

# PROECÇÃO ESTOCÁSTICO-DETERMINÍSTICA DOS EFEITOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NAS EXTRACÇÕES DE AQUÍFEROS COSTEIROS

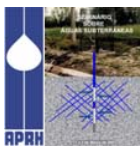
Júlio F. FERREIRA DA SILVA

*Doutor em Engenharia Civil – Hidráulica Prof. Auxiliar do Departamento de Eng<sup>a</sup> Civil da Universidade do Minho, Azurém 4800-058 Guimarães, Portugal  
253510200, [juliofs@civil.uminho.pt](mailto:juliofs@civil.uminho.pt)*

## RESUMO

As alterações climáticas, designadamente a subida do nível do mar e as modificações na precipitação e na recarga, irão provocar mudanças no equilíbrio entre as águas doce e salgada presentes nos aquíferos costeiros. Neste trabalho, apresentar-se-á um modelo de gestão estocástico-determinístico que sendo composto por ferramentas de simulação estocásticas, por técnicas de optimização e por modelos de simulação do comportamento dos aquíferos costeiros permite a projecção dos eventuais efeitos das alterações climáticas admitindo as incertezas inerentes aos fenómenos em análise. O modelo começa por recorrer a técnicas de análise e de simulação estocásticas de parâmetros que influenciam o comportamento do sistema aquífero, como o escoamento natural. O modelo de optimização - simulação possibilita a identificação dos melhores locais de implantação das captações subterrâneas e determina as extracções máximas permitidas e respectivos limites de confiança para cada cenário de subida do nível do mar e da recarga natural do aquífero. A inclusão do conceito de distância de segurança que corresponde à distância entre o pé da interface água doce / água salgada e um ponto de controlo, permite a assunção de risco por parte do decisor. Para cada cenário admitido são disponibilizadas curvas com a extracção máxima permitida e respectivos limites de confiança em função do local de captação. Estes resultados evidenciam a necessidade do adequado planeamento dos locais de construção das captações, da gestão regrada das extracções e do controlo do avanço da intrusão marinha, para que os efeitos das alterações climáticas sejam antecipadamente mitigados.

**Palavras-chave:** Alterações climáticas. Subida do nível do mar. Controlo da intrusão salina. Modelação de águas subterrâneas.



## 1. INTRODUÇÃO

O nosso planeta tem sofrido alterações climáticas que, inevitavelmente, provocam mudanças no equilíbrio entre as águas doce e salgada presentes nos aquíferos costeiros. São diversos os trabalhos científicos que indicam como verosímeis a subida do nível médio do mar e a redução na precipitação, face ao aquecimento global, apesar de serem expectáveis episódios com chuvadas de elevada intensidade. Tais alterações devem ser consideradas nas políticas e estratégias de planeamento e de gestão da água das regiões costeiras. As mudanças climáticas influenciarão as futuras solicitações e a disponibilidade de água doce nestas regiões vulneráveis. Entretanto, qualquer que seja a subida do nível do mar, se nada for feito, este fenómeno provocará o avanço para o continente da intrusão marinha e a subsequente redução das reservas de água doce subterrânea.

Para fazer face à variação do nível do mar, os sistemas de captação e de abastecimento de água de zonas costeiras devem ser concebidos, dimensionados e geridos para que o fenómeno da intrusão salina seja evitado ou mantido sob controlo. Os planeadores devem examinar cuidadosamente o número de captações necessário, os respectivos locais de implantação e as quantidades a extrair em cada, para que seja garantida a solicitação de água e maximizado o resultado económico. Estas decisões poderão ser melhor fundamentadas recorrendo a um conjunto de ferramentas de optimização e de simulação que interligadas procuram as melhores soluções e antecipam o comportamento dos sistemas hídricos envolvidos.

