

# MODELAÇÃO DA INUNDAÇÃO COSTEIRA NA RIA DE AVEIRO

**André B. FORTUNATO**

*Eng.º Civil, Doutor em Eng.ia do Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, afortunato@lnec.pt*

**Marta RODRIGUES**

*Eng.ª do Ambiente, Mestre em Ciências do Mar e das Zonas Costeiras, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, mrodrigues@lnec.pt*

**João M. DIAS**

*Oceanógrafo, Doutor em Física, CESAM, Universidade de Aveiro, joao.dias@ua.pt*

**Anabela OLIVEIRA**

*Eng.ª Civil, Doutora em Eng.ia do Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, aoliveira@lnec.pt*

## RESUMO

As inundações costeiras constituem uma preocupação crescente para as autoridades, o que tem motivado um esforço para simular estes acontecimentos extremos. Em suporte à futura aplicação da nova directiva de avaliação e gestão dos riscos de inundações (2007/60/CE), foram desenvolvidos mapas de inundação para a Ria de Aveiro. A Ria de Aveiro é uma laguna extensa (cerca de 45 por 10 km) e pouco profunda (profundidade média de 1 m), com pequenas aflúncias fluviais. No entanto, está exposta à agitação marítima intensa proveniente do Atlântico, assim como a sobre-elevações de origem meteorológica (*storm surges*), que podem exceder 1 m na embocadura. O presente artigo descreve a abordagem seguida no desenvolvimento dos mapas de inundação.

A primeira parte do artigo descreve a metodologia adoptada, incluindo as hipóteses de base e a sua validação. Para definir as condições de fronteira para forçar um modelo de circulação, foi desenvolvido um novo método que permite determinar os níveis máximos e as séries temporais associadas para diferentes períodos de retorno, baseado na análise estatística de séries temporais longas em estações costeiras. O método considera o efeito das marés, das *storm surges* e do ciclo de 19 anos de variabilidade das marés, tendo em conta pequenas correlações entre *storm surges* e marés. Os níveis extremos obtidos com este novo método convergem para os 20 anos de dados disponíveis em Aveiro e são semelhantes aos produzidos por abordagens convencionais. Relativamente a estas abordagens, o novo método tem a vantagem de produzir não apenas os níveis extremos, mas também as séries temporais que os incluem, e que são necessárias para forçar o modelo de circulação.

A segunda parte do artigo descreve a implementação e validação do modelo de circulação (SELFE) para a simulação da inundação na Ria de Aveiro. Saliencia-se a construção semi-automática de uma malha de elementos finitos que permite simular de forma eficiente um domínio muito extenso e com a resolução adequada nos canais estreitos que controlam a hidrodinâmica da laguna. Os coeficientes de fricção nas zonas inundáveis são calculados a partir da ocupação dos solos definida na base de dados *Corine Land Cover*. A validação do modelo de circulação mostra uma precisão comparável ou superior a simulações anteriores para este sistema.

Finalmente, apresentam-se os mapas de inundação para vários períodos de retorno, e comparam-se com outros mapas desenvolvidos com base em abordagens alternativas.

**Palavras-chave:** inundação, modelação numérica, métodos estatísticos, malhas não estruturadas.

## 1 INTRODUÇÃO

O risco de inundações nas zonas costeiras constitui uma preocupação crescente. Por um lado, o crescimento da população e das actividades económicas aumenta a vulnerabilidade destas zonas. Por outro lado, a subida do nível médio do mar e, nalgumas zonas do globo, o agravamento dos eventos extremos de temporais atmosféricos e de agitação marítima, aumentam a probabilidade de ocorrência de situações catastróficas. O aumento do risco de inundação costeira associado a estes factores motivou uma directiva-quadro europeia sobre a avaliação e gestão dos riscos de inundações (2007/60/CE), que obriga os estados membro a desenvolverem mapas de inundação para as zonas ribeirinhas e costeiras.

Neste contexto, foram desenvolvidos neste trabalho mapas de inundação para a Ria de Aveiro, com base numa análise de níveis extremos e na aplicação de um modelo hidrodinâmico de elevada resolução. A Ria de Aveiro é uma laguna extensa (cerca de 45 por 10 km) e pouco profunda (profundidade média de 1 m relativamente ao zero hidrográfico). As aflúncias fluviais para a laguna são pequenas, sendo a sua dinâmica determinada por um regime de maré mesotidal, sujeito a um ciclo quinzenal significativo (Dias et al., 2000). A zona envolvente da Ria é muito pouco elevada, pelo que a área potencialmente em risco é muito extensa. Por exemplo, a zona com cotas abaixo dos 4 m (NM) apresenta uma área de cerca de 8.2 km<sup>2</sup>. Simultaneamente, a costa oeste portuguesa está exposta à agitação marítima intensa proveniente do Atlântico, assim como a sobre-elevações de origem meteorológica (*storm surges*). Estas podem atingir 1 m na embocadura da Ria de Aveiro, somando-se aos restantes factores que determinam o nível do mar. A envolvente da Ria de Aveiro é por isso uma das zonas costeiras portuguesas em maior risco de inundação.

Os estudos de inundação costeira podem recorrer a vários tipos de abordagem: 1) a análise de marcas de cheia e outros testemunhos de eventos passados; 2) a análise estatística de dados de marégrafos; 3) a utilização de modelos que reproduzem os principais processos físicos envolvidos; ou, 4) uma combinação de várias abordagens.

A análise de registos de eventos passados requer uma recolha exaustiva de testemunhos, por vezes subjectivos. Não fornece informação sobre probabilidades de ocorrência, não permite avaliar situações futuras (e.g., determinar o efeito da subida do nível do mar) e a sua precisão é espacialmente muito variável. No entanto, não está dependente da precisão de modelos, e pode fornecer uma resolução espacial detalhada. No caso da Ria de Aveiro, foi já desenvolvido um mapa de inundação detalhado com base nesta abordagem (Universidade de Aveiro, 2007). A utilização extensiva de dados de marégrafos está limitada pela sua disponibilidade, dado que estes são frequentemente escassos, quer no tempo, quer no espaço. Na Ria de Aveiro, apenas existem séries temporais de longa duração para o marégrafo da Barra. A utilização de modelos é a opção mais atractiva, e é utilizada crescentemente (e.g., Dietrich et al., 2011, Bertin et al., 2011). No entanto, a consideração simultânea de todos os processos relevantes, em particular o *setup* devido ao vento e à agitação marítima, exige a simulação de escalas espaciais muito alargadas e o acoplamento de modelos de circulação e de ondas. Acresce que os erros inerentes aos modelos e aos seus forçamentos criam alguma incerteza nos resultados. Optou-se assim pela quarta abordagem, que permite tirar partido da riqueza de dados medidos na embocadura da Ria de Aveiro, e, simultaneamente, das potencialidades e precisão dos modelos de circulação. Esta abordagem permite ainda obter resultados espacialmente distribuídos e para períodos de retorno elevados, fundamentais para a gestão territorial.

Este artigo começa por descrever a metodologia adoptada, incluindo as hipóteses de base e a sua validação. Para definir as condições de fronteira de forçamento do modelo de circulação, foi desenvolvido um novo método que permite determinar os níveis máximos para diferentes períodos de retorno, baseado na análise estatística de séries temporais longas em estações costeiras. O método considera o efeito das marés, das *storm surges* e do ciclo de 19 anos de variabilidade das marés, tendo em conta pequenas correlações entre *storm surges* e marés. Os

níveis extremos obtidos com este novo método são semelhantes aos produzidos por abordagens convencionais e convergem para os 20 anos de dados disponíveis em Aveiro. O novo método tem a vantagem de produzir não apenas os níveis extremos, mas também as séries temporais que os incluem, e que são necessárias para forçar o modelo de circulação.

