

EFEITOS DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NUM CANAL DE RECARGA NO CONTROLO DA INTRUSÃO SALINA E NAS EXTRACÇÕES DE AQUÍFEROS COSTEIROS

Júlio F. FERREIRA DA SILVA

*Doutor em Engenharia Civil-Hidráulica Prof. Auxiliar do Departamento de Eng^a Civil da Universidade do Minho, Azurém 4800-058 Guimarães, Portugal
Tel: 253510207, juliofs@civil.uminho.pt*

João Paulo C. LOBO FERREIRA

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal
Tel: +351 21 844 3609, lferreira@lnec.pt*

Alberto da Silva LIMA

*Professor Auxiliar do Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho
Gualtar 4710-057 Braga 253 604 035 aslima@dct.uminho.pt*

João GARCEZ MOREIRA

*Licenciado em Eng Civil, Chefe de Divisão de Água dos Serviços Municipalizados de Viana do Castelo
4901-878 Viana do Castelo 258 806 900 j.garcez@smsbvc.pt*

RESUMO

Neste trabalho faz-se uma análise quantitativa dos efeitos da infiltração de água num canal de recarga no controlo da intrusão marinha e nas extracções de aquíferos costeiros. Sendo a utilização da água subterrânea economicamente interessante, aconselhariam os princípios de gestão de recursos hídricos o aproveitamento do escoamento subterrâneo que se dirige inevitavelmente para o mar. No entanto, a extracção de água de aquíferos costeiros deve respeitar regras para que seja possível manter sob controlo a intrusão de água marinha. O incremento da recarga realizado num canal ou vala é uma medida de gestão que pode ajudar nessa regulação. Esta acção permite aumentar o volume de água doce no aquífero e, assim, impelir a água salgada em direcção ao mar. A metodologia desenvolvida faculto o estudo do efeito das variações da recarga na posição da interface água doce - água salgada. Analisam-se os efeitos em função da eventual implantação do canal de recarga. Determinam-se as extracções aconselháveis face a determinada distância de segurança admitida em relação a um ponto de controlo. Calcula-se o acréscimo na extracção em função das quantidades disponíveis para recarga. Conclui-se que o incremento da recarga por infiltração num canal contribui para a utilização controlada e sustentável da água subterrânea e, conseqüentemente, para a gestão racional dos recursos hídricos disponíveis nas regiões costeiras.

Palavras-chave: Incremento da recarga, Intrusão salina, Gestão optimizada da água disponível nas zonas costeiras.

1. INTRODUÇÃO

Os aquíferos costeiros são sistemas hídricos que possuem em equilíbrio dinâmico água salgada e água doce. À extracção corresponde a diminuição do volume de água doce, o avanço da água marinha e o inerente aumento da salinidade da água. O controlo do volume de água salgada no aquífero pode ser conseguido restringindo as extracções e incrementando a recarga, designadamente, através da infiltração num canal ou do aproveitamento intencional duma linha de água.

A concepção, dimensionamento e exploração dos sistemas de captação e de abastecimento de água em zonas costeiras devem examinar cuidadosamente o número de captações necessário, definir correctamente os respectivos locais de implantação, determinar as quantidades a extrair em cada e manter sob controlo o fenómeno da intrusão salina. Estas decisões poderão ser melhor fundamentadas com recurso a um modelo de gestão composto por técnicas de optimização e por modelos matemáticos de simulação do comportamento dos aquíferos. Estas ferramentas devidamente interligadas constituem um modelo global de apoio ao planeamento e à gestão dos recursos hídricos disponíveis nas regiões costeiras. É importante que o modelo de gestão determine a extracção máxima permitida para que a interface seja mantida para além de determinada distância em relação a pontos de controlo, ou seja duma distância de segurança. Interessa, também, que o modelo de gestão disponibilize as extracções máximas e a distância de segurança mais indicada para cada eventual local de implantação dos sistemas de captação e de incremento da recarga.

O desenvolvimento de modelos para a gestão optimizada da água disponível nas regiões costeiras é uma tarefa complexa. Até esta data, não existem muitos estudos divulgados que incluem os efeitos do incremento da recarga nas águas subterrâneas do litoral. Mahesha (1996a, 1996b, 1996c) publicou alguns trabalhos sobre o efeito da recarga na posição da interface água salgada / água doce em aquíferos costeiros. Mahesha e Nagaraja (2003) estudaram o efeito da injeção de água numa bateria de furos. Reichard (2005) considera duas opções de gestão para melhorar o controlo da intrusão marinha: injeção numa barreira de poços e na utilização de água de superfície para substituir a extracção. Ferreira da Silva (2005, 2006 e 2007) apresenta aplicações do modelo de optimização-simulação de aquíferos costeiros à determinação das extracções máximas permitidas num aquífero genérico onde o incremento da recarga é conseguido pela infiltração / injeção em furos.

Nos itens seguintes far-se-á a apresentação do problema e da metodologia de resolução, descrever-se-á o modelo de gestão composto pelas técnicas de optimização e pelos modelos de simulação do fenómeno intrusão salina e far-se-á a aplicação a um sistema aquífero genérico de referência e a uma zona litoral de Viana do Castelo - Portugal.

2. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO

O problema que pretende resolver-se aqui consiste em determinar de forma quantitativa as consequências num aquífero costeiro do incremento da recarga por infiltração num canal, ou seja, pretende calcular-se o efeito do aumento da recarga na posição da interface água salgada / água doce e na quantidade máxima que é possível extrair do aquífero. O modelo de gestão é chamado a encontrar as extracções máximas para cada cenário da quantidade de água disponível para infiltrar, para cada local de implantação dum conjunto de captações e para cada distância de segurança. Assim, as sucessivas execuções do modelo de gestão varrem os valores compreendidos nos intervalos:

$$X_{s,\min} \leq X_s \leq X_{s,\max} \quad X_s = X_{toe} + ds, \dots, X_{s,\max} \text{ (m)} \quad (1)$$

$$ds_{\min} \leq ds \leq ds_{\max} \quad ds = 100, 200, \dots, 800 \text{ (m)} \quad (2)$$

em que: X_s , $X_{s,\min}$ e $X_{s,\max}$ o local de implantação de cada captação subterrânea medido em relação à linha de costa e os respectivos limites; ds - distância de segurança e os respectivos limites.

Na figura seguinte estão esquematizados os sistemas de captação, de abastecimento de água e de controlo da intrusão salina numa zona costeira.

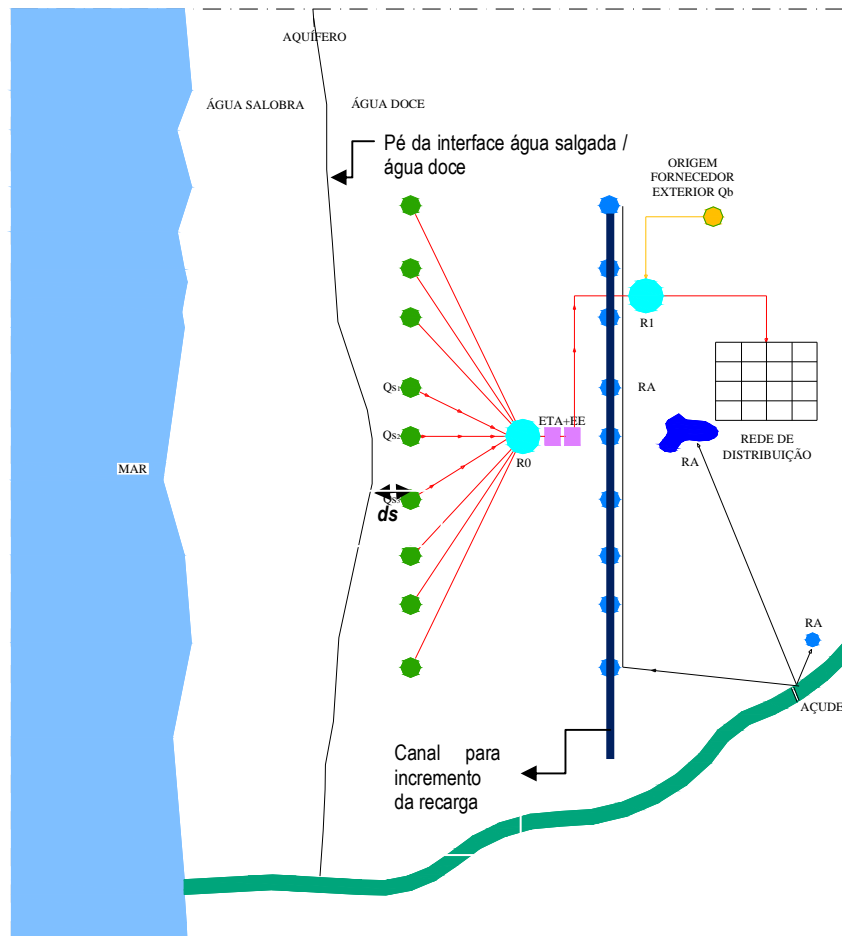


Figura 1 - Esquema de sistema de abastecimento de água e de incremento da recarga numa região costeira

3. MODELO DE GESTÃO DE AQUÍFEROS SUJEITOS À INTRUSÃO SALINA

A decisão sobre a implementação dum sistema de incremento da recarga que funcione como uma componente dum sistema de controlo da intrusão salina e, subseqüentemente, da qualidade da água subterrânea numa zona costeira, deve ser devidamente fundamentada sob os pontos de vista técnico e económico e para tal é fundamental a existência de modelos de gestão que incorporem técnicas de optimização e modelos de simulação dos sistemas hídricos envolvidos.

