

ANEXO 3

METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO

DAS FAIXAS DE SALVAGUARDA

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

[Esta página foi propositadamente deixada em branco]

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	5
2. METODOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO DAS FAIXAS DE SALVAGUARDA À EROSÃO COSTEIRA	9
2.1. TROÇOS E SETORES DA LINHA DE COSTA UTILIZADOS	9
2.2. DEFINIÇÃO DAS COMPONENTES DE RECUO	9
2.3. CÁLCULO DAS FAIXAS DE SALVAGUARDA À EROSÃO COSTEIRA	19
3. RESULTADOS	21
3.1. TAXA DE EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA (TELC)	21
3.2. EROSÃO INDUZIDA POR TEMPORAL (RMÁX)	21
3.3. EROSÃO INDUZIDA POR ELEVAÇÃO SECULAR DO NMM (RNMM)	21
4. FAIXAS DE SALVAGUARDA À EROSÃO COSTEIRA (NÍVEL I E II)	23
5. GALGAMENTO E INUNDAÇÃO COSTEIRA	25

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – EXEMPLO DO PROJETO SIG DESTINADO A CALCULAR AS TAXAS DE MIGRAÇÃO BASEADAS NA VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA, EVIDENCIANDO UM EXEMPLO PARCIAL DA LINHA DE BASE SOBRE A FOTOGRAFIA AÉREA (A VERMELHO) E OS RESPECTIVOS TRANSEPTOS (A BRANCO), OBTIDOS A PARTIR DESTA.	13
FIGURA 2 – PARÂMETROS UTILIZADOS NO DSAS. À ESQUERDA, A PARAMETRIZAÇÃO DO TRAÇADO DOS TRANSEPTOS. À DIREITA, OS PARÂMETROS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DA MOBILIDADE DAS LINHAS DE COSTA.	14
FIGURA 3 – EXEMPLO DO PROJETO SIG DESTINADO A CALCULAR AS TAXAS DE MIGRAÇÃO BASEADAS NA VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA, EVIDENCIANDO A INTERSECÇÃO DOS TRANSEPTOS COM AS DIVERSAS LINHAS DE COSTA DISPONÍVEIS, AS QUAIS PERMITIRÃO O CÁLCULO DAS TAXAS DE MIGRAÇÃO DA LINHA DE COSTA.	15
FIGURA 4 – ENQUADRAMENTO DAS VARIÁVEIS CONSIDERADAS, VIEGAS E SANCHI (2005)	25
FIGURA 5 – RÉGIME DE EXTREMOS DE COTA DE INUNDAÇÃO, VIEGAS E SANCHO (2005).	30

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

[Esta página foi propositadamente deixada em branco]

1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de fenómenos que, de alguma forma, constituam fator de perigosidade da zona costeira decorre da sua natureza dinâmica e dos processos físicos atuantes que promovem alterações morfológicas, especialmente relevantes em litoral arenoso.

Os processos habitualmente considerados ou a considerar, em função da informação disponível são: erosão de longo termo (neste caso horizontes de 2050 e 2100), erosão devida a temporais extremos, erosão devida à subida do nível médio da água do mar associada às alterações climáticas e galgamentos/inundações.

Devido à grande incerteza que caracteriza os dados de base e os modelos de análise e simulação numérica, o estabelecimento das faixas de salvaguarda associadas a cada processo deve atender a algum bom senso, bem como ao princípio da precaução, até porque pode haver alguma sobreposição de efeitos.

Os impactes de cada um, se forem passíveis de análise, foram avaliados para cada perfil (para o 1º processo referido) e de uma forma global para os restantes.

De referir que algumas das metodologias a aplicar, propostas pela APA, foram desenvolvidas em áreas piloto, atendendo às especificidades morfológicas de cada local, com recurso a monitorização, levantamentos de campo para calibração, efetuados durante um período de tempo longo e com outros meios disponíveis.

Por outro lado, em resposta ao fenómeno de subida do nível médio da água do mar, as praias que se desenvolvem sobre uma plataforma rochosa apresentam um comportamento de reajuste do perfil distinto daquelas que apresentam totalmente um perfil arenoso até à profundidade de fecho, ainda que, por precaução, se deva considerar um comportamento médio similar.

Nas praias limitadas por uma arriba ou estrutura, independentemente do cenário considerado, a evolução do limite terrestre foi considerada em função da real evolução registada e no caso de eventos extremos é considerada por precaução a evolução determinada.

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

A abordagem aqui apresentada baseia-se na metodologia proposta nos seguintes relatórios técnicos:

- Enquadramento metodológico para a demarcação das Faixas de Salvaguarda à Erosão Costeira (Nível I e II) em litoral baixo e arenoso, março de 2015, DLPC Nº1/2015, APA, Aplicação ao troço costeiro Ovar – Marinha Grande;
- Determinação e cartografia da perigosidade associada à erosão de praias e ao galgamento oceânico na Costa da Caparica, APA, junho de 2013.

A área de intervenção do POC Caminha-Espinho, com uma extensão de aproximadamente 110 km de linha de costa, apresenta vários trechos de conteúdo geomorfológico característico de litoral baixo e arenoso, dominado por sistemas praia-duna, interrompidos pontualmente por barreiras arenosas e embocaduras associadas a sistemas fluviais e áreas portuárias, bem como por formações rochosas.

Vários troços apresentam uma tendência evolutiva de longo e curto prazo marcada pela erosão, materializada pela perda de área emersa de território (redução e recuo dos sistemas dunares frontais, redução da largura e volumetria da praia emersa), ocorrendo também episódios de galgamento e inundação costeira localizados.

Segundo os documentos referidos e baseando-se noutros estudos também aí indicados, as consequências mais importantes associadas às alterações climáticas no litoral de Portugal Continental são e serão a subida do nível médio da água do mar e a modificação do regime de agitação marítima, da sobrelevação meteorológica, da temperatura e da precipitação.

As modificações referidas irão previsivelmente gerar impactos na faixa costeira ao nível do balanço sedimentar (i.e. aumento da tendência erosiva instalada e erosão em troços atualmente estáveis) e na modificação da frequência e intensidade de inundações costeiras localizadas.

Face aos atributos geomorfológicos, tendências evolutivas e usos do solo presentes neste troço costeiro, é fundamental que se incorporem medidas explícitas de adaptação destinadas à salvaguarda e mitigação dos impactos decorrentes da mobilidade e dinâmica da faixa costeira.

Neste contexto, o documento propõe como medida de ordenamento e gestão a delimitação de faixas de salvaguarda à erosão costeira ao longo de todo o litoral baixo e arenoso, para os horizontes temporais de 2050 e 2100.

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

Estas faixas, de carácter preventivo, impõem restrições ao uso e ocupação do solo, destinando-se a proteger a margem terrestre face à ocorrência de diferentes cenários de perigosidade no futuro, sendo o resultado da extrapolação para 2050 e 2100 de tendências evolutivas observadas no passado recente.