De seguida, descreve-se a implementação e validação do modelo de circulação (SELFE – Zhang e Baptista, 2008). É enfatizada a construção semi-automática de uma malha de elementos finitos que permite cobrir um domínio muito extenso, mas com a resolução adequada nos canais estreitos que controlam a hidrodinâmica da laguna. Os coeficientes de fricção nas zonas inundáveis são calculados a partir da ocupação dos solos definida na base de dados *Corine Land Cover*. Finalmente, apresentam-se os mapas desenvolvidos para vários períodos de retorno, e comparam-se com outros mapas de inundação desenvolvidos num estudo anterior com base na análise de registos de eventos passados.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Hipóteses de base

A metodologia desenvolvida parte de três hipóteses devidamente validadas para a Ria de Aveiro.

2.1.1 Hipótese 1: o efeito dos caudais fluviais nos níveis máximos é desprezável na maior parte da Ria de Aveiro.

Esta hipótese evita ter em conta a correlação entre o caudal fluvial e as sobre-elevações do nível do mar de origem meteorológica, baseando-se em dois argumentos.

Por um lado, demonstra-se matematicamente que a ocorrência simultânea de dois eventos independentes com uma duração característica de 1 dia e períodos de retorno de 2 anos tem um período de retorno de cerca de 1500 anos, pelo que é muito improvável. Para a região de Aveiro, a correlação entre as sobre-elevações de origem meteorológica e a precipitação local é baixa (coeficiente de correlação de 0.38), e a ocorrência simultânea de valores extremos de ambos os fenómenos é muito rara: em 30 anos de dados disponíveis, apenas se detectou uma situação em que ocorreu simultaneamente uma *storm surge* significativa e uma precipitação intensa (em 7/11/1982).

Por outro lado, simulações expeditas com um modelo numérico mostraram que o efeito do caudal de cheia nos níveis máximos diminui rapidamente de montante para jusante, pelo que, mesmo na eventualidade da ocorrência simultânea de uma *storm surge* significativa e de um caudal de cheia, os níveis na maior parte da Ria seriam pouco afectados pelo caudal fluvial. Assim, a análise das inundações que é efectuada neste estudo considera o efeito das *storm surges* mas não considera o efeito dos caudais fluviais.

Naturalmente, nas cabeceiras do estuário, ocorrerá o inverso. As grandes cheias de origem fluvial sobrepõem-se ao efeito da maré, podendo mesmo fazer desaparecer o sinal de maré em zonas onde esta é importante para caudais médios. Assim, determinam-se os níveis extremos induzidos por sobre-elevações meteorológicas ou de origem fluvial, de forma independente em cada ponto, e toma-se o valor mais elevado para cada período de retorno. A análise do efeito das cheias fluviais está em curso e será reportada oportunamente.

2.1.2. Hipótese 2: a correlação entre a maré e as *storm surges* é muito pequena

O coeficiente de correlação entre as marés e as *storm surges* na Ria de Aveiro (-0.0015) justificaria ignorar qualquer relação entre os dois fenómenos. No entanto, quer as *storm surges* quer as marés têm um comportamento sazonal, uma vez que as primeiras são mais significativas no Inverno, enquanto as segundas têm valores extremos nos equinócios. Admitiu-se por isso alguma correlação entre os dois fenómenos, como será detalhado mais à frente.

### 2.1.3 Hipótese 3: os níveis máximos na Ria de Aveiro só se alteram devido à subida do nível médio do mar

A subida generalizada do nível médio do mar, no passado recente e no futuro próximo, está bem estabelecida em todo o globo (IPCC, 2007) e em Portugal em particular (Dias e Taborda, 1992, Lopes et al., 2011). No entanto, o mesmo não se passa com outros factores que podem afectar os níveis extremos. Apesar de se preverem aumentos da frequência e intensidade dos temporais atmosféricos em várias zonas do mundo devido ao efeito das alterações climáticas, tendo como consequência a alteração do período de ocorrência e das características das *storm surges*, esta tendência não parece verificar-se na costa Portuguesa. Com efeito, Andrade et al. (2006) procuraram estas tendências em séries de quatro marégrafos na costa Portuguesa. Encontraram pequenas tendências positivas em Leixões e Cascais, e tendências negativas em Viana do Castelo e Lagos. Menéndez e Woodworth (2010) calcularam os níveis máximos em todo o mundo para um período de retorno de 50 anos, filtrando a subida do nível médio do mar. Os resultados mostraram uma ligeira tendência de crescimento no marégrafo de Cascais, e uma ligeira tendência de redução no marégrafo de Vigo. Os eventos extremos de agitação marítima, fortemente correlacionada com as *storm surges*, também não se estão a alterar. Dodet et al. (2010) analisaram a evolução dos parâmetros de agitação em frente à costa Portuguesa entre 1953 e 2009 e encontraram um aumento desprezável do percentil 90 da altura significativa. Andrade et al. (2007) simularam os regimes de agitação nos períodos 1961-1999 e 2070-2099 e concluíram que as alterações nas alturas significativas seriam reduzidas: o percentil 95 das maiores ondas aumentaria cerca de 1%. Quadrio e Taborda (2010) mostraram que o número de temporais por ano na costa portuguesa entre 1958 e 2001 não teve uma evolução significativa. Finalmente, Almeida et al. (2011) analisaram dados de bóias e resultados de modelos de *hindcast* e concluíram que não há evidências de alterações nos parâmetros das tempestades entre 1952 e 2009 na costa algarvia.

Assim, considera-se que a frequência e a intensidade dos eventos que conduzem a níveis extremos na costa Portuguesa estão estáveis.

## 2.2 Descrição da metodologia

A metodologia desenvolvida desenvolve-se em cinco passos.

1. **Análise de dados de níveis.** Os dados de níveis medidos no marégrafo da Barra foram digitalizados e analisados. Foram efectuadas análises harmónicas para cada ano de dados, com vista a separar o sinal de diferentes origens: nível médio anual, maré e resíduo. De acordo com a Hipótese 1, o resíduo é considerado o sinal de origem meteorológica.

2. **Criação de séries anuais de níveis de longa duração.** As séries temporais disponíveis no marégrafo da Barra, apesar de longas, são insuficientes para se determinar directamente níveis máximos com períodos de retorno elevados. A forma habitual de se ultrapassar este problema é assumir uma distribuição estatística para os níveis máximos anuais, e extrapolar os resultados para períodos de retorno elevados com base nessa distribuição. Esta abordagem tem sido usada neste tipo de problemas (e.g., Andrade et al., 2006), apesar de gerar uma incerteza crescente para períodos de retorno progressivamente mais longos. Em alternativa, utilizou-se aqui a Hipótese 2 para combinar os sinais de maré e os de origem meteorológica. Criou-se assim um extenso conjunto de séries anuais de níveis, sintéticas, de igual probabilidade de ocorrência.

3. **Determinação dos níveis máximos actuais para vários períodos de retorno.** O conjunto de séries anuais construídas no passo anterior foi analisado para determinar um vasto conjunto de níveis máximos anuais no marégrafo da Barra. Este conjunto permitiu determinar os níveis máximos nesta estação para vários períodos de retorno. Simultaneamente, determinaram-se as condições de níveis em que estes máximos ocorrem (i.e., séries temporais de poucos dias que precedem os níveis máximos para os vários períodos de retorno).

4. **Determinação dos níveis máximos futuros para vários períodos de retorno.** Aos resultados do passo anterior foi somada a subida do nível médio do mar esperada para o fim do século XXI, considerando diferentes cenários alternativos.