## 2. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO

O nível médio do mar e a recarga natural dos aquíferos são parâmetros fundamentais que condicionam o equilíbrio dinâmico entre os volumes de água doce e de água salgada marinha que coexistem nos aquíferos costeiros. A subida do nível médio do mar e a redução da recarga impelem a interface água doce / água salgada no sentido do continente, reduzindo as disponibilidades de água doce. Estas mudanças constituem um problema que é necessário estudar para que se possa antever o comportamento dos sistemas hídricos e projectar medidas mitigadoras. Assim, pretende conhecer-se os efeitos destas alterações climáticas na quantidade de água doce que é possível extrair de aquíferos costeiros, impedindo a invasão dos pontos de controlo pela água salobra / salgada marinha. Para mitigar os eventuais efeitos das alterações climáticas poderão ser implementadas medidas de concepção e de gestão dos sistemas de captação que se relacionam, por exemplo, com a adequada implantação das captações e com a limitação das extracções. Interessa, portanto, fazer a projecção da extracção máxima permitida em cada eventual local de captação face a cada cenário de subida do nível médio do mar e da redução do escoamento natural no aquífero. Dada a incerteza associada à projecção das alterações climáticas o estudo realizado teve como propósito cobrir um leque de eventuais cenários, pelo que o modelo de gestão (ou de optimização-simulação) é chamado a encontrar as extracções máximas para cada eventual local de implantação de um conjunto de captações, para cada valor do nível médio do mar, para cada cenário do escoamento natural e para cada distância de segurança. Assim, as sucessivas execuções do modelo de gestão varrem os valores compreendidos nos intervalos:

$$0 \leq \Delta h \leq \Delta h_{\max} \quad (1)$$

$$x_{s,\min} \leq x_s \leq x_{s,\max} \quad (2)$$

$$ds_{\min} \leq ds \leq ds_{\max} \quad (3)$$

em que:  $\Delta h$  e  $\Delta h_{\max}$  a subida do nível do mar e o seu valor máximo;  $x_s$ ,  $x_{s,\min}$  e  $x_{s,\max}$  o local de implantação das captações subterrâneas medido em relação à linha de costa e os respectivos limites;  $ds$  - distância de segurança.



### 3. MODELO DE GESTÃO ESTOCÁSTICO-DETERMINÍSTICO

#### 3.1. Descrição Geral

Para procurar a melhor estratégia de gestão do sistema hídrico costeiro é necessário recorrer a técnicas de optimização e ligá-las a modelos de simulação do escoamento que definam a posição da interface água doce / água salgada. Neste processo de procura são testadas inúmeras eventuais soluções. Assim, na selecção dos modelos matemáticos /numéricos para a simulação da intrusão salina não deve esquecer-se que o objectivo é obter em tempo útil as melhores soluções para cada um dos diversos cenários simulados. Os modelos de interface brusca, conforme constata ESSAID (1990) revelam-se mais conservadores, isto é colocam-se pelo lado da segurança, na definição da posição da interface água doce / água salgada. No caso de aquíferos homogéneos a solução defendida por STRACK (1989) apresenta vantagens pela economia de cálculos. Em FERREIRA DA SILVA (2003) defende-se uma metodologia que associa métodos de optimização e modelos de simulação da intrusão marinha em cascata num grau de complexidade crescente.

O modelo estocástico-determinístico faculta a análise dos efeitos da admissão de incerteza associada ao escoamento natural face a cada cenário de subida do nível médio do mar. A geração aleatória de acordo com uma lei previamente seleccionada de múltiplos valores o escoamento natural pode fazer-se recorrendo à técnica de Monte Carlo.

Admitindo que o escoamento específico actual é de  $0,6 \text{ m}^3/\text{m}.\text{dia}$  e uma redução máxima de 30% se a subida do nível do mar for de 1,0 m, então a relação entre o caudal por metro linear e a subida do nível do mar será:

$$q_m = 0,60 - 0,18\Delta h \quad (4)$$

sendo:  $q_m$  – valor médio expectável para o escoamento natural;  $\Delta h$  - subida do nível do mar;

Admitindo incerteza associada a este parâmetro para cada cenário de subida do mar ( $\Delta h$ ) serão gerados 200 valores do escoamento natural através de:

$$q_i = q_m \varepsilon_i \quad (5)$$

em que:  $q_i$  – valor do escoamento natural na geração  $i$ ;  $\varepsilon_i$  - factor gerado aleatoriamente segundo uma lei previamente definida.

O modelo de gestão, composto pelas técnicas de optimização e pelo modelo de simulação da intrusão salina, é chamado a encontrar as melhores soluções tantas vezes quantos os cenários gerados. Subsequentemente, para cada cenário ficam disponíveis conjuntos de resultados relacionados com as extracções máximas permitidas e com o comportamento do aquífero costeiro. Estas saídas serão sujeitas a uma análise estatística. A descrição completa dum modelo estocástico-determinístico pode ser encontrada em FERREIRA DA SILVA e CUNHA (2007)

Na figura seguinte está representado modelo global que permite estudar os efeitos da subida do nível médio do mar admitindo incerteza associada ao escoamento natural.