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

[Esta página foi propositadamente deixada em branco]

2. METODOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO DAS FAIXAS DE SALVAGUARDA À EROSÃO COSTEIRA

2.1. Troços e setores da linha de costa utilizados

Apesar da variabilidade de conteúdos e atributos geomorfológicos, características fisiográficas e diferentes tendências evolutivas e graus de intervenção (i.e. obras de proteção/defesa costeira), este troço costeiro foi analisado, na sua globalidade, comparando linhas de costa históricas, correspondentes a vários anos para os quais havia disponibilidade de levantamentos de fotografia aérea, considerando as taxas de recuo/acreção para cada perfil, calculados a partir da mobilidade das linhas de costa históricas retiradas a partir daqueles levantamentos.

2.2. Definição das componentes de recuo

O cálculo e dimensionamento das faixas de salvaguarda à erosão costeira seguiu os procedimentos metodológicos definidos nos documentos referidos inicialmente, com base em outras referências aí indicadas, semelhantes à maioria das abordagens conhecidas no âmbito do planeamento e ordenamento do território face aos riscos costeiros.

Foram adotadas as componentes de recuo que se explicam de seguida.

A **taxa de evolução da linha de costa** ($T_{ELC50/100}$) corresponde à extrapolação linear, para os horizontes dos anos de 2050 e 2100, da taxa de erosão anual calculada para cada perfil. Embora esta vá ser a designação mantida, em coerência com trabalhos anteriores, deveria ser preferida a sigla de $P_{ELC50/100}$ entendida como “Projeção da evolução da linha de costa para os horizontes temporais de 2050 e 2100” por refletir melhor a natureza deste tipo de componente, pois não se trata de uma taxa mas de uma projeção posicional prevista, admitindo a manutenção das taxas de migração anuais anteriores.

Na projeção para os horizontes temporais de 2050 e 2100 foi utilizada a média da taxa de migração anual da linha de costa obtida a partir das linhas de costa disponíveis para o trecho Caminha-Espinho.

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

Para a definição da posição do indicador bidimensional "linha de costa", sujeita a comparação para os diferentes instantes temporais providenciados pela fotografia aérea, utilizou-se como indicador morfológico o sopé da duna frontal, representado no terreno pela quebra de declive e, na sua ausência, pelo limite exterior da vegetação. De um modo geral, o sopé da duna frontal é caracterizado pela sua natureza conservativa no que diz respeito à fronteira praia-duna, constituindo uma vantagem sobre outros indicadores (como por exemplo o limiar do espraio e a crista da berma) que são fortemente influenciados por variações sazonais e interanuais da morfologia da praia relacionadas com os agentes forçadores (p. ex. agitação marítima, correntes). A linha de vegetação encontra-se normalmente bem marcada nas fotografias aéreas, providenciando um limite facilmente distinguível. Acresce, ainda, o facto de ser um limite que constitui um excelente indicador do limite de espraio, pois a vegetação normalmente desaparece nas zonas inundadas. No caso de ocorrer presença de arribas de erosão com inclinação significativa, o limite considerado foi o topo da arriba. Nos locais onde foram construídas estruturas fixas, tais como muros ou obras de defesa longilitorais, o limite assumido foi a base destas estruturas, considerado como limite máximo de potencial inundação pelo espraio da onda.

A utilização de indicadores de migração bidimensionais, sob a forma de linhas, é uma metodologia prática e com resultados interessantes pois, ao contrário de indicadores decorrentes da aplicação de modelos matemáticos, estas linhas materializam, efetivamente, a taxa de migração observada. Trata-se, contudo, de uma metodologia que não permite determinar balanços sedimentares, cujo cálculo é fundamentalmente tridimensional. Deste modo é possível, pela aplicação desta metodologia, que existam zonas em que não foi observável nenhum recuo significativo, mas nas quais pode ter ocorrido perda de grande quantidade de sedimento na área de praia, com diminuição da sua largura ou aprofundamento. Acresce ainda, como vantagem, o facto de a migração destes indicadores já incorporar, intrinsecamente, a influência de todos os fatores implicados na dinâmica costeira tais como a subida do nível médio da água do mar, os temporais, a penúria sedimentar, etc. Contudo, apesar da vantagem de agregar o somatório da atuação de todos os fatores de migração, esta técnica não permite distinguir a intensidade da atuação de cada um deles.

A extração de indicadores bidimensionais a partir de fotografia aérea apresenta, potencialmente, inúmeras fontes de erro. Alguns desses erros estão relacionados com operador e relacionam-se, em especial, com erros de interpretação da fotografia aérea, bem como na demarcação, por vectorização em ambiente SIG, das linhas correspondentes aos indicadores. Outros erros que podem influenciar a incerteza relacionam-se com a qualidade da fotografia, uma vez que, dependendo da exposição

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

luminosa desta, pode ocorrer uma imagem sobre-exposta ou sub-exposta, dificultando assim a identificação de pequenos tufos de vegetação ou outros aspetos necessários para delinear a linha de costa. A qualidade posicional da fotografia, ou seja, a georreferenciação, pode também introduzir erros nos valores da taxa de migração costeira, bem como a precisão possível durante a vectorização relacionada com a destreza do utilizador, uma vez que a sua delineação é um processo integralmente manual. A luminosidade e a resolução da fotografia aérea são outros dos diversos fatores que induzem erros. A resolução da fotografia aérea, apropriada a este tipo de trabalho deve permitir uma boa discriminação dos aspetos no solo que permitem a delineação da linha de costa. Fotografia aérea que possua resolução inferior a 1 ou 2 metros por *pixel* é geralmente inadequada para este tipo de trabalho. A resolução da fotografia é um fator determinante pois, normalmente, impede o cálculo de migração costeira com precisão centimétrica, pois o erro é normalmente, sensivelmente igual ou superior a quatro vezes a resolução do *pixel*. Em praias com uma dinâmica muito elevada, como é o caso da maioria do trecho em análise, na ordem dos vários metros para um horizonte temporal em análise quase sempre superior a 10 anos, é suficiente para reduzir a incerteza. Para este relatório foi assumido um valor médio de erro ou incerteza, associado à delineação de todas as linhas de costa, de 4 metros.

As linhas de costa utilizadas foram delimitadas sempre com o mesmo critério acima descrito. Para 1958, foi utilizada a linha de costa, fornecida pela APA. Esta linha, delimitada pelo Prof. João Catalão, apresenta a limitação de não cobrir integralmente a totalidade do trecho em análise por falta de qualidade da fotografia aérea de 1958 em alguns dos sectores. Sendo a linha antiga com cobertura mais extensa, este facto tem implicações significativas nos cálculos das taxas de migração pois nos sectores onde esta não está delimitada, é reduzido o intervalo de tempo em análise. O mesmo acontece para as restantes linhas disponíveis. As restantes linhas utilizadas foram delimitadas pelo Prof. Renato Henriques da Universidade do Minho ou por formandos em trabalhos realizados sob sua supervisão. Salientam-se as linhas provenientes do projeto “PROTEC|GEORISK - Proteção Civil e Gestão de Riscos no Alto Minho”, disponíveis de Caminha à foz do Rio Neiva. Estas linhas foram utilizadas também nalgumas teses de mestrado, tal como em Cardoso, E. (2011) e, pontualmente, nalguns trabalhos apresentados em congressos nacionais e internacionais.