5. **Simulação da inundação na Ria de Aveiro.** A hidrodinâmica da Ria de Aveiro foi simulada para cada uma das situações que originam os níveis extremos com os períodos de retorno analisados. As séries temporais no marégrafo da Barra determinadas nos dois passos anteriores foram corrigidas para ter em conta a deformação da maré entre a fronteira do modelo e o marégrafo da Barra, e utilizadas para forçar um modelo hidrodinâmico na fronteira marítima. Os resultados das simulações permitiram determinar os níveis máximos em cada ponto do domínio para cada período de retorno. As zonas de sobreposição entre os mapas para as cheias de origem fluvial e de origem oceânica serão analisadas no futuro.

### 3 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FRONTEIRA: ANÁLISE DOS NÍVEIS EXTREMOS

#### 3.1 Análise dos dados

Os níveis medidos no marégrafo da Barra entre 1976 e 2005 foram digitalizados e sujeitos a análise harmónica. Os resultados mostram que o nível médio do mar subiu 1.28 mm/ano neste marégrafo, o que está de acordo com estudos anteriores baseados em dados de outros marégrafos Portugueses (e.g., Dias e Taborda, 1992). As amplitudes de maré também cresceram durante os primeiros anos, mas estabilizaram aproximadamente desde 1990. Os resíduos (diferença entre as medições e as sínteses harmónicas) constituem o sinal de *storm surge*. Têm um desvio padrão de cerca de 12 cm, com máximos e mínimos de 1.12 m e -0.79 m, respectivamente. A existência de muitas falhas nos registos obrigou a eliminar vários anos de dados para análise. No entanto, com base nos dados de *hindcast* de agitação marítima para o mesmo período (Dodet *et al.*, 2010) e no facto de as *storm surges* mais significativas serem acompanhadas de agitação marítima intensa, foi possível identificar a ausência de *storm surges* significativas em determinados períodos em que não há dados de níveis disponíveis. Assim, foi possível definir um conjunto de 20 anos em que as *storm surges* significativas foram registadas. Para determinar os níveis máximos no marégrafo da Barra para vários períodos de retorno construíram-se 273 980 séries anuais de níveis neste marégrafo, considerando todas as combinações possíveis das seguintes variáveis:

- 20 anos de resíduos. As falhas nos registos foram substituídas por zero, dado não constituírem situações passíveis de determinarem máximos anuais.
- 19 anos de marés, de 1976 a 1994, de forma a ter em conta o ciclo de longo prazo de variação das amplitudes de maré;
- desfasagens entre -15 e + 15 dias, com intervalos horários, entre a maré e os resíduos, o que conduz a um total de 721 possibilidades. A limitação da desfasagem a apenas 15 dias está associada à hipótese 2.

De seguida, determinaram-se os máximos de cada uma destas séries anuais, assim como os histogramas de ocorrência e funções de probabilidade de não excedência para cada nível. Depois de somado o nível médio para o presente (2011) e o futuro (2100), determinou-se a função que relaciona o período de retorno ( $T_R$ ) com o nível máximo de acordo com a expressão:

$$T_R(z) = 1/(1 - F(z)) \quad (1)$$

onde  $F(z)$  é a função de probabilidade de não excedência para um determinado nível  $z$ .

#### 3.2 Aplicação e validação

A Figura 1a mostra os resultados da aplicação da metodologia descrita. A validade da metodologia foi verificada através da comparação dos resultados com os valores obtidos em

marégrafos próximos por uma abordagem tradicional (Quadro 1). Efectuou-se ainda uma análise de convergência dos resultados ao número de anos de dados utilizados na determinação dos níveis máximos. Os resultados (Figura 1b) mostram que a análise efectuada para 20 anos se encontra convergida. Por exemplo, o nível máximo para um período de retorno de 1000 anos obtido com 15 ou 20 anos de dados difere apenas de 3 cm.

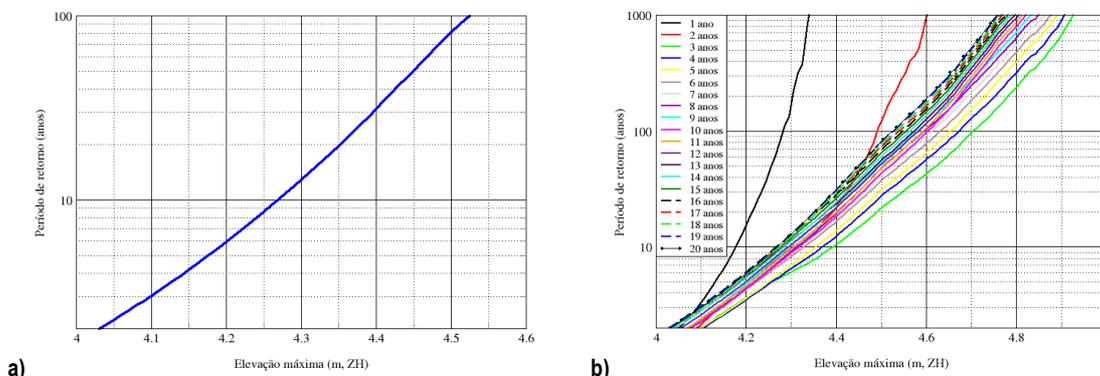


Figura 1 – a) Níveis máximos no marégrafo da Barra, para vários períodos de retorno, em 2011. Considerou-se um nível médio de 2.14 m (ZH). b) Análise de convergência: a aplicação da metodologia com um número crescente de anos de dados de resíduos mostra que os resultados estão convergidos para 20 anos de dados.

As mesmas séries usadas para calcular os níveis associados a cada período de retorno permitiram ainda definir as séries temporais necessárias ao forçamento do modelo hidrodinâmico. De entre as 273 980 séries anuais construídas, seleccionaram-se aquelas cujo nível máximo era igual (mais ou menos 1 cm) aos níveis máximos determinados para cada período de retorno. Em todos os casos, as séries foram desfasadas para que o nível máximo ocorresse no mesmo instante. Finalmente calculou-se a média das séries temporais assim determinadas (Figura 2).

Quadro 1 – Comparação de níveis máximos (m, ZH) obtidos com o presente método em Aveiro com resultados noutros marégrafos portugueses (fonte: Andrade et al., 2006).

Marégrafo	Período de retorno (anos)				
	5	10	25	50	100
Aveiro (presente método)	4.18	4.27	4.38	4.45	4.52
Viana do Castelo	4.3	4.3	4.4	4.5	4.6
Leixões	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
Cascais	4.1	4.2	4.3	4.3	4.4
Lagos	4.2	4.2	4.3	4.4	4.5

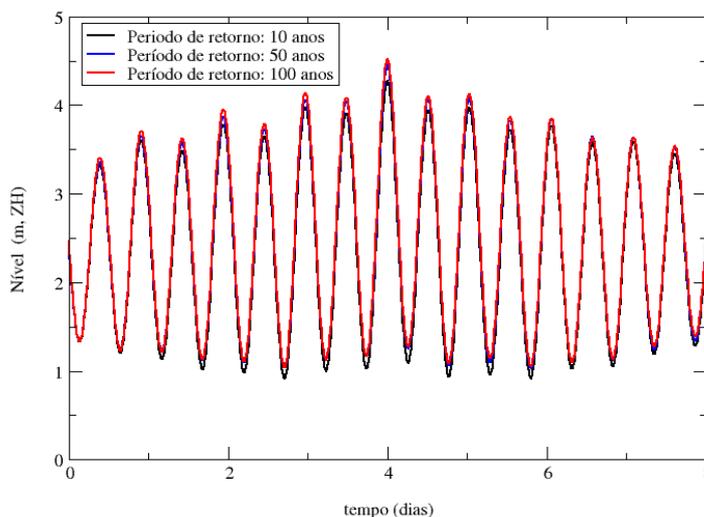


Figura 2 – Séries de níveis para forçamento dos modelos para o ano de 2011, interpoladas com *splines* cúbicos.

