

Capacitação LNEC no 14º SILUSBA,
ANAS e INIDA, Cidade da Praia, Cabo Verde
20 de setembro de 2019



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

Modelos matemáticos de escoamento subterrâneo e modelação do transporte de poluentes em águas subterrâneas

João Paulo Lobo Ferreira
Tiago Martins





14.ª SILUSBA



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

Demonstração prática da construção de modelos

> Objectivos:

- Apresentação dos métodos usados na construção de modelos e interpretação de resultados
- Conhecer os dados necessários
- Conhecer as limitações dos modelos

> Índice

- Construção do modelo conceptual
- Modelo de fluxo
- *Particle tracking*
- Modelos de transporte

LNEC



14.º SILUSBA



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

Introdução à modelação matemática em águas subterrâneas

João Paulo Lobo
Ferreira

Conceitos base

> O que é um modelo de águas subterrâneas?

- Versão simplificada de um sistema de águas subterrâneas real que simula aproximadamente as reacções problema – resposta do próprio sistema.
- A simplificação é necessária na gestão e planeamento de apoio à decisão sendo introduzidoa como um conjunto de assunções que expressam a natureza do sistema e o comportamento previsto importante para o problema em análise
- Essas assunções relacionam-se, entre outros factores, com a geometria do domínio de estudo, a forma como o problema da natural hererogeneidade do sistema será ultrapassada (homogeneidade, isotrópia, etc.), as propriedade(s) do(s) fluído(s) e o tipo de regime de escoamento.

> Modelo como ferramenta de gestão

- Uma parte essencial no processo de decisão é saber qual a resposta de um sistema à implementação de determinada medida antes da implementação propriamente dita.
- Dependendo do tipo de problema a abordar, uma ferramenta é necessária que forneça uma resposta (na forma dedistribuição espacial de concentrações de contaminantes, níveis piezométricos, etc.), no sentido de se obter informação sobre a resposta futura à decisões aplicadas. Essa ferramenta é o modelo.
- Possíveis aplicações:
 - o *Avaliação e desenho de sistemas de captação e tratamento de águas subterrâneas*
 - o *Avaliação da capacidade de sistemas de contenção hidráulica*
 - o *Avaliação do padrão migratório de plumas contaminantes*
 - o *Avaliação do impacto de liquinos de fase não aquosa (NAPL) como apoio de actividade de remediação e dissolução*

Conceitos base

- > A modelação tridimensional do fluxo em meios anisótipos consiste na aplicação da lei de Darcy

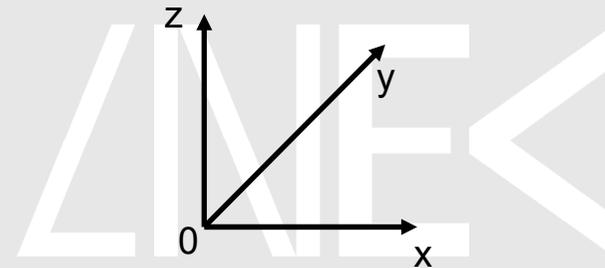
$$V_f = -K \text{ grad } h$$

Em que se considera V_f o vector velocidade, $\text{grad } h$ o gradiente hidráulico e K o tensor simétrico e permeabilidade

$$V_f = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}$$

$$\text{grad } h = \begin{bmatrix} \partial h / \partial x \\ \partial h / \partial y \\ \partial h / \partial z \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}$$



Conceitos base (cont.)

- > A modelação bidimensional considera-se quando se ignora uma das direcções de fluxo (ex. fluxo através de uma barragem de aterro, em que a componente de fluxo na direcção do eixo da barragem é igual a zero ou um valor muito baixo). Assim, temos:

$$\frac{\partial h}{\partial y} \Rightarrow 0$$

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$V_z = -K_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

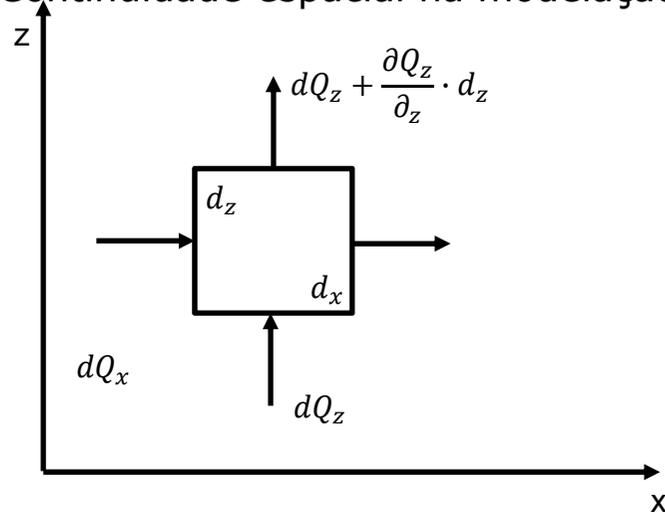
A permeabilidade é portanto considerada apenas em duas direcções (K_{xx} , K_{zz}), pelo que a aplicação da lei de Darcy será:

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

Conceitos base (cont.)

> Continuidade espacial na modelação bidimensional:



Supondo o seguinte:

- a compressibilidade da água é negligenciada
- todos os espaços estão cheios de água
- o fluxo é permanente
- o solo não substrato alterações de composição
- não existem nascentes ou drenos na área
- a lei de Darcy é passível de ser aplicada

Supondo que essas condições são respeitadas, então o volume de entrada será igual ao de saída:

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} dx + \frac{\partial Q_z}{\partial z} dz = 0$$

Substituindo a equação inicial tem-se:

$$Q_x = V_x \cdot dx \cdot 1 \text{ e } Q_z = V_z \cdot dz \cdot 1$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

(expressão que representa a condição bidimensional de continuidade)

Formulação matemática

- > Nos problemas de previsão (quantitativa) de sistemas de águas subterrâneas, a solução do problema de previsão é baseada na aproximação numérica da equação do escoamento em meios porosos. BEAR (1979) apresenta a equação do escoamento de águas subterrâneas para meios porosos saturados, heterogêneos e anisotrópicos em aquíferos confinados:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(T_{ij} \frac{\partial H}{\partial x_j} \right) = S \frac{\partial H}{\partial t} + R \quad i, j = 1, 2$$

onde

T_{ij}

tensor da transmissividade, L^2/T ;

H

altura pizométrica, L ;

R

recarga por unidade de área, L/T ;

S

coeficiente de armazenamento, -;

x_i, x_j

coordenadas cartesianas, L ;

t

tempo, T .

- > Quando a variação da transmissividade, devido a bombagens, é significativa e não desprezável, como no caso dos aquíferos livres anisotrópicos de pequena espessura, ter-se-á que considerar a equação diferencial não-linear de Boussinesq:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} H \frac{\partial H}{\partial x_j} \right) = S_y \frac{\partial H}{\partial t} + R \quad i, j = 1, 2$$

onde

K_{ij}

tensor da condutividade hidráulica, L^2/T ;

H

altura pizométrica, L ;

R

recarga por unidade de área, L/T ;

S_y

cedência específica, -;

x_i, x_j

coordenadas cartesianas, L ;

t

tempo, T .

Formulação matemática (cont.)

- > Um modelo de simulação que inclua a componente da qualidade das águas subterrâneas, deve envolver a solução da equação do transporte de massa. Em LOBO-FERREIRA (1986 e 1988) apresenta-se o desenvolvimento da equação do transporte em águas subterrâneas, também denominada equação da convecção-dispersão. Para o caso 2-D, considerando decaimento e adsorção de uma espécie química dissolvida num meio poroso saturado, a equação da convecção-dispersão pode ser escrita do seguinte modo:

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (C V_i) - \frac{C' W}{\phi b} - \lambda R_d C$$

$$i, j = 1, 2$$

onde

C	concentração da espécie química dissolvida, M/L^3 ;
D_{ij}	tensor dispersão, função de V_i , L^2/T ;
V_i	velocidade média da água (a nível dos poros) na direcção i , L/T ;
b	espessura saturada do aquífero, L ;
φ	porosidade efectiva do meio, -;
C'	concentração de soluto numa fonte ou sumidouro, M/L^3 ;
W	fluxo volumétrico por unidade de área, L/T ;
R_d	factor de retardamento, -;
λ	taxa de decaimento cinético de primeira ordem, $1/T$;
x_i, x_j	coordenadas cartesianas, L ;
t	tempo, T .

Método das diferenças finitas e elementos finitos



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

- > O método das diferenças finitas (MDF) e o método dos elementos finitos (MEF) permitem, para sistemas lineares de águas subterrâneas, a transformação das equações do escoamento e do transporte de massa, num sistema de equações diferenciais ordinárias que podem ser expressas do seguinte modo:

$$A \frac{d\Phi}{dt} + B\Phi + \mathbf{g} = 0$$
$$\Phi(0) = \Phi_0$$

- > As matrizes de coeficientes A e B são função do sistema hidráulico do aquífero ou dos parâmetros de qualidade. O vector **g** contém as fontes e os sumidouros, que são as variáveis de controle do sistema, e as condições de fronteira do sistema aquífero. O vector ϕ é o vector do valor das variáveis de estado nos nós e ϕ_0 representa as condições iniciais do problema.
- > A transformação numérica das equações do escoamento subterrâneo não-saturado, usando o MDF e o MEF, produz um sistema de equações ordinárias não-lineares. Estas equações podem ser expressas do seguinte modo:

$$D \frac{d\mathbf{h}}{dt} + E(\mathbf{h})\mathbf{h} + \mathbf{r} = 0$$

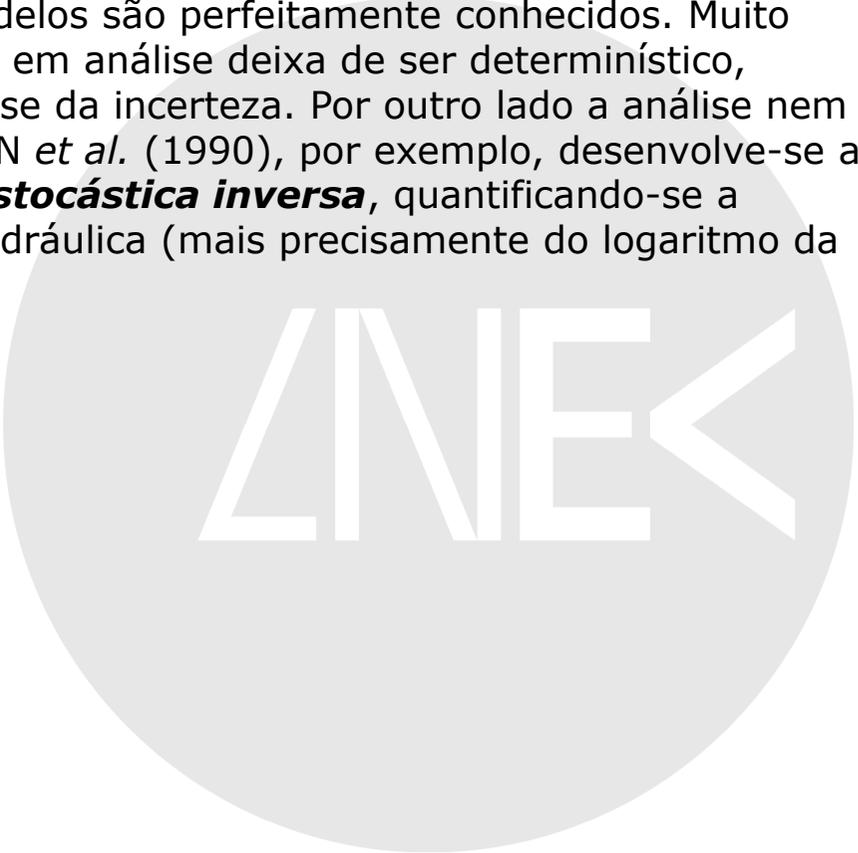
onde D e E, são matrizes de coeficientes que contêm a influência da cedência específica e da condutividade hidráulica. As políticas operacional ou de planeamento e o sistema das condições de fronteira são consideradas no vector **r**; **h** representa o vector da altura piezométrica em todos os pontos do sistema.

Método das diferenças finitas e elementos finitos (cont.)

- > Em alguns modelos de gestão, ou de previsão, é suficiente considerar as equações em regime permanente. Em geral e como regra, no entanto, tem de se relacionar as variáveis de decisão e o estado do sistema, num horizonte temporal de planeamento de vários anos, *i.e.* tem de se ter em conta o problema de gestão em regime variável, o que requer a solução de equações de resposta dinâmicas.
- > A previsão só será bem sucedida se o **problema** em análise tiver sido ***bem formulado***. Assim, a previsão da superfície piezométrica requer o conhecimento:
 - das condições de fronteira com altura piezométrica prescrita;
 - das condições de fronteira com fluxo prescrito (incluindo o nulo);
 - das fronteiras entre estratos geológicos (incluindo os valores de drenância) e unidades;
 - das entradas não controladas (*e.g.* de rios ou recarga por precipitação);
 - da distribuição espacial da condutividade hidráulica do aquífero;
 - da distribuição espacial da cedência específica (em aquíferos livres) ou do coeficiente de armazenamento (em aquíferos confinados), em estudos em regime variável, etc.
- > A simulação de problemas de transporte de massa, em regime permanente, requer ainda o conhecimento:
 - da localização das fontes de poluição;
 - da localização de eventuais plumas de poluição;
 - da distribuição espacial da porosidade e da dispersividade do meio;
 - das concentrações iniciais e nas fronteiras do domínio, etc.

Método das diferenças finitas e elementos finitos (cont.)

- > Nem todos os parâmetros a introduzir nos modelos são perfeitamente conhecidos. Muito antes pelo contrário. Nesses casos o problema em análise deixa de ser determinístico, tornando-se necessário ter em atenção a análise da incerteza. Por outro lado a análise nem sempre é a de um problema directo. Em RUBIN *et al.* (1990), por exemplo, desenvolve-se a análise do problema inverso ou **modelação estocástica inversa**, quantificando-se a incerteza da variável regional condutividade hidráulica (mais precisamente do logaritmo da condutividade hidráulica).



