

# IMPLICAÇÃO DA SUBIDA DO NMM NA NECESSIDADE DE REVISÃO DOS SISTEMAS DE REFERÊNCIA VERTICAIS

Carlos ANTUNES

*Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*

**Resumo:** O Nível Médio do Mar (NMM) é uma superfície de referência geodésica usada nas diferentes áreas da Cartografia, Topografia e Hidrografia, e dadas as suas características de superfície de um fluido que tende para uma forma de equilíbrio, aproximada a uma superfície equipotencial do campo gravítico, está sujeita a um conjunto de forças e constrangimentos que regem a sua dinâmica, adoptando uma forma e dimensão que varia ao longo dos tempos. A definição de um sistema de referência vertical (altimétrico ou batimétrico), do ponto de vista prático, está sempre associado a esta superfície assumida como referência para a concretização de qualquer *datum* vertical. A variação da sua forma e dimensão implica uma alteração directa dos sistemas de referência associados e uma redefinição dos *data* verticais. Na Geodesia, o datum vertical é rigorosamente definido por uma superfície equipotencial de referência – o geóide – que melhor se ajusta a uma dada superfície média do mar – o NMM, fixada numa dada época ou período. Ao passo que, na Hidrografia e Cartografia Náutica, o *datum* vertical é definido localmente através de um plano de referência – o Zero Hidrográfico (ZH), localizado a uma dada profundidade abaixo do NMM, em função da amplitude da maré local. Nesta comunicação apresentam-se as definições dos sistemas de referência verticais utilizados em Portugal e discute-se as implicações da subida do NMM na redefinição e revisão dos *data* verticais usados, não só na Geodesia, na Cartografia e na Topografia, como também na Hidrografia e Cartografia Náutica. As implicações directas são a revisão dos valores das atitudes ortométricas, da linha de costa, limites do domínio público hídrico e das profundidades e conseqüente navegabilidade das zonas de águas restritas (zonas portuárias e estuarinas).

**Palavras-chave:** Subida do NMM/ Sistema de Referência Vertical/ Potencial Gravítico/ Elipsóide de Referência/ Geóide/ Datum Altimétrico/ Zero Hidrográfico/ Sondagens e Profundidades/ Navegabilidade/ Águas Restritas/ Domínio Público Hídrico/ LMPAVE.

## 1. INTRODUÇÃO

A superfície média dos oceanos varia significativamente ao longo dos tempos, sendo regida pelas variações de longo período (ordem dos milhares de anos), verificadas no volume de massa oceânica (componente eustática) e que resultam dos ciclos glaciares (períodos glaciares e inter-glaciares).

Actualmente são conhecidas as causas e os efeitos destas variações no Nível Médio do Mar (NMM), com amplitudes na ordem dos 120 – 140 metros, e períodos de 120 a 200 mil anos. Estes ciclos não são regulares nem simétricos, eles têm uma duração mais prolongada no período glacial, correspondente ao arrefecimento da Terra e conseqüente descida do nível do mar devido à acumulação de massa de gelo nas zonas polares, e uma duração mais curta nos períodos inter-glaciares, correspondente ao aquecimento da Terra e conseqüente subida do nível do mar devido ao degelo das massas polares e conseqüente redistribuição na massa oceânica.

O último ciclo glacial iniciou-se há cerca de 120 mil anos, com o nível do mar ligeiramente acima do nível actual, e terminou há cerca de 20 mil anos, com o nível do mar a 130 metros abaixo do NMM actual. Iniciou-se, então nessa altura, o actual período inter-glacial (entre glaciações) com a conseqüente subida do nível do mar que terminou há cerca de 6-8 mil anos atrás (no período histórico do neolítico), estabilizando o nível próximo do valor actual (2-3 metros abaixo do NMM actual). Desde então, o NMM tem vindo lentamente a convergir para o nível actual a uma taxa média de 3-4 cm/século.

