

PLANEAMENTO OPTIMIZADO CONJUNTO DE SISTEMAS DE CAPTAÇÃO E DE CONTROLO DA INTRUSÃO MARINHA EM AQUÍFEROS COSTEIROS

Júlio F. FERREIRA DA SILVA

*Doutor em Engenharia Civil – Hidráulica Professor Auxiliar do Departamento de Eng^a Civil da Universidade do Minho,
Azurém 4800-058 Guimarães, Portugal
253510200, juliofs@civil.uminho.pt*

Resumo

Este trabalho é dedicado à definição da adequada implantação, num aquífero costeiro, duma barreira de captações e do respectivo sistema de controlo da intrusão marinha, para que sejam maximizadas as extracções e mantida a interface água doce / água salobra para além da distância de segurança mais apropriada. Nos aquíferos do litoral, como existe um equilíbrio dinâmico entre os volumes de água salgada marinha e de água doce, então às extracções de água para abastecimento corresponderia o avanço da cunha salina, no entanto, o incremento da recarga constitui um sistema de controlo da intrusão marinha. A associação de técnicas de optimização e de modelos de simulação do comportamento dos sistemas hídricos permite a determinação das extracções máximas permitidas para cada eventual local de implantação das captações, em função da quantidade de água disponível para recarga. A implementação dum sistema de incremento da recarga disponibiliza um maior volume de água doce no aquífero e impele a água salgada em direcção ao mar.

Palavras-chave - Modelos de optimização-simulação de aquíferos; Intrusão salina; Incremento da recarga; Optimização de sistema de captação e de abastecimento de água,.

1. Introdução

Nos aquíferos costeiros à diminuição do volume de água doce por extracção corresponde o avanço da cunha salina e a inerente degradação da qualidade da água. O controlo do volume de água doce no aquífero pode ser conseguido incrementando a recarga, designadamente, através da infiltração ou injeção em furos.

A concepção, dimensionamento e exploração dos sistemas de captação e de abastecimento de água em zonas costeiras para satisfazer a solicitação de água e procurar maximizar o resultado económico devem examinar cuidadosamente o número de captações necessário, os respectivos locais de implantação e as quantidades a extrair em cada, bem como manter sob controlo o fenómeno da intrusão salina. Esta definição poderá ser melhor fundamentada com recurso a um conjunto de ferramentas de optimização e de simulação do comportamento dos sistemas físicos envolvidos. Técnicas de optimização e modelos de simulação do fenómeno intrusão salina devidamente interligados constituem um modelo global de apoio ao planeamento e gestão dos recursos hídricos disponíveis nas regiões costeiras. Este modelo de gestão (ou de Optimização-Simulação) para determinar as melhores políticas de utilização da água das regiões costeiras considera os custos de investimento e de exploração dos sistemas de abastecimento de água e dos sistemas de controlo da intrusão salina e de preservação dos equilíbrios naturais, designadamente através do incremento da recarga.

Assim, para a utilização sustentável dos aquíferos costeiros é necessário dar atenção especial ao critério do controlo do fenómeno da intrusão marinha. É importante determinar a extracção possível para que a interface seja mantida para além de determinada distância em relação a pontos de controlo. O modelo de gestão disponibiliza as melhores políticas de extracção e a correspondente distância de segurança para cada eventual local de implantação do sistema de captação.

2. Identificação do problema e metodologia de resolução

O problema que pretende resolve-se aqui consiste em determinar de forma quantitativa as consequências do incremento da recarga como medida para minimizar os efeitos da intrusão marinha, ou seja, pretende calcular-se o efeito na quantidade máxima que é possível extrair se for possível incrementar a quantidade de água que se infiltra ou injecta no aquífero.

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 cenário da quantidade de água disponível para infiltrar / injectar e para cada distância de segurança. Assim, as sucessivas execuções do modelo de gestão varrem os valores compreendidos nos intervalos:

$$x_{s,\min} \leq x_s \leq x_{s,\max} \quad (1)$$

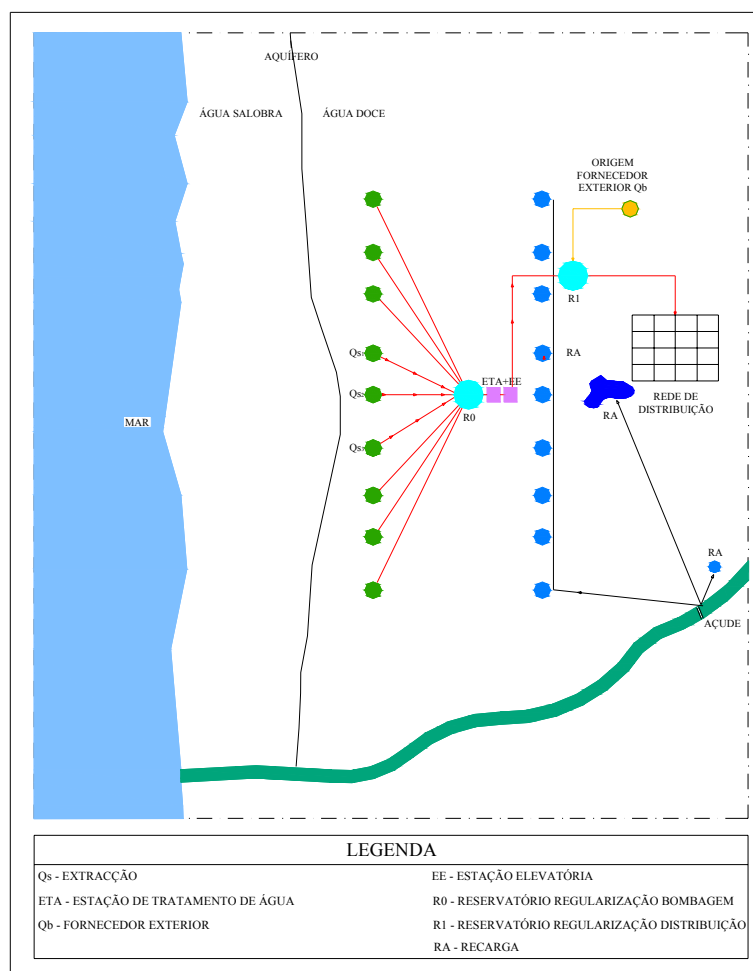
$$Q_{R\min} \leq Q_R \leq Q_{R\max} \quad (2)$$

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

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; Q_R e $Q_{R\min}$ e $Q_{R\max}$ a quantidade de água disponível para recarga e os respectivos limites; ds - distância de segurança.

