

# AVALIAÇÃO DA SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS E TÉCNICAS DE TRANSPOSIÇÃO E REUTILIZAÇÃO DOS SEDIMENTOS

## Evaluation of the Sedimentation of Reservoirs and Techniques of Transposition and reutilization of the Sediments

LUÍSA FERNANDES LAMEIRO <sup>(1)</sup> e FRANCISCO TAVEIRA-PINTO <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Mestre em Engenharia Civil, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, ec04114@fe.up.pt

<sup>(2)</sup> Professor Associado com Agregação, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, ec04114@fe.up.pt

### Resumo

O presente trabalho pretende abordar o processo de sedimentação em albufeiras nomeadamente, a teoria em que assenta o transporte sedimentar, as metodologias de determinação da quantidade de sedimentos depositados e as diversas técnicas de remoção dos sedimentos depositados.

Descrevem-se as alterações no transporte sedimentar fluvial induzidas pela construção de barragens nos principais rios Portugueses. Analisa-se, com base nos valores dos volumes mortos, a actual situação de 166 albufeiras Portuguesas, quanto à deposição de sedimentos, a fim de obter uma ordem de grandeza dos sedimentos disponíveis e pré-seleccionar as albufeiras que poderiam vir a integrar um projecto de aproveitamento dos sedimentos para alimentação de praias.

Este trabalho foi desenvolvido como um ponto de partida com o objectivo de poder ser implementado um esquema nacional de aproveitamento dos sedimentos, que se consideram ser uma mais-valia para a economia do país e que se encontram hoje na sua grande maioria desaproveitados.

**Palavras-chave:** Erosão, deposição; extracção; tratamento; transporte.

### Abstract

This work aims to describe the sedimentation process in reservoirs namely, the theory that underlies the sediment transport, the methodologies for determining the amount of sediments deposited in reservoirs and the various techniques for removal of deposited sediments.

The changes in fluvial sediment transport induced by the construction of dams on major Portuguese rivers are described. Based on the values of dead volumes, the current situation of 166 Portuguese reservoirs is analysed in order to obtain an order of magnitude of the sediments available and pre-select the reservoirs that could potentially integrate a project for artificial sand nourishment of beaches.

This work was carried out as a starting point, in order to implement a national plan for the exploitation of sediments considered to be an "added - value" to the economy and that are today, in general unexploited.

**Keywords:** Erosion, deposition; extraction ; treatment; transport.

### 1. Introdução

A erosão costeira compromete o futuro das populações que se fixaram no litoral, e portanto, reveste-se de grande urgência e interesse geral, procurar uma solução que permita controlar esse efeito da melhor forma possível.

A construção de barragens nas redes fluviais, embora represente um papel de grande relevo na produção de energia, em Portugal, despoletou a retenção a montante de um volume de sedimentos que iriam alimentar as praias, contribuindo para o agravamento da erosão costeira e ainda para a redução do volume de armazenamento de água disponível para a regularização dos rios.

As albufeiras poderão, assim, armazenar volumes significativos de cascalho, areia, silte, argila e matéria orgânica. Contudo os sedimentos transportados pelo rio não devem ser encarados unicamente como um problema, uma vez que estes representam também um papel importante em diversas áreas, como na alimentação de praias e na construção civil.

Interessa, então, procurar meios de remoção dos sedimentos que se depositam nas albufeiras e, de forma complementar, meios de fornecer sedimentos às praias que se encontram em risco, devido à agressiva erosão costeira que se tem feito sentir.

## 2. Processos de Sedimentação

### 2.1. Introdução

Um escoamento superficial estabelece-se quando a intensidade da chuva se sobrepõe à capacidade de infiltração da água no solo. Os materiais levantados pelo impacto das gotas são transportados ao longo das encostas por este escoamento que tem também um certo poder erosivo, tanto maior quanto maior for a altura da água e a inclinação do terreno.

Do material transportado pelo escoamento superficial, apenas uma parte atingirá as linhas de água, ficando o restante retido pelo percurso.

### 2.2. Ao longo de um curso de água

A erosão, o transporte e a deposição variam ao longo de um curso de água, em função da inclinação do leito e do caudal, no entanto, o transporte efectivo pode estar limitado pela quantidade local de sedimentos transportáveis fornecidos pela bacia hidrográfica.

Os quatro processos típicos que poderão caracterizar as secções dum curso de água desde a nascente até à foz são:

- **Erosão:** Enquanto o rio puder transportar mais sedimentos do que a bacia associada pode fornecer, o escoamento na linha de água terá energia suficiente para continuar a escavar o próprio leito. As rochas que geralmente constituem o leito do rio nestas zonas controlam a forma deste e a sua inclinação.
- **Transporte:** A capacidade de transporte do rio iguala o abastecimento de sedimentos pela bacia. Todos os novos sedimentos que chegam são imediatamente transportados e o rio apresenta um leito estável.
- **Deposição:** O rio não consegue transportar todo o material que é fornecido pela bacia. O material que não é transportado deposita-se formando canais e ilhas. O leito do rio é instável e terá tendência para subir de nível.
- **Desenvolvimento de deltas:** A capacidade de transporte é baixa comparada com o abastecimento. A deposição de sedimentos contrai o canal do rio e desenvolvem-se novos canais (suplementares ou substituintes). Este processo ocorre, geralmente, na foz do rio que assume a forma de leque ou triângulo (a forma da letra grega maiúscula com o mesmo nome ( $\Delta$ ), Figura 1), Lysne *et al.* (2003).

Enquanto que, da nascente à foz, a capacidade de transporte de um curso de água se vai reduzindo, acompanhando a evolução da inclinação do leito, a quantidade de sedimentos fornecidos vai aumentando, acompanhando a evolução da área da bacia hidrográfica.

Será, portanto, de esperar encontrar as quatro condições, acima descritas, consecutivamente desde a nascente até à foz. Observando a Figura 1, esperar-se-ia encontrar erosão na secção B-B', transporte na zona ramificada e deposição a jusante da zona ramificada até ao delta, Lysne *et al.* (2003).

As condições existentes num dado curso de água, podem ser modificadas, por vezes, por obras que não têm sequer essa finalidade.