## 4 MODELAÇÃO DA INUNDAÇÃO

### 4.1 Aplicação e validação do modelo

Para simular a inundação na Ria de Aveiro foi seleccionado o modelo SELFE (Zhang e Baptista, 2008), que resolve as equações de águas pouco profundas, considerando as aproximações hidrostática e de Boussinesq. As simulações foram realizadas em modo bidimensional, permitindo o cálculo da elevação da superfície livre e do campo médio da velocidade horizontal. Para a discretização do domínio horizontal o modelo utiliza malhas não estruturadas, sendo particularmente adaptado para representar a geometria complexa da Ria de Aveiro.

A implementação deste modelo na Ria de Aveiro baseou-se na aplicação de Rodrigues et al. (2011). A construção da malha de cálculo partiu da malha de Rodrigues et al. (2011) para simular o escoamento de maré. Como esta malha cobre apenas a parte da Ria que inunda com as flutuações associadas à maré astronómica, foi-lhe acoplada uma malha quase regular, com uma resolução de 50 m, nas zonas potencialmente inundáveis em resultado da ocorrência de eventos extremos. Estas foram definidas *a priori* como aquelas que estão abaixo de 8 m (ZH). A junção das duas malhas foi feita de forma semi-automática através de um pós-processador que otimiza malhas não-estruturadas, criando e apagando nós e ajustando as ligações entre eles (Fortunato et al., 2011). Este pós-processamento foi efectuado sem alterar a parte da malha dedicada à propagação da maré, o que permite manter o refinamento adequado mesmo nos canais mais estreitos. A malha de cálculo final possui cerca de 115000 nós, com uma resolução que varia entre 1.5 km na zona costeira e cerca de 2 m nos canais mais estreitos (Figura 3a).

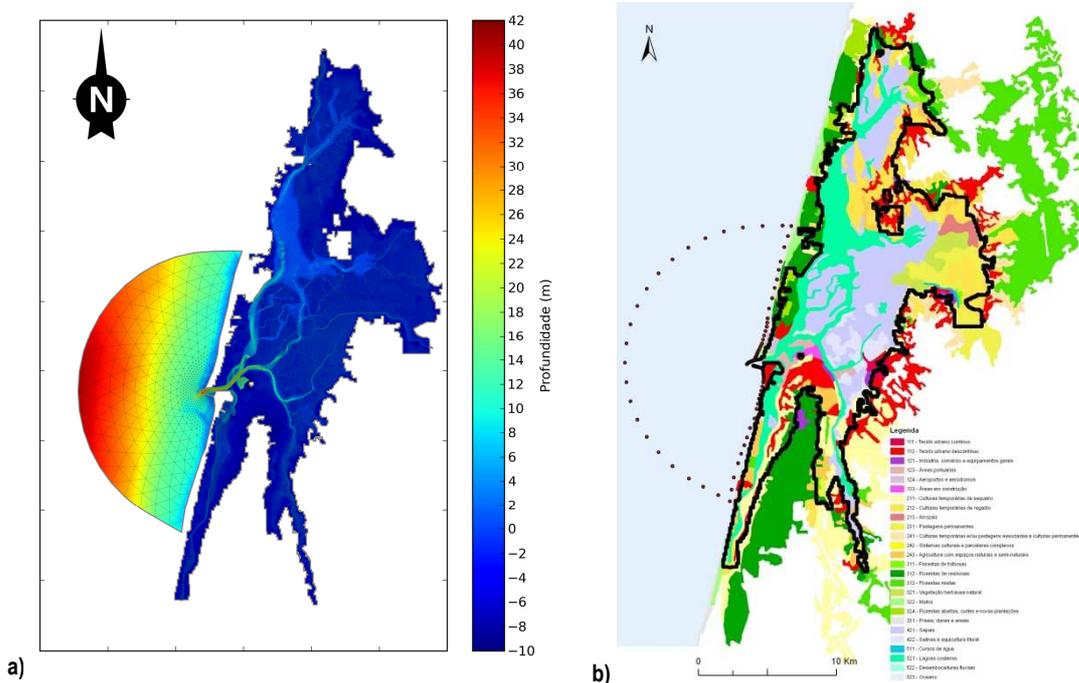


Figura 3 – Aplicação do modelo: a) malha de cálculo e topo-batimetria utilizada no modelo (referida ao nível médio do mar); b) ocupação do solo usada para definir os coeficientes de atrito (adaptado do Corine Land Cover).

Para representar a topo-batimetria na zona de estudo foi desenvolvido um modelo digital de terreno que combina a informação batimétrica e topográfica mais recente (Figura 3a). A informação batimétrica de base corresponde a dados obtidos através de um levantamento topo-hidrográfico efectuado em 1987-88 pelo Instituto Hidrográfico, os quais abrangem uma área extensa da Ria de Aveiro. Esta informação foi actualizada com dados de 2008 na zona de jurisdição da Administração do Porto de Aveiro e na zona exterior na proximidade da Barra,

assim como nos canais de Mira (entre a Costa Nova e Vagueira) e de S. Jacinto, com base em dados da ARH do Centro. Foi também actualizada com dados batimétricos de 2011 nos canais de Ílhavo e de Mira (entre a Vagueira e o Areão), cedidos pelo Polis Litoral Ria de Aveiro. A informação topográfica, cedida pela Comunidade Intermunicipal da Região de Aveiro (CIRA), tem uma resolução espacial da ordem de 1:10.000, com distâncias entre pontos que variam entre 100 m e 400 m, e foi complementada com dados de 1987-88 nas zonas onde os dados antigos apresentam melhor resolução.

A correcta formulação do atrito nas equações de águas pouco profundas é fundamental para que o modelo represente de modo preciso a hidrodinâmica estuarina. No caso do modelo usado neste estudo, o atrito foi representado através de uma formulação de Manning. Nas zonas periodicamente inundadas pela maré, o coeficiente de Manning foi definido com base na experiência anterior de aplicações a este sistema (Dias e Lopes, 2006; Oliveira et al., 2006). No resto do domínio, o coeficiente de Manning foi definido com base nas ocupações do solo presentes no *Corine Land Cover* (Figura 3b).

O modelo de maré foi validado para o período de Junho de 1997, tendo os seus resultados sido comparados com dados de níveis e velocidades das campanhas de Dias et al. (1999) nas estações indicadas na Figura 4. As simulações foram realizadas para um período de 25 dias, com um período de rampa de 2 dias. O passo de cálculo utilizado foi de 30 segundos. Foram consideradas 3 fronteiras abertas: uma oceânica e duas fluviais (rios Vouga e Antuã). A fronteira oceânica foi forçada com 14 constituintes de maré (Z0, MSF, M2, S2, N2, K2, O1, K1, P1, Q1, M4, MN4, MS4 e M6) obtidos do modelo regional de Fortunato et al. (2002). Os rios Vouga e Antuã são as principais fontes de água doce da Ria de Aveiro (Dias et al., 2000), tendo-se considerado um caudal fluvial constante de 7 m<sup>3</sup>/s e 2.3 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, com base em Rodrigues et al. (2009). Numa fase preliminar foram testadas duas condições de coeficiente de Manning na zona periodicamente imersa: coeficiente de Manning constante de 0.023 m<sup>1/3</sup>/s; e coeficiente de Manning variável em função da batimetria (Dias e Lopes, 2006; Oliveira et al., 2006). O coeficiente de Manning variável na zona molhada conduziu aos melhores resultados, pelo que apenas estes são apresentados, sendo esta condição usada nas simulações posteriores.

