



NÍVEIS MÁXIMOS DO ESPRAIAMENTO NO LITORAL DA RIA FORMOSA

Francisco Sancho, Filipa S.B.F. Oliveira, Paula Freire

*Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras
Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa
fsancho@lnec.pt, foliveira@lnec.pt, pfreire@lnec.pt*

RESUMO

No presente trabalho, apresentam-se estimativas dos níveis máximos do espraiamento na orla litoral da Ria Formosa. São determinadas cotas máximas de espraiamento associadas a vários períodos de retorno (5, 10, 25 e 50 anos). O cálculo inclui a determinação de níveis de água determinísticos (associados à maré), a análise estatística de sobrelevações observadas (extraídas de dados de marégrafos na barra de Faro-Olhão e em Huelva) e a estimativa dos níveis do espraiamento propriamente dito, determinados em função da agitação marítima. Aplicaram-se e avaliaram-se 10 formulações para estimar o espraiamento ao local de estudo e concluiu-se que as formulações para praias dissipativas fornecem resultados irrealistas, enquanto das restantes resultam estimativas realistas e uniformes entre si. Os resultados evidenciam maiores níveis máximos do espraiamento (em cerca de 2m) no sector orientado a SW (península do Ancão e Ilha da Barreta) do que naquele orientado a SE (desde a ilha da Culatra à península de Cacela), em consequência não só dos maiores valores dos extremos da agitação marítima nesse sector, mas também dos maiores declives médios da face da praia.

1 – INTRODUÇÃO

O sistema de ilhas barreira da Ria Formosa constitui uma unidade fisiográfica de forma, aproximadamente, triangular que inclui um cordão arenoso que se estende segundo duas direcções principais: NW-SE e SW-NE, com extensões de cerca de 18 e 40 km, respectivamente (Figura 1). Este sistema está integrado no Parque Natural da Ria Formosa que visa garantir a manutenção e a valorização das características das paisagens naturais e a biodiversidade da respectiva área de intervenção.

No âmbito do programa POLIS Litoral Ria Formosa, o LNEC efectuou um estudo (Freire *et al.*, 2011; Bruneau *et al.*, 2011; Portela *et al.*, 2011 e Clímaco *et al.*, 2011) tendo como principais objectivos genéricos: i) a valorização hidrodinâmica da zona lagunar, através do melhoramento geral da circulação hídrica na laguna, ii) a identificação das zonas críticas à erosão, na orla litoral do sistema ilhas barreira, e iii) a proposta de medidas de mitigação assentes no aproveitamento e reposição de sedimentos resultantes de dragagens de canais e barras. Pretende-se, com o segundo objectivo, identificar as zonas críticas, naturais ou artificiais, do sistema de ilhas barreira que ameacem a continuidade da estrutura dunar arenosa.

Em sentido lato, as zonas críticas podem ser encaradas como zonas de risco aos fenómenos marítimos (associados a galgamentos e inundações costeiras), evitando-se contudo neste trabalho essa designação dado que, em *stricto sensu*, o risco resulta do produto da perigosidade pela consequência do mesmo (in Julião *et al.*, 2009). Por seu turno, a perigosidade em determinada zona, que corresponde à probabilidade de ocorrência de determinada acção (potencialmente destruidora) com determinada severidade, depende da susceptibilidade da mesma, cuja avaliação consiste na identificação e classificação das áreas com propensão para serem afectadas por determinado perigo (Julião *et al.*, 2009). Estes autores, com vista a produção de cartografia municipal de risco, propõem ainda orientações para a avaliação da susceptibilidade a galgamentos e inundações costeiras, identificando as

variáveis mais relevantes: nível médio do mar, nível da maré astronómica, sobrelevação meteorológica, agitação marítima, topografia e batimetria.

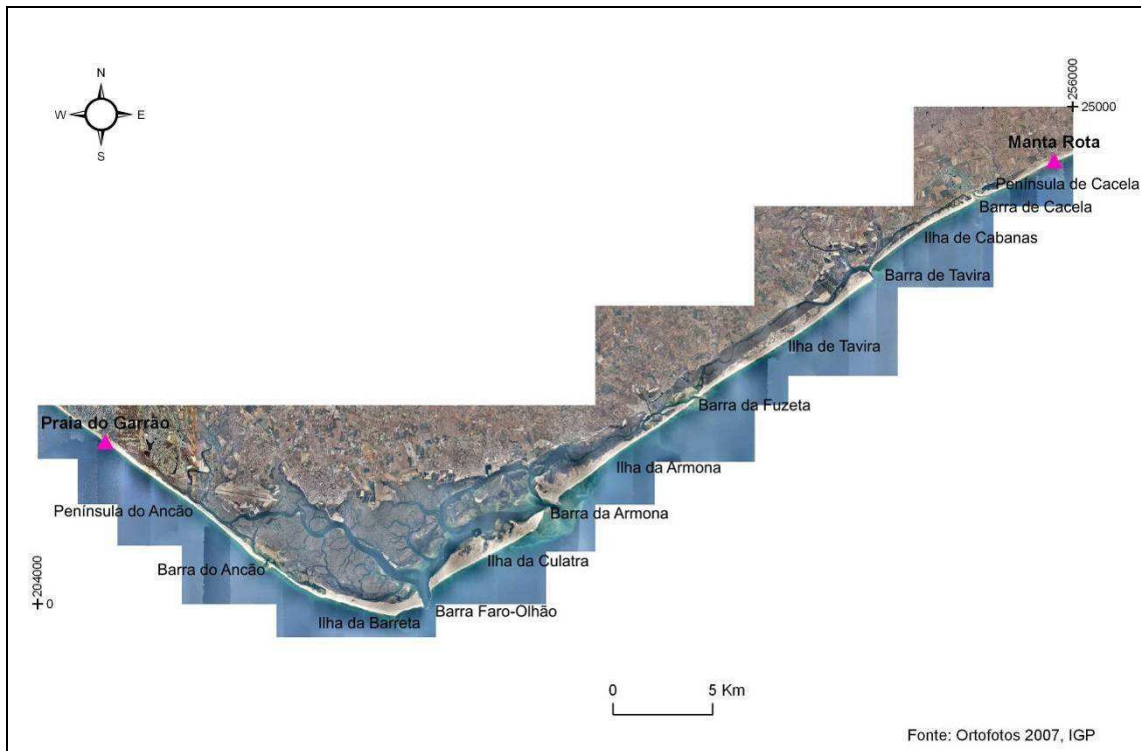


Figura 1 – O sistema ilhas barreira da Ria Formosa.