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

O adequado planeamento e gestão dos sistemas de captação e de controlo da intrusão marinha em aquíferos costeiros exigem a utilização conjunta de técnicas de optimização e de modelos de simulação do comportamento dos sistemas hídricos das regiões costeiras. A decisão sobre a implementação dum sistema de incremento da recarga que funcione como uma componente dum sistema de controlo da intrusão salina e, subsequentemente, da qualidade da água, deve ser devidamente fundamentada sob os pontos de vista técnico e económico. São diversas as técnicas de optimização que podem ser moldadas para determinarem 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. Os modelos de simulação do escoamento subterrâneo, como os defendidos por STRACK (1989) e BAKKER (2002), antecipam o comportamento do aquífero face às alternativas geradas pela ferramenta de optimização. Em FERREIRA DA SILVA (2003) e FERREIRA DA SILVA (2005) 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 pode ser definido por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(K_{xx})_d \frac{\partial h_d}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(K_{yy})_d \frac{\partial h_d}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[(K_{zz})_d \frac{\partial h_d}{\partial z} \right] + Q_d = S_d \frac{\partial h_d}{\partial t} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(K_{xx})_s \frac{\partial h_s}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(K_{yy})_s \frac{\partial h_s}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[(K_{zz})_s \frac{\partial h_s}{\partial z} \right] + Q_s = S_s \frac{\partial h_s}{\partial t} \quad (5)$$

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. 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 o respectivo caudal Q_i . O potencial é definido, usando o método das imagens, por:

$$\phi = \frac{q}{K} x + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi K} \ln \left[\frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{(x + x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right] \quad (6)$$

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.

4. Aplicações

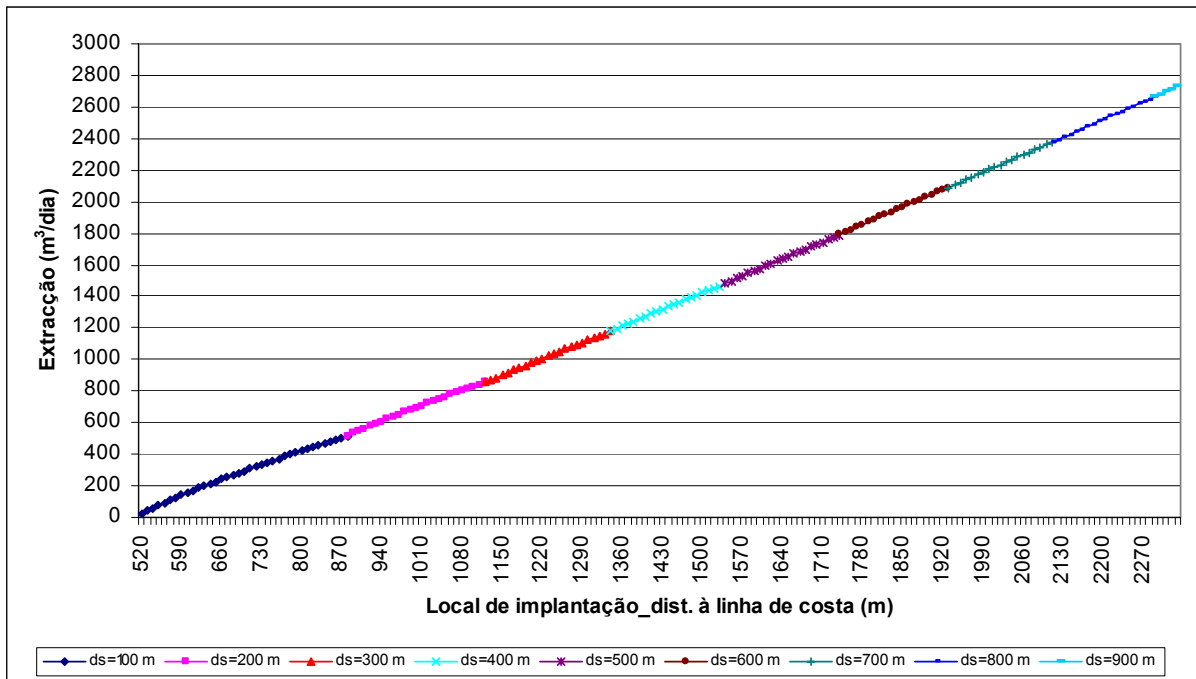
Nos estudos seguintes considerar-se-á o sistema esquematizado na figura 1. Admitir-se-á que as captações subterrâneas serão implantadas num aquífero com espessura de 14 m, condutividade hidráulica de 100 m/dia e escoamento específico de 0,6 m³/m.dia. Não ocorrendo qualquer extracção o pé da interface localiza-se a 418,54 m do mar. 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. O sistema de recarga é composto por um conjunto de furos em número igual ao das captações. Este sistema é semelhante ao usado em Ferreira da Silva e Haie (2004a) para que os efeitos do incremento da recarga possam ser facilmente comparados.

Numa primeira etapa analisar-se-ão os efeitos do incremento da recarga por infiltração / injecção em furos implantados paralelamente às respectivas captações e afastados 1000 m para o interior do continente. Depois far-se-á outro estudo diminuindo a distância entre as captações e o sistema de controlo para 500 m.

4.1. Extracção versus local de implantação numa captação subterrânea com sistema de controlo da intrusão salina incrementando a recarga em 100 m³/dia a 1000 m da captação