Dado que os primeiros geodestas (filósofos, matemáticos e astrónomos) surgem apenas no período da Grécia Antiga, há pouco mais de 2 mil anos, com Eratóstenes (276 a.C. – 196 a.C.) a encabeçar a lista de grandes

matemáticos que contribuíram para o aparecimento e desenvolvimento da Geodesia, e que a teoria que define a forma rigorosa da Terra e do seu campo gravítico surge no séc. XVIII com a teoria da gravitação universal de Newton (1643-1727), culminando com a definição da figura matemática da Terra de Gauss (1777-1855), o geóide, e a sua concretização através da solução integral de Stokes (1819-1903), e ainda, dado o facto de os primeiros marégrafos terem surgido apenas no final do séc. XIX, nunca houve na Geodesia a necessidade de redefinir ou rever os sistemas de referência verticais, através da concretização de um *datum* vertical. Por um lado, porque a teoria e a instrumentação surgiram muito recentemente na história (tendo em conta a duração do ciclo glacial), exactamente num período estável do NMM, e por outro, porque só muito recentemente se verificou e assumiu que o NMM está a subir a uma taxa considerável, com possíveis implicações futuras na redefinição dos valores e parâmetros dos sistemas de referência vertical, dadas as projecções da subida do NMM de cerca de 1 metro até 2100 (Ramsdorf, 2007).

Se, por um lado, do ponto de vista teórico, a concretização de um sistema de referência vertical através de um *datum* resulta de uma ou mais convenções, e por isso, a variação do NMM não implica obrigatoriamente a revisão de um sistema de referência vertical geocêntrico e global, por outro lado, do ponto de vista da geodesia aplicada e áreas afins, a variação significativa do NMM, bem como, os movimentos verticais costeiros de origem isostática e tectónica têm implicações práticas e directas na utilização da informação vertical e batimétrica por parte de toda a comunidade de utilizadores.

Nesta comunicação discute-se e apresenta-se o problema isolado do território nacional, cujo problema e conceito se pode aplicar a um qualquer outro território, deixando de parte a questão da unificação dos sistemas nacionais num sistema regional ou global, como é o caso do EVRS2000 - *European Vertical Reference System 2000* (Ihde e Augath, 2002). A unificação dos sistemas altimétricos cria problemas práticos de utilização no longo prazo, já que a subida do NMM absoluta, considerando apenas a componente eustática resultante, quer da expansão térmica quer do aumento de massa, não tem a mesma repercussão altimétrica em todas as zonas costeiras continentais, visto as diferentes regiões estarem, de forma diferenciada, sob o efeito de resposta visco-elástica causado pela carga superficial da glaciação, i.e., sob o efeito do ajustamento isostático glacial; e, além disso, apresentarem movimentos tectónicos verticais diferentes. Ou seja, a repercussão da subida do NMM sobre o sistema de referência altimétrico é diferente de região para região. Por esta razão, qualquer sistema de referência altimétrica unificado, regional ou global, tem implicações práticas directas nas regiões de maior dinâmica. Tendo em consideração a dinâmica da crosta da Terra e da variação permanente do NMM, os sistemas nacionais têm, de forma distinta, necessidades práticas de uma maior frequência de revisão e adaptação dos seus *data* verticais em função da variação relativa do NMM.

## 2. DEFINIÇÕES DOS SISTEMAS DE REFERÊNCIA E REFERENCIAIS VERTICAIS

De entre os vários sistemas de referência e referenciais verticais, interessa considerar neste contexto o Datum Altimétrico de Cascais de 1938, os Zeros Hidrográficos nacionais e o modelo numérico do geóide adoptado como superfície de referência vertical.