Assim, com vista à caracterização das zonas críticas aos agentes marinhos na orla litoral do sistema de ilhas barreira, Freire *et al.* (2011) calcularam um índice de susceptibilidade ao galgamento, ruptura do cordão dunar e recuo da linha de costa, adaptando e ampliando para a orla litoral da Ria Formosa o conceito de susceptibilidade de inundações e de galgamentos costeiros definido em Julião *et al.* (2009). A metodologia adoptada por aqueles autores considera as variáveis identificadas por estes, além das mais relevantes também identificadas nos trabalhos de Vila-Concejo *et al.* (2006), Ferreira *et al.* (2006) e Garcia *et al.* (2010). O referido índice de susceptibilidade inclui uma parcela associada à susceptibilidade ao galgamento do sistema dunar das ilhas barreira, determinado pela razão entre a cota da duna (medida no terreno) e as cotas estimadas do espraioamento, de acordo com Sallenger (2000), para diferentes probabilidades de ocorrência de eventos extremos.

O galgamento de cordões dunares pela agitação marítima ocorre frequentemente através da conjugação de três factores: elevado nível de preia-mar; elevada sobrelevação (normalmente associada a vento e depressão atmosférica fortes); e forte agitação marítima. O nível máximo do espraioamento resultante é assim determinado pela conjugação destes três fenómenos, parcialmente independentes.

No presente trabalho, apresentam-se as estimativas dos níveis de espraioamento, que permitiram determinar o índice de susceptibilidade ao galgamento proposto em Freire *et al.* (2011). São determinadas estimativas das cotas máximas de espraioamento associadas a vários períodos de retorno (5, 10, 25 e 50 anos). O cálculo inclui a determinação de níveis de água determinísticos (associados à maré), a análise estatística de sobrelevações observadas (extraídas de dados de marégrafos na barra de Faro-Olhão e em Huelva) e a estimativa dos níveis do espraioamento propriamente dito, determinados em função da agitação marítima.

2 – METODOLOGIA

2.1 – FORMULAÇÃO PARA O NÍVEL MÁXIMO DE INUNDAÇÃO

Num sistema praia-duna litoral, a cota máxima de inundação ou do espraioamento (que poderá dar origem ou não ao galgamento da duna) pode ser determinada através da soma dos níveis de água associados ao efeito da agitação marítima (que inclui o espraioamento propriamente dito e a sobrelevação associada às ondas – *wave setup*) com o nível do mar sem o efeito da ondulação. Efectivamente, nem sempre é possível distinguir ou quantificar de forma independente estas duas parcelas, havendo alguma dependência entre as mesmas.

Se não há dúvidas que a sobrelevação astronómica, i.e., a maré, é independente da agitação marítima, o mesmo já não se pode afirmar em relação à sobrelevação (ou rebaixamento) meteorológica (*storm surge*) do nível de água. Esta componente está associada a ventos, variações do campo de pressão atmosférica e cheias (mais notadas em rios e estuários). No entanto, o mesmo vento e campo de baixas pressões (que ocorrem durante temporais marítimos), que podem causar sobrelevações meteorológicas intensas, podem também provocar forte vaga ou ondulação, traduzidos por agitação marítima com elevadas alturas de onda. Nestes casos, haverá assim dependência entre a agitação marítima e a sobrelevação meteorológica.

Por outro lado, é sabido que a sobrelevação meteorológica é inversamente proporcional à profundidade em ambientes de pequenas profundidades. Assim, teoricamente, ocorrerão sobrelevações meteorológicas em lagunas, rias ou orlas costeiras diferentes consoante se esteja em preia-mar ou baixa-mar. Esta dependência é, contudo, fraca e geralmente desprezada.

Pelas considerações expostas, considera-se no presente trabalho que o nível de maré é independente das restantes variáveis. Quanto à sobrelevação meteorológica, assume-se dependente da agitação marítima, pelo que a sua contribuição para a cota de inundação será determinada para o mesmo período de retorno que se considera para aquela.

A metodologia a seguir detalhada consiste, essencialmente, na determinação dos níveis máximos do espraioamento, N_x , com determinada probabilidade de ocorrência, associada ao período de retorno x :

$$N_x = N_{m,x} + R_x, \quad (1)$$

em que $N_{m,x}$ e R_x representam, respectivamente, o nível médio do mar e o espraioamento associados ao mesmo período de retorno (Figura 2).

Consideram-se neste trabalho os períodos de retorno de 5, 10, 25 e 50 anos, ligados a horizontes temporais relevantes para planos de gestão e intervenção na orla costeira.

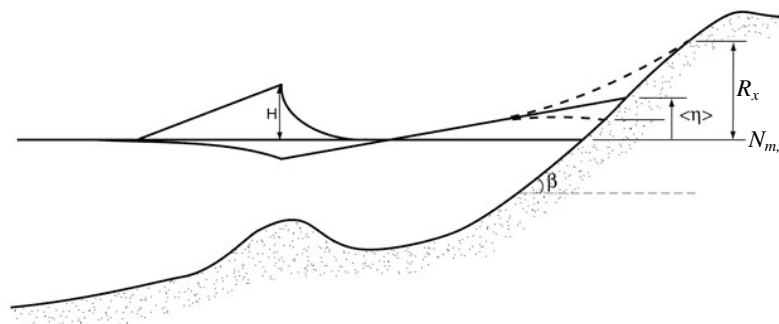


Figura 2 – Definição de variáveis para o cálculo do nível máximo do espraioamento.