3.1. Descrição do modelo de gestão

No processo de procura das melhores políticas de gestão de aquíferos do litoral são testadas pelas técnicas de optimização 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 porosos homogéneos as soluções defendidas por Strack (1989) e por Bakker (2002) apresentam 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.

Aplicando as equações diferenciais do escoamento subterrâneo em meios porosos a cada lado da interface água doce / água salgada, então o escoamento num aquífero costeiro é definido por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(K_{xx})_d \frac{\partial h_d}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(K_{yy})_d \frac{\partial h_d}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[(K_{zz})_d \frac{\partial h_d}{\partial z} \right] + Q_d = S_d \frac{\partial h_d}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(K_{xx})_s \frac{\partial h_s}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(K_{yy})_s \frac{\partial h_s}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[(K_{zz})_s \frac{\partial h_s}{\partial z} \right] + Q_s = S_s \frac{\partial h_s}{\partial t} \quad (4)$$

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 destas equações diferenciais pode realizar-se por via analítica, nalguns casos, e mais genericamente por via numérica. Defende-se 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 respectivo caudal Q_i . O potencial é definido, usando o método das imagens, por:

$$\phi = \frac{q}{K} x + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi K} LN \left[\frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{(x + x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right] \quad (5)$$

onde: q - escoamento específico; K - condutividade hidráulica; Q_i - extracção / Injecção; (x_i, y_i) coordenadas do local de extracção / injecção; n - número de locais extracção / injecção.

Cheng *et al* (1999) indicam que em situações reais quando existe um canal com largura $2a$ que dista da linha de costa L e onde é possível a altura de recarga diária w , então o potencial pode ser determinado através de:

$$\phi = \frac{q_r}{K} x \quad \Leftarrow \quad 0 \leq x \leq L \quad \wedge \quad \phi = \frac{q_r}{K} L \quad \Leftarrow \quad L \leq x \quad (6)$$

onde: $q_r = 2wa$ é o volume de recarga por unidade de comprimento.

Considerando um canal com comprimento limitado a $2l$ cujo ponto central está localizado a (L_x, L_y) o potencial determinado usando o método das imagens é:

$$\begin{aligned} \phi_{ditch} = & \frac{q_r}{4\pi K} \left[2(x + L_x) \left(\tan^{-1} \frac{y - L_y + l}{x + L_x} - \tan^{-1} \frac{y - L_y - l}{x + L_x} \right) \right. \\ & - 2(x - L_x) \left(\tan^{-1} \frac{y - L_y + l}{x - L_x} - \tan^{-1} \frac{y - L_y - l}{x - L_x} \right) \\ & + (y - L_y + l) LN \frac{(y - L_y + l)^2 + (x + L_x)^2}{(y - L_y + l)^2 + (x - L_x)^2} \\ & \left. - (y - L_y - l) LN \frac{(y - L_y - l)^2 + (x + L_x)^2}{(y - L_y - l)^2 + (x - L_x)^2} \right] \quad (7) \end{aligned}$$

São diversas as técnicas de optimização que podem ser usadas para determinar as melhores políticas de implantação das captações, os regimes de extracção de água doce e as quantidades a infiltrar ou injectar para incremento da recarga. A resolução do problema enunciado envolve a utilização de técnicas de optimização não lineares que se revelam computacionalmente complexas. A melhor solução pode ser encontrada adoptando uma metodologia multietápica com um grau progressivo de

complexidade. As técnicas de optimização que têm sido usadas baseiam-se no conceito de gradiente e/ou numa heurística de optimização global. Os métodos baseados no conceito de gradiente poderão convergir para óptimos locais, pelo que ao seu uso devem ser associadas algumas cautelas. Os algoritmos genéticos têm a capacidade de se adaptar a problemas não lineares como os encontrados na gestão de sistemas aquíferos do litoral. Informação mais detalhada sobre esta técnica de optimização pode ser encontrada em Goldberg (1989).

3.2. Formulação matemática do problema

O objectivo enunciado é matematicamente representado pela maximização das extracções:

$$\max Z = \sum_{s=1}^{N_s} Q_s \quad (8)$$

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. Estes poderão ser as captações que condicionam a solução, eventualmente as implantadas nos locais mais próximos do mar. Pretendendo implantar um conjunto de captações em linha, então os pontos de controlo serão as captações centrais. Exigindo que a distância de segurança seja respeitada, então limitar-se-á o avanço do pé da interface:

$$(X_{pe})_s \leq (X_{pc})_s - (ds)_s \quad \forall s, s=1,2,\dots,N_{pc} \quad (9)$$

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.

Poderão ser adicionadas outras restrições, designadamente os limites de extracção de cada captação e cotas piezométricas mínimas:

$$Q_{i,\min} \leq Q_i \leq Q_{i,\max} \quad i = 1, \dots, N_s \quad (10)$$

$$h_s \geq h_0 \quad s = 1, \dots, N_s \quad (11)$$

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.

4. APLICAÇÕES

Nos estudos seguintes considerar-se-á o sistema esquematizado na figura 1 com incremento da recarga por canal. Numa primeira etapa analisar-se-ão os efeitos do incremento da recarga por canal num sistema aquífero genérico de referência e posteriormente num aquífero da zona litoral de Viana do Castelo - Portugal.

4.1. Caso dum aquífero genérico de referência

Neste item aplicar-se-á o modelo de gestão ao caso apresentado em Cheng e Ouazar (1999). Trata-se dum aquífero poroso livre com espessura de 14 m, condutividade hidráulica de 100 m/dia e escoamento específico de 0,6 m³/m.dia. Existem duas captações implantadas nos locais (1000, 1200) e (800, 1600). Se as extracções forem de $Q_1=480$ m³/dia e $Q_2=360$ m³/dia então as captações serão invadidas pela água salgada, conforme se mostra na Figura 2.

Adoptando o conceito de distância de segurança então as extracções máximas permitidas ao conjunto destas duas captações são as que estão registadas na Figura 3.

Por exemplo, considerando uma distância de segurança (ds) de 150 m as extracções máximas são $Q_1=604,4$ m³/dia e $Q_2 = 75,2$ m³/dia. Com ds superiores a 150 m o modelo indica que a melhor

solução é desligar a captação 2. A localização do pé da interface em função das diversas distância de segurança consideradas ($ds=100, 150, \dots, 350$ m) encontra-se representada na Figura 4.