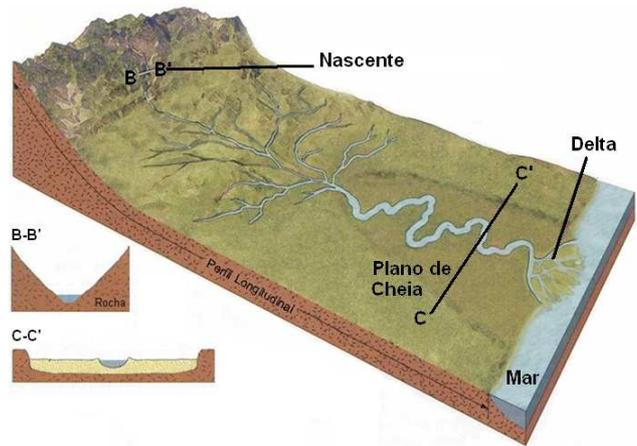


Figura 1. Perfil Longitudinal de um curso de água (adaptado de [http://sites.google.com/site/geologiaebiologia/\\_/rsrc/1219775711387/Home/geologia-problemas-e-materiais-do-quotidiano/bacias-hidrogr%C3%A1ficas/](http://sites.google.com/site/geologiaebiologia/_/rsrc/1219775711387/Home/geologia-problemas-e-materiais-do-quotidiano/bacias-hidrogr%C3%A1ficas/)).

### 2.3. Numa albufeira

A construção de uma barragem, modifica as condições de transporte de sedimentos, representando, usualmente, uma quebra na repetição da sequência normal de erosão, transporte e deposição, com formação de deltas na extremidade a montante da albufeira, assoreamento desta e erosão a seguir à restituição, da qual é exemplo a Figura 2, Lysne *et al.* (2003).

No dimensionamento de uma albufeira de regularização é, assim, necessário reservar espaço para a deposição de sedimentos, o volume morto, que é determinado em função do regime de transporte sólido do rio e da vida útil da obra, Lencastre e Franco (2006).



Figura 2. Padrão típico de deposição dos sedimentos nas albufeiras ([http://www.dha.lnec.pt/nre/english/projects/sedim\\_eng.html](http://www.dha.lnec.pt/nre/english/projects/sedim_eng.html)).

A deposição da maioria dos sedimentos ocorre na albufeira a montante, no volume de armazenamento útil e não no volume morto (volume abaixo da cota mínima da tomada de água).

Após a deposição, os materiais grosseiros apresentam muito maior estabilidade, com a manutenção das suas características no tempo e com uma difícil movimentação posterior.

Pelo contrário, os depósitos de sedimentos finos apresentam uma evolução nas suas propriedades, sofrendo compactação ao longo do tempo, podendo as camadas superficiais ser colocadas novamente em suspensão, muito mais facilmente.

### 3. Metodologias de Avaliação da Sedimentação nas Albufeiras

#### 3.1. Introdução

Existem três metodologias que permitem avaliar a deposição de sedimentos numa albufeira:

- Modelos matemáticos e físicos;
- Amostragem de sedimentos e medição de caudais;
- Levantamentos batimétricos.

Os modelos matemáticos e físicos são mais vocacionados para a utilização durante a fase de projecto de uma barragem permitindo estimar o volume da sedimentação no ano horizonte de projecto. A amostragem de sedimentos e medição de caudais assim como os levantamentos batimétricos são mais adequados para avaliação da sedimentação ao longo da operação, pois permitem atender à evolução temporal da deposição.

#### 3.2. Modelos matemáticos e físicos

Se não houver uma rede de medição, a estimativa dos sedimentos afluentes a uma secção de um curso de água pode ser feita de um modo teórico através do cálculo da erosão específica (por unidade de área e intervalo de tempo), cujo valor permite, depois de multiplicado pela área da bacia e pelo intervalo de tempo desejado, a obtenção da quantidade total de sedimentos erodidos e transportados.

Um exemplo deste tipo de metodologia é a equação universal de erosão do solo (Eq. [1]), deduzida empiricamente pelo "United States Soil Conservation Service", a partir de cerca de 10000 medições realizadas nas mais diversas condições de solos e chuvadas:

$$A = RKLSCP \quad [1]$$

em que  $A$  representa a perda de solo em toneladas por hectare e por ano,  $R$  o factor energético da chuva,  $K$  o factor de erodibilidade do solo,  $L$  o factor de comprimento,  $S$  o factor de inclinação,  $C$  o factor de técnica cultural e  $P$  o factor de práticas de conservação, Lencastre e Franco (2006).

#### 3.3. Amostragem de sedimentos e medição de caudais

A quantidade de sedimentos transportada num curso de água pode também ser determinada medindo a concentração de sedimentos transportados pelo rio sob vários regimes de escoamento e estabelecendo uma correspondência entre a concentração de sedimentos e a velocidade do escoamento medidas ao mesmo tempo e no mesmo local de um curso de água. As amostras dos sedimentos em suspensão podem ser recolhidas com o amostrador de Nilsson, Figura 3, baixando-o até ao leito e elevando-o até à superfície a uma velocidade constante.



Figura 3. Amostrador de Nilsson para recolha de sedimentos transportados em suspensão (<http://lindorm.com/products/nilsson.php>).

Se existirem amostras suficientes, é possível aplicar a Eq. [2] a fim de determinar a quantidade de sedimentos transportados em suspensão,  $Q_s$ , que passa na secção durante o tempo de recolha da amostra, em que  $C$  representa a concentração dos sedimentos transportados em suspensão e  $u$  a velocidade média medida no mesmo local de recolha da amostra.

$$Q_s = \int^A C(y, z)u(y, z)dzdy \quad [2]$$

Os sedimentos transportados por arrastamento junto ao leito podem ser recolhidos com o amostrador que se apresenta na Figura 4 colocando-o sobre o leito do rio na direcção da corrente e com a abertura para montante durante um determinado intervalo de tempo.

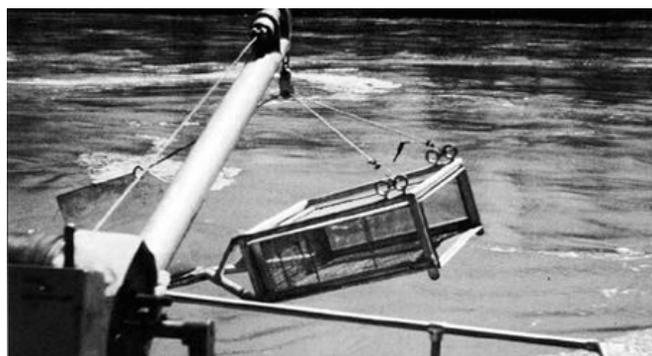


Figura 4. Amostrador para recolha de sedimentos transportados por arrastamento junto ao leito ([http://www.ec.gc.ca/Water/en/nature/sedim/e\\_bed.htm](http://www.ec.gc.ca/Water/en/nature/sedim/e_bed.htm)).

A fórmula de Einstein, Eq. [3], é um exemplo das fórmulas que se desenvolveram para a determinação da quantidade de sedimentos transportados por arrastamento,

$$q_{sa} = wd40 \left( \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma_w)d} \right)^3 \quad [3]$$

em que  $w$  representa a velocidade de queda das partículas,  $d$  o diâmetro das partículas em milímetros,  $\gamma_s$  e  $\gamma_w$ , respectivamente, o peso volúmico dos sedimentos e da água.