As linhas de costa utilizadas têm, nalguns casos, cobertura integral para todo o trecho. Nestas condições estão as linhas de costa de 2012 e 2006, obtidas a partir dos levantamentos aerofotográficos da DGT para estes anos. Outras linhas de costa, com cobertura limitada a alguns sectores, foram

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

também utilizadas. Nestas condições estão as linhas de costa relativas aos anos de 1948 (apenas praia da Aguçadoura Norte), 1965, 1973, 1983, 1987, 1994 e 1995. Estas linhas de costa foram obtidas a partir de fotografia aérea do acervo do Departamento de Ciências da Terra, do acervo pessoal do Prof. Gaspar Soares de Carvalho ou adquiridas pelo Instituto Politécnico de Viana do Castelo. A fotografia em papel, com resolução geométrica entre 5 a 25 micras e com qualidade em termos de luminosidade e imagem, foi digitalizada com um scanner fotogramétrico a uma resolução geométrica média de 15 micras.

Estas fotografias foram depois georreferenciadas utilizando pontos de controlo de coordenada conhecida, perfeitamente visíveis nas fotografias e materializáveis no campo, utilizando algoritmos de deformação do tipo “rubber sheeting”.

As tendências evolutivas da linha de costa foram estudadas através da quantificação da mobilidade da linha de costa, extraída de fotografia aérea de diferentes datas, com a aplicação do programa *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) desenvolvido pelo USGS (U. S. Geological Survey) (Danforth, W. *et al* 1992; Thieler, E.R. *et al*, 2009).

As diferenças de posição da linha de costa foram medidas relativamente a uma linha de base comum e utilizando uma sequência de transeptos equidistantes de 50 m na linha de base, Figura 1. A metodologia utilizada para o traçado da linha de base, a partir da qual foram obtidos os transeptos que vão intersectar as diversas linhas de costa, consistiu em que esta fosse o mais possível, sub-paralela às linhas de costa em análise. Deste modo, como o traçado dos transeptos é perpendicular a esta linha, assegura-se que a intersecção destes com as linhas de costa se faça com a maior perpendicularidade possível, reduzindo a possibilidade de subestimar ou sobrestimar a taxa de migração por efeito de maior tangencialidade dessa intersecção. Deste modo foi feito um “buffer” de 200 metros a todas as linhas de costa disponíveis e foi escolhido, para traçado da linha de base dos transeptos, o limite “offshore”. Este limite foi preferido tendo em conta a tendência de migração atual, maioritariamente erosiva. Deste modo assegura-se que num futuro trabalho, destinado a atualizar estes dados, não seja necessária a modificação posicional desta linha de base que, necessariamente, significaria alguma interferência nas taxas calculadas.

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

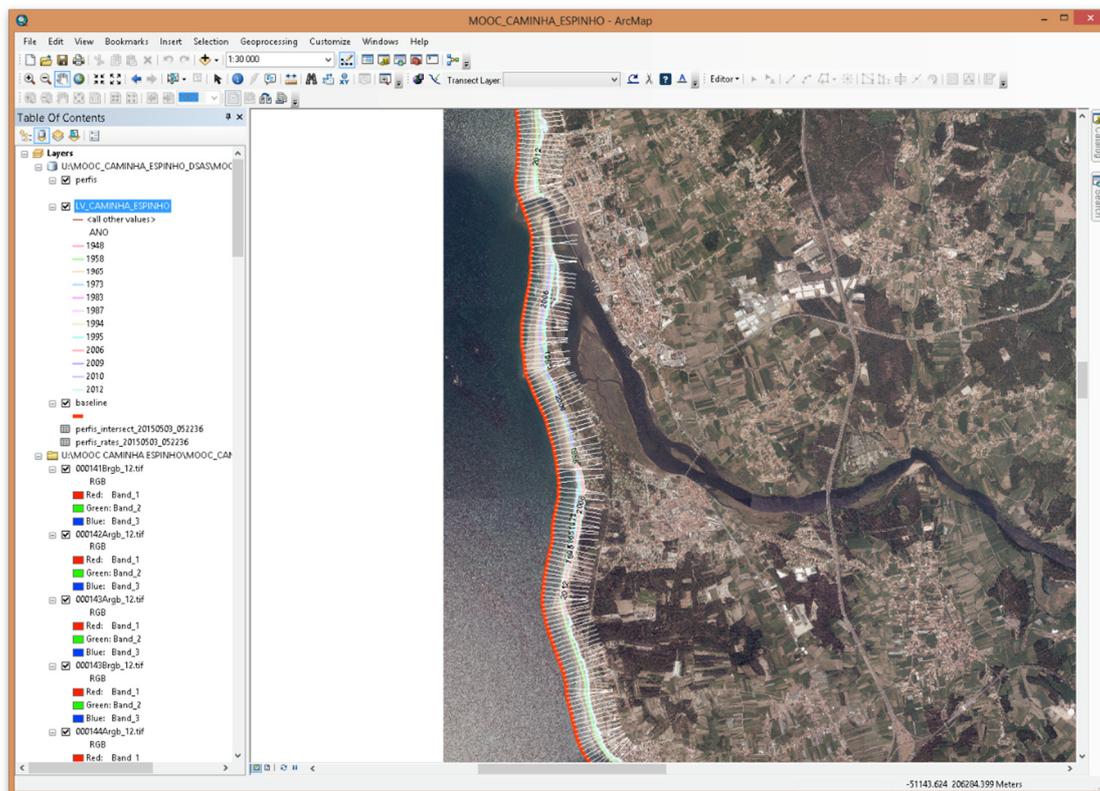


Figura 1 – Exemplo do projeto SIG destinado a calcular as taxas de migração baseadas na variação da linha de costa, evidenciando um exemplo parcial da linha de base sobre a fotografia aérea (a vermelho) e os respetivos transeptos (a branco), obtidos a partir desta

Todas as linhas de costa foram previamente preparadas de acordo com o manual do DSAS, integrando obrigatoriamente os seguintes campos de atributos:

- ID – contendo um identificador único numérico;
- DATA - contendo as datas no formato mês/dia/ano;
- UN – valor da incerteza.

O traçado dos transeptos foi feito, como já foi afirmado, com um espaçamento de 50 metros e com 500 metros de extensão, e considerando, para efeito de contabilização da mobilidade da linha de costa, o ponto mais próximo de intersecção de cada linha, tal como é ilustrado na Figura 2.