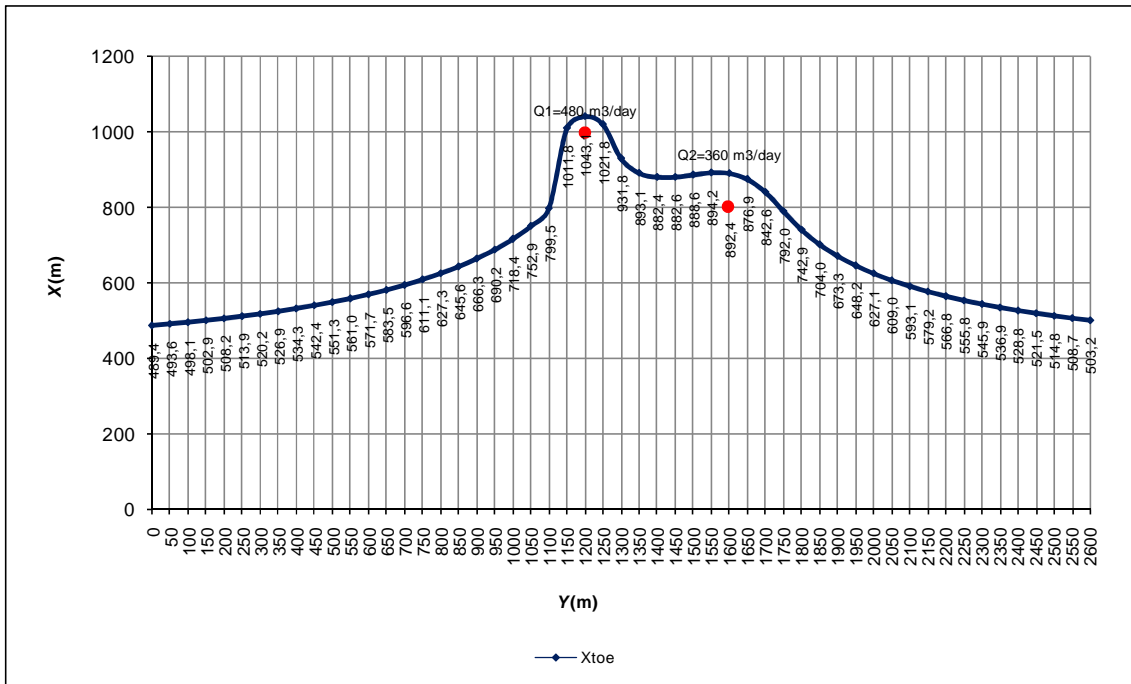


Figura 2 - Pé da interface na situação actual sem incremento da recarga

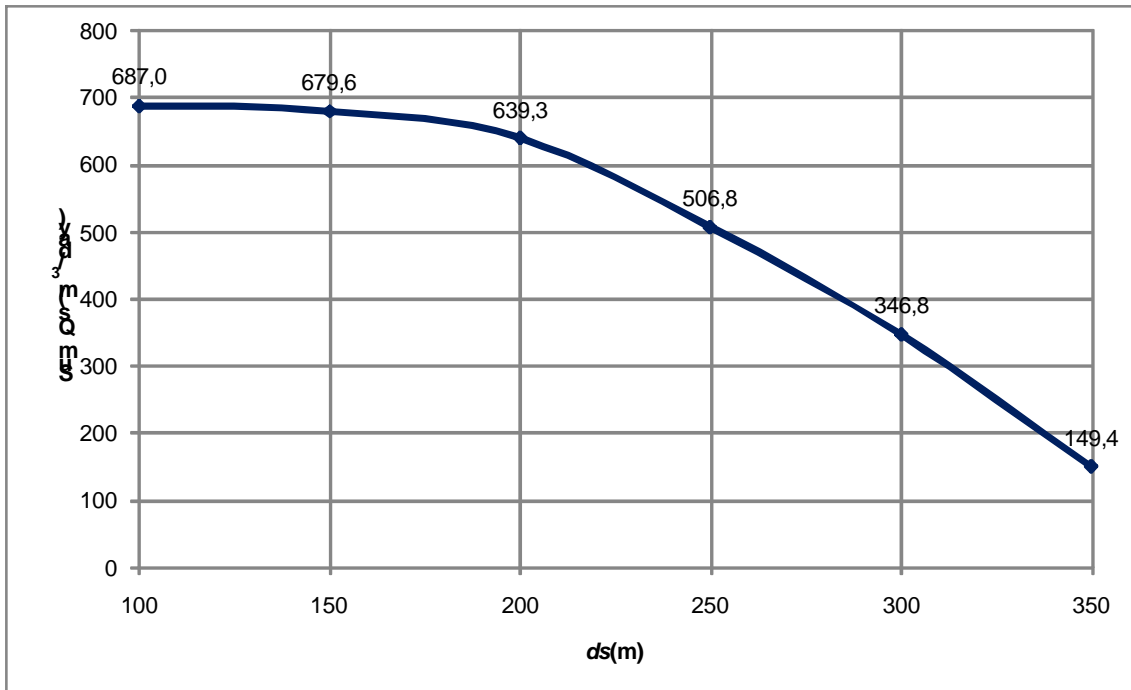


Figura 3 - Extracções máximas permitidas às duas captações versus distância de segurança

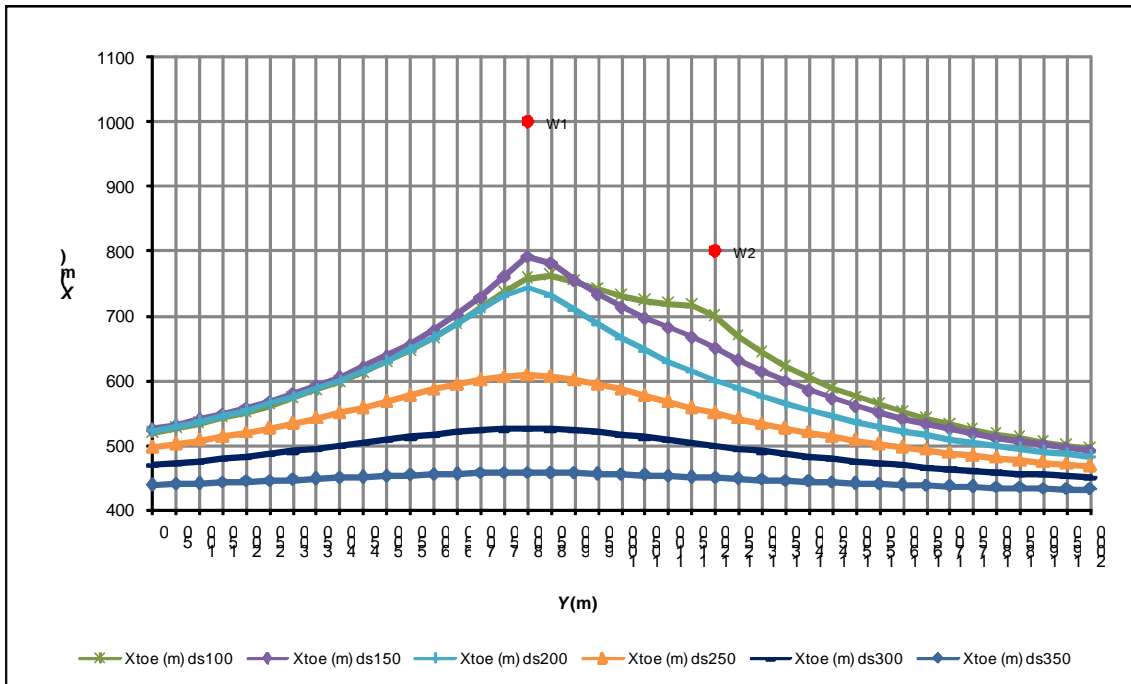


Figura 4 - Pé da interface versus distância de segurança (ds) sem incremento da recarga

Implementando um sistema de recarga composto por um canal paralelo à linha de costa que dista desta 500 m e cuja infiltração conduz a um incremento da recarga $w = 0,03$ m/dia então a posição do pé da interface altera-se e apresenta a configuração que consta na Figura 5.

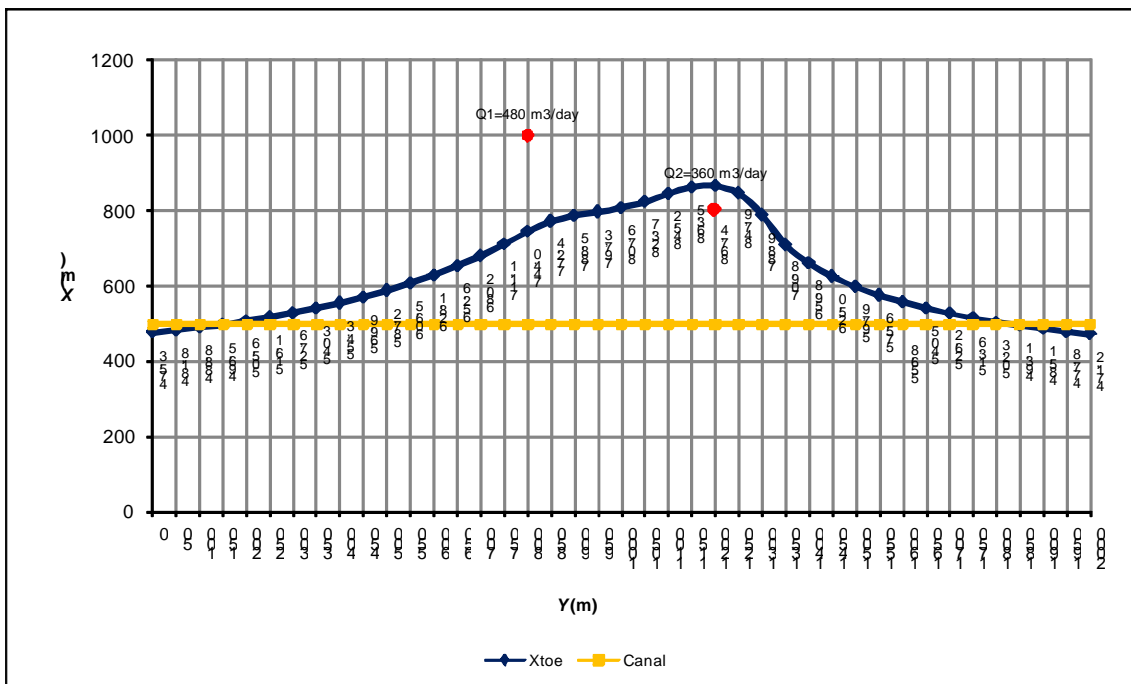


Figura 5 - Pé da interface na situação de incremento da recarga por canal com $w = 0,03$ m/dia

Sendo possível aumentar a infiltração para $w = 0,09$ m/dia então a interface é, novamente empurrada para locais mais próximos do mar, conforme se mostra na Figura 6.