#### 3.4. Levantamentos batimétricos

O sistema utilizado actualmente para a realização dos levantamentos batimétricos combina, em tempo real, as medidas de posicionamento, determinadas através do GPS e as leituras de profundidade determinadas pelas sondas hidrográficas, permitindo estimar as superfícies do fundo das albufeiras. Na Figura 5 pode ver-se o equipamento que o INAG (Instituto Nacional da Água) possui para a realizar este tipo de levantamentos.



Figura 5. Equipamento do INAG (Álvares et al. (2000)).

### 3.5. Curva de Brune

Enquanto que os levantamentos batimétricos permitem determinar directamente a quantidade de sedimentos depositados através da comparação com levantamentos anteriores, as duas primeiras metodologias fornecem informação acerca da quantidade de sedimentos transportados e a quantidade desses sedimentos que se deposita pode ser determinada por aplicação da curva de Brune, Figura 6.

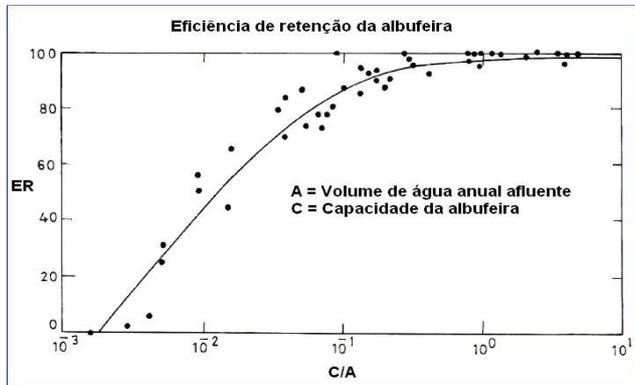


Figura 6. Curva de Brune (Støle (2008)).

A curva de Brune é um método muito utilizado para determinar a eficiência de retenção de uma albufeira, ER, em função da sua capacidade, C, e do volume de água anual afluente, A. Esta curva mostra que quanto maior é a capacidade de regularização de uma albufeira maior é a sua eficiência de retenção de sedimentos. Deste modo, a eficiência de retenção de uma albufeira diminui com o tempo, à medida que a respectiva capacidade se reduz, Støle (2008).

## 4. Metodologias de Controlo, Extracção e Tratamento

### 4.1. Introdução

A prevenção da sedimentação das albufeiras através de qualquer método é técnica e economicamente mais eficaz do que as técnicas utilizadas para remover os sedimentos depois da sua deposição e consolidação, Batuca e Jordaan (2000). O planeamento do tratamento dos sedimentos deverá ser efectuado antes mesmo da sua extracção, uma vez que, podendo representar custos muito variáveis, o tratamento poderá inviabilizar todo o projecto de reaproveitamento.

### 4.2. Metodologias de controlo

#### 4.2.1. Introdução

O controlo da deposição de sedimentos deverá ser um dos principais objectivos dos engenheiros responsáveis, quer pelo planeamento e projecto, quer pela operação das barragens, com vista a preservar e estender, se e quando possível, a vida útil das albufeiras, e a reduzir os efeitos adversos. Os impactos ecológicos graves, como o baixo conteúdo de sedimentos na água restituída a um rio a jusante de uma barragem, deveriam ser considerados com custos elevados na análise de custos-benefícios dos projectos das grandes barragens.

Portanto o recurso a sistemas de manutenção do transporte de sedimentos num rio, transferindo para jusante da barragem parte do caudal sólido, representaria um ganho na globalidade dos custos indirectos de um projecto.

#### 4.2.2. Minimização dos sedimentos afluentes

A minimização da afluência de sedimentos a uma albufeira pode ser obtida através de um sistema de desvio dos sedimentos transportados pelo rio para um ponto a jusante da barragem, utilizando um esquema de "bypass" em alternativa à albufeira.

Este sistema constitui uma solução não só para o problema da deposição de sedimentos nas albufeiras mas também para o problema da erosão que se faz sentir nos troços dos rios a jusante das barragens. Esta alternativa compreende os seguintes trabalhos hidráulicos no rio:

- Barragens secundárias de retenção dos sedimentos a montante da albufeira principal;
- Estruturas de desvio dos sedimentos;
- Estruturas de restituição directamente a jusante da barragem principal.

Quando devidamente projectadas, estas estruturas são muito eficientes, podendo, no entanto, aparecer algumas dificuldades durante a operação que aumentam o custo de manutenção destes sistemas, como por exemplo o preenchimento das estruturas de desvio pelos sedimentos e detritos. As estruturas de desvio podem ser de diversos tipos. Nas Figuras 7 e 8 pode ver-se respectivamente uma solução de desvio em canal aberto, no rio Colorado, nos Estados Unidos e em galeria, no rio Reuss, na Suíça, que são dois exemplos de estruturas de desvio distintas.



Figura 7. All-American Canal, no rio Colorado, no estado da Califórnia nos EUA ([http://www.allposters.co.uk/-sp/The-All-American-Canal-as-the-Blazing-Sun-Sets-in-the-West-near-Yuma-Arizona-Posters\\_i3991549\\_.htm](http://www.allposters.co.uk/-sp/The-All-American-Canal-as-the-Blazing-Sun-Sets-in-the-West-near-Yuma-Arizona-Posters_i3991549_.htm)).

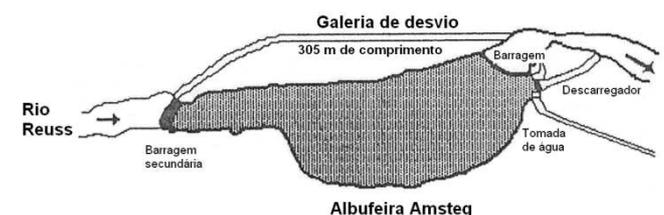


Figura 8. Sistema de passagem de sedimentos com galeria de desvio na albufeira Amsteg, no rio Reuss, na Suíça (adaptado de Batuca e Jordaan (2000)).

#### 4.2.3. Minimização da deposição de sedimentos

A minimização da deposição de sedimentos nas albufeiras, proporcionando-lhes a passagem para jusante da barragem o mais rapidamente possível, antes de se depositarem e consolidarem, é uma das formas mais eficientes e em determinados casos, mais económicas, de preservar a capacidade de armazenamento das albufeiras. As duas principais técnicas de minimização da deposição de sedimentos são:

- A passagem dos sedimentos (“sluicing”);
- A passagem das correntes de turbidez.

A passagem dos sedimentos (“sluicing”) consiste em manter o volume de sedimentos afluente em suspensão descarregando a grande maioria através da barragem antes de se poderem depositar no fundo da albufeira, reduzindo assim a eficiência de retenção da albufeira e armazenando somente a água praticamente livre de sedimentos.