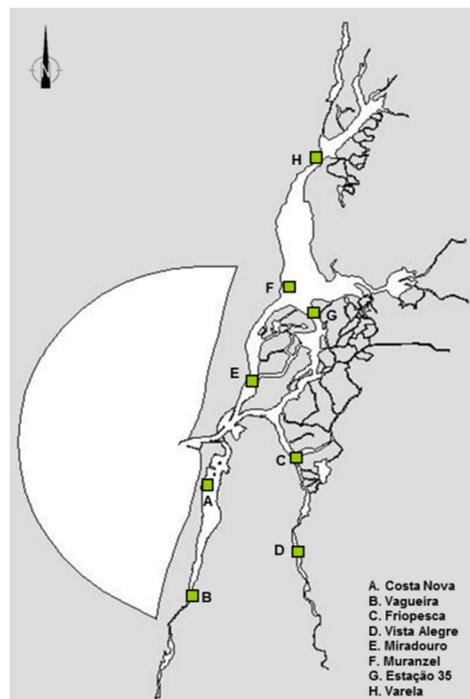
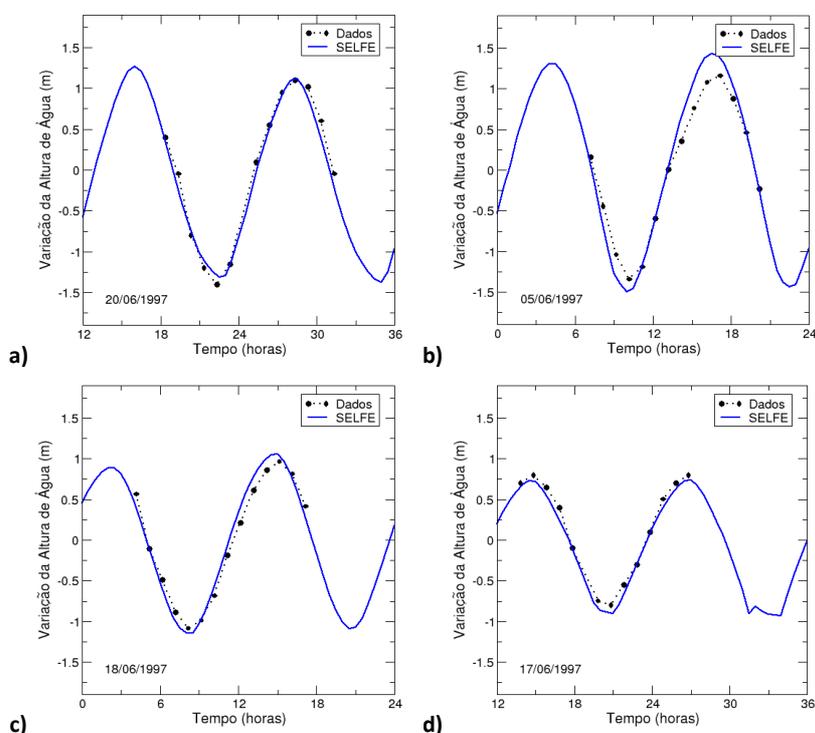


Figura 4 – Localização das estações de medição.

O modelo representa correctamente a dinâmica de maré ao longo dos vários braços da Ria de Aveiro, em termos de fase e de amplitude (Error! Reference source not found. e Figura 5). Os erros quadráticos médios (EQM – Error! Reference source not found.) são, de um modo geral, da mesma ordem de grandeza ou inferiores a outras aplicações hidrodinâmicas na Ria de Aveiro (Vaz, 2007; Rodrigues et al., 2009). A excepção ocorre na estação da Vista Alegre, onde o modelo subestima significativamente as amplitudes. As diferenças observadas poderão estar relacionadas com diferenças na batimetria, dado que o período simulado não corresponde ao período de dados de batimetria. No que se refere aos campos de velocidade, o modelo representa adequadamente os valores observados (Figura 6) com EQM também da mesma ordem de grandeza ou inferiores aos observados nas aplicações hidrodinâmicas na Ria de Aveiro referidas anteriormente (Error! Reference source not found.).

**Quadro 2 – Erros quadráticos médios (EQM) e diferenças entre os níveis máximos e mínimos ( $\Delta H$ ) medidos e previstos pelo modelo.**

Estação	EQM – Variação da Altura de Água (m)	EQM – Velocidade (m/s)		$\Delta H$ Dados(m)	$\Delta H$ SELFE (m)
		Componente N-S	Componente W-E		
Costa Nova	0.12	0.05	0.16	2.50	2.42
Vagueira	0.17	0.13	0.07	1.66	2.08
Friopesca	0.20	0.11	0.26	2.50	2.91
Vista Alegre	0.35	0.17	0.32	1.96	1.30
Miradouro	0.12	0.26	0.25	2.05	2.22
Muranzel	0.12	0.05	0.20	2.05	1.99
Estação 35	0.09	0.03	0.07	1.60	1.62
Varela	0.15	0.10	0.09	1.12	1.07



**Figura 5 – Comparação entre a variação da altura de água medida e prevista pelo modelo de maré em quatro estações: a) Costa Nova; b) Friopesca; c) Miradouro; d) Estação 35.**

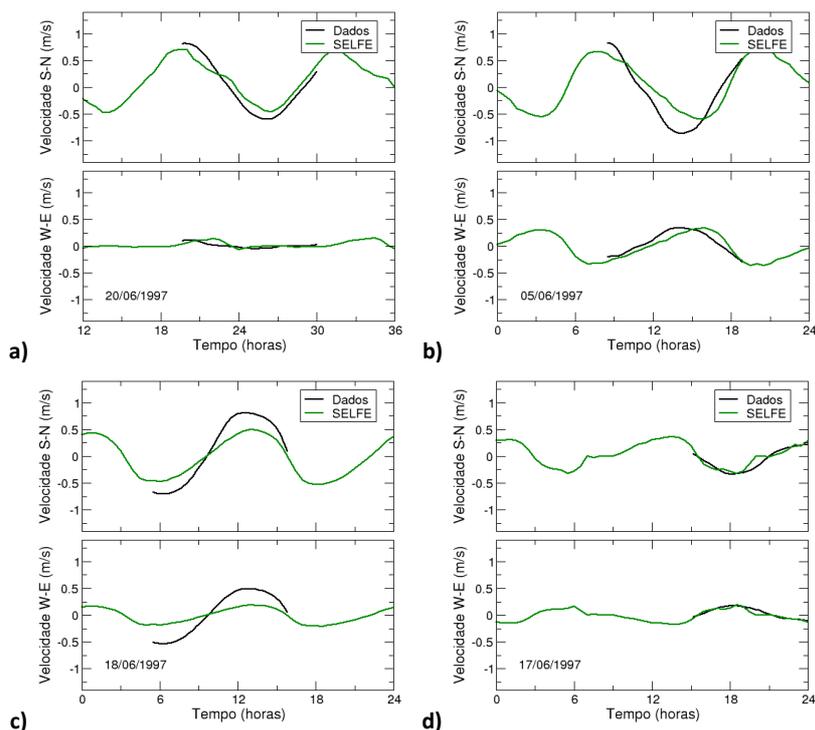


Figura 6 – Comparação entre as velocidades medidas e prevista pelo modelo de maré: a) Costa Nova; b) Friopescas; c) Miradouro; d) Estação 35.