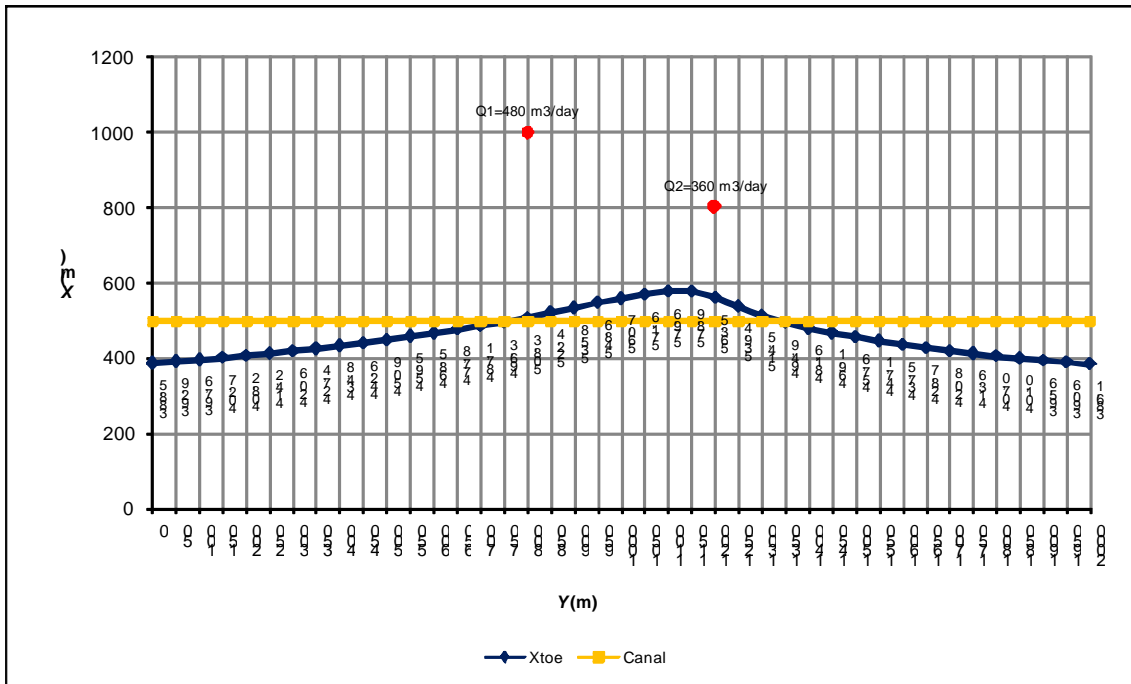


Figura 6 - Pé da interface na situação de incremento da recarga por canal com $w = 0,09$ m/dia

Considerando que é possível construir um canal com comprimento de 800 m, centrado no local de coordenadas (1200, 1000), onde seja possível incrementar a recarga com $q_r = 0,125$ m²/dia, então as extracções máximas permitidas nas duas captações em função da distância de segurança são as que constam na Figura 7 e as respectivas configurações do pé da interface são as que estão desenhadas na Figura 8.

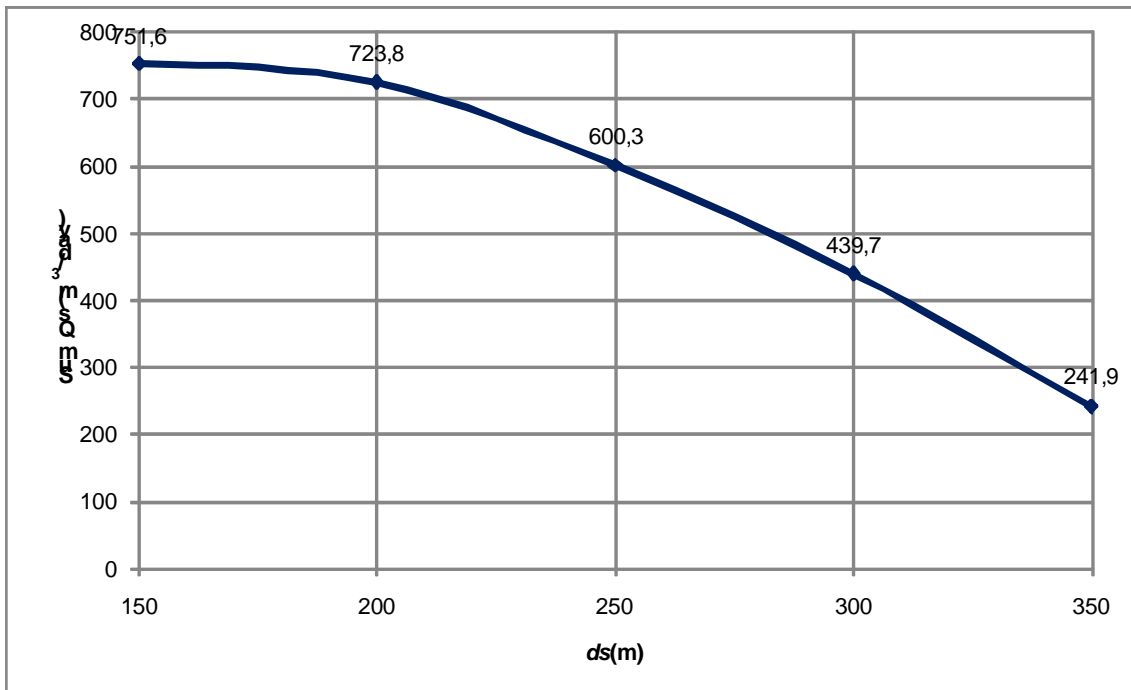


Figura 7 - Extracções máximas nas duas captações versus ds com canal de 800 m e $q_r = 0,125$ m²/dia

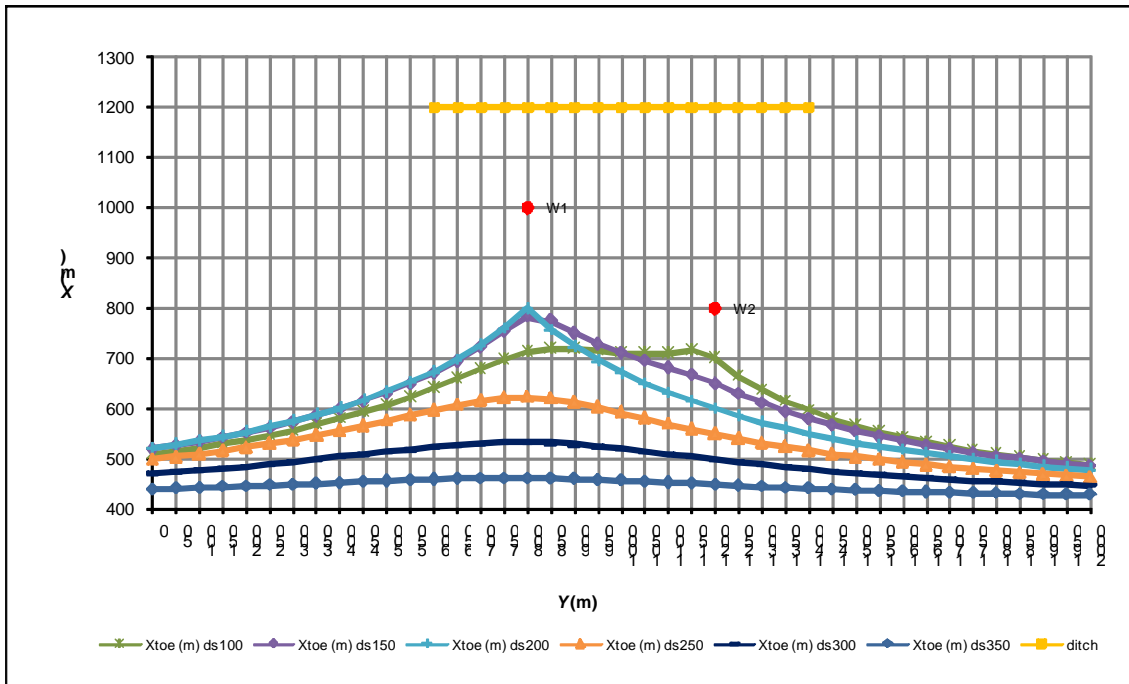


Figura 8 - Pé da interface versus ds com incremento da recarga por canal de 800 m e $q_r = 0,125 \text{ m}^2/\text{dia}$

Com o objectivo de se estudar o efeito do local de implantação do canal nas extracções das duas captações correu-se o modelo de gestão para sucessivos valores da distância do canal à linha de costa L_x (20, 40, 60, ..., 2000 m) e usando sempre como distância de segurança 150 m. Os resultados obtidos constam na Figura 9. Nota-se que a captação que desempenha um papel mais importante é a que está mais afastada do mar, que ocorre um crescimento acentuado nas suas extracções quando o local de implantação do canal se aproxima do local correspondente à sua localização deduzida da distância de segurança (neste caso $1000 - 150 = 850$ m). Quando é permitido um crescimento nas extracções na captação principal para que se mantenha sob controlo ds então é necessário diminuir a extracção na captação 2.