### 2.1. Datum Altimétrico

O sistema altimétrico em Portugal continental é definido a partir de um ponto, o Datum Altimétrico de Cascais de 1938, definido a partir da média das observações do nível do mar registadas no antigo marégrafo de Cascais, entre 1882 a 1938, originando assim o NMM de Cascais de 1938 – zero altimétrico de Portugal continental (NMM1938). Os registos e observações do nível do mar são referidos a uma marca de referência localizada junto ao marégrafo que serve de ponto de partida para o nivelamento geométrico estendido a toda a rede nacional de nivelamento e que estabelece o sistema nacional de altitudes ortométricas. Esta marca de referência, que materializa o *datum* altimétrico nacional, encontra-se a uma altitude de 4.308 m em relação ao NMM de Cascais de 1938, ou seja, o NMM1938 está localizado 4.308 m abaixo desta marca de referência.

A definição de um sistema de referência altimétrico relaciona a altitude de um qualquer ponto à superfície terrestre com a superfície de referência, medida ao longo da linha vertical ou normal entre a superfície de referência (geóide, elipsóide ou quasi-geóide) e o ponto à superfície topográfica.

O sistema nacional de referência vertical é então definido por um conjunto de altitudes ortométricas estendido a todo território nacional continental através da rede de linhas de nivelamento geométrico e da rede geodésica nacional. Ao contrário de muitos sistemas verticais na Europa que usam sistemas de altitude normais (definido através do valor da gravidade normal -  $\gamma$ , em vez da gravidade terrestre -  $g$ ), o sistema nacional usa o sistema de altitudes ortométricas, correspondente à distância vertical medida ao longo da vertical de lugar do ponto, entre a superfície do geóide e a superfície topográfica, e que resulta da seguinte definição

$$H = \frac{C}{\bar{g}} \cong \frac{C}{g + 0.0424H} \quad (1)$$

onde  $C$  é o número geopotencial e  $\bar{g}$  é o valor médio da aceleração da gravidade entre o ponto do terreno e a superfície do geóide, ao longo da vertical do lugar (Heiskanen and Moritz, 1967).

A diferença entre estes dois sistemas usados na Europa, ao nível das altitudes ortométricas e altitudes normais, é pouco significativa nas zonas de baixa altitude, apresentando apenas diferenças consideradas significativas nas zonas montanhosas, ou em zonas de significativa variação de densidade das massas topográficas.

## 2.2. Zero Hidrográfico

Apesar das resoluções recentes do IHO (*International Hydrographic Organization*), no sentido da unificação das definições de Zero Hidrográfico (ZH) existentes pelos diferentes países membros desta organização, continua a haver uma disparidade de definições e de zeros hidrográficos. Em Portugal continua a vigorar, não só a definição que deu origem a todos os ZH usados no território nacional, como também os próprios valores de ZH originalmente definidos. Assim, em Portugal, é ainda válida a definição de ZH dado pela mais baixa das Baixa-Mar registadas num período nodal (18.6 anos), acrescida do chamado “pé de piloto” (aproximadamente 30 cm). No território continental temos o valor do ZH de 2.00 m abaixo do NMM1938 para toda a costa portuguesa, com a exceção da zona do estuário do Tejo, que se situa a 2.08 m abaixo do NMM1938. Nas regiões autónomas, porque a maré nos oceanos é de amplitude inferior à das zonas costeiras e estuarinas, tem-se o ZH de 1.40 m na Madeira e de 1.00 m nos Açores.