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

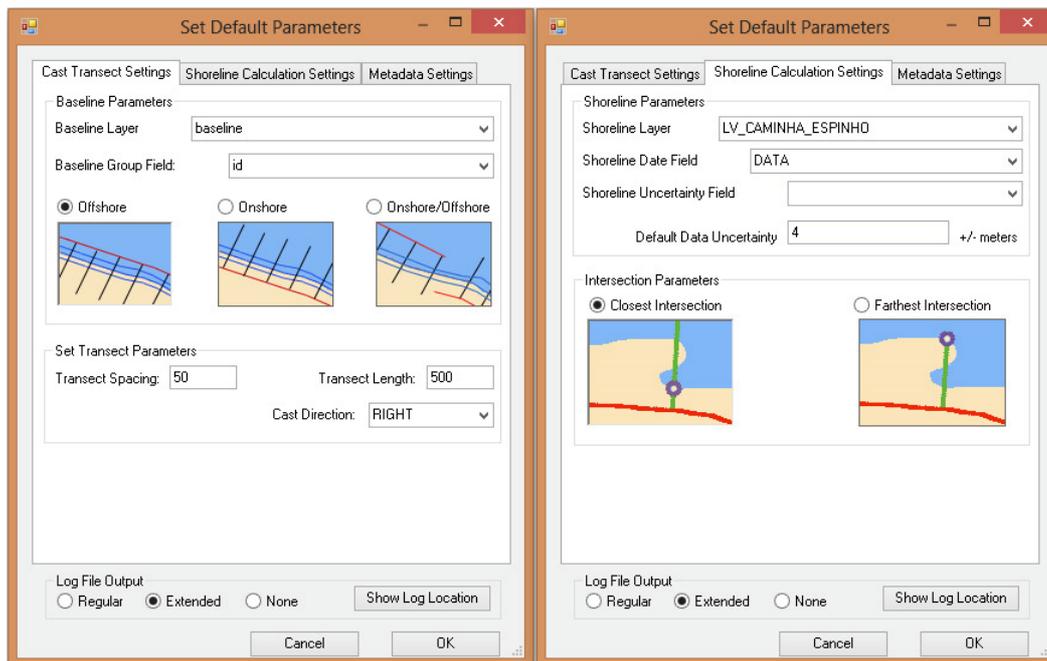


Figura 2 – Parâmetros utilizados no DSAS. À esquerda, a parametrização do traçado dos transeptos. À direita, os parâmetros utilizados para o cálculo da mobilidade das linhas de costa

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

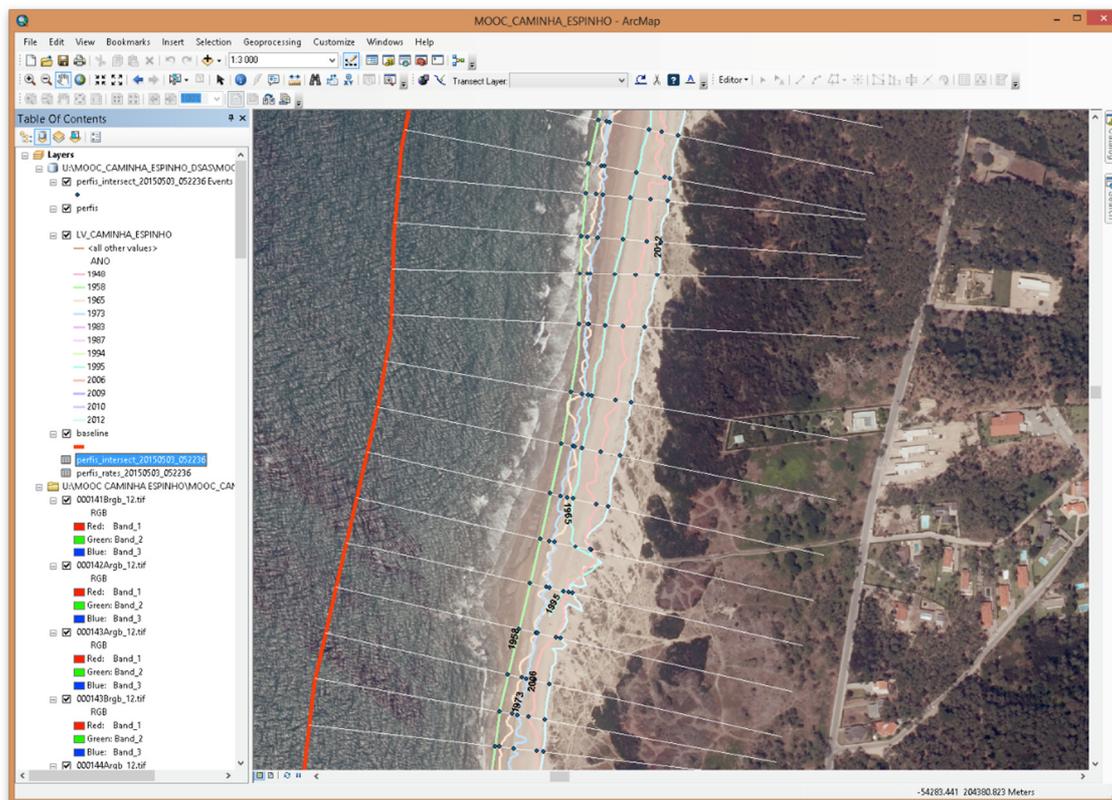


Figura 3 – Exemplo do projeto SIG destinado a calcular as taxas de migração baseadas na variação da linha de costa, evidenciando a intersecção dos transeptos com as diversas linhas de costa disponíveis, as quais permitirão o cálculo das taxas de migração da linha de costa

O DSAS calcula automaticamente a intersecção dos transeptos com as diversas linhas de costa disponíveis, resultando no cálculo de um conjunto de parâmetros estatísticos. Para este trabalho foram tidos em conta os seguintes:

- *End Point Rate (EPR)* ou Taxa no ponto terminal (TPT). Neste cálculo, os valores das taxas são obtidos através da divisão da distância percorrida pela LC pelo intervalo de tempo decorrido entre a medição intersectada mais antiga e a mais recente. As taxas de variação calculadas são expressas em distância de variação por ano (m/ano). Valores positivos representam acreção e valores negativos representam erosão. Face à limitação do número de Linhas de Costa disponíveis, este foi o método preferencial escolhido para o dimensionamento das faixas de salvaguarda à erosão costeira.
- *Least Median of Squares (LMS)* ou Regressão pelo método dos mínimos quadrados. Neste cálculo é tida em conta a melhor reta de regressão ajustada aos valores de mobilidade determinados,

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

eliminando o efeito de valores extremos ou residuais. Este método apenas tem aplicabilidade no caso de serem intersectadas mais do que duas linhas de costa. Quando apenas duas linhas são intersectadas, o valor de taxa obtido é igual ao método EPR. Apesar destes valores serem apresentados neste trabalho, aparecem apenas para comparação com os valores obtidos com o método EPR e não foram tidos em conta para o dimensionamento das faixas de salvaguarda à erosão costeira, em grande medida por não haver uma boa cobertura de linhas de costa em todo o trecho. Contudo, caso esta cobertura existisse, este método é estatisticamente mais robusto que o método EPR. As taxas de variação calculadas são expressas em distância de variação por ano (m/ano). Valores positivos representam acreção e valores negativos representam erosão.