2.2 – NÍVEL DO MAR

O nível do mar, N_m , é determinado através da soma do nível de maré com a sobrelevação meteorológica.

Atendendo que um temporal (na costa Portuguesa), que origine sobrelevações acima da média, terá uma duração predominantemente superior a doze horas (Costa *et al.*, 2001), portanto, decorrendo pelo menos durante uma preia-mar, será o nível de preia-mar aquele que importa considerar na determinação de cotas máximas do espraiamento. Acresce também que ocorrem, mensalmente, duas marés de sizígia (marés vivas) pelo que é elevada a probabilidade de ocorrência de uma tempestade marítima durante uma maré viva.

Assim, para o objectivo deste trabalho, optou-se por considerar como nível de maré (astronómica) o valor médio anual da altura de água de duas preia-mares sucessivas, que ocorrem quinzenalmente quando a amplitude de maré é máxima (marés vivas), PMAV. O valor de PMAV=+3.37 m (ZH) para o local de estudo (Ria Formosa) é extraído de Seabra de Melo (1989), resultante de conjunto de observações e estimativas para a Barra de Faro-Olhão, entre 1980 e 1990. O valor utilizado é referido ao Zero Hidrográfico (ZH).

Refira-se ainda que o plano do Zero Hidrográfico foi fixado em relação ao nível médio adoptado há várias décadas, 2.00 m abaixo desse nível médio do mar (NMM). Medições efectuadas durante 2 anos completos, de 1980 a 1982, permitiram registar um nível médio igual a +2.11 m (ZH) (IH, 1993; Seabra de Melo, 1989), corrigindo portanto o nível anteriormente fixado.

Por outro lado, é geralmente também aceite que se tem verificado nas últimas 3 décadas, em Portugal continental, uma subida relativa do nível médio do mar (e.g., Dias e Taborda, 1992; Antunes e Taborda, 2009). Admitindo a taxa média para a região da Ria Formosa de 1.5 mm/ano (igual ao referenciado para Lagos por Dias e Taborda, 1992), estima-se a partir do nível registado em 1980 o actual nível médio de +2.15 m (ZH), implicando que o valor actual do nível PMAV seja igual a +3.52 m (ZH).

Quanto à sobrelevação meteorológica, a mesma é determinada a partir dos registos maregráficos, subtraindo ao nível total o nível previsto de maré. Gama *et al.* (1994, 1997) apresentaram resultados da sobrelevação estimada a partir de registos maregráficos de 2 anos (Junho de 1986 a Maio de 1988) para vários portos de Portugal continental, sendo o mais perto da zona de estudo o marégrafo de Lagos. Para este local a sobrelevação máxima foi de 75 cm.

Não se conhecem outros estudos em Portugal continental sobre os valores da sobrelevação meteorológica para a região do Algarve. No entanto, dada a proximidade relativa (~90 km) da estação maregráfica de Huelva (em Espanha) à Ria Formosa, e dado que as características da plataforma costeira são similares nestas regiões, consideraram-se também dados de maré obtidos para o marégrafo n.º 3326 da instituição *Puertos del Estado* (http://www.puertos.es/es/oceanografia_y_meteorologia/banco_de_datos/nivel_del_mar.html). Para o conjunto de 7 anos de dados (de 1997 a 2003), obteve-se um residuo (ou sobrelevação) máximo de 87 cm. Para os dados do marégrafo n.º 3329 (que entretanto substituiu o n.º 3326), entre Janeiro de 2008 e Dezembro de 2009, obtiveram-se valores máximos da sobrelevação entre 64 e 72 cm.

Verifica-se assim que, com recurso a 2 anos de dados, embora distintos para as duas localidades, se observaram valores máximos das sobrelevações da mesma ordem de grandeza, de cerca de 70 cm, para os portos de Lagos e de Huelva. Logo, e dada alguma homogeneidade das condições meteorológicas que induzem este fenómeno extremo ao longo do litoral algarvio, admite-se que as sobrelevações para a Ria Formosa possam ser bem representadas pelas estimadas quer em Lagos, quer em Huelva. Assim, Teixeira (2010) efectuou uma análise comparativa entre as sobrelevações em Huelva e na barra de Faro-Olhão, tendo concluído da sua elevada correlação ($r=0.91$) e sugerindo a seguinte relação:

$$S_{Faro} = 0.72 S_{Huelva} + 24.13 \text{ (cm)}, \quad (2)$$

em que S_{Faro} é a sobrelevação em Faro-Olhão (incluindo 15 cm da subida secular do NMM) e S_{Huelva} é a sobrelevação em Huelva. Subtraindo a subida secular do NMM, obtém-se a relação:

$$S_{Faro} = 0.72 S_{Huelva} + 9.13 \text{ (cm)}, \quad (3)$$

que permite estimar as sobrelevações meteorológicas em Faro a partir das observadas (ou estimadas) em Huelva. Estas últimas são obtidas pelo ajuste de uma distribuição de Weibull aos resíduos registados em Huelva (marégrafo n.º 3326), no período 1997 a 2003 (publicado em *Puertos del Estado*, 2006).