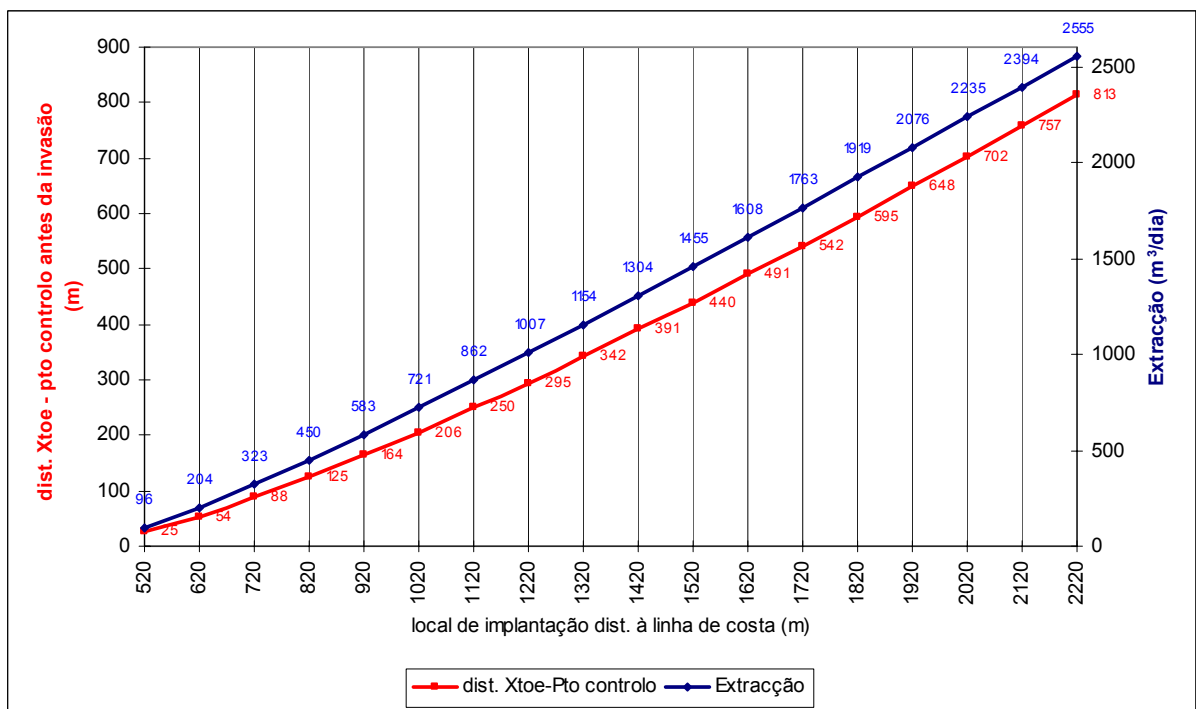
Pretende saber-se quais serão a extracção e a distância de segurança óptimas para cada eventual local de implantação, se for implementado um sistema de incremento da recarga a 1000 m da captação onde seja possível infiltrar / injectar $Q_{R1} = 100$ m³/dia, ou seja 1,16 L/s. Os resultados obtidos estão registados na figura seguinte:

Figura 2 - Extracção em função da distância de segurança para 1 captação vs local de implantação



Na figura seguinte encontram-se registados os valores da extracção máxima imediatamente antes da captação ser invadida e a distância entre o pé da interface e a captação para cada eventual local de implantação.

Figura 3 - Extracção máxima e distância do pé da interface à captação antes da invasão vs local de implantação



4.2. Extracção retirando a mesma quantidade em todas as captações versus local de implantação com sistema de controlo da intrusão salina incrementando a recarga em 100 m³/dia a 1000 m das captações

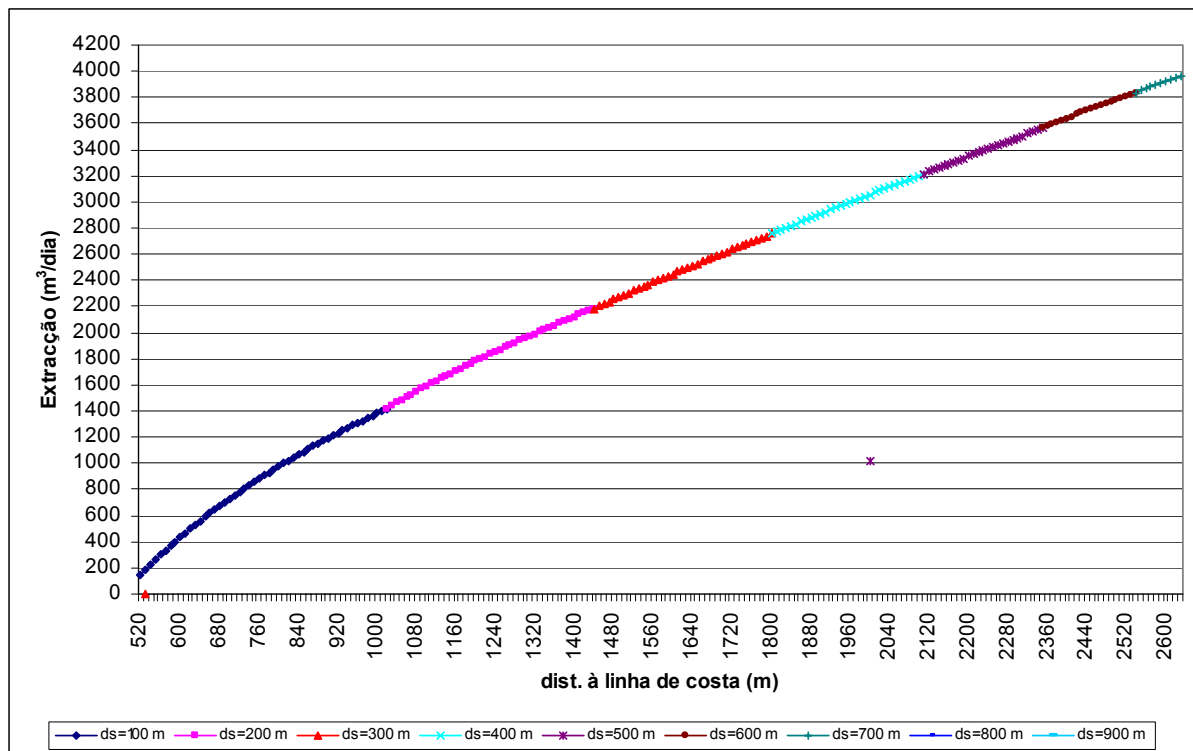
Por razões que se relacionam com facilidades de aquisição e de manutenção dos equipamentos electromecânicos poderá ser interessante a utilização de equipamentos com as mesmas características em todas as captações. A formulação e a metodologia de resolução são semelhantes à descrita no item anterior. Neste caso, as restrições associadas às extracções podem ser formuladas do seguinte modo:

$$Q_{s,\min} \leq Q_s \leq Q_{s,\max} \quad s = 1, 2, \dots, N_s \quad (7)$$

$$Q_{s+1} = Q_1 \quad s = 1, 2, \dots, (N_s-1) \quad (8)$$

Nas figuras seguintes estão os resultados de estudos realizados para a implantação de uma barreira de extracção com, respectivamente, 3, 5 e 11 captações e respectivo sistema de incremento da recarga com igual número de furos implantados a 1000 m das captações. Existe sempre uma captação central que corresponde ao ponto de controlo. As distâncias entre as captações são, respectivamente, 1000, 500 e 200 m.