#### 3.2. Formulação matemática do problema

O objectivo é matematicamente representado pela maximização das extracções:

$$\max Z = \sum_{s=1}^{N_s} Q_s \quad (6)$$

sendo:  $Q_s$  - A extracção em cada captação  $s$ ;  $N_s$  - Número total de captações.

O controlo da intrusão salina no aquífero será realizado impondo um valor máximo para a distância entre do “pé” da interface e os pontos de controlo ou distância de segurança ( $ds$ ). Pretendendo implantar um conjunto de captações em linha, então os pontos de controlo serão as captações centrais.

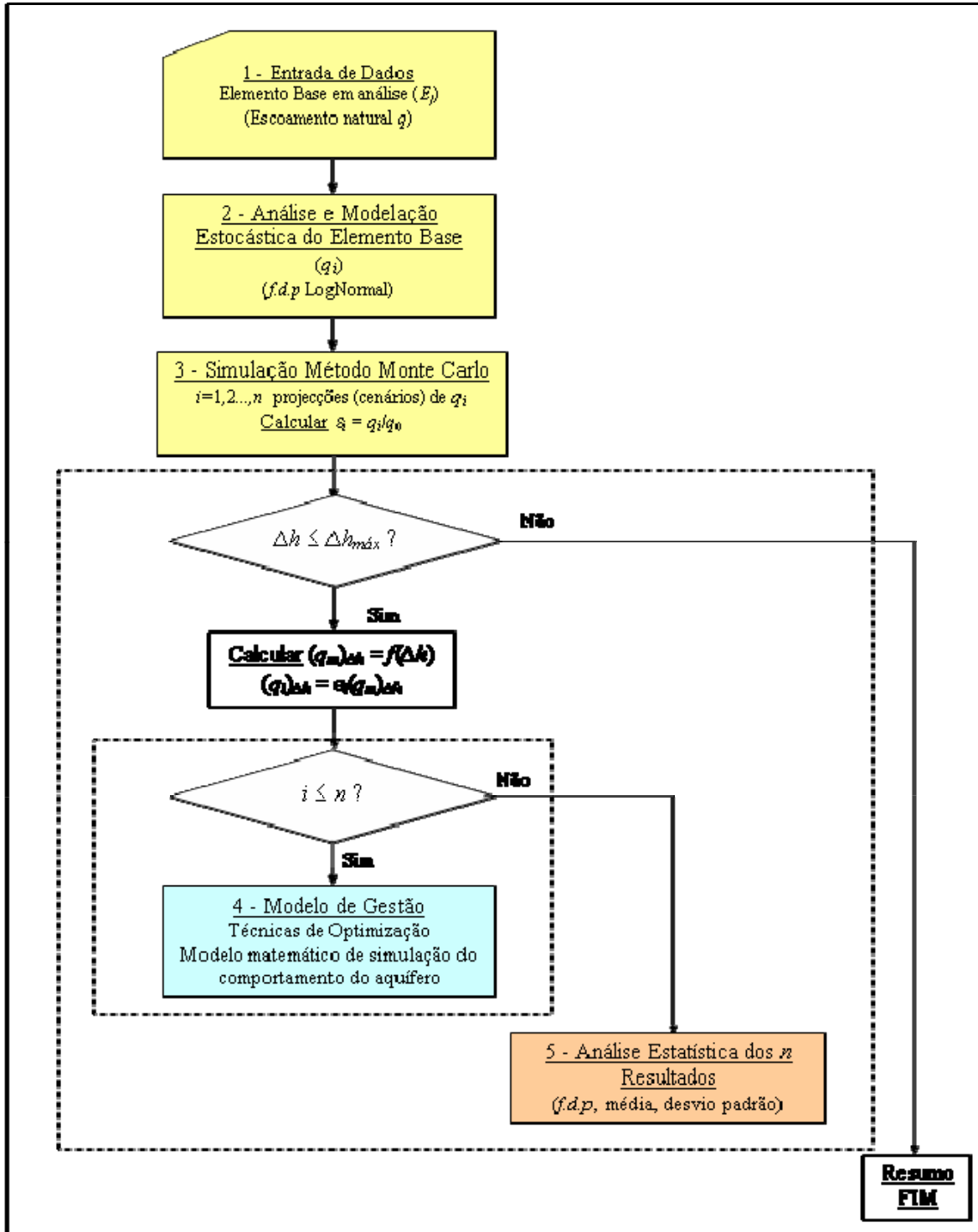


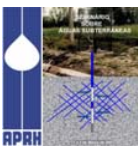
Figura 1 - Esquema do modelo estocástico-determinístico

Exigindo que um valor de  $ds$  seja respeitado, então limitar-se-á o avanço do pé da interface:

$$(x_{pe})_s \leq (x_{pc})_s - (ds)_s \quad \forall s, \quad s=1,2,\dots,N_{pc} \quad (7)$$

em que:  $(x_{pe})_s$  - distância do pé da interface à linha de costa;  $x_{pc}$  - distância do ponto de controlo à linha de costa;  $ds$  - distância segurança admissível entre a interface e o ponto de controlo;  $N_{pc}$  - número de pontos de controlo.