2.3 – ESPRAIAMENTO

Várias fórmulas têm sido propostas na literatura para o cálculo do espraçamento, todas elas de carácter empírico, dependentes na maioria dos casos da altura de onda significativa e comprimento de onda ao largo e do declive da face da praia. Sendo o espraçamento, tal como a altura de onda, uma variável estatística, para efeitos de verificação do galgamento do cordão dunar é comum utilizar-se a estimativa do espraçamento com probabilidade de não ocorrência de 2%, i.e., correspondente ao nível que é excedido somente por 2% da série de ondas associada a determinada altura significativa de onda, H_s .

Quadro 1 – Formulações do espraçamento utilizadas neste trabalho.

Autores	R
Hunt (1959), Battjes (1971)	$R = m(H_s L_0)^{0.5}$
Holman e Sallenger (1985)	$R = H_s (0.83 \xi_0 + 0.2)$
Holman (1986)	$R = 0.55 H_s \xi_0$
Nielsen e Hanslow (1991)	$R = L_{Ru} (-\ln(0.02))^{0.5}$ $L_{Ru} = \begin{cases} 0.6 m (H_s L_0)^{0.5} & \text{se } m \geq 0.10 \\ 0.05 (H_s L_0)^{0.5} & \text{se } m < 0.10 \end{cases}$
Raubenheimer e Guza (1996)	$R = \frac{1}{\pi} H_s \xi_0^2$
Masselink e Hughes (2003)	$R = 0.36 m (g H_s)^{0.5} T_p$
Stockdon <i>et al.</i> (2006)	$R_A = 1.1 \left\{ 0.35 m (H_s L_0)^{0.5} + 0.5 [H_s L_0 (0.563 m^2 + 0.004)]^{0.5} \right\}$ $R_B = 0.043 \sqrt{H_s L_0}$
Teixeira (2009)	$R_A = 0.8 + 0.62 H_s$ $R_B = 1.08 H_s \xi_0$

Neste trabalho aplicaram-se e avaliaram-se 10 formulações para a estimativa dos máximos do espraçamento (Quadro 1), para as diversas ilhas (Barreta, Culatra, Armona, Tavira e Cabanas) e penínsulas (Ancão, Cacela) da Ria Formosa. Destaque-se, no Quadro 1, que nas duas últimas referências foram propostas 2 fórmulas distintas, designadas por R_A e R_B .

Nestas fórmulas, ξ_0 representa o número de Iribarren, $\xi_0 = m/\sqrt{H_s/L_0}$, sendo m o declive da praia, H_s a altura significativa de onda e L_0 o comprimento de onda ao largo (calculado a partir do período de pico, T_p).

Para a determinação do espraçamento associado aos diversos períodos de retorno, importa estabelecer os valores extremos da agitação marítima no sector costeiro da Ria Formosa. Para o efeito atendeu-se aos estudos de Pires (1998) e Filipe *et al.* (1999) que estimam valores extremos de H_s diferentes entre si, para os mesmos períodos de retorno. Uma explicação mais detalhada da comparação e limitações destes resultados é apresentada por Freire *et al.* (2011), conjuntamente com a análise dos elementos apresentados por Costa *et al.* (2001) e da série de 10 anos de dados da bóia de Faro, entre 1998 e 2007 (in Capitão *et al.*, 2009).

Consequentemente, assumiu-se neste trabalho os valores de H_s e T_p expressos no Quadro 3, que resultam da análise subjectiva da série de dados de 1998 a 2007, dos resultados de Filipe *et al.* (1999), Pires (1998) e Costa *et al.* (2001). Ressalve-se que existem incertezas associadas àquelas estimativas, das quais dependem os valores do espraçamento máximo, recomendando-se a execução de um novo estudo do regime de extremos na costa sul com base em todos os dados da bóia-ondógrafo de Faro (eventualmente estendido a dados provenientes de outras fontes: *hindcast* e de outros ondógrafos).

Refira-se ainda que a quase totalidade das formulações no Quadro 1 faz intervir o declive da praia, quer directamente, quer através do número de Iribarren. Dado que o declive de uma praia varia no espaço (transversal e longitudinalmente) e no tempo (verão, inverno, tempestade, etc.), não existirá para cada local um único valor para este declive. Por outro lado, verifica-se ainda que a maioria das formulações é sensível a este parâmetro. Assim, neste trabalho, e tendo em consideração que se pretende calcular o espraçamento que resulta da interacção da onda sobre a face da praia (e neste contexto, em situação de preia-mar), identifica-se m como o declive médio da face da praia. Os valores utilizados neste trabalho foram retirados de Teixeira (2009, p. 48), tendo sido concordantes com os de outras publicações.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 – NÍVEL DO MAR

De acordo com a metodologia acima descrita (secção 2.2), estimaram-se as sobrelevações indicadas na segunda e terceira colunas do Quadro 2 (e Figura 3), para Huelva e Faro-Olhão, respectivamente. O nível máximo, sem o efeito da agitação marítima, em Faro-Olhão resulta da soma do nível PMAV=+3.52 m (ZH) com a sobrelevação calculada para determinado período de retorno.

Quadro 2 – Sobrelevações estimadas em Huelva e na barra de Faro-Olhão e nível máximo nesta barra.

Período de retorno (anos)	Sobrelevação Huelva (cm)	Sobrelevação Faro-Olhão (cm)	Nível máximo Faro-Olhão (m)
5	68	58	4.10
10	81	67	4.19
25	98	80	4.32
50	113	90	4.42

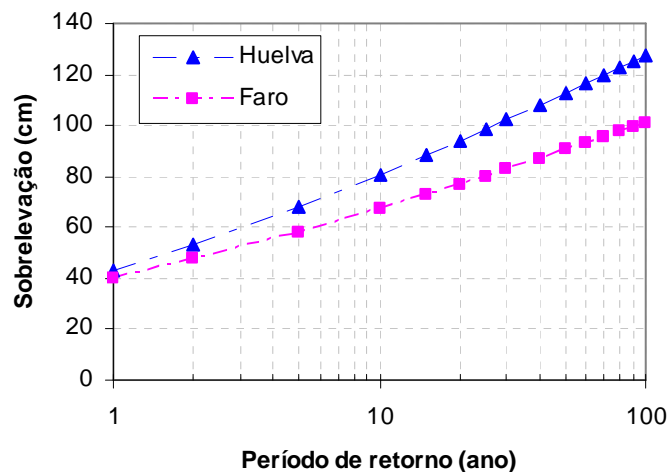


Figura 3 – Sobrelevações máximas estimadas em Huelva (distribuição de Weibull) e Faro (eq. 3).