LNEC

O modelo MODFLOW

- > O modelo MODFLOW (Mc DONALD e HARBAUGH, 1988) está programado para permitir a simulação do escoamento em sistemas uni, bi e tridimensionais, confinados e não confinados, em regime transitório ou em regime permanente. O modelo utiliza um método de cálculo por diferenças finitas com aproximação de blocos centrais, permitindo representar sistemas hidrogeológicos anisotrópicos, heterogéneos e estratificados. O modelo está organizado numa estrutura modular que consiste num programa principal e numa série de subrotinas independentes a que se dá o nome de módulos.

- > Os módulos estão agrupados em conjuntos de rotinas ("*packages*") e cada conjunto funciona com uma característica específica do sistema hidrológico que se pretende simular (por exemplo, escoamento a partir dos rios ou escoamento através de drenos), ou com um método específico de resolução de equações lineares que descrevem o sistema de escoamento. Esse método pode ser:
 - Strongly Implicit Procedure (SIP);
 - Slice-Successive Overrelaxation (SSO);
 - Preconditioned Conjugate Gradient 2 (PCG2).

- > A separação do programa em módulos permite ao utilizador examinar uma característica hidrológica específica independentemente das outras. Este facto facilita também o desenvolvimento de capacidades adicionais uma vez que podem ser adicionados ao programa novos "*packages*" sem modificar os já existentes. Os sistemas de entrada e saída do programa são também projectados para permitir a máxima flexibilidade.

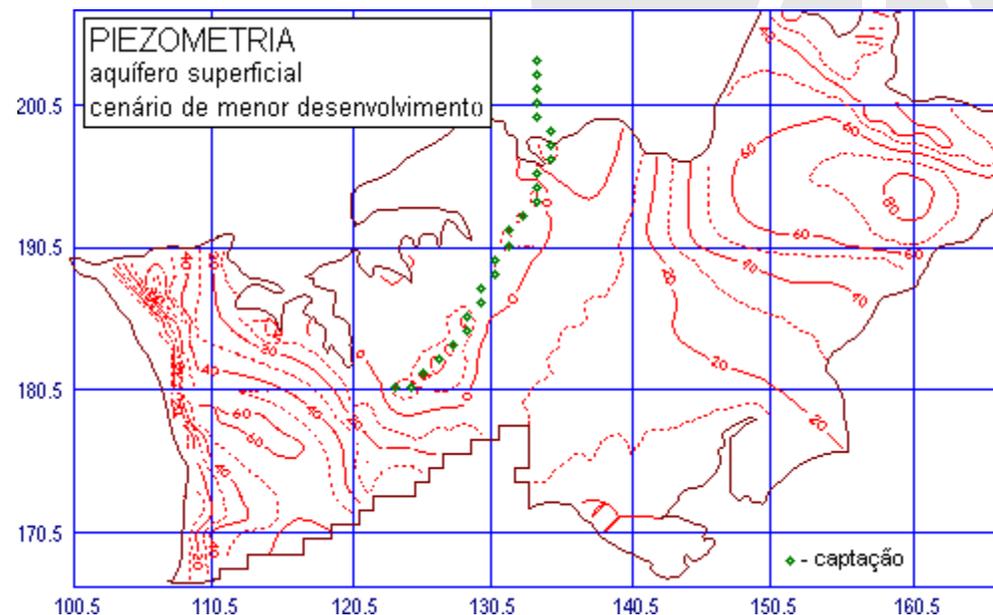
O modelo MODFLOW (cont.)

- > A representação do sistema aquífero a estudar no modelo MODFLOW é realizada pela sua discretização em células, que podem constituir uma malha regular ou irregular.
- > As células de discretização dividem-se em três grupos distintos:
 - **células inactivas ou sem fluxo:** aquelas onde nunca se verifica entrada ou saída de fluxo, uma vez que estas células não são consideradas para motivos de modelação. Esta não consideração nos cálculos é definida indexando um dado código às células.
 - **células activas de nível piezométrico constante:** aquelas onde o nível piezométrico é definido como um valor fixo, mantido durante toda a simulação.
 - **células activas de nível piezométrico variável:** aquelas a que se atribui um valor piezométrico inicial que pode variar ao longo do tempo.
- > As condições iniciais e de fronteira são definidas através destes tipos de células. Assim, uma fronteira impermeável será simulada através de células inactivas; as células de nível constante simulam áreas de eventual recarga ou onde o nível de água é constante.
- > A discretização na vertical pode representar-se por meio da especificação do número de camadas a utilizar, da sua espessura e dos seus parâmetros hidráulicos médios. A espessura pode ser variável no espaço, correspondendo a diferentes valores por célula.

O modelo MODFLOW (cont.)

- > A caracterização por célula depende dum conjunto de dados de entrada necessários para activar o modelo, os quais são os seguintes (não necessariamente todos obrigatórios):
 - níveis piezométricos iniciais
 - condutividade hidráulica
 - coeficiente de armazenamento (se em regime transitório)
 - drenância (se há de mais de uma camada)
 - nível do topo e da base das camadas

- > Os efeitos de captação ou adição de água ao aquífero são simulados em paralelo, num processo onde se define para cada célula o caudal captado/adicionado. Este processo é posteriormente integrado no programa principal.





Video tutorial de introdução de dados base em ferramentas de modelação

Modelos_leirosa_estarreja - Modelos_I



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

PROTEÇÃO DAS ORIGENS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA CONSUMO HUMANO: DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO NO SISTEMA AQUÍFERO LEIROSA - MONTE REAL

Tiago André MARTINS

Maria José HENRIQUES

João Paulo LOBO FERREIRA

Núcleo de Águas Subterrâneas
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Estudo realizado para a



PROTEÇÃO DAS ORIGENS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA CONSUMO HUMANO: DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO NO SISTEMA AQUÍFERO DE LEIROSA - MONTE REAL



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

- Introdução
- Objetivos
- Área de estudo
- Metodologias
 - Vulnerabilidade do aquífero à poluição: método DRASTIC (Aller et al., 1987);
 - Parâmetros DRASTIC
 - Resultados
 - Risco do meio hídrico subterrâneo à poluição: Índice da Zona não Saturada desenvolvida pela USGS e aplicada em Lobo-Ferreira *et al.* (2009)
 - Parâmetros do Índice de risco da Zona não Saturada
 - Resultados
 - Classes de proteção atendendo à vulnerabilidade e risco do meio hídrico subterrâneo (Martins *et al.*, 2011) no âmbito do PRGH do Centro
 - Resultados
- Considerações finais

PROTEÇÃO DAS ORIGENS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA CONSUMO HUMANO: DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO NO SISTEMA AQUÍFERO DE LEIROSA - MONTE REAL

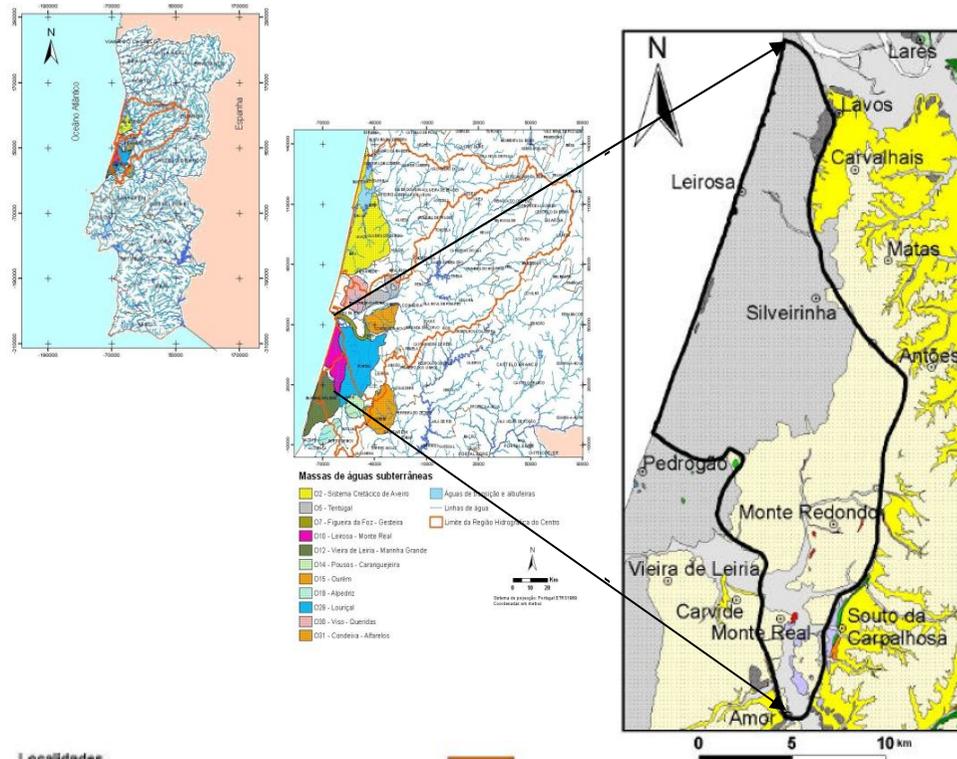


LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

- Introdução
- A disponibilidade actual dos sistemas de informação geográfica permite uma melhor visibilidade quando se pretende ponderar os impactes do uso e transformação do território (pressões antropogénicas) face às características intrínsecas dos aquíferos (vulnerabilidade e risco dos aquíferos à poluição)
- Objetivos
 - Divulgar metodologias desenvolvidas em SIG para o apoio aos órgãos decisores no licenciamento de captações para abastecimento de água para consumo humano
 - Dar cumprimento ao estabelecido pela Directiva 2000/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro de 2000 (Directiva Quadro da Água - DQA) que fixa 2015 como o ano em que devem ser atingidos os objetivos ambientais estabelecidos, através da execução de programas de medidas especificados em Planos de Gestão de Região Hidrográfica (PGRH)

PROTEÇÃO DAS ORIGENS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA CONSUMO HUMANO: DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO NO SISTEMA AQUÍFERO DE LEIROSA - MONTE REAL

- Área de estudo: sistema aquífero de Leirosa – Monte Real



Ocupa uma área de cerca de 218 km², estendendo-se ao longo do litoral, desde a foz do rio Mondego, a norte, e o rio Lis, a sul, contactando a Este com o sistema aquífero do Lourçal e a sul com Vieira de Leiria – Marinha Grande. É composto essencialmente por sedimentos do Plio-pleistocénico recobertos por uma grande extensão de areias de duna. Estas formações preenchem as depressões resultantes da atividade diapírica na zona de Monte Real e Ervedeira, bem como o sinclinal entre elas (sinclinal de Crasta Alta) – (Almeida *et al.*, 2000)

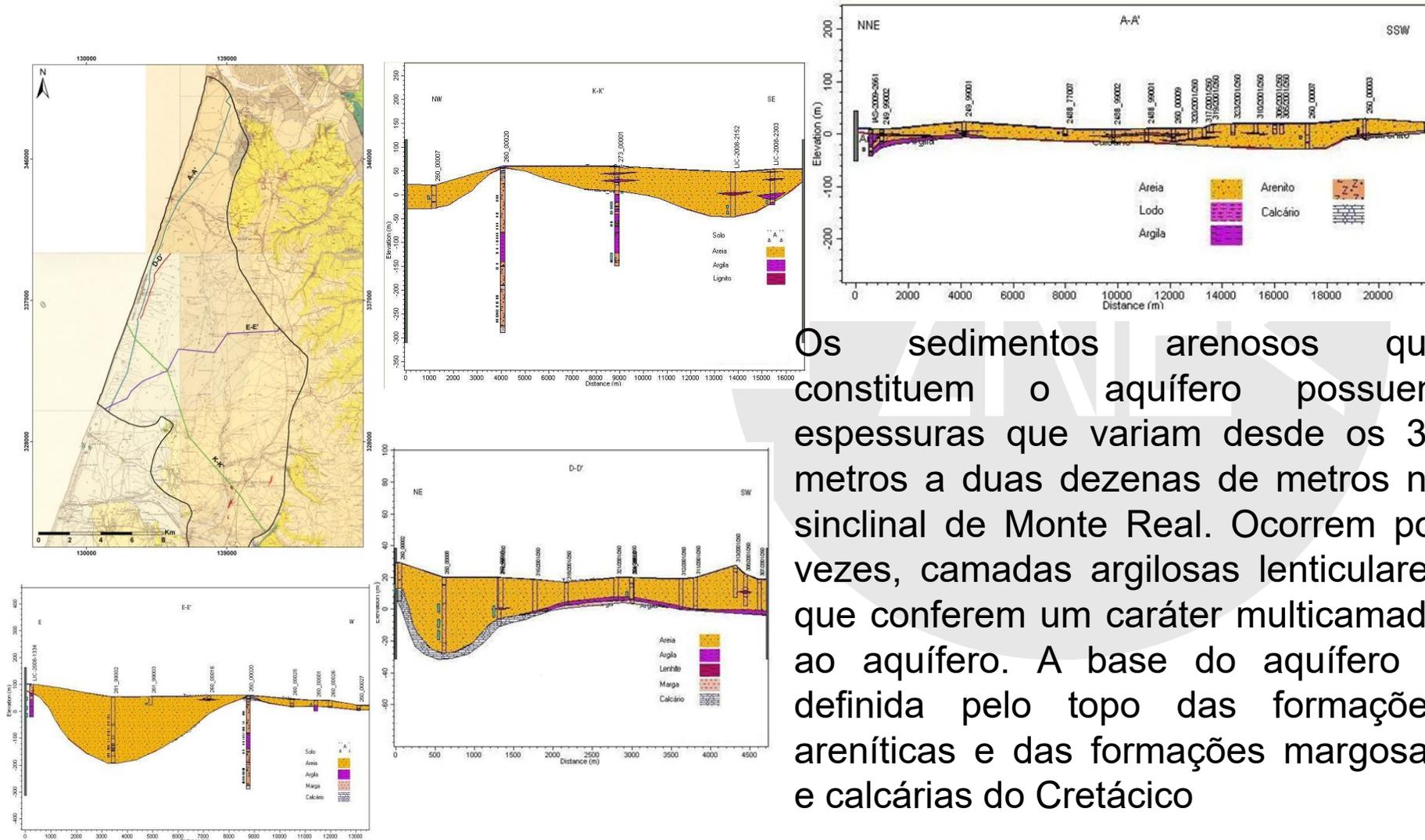


PROTEÇÃO DAS ORIGENS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA CONSUMO HUMANO: DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO NO SISTEMA AQUÍFERO DE LEIROSA - MONTE REAL