As outras restrições são relativas aos limites de extracção de cada captação e às cotas piezométricas mínimas:



$$Q_{i,\min} \leq Q_i \leq Q_{i,\max} \quad i = 1, \dots, N_s \quad (8)$$

$$h_s \geq h_0 \quad s = 1, \dots, N_s \quad (9)$$

em que:  $Q_{i,\min}$  e  $Q_{i,\max}$  os limites de extracção em cada origem;  $N_s$  - Número de origens subterrâneas;  $h_s$  a cota piezométrica na captação  $s$ ;  $h_0$  a cota piezométrica mínima admissível.

### 3.3. Modelos de simulação da intrusão salina

As equações que caracterizam o escoamento num sistema aquífero costeiro podem ser definidas aplicando a expressão de Darcy a cada lado da interface:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ (K_{xx})_d \frac{\partial h_d}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (K_{yy})_d \frac{\partial h_d}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ (K_{zz})_d \frac{\partial h_d}{\partial z} \right] + Q_d = S_d \frac{\partial h_d}{\partial t} \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ (K_{xx})_s \frac{\partial h_s}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (K_{yy})_s \frac{\partial h_s}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ (K_{zz})_s \frac{\partial h_s}{\partial z} \right] + Q_s = S_s \frac{\partial h_s}{\partial t} \quad (11)$$

Em que:  $x, y$  - coordenadas,  $d$  água doce;  $s$  a água salgada;  $h$  - altura piezométrica,  $Q$  - caudal extraído ou injectado,  $S$  - coeficiente de armazenamento,  $t$  - tempo.

A resolução da equação diferencial que caracteriza o escoamento pode realizar-se por via analítica, nalguns casos, e mais genericamente por via numérica. Defendemos que o estudo de sistemas complexos e de grande dimensão deve iniciar-se com o recurso a modelos conceptuais simples para numa segunda fase ser usado um modelo numérico, necessariamente mais refinado. STRACK (1976 e 1989) desenvolveu uma solução exacta para caracterizar o escoamento em aquíferos costeiros com uma linha de costa recta, diversas captações localizadas a  $x_i$  do mar e o respectivo caudal  $Q_i$ . O potencial é definido, usando o método das imagens, por:

$$\phi = \frac{q}{K} x + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi K} LN \left[ \frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{(x + x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right] \quad (12)$$

onde  $(x_i, y_i)$  e  $Q_i$  são, respectivamente, as coordenadas e o caudal da captação  $i$ .

### 3.4. Análise estatística de resultados

A simulação do fenómeno da intrusão salina para cada uma das  $n$  realizações de  $q_i$  permite a obtenção de  $j=1,2,\dots,n$  valores da extracção  $Q$  da água doce em cada captação  $s$   $(Q_s)_j$ . Então, é possível calcular os momentos de primeira e segunda ordem de  $Q_s$

$$\overline{(Q_s)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Q_s)_j \quad s=1,2,\dots,N_s \quad (13)$$

$$\sigma_{Q_s}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n \left[ (Q_s)_j - \overline{(Q_s)} \right]^2 \quad s=1,2,\dots,N_s \quad (14)$$

Os limites de confiança para o valor esperado com  $(1-\alpha).100\%$  de confiança são dados por:

$$\lim_{Sup,Inf} = \overline{Q_s} \pm z(\alpha/2) \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n ((Q_s)_j - \overline{Q_s})^2}}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

$\lim_{Sup}$  - Limite superior;  $\lim_{Inf}$  - Limite inferior;  $\overline{Q_s}$  - Média dos valores da extracção de água doce;  $z(\alpha/2)=1,96$  - coeficiente de confiança admitindo que distribuição da variável é Normal e  $\alpha=5\%$ .



