

VARIAÇÃO ACTUAL DO NMM EM CASCAIS

Carlos Antunes¹

¹IDL – Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

(cmantunes@fc.ul.pt)

RESUMO

A monitorização diária e permanente do Nível do Mar através do acesso aos dados do marégrafo de Cascais, via FTP, possibilita a determinação da variação actual do NMM para a costa ocidental portuguesa. As variações recentes observadas mostram indícios da existência de um qualquer mecanismo de forçamento da subida do NMM, originando uma aceleração acentuada, quando comparada com as três últimas décadas. Um mecanismo que possivelmente poderá estar associado à flutuação do índice da NAO (*North Atlantic Oscillation*), negativo desde final de 2009.

Baseada numa série diária, com uma base de dez anos de dados, e em estimadores de média corrida, a taxa de variação decadal do NMM e respectiva aceleração são diariamente actualizadas, permitindo um acompanhamento permanente. Apesar de estas variáveis estarem dependentes da respectiva variabilidade sazonal e mesmo anual, a sua evolução anual pode ser utilizada na avaliação dos impactes sobre a erosão costeira e os fenómenos de galgamento da linha de costa, o que têm acontecido actualmente com alguma frequência, já que a subida do NMM, mesmo que pequena, amplifica a energia das ondas que atingem as praias.

Nesta comunicação serão apresentados valores actualizados da taxa de subida do NMM em Cascais, com valores muito acima dos anteriormente reportados, cuja diferença é justificada pela média do NMM de 2010 que se situou cerca de 7 cm acima da média dos últimos 10 anos. Um ano que se revelou abundante em eventos extremos, batendo vários recordes de valores máximos.

1. Revisão

Este trabalho aqui publicado vem no seguimento de outros trabalhos do autor já publicados sobre a análise da série temporal do marégrafo de Cascais, incluindo os dados do novo marégrafo digital de medição acústica, instalado no final de 2003. Em publicações anteriores foram expostos os métodos de análise aplicados à série temporal maregráfica de Cascais, iniciada em 1882. Em Antunes e Taborda (2009) e Antunes (2009) são apresentados valores da taxa de sNMM (*subida do Nível Médio do Mar*) para a série secular do último século e para a série de dados da primeira década do século XXI. A análise secular indica uma variabilidade na taxa de variação do NMM, contudo é evidente a estabilidade do valor dessa taxa nos últimos 23 anos do século XX, situada nos 2,1 mm/ano. Em termos médios, a série secular apresenta uma taxa média de 1,9 mm/ano para o período compreendido entre 1920 e 2000.

A fim de se poder avaliar a hipotética variação actual da própria taxa, i.e., a aceleração da variação do NMM, assumiu-se uma análise complementar de uma série reduzida de dados,

baseada apenas no período dos últimos 10 anos. A impossibilidade de estimar a actual taxa de sNMM por via do estimador linear de média móvel de longo período (10 anos) aplicado à série secular com valores de média mensal, justificou a introdução de um método complementar, i.e., a análise de uma série temporal reduzida de maior resolução temporal. A diferença entre os dois métodos de análise encontra-se, não só na resolução temporal dos dados, respectivamente, médias mensais versus médias diárias, mas também na redução de efeitos conhecidos de forçamento de curto período sobre os dados recentes, nomeadamente, efeitos atmosféricos. A série reduzida de dados dos últimos 10 anos é composta por dados de média diária da maré, corrigidos do EBI (*efeito barométrico inverso*), de forma a eliminar a variabilidade do NMM diário forçada pela variação da pressão atmosférica.

Esta metodologia de análise permite estimar a actual taxa de sNMM, embora com maior incerteza, e compará-la com a taxa das últimas décadas do século anterior, inferindo um valor de aceleração da variação do NMM. Desta forma, e após considerar-se a velocidade vertical do sítio de Cascais (componente tectónica e isostática) com base, nomeadamente, nas séries de dados GPS da Estação Permanente IGS de Cascais (Antunes *et al.*, 2010), é também possível obter uma taxa absoluta de sNMM, a qual se revelou, nas publicações anteriores, compatível com os valores de sNMM actuais advogados por diversas fontes (Church e White, 2006; Jevrejeva *et al.*, 2006; IPCC, 2007), um valor próximo dos 3 mm/ano.