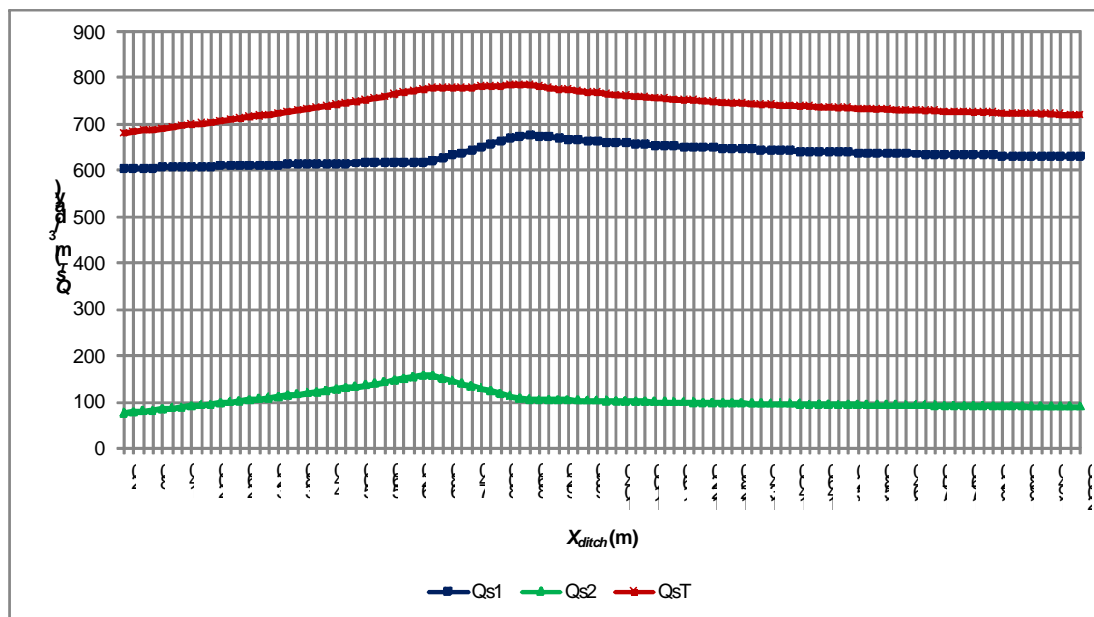


Figura 9 - Extracções máximas nas captações com $q_r = 0,125 \text{ m}^2/\text{dia}$ versus local de implantação do canal

A análise dos resultados que constam das figuras anteriores permitem-nos realçar que a implementação dum sistema de incremento da recarga possibilita o aumento das extracções, (isto seria interessante se fosse possível utilizar uma linha de água como canal de recarga), mas, sobretudo, disponibiliza um sistema de controlo da posição da interface água salgada / água doce, ou seja proporciona um sistema de controlo da qualidade da água.

4.2. Caso da zona costeira do Viana do Castelo - Portugal

Nos estudos seguintes admitir-se-á que três captações subterrâneas distando entre si 200 m serão implantadas na camada aquífera superficial da Veiga da Anha no litoral de Viana do Castelo. A caracterização hidrogeológica do local de estudo foi feita a partir da realização de ensaios de caudal e das respectivas medições de níveis, bem como da análise de estudos anteriores relacionados com a construção das antigas captações por furo existentes em Veiga da Anha. A camada aquífera superficial apresenta uma condutividade hidráulica cujo valor médio pode quantificar-se como $K=1,25$ m/dia e escoamento específico actual $q=0,1875$ m³/m.dia. A altura actual da superfície do mar está vinte metros acima da base da cobertura sedimentar ($B=20,0$ m). Admite-se que é possível construir um canal com comprimento de 400 m, implantado a 1500 m do mar e que seja possível incrementar a recarga com $q_r=0,125$ m²/dia. Correndo o modelo de gestão para sucessivos valores do local de implantação das captações ($X_s=150,200,\dots,1300$ m) as extracções máximas no conjunto das três captações para cada distância de segurança considerada ($ds=100, 200, \dots,800$ m) são as que constam na Figura 10.

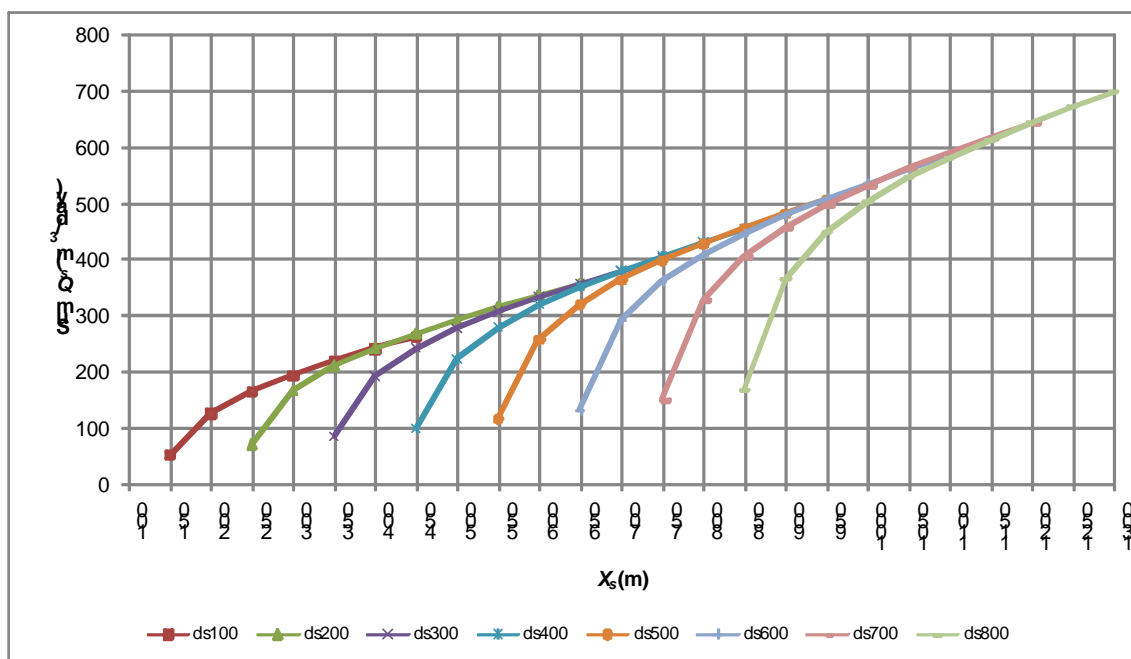


Figura 10 - Extracções máximas permitidas nas três captações na situação actual em função de ds versus X_s

Seleccionando o valor máximo em cada eventual local de implantação evidencia-se que é vantajoso e recomendável que à medida que as captações são construídas em locais mais afastados do mar convém manter a interface a distâncias sucessivamente maiores. Por exemplo, implantando o conjunto de captações em locais que distam do mar entre 950 m e 1050 m convém manter o pé da interface a 600 m.

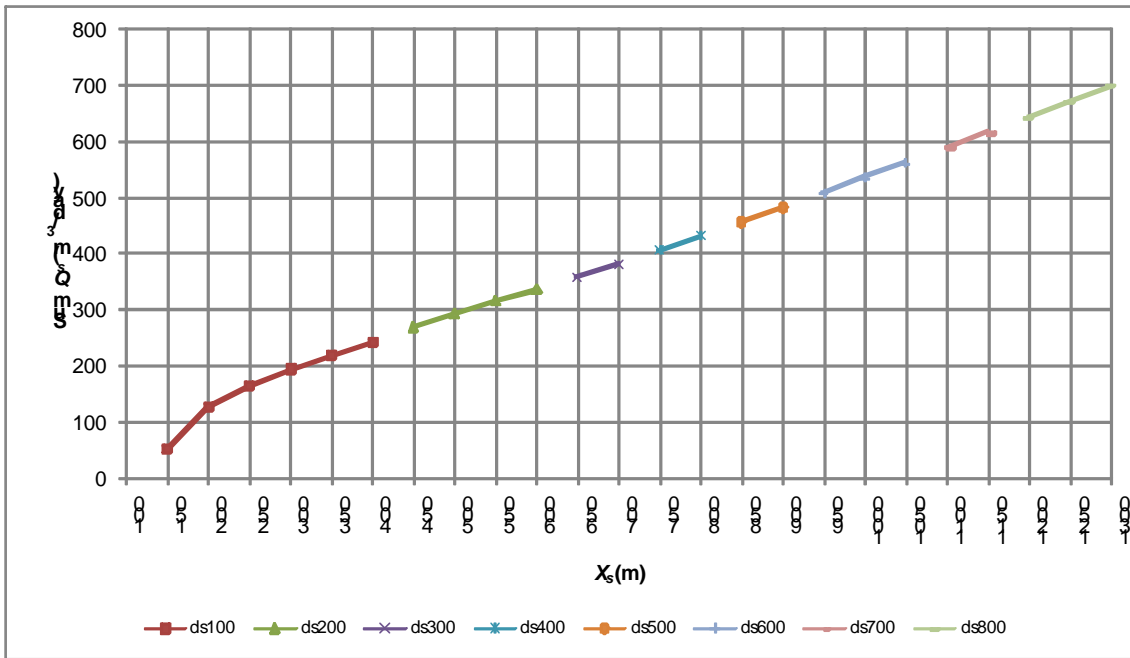


Figura 11 - Extracções máximas permitidas nas três captações na situação actual versus X_s

Se os locais disponíveis para a construção do conjunto de captações estiverem entre os 250 m e 600 m do mar adoptando uma distância de segurança de 200 m é possível extrair em cada furo as quantidades que estão registadas na Figura 12, sendo $Q_{s1}=Q_{s3}$ e Q_{sT} a soma das extracções.