- *Net Shoreline Movement* (NSM) ou Movimento Total Líquido da Linha de Costa (MTLLC). Trata-se da cumulativa da mobilidade observada para a linha de costa entre a linha mais antiga e mais recente intersectadas. O valor é expresso em metros. Valores positivos representam acreção e valores negativos representam erosão. Este valor dá uma ideia da migração total face ao intervalo em análise. Para se fazer uma correta interpretação, deve-se sempre verificar quais os instantes temporais que foram utilizados, em cada ponto, para este cálculo, por análise das linhas de costa intersectadas. Existem situações em que há grande mobilidade que pode decorrer de um intervalo longo de análise, resultando eventualmente de taxas de migração baixas e há outros casos em que essa mobilidade tem valores igualmente elevados, mas obtidos num intervalo temporal curto de análise, resultando de taxas de migração elevadas.

Todos os dados estatísticos obtidos para cada transecto encontram-se expressos, numérica e graficamente em tabelas já apresentadas.

A análise de taxas de migração é fortemente dependente do intervalo temporal em análise. Por vezes, um intervalo longo mascara tendências recorrentes de curto termo que são mais importantes e se têm mantido ao longo dos últimos anos. Este caso é particularmente relevante, por exemplo, nas situações que a linha de costa mais antiga se situava muito para o interior, observou-se recuperação da linha de costa durante um determinado período, de origem natural ou decorrente de uma intervenção de defesa e, nos últimos anos, têm-se mantido uma tendência regressiva.

A análise de todo o intervalo temporal remeterá para acreção quando, na realidade, o sector está em erosão nos últimos anos. O mesmo é válido para o caso contrário em que sectores em erosão possam ter passado, nos últimos anos, para uma situação de acreção decorrente, por exemplo, de obras de defesa. Para permitir uma análise mais correta desta influência, foi feito o cálculo das taxas de erosão

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

para todo o intervalo temporal em análise, ou seja, entre 1958 e 2012, sempre que estas linhas de costa estejam presentes.

Contudo foi também, paralelamente, feito o cálculo apenas para o período temporal entre 1994 e 2012, representando a tendência evolutiva apenas dos últimos 20 anos. Deste modo as diferenças podem ser comparadas e melhor interpretadas. Nalguns casos, este último período, de 1994 a 2012, apresenta inversão de tendências evolutivas face à consideração de todo o período disponível, de 1958 a 2012. Atendendo ao contexto de elevada incerteza que resulta da extrapolação linear para o futuro de evoluções observadas no passado recente, e no pressuposto que o planeamento a longo prazo deve assentar numa abordagem preventiva, foi considerada a taxa média de erosão anual dos últimos 52/56 anos na $T_{ELC50/100}$ para o dimensionamento das faixas de salvaguarda à erosão costeira. Contudo este traçado será acompanhado também, a tracejado, pelas $T_{ELC50/100}$ tendo em conta apenas a tendência migratória dos últimos 20 anos. As faixas finais resultarão da intersecção das faixas destes dois períodos. Deste modo é possível, por prudência e dada a incerteza associada a um longo intervalo de previsão, fazer uma análise à delimitação destas faixas tendo em conta uma abordagem do tipo “worst-case scenario”. Salientam-se aqui as limitações importantes deste tipo de cenários de projeção a longo termo, tendo em conta o intervalo limitado de dados em análise. A projeção a 50 e a 100 anos de tendências baseadas num período que, na melhor das hipóteses, representa 56 anos de observações é, obviamente, sujeita a grande incerteza decorrente do próprio procedimento matemático e associada à manutenção ou variação dos fatores implicados na migração costeira.

Em alguns perfis, a análise integrada das tendências evolutivas de curto e longo prazo revelou que a média das variações de curto prazo foi inferior ao recuo de longo prazo (1958 - 2012 vs 1994 - 2012). Noutros casos observou-se precisamente o contrário.

A **erosão induzida por temporal** ($R_{MÁX}$), corresponde ao recuo máximo instantâneo expectável da linha de costa quando atuada por um temporal extremo.

Apesar da componente T_{ELC} já incorporar uma influência média das tempestades para os horizontes temporais de 2050 e 2100, dado que inclui a variabilidade sazonal e interanual da linha de costa, os documentos de referência consideram que o objetivo das faixas de salvaguarda à erosão costeira é definir o potencial de extensão dos riscos costeiros numa abordagem preventiva e de precaução, dada

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

a incerteza subjacente às extrapolações efetuadas para o futuro, atendendo ao previsível agravamento da tendência erosiva em alguns setores deste litoral em cenário de alterações climáticas.

Para o cálculo do recuo máximo expectável da linha de costa em consequência de uma tempestade extrema, utilizou-se a expressão proposta por Dean *et al.* (2008):

$$R_{M\acute{A}X} = (SM + 0.068 H_b) \frac{W_b}{B + d_b} \quad (1)$$

onde,

$R_{M\acute{A}X}$ - recuo máximo expectável da linha de costa (m);

SM - sobre-elevação meteorológica (m);

H_b - altura na rebentação (m);

d_b - profundidade na rebentação (m NMM) = 1.28 H_b ;

W_b - largura do perfil ativo (m);

B - cota média da região erodida (m NMM).

O parâmetro $R_{M\acute{A}X}$ corresponde ao recuo máximo expectável do perfil de praia. Porém, na realidade, existe um desfasamento temporal entre a solicitação hidrodinâmica e a resposta morfológica, pelo que o recuo efetivamente observado (R_t) depende também da duração da tempestade e da resiliência do sistema, variáveis que a equação (1) não inclui.

Dean *et al.* (2008) apresentam soluções gráficas para incorporar os efeitos deste desfasamento no cômputo de R_t , o qual será o valor de recuo ($R_{m\acute{a}x}$) a adicionar à ($T_{ELC50/100}$).

A **erosão induzida por elevação secular do nível médio da água do mar (NMM)** ($R_{SNMM50/100}$) é dada pela aplicação da Regra de Bruun (Bruun, 1962), a qual consiste num modelo de reajustamento do perfil transversal da faixa costeira à elevação do nível de base, assumindo que determinada fração da volumetria perdida pelas praias resulta da alteração do regime sedimentar imposto pela subida do nível médio da água do mar.

Perante uma sobre-elevação do nível de base, o perfil de praia tende a responder no sentido de eliminar a variação introduzida, promovendo alimentação sedimentar da plataforma próxima

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

(totalidade da extensão do perfil ativo até à profundidade de fecho, d_c), e sedimentação a taxa igual à da alteração do nível do mar.

O recuo (R_{NMM}) é dado pela expressão:

$$R_{NMM} = \Delta_{NMM} \frac{W_c}{B + d_c} \quad (2)$$

onde,

R_{NMM} - variação secular do NMM (m);

W_c - largura do perfil ativo (até à profundidade de fecho) (m);

d_c - profundidade de fecho (m NMM);

B - cota média da região erodida (m NMM).