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

- Área de estudo: caracterização hidrogeológica



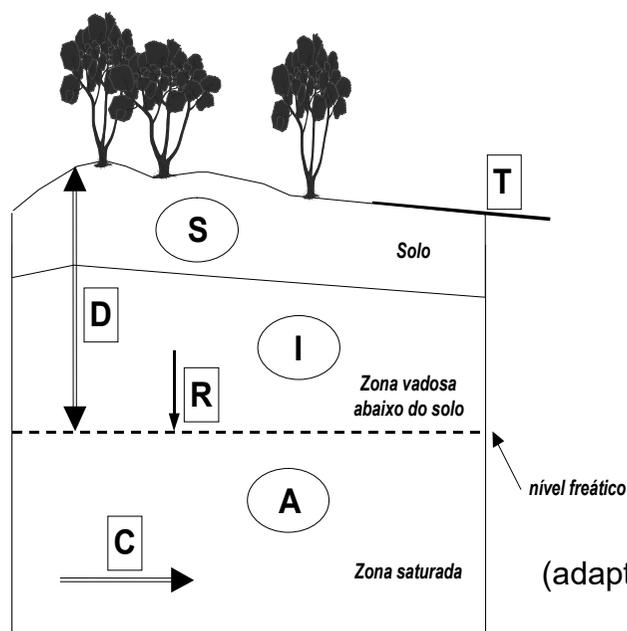
Os sedimentos arenosos que constituem o aquífero possuem espessuras que variam desde os 30 metros a duas dezenas de metros no sinclinal de Monte Real. Ocorrem por vezes, camadas argilosas lenticulares que conferem um caráter multicamada ao aquífero. A base do aquífero é definida pelo topo das formações areníticas e das formações margosas e calcárias do Cretácico

PROTEÇÃO DAS ORIGENS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA CONSUMO HUMANO: DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO NO SISTEMA AQUÍFERO DE LEIROSA - MONTE REAL



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

- Metodologia DRASTIC: Somatório ponderado de 7 parâmetros ou indicadores hidrogeológicos e morfológicos (cf. Aller *et al.*, 1987)



D = Profundidade do Topo do Aquífero
 R = Recarga do Aquífero
 A = Material do Aquífero
 S = Tipo de Solo
 T = Topografia
 I = Influência da Zona Vadosa
 C = Condutividade Hidráulica do Aquífero

(adaptado de Oliveira, 2002)

- o contaminante é introduzido à superfície do terreno
- o contaminante é transportado verticalmente até ao aquífero pela água de infiltração
- o contaminante tem a mobilidade da água

$$DRASTIC = D_p \times D_i + R_p \times R_i + A_p \times A_i + S_p \times S_i + T_p \times T_i + I_p \times I_i + C_p \times C_i$$

onde X_i é o índice atribuído ao elemento em causa e X_p é o seu peso. O peso varia de 1 a 5 da seguinte forma:

Parâmetro	D	R	A	S	T	I	C
Normal	5	4	3	2	1	5	3
Pesticidas	5	4	3	5	3	4	2

PROTEÇÃO DAS ORIGENS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA CONSUMO HUMANO: DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO NO SISTEMA AQUÍFERO DE LEIROSA - MONTE REAL



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

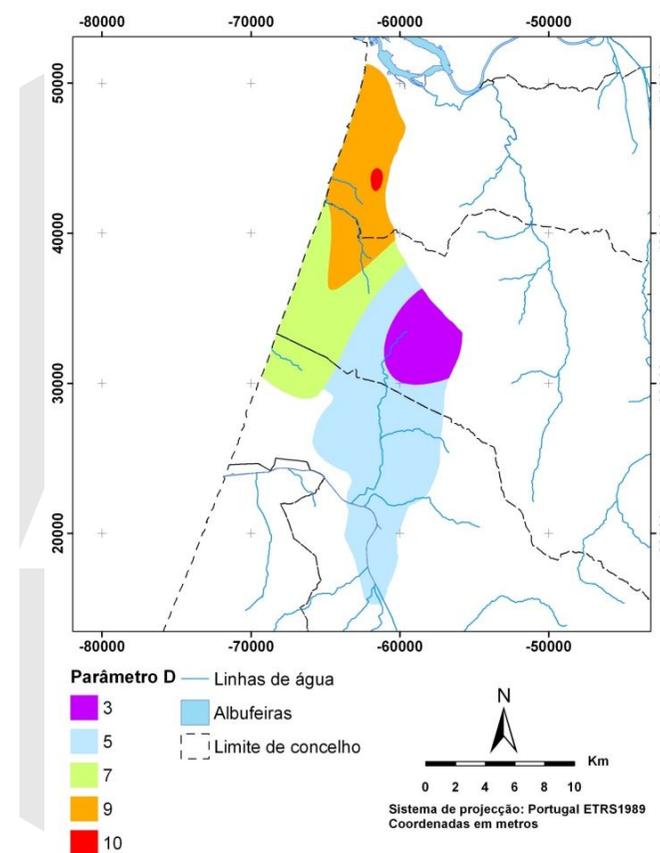
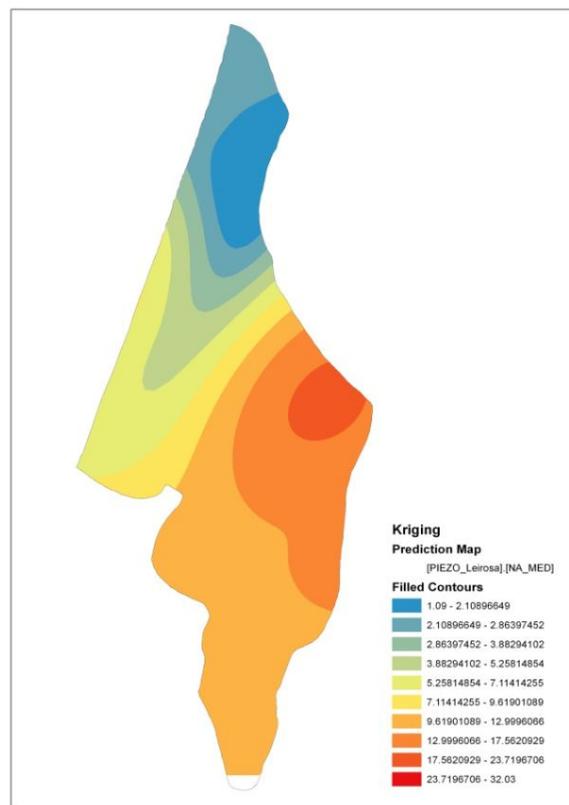
▪ Metodologia DRASTIC

<i>Parâmetro</i>	<i>Importância do parâmetro</i>
D	A profundidade do topo do aquífero condiciona a espessura de material que um poluente tem que atravessar para atingir o aquífero. Num aquífero livre, a profundidade é a distância ao nível freático. No caso de aquífero confinado, a profundidade é a distância ao topo do aquífero.
R	A recarga condiciona o transporte de um poluente na zona não saturada e a disponibilidade de água para processos de dispersão e diluição tanto na zona vadosa como na zona saturada. De uma maneira geral, quanto maior a recarga, maior será o potencial de poluição de águas subterrâneas.
A	Refere-se à capacidade do aquífero para atenuar os efeitos dos poluentes. Para além deste efeito principal, o material do aquífero condiciona o fluxo de água subterrânea que, a par da condutividade hidráulica e do gradiente hidráulico, determinam o tempo disponível para a ocorrência dos processos de atenuação.
S	Refere-se ao material da zona alterada da superfície terrestre, com uma espessura normalmente inferior a 2 m. O tipo de solo tem um significativo impacto na quantidade de recarga, mas é sobretudo pelo seu potencial atenuador da poluição que é considerado no índice DRASTIC.
T	Condiciona a probabilidade de um poluente escoar superficialmente ou de permanecer à superfície durante o tempo suficiente para se infiltrar. Influencia o desenvolvimento de solos condicionando, desta forma, o efeito de atenuação do contaminante.
I	O tipo de material da zona vadosa condiciona o tempo de contacto com o poluente, permitindo a ocorrência de diversos processos: biodegradação, neutralização, filtração mecânica, reacção química, volatilização e dispersão. A fracturação é importante pois facilita a percolação vertical do poluente até ao aquífero.
C	Capacidade do aquífero para transmitir água, que, conjuntamente com o gradiente hidráulico, controla o fluxo de água subterrânea. Depende da quantidade e conectividade dos espaços vazios dentro do aquífero, que podem ser poros, fracturas, cavidades ou planos de estratificação

PROTEÇÃO DAS ORIGENS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA CONSUMO HUMANO: DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO NO SISTEMA AQUÍFERO DE LEIROSA - MONTE REAL

- Metodologia DRASTIC: parâmetro D

D – Profundidade do Topo do Aquífero (m)	Índice
< 1,5	10
1,5 - 4,6	9
4,6 - 9,1	7
9,1 - 15,2	5
15,2 - 22,9	3
22,9 - 30,5	2
> 30,5	1



Superfície da profundidade ao nível da água obtida por krigagem (m)

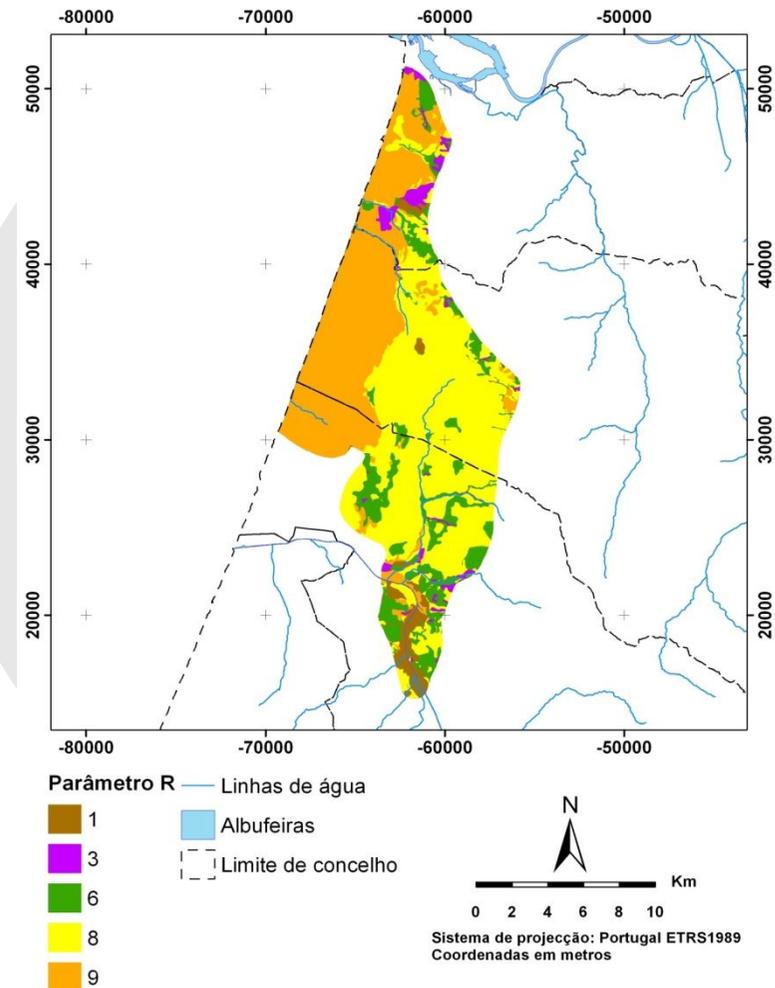
Índices mais elevados na zona centro e norte

PROTEÇÃO DAS ORIGENS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA CONSUMO HUMANO: DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO NO SISTEMA AQUÍFERO DE LEIROSA - MONTE REAL

- Metodologia DRASTIC: parâmetro R

Índices atribuídos tendo por base a distribuição espacial da recarga calculada em Martins *et al.*, (2011)

R – Recarga do aquífero (mm/ano)	Índice
< 51	1
51 - 102	3
102 - 178	6
178 - 254	8
> 254	9



PROTECÇÃO DAS ORIGENS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA CONSUMO HUMANO: DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE PROTECÇÃO NO SISTEMA AQUÍFERO DE LEIROSA - MONTE REAL



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

- Metodologia DRASTIC: parâmetros A, I e C

Índices atribuídos com base nas características geológicas e hidrogeológicas do aquífero

Geologia (Carta geológica 1:50 000)	A	I	C
Doleritos e rochas afins (delta)	4	4	2
Margas de Dagorda: Calcários dolomíticos (J1*_ab)	4	4	1
Calcários dolomíticos e margas de Dagorda (J1_ab)	4	4	1
Margas de Dagorda (J1_ab)	4	4	1
Cenomaniano inferior, Albiano, Aptiano e Neocomiano (C1-2)	6	6	1
Formação argilo-gresosa e conglomerática de Senhora do Bom Sucesso (phi-M)	6	6	1
Miocénico e Paleogénico indiferenciado (phi-M)	6	6	1
Miocénico continental (M)	6	6	2
Formações marinhas de Monte Real: Série continental de Marrazes e de Barracão (P)	6	6	2
Plio-Plistocénico indiferenciado (PQ)	6	6	2
Cascalheiras de antigas praias (Q)	8	8	4
Plistocénico indiferenciado (Q)	8	8	4
Depósitos de terraços de 25-40m (Q3)	8	8	4
Areias de praia (A)	8	8	4
Areias de duna (Ad)	8	8	4
Dunas (d)	7	8	4
Dunas e areias de dunas (d)	7	8	4
Dunas, areias de dunas e de praia (d)	7	8	4
Aluviões (a)	6	6	1
Aluviões e depósitos de fundo de vale (a)	6	6	1