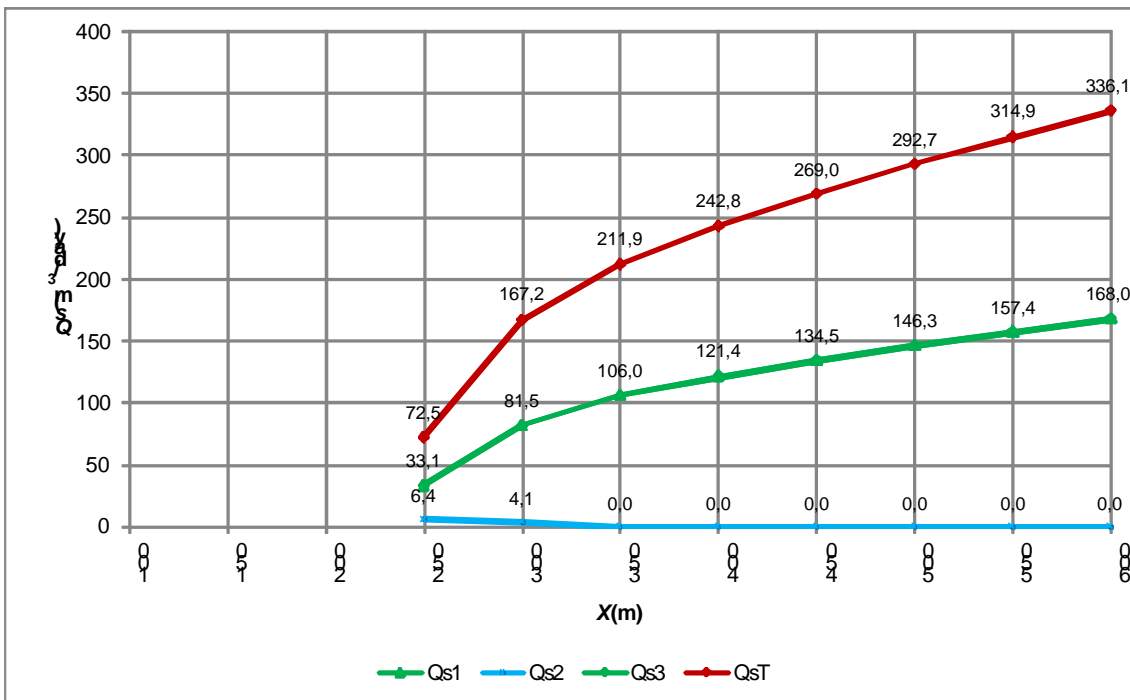


Figura 12 - Extracções máximas permitidas nas três captações na situação actual com $ds = 200$ m versus X_s

Construindo um canal com comprimento de 400 m paralelamente à linha de costa a 1500 m do mar e onde seja possível incrementar a recarga com $q_r = 0,125$ m²/dia, então as extracções máximas para cada ds e em cada eventual local de implantação passam para os valores registados na figura 13.

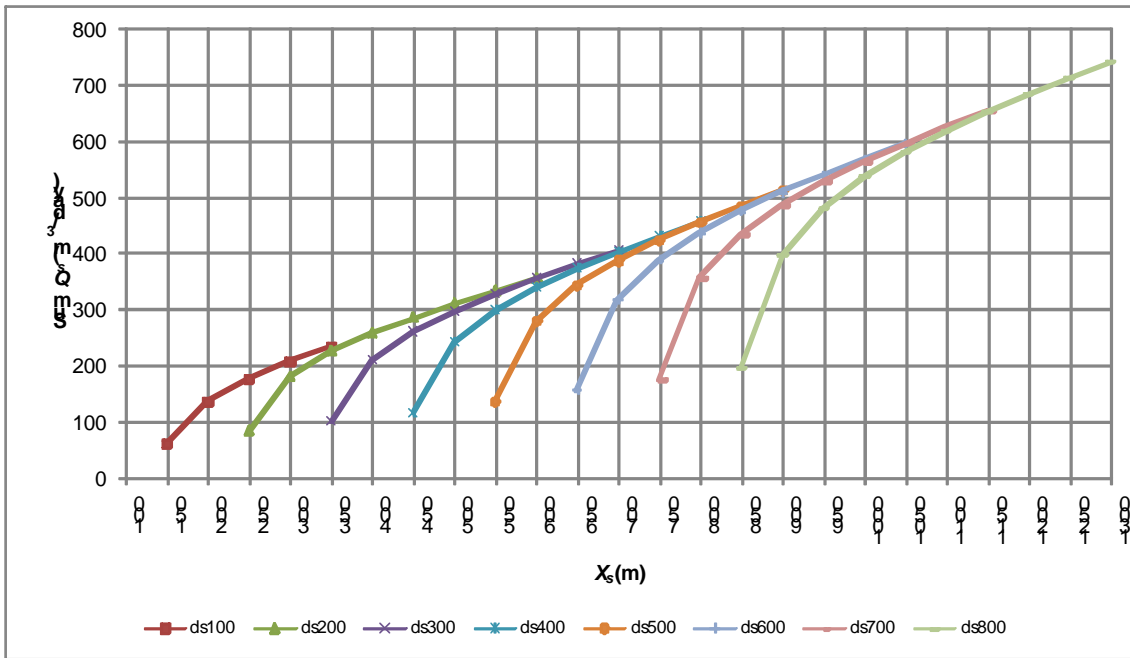


Figura 13 - Extracções máximas permitidas nas três captações com incremento da recarga por canal em função de ds versus local de implantação

Na Figura 14 constam as extracções máximas permitidas nas três captações pretendendo $ds = 200$ m quando na zona existe sistema de incremento da recarga. A Figura 15 diz respeito à localização do pé da interface quando o local de implantação das captações é $X_s = 400$ m e se adopta $ds = 200$ m.

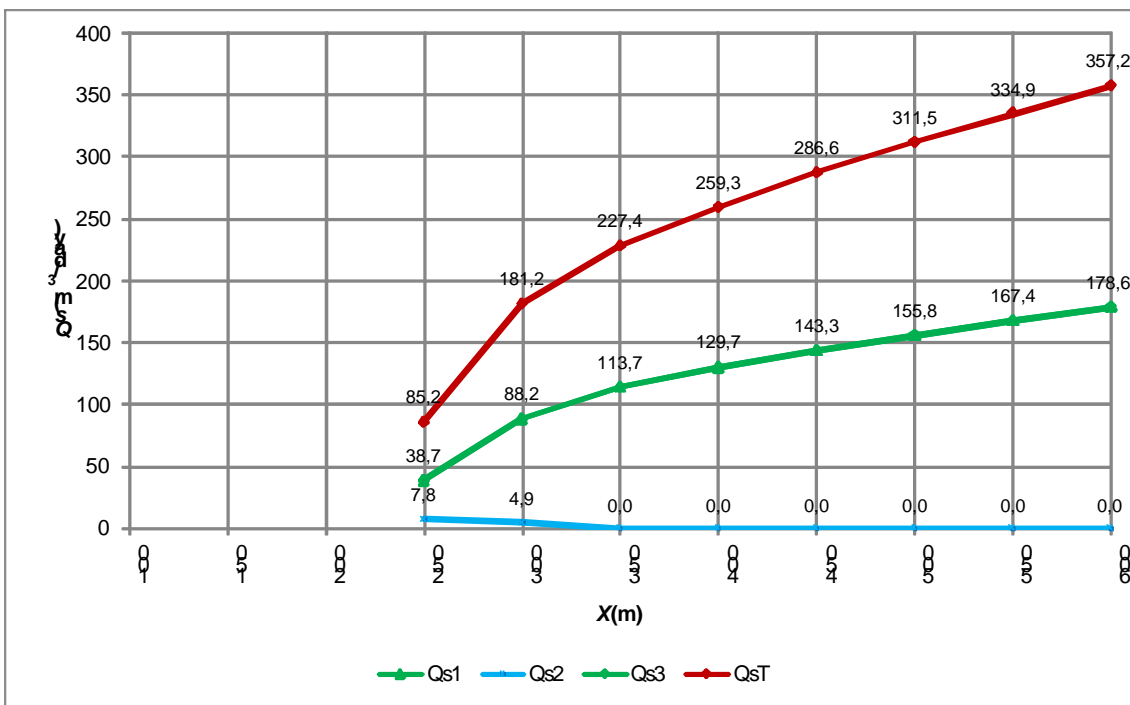


Figura 14 - Extracções máximas nas três captações com incremento da recarga e $ds = 200$ m versus X_s