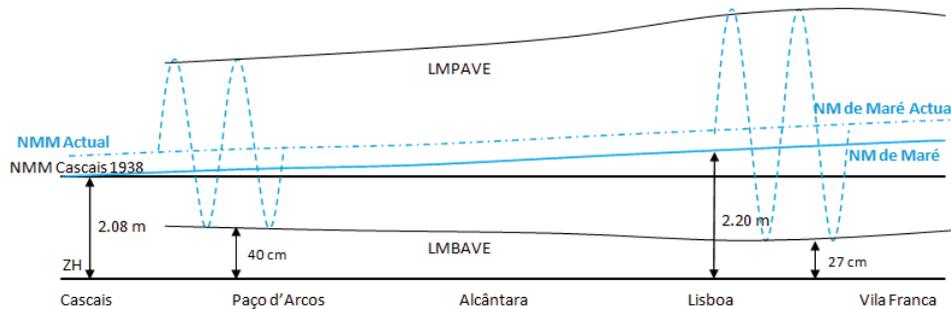
A observação de maré é feita por marégrafos de poço (usando diferentes tecnologias de medição e registo), registando o nível da superfície instantânea do mar em relação à marca de referência. Esta observação de nível do mar pode ser registada e convertida na forma de elevação da maré (variação do nível do mar em relação ao NMM) ou na forma de altura de maré (variação em relação ao ZH). Sendo a altura de maré dada pela soma da elevação de maré com o valor de ZH local. Deste modo, temos a grandeza de elevação de maré a oscilar em torno do nível médio de maré (ou NMM, a menos de efeitos de subida do NMM e de efeitos de sobre-elevação meteorológica), assumindo valores positivos (na Preia-Mar – PM) e valores negativos (na Baixa-Mar – BM), ao passo que, a grandeza de altura de maré é uma grandeza sempre positiva, a menos de situações extremas de forçamento meteorológico ou outro que cause um abaixamento significativo da maré abaixo do ZH.

Em Hidrografia, a amplitude de maré é sempre dada e definida pela altura de maré, i.e., em relação ao ZH, tal como toda a informação batimétrica usada na cartografia náutica, sondas e profundidades, esta deve ser referida ao ZH local da zona portuária ou hidrográfica, visto que, como foi referido, o ZH é definido sempre em função do regime de maré (amplitude máxima em águas vivas – AV) e da sua coluna de água.

Ao longo da costa portuguesa o regime de maré é do tipo semi-diurno com uma semi-amplitude máxima na ordem de 1.70 m, podendo atingir 1.80 m no caso de Viana do Castelo e 1.85 em Cascais, e excepcionalmente, 2.10 m em Lisboa devido ao facto de ser um regime de maré estuarina (Antunes, 2007) (Fig.1). Por aqui se pode compreender que para toda a zona costeira portuguesa o ZH de 2.00 m é, de acordo com a definição usada em Portugal pelo Instituto Hidrográfico (IH), uma referência adequada e justificada.

Já para o caso particular do estuário do Tejo, nomeadamente para Lisboa, há a considerar o efeito de propagação da onda de maré ao longo do estuário. A onda de maré que transporta uma dada quantidade de massa a uma determinada velocidade, ao entrar num estuário, confinado por um determinado prisma de maré, perde velocidade (atraso de fase) e aumenta a sua amplitude devido à conservação de energia da onda (Fig.1). Além disso, verifica-se também uma ligeira elevação do seu nível médio, sobre-elevando ligeiramente a onda e o

seu nível médio de maré (NMMaré) em relação ao NMM e ao ZH da carta náutica. Localmente, a altura de maré do NMMaré de um dado porto define a profundidade local do ZH, e este é por vezes definido como o ZH local correspondendo à constante  $Z_0$ , ou harmónica de ordem zero, do modelo de harmónicas simples que define matematicamente a maré astronómica. No caso de Lisboa, este valor era originalmente 2.20 m, situando-se actualmente no valor de 2.32 m devido subida do NMM; ao passo que, em Cascais era originalmente de 2.08 m (o ZH oficial), e actualmente 2.23 m.



**Figura 1** – Geometria da maré no estuário do Tejo. Relação entre o NMM1938 e o ZH de Cascais-Lisboa. Diferença entre o NMM1938 e o NMM actual. Limite máximo de PM de AV equinociais – LMPAVE.

A Fig. 1 mostra a sobre-elevação da maré actual devido à subida do NMM de 15 cm em relação à referência do NMM1938 (Antunes, 2007), posicionando os valores de altura de maré (BM, NMM e PM) acima dos valores convencionais definidos pelos antigos modelos de maré. Nomeadamente, os valores de resguardo dado pelo mínimo de baixa-mar (BM) de AV, de 40 cm em Cascais e 27 cm em Lisboa (baseado em Antunes, 2007 para a década de 2001-10).