Figura 4 - Extracção em função da distância de segurança para 3 captações com sistema de incremento da recarga $Q_{Ri} = 100 \text{ m}^3/\text{dia}$ a 1000 m das captações vs local de implantação



Por exemplo, admitindo que será possível implantar um conjunto de três captações a 2000 m do mar com o respectivo sistema de controlo implantado a 3000 m da linha de costa e $Q_{Ri} = 100 \text{ m}^3/\text{dia}$, então as três origens poderão extrair no conjunto 3057,16 m³/dia com uma distância de segurança de 400 m ao ponto de controlo, ou seja a captação central. No quadro seguinte estão resumidos os resultados.

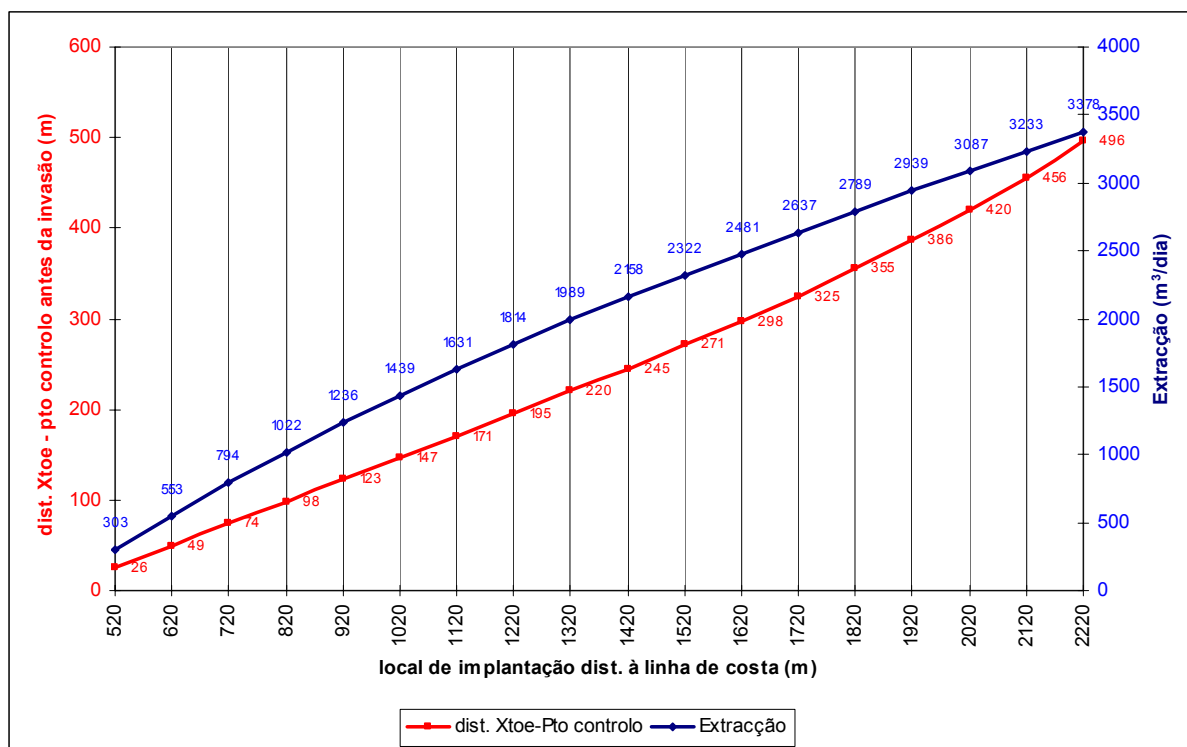
Quadro 1 – Extracção máxima permitida em 3 captações com mesma extracção implantadas a 2000 m da linha de costa e localização do pé da interface

Designação	x_s (m)	y_s (m)	x_{pe} (m)	x_s-x_{pe} (m)	Q_s (m ³ /dia)
Cap _{S1}	2000	1000	911,56	1088,4	1019,05
Cap _{S2}	2000	0	1600,0	400,0	1019,05
Cap _{S3}	2000	-1000	911,56	1088,4	1019,05

sendo: x_s - distância da captação à linha de costa; y_s - distância ao longo da costa, x_{pe} - distância do pé da interface à linha de costa, Q_s - Extracção.

A extracção máxima em 3 captações com sistema de incremento da recarga $Q_{Ri} = 100 \text{ m}^3/\text{dia}$ a 1000 m das captações e a distância do pé da interface à captação antes da invasão versus local de implantação encontram-se na figura seguinte:

Figura 5 - Extracção máxima em 3 captações com sistema de incremento da recarga $Q_{Ri} = 100 \text{ m}^3/\text{dia}$ a 1000 m das captações e distância do pé da interface à captação antes da invasão vs local de implantação



Os resultados quando a barreira de extracção e de controlo da intrusão salina têm 5 e 11 furos encontram-se nas figuras seguintes:

Figura 6 - Extracção em função da distância de segurança para 5 captações com sistema de incremento da recarga $Q_{Ri}=100 \text{ m}^3/\text{dia}$ a 1000 m das captações vs local de implantação