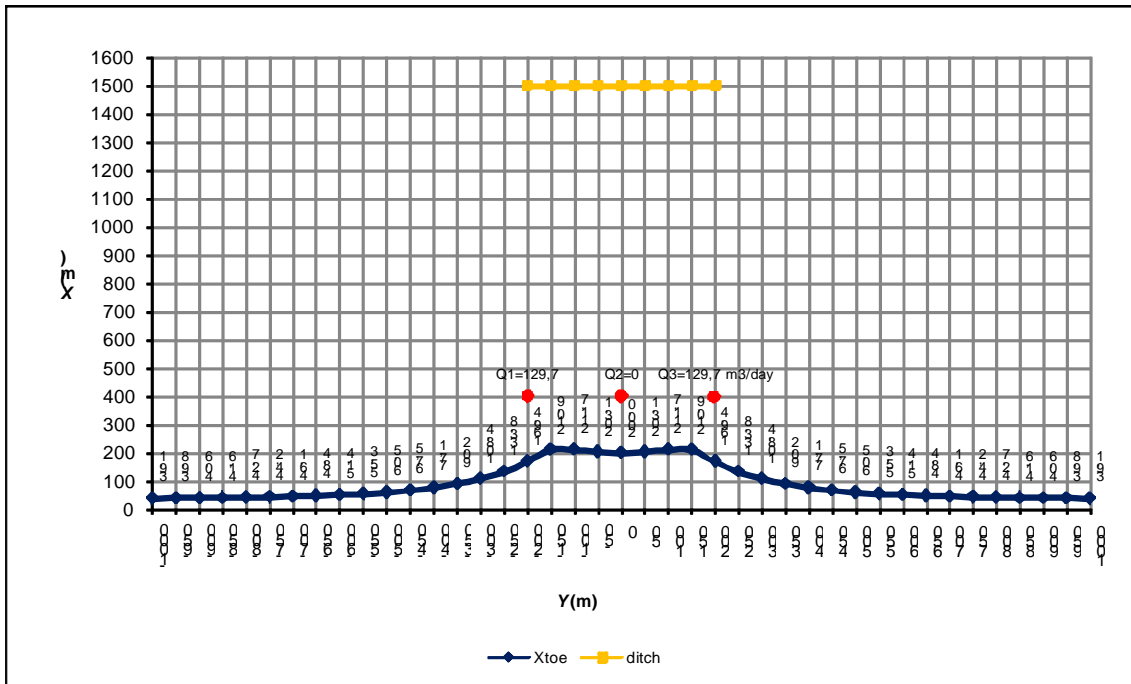


Figura 15 - Localização do pé da interface com incremento da recarga, $ds = 200$ m e $X_s = 400$ m

Fazendo uma análise comparativa dos resultados sem e com sistema de incremento da recarga por canal constata-se que o canal de infiltração constitui um sistema de controlo do fenómeno da intrusão salina e que permite o acréscimo nas extracções, cujos valores ficam registados nas figuras seguintes, respectivamente em (m^3/dia) e em (%).

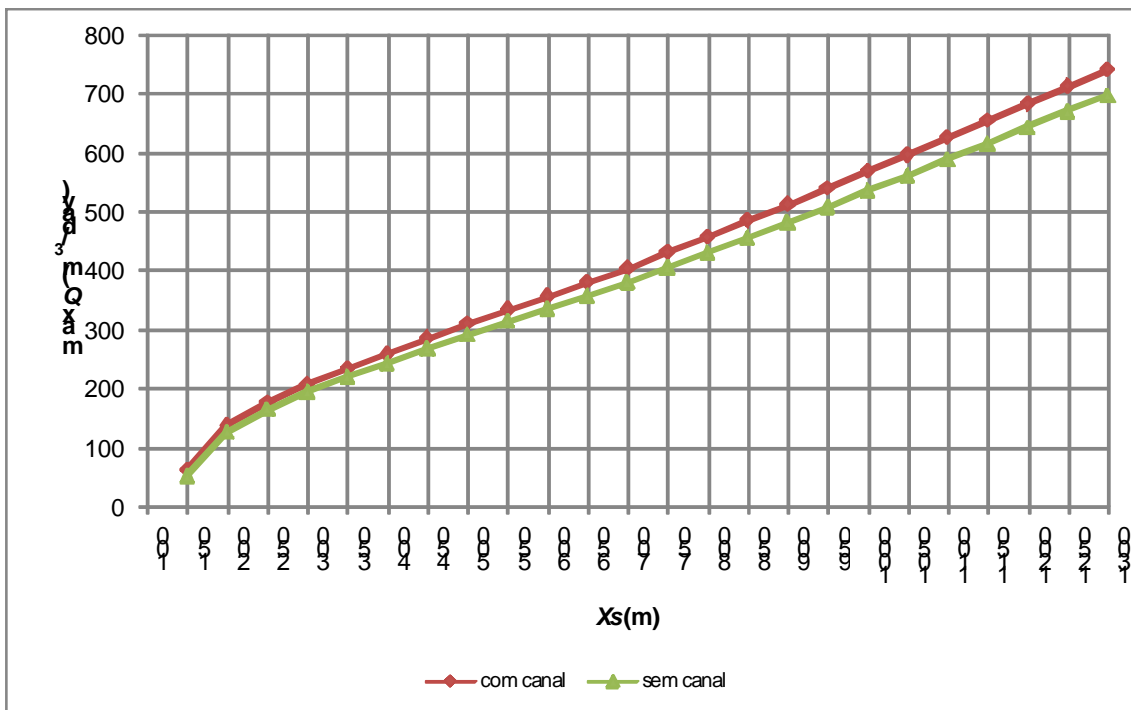


Figura 16 - Valores máximos das extracções nas três captações sem e com incremento da recarga versus X_s

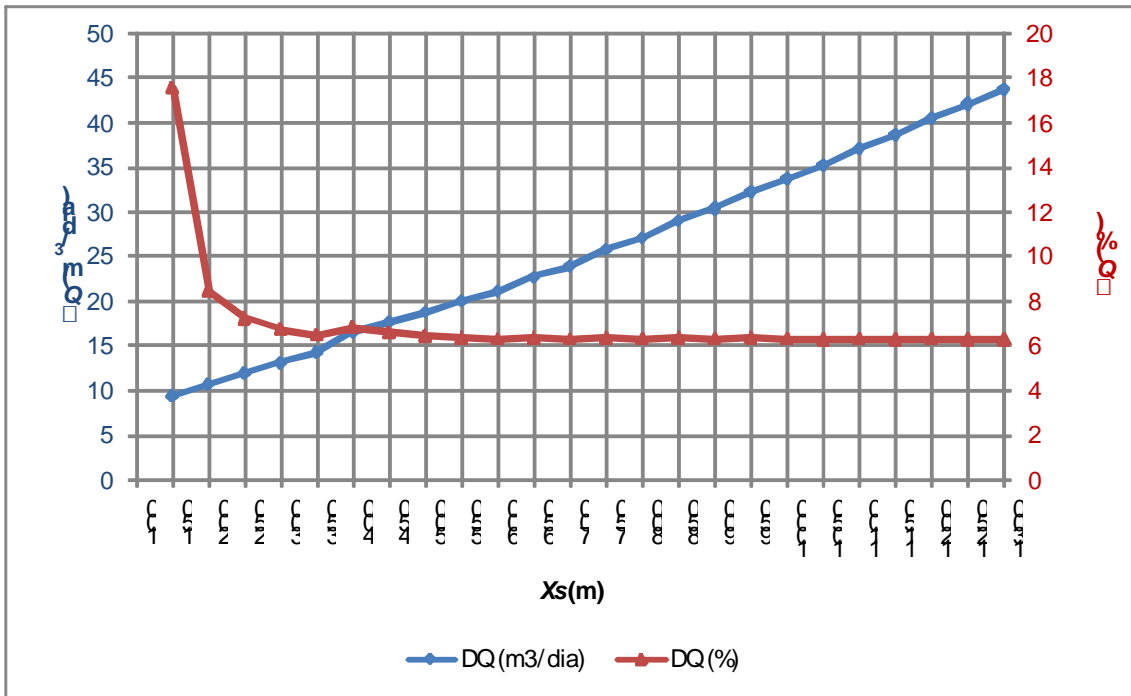


Figura 17 - Resumo dos acréscimos na extracção quando existe sistema de incremento da recarga vs X_s

Por razões que se relacionam com facilidades de aquisição e de manutenção das electrobombas poderá ser interessante a utilização de equipamentos com as mesmas características em todas as captações. Nestas circunstâncias a extracção total nas 3 captações é inferior quando se permite qualquer valor para a captação central. A título de exemplo, mostra-se na Figuras 18 as extracções permitidas quando se pretende respeitar $d_s=800$ m. Na figura 19 está representada a localização do pé da interface quando $d_s=800$ m e o local de implantação das captações é $X_s=1200$ m.