3.2 – ESPRAIAMENTO E NÍVEL MÁXIMO DE INUNDAÇÃO

Apresenta-se no Quadro 3 os valores do espraioamento e níveis máximos de inundação obtidos para o conjunto de ilhas barreira da Ria Formosa.

Note-se que, para a península do Ancão e ilha da Barreta, utilizaram-se valores de H_s mais elevados, correspondentes a agitação extrema com rumo de SW, e para os restantes locais valores menores, correspondentes ao rumo de SE. Esta opção resulta do facto das ilhas a oriente do Cabo de Santa Maria se encontrarem mais abrigadas da agitação de SW enquanto as ilhas a ocidente se encontram mais abrigadas da agitação de SE (e.g., Andrade *et al.*, 1998). Assim, em cada sector calcula-se o espraioamento somente para a agitação que incide quase perpendicularmente, e não se consideram eventuais efeitos de amplificação locais devido à refração por esta ser pouco relevante (Andrade *et al.*, 1998).

Relativamente aos valores do espraioamento, R_x , nota-se alguma uniformidade dos resultados obtidos com as diferentes fórmulas, excepto para aqueles assinalados a cinzento, correspondentes às expressões de Holman (1986), Stockdon *et al.* (2006) para praias dissipativas (B), e a de Raubenheimer e Guza (1996). Todas estas três tinham sido obtidas para praias do tipo dissipativo, e originaram para as praias das ilhas barreira espraioamentos muito inferiores aos das restantes fórmulas e aos valores conhecidos no terreno, tendo por isso sido rejeitadas.

Relativamente aos resultados das sete restantes fórmulas, verifica-se que a expressão A de Teixeira (2009) conduz consistentemente aos valores mais elevados de R_x para o sector oriental (agitação de SE). Sendo a única formulação que considera apenas o efeito da altura de onda, negligenciando quer o declive da face da praia quer o período da onda, é aquela que estima valores mais próximos do espraioamento para ambos os sectores, ocidental e oriental. Por outro lado, para o sector oriental, a formulação de Masselink e Hughes (2003) origina também os menores valores de R_x . Assim, apesar da relativa uniformidade geral dos valores resultantes daquelas 7 expressões, optou-se por calcular o valor médio do espraioamento indicado na penúltima coluna através da média destes 7 resultados, excluindo o menor (a verde) e o maior (a vermelho) valor, em cada caso.

Na última coluna do Quadro 3 apresentam-se os valores dos níveis máximos ou cotas máximas (incluindo o espraioado) atingidas pela água na frente marítima, que resultam da soma de R_x com os níveis N_m indicados no Quadro 2. Estes resultados devem ser interpretados como valores médios para as penínsulas/ilhas referidas, dado que não tiveram em consideração as variações hidrodinâmicas e morfológicas existentes ao longo de cada trecho.

Quadro 3 – Espreadimento e nível máximo de inundação para diversos períodos de retorno e ilhas barreira.