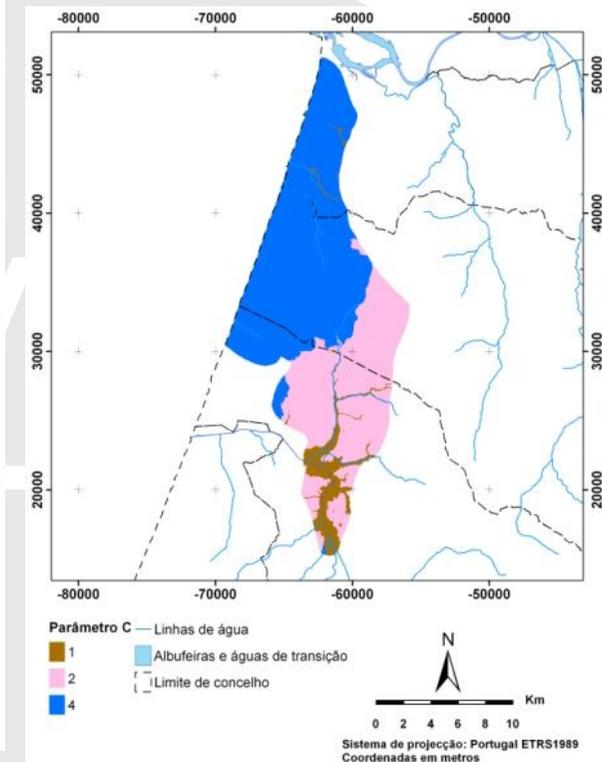
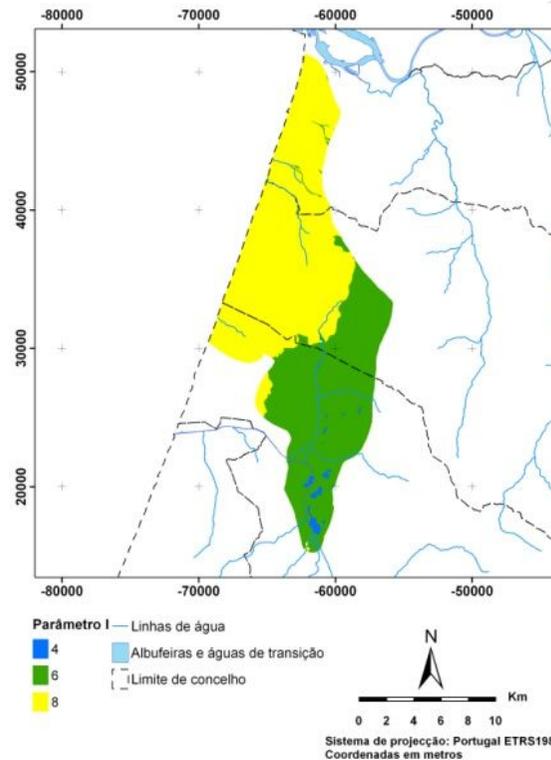
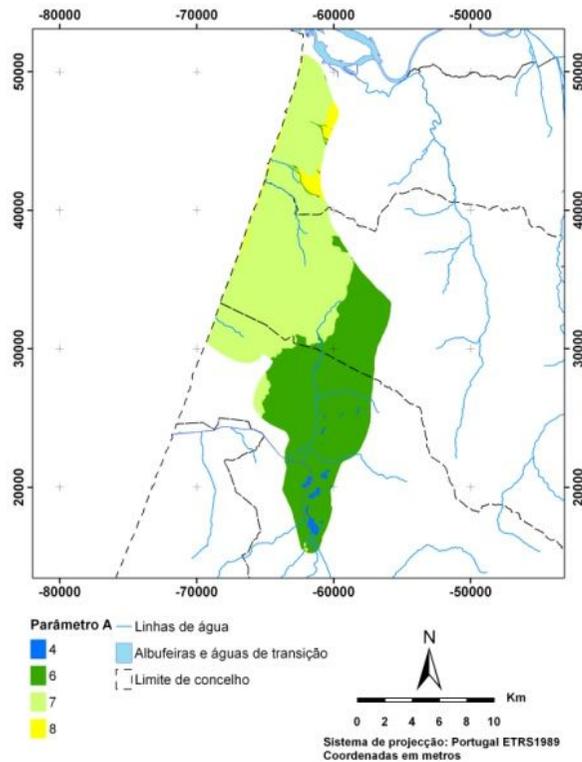
A – Material do aquífero	Índice
Xisto argiloso, argilito	1-3 (2)
Rocha metamórfica/Ígnea	2-5 (3)
Rocha metamórfica/Ígnea alterada	3-5 (4)
Arenito, calcário e argilito estratificados	5-9 (6)
Arenito maciço	4-9 (6)
Calcário maciço	4-9 (6)
Areia e balastro	4-9 (8)
Basalto	2-10 (9)
Calcário carsificado	9-10 (10)

I – Impacto da zona vadosa	Índice
Camada confinante	1
Argila/Silte	2-6 (3)
Xisto argiloso, argilito	2-5 (3)
Calcário	2-7 (6)
Arenito	4-8 (6)
Arenito, calcário e argilito estratificados	4-8 (6)
Areia e balastro com percentagem significativa de silte e argila	4-8 (6)
Rocha metamórfica/Ígnea	2-8 (4)
Areia e balastro	6-9 (8)
Basalto	2-10 (9)
Calcário carsificado	8-10 (10)

C – Condutividade hidráulica (m/d)	Índice
< 4,1	1
4,1 - 12,2	2
12,2 - 28,5	4
28,5 - 40,7	6
40,7 - 81,5	8
> 81,5	10

PROTEÇÃO DAS ORIGENS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA CONSUMO HUMANO: DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO NO SISTEMA AQUÍFERO DE LEIROSA - MONTE REAL

- Metodologia DRASTIC: parâmetros A, I e C

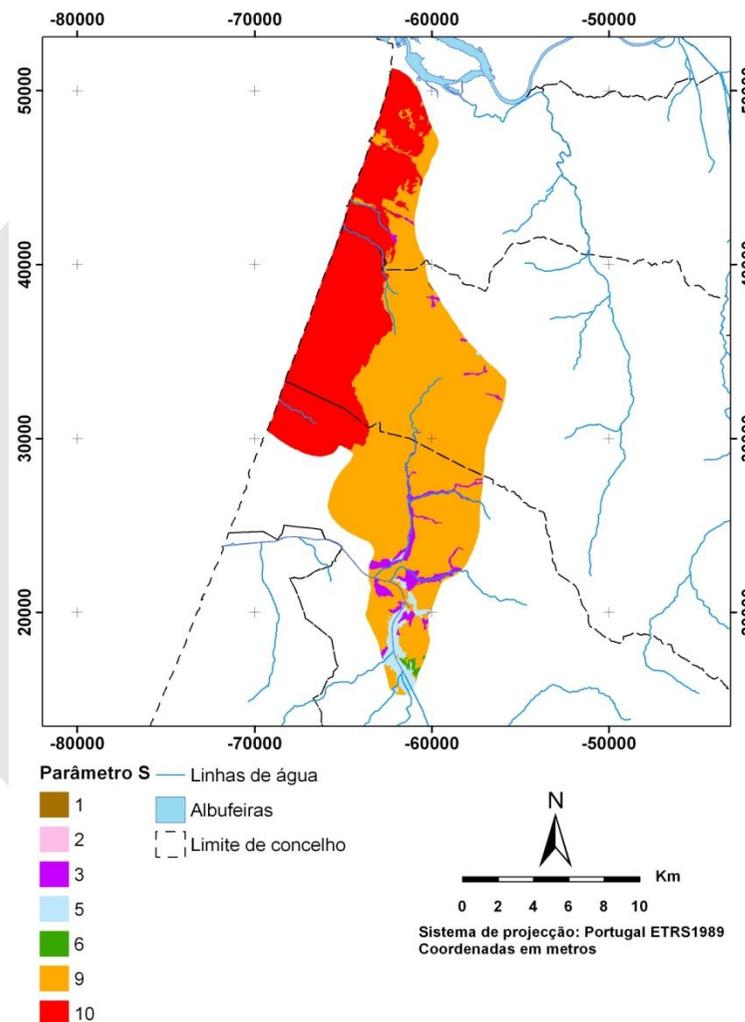


Índices mais elevados: areias de praia e de duna, depósitos de terraços, dunas e cascalheiras

PROTEÇÃO DAS ORIGENS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA CONSUMO HUMANO: DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO NO SISTEMA AQUÍFERO DE LEIROSA - MONTE REAL

- Metodologia DRASTIC: parâmetro S
 Dados de base: cartas de solos (DGADR) à escala 1:25 000, com base nos parâmetros atribuídos por Oliveira *et al.* (1997).

S – Tipo de solo	Índice
Fino ou ausente	10
Balastro	10
Areia	9
Turfa	8
Argila agregada e/ou expansível	7
Franco arenoso	6
Franco	5
Franco siltoso	4
Franco argiloso	3
"Muck"	2
Argila não agregada e não expansível	1



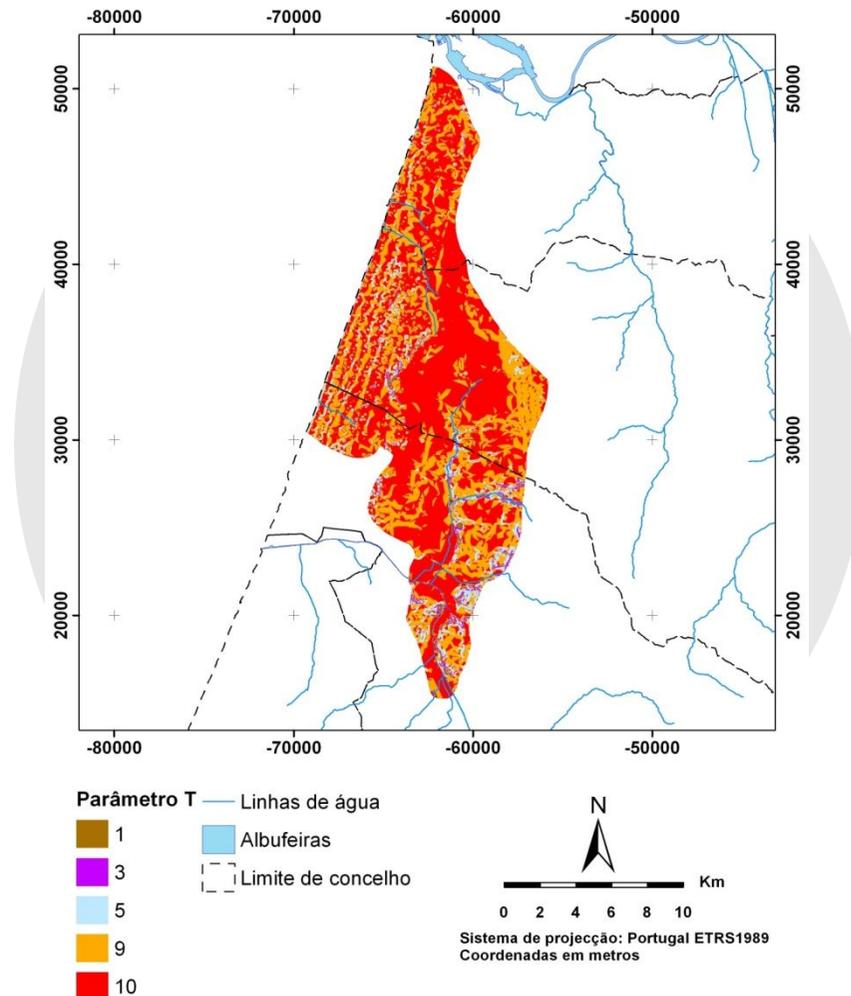
Solos pouco desenvolvidos representam quase toda a área; solos franco-argilosos associados a depósitos aluvionares nos vales das linhas de água

PROTEÇÃO DAS ORIGENS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA CONSUMO HUMANO: DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO NO SISTEMA AQUÍFERO DE LEIROSA - MONTE REAL

- Metodologia DRASTIC: parâmetro T

T – Topografia (declive em %)	Índice
< 2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
> 18	1

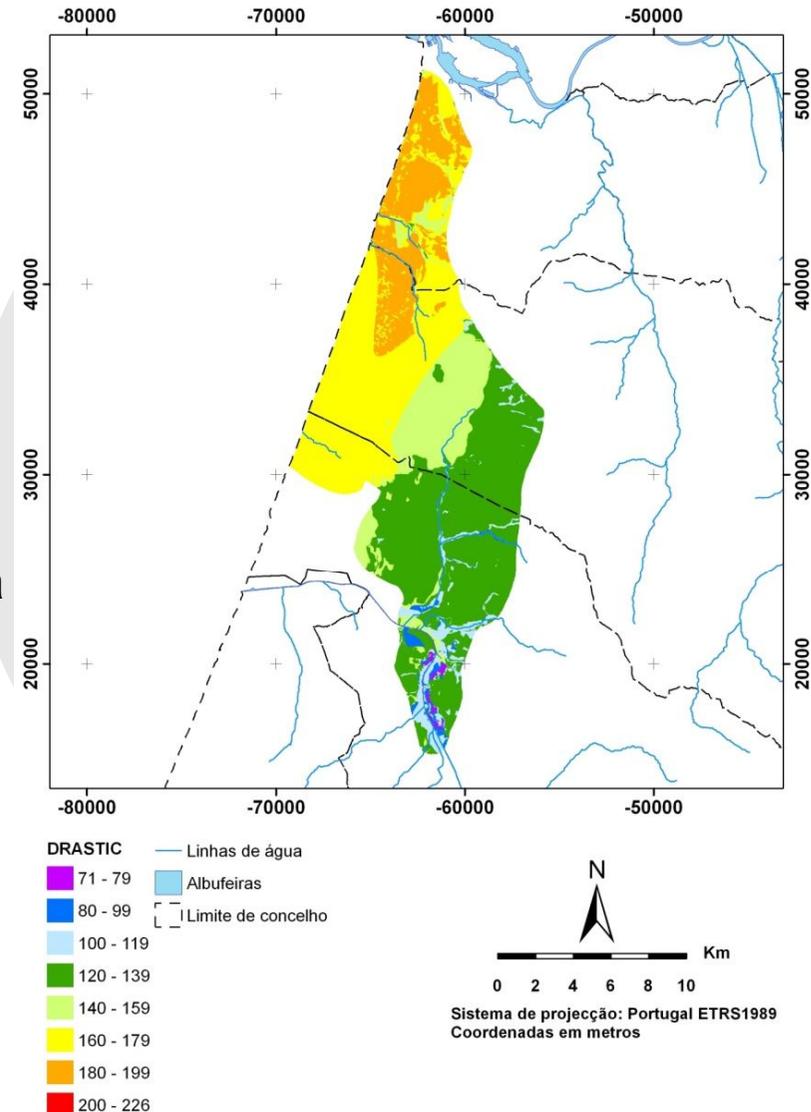
Índices elevados em quase toda a extensão do aquífero - reflete uma área aplanada em descida até ao oceano