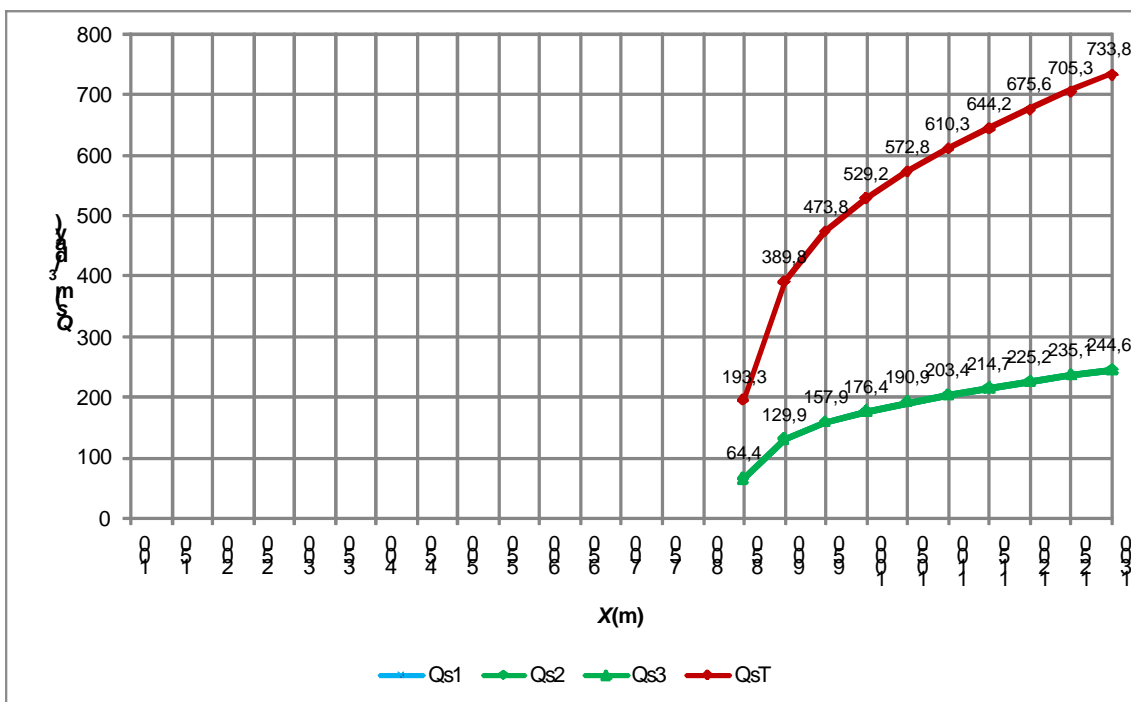


Figura 18 - Extracções máximas nas três captações com incremento da recarga e $d_s = 800$ m versus local de implantação quando $Q_{s1} = Q_{s2} = Q_{s3}$

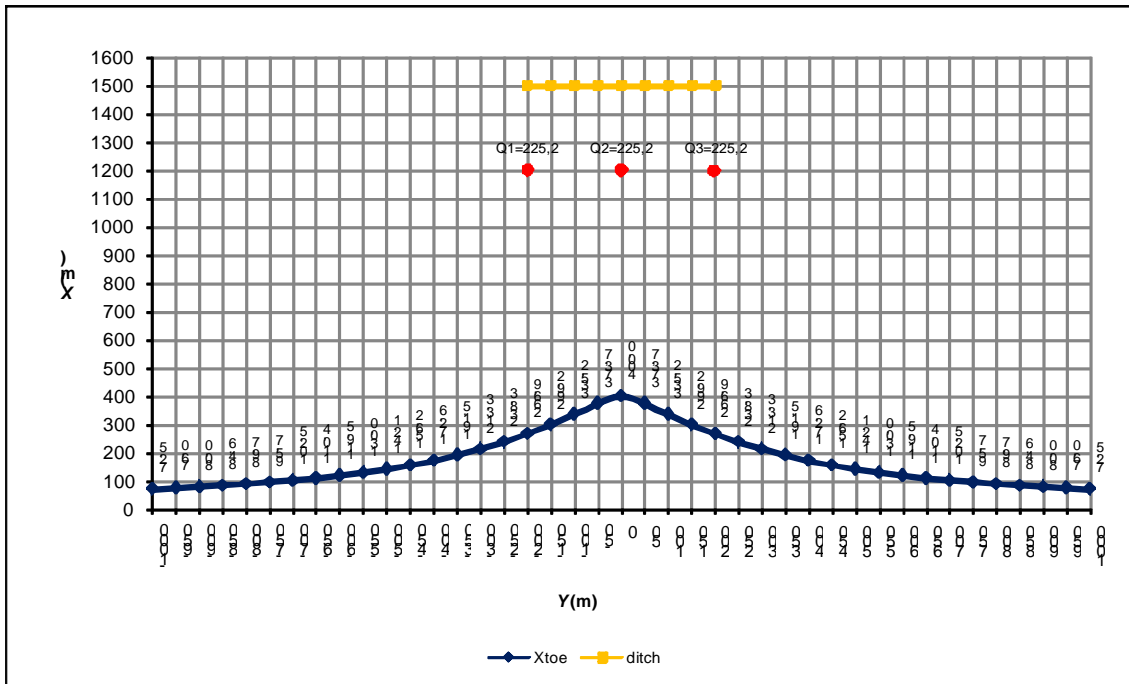


Figura 19 - Localização do pé da interface com incremento da recarga, $\delta s = 800$ m e local de implantação das captações $X_s = 1200$ m quando $Q_{s1} = Q_{s2} = Q_{s3}$

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, quantificamos os efeitos do incremento da recarga em aquíferos costeiros por infiltração em canal e mostramos que a utilização da água disponível numa região costeira que inevitavelmente seria descarregada no mar permite a implementação dum verdadeiro sistema de controlo da intrusão marinha. Adoptando esta perspectiva regional e incrementando a recarga contribui-se para a utilização integrada e sustentável dos recursos hídricos disponíveis nas áreas costeiras. O incremento da recarga revela-se uma medida adequada para o manter sob controlo o volume de água salgada num aquífero costeiro e permite, simultaneamente, acréscimos nas extracções.

Os casos de estudo apresentados permitem verificar que o modelo de gestão (Optimização-simulação) desenvolvido pode ser usado para a concepção e gestão optimizadas conjuntas de sistemas de captação e de controlo da intrusão marinha em zonas costeiras. O modelo determina o conjunto de extracções aconselháveis em função do eventual local de implantação das captações e para que se mantenha sob controlo a interface água salgada / água doce no aquífero, ou seja que se evite a propagação da poluição salina. Assim, conclui-se que o modelo apresentado pode ser um instrumento útil para a definição de políticas sustentáveis da utilização da água em zonas costeiras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Serviços Municipalizados de Viana do Castelo a disponibilização de meios para a realização de ensaios de caudal nas antigas captações de Veiga da Anha.

BIBLIOGRAFIA

1. Bakker, Mark e Schar, F. (2002). *The Sea Water Intrusion (SWI) Package Manual*, Version 1;
2. Cheng, A. e D. Ouazar, (1999). *Analytical Solutions. Seawater Intrusion in coastal Aquifers - Concepts, Methods and Practices*,. Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-5573-3;
3. Essaid HI, (1990). *The computer model SHARP*, water-resources investigations report 90-4130. US Geological Survey, California;
4. Ferreira da Silva, Júlio (2003). *Gestão otimizada à escala regional de sistemas aquíferos potencialmente sujeitos à intrusão salina - Um modelo global para o uso sustentável da água em regiões costeiras*, Dissertação de doutoramento em Engenharia Civil - Hidráulica, UMinho;
5. Ferreira da Silva, Júlio F. (2005). *Localização e gestão otimizadas de sistemas de captação e de controlo da intrusão marinha em aquíferos costeiros*, 7.º SILUSBA, Évora, 30 Maio-2 Junho;
6. Ferreira da Silva, Júlio F. (2006). *Planeamento otimizado conjunto de sistemas de captação e de controlo da intrusão marinha em aquíferos costeiros*, 5.º Congresso Ibérico de Gestão e Planeamento da água, Faro, 4-8 Dezembro;
7. Ferreira da Silva, Júlio F. (2007b). *Modelo estocástico-determinístico para a análise dos efeitos do incremento da recarga nos aquíferos costeiros*. IV Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa. Madeira. Funchal. 17 a 19 de Outubro;
8. Goldberg, D.E (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, 486 pp, USA,;
9. Mahesha, A. and S. H. Nagaraja, (2003). *Effect of natural recharge on sea water intrusion in coastal aquifers*, Journal of Hydrology, 174, pp 211-220;
10. Mahesha, A.,(1996a). *Steady-state effect of freshwater injection on seawater intrusion*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 122, no. 3 pp 149-154, May/June;
11. Mahesha, A., (1996b). *Transient effect of battery of injection wells on seawater intrusion*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 122 no. 5, pp 266-271, May/June;
12. Mahesha, A., (1996c). *Control of seawater intrusion through injection-extraction well system*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 122, no.º 5, pp 314-317, Sept/Oct;
13. Reichard Eric G. and Johnson, Theodore A., (2005). *Assessment of regional management strategies for controlling seawater intrusion*. Journal of water resources planning and management. vol. 131, nº4, pp. 280-291
14. Strack, O. D. L. (1989). *Groundwater Mechanics*, Prentice Hall.