

Subida do Nível Médio do Mar em Cascais, revisão da taxa actual

C. Antunes (1)

(1) IDL – Instituto Dom Luiz, FCUL – Universidade de Lisboa, cmantunes@fc.ul.pt.

Resumo: A monitorização e actualização da estimativa da taxa e aceleração da subida do NMM é de importância crucial, devido ao previsível impacto que estas variáveis terão na ocorrência de eventos extremos de inundação e galgamento e, respectiva erosão costeira. Dada a evolução da subida do NMM devido à dinâmica dos diferentes efeitos resultantes das alterações climáticas, a actualização dos dados de monitorização do nível do mar, quer ao nível local através de marégrafos, quer ao nível global através de dados de satélite, permite a permanente revisão das taxas de subida do NMM, a sua comparação com as curvas de projecção, e consequentemente, a avaliação dos impactos futuros de âmbito regional. A comunicação apresenta uma revisão actualizada da taxa de subida do NMM em Cascais, fazendo uma análise das diferentes componentes e factores que influenciam a sua estimativa e evidenciando uma elevada correlação com a respectiva taxa global.

Palavras-chave: Nível Médio do Mar, Marégrafo de Cascais, Subida do NMM, Aceleração do NMM, Efeito Barométrico.

1. INTRODUÇÃO

Ao fim de doze anos e meio de dados adquiridos pelo marégrafo digital de Cascais, da actual Direcção Geral do Território (DGT), de forma contínua e com alta taxa de registo, é já possível avaliar a actual evolução da subida do nível médio do mar com um reduzido grau de incerteza. Para além de outras informações e análises que podem ser extraídas e realizadas sobre a série de dados registada, à taxa actual de 3 minutos (de 6 minutos até 2010), a monitorização contínua da variação do nível do mar em Cascais, como referência para a costa portuguesa, é hoje fundamental face ao risco inerente às alterações climáticas, cujo impacto mais evidente e consequente para as populações costeiras é a subida do nível médio do mar (NMM) e a perigosidade associada a inundações e galgamentos costeiros e, recuo da linha de costa.

Devido à dinâmica dos oceanos e sua elevada inércia face à constante e actual mudança climática, a subida do NMM ocorre de forma não-linear, apresentando-se como um fenómeno de tendência acelerado. Como consequência deste tipo de comportamento, verifica-se uma evolução com tendência crescente da taxa de subida do nível médio do mar (sNMM) cuja variação pode chegar no futuro à sua duplicação a cada 10 ou 15 anos.

A falta de continuidade e longevidade de registo de outros marégrafos a nível nacional, como seja, o marégrafo de Lagos da DGT, ou os vários marégrafos do Instituto Hidrográfico (IH), ou a ausência de estudos de análise consistentes dos seus dados, torna o marégrafo de Cascais e as suas séries de dados de elevada importância, quer a nível nacional, quer a nível global, por ser muito utilizada nos estudos e análises da variabilidade do NMM global (pelo menos até 2005).

A complexidade da variabilidade e amplitude das diferentes componentes que constituem a grandeza variável do NMM obriga a um estudo e uma análise detalhada e cuidada da sua série de registo de elevada frequência. Para o fazer de forma rigorosa, é necessário estudar todas as variáveis de origem oceânica e de forçamento meteorológico, bem como, de validação, correcção e referenciação dos dados numéricos da série.

A componente principal que está relacionada com as mudanças climáticas, a chamada componente eustática, embora esteja apenas directamente dependente, em termos conceptuais, do aumento do volume de massa oceânica, que deriva da diminuição de densidade por expansão térmica, e aumento de massa de água por degelo das massas geladas (calotes polares, glaciares continentais e permafrostes), é do ponto de vista prático em termos de modelação numérica extremamente difícil de avaliar a partir de uma única série de dados maregráficos. A influência de diversos factores, como o forçamento meteorológico de curto e médio período, os movimentos verticais do marégrafo devido a efeitos tectónicos, efeitos de assentamento estrutural e de reajustamento isostático pós-glacial, bem como, eventuais problemas instrumentais devido a erros ou falhas nos dados, exige uma metodologia completa e criteriosa, cujos resultados nem sempre são possíveis de serem validados. Por vezes, resta apenas esperar que o tempo dê razão e comprovação desses mesmos resultados, ou na melhor das hipóteses, comparar com os resultados de métodos globais publicados.