Apesar da evidente variabilidade da estimativa do valor de taxa de sNMM de curto período, foi obtida nos trabalhos anteriores uma taxa de sNMM relativa de 2,5 mm/ano para o período de 2000-2009, o que comparada com a taxa da década anterior de 2,1 mm/ano, implica uma aceleração do NMM de 0,022 mm/ano².

2. Actualização da série decadal do Marégrafo de Cascais

A disponibilidade de acesso aos dados do marégrafo de Cascais através do sítio FTP público do IGP (*Instituto Geográfico Português*) possibilita a constante e permanente monitorização da variação diária do NMM. Os ficheiros horários de valores de elevação de maré, com registos a uma taxa de 3 minutos, são diariamente descarregados. Os valores são convertidos em altura de maré e analisados para cada dia do mês, onde é calculado a média diária do NMM e analisado o valor de sobre-elevação meteorológica. O NMM diário é acrescentado à série temporal de curto período, de 10 anos, e o valor da sobre-elevação meteorológica é acrescentado à respectiva série com a qual é feita a estatística de frequência deste tipo de eventos meteorológicos. Adicionalmente, e no final de cada mês, é calculada a média mensal respectiva, com a qual é actualizada a série temporal de longo período, a série secular.

Apesar de diariamente se obter um valor actualizado da taxa de sNMM, e devido à existência de uma variação sazonal de influência meteorológica (Antunes e Taborda, 2009), o valor da taxa actual de sNMM é apenas assumido após a conclusão de um ano de

dados sobre a série temporal. Isto é, os valores actualizados da sNMM são assumidos e publicados apenas com os períodos anuais completos.

Para se completar a série de 10 anos de dados, uma vez que o novo marégrafo iniciou actividade apenas em Novembro de 2003, foram usados os dados do antigo marégrafo de poço, cuja ligação altimétrica foi devidamente realizada pelos Serviços de Geodesia do IGP.

A fim de se certificar de uma boa referenciação altimétrica, e de forma a garantir uma correcta e adequada determinação do NMM, são realizados periodicamente trabalhos de nivelamento geométrico de alta precisão entre os dois marégrafos, a estação EP GPS e a marca de nivelamento NP de referência. O Quadro 1 apresenta os valores resultantes dessa operação de nivelamento geométrico da marca de referência do novo marégrafo, levado a cabo pelos Serviços de Geodesia do IGP, no qual se verifica uma boa estabilidade vertical.

Quadro 1 – Variação da altitude ortométrica da marca de nivelamento de referência do marégrafo acústico (ΔH – variação anual da altitude; $\Delta H/\Delta A$ – velocidade vertical média em relação a 2003 em mm/ano).

Anos	2003	2004	2006	2007	2008	2011
H (m)	3,5892	3,5867	3,5788	3,5774	3,5743	3,5688
ΔH (mm)	-	2,5	7,9	1,4	3,1	5,5
$\Delta H/\Delta A$	-	-	-3,47	-2,95	-2,98	-2,55

Os registos maregráficos efectuados pelo novo marégrafo são referidos à altitude ortométrica da marca de referência. Assim, sempre que é efectuado um novo nivelamento geométrico e calculada uma nova altitude da marca, o valor de referência, em memória no equipamento, com o qual é convertido o registo do nível do mar em elevação da maré, deve ser alterado. Esta é uma situação que nem sempre ocorreu nos registos do marégrafo desde 2003; a avaliar pelo valor que consta nos ficheiros de dados horários, esse valor não é modificado desde 2006, permanecendo até à actualidade com o valor de 3,579 m; e, no caso dos ficheiros mensais também produzidos, o valor de altitude da marca de referência corresponde ao valor de 2004.

Esta situação obriga à correcção dos valores da série temporal, aplicando uma correcção de variação linear aos dados diários da série de NMM, considerando as datas e os valores obtidos em cada nivelamento realizado. Deste modo o cálculo da taxa actual de sNMM resulta de uma série de dados de curto período do marégrafo corrigida da velocidade vertical da estrutura que suporta o equipamento.

