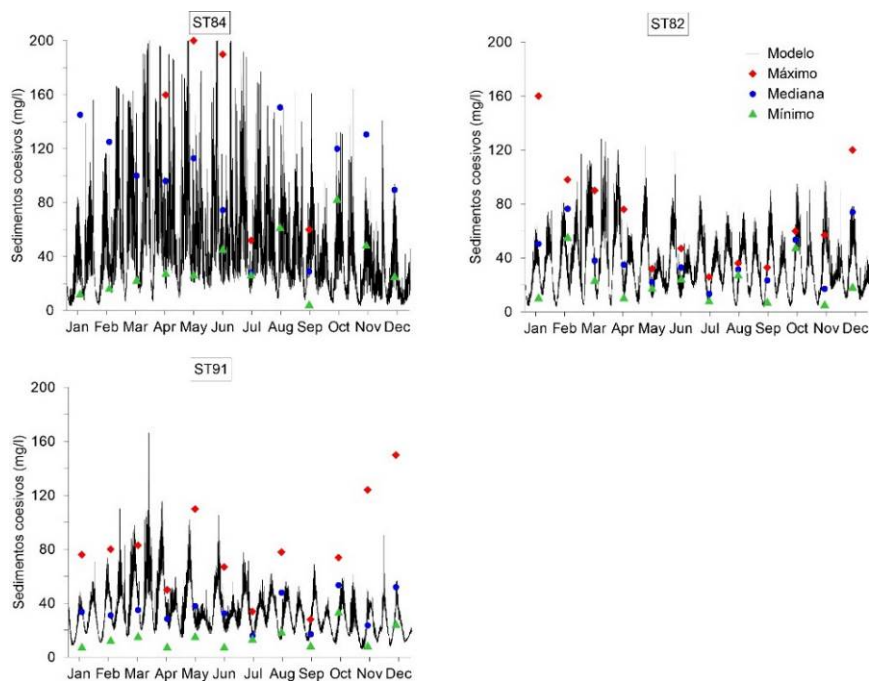
*Figura 58. Comparação dos sedimentos coesivos simulados para o ano de 2012 e o mínimo, mediana e máximo mensal obtido com base nas medidas entre 2004 e 2012 nos locais ST41, ST43, ST51 e ST53*



*Figura 59. Comparação dos sedimentos coesivos simulados para o ano de 2012 e o mínimo, mediana e máximo mensal obtido com base nas medidas entre 2004 e 2012 nos locais ST54, ST61, ST64 e ST65*

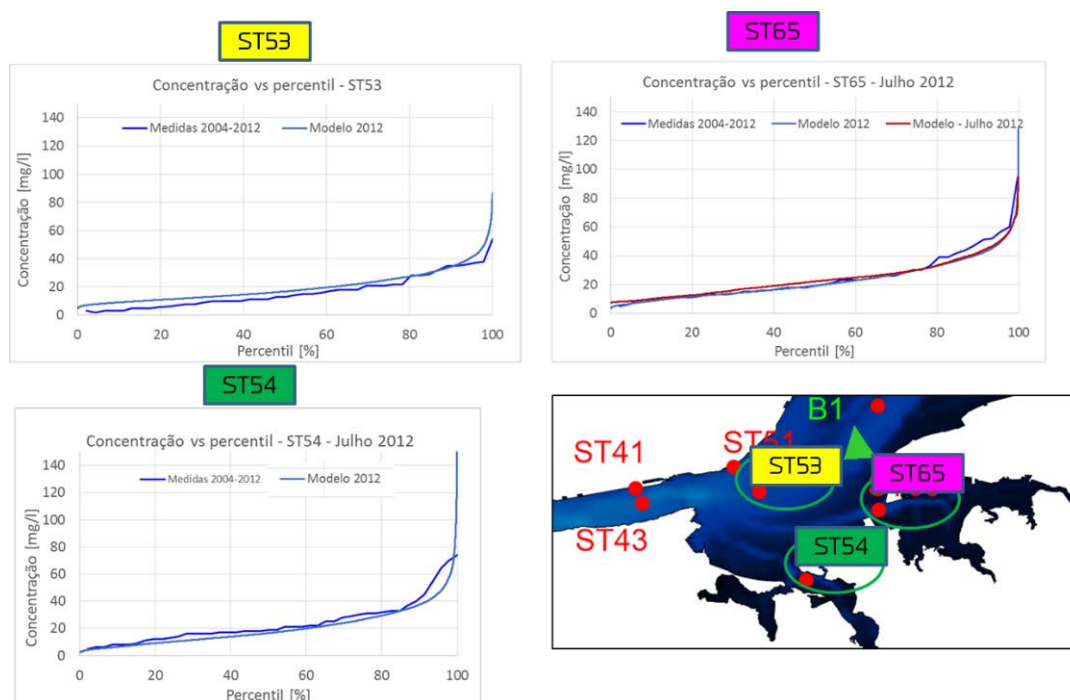


*Figura 60. Comparação dos sedimentos coesivos simulados para o ano de 2012 e o mínimo, mediana e máximo mensal obtido com base nas medidas entre 2004 e 2012 nos locais ST71, ST73, ST74 e ST81*



*Figura 61. Comparação dos sedimentos coesivos simulados para o ano de 2012 e o mínimo, mediana e máximo mensal obtido com base nas medidas entre 2004 e 2012 nos locais ST84, ST82, ST91.*

A fim de permitir uma visão mais objetiva do nível de ajustamento destes valores (dada a sua dispersão no tempo) aos resultados do modelo, foi igualmente uma comparação dos dados das concentrações correspondentes a diferentes percentis das medidas com os resultados do modelo para os mesmos percentis. Os resultados apresentados na *Figura 62* e correspondentes a análises efetuadas nas estações ST53, ST65 e ST54 reforçam a evidência que o modelo consegue reproduzir bem as concentrações de sedimentos em suspensão na coluna de água e que se aproxima dos valores máximos medidos.



*Figura 62. Concentrações de sedimentos coesivos na coluna de água na zona de estudo na situação de referência. A concentração corresponde ao P90 das medidas (2004 a 2012) nos locais*