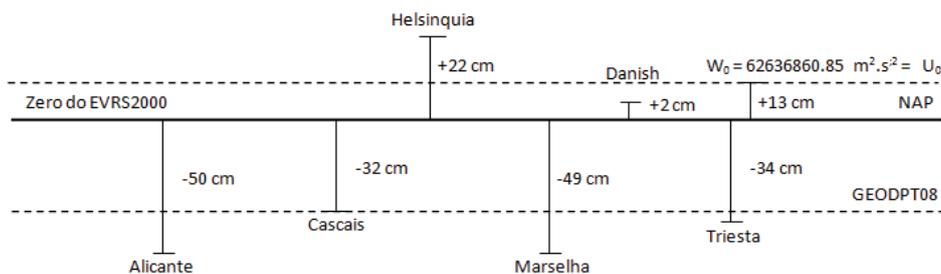
### 2.3. Geóide

A definição rigorosa de um *datum* altimétrico global (com aplicação local) é dada pela superfície que define matematicamente a figura física da Terra, isto é, a superfície equipotencial de referência – o geóide.

A superfície do geóide é uma figura matemática que define a geometria do campo gravítico da Terra, ao nível do mar. Para ser estabelecida, fixada e usada como referência altimétrica, esta superfície tem de resultar de um conjunto de convenções. São elas: a sua dimensão e forma dado pelos parâmetros ( $a$ ,  $e^2$ ) do elipsóide de referência; a velocidade angular da Terra ( $\omega$ ) e a constante gravitacional da Terra ( $GM$ ). A partir da fixação destes parâmetros determina-se o valor constante do potencial gravítico  $W_0$  que define a superfície equipotencial particular do geóide. Por convenção, este valor constante  $W_0$  é igual ao equivalente valor do potencial normal do elipsóide de referência,  $U_0$ , dado actualmente pelo valor  $W_0=U_0= 62636860.85 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  (Moritz, 2000), e que matematicamente é definido pela seguinte expressão analítica:

$$U_0 = \frac{GM}{\sqrt{a^2 - b^2}} \arctg\left(\frac{e}{\sqrt{1 - e^2}}\right) + \frac{1}{2} \omega^2 a^2 \quad (2)$$

onde ( $GM$ ,  $a$ ,  $e^2$ ,  $\omega$ ) são os parâmetros definidos numericamente pelo GRS80 (*Geodetic Reference System* 1980), definido em (Moritz, 2000).



**Figura 2** – Relação entre os diferentes *data* altimétricos na Europa (Idhe and Sánchez, 2005), o GEODPT08 e a superfície equipotencial de referência,  $U_0$ , dada pelo GRS80.

Em Portugal, existe já um modelo gravimétrico de geóide, o GEODPT08 (Catalão and Sevilla, 2009). É um modelo numérico dado no formato de grelha e corresponde a uma solução de geóide fixa no Datum Altimétrico de Cascais (NMM1938), ajustado ao sistema de altitudes da rede de nivelamento de alta precisão e da rede geodésica de primeira ordem. Este modelo, facultado publicamente pelo IGP, é hoje comumente usado nas aplicações de GNSS diferencial em Topografia, Cartografia e Hidrografia, e como técnica de nivelamento geodésico proporciona uma exactidão superior a 4 cm (Catalão and Sevilla, 2009). A Fig. 2 mostra a relação altimétrica entre diferentes referenciais usados na Europa e a sua relação com o sistema EVRS2000.

### 3. IMPLICAÇÕES DA SUBIDA DO NMM

Observando-se a série temporal do NMM do marégrafo de Cascais, a subida do NMM inicia-se a partir de meados de 1920, a uma razão de 1.9 mm/ano até 2000 (Antunes, 2007; Antunes and Taborda, 2009; Antunes, 2011). No final do século passado, o NMM, dado pela média móvel de 10 anos da série anual situava-se nos 12 cm acima do NMM1938 e situa-se actualmente nos 16 cm (Antunes, 2007), valor dado pela média dos últimos 10 anos (considerando já os dados do novo marégrafo de Cascais até 2010).