PROTEÇÃO DAS ORIGENS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA CONSUMO HUMANO: DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO NO SISTEMA AQUÍFERO DE LEIROSA - MONTE REAL

Metodologia DRASTIC: Resultados

- Reflete um sistema aquífero bastante homogéneo ao nível geológico e topográfico
- Vulnerabilidade elevada na zona norte onde os níveis da água se encontram muito próximos da superfície (importância do parâmetro D)
- Valores mais baixos de vulnerabilidade na zona sul, associados a formações aluvionares em que os factores de maior peso na vulnerabilidade é a litologia e o topo de solo



Parâmetro A

Shape	OBJECTID	UGEO_SIMBO	DESCRICAO	param_a	param_i	param_c
Polygon	1	(delta)	Doleritos e rochas afins	4	4	2
Polygon	2	(phi)@M	Formacao argilo-gresosa e conglomeratica de Senhora do Bom Sucesso	6	6	1
Polygon	3	(phi)@M	Miocenico e Paleogenico indiferenciado	6	6	1
Polygon	4	@A	Areias de praia	8	8	4
Polygon	5	@Ad	Areias de duna	8	8	4
Polygon	6	@C1-2	Cenomaniano inferior, Albiano, Aptiano e Neocomiano	6	6	1
Polygon	7	@J1*_ab	Margas de Dagorda: Calcarios dolomiticos	4	4	1
Polygon	8	@J1_ab	Calcarios dolomiticos e margas de Dagorda	4	4	1
Polygon	9	@J1_ab	Margas de Dagorda	4	4	1
Polygon	10	@M	Miocenico continental	6	6	2
Polygon	11	@P	Formacoes marinhas de Monte Real: Serie continental de Marrazes e de Barracao	6	6	2
Polygon	12	@P@Q	Plio-Plistocenico indiferenciado	6	6	2
Polygon	13	@Q	Cascalheiras de antigas praias	8	8	4
Polygon	14	@Q	Plistocenico indiferenciado	8	8	4
Polygon	15	@Q3	Depositos de terracos de 25-40m	8	8	4
Polygon	16	a	Aluvios	6	6	1
Polygon	17	a	Aluvios e depositos de fundo de vale	6	6	1
Polygon	18	d	Dunas	7	8	4
Polygon	19	d	Dunas e areias de dunas	7	8	4
Polygon	20	d	Dunas, areias de dunas e de praia	7	8	4

param_t

FID	Shape	ID	GRIDCODE	param_t
0	Polygon	1	3	3
1	Polygon	2	5	5
2	Polygon	3	10	10
3	Polygon	4	9	9
4	Polygon	5	10	10
5	Polygon	6	5	5
6	Polygon	7	10	10
7	Polygon	8	5	5
8	Polygon	9	3	3
9	Polygon	10	5	5
10	Polygon	11	10	10
11	Polygon	12	3	3

param_d

FID	Shape	ID	GRIDCODE
0	Polygon	1	10
1	Polygon	2	7
2	Polygon	3	9
3	Polygon	4	5
4	Polygon	5	5
5	Polygon	6	7

param_r

FID	Shape	REC_F	param_r	COMB_3	FRAC_1	FRAC_2	FRAC_3	CODE_06	RESUMO	param_s
51	Polygon	0	1	1	7	3	0	312	312_A_7_A_3_0_0	5
53	Polygon	0	1	1	7	3	0	212	212_A_7_A_3_0_0	
677	Polygon	3.266581	1	1	10	0	0	212	212_Aac_10_0_0_0	
616	Polygon	3.321137	1	1	10	0	0	212	212_Aac_10_0_0_0	
307	Polygon	3.557377	1	1	10	0	0	312	312_Aac_10_0_0_0	
626	Polygon	3.616166	1	1	6	4	0	242	242_Aac_6_Ac_4_0_0	
665	Polygon	3.756167	1	1	6	4	0	212	212_Aac_6_Ac_4_0_0	
672	Polygon	3.756167	1	1	6	4	0	312	312_Aac_6_Ac_4_0_0	
611	Polygon	3.983293	1	1	10	0	0	242	242_Aac_10_0_0_0	
605	Polygon	4.134711	1	1	10	0	0	212	212_Aac_10_0_0_0	
716	Polygon	5.262542	1	1	10	0	0	243	243_Aac_10_0_0_0	
714	Polygon	6.800026	1	1	7	3	0	312	312_Ac_7_A_3_0_0	
769	Polygon	7.08061	1	1	7	3	0	243	243_Ac_7_A_3_0_0	
758	Polygon	7.171529	1	1	7	3	0	212	212_Ac_7_A_3_0_0	
676	Polygon	7.55058	1	1	10	0	0	212	212_Ac_10_0_0_0	
615	Polygon	8.246317	1	1						
751	Polygon	8.712389	1	1						
405	Polygon	9.579855	1	1						
511	Polygon	9.579855	1	1						
723	Polygon	10.189096	1	1						
688	Polygon	10.387489	1	1						
753	Polygon	10.411384	1	1						
724	Polygon	11.423992	1	1						
767	Polygon	11.711921	1	1						
696	Polygon									
695	Polygon									



Field Calculator

Parser: VB Script Python

Fields: param_r, FID_para_2, OBJECTID, UGEO_SIMBO, DESCRICAO, param_a, param_i, param_c, FID_para_3, FID_SOLOS, AREA_1

Type: Number String Date

Functions: Abs(), Atn(), Cos(), Exp(), Fix(), Int(), Log(), Sin(), Sqr(), Tan()

Show Codeblock

Normal =

$$[\text{param_d}] * 5 + [\text{param_r}] * 4 + [\text{param_a}] * 3 + [\text{param_s}] * 2 + [\text{param_t}] * 1 + [\text{param_i}] * 5 + [\text{param_c}] * 3$$

Buttons: Clear, Load..., Save..., Help, OK, Cancel



CONSULTORIA E SERVIÇOS
TÉCNICOS E AMBIENTAIS LTDA



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

ESTUDOS SOBRE A DISPONIBILIDADE E VULNERABILIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE

Vulnerabilidade natural à Poluição

Apresentação de: João Paulo LOBO FERREIRA



Estudos sobre a disponibilidade e vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos da Região Metropolitana do Recife



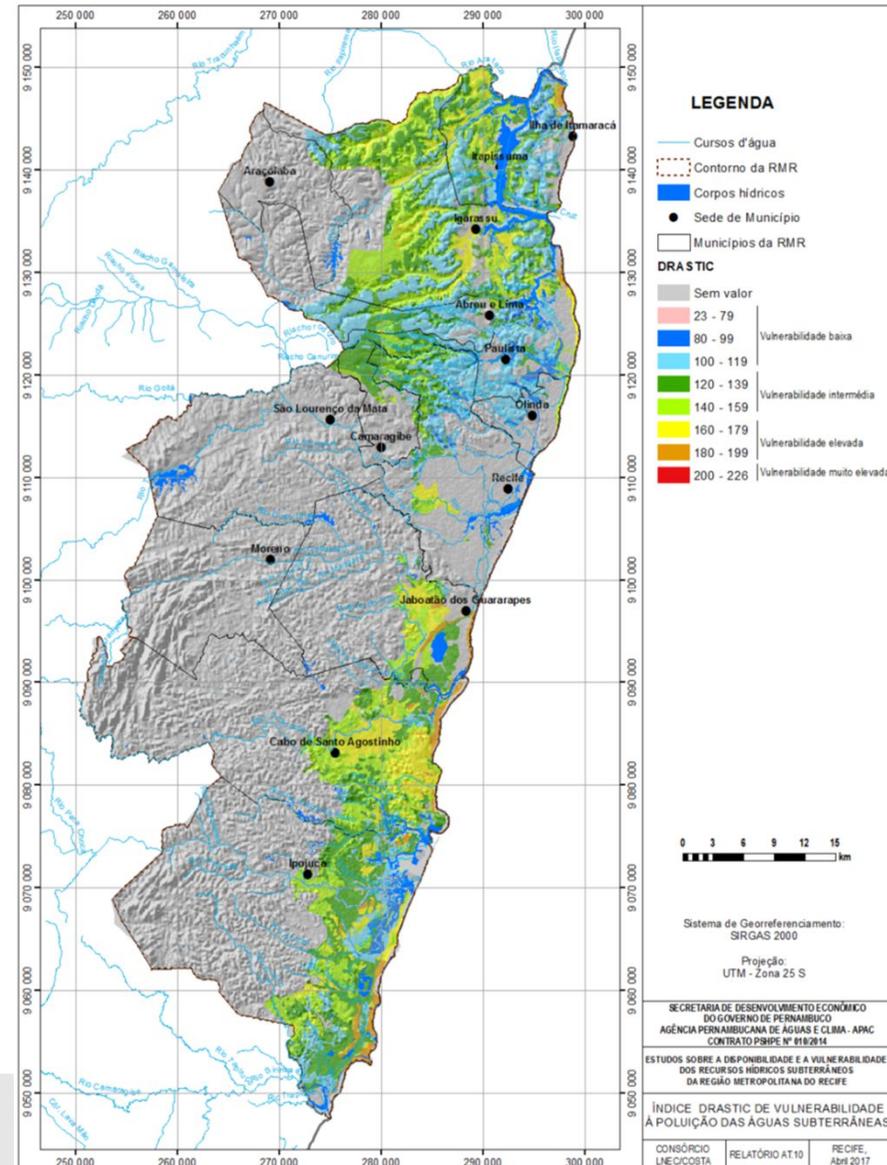
ÍNDICE

1. Introdução à Vulnerabilidade dos aquíferos à Poluição
2. Aplicação da metodologia DRASTIC
 - Caracterização de 7 parâmetros ou indicadores hidrogeológicos e morfológicos
 - Somatório ponderado
3. Reflexão sobre os resultados obtidos pela metodologia DRASTIC, e sugestões de melhoria
4. Apresentação da metodologia GOD
5. Apresentação do Índice LNEC IFI para mapeamento da Facilidade de Infiltração
6. Conclusões a tirar destes INSTRUMENTOS DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

Estudos sobre a disponibilidade e vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos da Região Metropolitana do Recife

Conclusões da aplicação da metodologia DRASTIC à RMR e recomendações para novos estudos de caracterização:

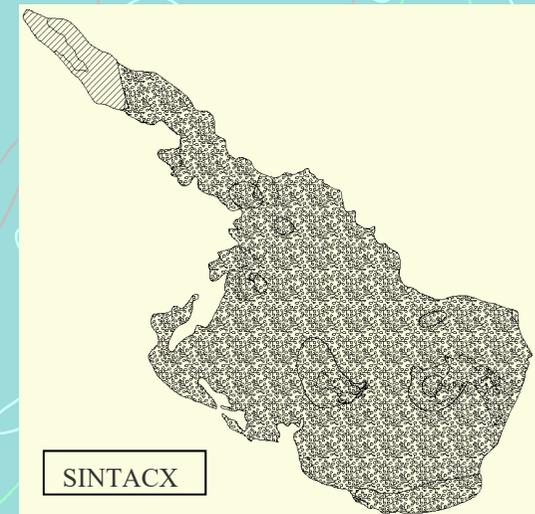
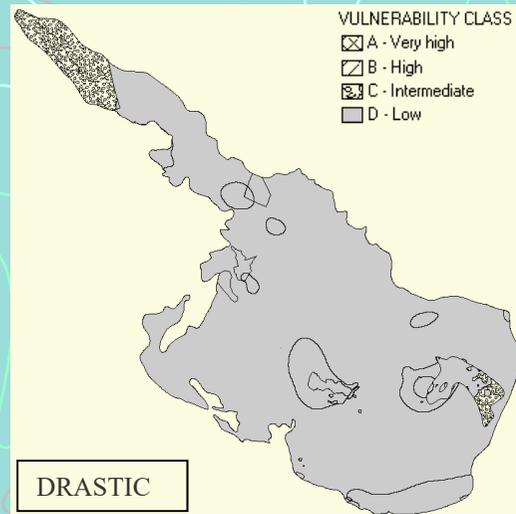
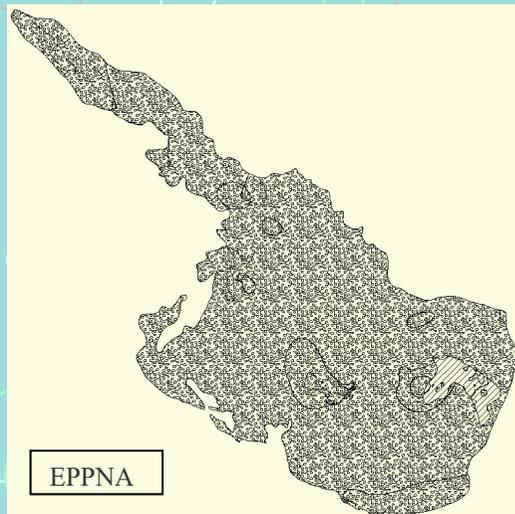
O índice DRASTIC obtém-se pela soma ponderada dos índices atribuídos aos sete parâmetros que o caracterizam (cf. seção 6.1.2.1). Como terá sido perceptível da leitura do Relatório 10, a caracterização de cada parâmetro acarreta alguma incerteza, que advém quer das escalas da informação de base utilizada quer dos resultados da modelagem. Na figura ao lado, apresenta-se o mapeamento DRASTIC da RMR, que se considera provisório, pelo facto de algum dos parâmetros, nomeadamente o tipo de solo S, se apresentar omissos em muitas das áreas da RMR, nomeadamente nas zonas urbanizadas. O mapa final do índice DRASTIC, foi omitido no Relatório 10. Considera-se pertinente analisar com a APAC o interesse da sua inserção no Relatório 10, com a referência às restrições referidas “uma soma de incertezas, cada uma delas de sinal desconhecido (ou seja se subavaliando ou se sobreavaliando os parâmetros, e as suas localizações).”