Embora, do ponto de vista de comparação com os resultados de soluções globais, nomeadamente, de observação por satélite, importa analisar os valores de taxa absoluta de subida do NMM, já para efeitos de avaliação de vulnerabilidade e risco costeiro

interessa mais os valores de taxa relativa da subida do NMM ao nível regional, pela relação directa com os impactos costeiros associados.

Neste trabalho são apresentados os resultados da análise da série maregráfica do novo marégrafo digital de Cascais de medição acústica, a operar desde Novembro de 2003. São ainda apresentados e discutidas as correcções e reduções numéricas da série com vista à avaliação da taxa actual de subida do NMM relativa ao datum altimétrico nacional (Cascais 1938).

2. SÉRIE DIÁRIA DO NMM

A série diária do NMM é elaborada a partir dos dados públicos disponibilizados via FTP pela DGT. Estes dados são referidos a uma referência materializada e devidamente cotada por nivelamento geométrico a partir de marcas da rede de nivelamento nacional de alta precisão.

2.1. Correcção da velocidade vertical de sítio

A altitude ortométrica, resultante do nivelamento, da marca de referência que consta nos dados está desactualizada e data ainda de 24 de junho de 2006. Esse valor de referência, obtido com nivelamento, tem-se vindo a alterar ao longo do tempo devido ao assentamento natural do edifício de apoio onde está alojado o equipamento do marégrafo na marina de Cascais. Com base na série de observações de nivelamento geométrico realizadas pelos serviços de Geodesia da DGT é possível determinar as correcções de velocidade vertical relativas que podem ser aplicadas à série de dados do NMM diário observado (Tabela I).

Tabela I – Variação da altitude ortométrica da marca de nivelamento de referência do marégrafo acústico (ΔH – variação anual da altitude; $\Delta H/\Delta t$ – velocidade vertical anual em mm/ano).

Anos	2006	2007	2008	2011	2014	2015
H (m)	3.579	3.577	3.574	3.569	3.565	3.563
ΔH (mm)	-7.9	-1.4	-3.1	-5.5	-4.3	-2.0
$\Delta H/\Delta t$ (mm/ano)	-3.7	-1.9	-2.1	-2.2	-1.4	-1.2

A correcção dos valores diários do NMM devido ao assentamento é realizada por interpolação linear, com base nos valores de velocidades verticais anuais resultantes do nivelamento. A não correcção deste efeito acarretaria em erros significativos na determinação da taxa de subida do NMM, com um aumento na ordem de 2 mm/ano.

A série apresentada na Figura 1 contém os dados do novo marégrafo que foram complementados com valores da série de dados do marégrafo analógico, devidamente ajustados, para o período entre Janeiro de 2000 e Novembro de 2003.

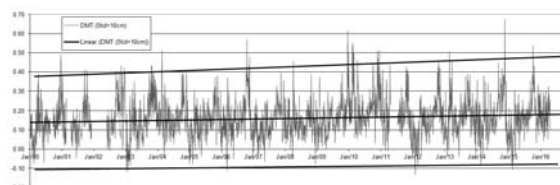


Fig. 1. Série diária do NMM de Cascais (em metros e com DP de 10 cm), entre 2000 e 2015, relativo ao datum Cascais1938.

Os limites máximos e mínimos identificados na Figura 1 com as duas linhas rectas adicionais, servem para identificar a tendência dos extremos da variação diária do NMM. Com essas linhas de tendência identifica-se o aumento dos extremos máximos na variação do NMM que correspondem à ocorrência de temporais, devido ao aumento do forçamento meteorológico, o qual se traduz em sobre-elevações meteorológicas de maior amplitude. Esta tendência evidencia, além disso, um aumento da variabilidade dada pela evolução do desvio padrão dos valores médios diários.

2.2. Correcção do forçamento meteorológico

A série de dados da Figura 1 está isenta de qualquer correcção meteorológica, quer devido ao efeito barométrico inverso (EBI), quer ao efeito do vento de curto e longo período.