Local	Declive médio da face da praia	Período de Retorno	Direcção	Hs (m)	Tp (s)	Teixeira (A)	Teixeira (B)	Battjes / Hunt	Holman & Sallenger	Nielsen & Hanslow	Masselink & Hughes	Stockdon et al (A)	Holman	Stockdon et al (B)	Raubenheimer & Guza	R _x (m)	N _x (m ZH)
Ancão	0.13	5	SW	6.0	11.0	4.5	4.7	4.4	4.8	4.4	3.9	3.8	2.4	1.4	1.0	4.4	8.5
	0.13	10	SW	6.2	11.5	4.6	5.0	4.6	5.1	4.6	4.2	4.1	2.6	1.5	1.1	4.6	8.8
	0.13	25	SW	6.5	12.0	4.8	5.4	5.0	5.4	5.0	4.5	4.4	2.7	1.6	1.2	4.8	9.1
	0.13	50	SW	7.0	12.5	5.1	5.8	5.4	5.9	5.4	4.8	4.7	3.0	1.8	1.3	5.3	9.7
Barreta	0.13	5	SW	6.0	11.0	4.5	4.7	4.4	4.8	4.4	3.9	3.8	2.4	1.4	1.0	4.4	8.5
	0.13	10	SW	6.2	11.5	4.6	5.0	4.6	5.1	4.6	4.2	4.1	2.6	1.5	1.1	4.6	8.8
	0.13	25	SW	6.5	12.0	4.8	5.4	5.0	5.4	5.0	4.5	4.4	2.7	1.6	1.2	4.8	9.1
	0.13	50	SW	7.0	12.5	5.1	5.8	5.4	5.9	5.4	4.8	4.7	3.0	1.8	1.3	5.3	9.7
Culatra	0.09	5	SE	5.0	9.0	3.9	2.4	2.3	2.9	2.1	2.0	2.2	1.2	1.1	0.3	2.4	6.5
	0.09	10	SE	5.3	9.5	4.1	2.7	2.5	3.1	2.3	2.2	2.3	1.4	1.2	0.4	2.6	6.8
	0.09	25	SE	5.6	10.0	4.3	2.9	2.7	3.3	2.5	2.4	2.5	1.5	1.3	0.4	2.8	7.1
	0.09	50	SE	6.0	10.5	4.5	3.1	2.9	3.6	2.7	2.6	2.7	1.6	1.4	0.4	3.0	7.4
Armona	0.10	5	SE	5.0	9.0	3.9	2.7	2.5	3.1	2.5	2.3	2.3	1.4	1.1	0.4	2.7	6.8
	0.10	10	SE	5.3	9.5	4.1	3.0	2.7	3.3	2.7	2.5	2.5	1.5	1.2	0.4	2.9	7.1
	0.10	25	SE	5.6	10.0	4.3	3.2	3.0	3.6	2.9	2.7	2.7	1.6	1.3	0.5	3.2	7.5
	0.10	50	SE	6.0	10.5	4.5	3.5	3.2	3.9	3.2	2.9	3.0	1.8	1.4	0.5	3.3	7.8
Tavira	0.10	5	SE	5.0	9.0	3.9	2.7	2.5	3.1	2.5	2.3	2.3	1.4	1.1	0.4	2.7	6.8
	0.10	10	SE	5.3	9.5	4.1	3.0	2.7	3.3	2.7	2.5	2.5	1.5	1.2	0.4	2.9	7.1
	0.10	25	SE	5.6	10.0	4.3	3.2	3.0	3.6	2.9	2.7	2.7	1.6	1.3	0.5	3.2	7.5
	0.10	50	SE	6.0	10.5	4.5	3.5	3.2	3.9	3.2	2.9	3.0	1.8	1.4	0.5	3.3	7.8
Cabanas	0.10	5	SE	5.0	9.0	3.9	2.7	2.5	3.1	2.5	2.3	2.3	1.4	1.1	0.4	2.7	6.8
	0.10	10	SE	5.3	9.5	4.1	3.0	2.7	3.3	2.7	2.5	2.5	1.5	1.2	0.4	2.9	7.1
	0.10	25	SE	5.6	10.0	4.3	3.2	3.0	3.6	2.9	2.7	2.7	1.6	1.3	0.5	3.2	7.5
	0.10	50	SE	6.0	10.5	4.5	3.5	3.2	3.9	3.2	2.9	3.0	1.8	1.4	0.5	3.3	7.8
Cacela	0.10	5	SE	5.0	9.0	3.9	2.7	2.5	3.1	2.5	2.3	2.3	1.4	1.1	0.4	2.7	6.8
	0.10	10	SE	5.3	9.5	4.1	3.0	2.7	3.3	2.7	2.5	2.5	1.5	1.2	0.4	2.9	7.1
	0.10	25	SE	5.6	10.0	4.3	3.2	3.0	3.6	2.9	2.7	2.7	1.6	1.3	0.5	3.2	7.5
	0.10	50	SE	6.0	10.5	4.5	3.5	3.2	3.9	3.2	2.9	3.0	1.8	1.4	0.5	3.3	7.8

Os resultados, de acordo com o conhecimento no terreno, evidenciam imediatamente um maior espraioamento nos sectores orientados a SW do que naqueles orientados a SE. Note-se que o valor obtido para o período de retorno de 50 anos, +9.7 m (ZH), é semelhante ao obtido por Ferreira *et al.* (2006) para vários sectores da península do Ancão, entre +9.25 e +10.15 m (ZH), para igual período de retorno.

Para o sector oriental os níveis máximos são cerca de 2 m inferiores, para todos os períodos de retorno, resultantes dos valores muito inferiores do espraioamento estimado. As diferenças de níveis máximos entre a ilha da Culatra e as restantes do sector oriental resultam unicamente do diferente pendor da face da praia, obtendo-se valores mais elevados para pendores também mais elevados.

Apuram-se de seguida as diferenças entre os espraioamentos estimadas nos dois sectores. Admitindo um declive constante e igual a 0.10 para todas as ilhas, obter-se-iam espraioamentos com diferenças da ordem de 0.8 m para as ilhas dos sectores ocidental e oriental, portanto, resultantes unicamente das diferenças do clima de agitação. Por outro lado, fixando a agitação marítima em todo o sector (igualando aos valores do sector ocidental ou vice-versa), os diferentes declives da face da praia nos dois sectores (simplificando, 0.13 e 0.10) provocam diferenças nos espraioamentos entre 0.6 e 1.0 m. Ou seja, (dentro da gama dos valores presentes), os diferentes climas de agitação ou os diferentes declives médios contribuem com peso idêntico para a diferença final de cerca de 2 m, estimada para o espraioamento entre os sectores ocidental e oriental.

Analisando em detalhe as expressões utilizadas, todas podem ser expressas simplesmente em função de 3 variáveis: m , H_s e L_0 . À excepção de três fórmulas, todas têm a mesma dependência destas variáveis: $R = f(m^1 H_s^{0.5} L_0^{0.5})$. A fórmula "A" de Teixeira (2009) é da forma $R = f(H_s^1)$, a expressão "B" de Stockdon et al. (2006) da forma $R = f(H_s^{0.5} L_0^{0.5})$ e a expressão proposta por Raubenheimer e Guza (1996) da forma $R = f(m^2 L_0^1)$. Note-se que estas duas últimas foram deduzidas para praias muito dissipativas, em que as zonas de rebentação e de espalho (*surf*) estão saturadas, não sendo portanto de admirar terem formulações distintas das restantes e não serem recomendadas para aplicação nas praias marítimas da Ria Formosa. Acresce que a expressão "A" de Teixeira (2009) é aquela que, dando resultados razoáveis para as ilhas orientadas a SW, fornece estimativas exageradas para as ilhas orientadas a SE. Assim, da aplicação destas formulações ao litoral da Ria Formosa, depreende-se que releva a consideração do declive, da altura de onda e do período (ou do comprimento de onda) das mesmas. Curiosamente, nenhuma expressão (excluindo a "A" de Teixeira, 2009) é independente do comprimento de onda ao largo, que depende do período da onda, sendo que o espraioamento é crescente com esta variável.