Considerando as incertezas que caracterizam as projeções futuras das variáveis com interesse para o dimensionamento de faixas de salvaguarda à erosão costeira, os valores de variação do NMM adotados para o cálculo do recuo (R_{NMM}) para os horizontes temporais de 2050 e 2100, de acordo com as indicações fornecidas pela APA, foram de + 0.35m e + 1.50 m, respetivamente.

A consideração de um cenário de maior precaução de subida do nível médio do mar no longo prazo (+1.5m) segue as recomendações da generalidade da comunidade científica, atendendo ao contexto de elevada incerteza que norteia as projeções de subida do nível médio do mar.

2.3. Cálculo das faixas de salvaguarda à erosão costeira

A largura final da faixa de salvaguarda à erosão costeira (Nível I) para 2050 corresponde ao somatório das três componentes descritas, dada pela expressão:

$$FSEC_{Nível I} = T_{ELC50} + R_{MÁX} + R_{NMM50}$$

A largura final da faixa de salvaguarda à erosão costeira (Nível II) para 2100 corresponde ao somatório das três componentes descritas, dada pela expressão:

$$FSEC_{Nível II} = T_{ELC100} + R_{MÁX} + R_{NMM100}$$

Nos setores em que não se identificaram tendências de recuo no passado (curto e longo prazo), a FSEC inclui as estimativas de recuo induzidas por subida do NMM e por temporal extremo.

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

[Esta página foi propositadamente deixada em branco]

3. RESULTADOS

3.1. Taxa de evolução da linha de costa (TELC)

Tendo por base a metodologia referida, a taxa de erosão anual considerada em cada perfil para o dimensionamento das faixas é a que consta dos layouts cartográficos e das tabelas respetivas.

3.2. Erosão induzida por temporal ($R_{m\acute{a}x}$)

Observações e medições efetuadas no terreno numa série de praias entre Esmoriz e Mira (CESAM/UA, 2014) na sequência dos temporais de janeiro e fevereiro de 2014 (com registos de altura de onda significativa máximos da ordem dos 14m/15m) provocaram recuos instantâneos na linha de costa da entre os 10 m a 50 m (APA, 2014).

A aplicação da equação (1) e respetiva solução gráfica à zona de Ovar – Marinha Grande, referido nos documentos em análise, conduziu a uma série de valores de recuo máximo instantâneo, em média entre os 22 e os 35m, consoante a altura na rebentação considerada (7 a 10m), a altura da berma (3 a 5m) e a duração do temporal (1 a 3 dias).

Os resultados mostram que os $R_{m\acute{a}x}$ calculados através do modelo de convolução de Dean *et al.* (2008) se enquadram, em termos médios, com os valores de recuo instantâneo referidos, medidos no terreno.

Em termos globais, neste troço costeiro, foi adotado um valor médio de recuo instantâneo associado a temporais extremos da ordem dos 30m para a totalidade do troço costeiro.

Idêntica metodologia foi aplicada para a Costa da Caparica, tendo sido obtidos valores de R entre 15 m e 21 m para um horizonte de 50 anos e entre 16 m e 24 m para o horizonte de 100 anos.

3.3. Erosão induzida por elevação secular do NMM (RNMM)

Ainda de acordo com os documentos referidos e para o trecho costeiro Ovar-Marinha Grande, da aplicação da equação 2, para uma variação de subida do NMM de + 0.35 m (50 anos) e + 1.5 m (100 anos), profundidade de fecho de -15 m (NM), larguras do perfil de praia ativo (W_c) de 2500 m a 3500

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

m e uma cota média da região erodida (B) ao longo de todo o troço de 10 m, obtiveram-se valores de R_{NMM50} entre 35 m a 49 m e R_{NMM100} entre 150 m e 210 m, valores que devem ser considerados com precaução.

Para a Costa da Caparica obtiveram-se valores de 9 m a 11 m (50 anos) e 45 m a 54 m (100 anos), considerando uma altura média de área erodida de 6.5 m a 10 m e uma largura do perfil ativo de 630 m.

4. FAIXAS DE SALVAGUARDA À EROÇÃO COSTEIRA (NÍVEL I E II)

Atendendo à metodologia descrita e aos resultados obtidos noutros casos, as faixas de salvaguarda à erosão costeira (Nível I e II) a considerar no âmbito do POC Caminha-Espinho têm as dimensões referidas nos respetivos layouts para a T_{ELC} , a que se adicionam os seguintes valores de $R_{m\acute{a}x}$ e R_{NMM} .

Quanto ao efeito dos temporais extremos, com base na informação disponível e em aplicações similares para áreas próximas, foram adotados os seguintes parâmetros:

- Sobrelevação meteorológica = 0.75 m;
- Altura de onda na rebentação = 10 m;
- Profundidade da água na rebentação = 13 m;
- Altura média de área erodida = 4 m;
- Inclinação média da praia = 0.03;
- Recuo máximo = 36,3 m

Com base nesta abordagem, propõe-se um valor de **R de 30 m para 2050 e de 35 m para 2100**, de forma a atender a um agravamento das condições de agitação marítima incidente.

Quanto ao efeito da subida do nível médio da água do mar, com base na informação disponível e em aplicações similares para áreas próximas, atendendo a que não existe informação mais objetiva e detalhada sobre alguns parâmetros, foram considerados os seguintes:

- Profundidade de fecho = 13 m a 17 m (Silva *et al.*, 2008);
- Largura do perfil ativo = 450 m a 600 m;
- Inclinação média da praia = 0,03.

Com base nesta abordagem, propõe-se um valor de **R_{NMM} de 10 m para 2050 e de 40 m para 2100**, de forma a prever algum efeito complementar aos dois anteriores referidos, numa perspetiva não excessivamente extrema, atendendo as que as previsões de subida do NMM, bem como outros fatores, têm sempre incerteza associada.

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

[Esta página foi propositadamente deixada em branco]

5. GALGAMENTO E INUNDAÇÃO COSTEIRA

O galgamento e a inundação costeira correspondem à condição de submersão pela água do mar, de forma episódica ou permanente (durante algum período de tempo), de zonas que habitualmente se encontram emersas.

A cota máxima alcançada pela superfície livre da água do mar (espraio ou espraçamento) depende, em cada perfil da linha de costa e em cada momento, da soma das seguintes componentes verticais, Figura 4:

- 1) Nível do mar, determinado pela maré astronómica (MA);
- 2) Sobre-elevação meteorológica (SM) (que inclui o *storm surge* ou *wind setup*);
- 3) *Run-up*, que inclui o *wave set-up* (sobrelevação da água devida às ondas) (S) e espraio das ondas (E).