De acordo com os valores de velocidade vertical do Quadro 1, a estrutura que suporta o equipamento do marégrafo mostra um decaimento médio de 2,55 mm/ano (de 2003 a

2011), um valor que tem vindo a evoluir, indicando que o assentamento da estrutura está progressivamente a estabilizar.

É espectável que, devido a esta correcção de referência vertical forçada, os valores do NMM estimados directamente dos dados brutos sejam ligeiramente atenuados. Feita esta actualização e correcção dos dados da série de 10 anos, a Figura 1 apresenta a série de dados corrigida.

Esta questão é de extrema importância, já que qualquer tentativa de determinação da variação do NMM a partir dos dados disponibilizados não corresponderá à real taxa de sNMM relativa.

A Figura 1 apresenta a série temporal de valores diários do NMM de Cascais, desde 2000 a 2010, relativo à referência do NMM de 1938. Na figura estão indicadas as tendências positivas dos valores extremos, máximos e mínimos através das linhas superior e inferior, atingidos em cada ano do período representado, facto adicional também indicativo da tendência de subida do NMM no período considerado.

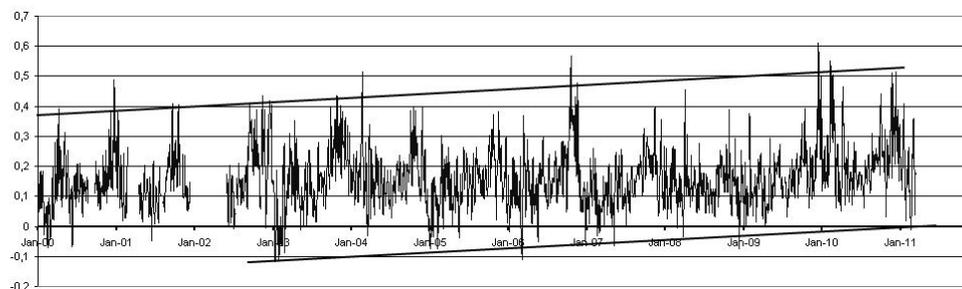


Figura 1 – Série diária do NMM (em metros) de Cascais, entre 2000 e 2010, relativo ao NM de 1938.

3. Nova abordagem de análise da série decadal

Dada a influência de factores oceânicos e atmosféricos de curto e médio período, a estimação da taxa de sNMM, por esta via da análise de curto período, revela-se muito sensível ao período de dados considerado e ao acréscimo sucessivo de dados anuais, desviando assim, a solução de estimação da verdadeira taxa de sNMM relativa à variação da componente eustática (aumento do volume dos oceanos, quer pelo aumento de massa da água, quer devido à expansão térmica). Estas flutuações, embora associadas a fenómenos físicos regionais, contaminam a solução de determinação da componente eustática da sNMM.

As variações sazonal e anual são, contudo, importantes do ponto de vista da análise de risco associado aos fenómenos de erosão e inundaçãocosteira, pois, quando acompanhadas por períodos de tempestades extremas, tal como o que se verificou em 2010, aumenta consideravelmente o risco de erosão e inundaçãocosteira.

Para a determinação da sNMM eustática, esses efeitos de variabilidade são considerados componentes periódicos que alteram a variância dos dados e aumentam a incerteza padrão da estimativa da taxa média de sNMM.

Do ponto de vista numérico, a estimação do valor de taxa média de sNMM deve, por um lado, corrigir os efeitos de variabilidade conhecidos e associados a fenómenos físicos, e por outro lado, usar métodos numéricos que atenuem a influência dos factores de variabilidade que sejam previsíveis ou com comportamento típico, i.e., numericamente modeláveis.

2.1 Correção do efeito da Pressão Atmosférica

Um efeito perfeitamente conhecido e estudado é o forçamento provocado pela variação da PA (*Pressão Atmosférica*) sobre a variação da altura de maré, designado de efeito barométrico inverso (EBI). O nível da superfície livre do oceano varia com a PA na proporção média de -1 cm/mbar. Este valor de correlação é variável de ano para ano, mas o valor médio observado corresponde ao valor teórico de -1 cm por milibar. Entre 2003 e 2010, os valores calculados a partir dos registos do sensor de PA do marégrafo de Cascais variaram entre -0,78 cm/mbar em 2008 e -1,27 cm/mbar em 2010, com um valor médio de $-1,03 \pm 0,19$ cm/mbar. Esta variabilidade do EBI pode estar relacionada de alguma forma com a variação do Índice da NAO (*North Atlantic Oscillation*).