Dados do terreno, relativos à cota da crista da duna (*in* Freire et al., 2011), revelam, p.ex., que para a península do Ancão estas cotas variam predominantemente entre +7 e +10 m (ZH), englobando portanto a gama de valores estimados do nível máximo de espraioamento, entre +8.5 e +9.7. A ocorrência ocasional de episódios de galgamento destas dunas valida, de certa forma, os resultados obtidos. Identicamente, nos sectores ocidental e central da Ilha da Armona o cordão dunar é robusto e bem vegetado, com cotas máximas entre +6 e +8 m (ZH), mais uma vez concordantes com os valores aqui estimados para o nível de inundaçãõ, entre +6.8 e +7.8, e o conhecimento de episódios pouco frequentes de galgamentos. Inversamente, no sector oriental desta ilha, cuja crista se desenvolve a cotas de +6 m (ZH), os episódios de galgamento são mais frequentes, de acordo com o aqui estimado e em concordância com a análise de susceptibilidade ao galgamento apresentada por Garcia *et al.* (2010).

Refira-se ainda que a diferença entre os níveis máximos estimados para períodos de retorno de 5 e 50 anos se cifra em cerca de 1m, resultantes maioritariamente da contribuiçãõ do espraioamento, que só acresce no máximo 0.9 m para períodos de retorno tão diferentes. Saliente-se, mais uma vez, que as estimativas de H_s e de T_p carecem de uma análise mais completa, em particular para a variável T_p (L_0), que é determinante em todas as expressões de cálculo de R_x (Quadro 1).

4 - SÍNTESE E CONCLUSÕES

Apresentou-se uma metodologia para o cálculo de níveis máximos do espraiamento oceânico no sistema de ilhas barreira da Ria Formosa. Para o efeito, determinaram-se separadamente as contribuições da maré (sobrelevação astronómica), da sobrelevação meteorológica (*storm surge*) e do espraiamento directo resultante da agitação marítima (*run-up* mais *wave setup*). A análise baseou-se na associação dos cálculos do espraiamento e da sobrelevação meteorológica a determinados períodos de retorno, tendo-se admitido dependentes (de um mesmo temporal) estas duas variáveis. Uma análise estatística mais rigorosa exigiria o recurso a dados e/ou resultados da modelação (*hindcast*) detalhada destes processos, respectivamente inexistentes ou fora do âmbito deste trabalho, tendo-se por isso optado pela metodologia simplificada descrita.

Conclui-se em primeiro lugar que existe acentuada incerteza nas estimativas actuais do regime de extremos para o litoral sul, evidenciadas pela discrepância de resultados nos trabalhos de Pires (1998), Filipe *et al.* (1999), Costa *et al.* (2001) e Capitão *et al.* (2009). Reconhece-se assim a necessidade de execução de um estudo actual do regime de extremos na costa sul com base em todos os dados da bóia-ondógrafo de Faro (eventualmente estendido a dados provenientes de outras fontes: *hindcast* e de outros ondógrafos).

Por outro lado, face à ausência de séries mais completas de dados de qualidade de superfície livre (incluindo a maré e a sobrelevação) na barra de Faro-Olhão, recorreu-se a estimativas da sobrelevação meteorológica baseadas na série de dados do marégrafo de Huelva (Puerto del Estado, 2006), aferidas com os dados locais disponíveis (Teixeira, 2010).

Conclui-se também que, para o litoral da Ria Formosa, o nível médio de água se situa actualmente à cota +2.15 m (ZH), corrigindo em 15 cm o nível médio adoptado, em resultado da subida generalizada do nível médio do mar (Antunes e Taborda, 2009).

A aplicação de dez fórmulas para o cálculo do espraiamento permitiu concluir que as três expressões desenvolvidas para praias dissipativas eram desadequadas e que a expressão dependente somente da altura significativa de onda sobrestimava o espraiamento no litoral nascente (desde a ilha da Culatra até à península de Cacela). As restantes fórmulas forneceram estimativas coerentes entre si e com os dados do terreno, quer em termos de cotas da crista dunar, quer do conhecimento da frequência e extensão de galgamentos.

Os resultados, de acordo com observações no terreno, evidenciam um maior espraiamento nos sectores orientados a SW do que naqueles orientados a SE. No primeiro, os níveis máximos do espraiamento são cerca de 2 m inferiores aos estimados no segundo, resultando de contribuições idênticas da menor agitação marítima e do menor pendor na face da praia nas ilhas com alinhamento SW-NE. Conclui-se também que a diferença entre os níveis máximos estimados para os períodos de retorno de 5 e 50 anos se cifra em pouco mais de 1m.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à “Sociedade Polis Litoral Ria Formosa S.A. – Sociedade para a Requalificação e Valorização da Ria Formosa S.A. (SPLRF)” a autorização para publicação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Andrade, C., Barata, A., Teles, M., 1998. An analysis of the vulnerability to overwash of the Ria Formosa barrier system (Portugal) using a simple multi-attribute rating technique (SMART) approach. Proceedings 4th int. Symp. Littoral'98, EUROCOAST, Barcelona, pp. 511-519.
- Antunes, C., Taborda, R., 2009. Sea level at Cascais tide gauge: Data, analysis and results. *J. Coastal Research*, SI56, ICS2009 Proceedings, pp. 218-222.
- Battjes, J., 1971. Run-up distributions of waves breaking on slopes. *J. Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 97, pp. 91-114.