As concentrações de sedimentos transportados pela corrente tendem a variar muito durante uma única cheia, porque a precipitação inicial, especialmente depois de uma época de secas, encontra mais material transportável do que as precipitações subsequentes. Na maioria dos casos o nível de água é mantido baixo durante a época das cheias, de forma a proporcionar uma suficiente capacidade de transporte através da albufeira. Depois da época das cheias o nível de água é elevado para a armazenar de forma relativamente clara, Mahmood (1987), referido por Batuca e Jordaan (2000). O sucesso da descarga das primeiras cheias depende do seguinte:

- Excesso de afluência de água suficiente para descarregar sedimentos;
- Descarregador com abertura de capacidade adequada e localizado de preferência próximo do nível do leito original;
- Albufeira com configuração estreita do início ao fim (tipo 4 - vale encaixado, Figura 9);
- Rio com transporte sobretudo de sedimentos em suspensão;
- Regime hidrográfico previsível com confiança no local da barragem, a fim de encher a albufeira a tempo depois da operação dos descarregadores.

As correntes de turbidez são correntes densas e estratificadas com sedimentos em suspensão. A passagem destas correntes pode ser um método eficiente na redução da sedimentação nas albufeiras, no entanto só é aplicável quando e onde tais correntes de turbidez ocorrem, utilizando a sua elevada capacidade de transporte para passar os sedimentos através da albufeira para jusante da barragem.

As condições favoráveis à ocorrência de correntes de turbidez são:

- Rio com características adequadas, tais como elevada inclinação do leito e caudais afluentes com grandes concentrações de sedimentos;
- Albufeira com morfologia adequada (estreita, configuração tipo 4 - vale encaixado, Figura 9, fundo inclinado);

- Hidráulica da albufeira adequada (elevadas profundidades e reduzidas velocidades de escoamento).

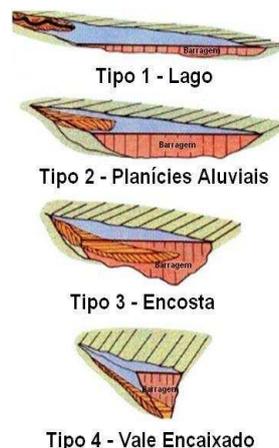


Figura 9. Diferentes formas de albufeiras (adaptado de Støle, 2008).

Quando as correntes de turbidez ocorrem, elas movem-se graviticamente ao longo da albufeira até ao local da barragem subindo até uma determinada altura e depois caem, Figura 10. Caso a estrutura da barragem incluía descarregadores ou uma cortina, então as correntes de turbidez podem ultrapassar a barragem eficazmente, Figura 11, Batuca e Jordaan (2000).

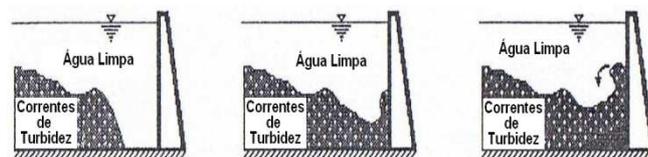


Figura 10. Movimento das correntes de turbidez numa albufeira (adaptado de Batuca e Jordaan (2000)).

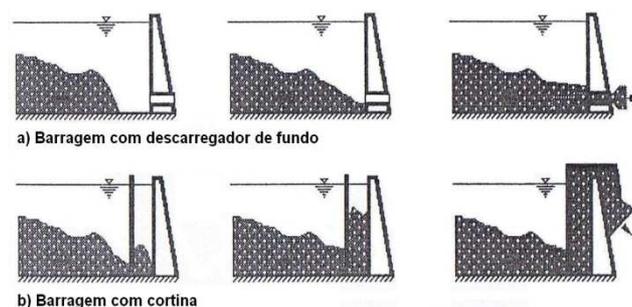


Figura 11. Passagem das correntes de turbidez através da barragem (adaptado Batuca e Jordaan (2000)).

### 4.3. Metodologias de extracção

#### 4.3.1. Introdução

As medidas para controlar a deposição, ou porque nem sempre são aplicadas, ou porque podem não ser suficientemente eficazes podem permitir a deposição dos sedimentos e o potencial destes para serem reutilizados conduz à necessidade de saber como os remover das albufeiras.

As principais técnicas de remoção podem agrupar-se de acordo com o tipo de sedimentos, como mostra o Quadro 1.

Quadro 1. Principais técnicas de remoção dos diferentes tipos de sedimentos (adaptado de Sánchez, 2008).

Cascalho e Areia	Silte e Argila	
Dragagem	Lavagem	Dragagem

Por vezes estas técnicas são aplicadas em conjunto de forma a melhorar reciprocamente a sua eficiência.

#### 4.3.2. Lavagem (“flushing”)

A lavagem (“flushing”) é uma técnica operacional em que a velocidade do escoamento na albufeira é aumentada até que os sedimentos depositados são novamente mobilizados sendo transportados através dos descarregadores. Em muitos casos a passagem dos sedimentos e a lavagem são utilizadas em combinação ou alternadamente, Basson e Rooseboom (1999).

Geralmente, no final da época de secas e antes do início da época de cheias, as albufeiras ainda armazenam um volume de água considerável que pode ser utilizado para lavar os sedimentos previamente depositados, Figura 12.

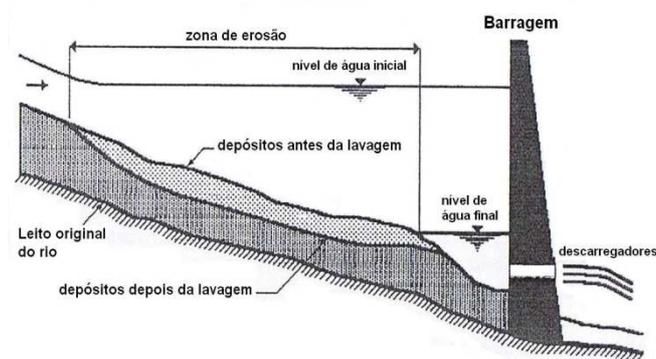


Figura 12. Lavagem de sedimentos, (adaptado de Batuca *et al.*, 2000).

Em regiões áridas e semi-áridas as operações de lavagem resultam frequentemente em grandes e inaceitáveis perdas de água.

Portanto, quer a passagem de sedimentos, quer a lavagem aumentam o risco de falha no abastecimento de água durante os períodos hidrológicos críticos (Brabben, 1988; White e Bettes, 1984, referido por Basson e Rooseboom, 1999).

Não é possível descarregar as albufeiras de armazenamento inter-anual ou quando não podem ser toleradas interrupções periódicas na utilização (White e Bettes, 1984, referido por Basson e Rooseboom, 1999). Em tais casos os riscos podem ser reduzidos operando as albufeiras em combinação umas com as outras (Basson e Rooseboom, 1999).

#### 4.3.3. Dragagem

Qualquer operação de dragagem, mecânica ou hidráulica, consiste em três componentes principais: escavação, transporte e depósito dos sedimentos.