Assim,

Cota de máximo espraio ou de inundação (ZH) = (MA + SM) + (S + E) = Nível do Mar + *Run-up*

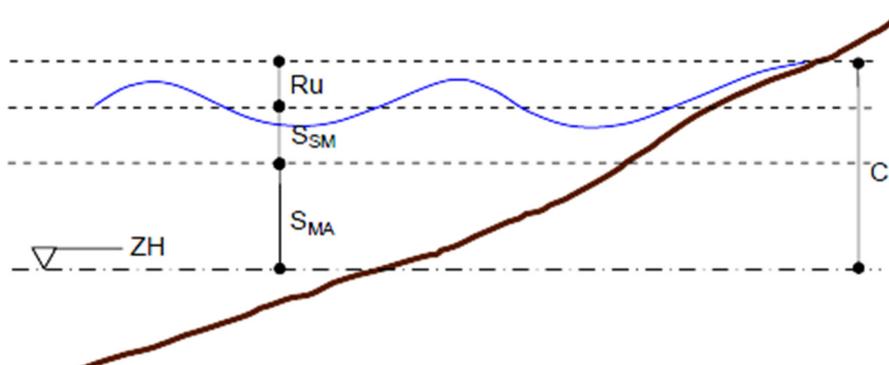


Figura 4 – Enquadramento das variáveis consideradas, Viegas e Sanchi (2005)

Outros fatores também diretamente envolvidos no processo de determinação das cotas de inundação são a morfologia costeira (em particular a batimetria), que afeta a propagação das ondas do largo até

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

à costa e, a longo prazo, dever-se-á também acrescentar o efeito da variação do nível médio da água do mar devido ao efeito das alterações climáticas.

Considera-se, assim, que o nível de água em zonas costeiras é condicionado pela maré, pela sobrelevação (fundamentalmente de origem meteorológica) e pela agitação. Com exceção da maré astronómica, todas as restantes componentes que contribuem para o galgamento aumentam de importância durante a ocorrência de eventos de tempestade e são proporcionais à sua intensidade. A maré tem origem astronómica e, por isso, pode ser estimada com rigor para a maioria dos locais.

A sobrelevação meteorológica é a diferença entre os valores reais da elevação da superfície livre observados nos marégrafos e os devidos apenas à maré. A sobrelevação meteorológica pode ser induzida quer pelo vento e variações da pressão atmosférica (*wind setup* ou *storm surge*), quer por variações (espaciais) da quantidade de movimento associada às ondas, que assume particular importância na zona de rebentação das ondas na linha de costa (*wave setup*).

A sobrelevação devida às ondas ocorre com maior significado onde a rebentação se processa suavemente, como em praias de pequeno declive, e em períodos de temporal. Por outro lado, não se consegue medir separadamente esta componente da sobrelevação provocada pelo vento e pressão atmosférica. Entende-se que a sobrelevação meteorológica é maioritariamente induzida pelo vento e pressão atmosférica.

Por último, as ondas ao atingirem a costa oscilam entre uma cota máxima (designada por espraiamento) e que interessa quantificar e um mínimo (na fase do refluxo). As condições mais favoráveis à ocorrência de galgamentos ocorrem quando existe uma coincidência temporal entre um pico de intensidade da agitação marítima e uma preia-mar de águas vivas equinocial. A probabilidade de ocorrência conjunta de valores muito elevados de todas as variáveis acima consideradas é muito pequena e tanto mais pequena quanto mais extremos forem os valores.

Por outro lado, se o comportamento da maré é, para efeitos práticos, suscetível de abordagem determinista, já o mesmo não se aplica às restantes variáveis. Tal obriga a adotar uma abordagem de natureza probabilística ao fenómeno de galgamento que considere também a variabilidade espacial imposta ao comportamento das ondas pela configuração morfológica da batimetria do fundo do mar, da zona terrestre e orientação e características da agitação marítima incidente local.

No que diz respeito à inundaçãocosteira, esta só se concretiza quando o elemento morfológico mais elevado da praia ou zona anexa é galgado pelo mar e a ação marítima persiste com intensidade e

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

duração suficientes para proporcionar a transposição de um volume de água significativo ou quando essa propagação da massa de água se dá lateralmente à linha de costa ou ocorre rotura.

A caracterização da maré é efetuada com base em séries temporais de dados de alturas de água do marégrafo mais próximo, que correspondem à soma das componentes verticais associadas à maré astronómica e à sobre-elevação meteorológica.

Existem várias metodologias para a determinação do run-up (R), nomeadamente a referida pela APA, aplicável em sistemas praia-duna e que corresponde à formulação empírica estabelecida no âmbito de trabalhos realizados em algumas praias-piloto da costa Portuguesa. Essa metodologia depende de coeficientes empíricos adimensionais locais a determinar, da altura de onda equivalente não refratada em águas profundas, do período de pico e do declive da praia.

Os valores da altura e período de onda junto à costa, a partir dos quais se podem estimar os parâmetros acima indicados, podem ser retirados da série temporal obtida através da reconstituição do regime de agitação registado na zona de rebentação através de modelação numérica e são característicos de cada setor da costa, devido à variação da sua batimetria. Em qualquer dos casos o conhecimento da agitação marítima ao largo e na costa Portuguesa está associado a um número de locais muito limitado.

A determinação objetiva do declive da praia constitui um outro obstáculo à sua aplicação, sendo tipicamente calculado considerando apenas a situação da praia em condições de agitação marítima de baixa energia. Tal procedimento tende a sobrevalorizar aquele valor, o que pode também conduzir a valores anormais do efeito deste processo costeiro, visto que o run-up em condições de tempestade se associa a valores mais reduzidos de inclinação. Daí a necessidade de se adotarem valores conservativos.

A cota de máximo espraio pode ser calculada através da soma dos valores de nível de água (medidos no marégrafo) com os valores sinópticos de run-up, obtendo-se uma série de valores horários de cotas de espraio para um perfil de praia. As séries temporais assim obtidas, são analisadas aplicando a distribuição de Gumbel aos valores máximos anuais. A aplicação deste método permite associar cotas de máximo espraio ou de inundação a períodos de retorno, para aquele perfil de praia.

A comparação entre a cota de máximo espraio e a cota da base da duna nos perfis analisados permitiu encontrar, para as praias-piloto, uma relação direta entre estas grandezas. Assim, de acordo com o documento da APA, verificou-se que, em média, a cota máxima de galgamento para o horizonte temporal de 2050 excede em 2.5 m a cota da base da duna, enquanto para o horizonte temporal de

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

2100 esta diferença toma o valor de 3 m. A relação mantém-se, independentemente do valor absoluto da cota do sopé da duna, que varia de local para local.

Posteriormente seria necessário compatibilizar esta informação com as características do perfil transversal e definir o limite físico da inundação associada a esse galgamento, o que obriga, de acordo com a metodologia apresentada pela APA a repetir esse processo para todos os perfis em análise.

Uma vez que esta metodologia só pode ser aplicada com informação de base obtida com trabalho de campo, optou-se por uma outra abordagem, que corresponde à inicialmente proposta.

Viegas e Sancho (2005) aplicaram um método simplificado, probabilístico, de determinação de regimes extremos do nível do mar (ou da cota de inundação), passível de ser aplicado à costa norte de Portugal, com base em dados de maré meteorológica e de agitação marítima.

O método é semelhante ao utilizado na costa espanhola, através do “Atlas de inundación del litoral peninsular Español”, incluído no sistema de modelação “Sistema de Modelado Costero – SMC”, desenvolvido pela Universidade de Cantábria.