#### 4. APLICAÇÕES

Nos estudos seguintes admitir-se-á que três captações subterrâneas distando entre si 1000 m serão implantadas num aquífero com condutividade hidráulica de 100 m/dia e escoamento específico actual de 0,6 m<sup>3</sup>/m.dia. Considerando que a altura actual da superfície do mar está catorze metros acima da base do aquífero ( $B=14,0$  m), então não havendo qualquer extracção o pé da interface localiza-se a 418,54 m da linha de costa. Admitindo sucessivos valores para a distância de segurança, desde a distância mínima de 100 m, depois 200 m até 800 m, as captações poderão ser implantadas, respectivamente, a partir dos 520 m, 620 m, etc.

Nos estudos realizados admitiram-se diversos cenários para a subida do nível do mar, pelo que o modelo de gestão foi chamado a proceder a sucessivos cálculos para incrementos daquele parâmetro de 0,05 m ( $B_i=14; 14,05; \dots; 15$  m, ou seja,  $\Delta h=0; 0,05; \dots; 1$  m).

O problema que aqui pretende resolver-se consiste em determinar qual será a extracção máxima numa barreira de três captações com valores individuais iguais ( $Q_{s1}=Q_{s2}=Q_{s3}$ ) para que seja assegurado o controlo da intrusão salina, ou seja para manter a interface água doce / água salobra para além duma distância de segurança, em função do local de implantação e face ao aumento do nível médio do mar e redução do escoamento natural.

Para analisar os efeitos da admissão de incerteza associada ao escoamento natural  $q$  foram gerados 200 valores do factor aleatório  $\varepsilon$  com média 1 e coeficiente de variação  $CV=\sigma/\mu=5\%$ . Os valores mínimo e máximo, foram respectivamente, 0,89 e 1,1. Na situação actual, como  $\Delta h$  é 0 então o valor médio do escoamento natural vale  $q_m=0,6$  m<sup>2</sup>/dia. Os primeiros valores gerados de  $\varepsilon$  e os respectivos valores de  $q$  estão registados no quadro seguinte:

Quadro 1 - Primeiros valores gerados para o factor aleatório  $\varepsilon$  e escoamento natural  $q$  (m<sup>2</sup>/dia)

$\varepsilon$	1,000	0,936	0,966	1,046	0,991	0,916	0,957	0,965	1,020	0,960	0,975	(...)
$q$	0,600	0,562	0,580	0,627	0,595	0,549	0,574	0,579	0,612	0,576	0,585	(...)

Considerando uma distância de segurança de 100 m as extracções máximas permitidas na situação actual estão registadas no quadro seguinte:

Quadro 2 – Extracção máxima permitida numa barreira de 3 captações ( $Q_{s1}=Q_{s2}=Q_{s3}$ ) (m<sup>3</sup>/dia) quando  $\Delta h=0$  com  $d_s=100$  m vs local de implantação para diversos valores do escoamento natural  $q$

Local \ $q$	0,600	0,562	0,580	0,627	0,595	0,549	0,574	0,579	0,612	0,576	0,585
520,0	5,8			81,5					38,1		
530,0	44,6			121,0	29,5				77,3		3,1
540,0	82,4		25,7	159,5	67,2		9,6	22,7	115,4	15,0	40,5
550,0	119,2	10,3	61,9	197,0	103,8		45,7	58,9	152,4	51,2	76,9
560,0	155,0	45,2	97,2	233,5	139,5	10,2	80,9	94,2	188,6	86,4	112,4
570,0	189,9	79,2	131,6	269,1	174,2	43,8	115,1	128,6	223,7	120,7	146,9

A diferentes valores do escoamento natural correspondem distintas localizações do pé da interface, designadamente junto do ponto de controlo principal que é a captação central. No gráfico seguinte está registado o número de simulações em que não é possível captar em cada um dos locais mais próximos da linha de costa. A admissão de incerteza leva a que, caso o decisor não queira correr qualquer risco, então a barreira de três captações deve ser implantada um pouco mais para o interior do continente.