#### 4.2 Condições de forçamento do modelo de inundação

As simulações preliminares forçadas na fronteira oceânica pelas séries temporais de níveis apresentadas na Figura 2 mostraram que existe uma maior dissipação da onda de maré entre o largo (fronteira oceânica do modelo) e a embocadura da Ria de Aveiro em situações extremas relativamente às situações habituais. Nestas últimas, as diferenças entre os níveis impostos na fronteira oceânica e os níveis observados no mareógrafo da Barra tendem a ser inferiores a 5 cm. As simulações exploratórias realizadas mostraram que parte das diferenças observadas (cerca de 50%) se deve aos constituintes não-lineares. A restante diferença poderá dever-se ao facto de a batimetria da embocadura estar adaptada às condições habituais, ocorrendo em condições excepcionais velocidades mais elevadas, o que provoca maiores perdas de carga. Desta forma, corrigiu-se o forçamento imposto na fronteira oceânica multiplicando a amplitude dos níveis por uma constante (1.1), para garantir que na embocadura da Ria de Aveiro ocorrem as séries temporais de níveis determinadas anteriormente (Figura 2). Os resultados mostram que a correcção introduzida nas condições de fronteira permite reproduzir efectivamente os níveis desejados no mareógrafo da Barra (Figura 7).

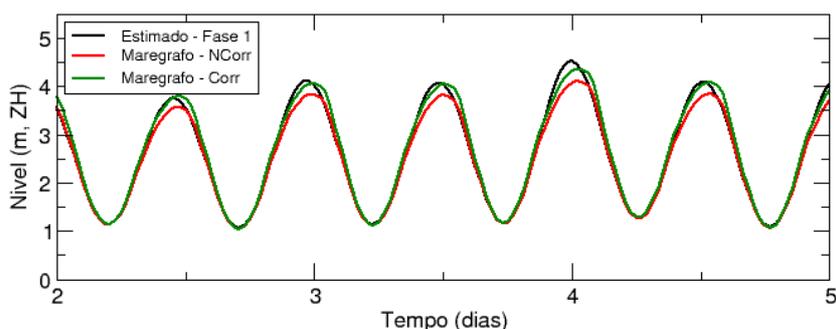


Figura 7 – Comparação entre os níveis estimados na secção 3.2 (Estimado) e no mareógrafo da Barra antes (Maregrafo – Ncorr) e após a correcção (Maregrafo – Corr) para o período de retorno de 100 anos.

Nas fronteiras fluviais consideraram-se caudais constantes de 60 m<sup>3</sup>/s e 10 m<sup>3</sup>/s nos rios Vouga e Antuã, respectivamente, os quais correspondem a caudais médios de Inverno, estimados com base em dados climatológicos do SNIRH.

Adicionalmente, dadas as baixas profundidades existentes na Ria de Aveiro, considerou-se relevante avaliar o impacto do vento nos níveis máximos que ocorrem na laguna. Apesar do efeito regional destes ventos afectar os níveis no marégrafo da Barra (e por isso ser tido em consideração na metodologia desenvolvida), o efeito local não é tido em conta. Nestas simulações considerou-se um vento constante de Sudoeste com intensidade de 6.4 m/s, o qual foi determinado tendo por base os registos de vento observados durante quatro (1986, 1989 e 2003) das dez maiores *storm surges* registadas na Ria de Aveiro. Os resultados mostram que a influência do vento na extensão da zona inundável é desprezável face ao grau de resolução do modelo e dos dados topográficos, pelo que na secção 4.3 os resultados são apresentados apenas para as simulações sem o efeito do vento.

De forma a analisar o efeito da subida do nível médio do mar na extensão das áreas inundáveis na Ria de Aveiro, consideraram-se três cenários para cada um dos períodos de retorno. Estes cenários correspondem a subidas do nível médio do mar de 0.23 m, 0.35 m e 1 m. Os dois primeiros cenários foram determinados por Lopes et al. (2011), enquanto o último cenário corresponde a um valor adoptado em estudos recentes (e.g., Yates et al., 2011, Sano et al., 2011). O Quadro 3 sintetiza as simulações realizadas

Quadro 3 – Simulações realizadas para a modelação da inundação na Ria de Aveiro.

Período de Retorno (anos)	Situação Actual		Situação Futura		
	SV	CV	SNMM = 0.23 m	SNMM = 0.35 m	SNMM = 1 m
10	✓	✓	✓	✓	✓
50	✓	✓	✓	✓	✓
100	✓	✓	✓	✓	✓

CV – Com vento; SV – Sem vento; SNMM – Subida do nível médio do mar

#### 4.3 Resultados e discussão

Os resultados (Figuras 8-10) mostram que, para qualquer dos períodos de retorno considerados, a inundação devida a *storm surges* abrange toda a extensão da Ria de Aveiro, desde a embocadura até às cabeceiras dos principais canais (Mira, Ílhavo, Espinheiro e S. Jacinto), assim como a zona central. Os níveis máximos na embocadura variam entre 4.13 m (ZH) para o período de retorno de 10 anos e os 4.35 m (ZH) para o período de retorno de 100 anos, o que se traduz num aumento da extensão marginal da zona inundável geralmente inferior a 50-100 m (i.e., a resolução da malha de cálculo nas zonas inundáveis). O efeito do aumento do nível máximo na embocadura na extensão das zonas inundáveis é mais significativo na zona oeste da Ria, nas localizações a montante (zona de afluência dos rios Vouga e Antuã).

Nos cenários futuros de subida do nível do mar, observa-se um aumento dos níveis máximos no interior da Ria e da extensão das zonas inundáveis por cheias induzidas por sobre-elevações de origem meteorológica. Para o cenário mais pessimista, de subida do nível do mar de 1 m, o aumento da extensão das áreas inundáveis é mais evidente no canal de S. Jacinto. No caso mais gravoso (período de retorno de 100 anos e subida do nível médio do mar de 1 m), os resultados mostram também que os limites da malha (8 m, ZH) não são atingidos, validando a

posteriori a definição destes limites. Nas situações de subida do nível médio do mar de 0.23 m e 0.35 m, o efeito em termos de extensão da área inundável é mais reduzido.

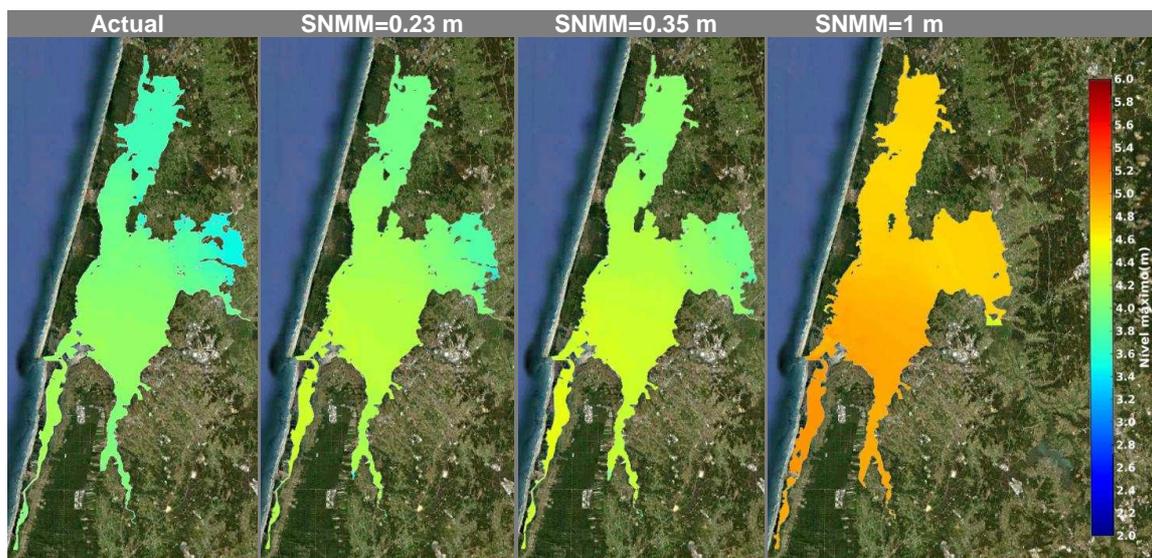


Figura 8 – Níveis máximos na Ria de Aveiro para a situação actual e cenários futuros de subida do nível médio do mar (SNMM) – período de retorno de 10 anos.