De acordo com Antunes and Taborda (2009) a taxa de subida do NMM nas últimas décadas do século passado era de 2.1 mm/ano, ao passo que actualmente esse valor, de acordo com Antunes (2011), ronda os 3.6 mm/ano, resultando numa aceleração actual estimada do NMM de 0.074 m/ano<sup>2</sup>. Admitindo que este valor de aceleração da subida do NMM se mantém, teríamos em 2050, uma subida do NMM de 42 cm acima do NMM1938 e, em 2100, uma subida do NMM de 1.08 m acima do NMM1938. Considerando que, actualmente, o movimento vertical de sítio, dado por GPS (Antunes *et al.*, 2010), é um movimento de soerguimento da ordem de 0.3 mm/ano, o valor de subida do NMM absoluta situa-se muito próximo e compatível com os valores publicados por Ramsdorf (2007) e aceites pela comunidade científica como valores prováveis.

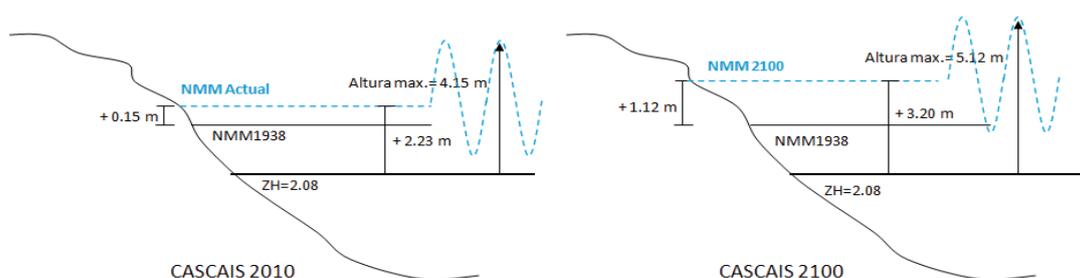
#### 3.1. Datum Altimétrico e sistema de altitudes

Admitindo que o NMM subirá 1.0 m até 2100 e que o *datum* altimétrico é revisto e ajustado ao novo NMM, todas as altitudes ortométricas do território nacional, e informação geográfica associada, têm de ser alteradas em função do novo *datum* altimétrico. Dado que o campo gravítico não sofrerá alterações significativas na sua forma devido à redistribuição das massas de água no oceano, as diferenças de altitude (desníveis) resultantes do nivelamento geométrico corrigidas da curvatura do campo gravítico permanecerão iguais, o que implica apenas e somente uma translação de todas as altitudes em função da translação do *datum* altimétrico de referência.

Nesta situação é evidente a actualização da informação cartográfica, nomeadamente, os limites administrativos de domínio hídrico, quer na costa marítima, através da linha máxima de PM em AV equinociais – LMPAVE, quer nas zonas estuarinas de forte influência da maré oceânica.

#### 3.2. Zero Hidrográfico e profundidades em águas restritas

Ao nível da Hidrografia e cartografia náutica são evidentes as necessidades de revisão do *datum* vertical, o ZH, já que a subida do NMM tem implicações directas na navegabilidade, com repercussões económicas nas administrações dos portos de forte actividade, como é o caso do porto de Lisboa.



**Figura 3** – Relação entre a maré e NMM, actual e projectado, com as referências do NMM1938 e do ZH Cascais.

A Fig. 3 mostra claramente o aumento de coluna de água devido ao efeito da subida do NMM, colocando o ZH 3.20 m abaixo do NMM em 2100. A não actualização da cartografia, nomeadamente, na zona do estuário do

Tejo, cuja batimetria é referida ao ZH, irá restringir a zona de navegabilidade face à profundidade real, em benefício de uma maior mas exagerada segurança de navegação.