A dragagem mecânica pode ser realizada de forma similar a qualquer trabalho de movimentação de terras com recurso a escavadoras e camiões ou pode realizar-se com recurso a dragas para trabalho subaquático. O “bucket-wheel” é um exemplo deste tipo de equipamento, Figura 13.



Figura 13. Bucket-wheel (<http://www.gendredge.com/nigeria/bucket.php>).

## 4.4. Tratamento

Os sedimentos do fundo das albufeiras são reconhecidos como locais preferenciais de deposição de materiais orgânicos e minerais, em particular, nutrientes, metais pesados e bactérias, considerados no seu conjunto como fontes poluentes.

Com vista à alimentação artificial de praias será mais importante avaliar as concentrações de metais presentes nos sedimentos do que o conteúdo em matéria orgânica, uma vez que este pode até ser favorável quando a areia é aplicada em cordões dunares criando condições para o desenvolvimento de vegetação.

O processo de tratamento dos sedimentos removidos das albufeiras, a fim de os preparar para os seus diversos fins pode dividir-se em duas fases distintas:

- Distribuição granulométrica;
- Descontaminação.

A distribuição granulométrica é geralmente obtida por peneiração. Para a alimentação de praias a fracção requerida corresponde à fracção de areia (dimensões entre 0,075mm, #200 e 4,75mm, #4), a granulometria deverá ser o mais próxima possível da granulometria da praia a alimentar. As praias alimentadas com granulometrias mais elevadas serão mais estáveis mas mais declivosas, induzindo novos perfis com possíveis implicações ao nível de comodidade e segurança balnear. Praias alimentadas com granulometrias menores são potencialmente mais instáveis e por conseguinte os volumes colocados tenderão a ser levados mais rapidamente pela acção do mar

Tem sido genericamente aceite que as partículas poluídas se concentram na fracção mais fina dos sedimentos, Colandini (1997), Lee *et al.* (1997), Zanders (2005), referido por Pétavy *et al.* (2008). Contudo, estudos recentes, referem que os metais não se fixam a uma fracção de sedimentos específica, Durand (2003), Clozel *et al.* (2006), referido por Pétavy *et al.* (2008). Será, portanto conveniente confirmar sempre a necessidade de descontaminação através de análises químicas, antes de se proceder ao transporte dos sedimentos para aplicação nas praias. A necessidade de descontaminação de areias representa um grande custo num projecto de reaproveitamento de sedimentos para alimentação artificial de praias podendo até inviabilizar todo o projecto e portanto deverá ser bem avaliado.

Contudo, geralmente, este processo de descontaminação pode ser dispensado relativamente à fracção mais grossa, sendo, nesse caso, o processo de tratamento dos sedimentos removidos das albufeiras ilustrado pela Figura 14.

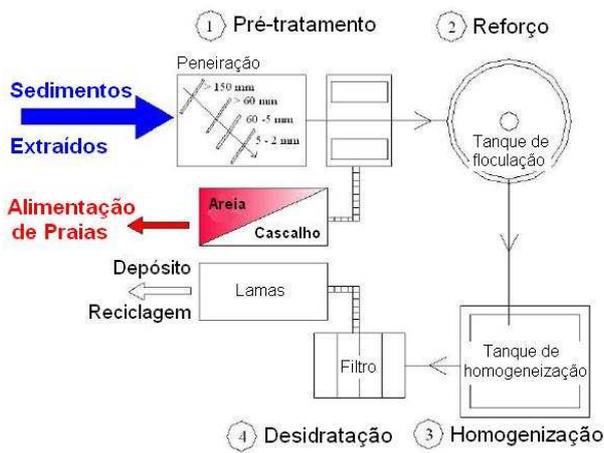


Figura 14. Esquema do processo geral de tratamento dos sedimentos removidos das albufeiras com vista ao seu reaproveitamento (adaptado de V. Sánchez, 2008).

## 5. Enquadramento e Análise do Caso Português

### 5.1. Introdução

O fenómeno natural de erosão foi transformado num problema de intensidade crescente pela intervenção humana sobre as zonas costeiras, na medida em que as zonas de baixa altitude, que eram naturalmente capazes de se adaptar às variações no nível médio da água do mar, às tempestades e marés, hoje em dia perderam essa capacidade devido à fixação da linha de costa por estradas, urbanizações, parques de recreio, zonas industriais, entre outras infraestruturas e ocupações.

Sendo a construção das barragens apontada como uma das principais causas para a redução do transporte sedimentar nos rios, foi estimado que essa redução em Portugal ascende a cerca de 80%, Fonseca (2002).

Em 2008, investiram-se 7 579 000 € em obras de defesa costeira, em Portugal continental, Maia (2009). Um projecto de reaproveitamento dos sedimentos depositados nas albufeiras para alimentação artificial de praias pode representar custos elevados, contudo, na avaliação da viabilidade destes projectos, será necessário ter presente a dimensão dos investimentos necessários quer na implementação de soluções alternativas quer na sua manutenção uma vez que a reparação e adaptação de obras de defesa costeira têm representado uma grande parte destes investimentos.

### 5.2. Enquadramento do problema em Portugal

Em Portugal é muito frequente a ocorrência de incêndios que adquirem graves dimensões durante o Verão, devastando por completo a vegetação em áreas com dimensões preocupantes podendo, assim, contribuir para um aumento da afluência de sedimentos aos cursos de água.

A principal direcção do transporte de sedimentos na costa atlântica portuguesa é de norte para sul. De forma a dar uma ideia da capacidade de transporte do mar, algumas referências indicam que é próxima de 1 000 000 m<sup>3</sup>/ano desde a foz do Douro até à Nazaré, Veloso Gomes *et al.* (2006b).

Em 1930, anteriormente à construção das barragens a afluência de sedimentos à costa norte portuguesa era de aproximadamente 2 000 000 m<sup>3</sup>/ano, com o próprio rio Douro a garantir 90% deste valor (Plano Nacional da Água, 2001). Hoje em dia o rio Douro só contribui com uma pequena quantidade, estimada em 250 000 m<sup>3</sup>/ano, como resultado da construção de barragens que têm reduzido a velocidade de escoamento e consequentemente a capacidade de erodir o leito do rio. A par disto, existe uma quantidade significativa de areia extraída para uso na construção civil, dragada do leito do rio em diversos lugares e em quantidades para além do que seria sustentável, Veloso Gomes *et al.* (2006a). As taxas médias de sedimentação calculadas no período de 1983-1984, no estuário do Tejo, apontam para valores de 1,1 a 1,5 cm/ano. Durante a construção da Ponte Vasco da Gama dragaram-se no Tejo cerca de 1 milhão de m<sup>3</sup> de sedimentos que estavam, em parte, contaminados, PNA (2002).