O método desenvolvido para o cálculo da cota de inundação é baseado numa série de hipóteses:

- A maré astronómica é uma série temporal “conhecida”, determinada a partir da análise harmónica;
- A maré e a sobrelevação meteorológica são variáveis independentes;
- A maré e a altura de onda significativa são variáveis independentes;
- A sobrelevação meteorológica e altura de onda significativa estão relacionadas entre si;
- O período de pico e a altura de onda significativa estão relacionados entre si.

O procedimento para o cálculo do regime de extremos da cota de inundação considera para cada ano o valor máximo da cota de inundação.

Viegas e Sancho (2005) apresentam cotas de inundação médias associadas ao regime médio e de extremos do nível do mar junto à costa, considerando dois tipos de praia: uma dissipativa e outra refletiva.

Os resultados mostram que, para uma praia dissipativa e para as três direções de agitação consideradas (SW, W e NW) ocorrem em média valores superiores a 6 m durante 10 horas por ano. Resulta ainda que, para a praia dissipativa, existe pouca diferença da direção de onda nos resultados

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

da cota de inundação. Para a praia refletiva, os resultados obtidos indicam cotas de inundação superiores às de uma praia dissipativa, ocorrendo níveis superiores a 10m durante 10 horas por ano.

A diferença de comportamento da praia dissipativa versus a refletiva deve-se à diferença dos níveis de espraiamento devido ao declive da praia. Na realidade, uma dada praia (de declive fixo) pode mudar de comportamento dissipativo ou refletivo em função da agitação marítima incidente. A caracterização do tipo de praia para cada onda, poderia conduzir a menores diferenças (e valores mais realistas) das cotas de inundação em praias predominantemente dissipativas ou refletivas (em função do seu declive e/ou velocidade de queda dos sedimentos). Face ao exposto, os resultados apresentados para uma “praia refletiva” deverão ser encarados com alguma reserva, pois na verdade a maioria das praias da costa continental portuguesa tem um declive inferior a 1:10.

Os resultados para o regime de extremos são apresentados somente para a praia dissipativa. Os resultados indicam valores entre 5.8 e 7 m, aproximadamente, para as cotas de inundação com probabilidade de ocorrência correspondentes a períodos de retorno entre 1 e 30 anos. Para o período de retorno de 10 anos, a cota de inundação estimada varia entre 6.4 e 6.7 m, em função da direção de onda. De referir também os intervalos de confiança de 95% apresentados, que representam alguma da incerteza associada à determinação destas cotas de inundação.

Verifica-se ainda que se obtêm, para o regime de extremos, valores mais elevados das cotas de inundação para ondas provenientes de Oeste. Tal deve-se às características do clima de agitação, determinadas para essa direção, que por um lado são mais severas que para SW e, por outro, as ondas sofrem menos o efeito da refração que as ondas de NW.

Para a aplicação ao trecho Caminha-Espinho foi efetuada uma extrapolação do rumo de W, a partir do período de retorno aproximado de 20 anos e para 35 anos (2050) e 85 anos (2100), respetivamente, incluindo também as estimativas para a subida do nível médio da água do mar (0.35 m para 2050 e 1.50 m para 2100). Assim obtiveram-se para 2050 e 2100 as seguintes cotas médias de inundação: 7.60 m (ZH) e 9.06 m (ZH), respetivamente.

De referir que outros rumos de agitação marítima poderão pontualmente induzir níveis de inundação mais elevados, que seriam depois atenuados ao longo da propagação da massa de água para o interior, tendo-se por isso optado, nesta abordagem, por considerar um valor médio associado à orientação de W.

PROGRAMA DA ORLA COSTEIRA CAMINHA-ESPINHO

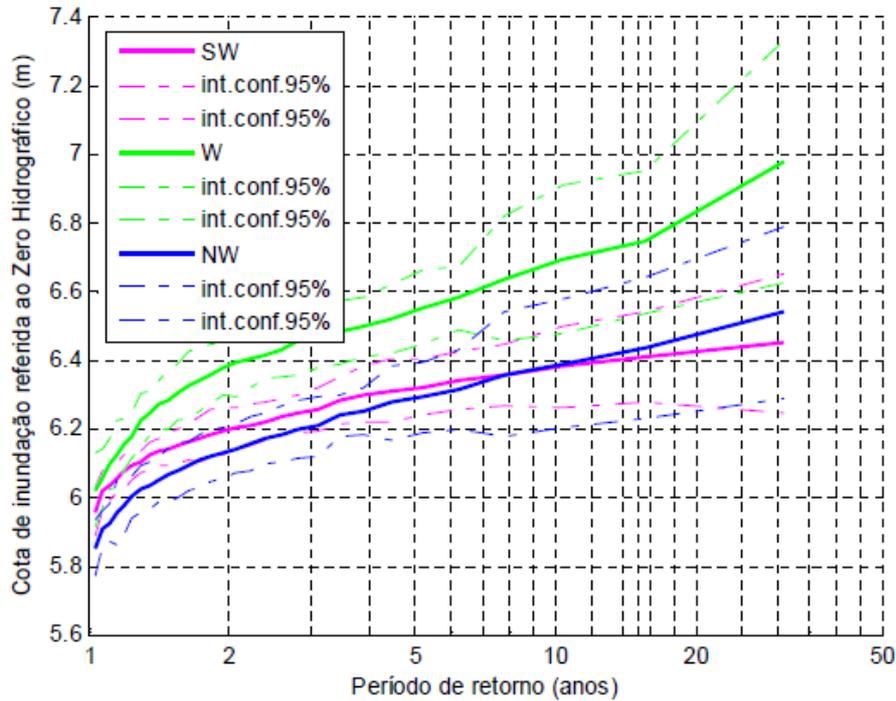


Figura 5 – Regime de extremos de cota de inundação, Viegas e Sancho (2005)

Estas cotas de inundação foram aplicadas ao modelo altimétrico da zona costeira (LIDAR) que permitiu identificar zonas vulneráveis ao galgamento, diretamente a partir da linha de costa, indiretamente a partir de zonas anexas mais vulneráveis ou após rotura da própria linha de costa. Esta informação pode ser cruzada com a localização dos eventos de galgamento e inundação, resultantes de eventos extremos recentes (2014), comprovando esta metodologia de definição de faixas de salvaguarda, apenas consideradas até ao limite da Zona Ameaçada pelo Mar (ZAM) que corresponde ao efeito conjunto da ação dos temporais e da subida do nível médio da água do mar previstas para 2050 e 2100.

No contexto da definição destas faixas de salvaguarda e do seu enquadramento em relação à Zona Ameaçada pelo Mar, independentemente de outras definições, considera-se que refletem a avaliação espacial de uma potencial ameaça (ação negativa sobre a zona costeira) com um certo nível de perigosidade (materialização da ameaça: galgamento e inundação), cuja quantificação não vai para além dos períodos de retorno associados e dessa mesma espacialização. Paralelamente e em consonância com essa avaliação há um risco associado, não quantificado pois isso exigiria uma análise detalhada das possíveis consequências (perdas, prejuízos, danos, etc).