A aplicação da correção do EBI sobre os valores de NMM diário reduz a variabilidade (desvio padrão) da série decadal original, representada na Figura 1. Esta é convertida numa série com um menor desvio padrão (Figura 2), possibilitando assim uma estimativa da taxa de sNMM com melhor precisão.

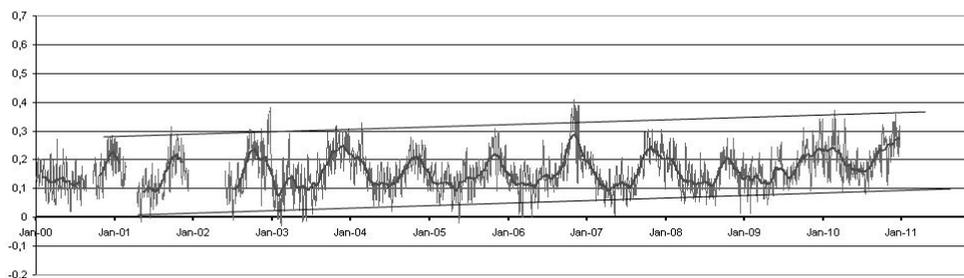


Figura 2 – Série diária do NMM de Cascais (em metros) corrigida do EBI, sobreposta com a média móvel de 60 dias.

Nos trabalhos anteriores o método utilizado para a determinação da estimativa de taxa de sNMM decadal baseava-se na regressão linear de uma média móvel de 60 dias corrida sobre a série do NMM corrigida do EBI (Figura 2). Essa abordagem apresenta, para este período em estudo, de 2000 a 2010, uma taxa da sNMM de 3,84 mm/ano, contra os 2,64

mm/ano entre 2000 e 2009, ao passo que para a série original não corrigida da Figura 1, a taxa actual é de 4,85 mm/ano, contra os 2,45 mm/ano em 2009 e os 1,42 mm/ano em 2008. Pela simples análise dos gráficos apresentados nas Figuras 1 e 2, é evidente a redução da variabilidade (incerteza padrão) dos dados com a aplicação da correcção do EBI, passando de $\pm 9,5$ cm da série original para os $\pm 6,8$ cm na série corrigida.

2.2 Remoção da variação sazonal

A nova abordagem acrescenta uma nova correcção de redução aplicada aos dados diários. Tal como atrás se referiu, a remoção de efeitos de variabilidade de uma causa física, conhecida ou desconhecida, de difícil ou impossível modelação analítica, pode através de modelação numérica atenuar a variabilidade periódica da série, isolando hipoteticamente o efeito eustático da sNMM e viabilizando uma estimativa mais precisa e exacta.

Tomando os vários conjuntos de dados anuais, de 2004 a 2009, e obtendo para cada ano a curva da componente de variação sazonal através da média móvel de 60 dias sobre a série corrigida do EBI, calculou-se a curva média dos 5 anos da variação sazonal, sobre a qual se obteve uma nova suavização com uma média corrida. Esta curva resultante, representa a variação sazonal média e está representada na Figura 3.

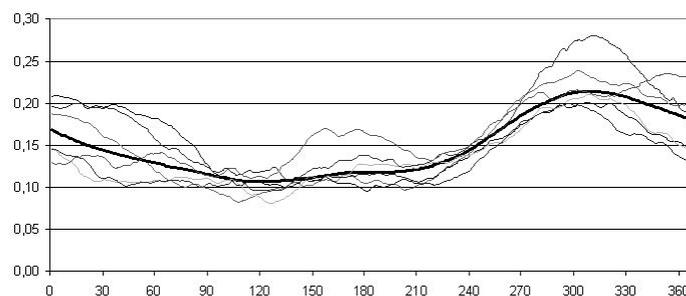


Figura 3 – Variação sazonal (em metros) de 2004 a 2009 e variação média (negrito).