No Guadiana uma consequência da redução de caudais, induzida pela perda hidrológica e regularização decorrente do enorme armazenamento instalado (70,4% da bacia dominada em 1990), é a diminuição do fornecimento sedimentar, também às zonas costeiras adjacentes, PNA (2002). Em Portugal reconhece-se a importância da avaliação do assoreamento das albufeiras, e das suas consequências, assim como a necessidade da existência de um corpo permanente que se ocupe da sua análise.

Desde 1996, que o Instituto da Água (INAG) tem vindo a reestruturar as redes de monitorização de recursos hídricos, incluindo a rede sedimentológica. A nova rede sedimentológica compreende estações em cursos de água, onde serão efectuadas amostragens de caudal sólido e de granulometria de fundo, e estações em albufeiras onde serão realizados levantamentos batimétricos. Na Figura 16 apresenta-se a localização das estações da nova rede sedimentológica, classificadas por tipo de estação, Álvares *et al.* (2001).



Figura 15. Mapa das estações da nova rede sedimentológica de Portugal, Álvares *et al.* (2001).

Como a rede está em implementação ainda não se conhecem os dados obtidos.

### 5.3. Estimativa e análise da sedimentação actual nas principais albufeiras portuguesas

Apesar do esforço que está a ser feito no sentido de colmatar a falta de informação relativa ao transporte de sedimentos em Portugal, o volume de sedimentos depositado nas albufeiras permanece, nos dias de hoje, desconhecido e consequentemente também a real capacidade das albufeiras Portuguesas.

Há falta de informação acerca da sedimentação e portanto os dados que constituem a base deste estudo provêm do inventário de barragens Portuguesas feito pelo INAG. As barragens presentes no inventário do INAG e portanto também objecto do presente estudo são genericamente barragens que obedecem ao critério de ter mais de 15 metros de altura, ou de ter mais de 1 milhão de m<sup>3</sup> de capacidade total de armazenamento.

Através, principalmente, dos valores apresentados pelo INAG para os volumes mortos e com recurso pontual a informação relativa à taxa de assoreamento retirada de outra referência (Lencastre e Franco, 2006), foi feita uma tentativa de determinar valores que, de alguma forma, possam reflectir a situação actual da sedimentação em Portugal. No cálculo considerou-se o volume morto de cada barragem, definido aquando da fase de projecto, como sendo o real volume de sedimentação actual verificado na albufeira com 50 ou mais anos de vida:

$$Volume_{Sedimentação} = Volume_{Morto} \quad [4]$$

e admitiu-se para as barragens com tempo de vida inferior a 50 anos que a sedimentação da albufeira seria directamente proporcional à idade da barragem:

$$Volume_{Sedimentação} = \frac{Volume_{Morto}}{50} \cdot idade_{Barragem} \quad [5]$$

Com o propósito de poder colmatar alguma falta de dados, procedeu-se de forma similar à sugestão para a estimativa do volume de sedimentos depositado referida em ICOLD (1989) em que se estabelece uma relação empírica entre a área da bacia hidrográfica e o volume de sedimentos depositado.

Esta relação empírica foi estabelecida separadamente para as regiões geográficas do norte, do centro e do sul, numa tentativa de isolar os casos com condições de erosão e transporte de sedimentos semelhantes, Figuras 17, 18 e 19.

Embora estas relações não apresentem graus de correlação próximos da unidade, considerou-se que serão capazes de fornecer valores do volume de sedimentação com proximidade suficiente.

É portanto de salientar que os pressupostos base foram adoptados com vista a obter uma ordem de grandeza e que uma vez na presença de dados mais concretos, tais pressupostos deixarão de fazer sentido.

O inventário do INAG é constituído por 166 barragens e foi possível reunir informação suficiente para estimar, pelos meios já enunciados, o volume de sedimentos depositado de 151 dessas 166 barragens.

Estima-se que estas 151 barragens representem um volume total de sedimentos depositados de 1568 milhões de m<sup>3</sup> e uma capacidade bruta total de 12546 milhões de m<sup>3</sup>, o que significa que 12,5% da capacidade bruta total para o armazenamento de água estará, hoje, ocupada por sedimentos.

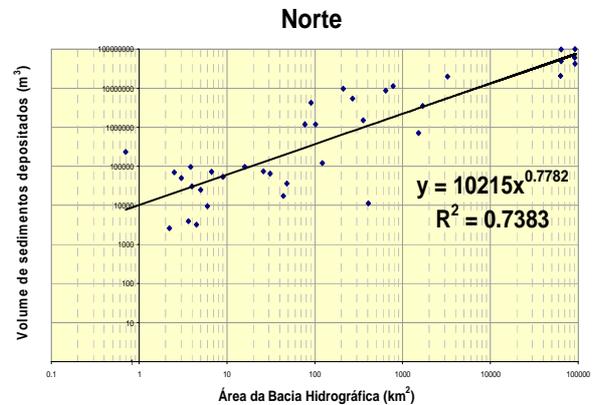


Figura 16. Relação entre o volume de sedimentos depositados e a área da bacia hidrográfica para a região Norte.

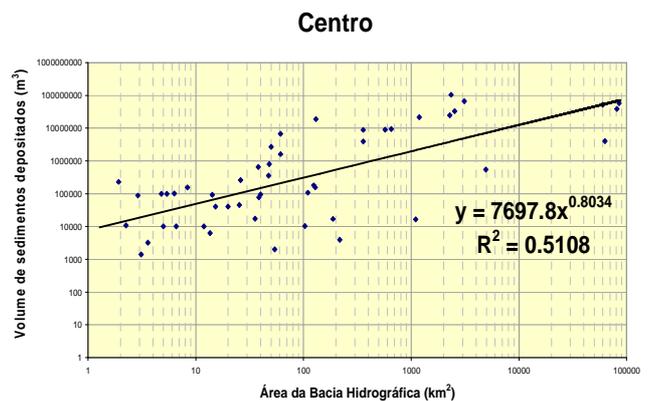


Figura 17. Relação entre o volume de sedimentos depositados e a área da bacia hidrográfica para a região Centro.

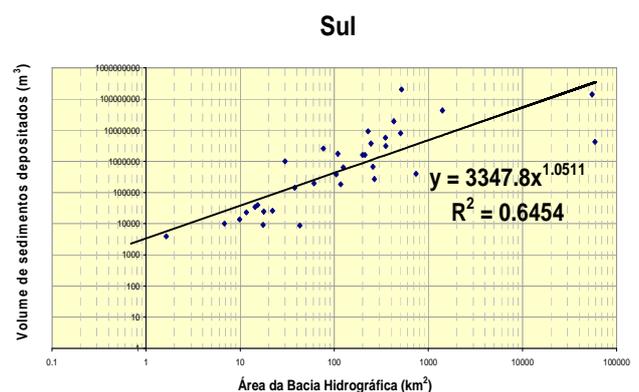


Figura 18. Relação entre o volume de sedimentos depositados e a área da bacia hidrográfica para a região Sul.