- Bruneau, N., Fortunato, A., Portela, L., 2010. Valorização da Hidrodinâmica da Ria Formosa e Mitigação do Risco nas Ilhas Barreira. Relatório 2: Valorização Hidrodinâmica da Laguna. 1^a e 2^a Fases. Relatório 325/2010 – NEC, 51 pp.
- Capitão, R., F. Sancho, N. Alenquer, B. Proença, 2009. Colmatação de falhas em dados de agitação marítima - o caso de Faro. 6.as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009.
- Clímaco, M., Vicente, C.M., Freire, P., Bertin, X., 2011. Valorização da Hidrodinâmica da Ria Formosa e Mitigação do Risco nas Ilhas Barreira. Relatório 4: Mitigação do risco nas ilhas barreira 2^a e 3^a Fases – Proposta e Avaliação das Medidas de Reabilitação e Plano de Gestão de Sedimentos Dragados. Relatório xxx/2011- NET, LNEC, Lisboa, Julho.
- Costa, M., Silva, R, e Vitorino, J., 2001. Contribuição para o estudo do clima de agitação marítima na costa Portuguesa. 2^aJornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Sines, CD-ROM, 20p.
- Dias, J.A., Taborda, R., 1992. Tidal gauge data in deducing secular trends of relative sea level and crustal movements in Portugal. *J. Coastal Research*, 8(3), Fort Lauderdale (USA), pp. 655-659.
- Ferreira, Ó., Garcia, T., Matias, A., Taborda, R., Dias, J.A., 2006. An integrated method for the determination of set-back lines for coastal erosion hazards on sandy shores. *Continental Shelf Research*, 26:1030-1044.
- Filipe, A., Carvalho, M.M., Capitão, R., 1999. Valores extremos da agitação marítima no Algarve. Faro – Tratamento local dos dados existentes. Relatório 179/99 – NPP, LNEC, Lisboa, 60p.
- Freire, P., Sancho, F., Oliveira, F., 2011. Valorização Hidrodinâmica da Ria Formosa e Mitigação do Risco nas Ilhas Barreira. Relatório 1: Mitigação do Risco nas Ilhas Barreira. 1^a Fase - Identificação das Zonas de Risco. Rel. 40/2011 – NEC, Fevereiro 2011, LNEC, Lisboa, 129 pp.
- Gama, C., Dias, J.M.A., Taborda, R., 1994. Analysis of storm surge in Portugal, between June 1986 and May 1988. *Proc. Littoral 94*, Lisboa, 381-387.
- Gama, C., R. Taborda, Dias, J.M.A., 1997. Sobrelevação do nível do mar de origem meteorológica ('storm surge'), em Portugal Continental. Colectânea de ideias sobre a zona costeira de Portugal, Porto: Associação Eurocoast – Portugal, pp. 131-149.
- Garcia, T., Ferreira, Ó., Matias, A., Dias, J.A., 2010. Overwash vulnerability assessment based on long-term washover evolution. *Natural Hazards*, 54: 225-244.
- Holman, R.A., 1986. Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. *Coastal Engineering*, 9, pp. 527-544.
- Holman, R.A., Sallenger Jr., A.H., 1985. Setup and swash on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 90 (C1), pp. 945-953.
- Hunt, I.A., 1959. Design of seawalls and breakwaters. *J. of Waterways and Harbours Division*, ASCE, 85(WW3), pp. 123-152.
- IH, 1983. Recolha e tratamento de um ano de informação maregráfica na Barra de Faro-Olhão (01Set79 a 31Ago80). Instituto Hidrográfico, Divisão de Marés e Correntes, Rel-FC-MC-15/83.
- Julião, R. P., Nery, F., Ribeiro, J.L., Branco, M. C., Zêzere, J.L., 2009. Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal. Autoridade Nacional de Protecção Civil, 91p.
- Nielsen, P., Hanslow, D.J., 1991. Wave runup distributions on natural beaches. *Journal of Coastal Research*, 7 (4), pp. 1139-1152.
- Masselink, G., Hughes, M.G., 2003. Introduction to coastal processes and geomorphology. Arnold, London, 354 pp.
- Pires, H. O., 1998. Project India. Preliminary report on the wave climate at Faro. Instituto de Meteorologia - Instituto Superior Técnico, 37 pp.
- Portela, L., Azevedo, A., Fortunato, A. B., 2011. Valorização da Hidrodinâmica da Ria Formosa e Mitigação do Risco nas Ilhas Barreira. Relatório 3: Valorização da Hidrodinâmica da Laguna. 3^a Fase – Proposta de Medidas Correctivas. Relatório xxx/2011- NET, LNEC, Lisboa, Julho.
- Puertos del Estado, 2006. Extremos maximos de nivel del mar (nivel medio horario). Mareografo de Huelva-Mazagón, codigo BD: 3326. Puertos del Estado, Ministerio de Fomento.



- Raubenheimer, B., Guza, R.T., 1996. Observations and predictions of run-up. *Journal of Geophysical Research*, 101 (C10), pp. 25575-25587.
- Sallenger, A.H., 2000. Storm impact scale for barrier islands. *Journal of Coastal Research*, 16/3), pp. 890-895.
- Seabra de Melo, J.L.B., 1989. Caracterização hidro-oceanográfica da Ria Formosa. *Anais do Instituto Hidrográfico*, n.º 10, pp. 7-23.
- Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., Sallenger Jr., A.H., 2006. Empirical parameterization of setup, swash and runup. *Coastal Engineering*, 53, pp. 573-588.
- Teixeira, S., 2009. Demarcação do leito e da margem das águas do mar no litoral sul do Algarve. ARH Algarve, Departamento de Recursos Hídricos do Litoral, 207p.
- Teixeira, S., 2010. Risco de inundação na margem da Ria Formosa. ARH Algarve, Departamento de Recursos Hídricos do Litoral. Relatório Provisório, Faro, Abril 2010, 40p.
- Vila-Concejo, A., Matias, A., Pacheco, A., Ferreira, Ó., Dias, J.A., 2006. Quantification of inlet-related hazards in barrier island systems. An example from the Ria Formosa (Portugal). *Continental Shelf Research*: 26:1045-1060.