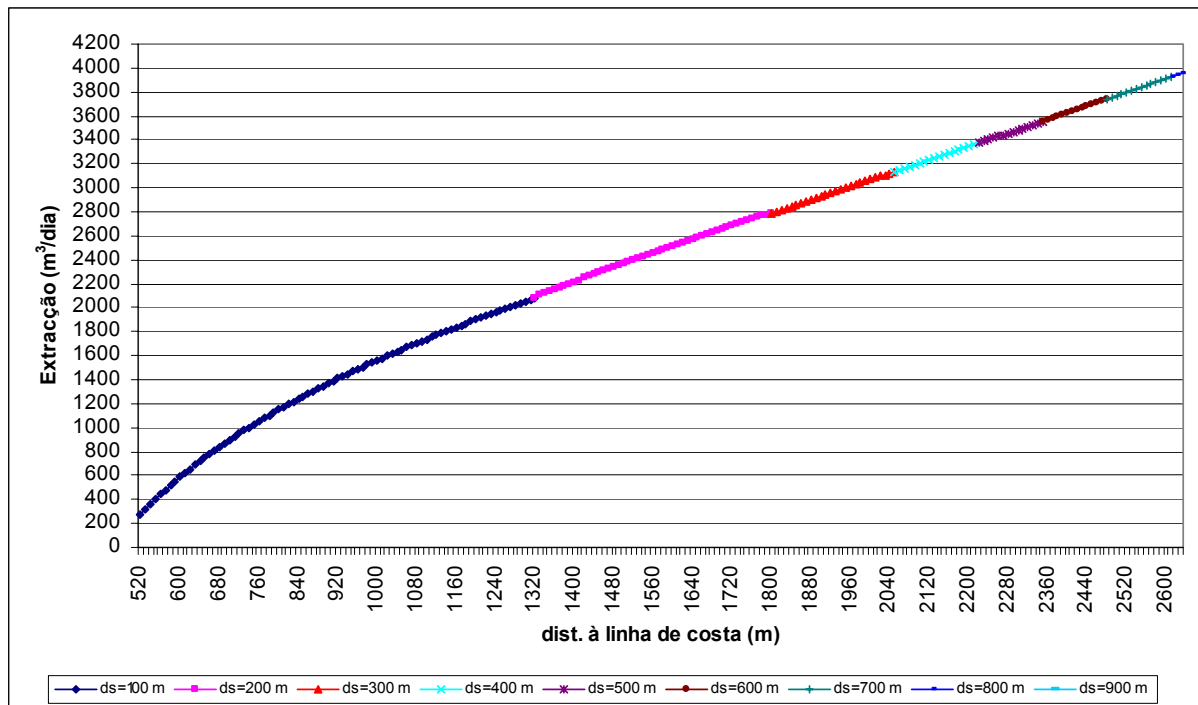


Figura 7 - Extracção máxima em 5 captações com sistema de incremento da recarga $Q_{Ri}=100 \text{ m}^3/\text{dia}$ a 1000 m das captações e distância do pé da interface à captação antes da invasão vs local de implantação

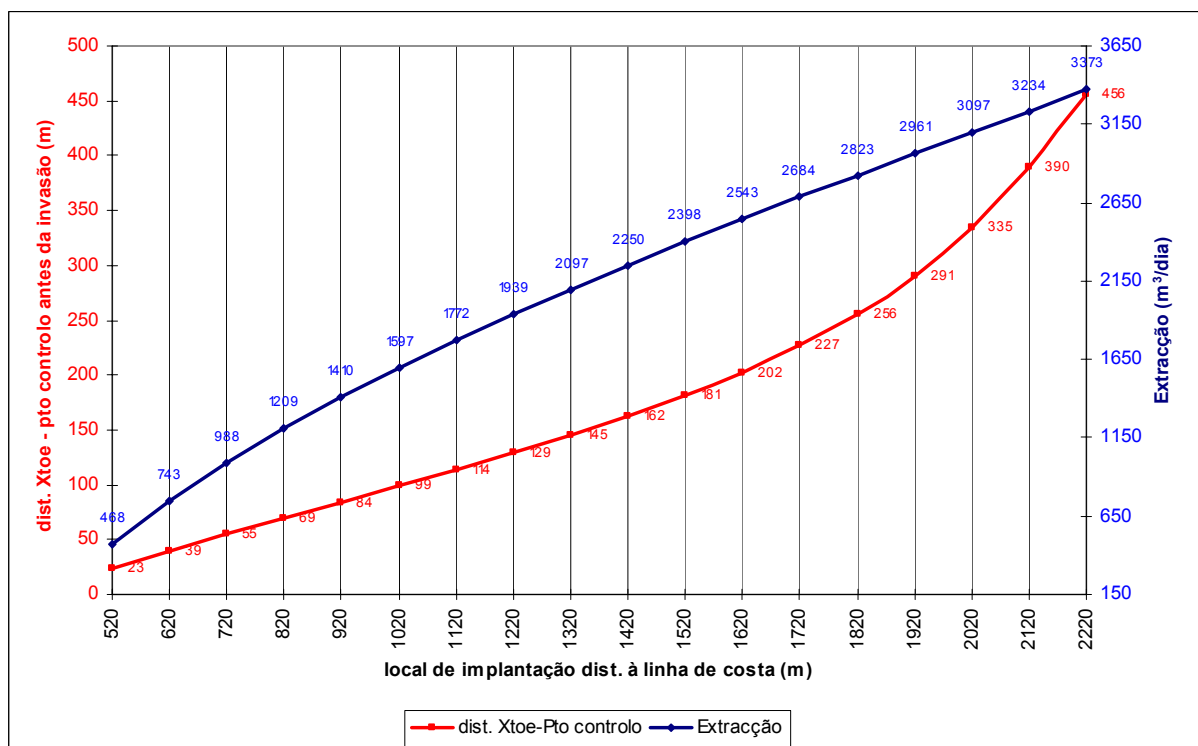


Figura 8 - Extracção em função da distância de segurança para 11 captações com sistema de incremento da recarga $Q_{Ri}=100 \text{ m}^3/\text{dia}$ a 1000 m das captações vs local de implantação