A variação sazonal média, centrada em zero, é então removida da série de dados reduzida do EBI, obtendo-se uma nova série de dados (Figura 4), independente dos efeitos de variação da PA e da variação sazonal.

2.3 Resultados e estatística final

A determinação da taxa de sNMM a partir desta nova série é então realizada de acordo com o mesmo procedimento anteriormente utilizado, através de uma regressão linear precedida de uma média móvel de 60 dias. A Figura 4 mostra a nova série temporal reduzida, sobre a qual se projectou a curva da média móvel e respectiva regressão linear.

Esta nova série, reduzida da variação sazonal média centrada, mostra uma redução considerável da variabilidade do NMM diário, em relação à série original de dados. Este factor tornará a estimativa da taxa de sNMM muito menos sensível (menos variável) ao período de dados, o que não se verificava com a série de dados original.

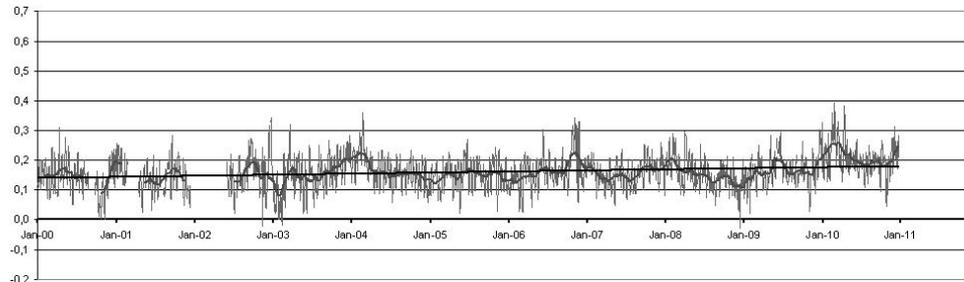


Figura 4 – Série de dados reduzida da variação sazonal, com sobreposição da média móvel de 60 e respectiva recta de regressão linear.

O Quadro 2 mostra na sua primeira linha a evolução da variabilidade, através do desvio padrão de cada série de dados. A curva final da média móvel da série reduzida (MM60_red), representativa da variação decadal do NMM a menos dos efeitos atmosféricos e sazonais, apresenta um desvio padrão de apenas 3,1 cm, face aos 9,5 cm da série original. Nas duas últimas linhas do Quadro 1 apresentam-se as taxas de sNMM e respectivas incertezas padrão das diferentes séries, obtidas por regressão linear sobre cada série de dados para o período de 2000 a 2010.

Quadro 2 – Variabilidade (DP em cm) das séries de dados, Taxa de sNMM (mm/ano) e respectivo desvio padrão (mm).

Séries	original	corrigida	MM60_cor	reduzida	MM60_red
Desvio Padrão	9,5	6,8	4,8	5,6	3,1
Taxa sNMM	4,85	4,58	3,84	3,85	3,57
DP_sNMM	0,54	0,38	0,26	0,31	0,16

Os resultados apresentados no Quadro 1 são evidentes na demonstração da melhoria de precisão da estimativa da taxa de sNMM, ao longo do processo seguido pela abordagem adoptada, culminando num valor de maior precisão face às estimativas anteriores. Conclui-se assim que a estimativa mais precisa da taxa actual da sNMM em Cascais é de $3,57 \pm 0,16$ mm/ano.

Considerando este valor de taxa actual de sNMM, de 3,57 mm/ano, e o valor assumido para a última década do século XX, de 2,1 mm/ano, chega-se ao valor de aceleração do NMM de 0,074 mm/ano², com uma incerteza de 0,009 mm/ano². Uma grandeza com um erro relativo de apenas 12,8%, o que representa uma melhoria considerável face às estimativas anteriormente apresentadas (Antunes, 2009; Antunes *et al*, 2010).

4. Correlação da NAO com a variabilidade do NMM

Para melhor compreender as flutuações e variações da série secular de dados do marégrafo de Cascais usada na determinação da taxa de sNMM, empreendeu-se um estudo de análise da correlação dos dados do marégrafo com a série de dados do índice da *North Atlantic Oscillation*.