Os resultados obtidos para a situação actual foram validados por comparação com a Carta de Risco de Cheia desenvolvida pela Universidade de Aveiro para Associação de Municípios da Ria de Aveiro (AMRIA) – Figura 11 – que teve por base a inventariação e o levantamento topográfico de marcas de cheia e de áreas inundáveis nos municípios da Ria de Aveiro (Universidade de Aveiro, 2007). A comparação evidencia uma boa concordância entre as áreas inundáveis previstas pelas duas metodologias, permitindo validar a abordagem seguida no presente estudo. Note-se que as diferenças se concentram nas zonas fluviais, que se encontram fora da área de abrangência deste estudo. As diferenças observadas entre as duas abordagens devem-se, quer à própria metodologia utilizada, quer à informação de base utilizada, nomeadamente a topográfica e batimétrica. A informação topográfica, em particular, é relativamente grosseira nalgumas áreas.

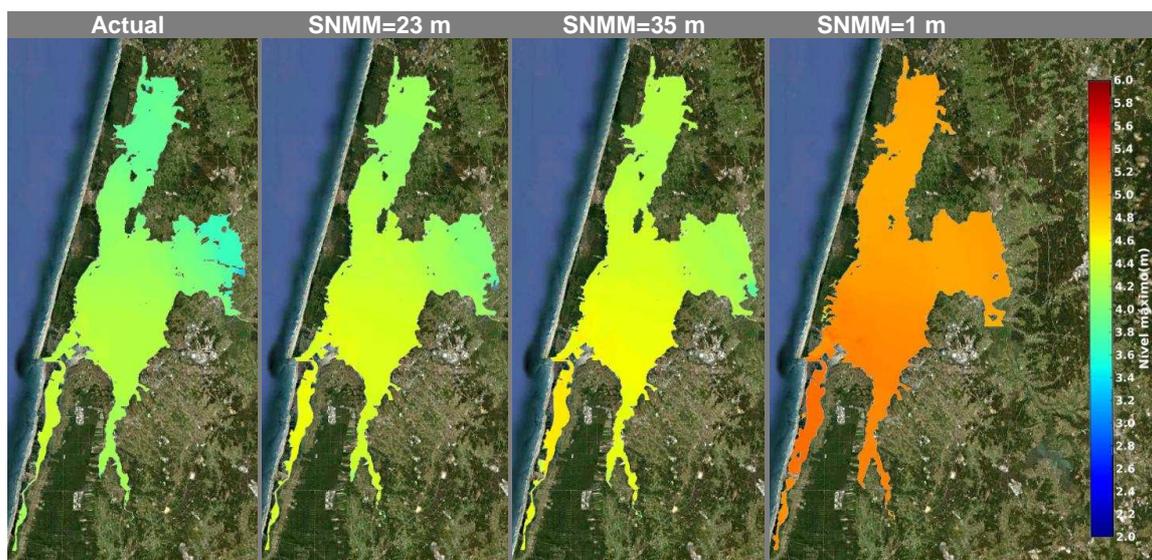


Figura 9 – Níveis máximos na Ria de Aveiro para a situação actual e cenários futuros de subida do nível médio do mar (SNMM) – período de retorno de 50 anos.

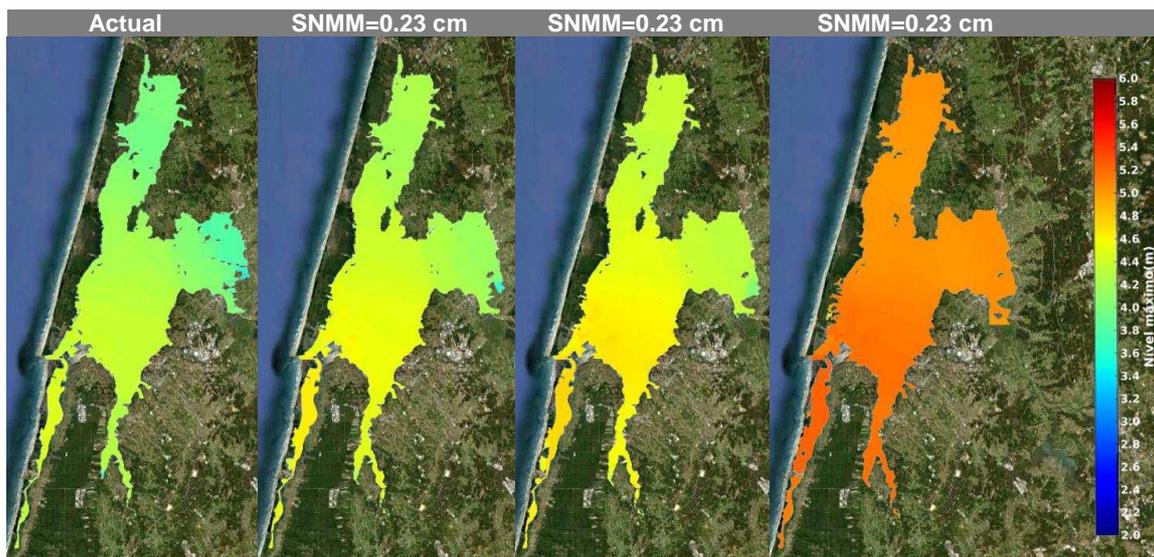


Figura 10 – Níveis máximos na Ria de Aveiro para a situação actual e cenários futuros de subida do nível médio do mar (SNMM) – período de retorno de 100 anos.

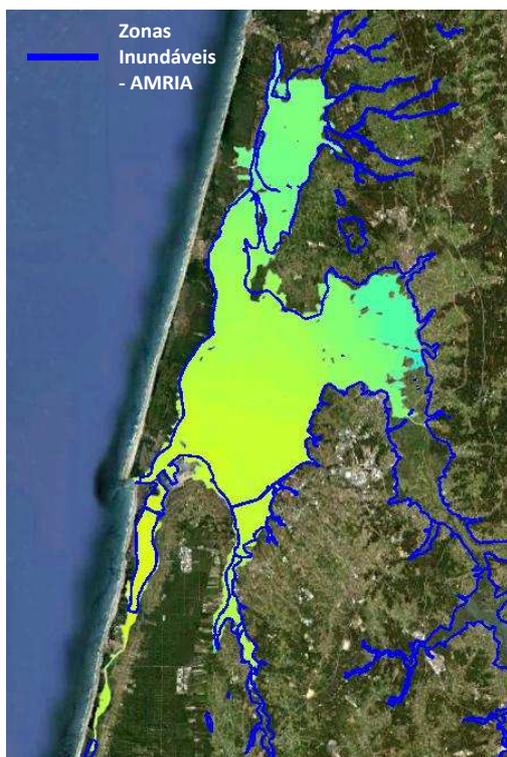


Figura 11 – Comparação entre a zona inundável determinada pela presente metodologia (cores) e por uma metodologia alternativa (linha azul, Universidade de Aveiro, 2007).