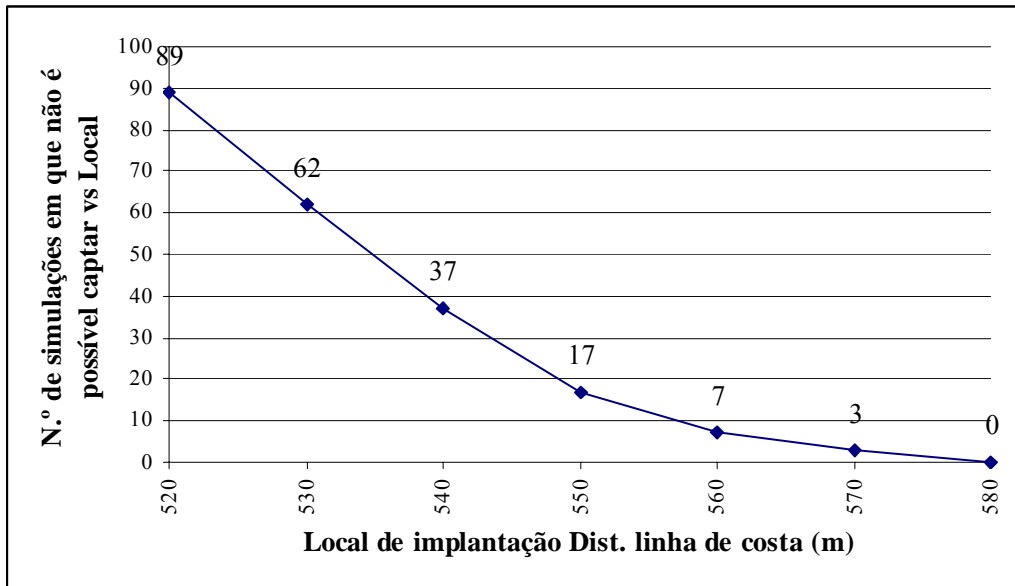
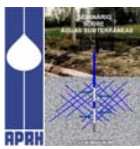


Figura 2 – Número de simulações em que não é possível captar em cada eventual local de implantação

Após o cálculo das 200 extracções máximas permitidas em cada eventual local de captação foram determinados os valores médios, os desvios padrão e os limites de confiança. No quadro seguinte constam esses resultados para alguns locais de implantação das captações e para distâncias de segurança ( $d_s$ ) de 100 e 200 m.

Quadro 3 - Valores médios das extracções e respectivos limites para  $d_s = 100$  m e  $d_s = 200$  m com  $B=14$  m ( $\Delta h=0$  m) e  $q_m = 0,60$  m<sup>2</sup>/dia

Local	$\mu_{d_s100}$ (m <sup>3</sup> /dia)	$\sigma_{d_s100}$ (m <sup>3</sup> /dia)	LimInf <sub>d_s100</sub> (m <sup>3</sup> /dia)	LimSup <sub>d_s100</sub> (m <sup>3</sup> /dia)	$\mu_{d_s200}$ (m <sup>3</sup> /dia)	$\sigma_{d_s200}$ (m <sup>3</sup> /dia)	LimInf <sub>d_s200</sub> (m <sup>3</sup> /dia)	LimSup <sub>d_s200</sub> (m <sup>3</sup> /dia)
580	224,3	90,4	217,9	230,7				
590	257,5	91,2	251,1	264,0				
(...)								
680	525,9	97,6	519,1	532,9	270,8	109,2	263,1	278,5
690	552,9	98,3	546,0	559,9	310,3	109,9	302,6	318,1
(...)								
1340	1761,4	137,4	1751,7	1771,2	1834,0	149,9	1825,4	1846,6
1350	1775,8	138,0	1766,0	1785,5	1852,3	150,5	1841,7	1863,0

Sendo:  $\mu_{d_s}$  – Extracção média no conjunto das 3 captações ( $Q_{s1}=Q_{s2}=Q_{s3}$ ) implantadas em cada eventual local respeitando a distância de segurança  $d_s$ ;  $\sigma_{d_s}$  – desvio padrão; LimInf<sub>d\_s</sub> – Limite inferior; LimSup<sub>d\_s</sub> - Limite Superior.

Na figura seguinte estão representados os valores médios e respectivos limites de confiança para as diversas distâncias de segurança consideradas ( $d_s=100, 200, \dots, 800$  m).