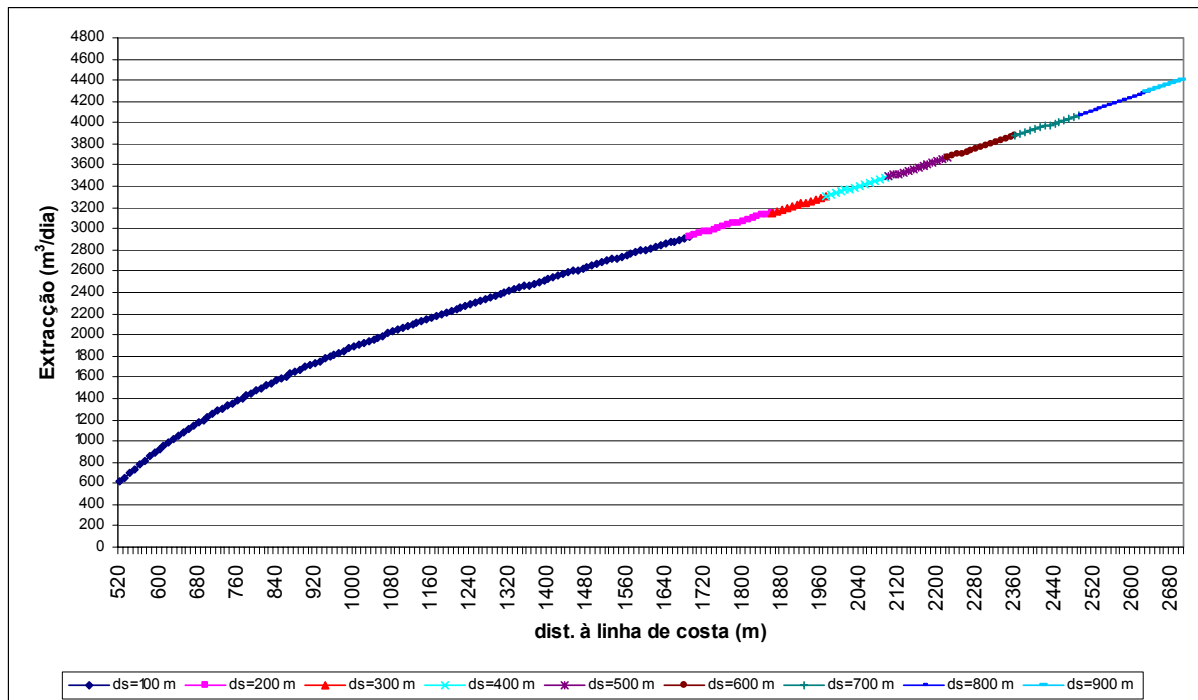
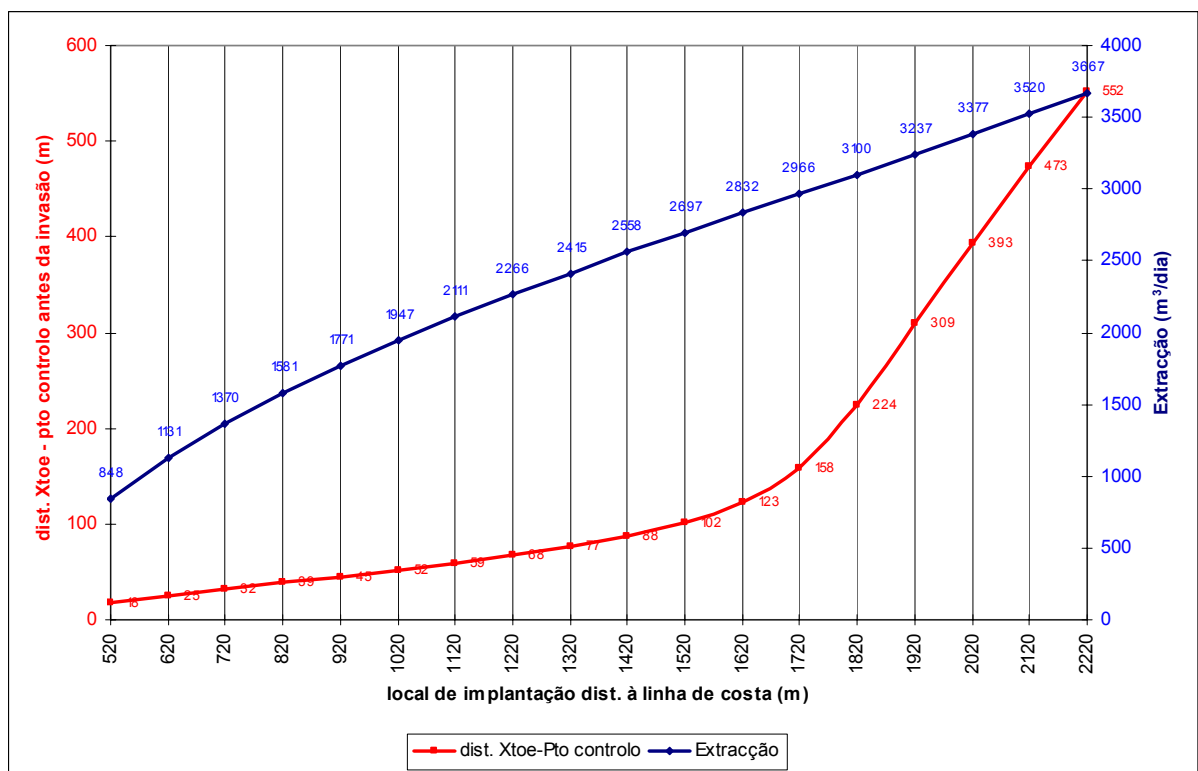


Figura 9 - Extracção máxima em 11 captações com sistema de incremento da recarga $Q_{Ri}=100 \text{ m}^3/\text{dia}$ a 1000 m das captações e distância do pé da interface à captação antes da invasão vs local de implantação



Fazendo uma análise comparativa com os resultados apresentados em Ferreira da Silva e Haie (2004a) constata-se que o incremento da recarga constitui um sistema de controlo do fenómeno da intrusão salina e permite o acréscimo nas extracções, cujos valores ficam registados nas figuras seguintes, respectivamente em (m³/dia) e em (%).

Figura 10 – Resumo dos acréscimos na extracção (m³/dia) quando existe sistema de incremento da recarga $Q_{Ri}=100$ m³/dia a 1000 m das captações vs local de implantação