Dada a existência do registo *in loco* da pressão atmosférica (PA), para além de valores de temperatura da água e do ar a cada 30 minutos, é possível determinar a correcção do EBI com os próprios dados do marégrafo. Ao fim de vários anos de análise destes dados e da aplicação da correcção do EBI por esta via, constatou-se uma variação anómala nos valores de PA do marégrafo de Cascais, com um aumento na ordem 0.3 hPa/ano. De acordo com Held e Soden (2006) é esperado um aumento da PA nas latitudes baixas e médias e, uma diminuição nas zonas polares, devido às alterações climáticas, contudo não é espectável que haja grandes variações em períodos tão curtos. Devido a este facto foi feita uma investigação aos valores da série de PA de Cascais, comparando-os, nomeadamente, com modelos atmosféricos de reanálise e com valores de uma estação próxima com registos de PA ao nível mar. Feita esta análise concluiu-se que o barómetro digital apresenta uma deriva instrumental, com início em meados de 2009, facto que causa uma sobrestimação da taxa de subida do NMM em cerca de 2 mm/ano. Face a esta situação e antes de ser possível qualquer rectificação ou substituição dos valores de PA da série, assumiu-se o valor de referência da PA, em relação ao qual é calculado o EBI, dado por uma média móvel de 2 anos em vez do valor médio global dos dados do barómetro do marégrafo de Cascais. Desta forma elimina-se o efeito de deriva instrumental verificado, evitando um enviesamento anómalo e não real da estimativa da taxa média de subida do NMM.

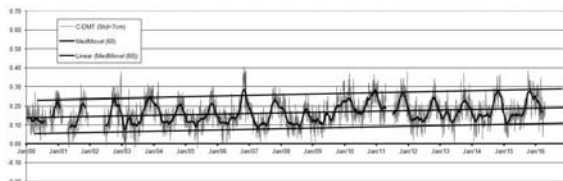


Fig. 2. Série diária do NMM de Cascais (em metros e com DP de 7 cm) corrigida do EBI e respectiva média móvel de 60 dias.

A Figura 2 mostra a série de médias diárias do NMM corrigida da variação da PA. A média móvel de 60 dias sobreposta à série dá-nos a variação anual do NMM isenta das variações de curto período de forçamento do vento. Nesta série é visível o aumento dos valores extremos, máximos e mínimos, com idêntica taxa de crescimento da própria série, facto que não se verificava na série não corrigida. Uma das hipóteses que pode explicar tal diferença é a evolução de intensidade e frequência dos eventos extremos, ao nível da PA e do vento.

3. TAXA ACTUAL DA SUBIDA DO NMM, ANÁLISE E CONCLUSÕES

A variação intra-anual do NMM apresenta um padrão de variabilidade caracterizado pela chamada variação sazonal. Esta variação, apresentando valores máximos no final de cada ano, de Outubro a Dezembro, e valores mínimos de Maio a Julho, deve-se essencialmente ao regime de ventos que assolam a costa oeste atlântica, de verão com ventos do quadrante noroeste, causando o transporte da camada superficial para o largo, o chamado transporte de Ekman que favorece o afloramento costeiro (Fiúza *et al.*, 1982) designado por «*upwelling*» (Wooster e Reid, 1963), e de inverno com ventos do quadrante sudoeste que geram um transporte da camada superficial em direcção à costa causando empilhamento e consequente sobre-elevação persistente. Adicionalmente a este efeito há ainda a considerar o efeito da variação da temperatura da água do mar ao longo do ano e o efeito de variação sazonal da maré, nomeadamente, a componente harmónica anual de maré de influência solar (SA).

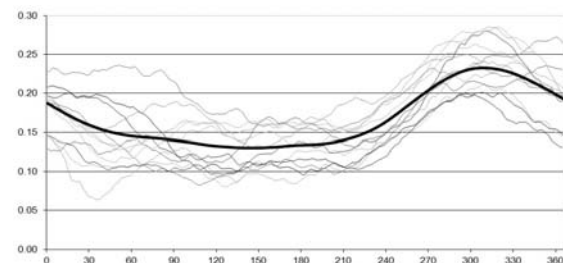


Fig. 3. Variação sazonal (em metros) de 2003 a 2015 e variação média (negrito).