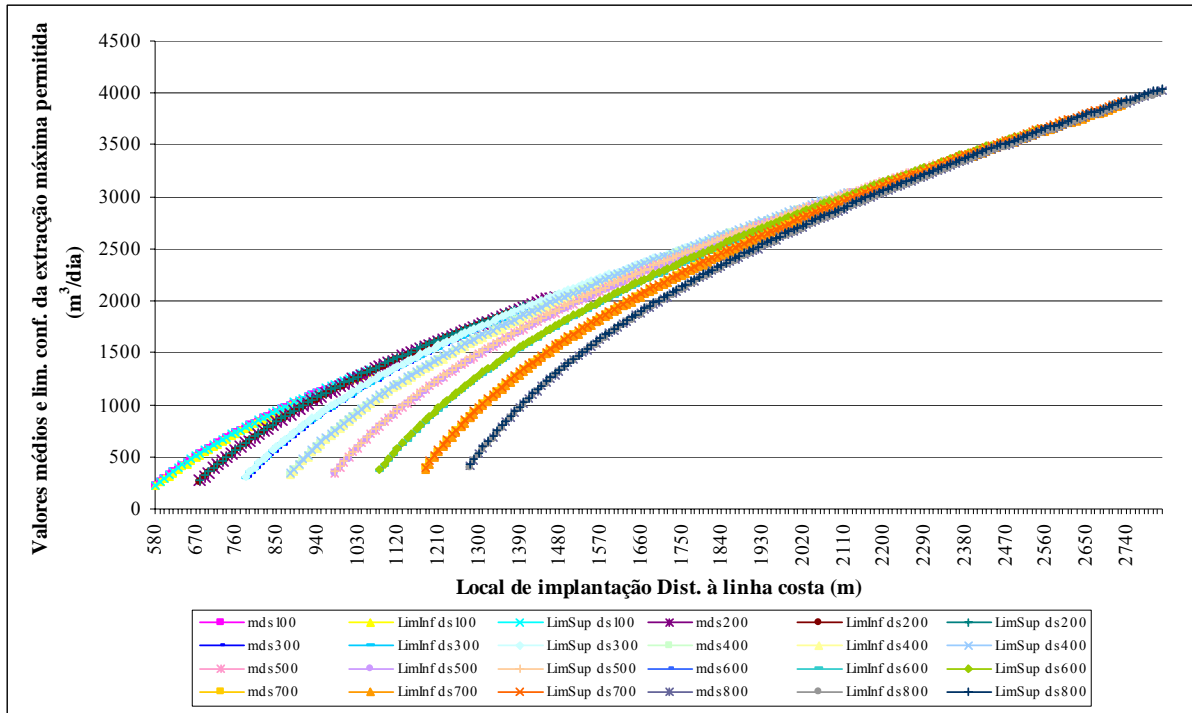


Figura 3 – Média e limites de confiança da extracção máxima permitida ( $Q_{s1}=Q_{s2}=Q_{s3}$ ) para  $\Delta h=0$  e diversas distâncias de segurança ( $ds=100, 200, \dots, 800$  m) versus local de implantação

Assim, à medida que afastamos as captações do mar pode extrair-se maiores quantidades mantendo a interface a maiores distâncias. Na figura seguinte pode verificar-se que o desvio padrão da extracção máxima permitida em cada eventual local de implantação cresce com o aumento das extracções que ocorre em locais mais afastados da linha de costa.

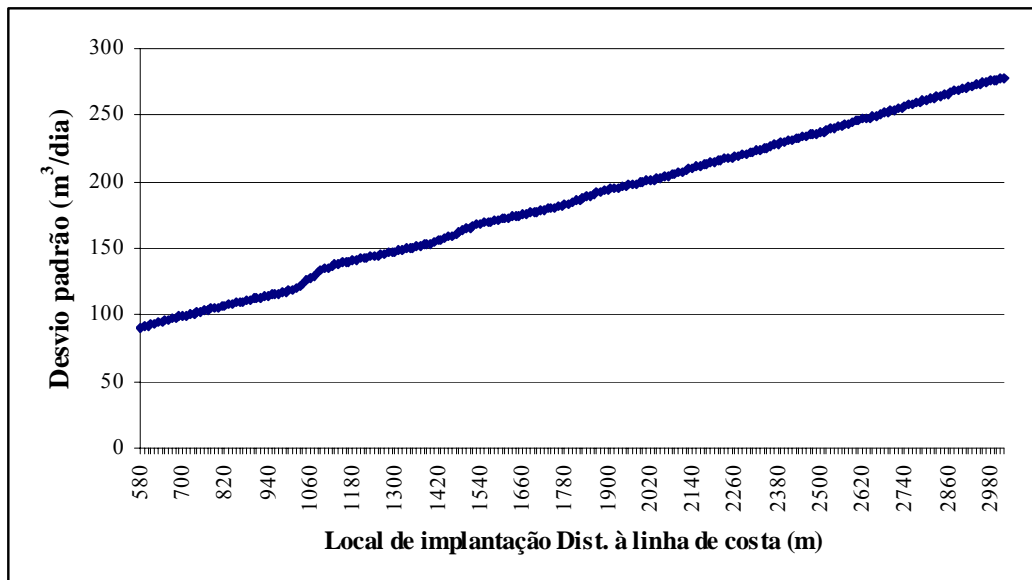
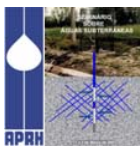