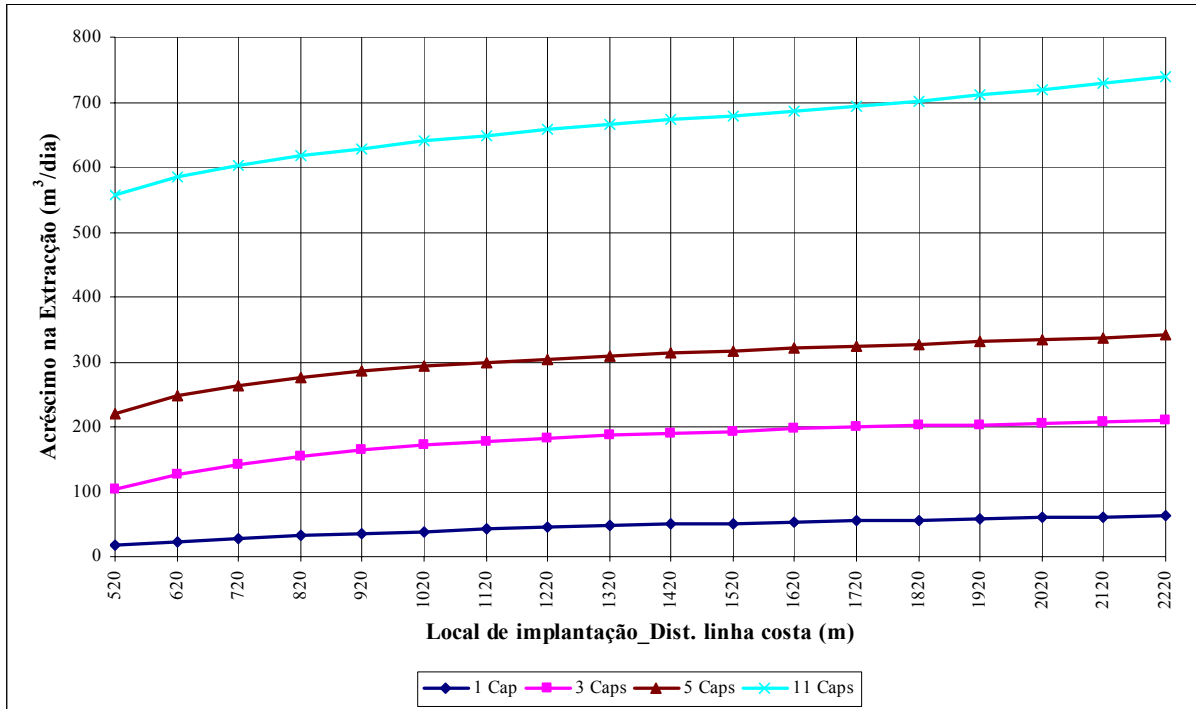
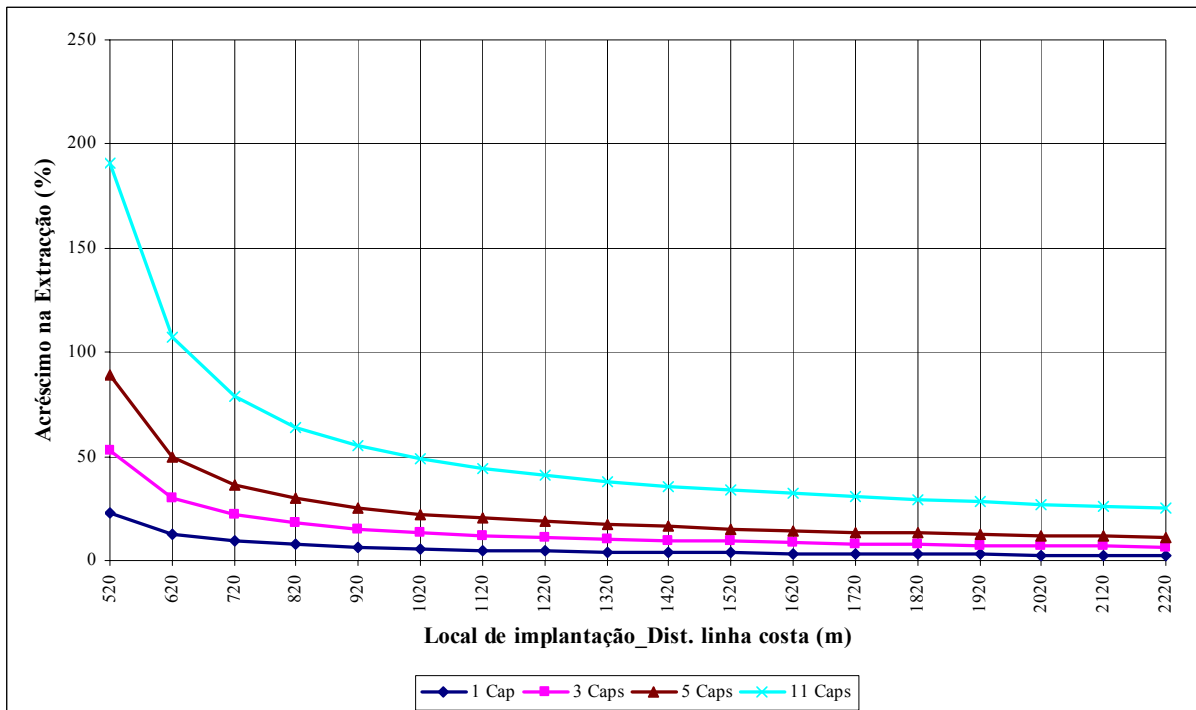


Figura 11 – Resumo dos acréscimos na extracção (%) quando existe sistema de incremento da recarga $Q_{Ri}=100$ m³/dia a 1000 m das captações vs local de implantação



4.3.Extracção versus local de implantação de captações com sistema de controlo da intrusão salina incrementando a recarga em 100 m³/dia a 500 m da captação

Se for possível implantar o sistema de incremento da recarga a 500 m das captações então é possível melhorar os resultados das extracções máximas permitidas em cada eventual local de implantação, conforme se pode verificar nas figuras seguintes:

Figura 12 – Resumo dos acréscimos na extracção (m³/dia) quando existe sistema de incremento da recarga $Q_{Ri}=100\text{ m}^3/\text{dia}$ a 500 m das captações vs local de implantação