Das 151 albufeiras com volumes de sedimentação estimados, cerca de 66% têm um volume de sedimentação inferior a 10% da sua capacidade bruta de armazenamento, 28% estão sedimentadas entre 10% a 50% e somente 6% estão sedimentadas em mais de 50% da sua capacidade bruta de armazenamento.

Recorrendo ao software ArcGis as coordenadas das barragens foram referenciadas no Sistema de Informação Geográfica o que permitiu analisar o posicionamento das 166 albufeiras relativamente à costa Portuguesa, Figura 20.

Portugal encontra-se actualmente dividido em 5 Regiões Hidrográficas que estão definidas na figura 20. Esta separação pareceu também a mais adequada uma vez que a observação do mapa permite uma leitura imediata da distribuição das albufeiras pelas respectivas Regiões Hidrográficas que têm jurisdição sobre as correspondentes áreas costeiras, sugerindo desta forma um caminho provável de administrar todo o processo de reaproveitamento dos sedimentos.

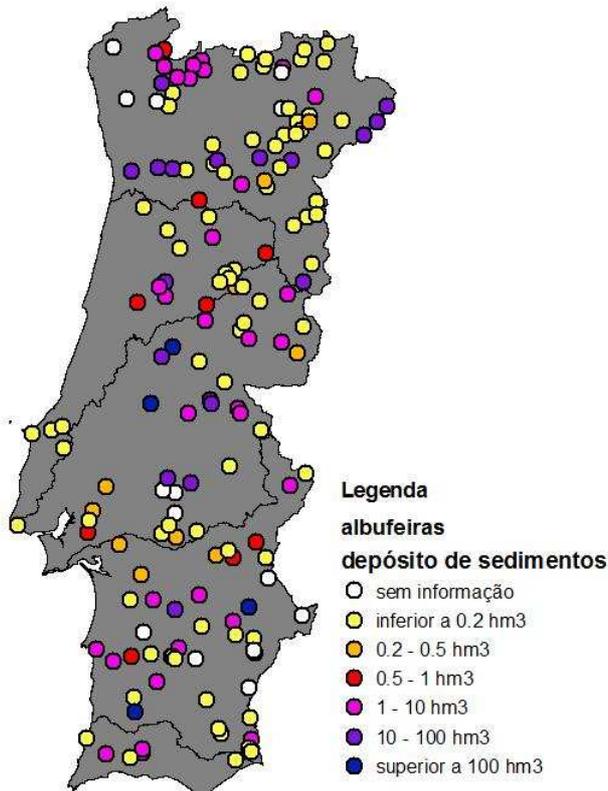


Figura 19. Localização das 166 albufeiras presentes no inventário do INAG.

Das 166 albufeiras seleccionaram-se as que seriam mais interessantes para a inserção num projecto de aproveitamento dos sedimentos para alimentação de praias.

Os critérios de selecção foram os seguintes:

- Albufeiras com mais de 0,2 hm<sup>3</sup> de sedimentos e localizadas a menos de 50 km da costa;
- Albufeiras localizadas a mais de 50 km e menos de 100 km da costa e com mais de 0,5hm<sup>3</sup> de sedimentos.

Estes critérios são similares aos de um estudo feito em Espanha com o mesmo fim, Sanchez (2008).

A selecção de albufeiras obtida representará uma pré-selecção de um conjunto de albufeiras que será necessário continuar a investigar antes de se poder decidir definitivamente acerca da sua inserção num projecto de reaproveitamento dos sedimentos para alimentação de praias.

Das 166 albufeiras analisadas 53 foram seleccionadas representando na sua totalidade 1242 milhões de m<sup>3</sup> de sedimentos e 10968 milhões de m<sup>3</sup> de capacidade bruta para o armazenamento de água. De todas as albufeiras seleccionadas, 11 localizam-se a menos de 25 km da costa, 17 entre 25 e 50 km, 10 entre 50 a 75 km e 15 entre 75 a 100 km representando respectivamente 65, 484, 345 e 347 milhões de m<sup>3</sup> disponíveis, Figura 20.

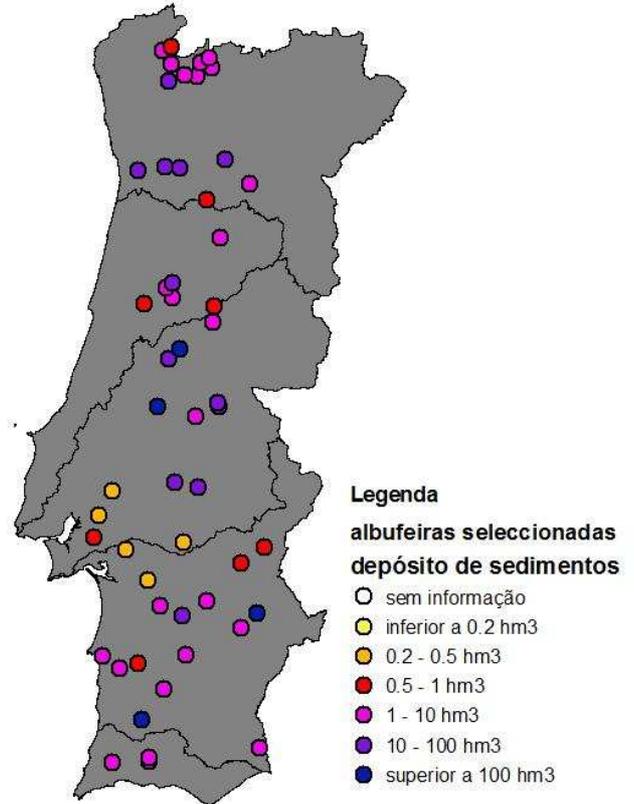


Figura 20. Localização das 53 albufeiras pré-seleccionadas.

Relativamente às regiões hidrográficas a selecção feita corresponde a 269 milhões de m<sup>3</sup> na região hidrográfica do Norte, 84 milhões de m<sup>3</sup> na do Centro, 482 milhões de m<sup>3</sup> na do Tejo, 394 milhões de m<sup>3</sup> na do Alentejo e 13 milhões de m<sup>3</sup> na do Algarve.

As regiões hidrográficas do Tejo e Alentejo são as que apresentam uma maior quantidade de sedimentos disponíveis talvez devido à existência de regularizações de maiores dimensões. As regiões hidrográficas do Algarve e Centro correspondem a uma menor disponibilidade de sedimentos até porque são as regiões com menor quantidade de albufeiras analisadas.