Figura 4 – Desvio padrão da extracção máxima permitida para  $\Delta h=0$  versus local de implantação

Face à subida do nível do mar, o controlo do avanço da intrusão marinha poderá ser realizado com a redução das extracções. Adoptando a metodologia descrita anteriormente, correu-se o modelo de optimização - simulação para sucessivas eventuais subidas do nível do mar. De acordo com a hipótese formulada a uma subida de 0,20 m corresponderá um  $q_m=0,564$  m<sup>2</sup>/dia. Nestas circunstâncias,





não será possível extrair água doce nos locais mais próximos do mar, podendo ser eventualmente necessário abandonar algumas captações. No quadro seguinte apresentam-se, a título exemplificativo, as extracções máximas na barreira de captação se esta for implantada nos locais ali listados.

Quadro 4 - Valores médios das extracções e respectivos limites ( $Q_{s1}=Q_{s2}=Q_{s3}$ ) para  $ds=100$  m e  $ds=200$  m com  $\Delta h=0,20$  m e  $q_m = 0,564$  m<sup>3</sup>/dia

Local	$\mu_{ds100}$ (m <sup>3</sup> /dia)	$\sigma_{ds100}$ (m <sup>3</sup> /dia)	LimInf <sub>ds100</sub> (m <sup>3</sup> /dia)	LimSup <sub>ds100</sub> (m <sup>3</sup> /dia)	$\mu_{ds200}$ (m <sup>3</sup> /dia)	$\sigma_{ds200}$ (m <sup>3</sup> /dia)	LimInf <sub>ds200</sub> (m <sup>3</sup> /dia)	LimSup <sub>ds200</sub> (m <sup>3</sup> /dia)
620	202,5	87,8	196,3	208,7				
630	232,5	88,4	226,3	238,8				
640	261,9	89,1	255,6	268,2				
(...)								
710	451,7	93,7	445,0	458,3				
720	476,8	94,3	470,1	483,5	242,8	105,2	235,3	250,2
(...)								
1120	1252,2	117,5	1243,9	1260,5	1251,9	128,8	1242,8	1261,0
1130	1267,9	118,0	1259,6	1276,3	1270,7	129,4	1261,6	1279,9

Comparando estes resultados com os registados no quadro relativo a  $\Delta h=0$  m consta-se uma redução nas extracções, conforme era expectável. Na figura seguinte pode verificar-se a redução nas extracções das 3 captações quando implantadas a 900 m da linha de costa em função da subida do nível do mar. Neste caso a extracção máxima ocorre quando  $ds = 100$  m.

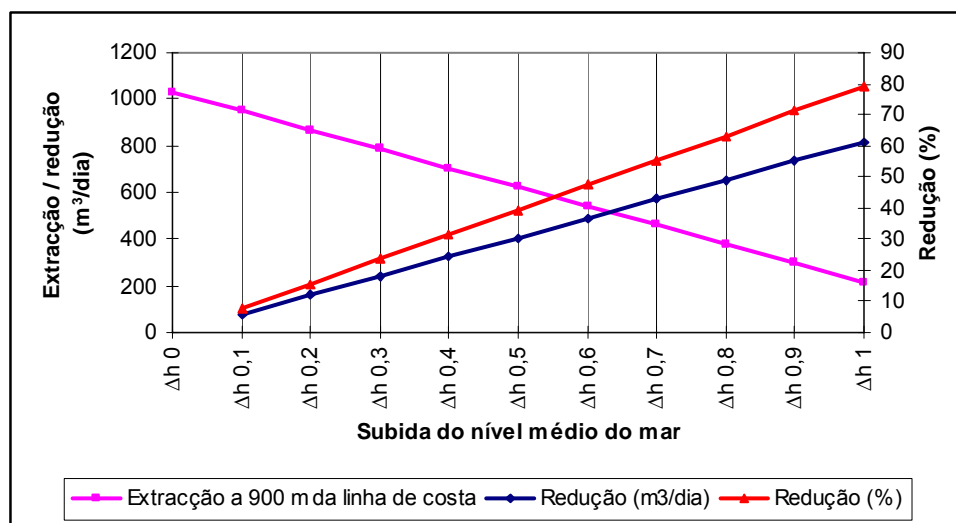


Figura 5 – Média da extracção máxima em 3 captações implantadas a 900 m da linha de costa e redução vs subida do nível do mar

Os valores médios da extracção máxima que será possível extrair na barreira de 3 captações e respectivos limites de confiança em função do local de implantação e da subida do nível do mar ficam registados nas figuras seguintes.