Dada a impossibilidade de uma modelação analítica da combinação destes vários efeitos sazonais, optou-se por uma modelação numérica com base na série decadal dos valores médios diários de maré. A Figura 3 mostra as variações sazonais dos últimos 12

anos, com a qual é possível determinar a variação média sazonal do NMM.

Centrando a curva da variação média sazonal em torno de zero, é possível remover esta variação sazonal média à série diária do NMM corrigida e, assim, obter uma série reduzida cujos vários efeitos até aqui numericamente modelados são removidos, tornando a série próxima daquilo que se pode considerar a variação eustática relativa, a menos de efeitos de variação de correntes oceânicas de longo período e efeitos de compensação ou resposta do equilíbrio hidrostático do oceano.

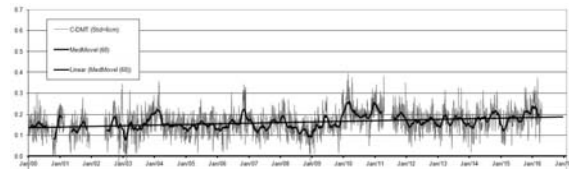


Fig. 4. Série de dados reduzida da variação sazonal (em metros e com 6 cm de DP) e respectiva média móvel de 60 dias com a recta de regressão linear.

Esta série reduzida de variação do NMM apresenta uma variabilidade inter-anual significativamente mais reduzida. Ao aplicar-se a média móvel de 60 dias obtém-se uma curva suavizada com um desvio padrão (DP) de apenas 3.2 cm evidenciando uma maior estabilidade da estimativa da taxa de sNMM ao longo do processo de incrementação e actualização da série com novos dados. A regressão linear da média móvel da série reduzida apresenta assim uma taxa de sNMM mais precisa quando comparada com as séries anteriores, com um DP de apenas 0.09 mm/ano. A taxa média de subida do NMM estimada para o período de 16 anos, de 2000 a 2015, a partir da média móvel de 60 dias da série reduzida é de 3.0 mm/ano (Tabela II).

Tabela II – Variabilidade (DP em cm) das séries de dados, Taxa de subida do NMM (mm/ano) e respectivo desvio padrão para o período de 2000 a 2015.

Séries	DP Série	Taxa sNMM	DP Taxa
Original	9.6	2.5	0.29
Corrigida	6.9	3.4	0.20
MM60_cor	4.9	3.2	0.15
Reduzida	5.7	3.3	0.16
MM60_red	3.2	3.0	0.09

Comparando estes valores com estimativas anteriormente publicadas (Antunes, 2011), os valores aqui apresentados na Tabela II são mais baixos, com uma redução de 0.5 mm/ano na melhor das estimativas. Esta redução deve-se essencialmente a dois factores: 1) a existência de uma anomalia positiva do NMM ocorrida em 2010 devido à intensidade e elevada frequência de temporais nesse ano, associados a um período prolongado do índice da NAO negativo (Antunes, 2014) e consequente estabilização entre 2011 e 2015; e, 2) a correcção efectuada no presente

trabalho ao EBI resultante da deriva instrumental do barómetro do marégrafo com efeito a partir de 2009 que terá enviesado ligeiramente a estimativa obtida em 2011.

Comparando as presentes estimativas da subida do NMM com valores do final do séc. XX deparamo-nos com um aumento significativo da respectiva taxa, evidenciando a existência de uma aceleração na variação do NMM. Recorrendo à série decadal definida entre 2000 e 2015 e aplicando o método denominado de *bootstrapping*, em que são estimadas sucessivas taxas de subida do NMM com períodos sucessivamente mais recentes, obtém-se uma série de taxas sucessivamente crescente (colunas 3, 4 e 5 da Tabela III).

Este comportamento de sucessivo aumento da taxa de subida do NMM é característico de um comportamento acelerado, pelo que é possível estimar, para além da taxa para um dado período, também o valor da aceleração da subida do NMM.

Tabela III – Taxas de sNMM para diferentes períodos (em mm/ano), de 1992 a 2004 com a série de dados secular, e de 2000 a Abril de 2016 com dados da série decadal de médias diárias.