O índice da NAO é um indicador da oscilação do sistema bipolar formado pelos centros de baixa e alta pressão da região do atlântico norte, respectivamente, o ciclone da Islândia e o anticiclone dos Açores que controla a intensidade e direcção dos ventos e tempestades do atlântico norte vindos de Oeste. Estes dois centros de pressão oscilam na direcção Este-Oeste em períodos quase regulares, com variação do gradiente de pressão, influenciando o regime do clima na região do Atlântico Norte. Em fases de índice positivo da NAO, aumenta a intensidade do centro subtropical de altas pressões e diminui, mais do que o normal, o centro de baixas pressões da Islândia. O resultado é um inverno na Europa mais ameno e chuvoso, e um inverno seco e frio na zona norte do Canadá e Gronelândia. Em fases de índice negativo, verifica-se um gradiente de pressão mais baixo entre os dois centros, altas pressões mais baixas e um deslocamento para Este do centro subtropical dos Açores e, baixas pressões mais altas e o deslocamento para Oeste do centro da Islândia. O resultado é invernos mais húmidos na zona mediterrânica e mais frios no norte da Europa; do lado da costa Este americana, verificam-se surtos de ar frio e condições de neve, enquanto que na Gronelândia observam-se invernos mais temperados.

O primeiro gráfico da Figura 5 mostra a série da média móvel de 3 meses do índice da NAO, desde 1990, onde se verifica o prolongado período do índice negativo que se verificou desde o final de 2009 até ao início de 2011.

Para se comparar e analisar a correlação deste fenómeno com a variação do NMM em Cascais foi calculada uma série residual a partir da série secular (Antunes e Taborda, 2009; Antunes, 2009; Antunes *et al*, 2010). Essa série é obtida pela diferença dos valores de média mensal com a média móvel de 10 anos, que serviu para avaliar a tendência secular do NMM. A esses valores foi aplicada, à semelhança da série do índice da NAO, uma média móvel de 3 meses. Esta série está representada no segundo gráfico da Figura 5. A razão pela qual a série é calculada apenas até 2006 é justificada pelo facto da curva de tendência da série secular, baseada numa média móvel centrada de 10 anos, terminar 5 anos antes dos últimos dados incrementados na série, ou seja 2006. Estas duas séries foram

calculadas a partir de 1960, ano de início da série do índice da NAO, apesar de neste trabalho apenas se apresentar o gráfico das duas últimas décadas.

Para uma melhor visualização e percepção, os gráficos são apresentados em separado. É perceptível a existência de alguns períodos onde as duas séries apresentam comportamentos idênticos, denotando a existência de alguma correlação, mesmo que pequena.

Calculada a correlação dos dados das duas séries, apresentada graficamente na Figura 6, chega-se à conclusão de que existe, embora muito pequena, uma ligeira correlação da NAO com a flutuação média do NMM em Cascais (coeficiente de correlação, $r = 0,32$).

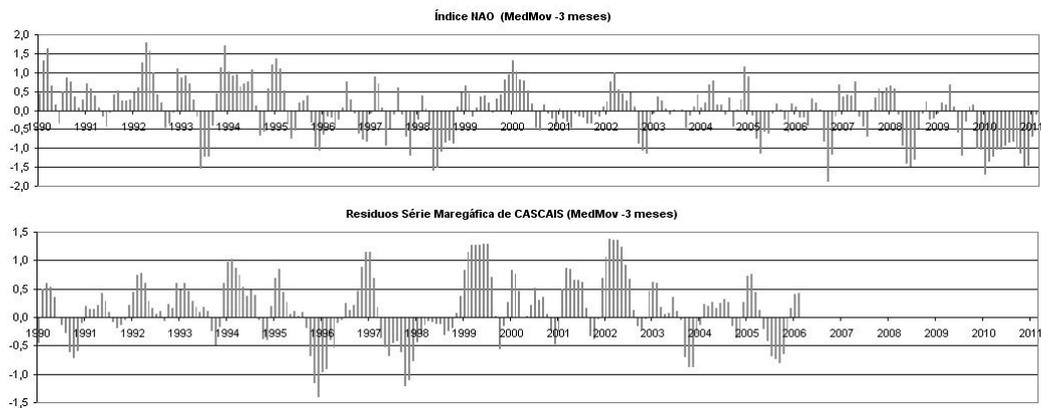


Figura 5 – Série do índice da NAO (média móvel de 3 meses) *versus* série residual do NMM de Cascais.