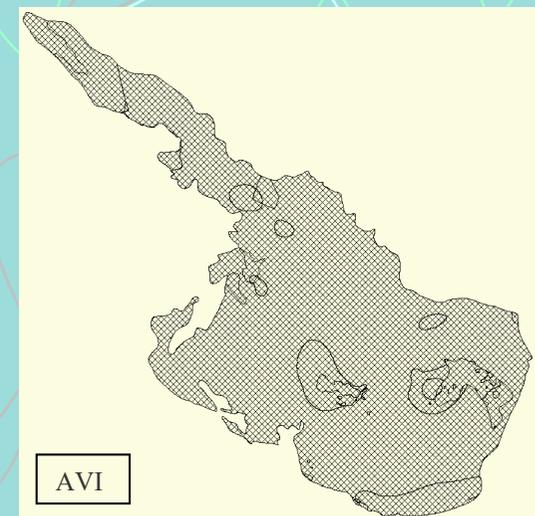
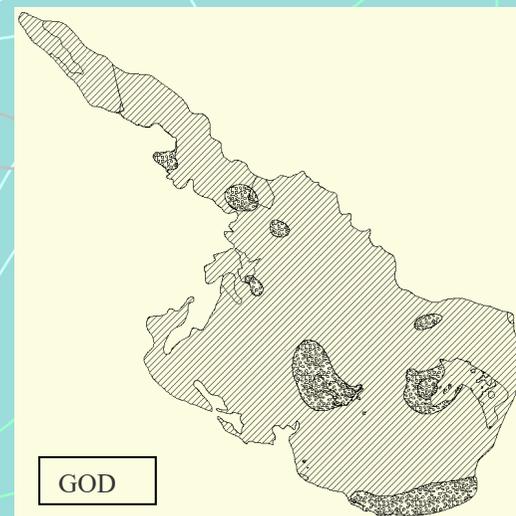
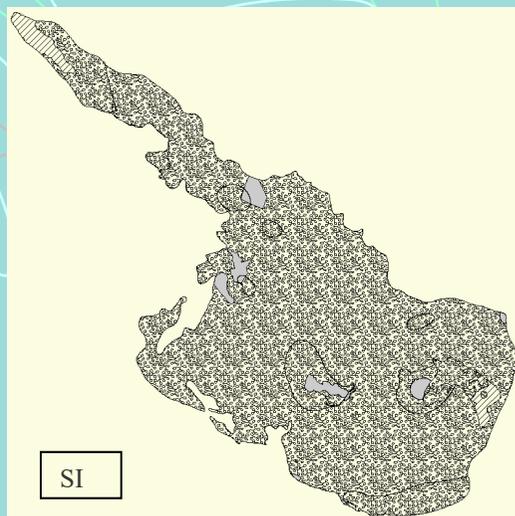
Comparison of six different methods for groundwater vulnerability assessment



Geofísica Internacional (2004), Vol. 43, Num. 4, pp.
Groundwater vulnerability assessment in Portugal
J. P. Lobo Ferreira J. P. and Manuel M. Oliveira

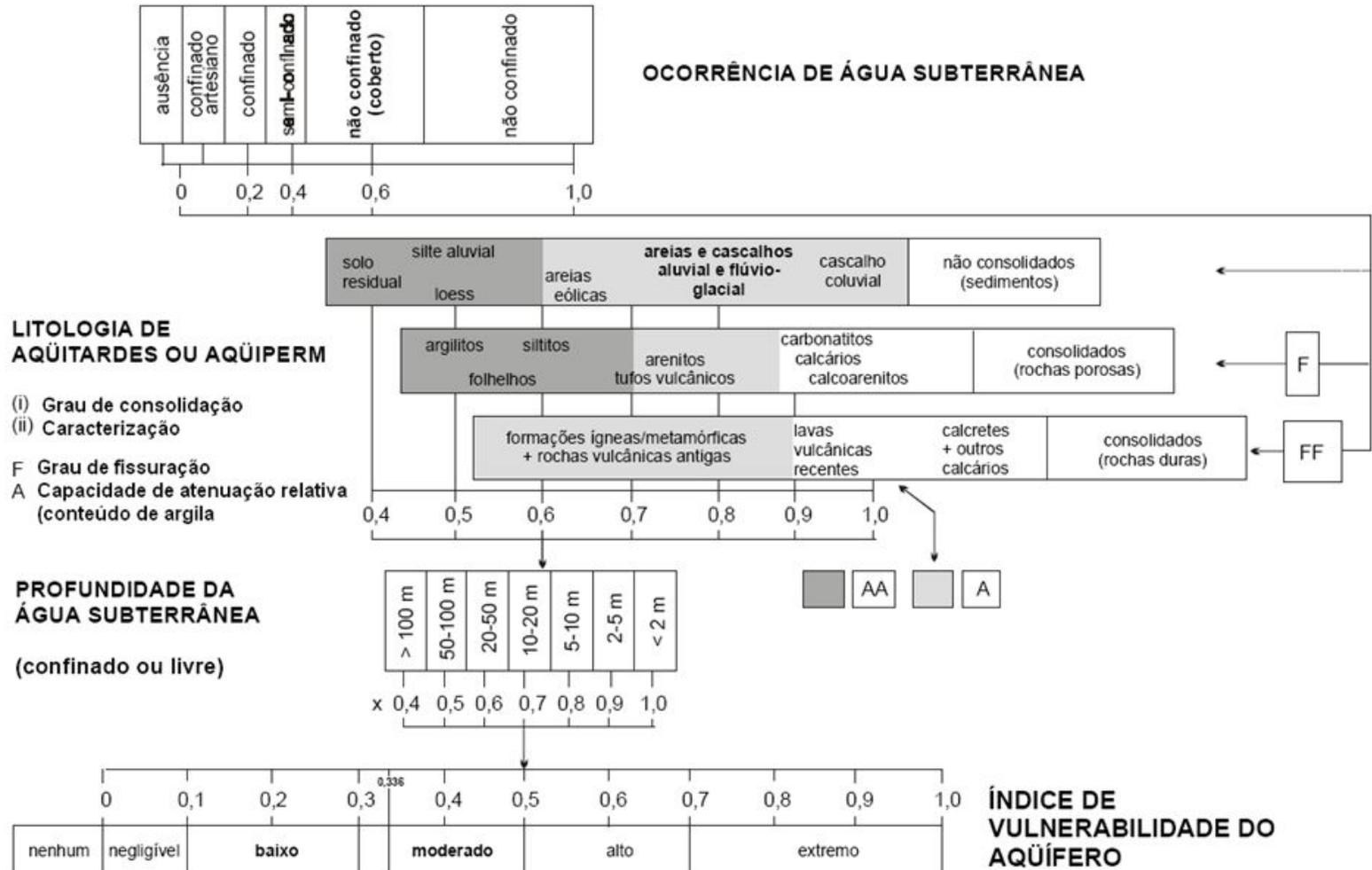


VULNERABILITY CLASS
A - Very high
B - High
C - Intermediate
D - Low



Estudos sobre a disponibilidade e vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos da Região Metropolitana do Recife

Procedimento da metodologia GOD para avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero

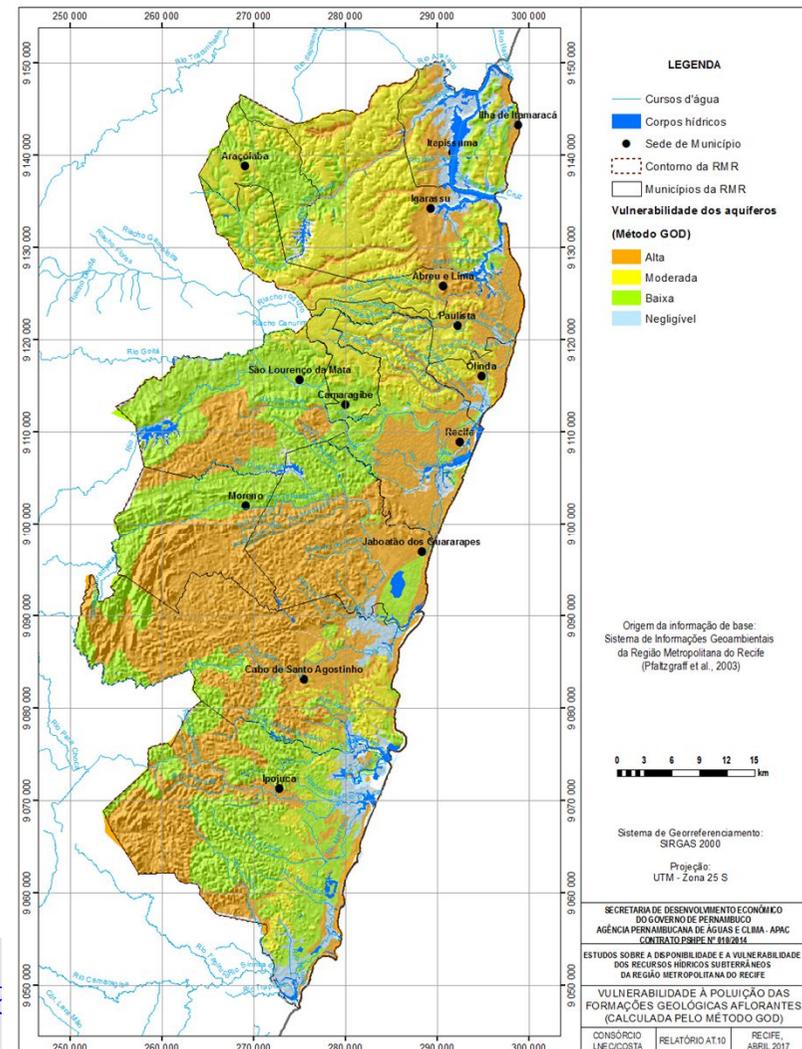


Estudos sobre a disponibilidade e vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos da Região Metropolitana do Recife

A metodologia GOD considera os seguintes parâmetros (Foster et al., 1988):

- Tipo de ocorrência do aquífero: desde livre a confinado, ou ausente.
- Tipos litológicos acima da zona saturada: que além dos litótipos, considera o grau de consolidação, o grau de fraturamento e conteúdo de argila, componentes que relevam o grau de permeabilidade do aquífero.
- Profundidade do nível da água ou do teto do aquífero confinado.
- A cada um destes fatores é atribuído um índice, sendo feito o produto dos três índices cujo resultado é um quarto índice que representa a vulnerabilidade natural do aquífero. O processo de avaliação do índice de vulnerabilidade GOD é ilustrado na Figura 6.11.
- Com base nas informações litológicas, tipo de funcionamento/ocorrência e permeabilidades de cada aquífero, para as suas áreas de ocorrência freática, e seguindo os procedimentos ilustrados na figura do slide anterior, foi obtido para a totalidade do território da RMR, as seguintes classes de vulnerabilidade (cf. Pfaltzgraff et al., 2003):

Mapa de vulnerabilidade da RMR segundo o índice GOD



Avaliação da Vulnerabilidade à Intrusão Marinha no Sistema Aquífero Quaternário de Aveiro

- **Introdução**
- **Intrusão marinha e Vulnerabilidade à intrusão marinha**
- **Metodologia GALDIT**
 - **Parâmetros que influenciam a intrusão marinha**
- **Aplicação da metodologia GALDIT:**
 - **Área de estudo**
 - **Dados de base**
 - **Atribuição dos índices**
- **Resultados**
- **Considerações gerais**



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

Avaliação da Vulnerabilidade à Intrusão Marinha no Sistema Aquífero Quaternário de Aveiro

T. MARTINS

Geólogo, LNEC, tmartins@lneec.pt

M.J. HENRIQUES

Geóloga, LNEC, mjhenriques@lneec.pt

J.P. LOBO FERREIRA

Eng^o. Civil, LNEC, lferreira@lneec.pt

Trabalho realizado para:



Co-financiamento:



UNIÃO EUROPEIA

Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional

Estudos sobre a disponibilidade e vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos da Região Metropolitana do Recife

■ BIBLIOGRAFIA

- Aller, L., Benett, T., Leher, J.H., Hackett, G. (1987) – “DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeological Settings”. U. S. Environmental Protection Agency, 622 pp.
- Almeida C., Mendonça, J.J.L., Jesus, M.R., Gomes, A.J. (2000) – “Sistemas Aquíferos de Portugal Continental”. Centro de Geologia da Faculdade de Ciências de Lisboa e Instituto da Água.
- Eimers, J.L., Weaver, J.C., Terziotti, S., Midgett, R.W. (2000) – “Methods of rating unsaturated zone and watershed characteristics of public water supplies in North Carolina”. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 99-4283.
- Lobo Ferreira, J.P., Oliveira, M.M., Leitão, T.E., Rocha, J., Barbosa, A.E. (2009) – “Protecção das Origens Superficiais e Subterrâneas nos Sistemas de Abastecimento de Água”. Série de Guias Técnicos IRAR, Guia n.º 11. Instituto Regulador de Águas e Resíduos e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa (ISBN:978-989-95392-6-6).
- Martins, T., Oliveira, M.M., Lobo Ferreira, J.P., (2011) – “Modelação da recarga dos sistemas aquíferos da região hidrográfica do Centro”. Relatório Final, Lisboa, LNEC, Relatório 208/2011, 96 pp.
- Martins, T., Henriques, M.J. (2011) – “Caracterização da Vulnerabilidade à Poluição dos Sistemas Aquíferos da Região Hidrográfica do Centro”. Lisboa, LNEC, Relatório 287/2011–NAS.
- Martins, T., Henriques, M.J. (2011) – “Modelação de perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas da Região Hidrográfica do Centro”. Lisboa, LNEC, Relatório 324/2011-NAS.
- Oliveira, M.M. (2002) - "Cartografia da Vulnerabilidade à Poluição das Águas Subterrâneas do Concelho de Montemor-o-Novo utilizando o Método DRASTIC", Lisboa, LNEC, Relatório 46/02-GIAS.