## 5 CONCLUSÕES

A metodologia utilizada neste estudo é aplicável a outras zonas costeiras e tem grandes vantagens relativamente a métodos alternativos para gerar cartas de inundação. A combinação de análise de dados com modelos de circulação permite tirar partido da riqueza temporal de dados de marégrafos, e da resolução e precisão espacial dos modelos numéricos. Simultaneamente, evita a morosidade da recolha exaustiva de elementos no terreno necessária

nalguns métodos, e a complexidade associada ao acoplamento de vários modelos numéricos utilizado em simulações mais detalhadas. A abordagem desenvolvida para o cálculo dos níveis máximos produz resultados semelhantes aos métodos estatísticos tradicionais, evitando a ambiguidade associada à escolha da distribuição estatística e fornecendo simultaneamente as séries temporais necessárias para forçar os modelos de circulação.

Os resultados mostram que a inundação induzida por sobre-eleva es de origem meteorológica afecta, de um modo geral, toda a extensão da Ria de Aveiro, sendo a área inundável ligeiramente superior para o período de retorno de 100 anos. Para os cenários de subida do nível médio do mar, observa-se um aumento da extensão da área inundável e dos níveis máximos no interior da Ria de Aveiro, o qual   mais significativo para a subida do nível do mar de 1 m. A compara o dos resultados obtidos por modela o com a Carta de Risco de Cheia elaborada pela Universidade de Aveiro para a AMRIA mostrou uma boa concordância, o que permitiu validar a metodologia utilizada.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se o co-financiamento da Administra o de Região Hidrográfica do Centro I.P. através do projecto "Modela o de dados geográficos e modela o matemática dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos a prestar no âmbito do desenvolvimento e implementa o do sistema de informa o geográfica para o planeamento e gestão dos recursos hídricos sob jurisdi o da ARH DO CENTRO, I.P.", financiado pelo QREN, Mais Centro – Programa Operacional Regional do Centro e União Europeia / Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional, e da Funda o para a Ciência e a Tecnologia (projecto AdaptaRia, PTDC/AAC-CLI/100953/2008). A segunda autora foi co-financiada pela FCT e pelo FSE (SFRH/BD/41033/2007). Agradece-se ao Dr. Lourival Trovisco o tratamento das imagens do Corine Land Cover.

## BIBLIOGRAFIA

- Almeida, L.P., Ferreira,  ., Vousdouskas, M.I., e Dodet, G., 2011. Historical variations and trends in storminess along the Portuguese south coast. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 2407-2417.
- Andrade, C., Pires, H.O., Silva, P., Tabora, R., e Freitas, M.C., 2006. Zonas costeiras, F.D. Santos e P. Miranda (eds.), *Altera es climáticas em Portugal. Cenários, impactes e medidas de adapta o – Projecto SIAMII*, Gradiva, Lisboa.
- Andrade, C., Pires, H. O., Tabora, R. e Freitas, M. C., 2007. Projecting future changes in wave climate and coastal response in Portugal by the end of the 21st century. *Journal of Coastal Research*, SI 50, 253-257.
- Bertin, X., Bruneau, N., Breilha, J.-F., Fortunato, A.B. e Karpytchev, M. (2011). Importance of wave age and resonance in storm surges: the case Xynthia, Bay of Biscay. *Ocean Modelling*, em impressão, doi:10.1016/j.ocemod.2011.11.001.
- Dias, J.A. e Tabora, R. (1992). Tidal gauge data in deducing secular trends of relative sea level and crustal movements in Portugal. *Journal of Coastal Research*, 8, 655–65.
- Dias, J.M. e Lopes, J.F., 2006. Implementation and assessment of hydrodynamic, salt and heat transport models: the case of Ria de Aveiro Lagoon. *Environmental Modeling and Software*, 21: 1-15.
- Dias, J.M., Lopes, J.F. e Dekeyser, I., 2000. Tidal propagation in Ria de Aveiro lagoon, Portugal. *Physics and Chemistry of the Earth*, 25: 369-374.
- Dias, J.M., Lopes, J.F. e Dekeyser, I., 1999. Hydrological characterisation of Ria de Aveiro, Portugal, in early summer. *Oceanologica Acta*, 22: 473-485.
- Dietrich, J.C., M. Zijlema, J.J. Westerink, L.H. Holthuijsen, C. Dawson, R.A. Luettich, R. Jensen, J.M. Smith, G.S. Stelling, G.W. Stone, 2011. Modeling Hurricane Waves and Storm Surge using Integrally-Coupled, Scalable Computations, *Coastal Engineering*, 58. 45-65.

- Dodet, G., Bertin, X. e Taborda, R., 2010. Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades, *Ocean Modeling*, 31 (3-4): 120-131.
- Fortunato, A.B., L. Pinto, A. Oliveira and J.S. Ferreira, 2002. Tidally-generated shelf waves off the western Iberian coast, *Continental Shelf Res.*, 22/14: 1935-1950.
- Fortunato, A.B. Bruneau, N. Azevedo, A. Araújo, M.A.V.C. e Oliveira, A. 2011. Automatic improvement of unstructured grids for coastal simulations. *Journal of Coastal Research*, SI 64: 1028 – 1032.
- Lopes, C.L., P.A. Silva, J.M. Dias, A. Rocha, A. Picado, S. Plecha e A.B. Fortunato, 2011. Local sea level change scenarios for the end of the 21st century and potential physical impacts in the lower Ria de Aveiro (Portugal), *Continental Shelf Research*, 31/14: 1515-1526.
- Menéndez, M. e Woodworth, P.L., 2010. Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge data set. *Journal of Geophysical Research*, 115: C10011
- Oliveira, A., Fortunato, A.B. e Dias, J.M., 2006. Numerical modeling of the Aveiro inlet dynamics. *Coastal Engineering*, 3282-3294.
- Quadrio, A. e Taborda, R., 2010. Chapter 9 - Portuguese Western Coast, in Ferreira, Ó., Vousdoukas, M. and Ciavola, P. (Eds.), *Review of climate change impact on storm occurrence – Micore Project Deliverable 202798*, pp. 71-78.
- Rodrigues, M., Oliveira, A., Queiroga, H., Fortunato, A.B. e Zhang, Y.J., 2009. Three-dimensional modeling of the lower trophic levels in the Ria de Aveiro (Portugal). *Ecological Modelling*, 220: 1274-1290.
- Rodrigues, M., Oliveira, A., Queiroga, H. e Brotas, V., 2011. Seasonal and diurnal water quality dynamics along a salinity gradient (Mira channel, Aveiro lagoon, Portugal). *Procedia Environmental Science*, em impressão.
- Sano, M., Golshani, A., Splinter, K.D., Strauss, D., Thurston, W. e Tomlinson, R., 2011. A detailed assessment of vulnerability to climate change in the Gold Coast, Australia. *Journal of Coastal Research*, SI 64: 245-249.
- Universidade de Aveiro (2007). Definição das condições de risco de cheia, incêndios florestais, erosão costeira e industriais na área de intervenção da AMRIA, Volumes I e II.
- Vaz, N., 2007. Estudo dos processos de transporte de calor e de sal no Canal do Espinheiro (Ria de Aveiro), Dissertação de Doutoramento em Física, Universidade de Aveiro.
- Yates, M.L., le Cozannet, G. e Lenôtre, N., 2011. Quantifying errors in long-term coastal erosion and inundation hazard assessments. *Journal of Coastal Research*, SI64: 260-264.
- Zhang, Y.-L. e Baptista, A.M., 2008. SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean Modelling*, 21/3-4: 71-96.