## 6. Conclusões

Neste momento, em Portugal, não há uma estratégia de gestão dos sedimentos, nem se reconhece, a par do problema de erosão costeira, a existência do problema da sedimentação das albufeiras, que por se manifestar com menor intensidade, representa actualmente uma muito menor preocupação para a sociedade em geral, mas que, caso não se intervenha, será necessário enfrentar um dia.

Portanto, quanto mais cedo se planear uma estratégia de actuação, menor será o esforço necessário para a implementar. Também não existe uma solução única para o problema, pois cada albufeira tem as suas características específicas. Depois da colocação da areia na praia, o mar actua novamente, sendo previsível, a exemplo do que sucedeu no passado, uma progressiva perda de areal, não sendo possível, portanto, criar expectativas quanto à criação de uma praia “definitiva” e daí a necessidade de programas de monitorização.

O transporte é o factor condicionante de um projecto de reaproveitamento dos sedimentos para alimentação de praias. O transporte por via terrestre tem custos muito elevados e impactes negativos significativos que aumentam com a distância a percorrer. Deverá portanto optar-se por soluções alternativas sempre que possível. O transporte por via fluvial poderá ser uma solução nos troços navegáveis dos principais rios.

No balanço custo-benefício deverá ter-se em consideração os benefícios relativos não só ao reaproveitamento dos sedimentos mas também à redução dos custos associados às obras de defesa costeira, que têm representado custos muito elevados, e à maximização do proveito retirado das barragens, que, por todos os grandes impactos que representam justificam a realização de trabalhos de manutenção que potenciem as suas funções.

Por tudo isto, é importante reconhecer que o investimento actual na revitalização das redes sedimentológicas constitui uma excelente oportunidade para a definição de estratégias de gestão dos sedimentos que possam ser postas em prática de forma eficaz, tendo em vista o aproveitamento tão exaustivo quanto possível dos sedimentos, que são uma mais-valia para a economia do país.

Estes projectos carecem de estudos técnicos e financiamentos compatíveis e portanto, também, de muita vontade política. É necessária a coordenação das partes envolvidas: água, promotores industriais, autoridades costeiras e ambientais e a transparência com os utilizadores: habitantes, pescadores e proprietários dos terrenos circundantes às albufeiras

Este trabalho foi desenvolvido como um ponto de partida com o objectivo de poder ver implementado um esquema nacional de aproveitamento dos sedimentos, que se consideram ser uma mais-valia para a economia do país e que se encontram, hoje, na sua grande maioria, desaproveitados.

## Agradecimentos

Ao Eng.º Joaquim Pais Barbosa pela disponibilidade e colaboração.

## Referências

- Álvares, Maria Teresa, Fernandes, Sónia, Mariano, Ana Catarina, Pimenta, Maria Teresa (2000). Monitorização batimétrica para gestão de albufeiras: Estudo Piloto. IX SILUBESA, 2000, Porto Seguro - Brasil.
- Álvares, Maria Teresa, Fernandes, Sónia, Mariano, Ana Catarina, Veríssimo, Maria Raquel (2001). Plano de Trabalhos para Execução de Levantamentos Batimétricos nas Albufeiras da Rede Sedimentológica. Instituto da Água - Direcção de Serviços de Recursos Hídricos.
- Basson, G. R., Rooseboom, A. (1999). Dealing with reservoir sedimentation, Comissão Internacional das Grandes Barragens (ICOLD), Paris.
- Batucu, Dan G., Jordaan, Jan M. (Jr) (2000). Silting and Desilting of Reservoirs. A. A. Balkema, Roterdão.
- Fonseca, Rita Maria Ferreira da (2002). Impactos ambientais associados a barragens e a albufeiras. Estratégia de reaproveitamento dos sedimentos depositados. CGE/Universidade de Évora.
- Lencastre, A., Franco, F. M. (2006). Lições de Hidrologia, Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica.
- Lysne, Dagfinn, Glover, Brian, Støle, Håkon, Tesaker, Einar (2003). *Sediment transport and sediment handling*, Hydraulic Design, , Norwegian University of Science and Technology Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Trondheim, Noruega páginas 117-155.
- Maia, Alfredo (2009). Recuperação de praias custou 18 milhões em 2008. Jornal de Notícias, 21/04/2009, página 30.
- Pétavy, F., Ruban, V., Conil, P. (2008). Treatment of stormwater sediments: Efficiency of an attrition scrubber - laboratory and pilot-scale studies. Chemical Engineering Journal, 28/04/2008, página 477, Elsevier B. V.
- PNA - Plano Nacional da Água. Capítulos 5, 7, 8 e 10 do II Volume.
- Sánchez, Virgínia (2008). Sedimentation of the spanish reservoirs as sand source for beach nourishment. Área de Estudos de Costas, Centro de Estudos de Portos e Costas (CEDEX), Madrid - Espanha.
- Støle, Håkon (2008). Material de apoio às aulas de Headworks and Sedimentation leccionadas na Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia (NTNU).
- Veloso-Gomes, Fernando, Taveira-Pinto, Francisco, Neves, Luciana das, Barbosa, Joaquim Pais (2006a). O Projecto EUrosion. Resultados e recomendações para uma gestão mais eficaz da erosão costeira. 8º Congresso da Água (FCTUC), 13/03/2006, Figueira da Foz, páginas 1-9, IHRH-FEUP, Porto.
- Veloso-Gomes, Fernando, Taveira-Pinto, Francisco, Neves, Luciana das, Barbosa, Joaquim Pais (2006b). EUrosion - Pilot Site of River Douro - Cape Mondego and Case Studies of Estela, Aveiro, Caparica, Vale do Lobo and Azores. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos.

[http://sites.google.com/site/geologiaebiologia/\\_/rsrc/1219775711387/Home/geologia-problemas-e-materiais-do-quotidiano/bacias-hidrogr%C3%A1ficas](http://sites.google.com/site/geologiaebiologia/_/rsrc/1219775711387/Home/geologia-problemas-e-materiais-do-quotidiano/bacias-hidrogr%C3%A1ficas)  
(30/01/2009)

[http://www.dha.lnec.pt/nre/english/projects/sedim\\_eng.html](http://www.dha.lnec.pt/nre/english/projects/sedim_eng.html) (05/02/2009)

<http://lindorm.com/products/nilsson.php> (11/03/2009)

[http://www.ec.gc.ca/Water/en/nature/sedim/e\\_bed.htm](http://www.ec.gc.ca/Water/en/nature/sedim/e_bed.htm)  
(09/03/2009)

[http://www.allposters.co.uk/-sp/The-All-American-Canal-as-the-Blazing-Sun-Sets-in-the-West-near-Yuma-Arizona-Posters\\_i3991549\\_.htm](http://www.allposters.co.uk/-sp/The-All-American-Canal-as-the-Blazing-Sun-Sets-in-the-West-near-Yuma-Arizona-Posters_i3991549_.htm) (03/04/2009)

<http://www.gendredge.com/nigeria/bucket.php>  
(06/05/2009)