Introdução

Este trabalho tem como objectivo a caracterização da vulnerabilidade à intrusão marinha do sistema aquífero Quaternário de Aveiro através da aplicação em SIG do método GALDIT (Chachadi e Lobo Ferreira, 2001)

Intrusão marinha

Fenómeno que pode influenciar a qualidade das águas subterrâneas nas áreas afectadas pela subida do nível médio do mar.

A sobreexploração dos aquíferos costeiros é uma das principais causas deste fenómeno, já que o incremento dos volumes de água captados promove diminuição do nível de água subterrânea e por consequência o avanço da interface água doce / água salgada para o interior do continente, dando origem à salinização da água

Vulnerabilidade à intrusão marinha

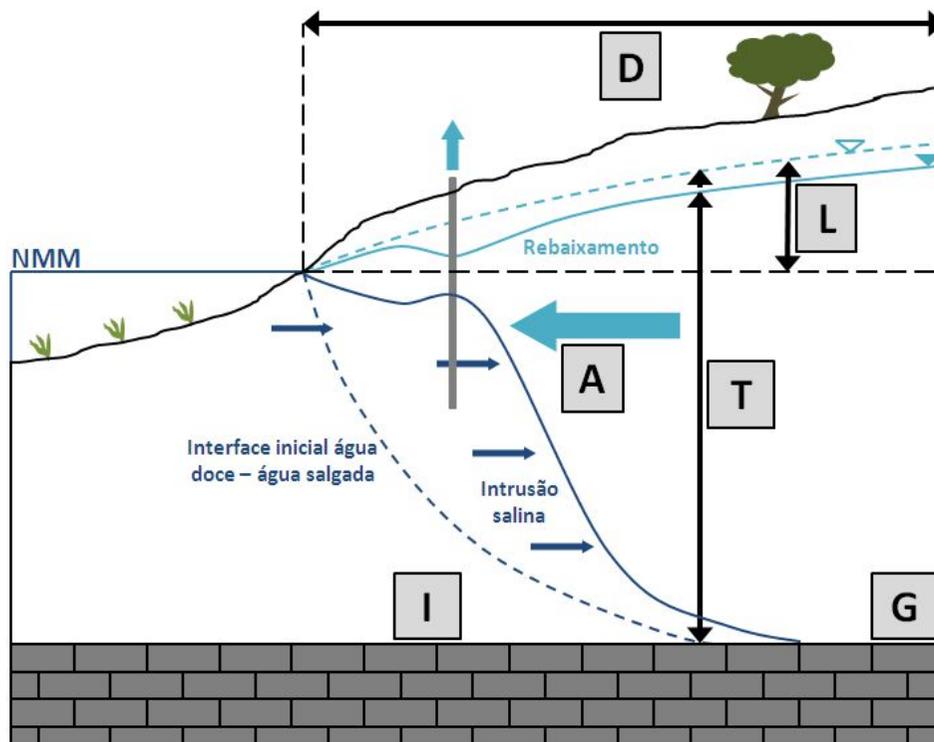
"Sensibilidade da qualidade da água subterrânea a uma extracção imposta ou à subida do nível do mar, determinada pelas características intrínsecas do aquífero".

Metodologia GALDIT

> O método GALDIT (Chachadi e Lobo Ferreira, 2001) - **G**roundwater occurrence; **A**quifer hydraulic conductivity; **D**epth to groundwater **L**evel above the sea; **D**istance from the shore; **I**mpact of existing status of sea water intrusion; **T**hickness of the aquifer.

> É calculado através da equação:

• Índice **GALDIT** = $(1 \times G + 3 \times A + 4 \times L + 4 \times D + 1 \times I + 2 \times T) / 15$



G – Ocorrência de aquífero

A – Condutividade hidráulica

L – Nível piezométrico actual acima da água do mar

D – Distância à linha de costa

I – Impacte da intrusão marinha

T – Espessura do aquífero

Classes de vulnerabilidade	Índice GALDIT
Elevada	$\geq 7,5$
Moderada	5 - 7,5
Baixa	≤ 5

Metodologia GALDIT - Parâmetros que influenciam a intrusão marinha

- Ocorrência de **águas** subterrâneas (tipo do aquífero: não confinado, confinado ou semi-confinado);
- Condutividade hidráulica do **A**quífero;
- Nível **L** piezométrico (acima do nível do mar);
- **D**istância à linha de costa;
- **I**mpacte da existência de fenómenos de intrusão marinha na área;
- Espessura da camada do aquífero em es**T**udo

O Valor de cada parâmetro varia entre 2,5 e 10 (corresponde, respectivamente, a uma vulnerabilidade à intrusão marinha baixa e alta).

Os valores são, de forma geral, atribuídos a partir de tabelas que fazem a correspondência entre as características hidrogeológicas locais e o valor do parâmetro associado.

Os Coeficientes de ponderação variam entre 1 e 4 (parâmetros com menor e maior influência na vulnerabilidade, respectivamente)

Parâmetro GALDIT	Valor do Coeficiente de Ponderação
G – Ocorrência de Aquíferos	1
A – Condutividade Hidráulica	3
L – Nível piezométrico (acima do nível do mar)	4
D – Distância à linha de costa	4
I – Impacte do estado actual da intrusão marinha na região	1
T – Espessura do aquífero	2

As Classes de vulnerabilidade GALDIT são definidas em função do índice calculado pela Equação.

Metodologia GALDIT - Parâmetros que influenciam a intrusão marinha (cont)

Tabelas de correspondência entre as características hidrogeológicas locais e o valor do parâmetro associado

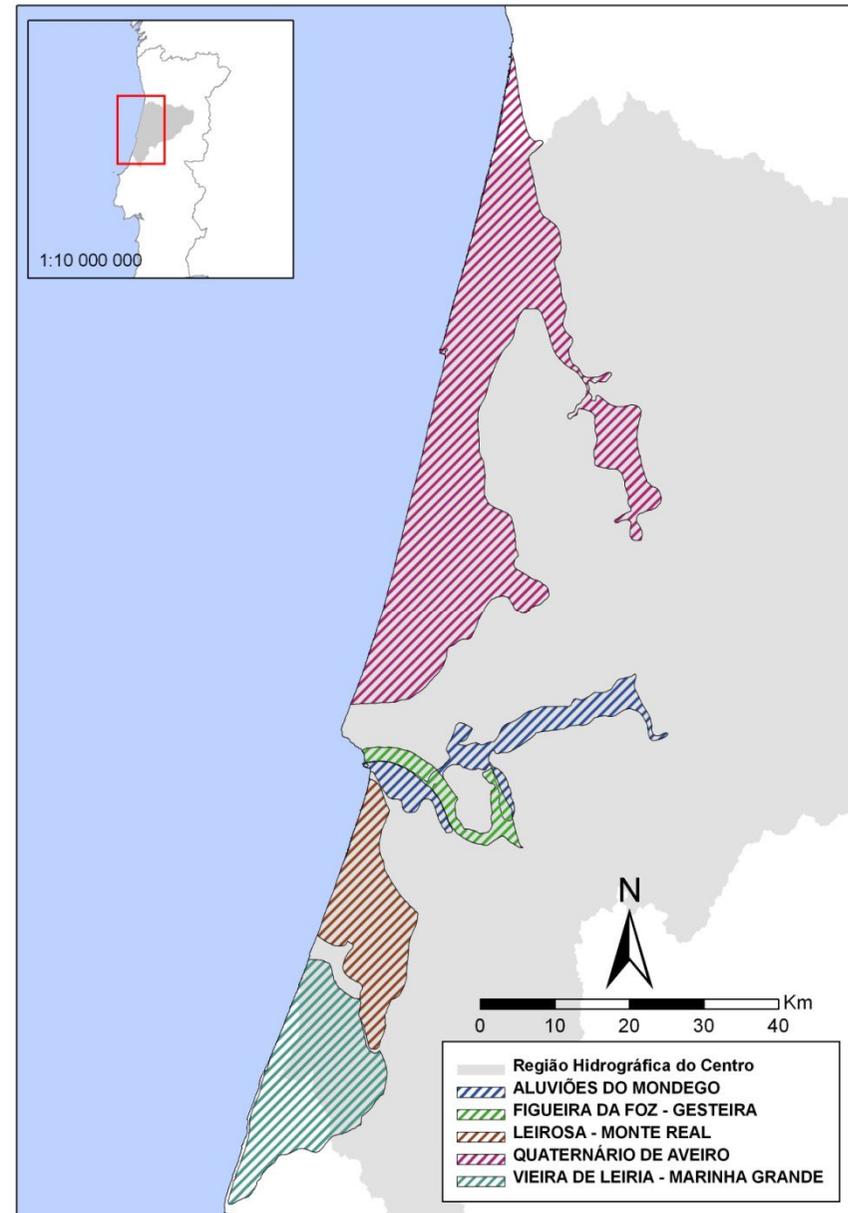
Parâmetro G - Classes "ocorrência de aquíferos"; Peso (1)		Valor do índice
Aquífero confinado		10
Aquífero livre		7,5
Aquífero semi-confinado		5
Aquífero limitado (recarga e/ou barreira impermeável alinhada paralelamente à linha de costa)		2,5
Parâmetro A - Classes "condutividade hidráulica"; Peso (3)	Intervalo (m/d)	Valor do índice
Elevada	> 40	10
Média	10 - 40	7,5
Baixa	5 - 10	5
Muito Baixa	< 5	2,5
Parâmetro L - Classes "nível piezométrico acima do nível do mar"; Peso (4)	Intervalo (m)	Valor do índice
Elevada	< 1	10
Média	1 - 1,5	7,5
Baixa	1,5 - 2	5
Muito Baixa	> 2	2,5
Parâmetro D - Classes "distância à linha de costa"; Peso (4)	Intervalo (m)	Valor do índice
Muito Perto	< 500	10
Perto	500 - 750	7,5
Meia distância	750 - 1000	5
Longe	> 1000	2,5
Parâmetro I - Classes "impacte do estado actual da intrusão marinha na região"; Peso (1)	Razão $Cl^-/[HCO_3^- + CO_3^{2-}]$ na água doce	Valor do índice
Alta	> 2	10
Média	1,5 - 2	7,5
Baixa	1 - 1,5	5
Muito baixa	< 1	2,5
Parâmetro T - Classes "espessura do aquífero"; Peso (2)	Intervalo (m)	Valor do índice
Grande	> 10	10
Média	7,5 - 10	7,5
Pequena	5 - 7,5	5
Muito pequena	< 5	2,5

Aplicação da metodologia GALDIT: Área de estudo

A análise da vulnerabilidade à intrusão marinha centra-se nos sistemas aquíferos costeiros ou com fortes afinidades com o oceano:

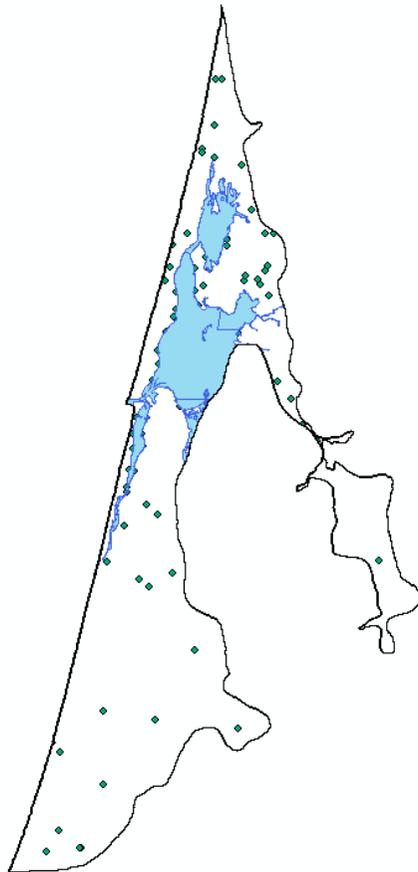
- o **Quaternário de Aveiro**
- o Aluviões do Mondego
- o Figueira da Foz – Gesteira
- o Leirosa – Monte Real
- o Vieira de Leiria – Marinha Grande

Almeida *et al.* (2000) define o sistema aquífero do Quaternário de Aveiro como um sistema multiaquífero, poroso, em que o aquífero instalado nas dunas apresenta uma vulnerabilidade elevada a fenómenos de contaminação

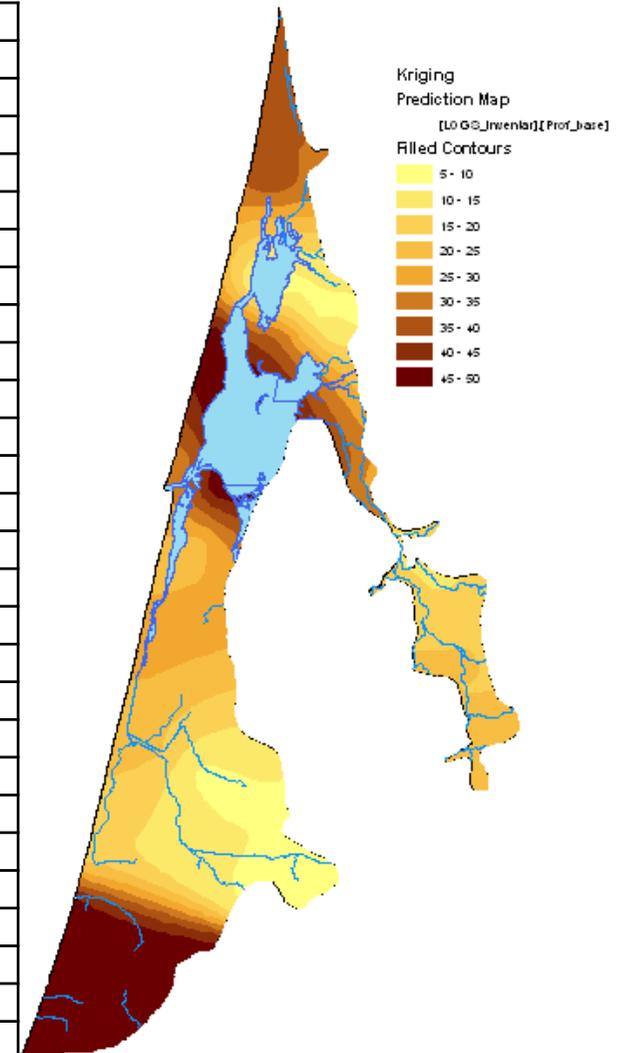


Aplicação da metodologia GALDIT: Dados de base

- Localização dos furos
- Nível piezométrico
- Concentração de cloretos
- Profundidade total dos furos