Período	1992-2004	2000-16	2003-16	2005-16
Taxa sNMM	2.2	3.0	3.4	4.1
DP Taxa	0.07	0.09	0.11	0.14

Assumindo uma subida do NMM acelerada, com taxa de 2.2 mm/ano de 1992 a 2004 e de 4.1 mm/ano de 2005 a 2016 (dados até Abril), obtém-se uma aceleração de 0.079 mm/ano². Este valor mantém a mesma magnitude do valor anteriormente estimado por Antunes (2011), de 0.074 mm/ano², e substancialmente maior do valor estimado por Antunes e Taborda (2009) de 0.024 mm/ano². Esta diferença, comparativamente à aceleração estimada em 2009, com dados apenas até 2008, prende-se com a subestimação resultante do reduzido número de dados (de 2000 a 2008), e ainda, o facto de ocorrer uma subida considerável do NMM a partir de 2009, como é visível na Figura 4 e evidenciado pela taxa média correspondente ao período mais recente, entre 2005 e 2016, de 4.1 mm/ano.

Assim, temos uma estimativa da taxa média de sNMM de 3.0 mm/ano para o período 2000-2015, e uma taxa média de 4.1 mm/ano para o período mais recente de 2005-2015. Analisando as várias séries do NMM global resultantes dos dados de satélite, disponíveis e publicadas nas páginas da internet da NASA¹, CSIRO² e AVISO (do CNES)³, podemos obter estimativas semelhantes, de um período mais alargado, entre 1992 a 2016, e de um período mais recente, entre 2007 a 2016 (Tabela IV). Estas

estimativas diferem das estimativas para Cascais na ordem de 0.1 a 0.4 mm/ano.

Tabela IV – Taxa de sNMM estimadas com as séries de dados de satélite por diferentes instituições (em mm/ano).

Séries	Taxa 1992-2016	DP	Taxa 2007-2016	DP
NASA	3.42	0.02	4.24	0.07
CSIRO	3.30	0.03	4.30	0.11
AVISO	3.37	0.01	4.14	0.06

Este resultado evidencia uma correlação muito elevada entre a taxa de sNMM de Cascais e a taxa global de sNMM, conclusão já tirada em trabalhos anteriores (Antunes e Taborda, 2009; Antunes, 2011).

Assumindo que estas taxas correspondem a médias estimadas por regressão linear para um determinado período, e que a subida do NMM é acelerada, a taxa actual em 2015 será certamente superior a estas taxas apresentadas. Com base numa simulação e usando a estimativa da aceleração, a taxa efectiva de sNMM em 2015 deverá ser de 4.6 mm/ano.

Agradecimentos

Fundação para a Ciência e Tecnologia, Financed by Project FCT: “Pest-Oe/CTE/LA0019/2013-2014”.

À Direcção Geral do Território, pela cedência e facilitação do acesso aos dados do Marégrafo de Cascais.

REFERÊNCIAS

- Antunes, C. e Taborda, R. (2009). Sea level at Cascais Tide Gauge: Data, Analysis and Results. *Journal of Coastal Research*, SI 56 (*Proceedings of the 10th International Coastal Symposium*), Lisbon, Portugal, 218-222.
- Antunes, C. (2011). Variação actual do NMM em Cascais. *Actas da VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia - CNCG2011*, 366-373.
- Antunes, C. (2014). Eventos extremos e a variação do Nível do Mar. *Actas das 3as Jornadas de Engenharia Geográfica*, Instituto Hidrográfico, Lisboa 24-26 de Junho, 37-40.
- Fiúza, A.F.G., Macedo, M.E., Guerreiro, M.R. (1982). Climatological space and time variation of the Portuguese coastal upwelling. *Oceanologica*, 5, 31-40.
- Held, I.M. e Soden, B.J. (2006). Robust Response of the Hydrological Cycle to Global Warming. *Journal of Climate*, 19, DOI:10.1175/2010JCLI4045.1.
- Wooster, W.S. e J.L. Reid, Jr. (1963). Eastern Boundary Currents. p. 253-280. In M.N. Hill (ed.), *The Sea*, Vol. 2. Interscience, New York. 554 p.

¹ <http://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>

² http://www.cmar.csiro.au/sealevel/sl_hist_last_decades.html

³ <http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level.html>