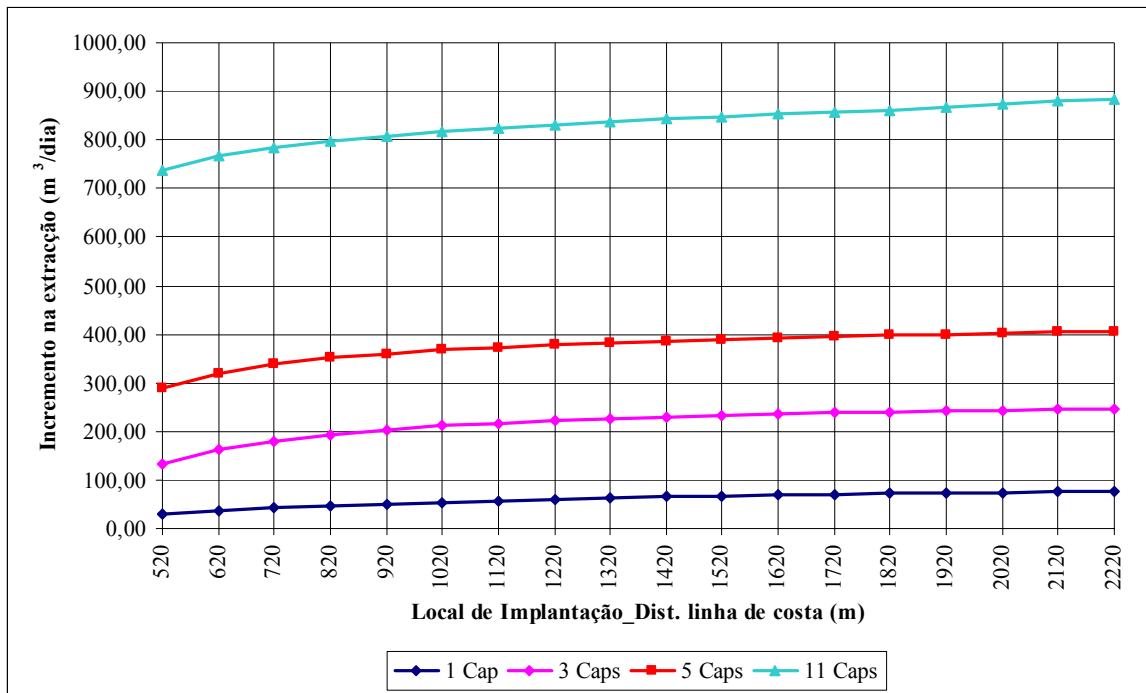
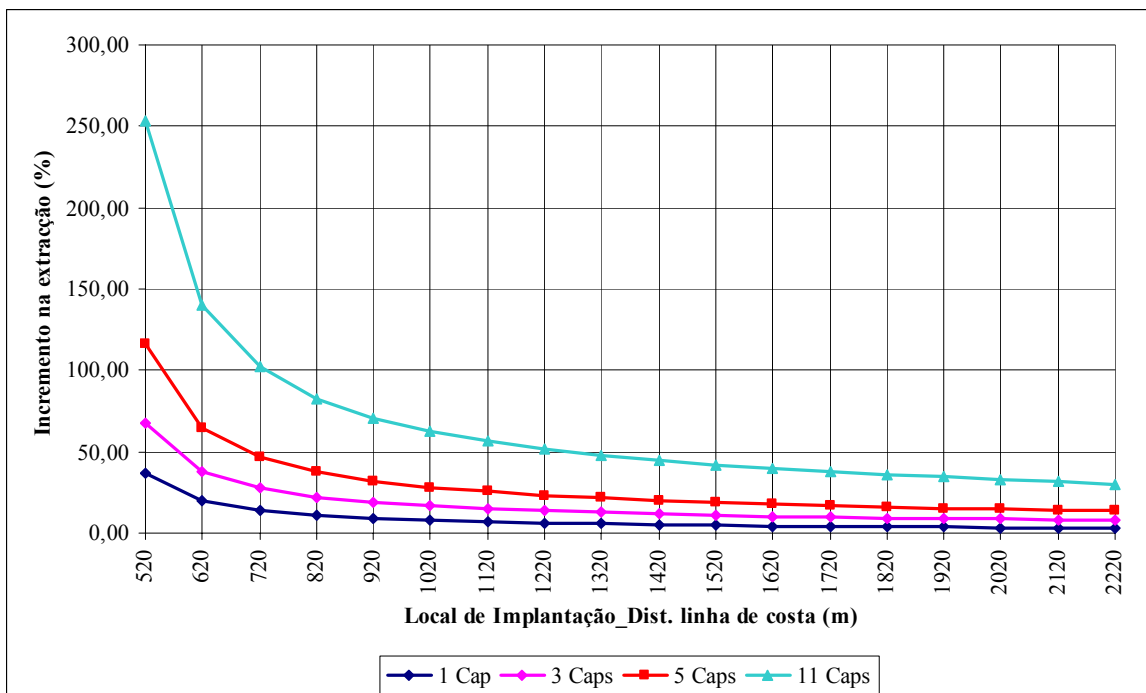


Figura 13 – Resumo dos acréscimos na extracção (%) quando existe sistema de incremento da recarga $Q_{Ri}=100\text{ m}^3/\text{dia}$ a 500 m das captações vs local de implantação



5. Conclusões

Neste trabalho defendeu-se a adopção duma perspectiva regional, integrada e sustentável para a utilização dos recursos hídricos disponíveis nas áreas costeiras. A utilização da água disponível na região, que inevitavelmente seria descarregada no mar, para incremento da recarga revela-se uma medida adequada para o controlo da intrusão salina e permite, simultaneamente, acréscimos nas extracções, contribuindo para a melhoria dos resultados económicos.

Os casos de estudo apresentados permitem examinar os efeitos da implementação dum sistema de incremento da recarga como medida para controlar o fenómeno da intrusão salina. Estes ensaios permitem verificar que o modelo 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 o volume de água salgada 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

O autor regista o apoio da FCT ao Centro de Engenharia Civil da UMinho.

Bibliografia

1. BAKKER, Mark e Schars, F. - “The Sea Water Intrusion (SWI) Package Manual”, Version 1, Dezembro, 2002;
2. FERREIRA DA SILVA, Júlio – “Gestão optimizada à escala regional de sistemas aquíferos potencialmente sujeitos à intrusão salina - Um modelo global para o uso sustentável da água em regiões costeira”, Dissertação de doutoramento em Engenharia Civil - Hidráulica, Universidade do Minho, 2003;
3. FERREIRA DA SILVA, Júlio F. e Naim Haie, “Localização Optimizada de Captações em Aquíferos Potencialmente Sujeitos à Intrusão Salina”, 7.º Congresso da água, Lisboa, 8-12 Março; 2004a;
4. FERREIRA DA SILVA, Júlio F. e Naim Haie, “Gestão Optimizada dos recursos Hídricos Disponíveis em Zonas Costeiras - O incremento da recarga como componente duma estratégia para utilização sustentável de aquíferos costeiros”, 7.º Congresso da água, Lisboa, 8-12 Março; 2004b;
5. GOLDBERG, D.E.- “Genetic Algorithms is Search, Optimization and Machine Learning”, Addison-Wesley, 486 pp, USA, 1989;
6. STRACK, O. D. L. - “Groundwater Mechanics”, Prentice Hall, 1989.