### 3.3. Modelo de geóide e altitude ortométricas

Os sistemas de referência vertical baseados num modelo numérico de geóide estão associados a uma superfície de nível definida por um número geopotencial ( $C_p = W_p - W_0 = W_p - U_0$ ). Verificando-se a subida do NMM e consequente revisão de 1 metro do raio médio da Terra, e admitindo que não haverá alteração nos restantes parâmetros, excentricidade ( $e^2$ ), massa ( $M$ ) e velocidade angular da Terra ( $\omega$ ), teremos uma diferença  $\Delta C_p = -9.8 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  na nova superfície equipotencial de referência em relação a  $U_0$  do GRS80. Como consequência, um novo elipsóide de referência será ajustado à nova superfície do geóide, com  $a = 6378138.002 \text{ m}$  e  $b = 6356753.312 \text{ m}$  (mantendo-se a excentricidade), e todas as altitudes ortométricas serão reduzidas do valor equivalente à translação do modelo numérico de geóide. Em termos de altitudes elipsóidais, uma vez que as coordenadas tridimensionais dos vértices geodésicos não sofrerão alteração, serão reduzidas do valor de 1.004 m, correspondente ao respectivo acréscimo do raio de curvatura do meridiano ( $N$ ) para uma latitude média, desprezando a sua variação ( $< 0.5 \text{ mm}$ ) ao longo do território continental.

## 4. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Do que aqui foi exposto é evidente a necessidade de revisão dos *data* altimétricos que são definidos em função de um NMM. Se por um lado, na Geodesia teórica este pode ser tratado como um assunto facilmente ultrapassável e sem necessidade de revisão, já no campo da Geodesia aplicada e áreas afins, nomeadamente, na área da Hidrografia, quer por razões de segurança quer por razões de navegabilidade, e consequentemente razões económicas, as evidências são claras. Na cartografia terrestre, nomeadamente no Cadastro, por via dos limites administrativos de domínio hídrico, há também evidentes necessidades de revisão e actualização.

### Referências

- Antunes, C. (2007). Previsão de Marés dos Portos Principais de Portugal URL: [http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro\\_mares.html](http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html) (consultado em 2012.07.16)
- Antunes, C. and Taborda, R. (2009). Sea level at Cascais tide gauge: data, analysis and results. Journal of Coastal Research, SI 56: Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Coastal Symposium, p. 218-222, Lisbon, Portugal, ISSN 0749-0258.
- Antunes, C., Taborda, R. and Mendes, V. (2010). Analysis of the most recent data of Cascais Tide gauge. EGU General Assembly 2010, held 2-7 May, 2010 in Vienna, Austria, p.1253.
- Antunes, C. (2011). Variação actual do NMM em Cascais. Actas da VII Conferência de Cartografia e Geodesia, 5-6 Maio, Porto, Portugal (em publicação).
- Catalão, J. and Sevilla, M.J. (2009). Vertical datum unification on Iberia and Macaronesian islands using multi-sensor gravity data and GRACE geopotential model. Journal of Geodynamics, doi:10.1016/j.jog.2009.03.001.
- Heiskanen W.A. and Moritz, H. (1967). Physical Geodesy. W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- Ihde, J. and Augath, W. (2002). The European Vertical Reference System (EVRS), its relation to a World Height System and to ITRS. In: Proceedings of the IAG 2001 Scientific Assembly, Budapest, Hungary, IAG Symposium, vol. 125, Springer Berlin, p. 78.83.
- Ihde, J. and Sánchez, L. (2005). A unified global height reference system as a basis for IGGOS. Journal of Geodynamics, 40, p. 400-413.
- Moritz, H. (2000). Geodetic Reference System 1980. Journal of Geodesy, 74(1), p. 128-162.
- Rahmstorf, S. (2007). A semi-empirical approach to projecting future sea level rise. Science, p. 315-368.

### Contactos

Carlos ANTUNES; [cmantunes@fc.ul.pt](mailto:cmantunes@fc.ul.pt); IDL – Instituto Dom Luiz, Universidade de Lisboa; <http://idl.ul.pt>