Essa pequena correlação pode explicar, no entender do autor, o elevado valor do NMM observado em 2010, de 22,9 cm, quando comparado com a média dos últimos 10 anos, de 16,0 cm. O longo período de índice negativo da NAO, desde Novembro de 2009 a Janeiro de 2011, terá causado a forte intensidade dos dois invernos e das tempestades verificadas nesse período, o que terá fortemente contribuído para o respectivo elevado valor do NMM, contribuindo assim, para um aumento significativo da taxa de sNMM em relação aos anos anteriores.

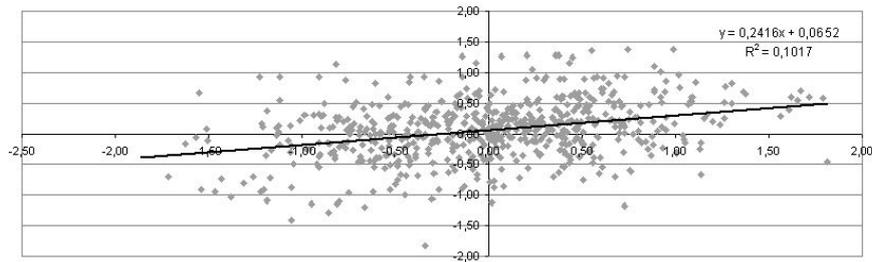


Figura 6 – Gráfico de correlação entre o índice da NAO e os resíduos da série secular do NMM de Cascais.

Admitindo que a NAO tenderá a regularizar a sua periodicidade e compensar o extremo verificado em 2010, é admissível que a taxa de sNMM estabilize nos anos seguintes, ou mesmo, que verifique uma ligeira contracção face ao valor aqui apresentado de $3,57 \pm 0,16$ mm/ano.

5. Conclusões finais

Os mais recentes resultados que se apresentam neste trabalho mostram uma consistente e sólida conclusão sobre a actual taxa de sNMM. O NMM observado em Cascais mostra na recente década de 2000 a 2010 uma taxa de subida, de 3,57 mm/ano ($\pm 0,16$), muito superior à taxa calculada para as duas últimas décadas do último século, de 2,1 mm/ano ($\pm 0,1$). Estes valores implicam, de igual forma, a existência de uma aceleração do NMM observado em Cascais, determinada agora com muito maior precisão do que a que foi apresentada em trabalhos anteriores.

Os resultados mostram uma clara concordância com o que é esperado, em termos de sNMM para o presente e futuro, face às alterações climáticas que estão a ocorrer no nosso planeta. Do ponto de vista do autor, mostra-se uma vez mais o que tem vindo a defender, que os dados do marégrafo de Cascais são consistentes e revelam-se de extrema importância no estudo da subida global do NMM.

A correlação obtida entre a flutuação do NMM em Cascais e o índice da NAO, embora fraca, é relativamente significativa porque explica as fortes flutuações do NMM que ocorrem nos registos do marégrafo.

Em conclusão, mostra-se neste trabalho o que em anteriores publicações foi defendido, esta metodologia tornou-se mais fiável e robusta à medida que foram sendo acrescentados dados para concluir a série decadal.

Referências Bibliográficas

Antunes, C., Taborda R., Mendes V. (2010). “Analysis of the most recent data of Cascais Tide Gauge”. Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-1253, EGU General Assembly.

Antunes, C. (2009). “Evolução do nível médio do mar em cascais, análise dos dados do novo marégrafo”. VI Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, 7-8 de Maio, Caldas da Rainha, Portugal.

Antunes, C., 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, 218-222. Lisbon, Portugal.

Church, J.A., White, N.J. (2006). “A 20th century acceleration in global sea-level rise”. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, Issue 1, L10602, 1-4.

Jevrejeva, S., Grinsted, A., Moore, J.C., Holgate, S. (2006). “Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records”. *Journal of Geophysical Research*, 111, C09012.

IPCC, 2007. “Climate Change (2007). “The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment”, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.