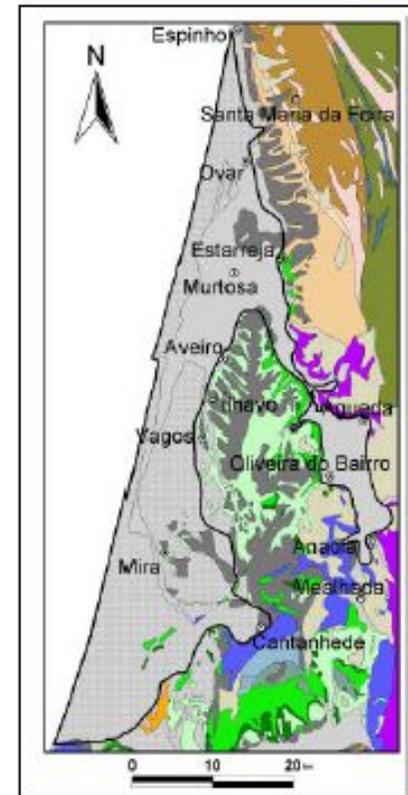


M	P	Designação	Profundidade base
156260	433870	OVR1	38.5
153380	425440	AC7	17.5
149500	398300	AC2	27.2
150120	384830	JK3	8.7
142500	363770	JK24	48.22
161200	425300	AC4	11
150200	404180	AC1	23.4
145500	394100	JK1	26
146720	386550	AC1	20.75
151620	399770	AC1	26
162510	422660	AC7	8
165250	406350	AC7	33
164200	409100	AC55	28
166500	404600	AC68	12.4
161700	421570		9.1
160360	423100		8.1
160960	422170		10.9
161970	422200		12.6
162180	422780		10
148940	410310	AC1	32
159000	411240	AC1	50
151500	408650	AC2	50
164800	400300	JK2	20.4
151910	421870	AC1	46
156900	421400	AGC16	33.5
173700	392700	SJS2/90	20
155340	424900	SJS1	5



Aplicação da metodologia GALDIT: Parâmetro G (ocorrência de aquífero)

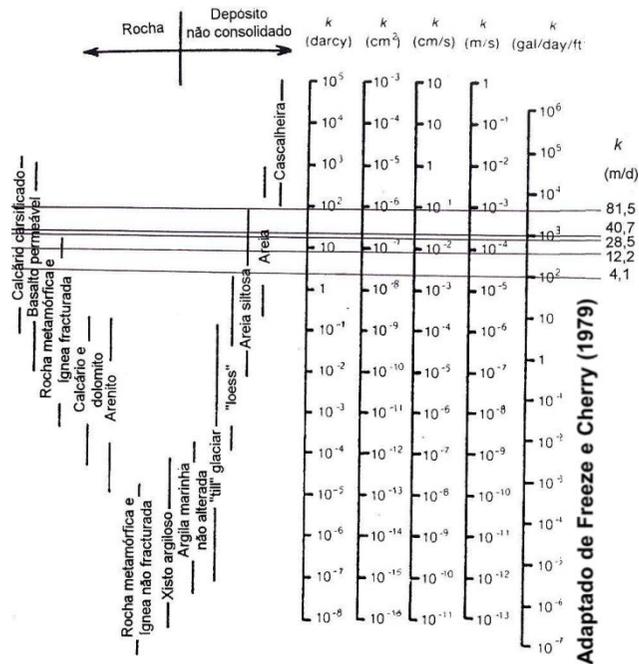
Definiu-se para todas as áreas correspondentes a areias de duna, areias de praia e litologias recentes o índice do parâmetro G como aquífero livre (7,5). Para as restantes áreas (que apresentam as litologias cretácicas e jurássicas e triásicas) foi definido o índice 5 correspondente a aquíferos semi-confinados.



Aplicação da metodologia GALDIT: Parâmetro A (Condutividade hidráulica)



A análise da descrição litológica das formações geológicas que constituem o sistema aquífero (escala 1:50 000) permitiu atribuição dos índices A com base no ábaco proposto por Freeze e Cherry (1979).



Quaternário de Aveiro	A
Arenitos de Eirol (T)	2.5
Camadas de Coimbra (J1_cd)	2.5
Margas e calcários margosos de Vale das Fontes (J1_ef)	2.5
Calcários e calcários margosos (J1_f)	2.5
Arenitos de Carrascal (C1-2)	2.5
Gres de Palhaça (C1-2)	2.5
Arenitos de Requeixo (C2)	2.5
Depositos argilo-gresosos (C2)	2.5
Calcários de Tentúgal (C2-3)	2.5
Grés de Furadouro (C3)	2.5
Grés de Oiã (C3-4)	2.5
Grés de Furadouro (C3_F)	2.5
Argilas de Vagos (C5)	2.5
Argilas de Viso (C5)	2.5
Arenitos de Viso (C5*)	2.5
Conglomerado de Mira (C5*)	2.5
Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais (Areias de Cordinhã) (P)	5
Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais (Areias de Cantanhede) (Q2)	7.5
Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais de 60-70m (Q2_a)	7.5
Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais de 45-50m (Q2_b)	7.5
Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais de 30-40m (Q3)	7.5
Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais de 30-40m (seixos e cascalheiras roladas) (Q3*)	7.5
Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais de 15-20 m (Q4_a)	7.5
Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais de 15-20m (Q4_a)	7.5
Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais de 5-8m (Q4_b)	7.5
Formação areno-pelítica de cobertura (Qp)	7.5
Areias eólicas (s.l.) - Areias de Gandara (s.l.) (A)	7.5
Areias de duna (Ad)	7.5
Areias hidro-eólicas - Areias de Gandara (s.l.) (Ae)	7.5
Areias de praia (Ap)	7.5
Cordão dunar de praia (da)	7.5
Dunas com orientação W-E (db)	7.5
Dunas parabólicas (dc)	7.5
Dunas parabólicas - Areias de Gandara (s.l.) (dc)	7.5
Dunas com orientação NW-SE (dd)	7.5
Eluviões carbonatados (Ec)	7.5
Aluviões (a)	2.5

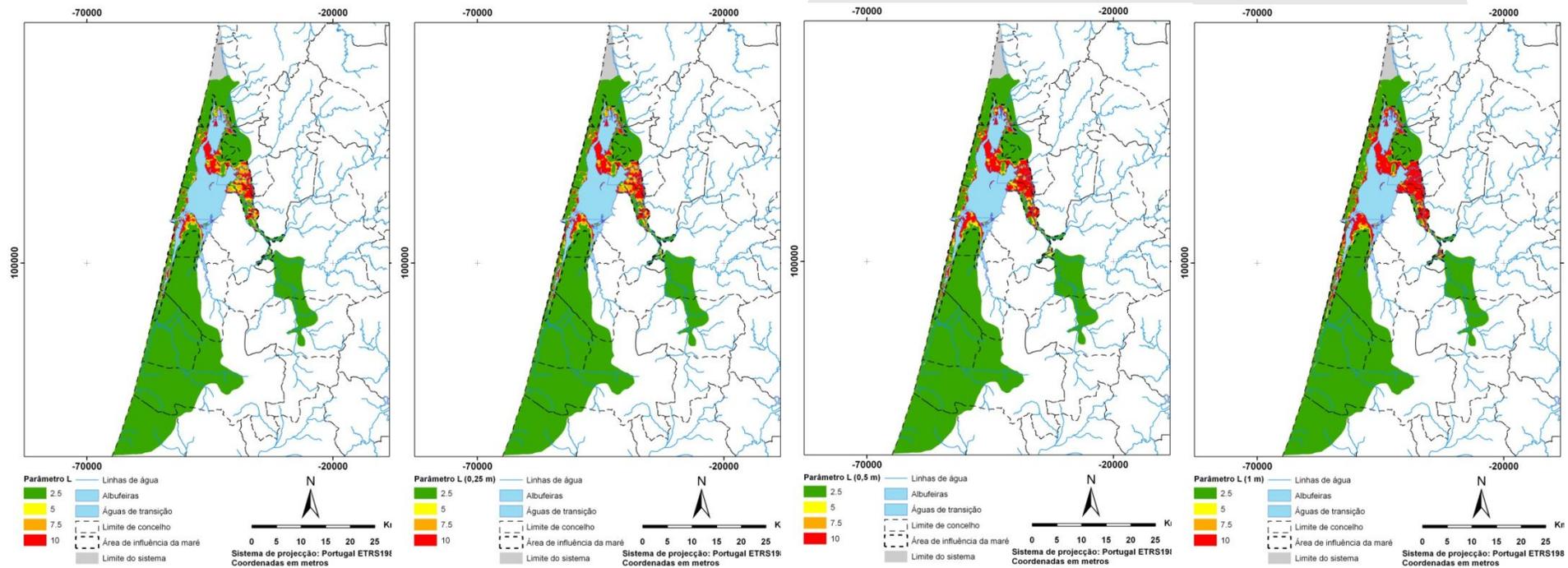
Aplicação da metodologia GALDIT: Parâmetro L (nível piezométrico acima do nível do mar)



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

O parâmetro L foi determinado a partir da subtração de um NPZ médio à cota topográfica (MDT do terreno);

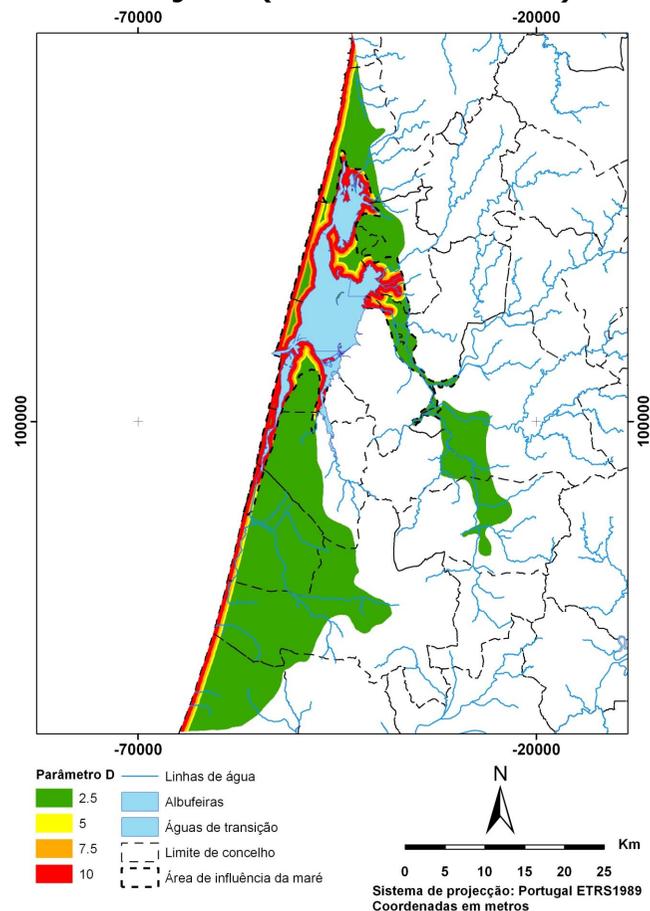
A partir da superfície piezométrica inicial (condição actual) foram calculados cenários de subida do NMM em 0,25 m, 0,5 m e 1 m.



Aplicação da metodologia GALDIT:

Parâmetro D (distância à linha de costa)

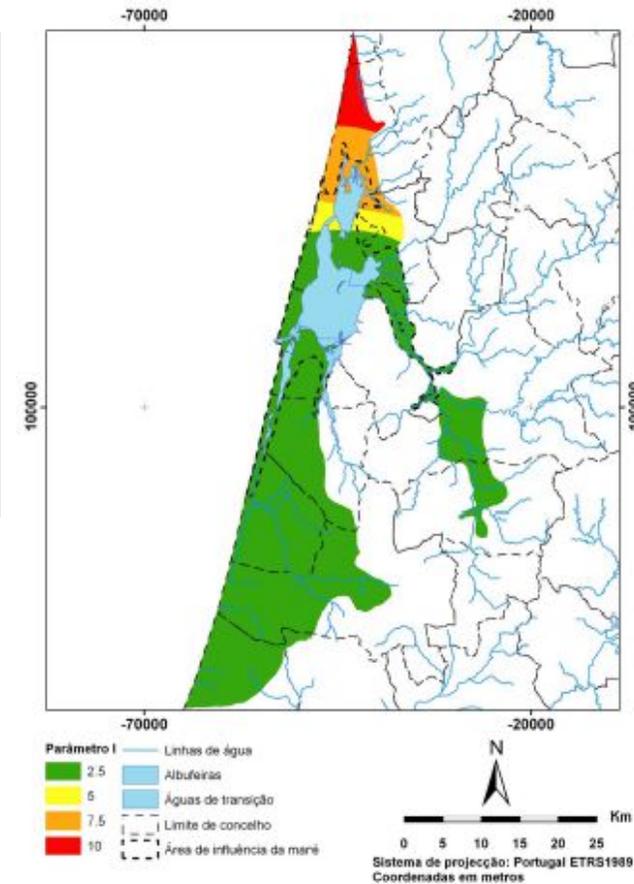
A distância à linha de costa foi calculada a partir a delimitação de um *buffer* de 500, 750 e 1000 m em relação à linha de costa e em torno da massa de água de transição (Ria de Aveiro)



© LNEC 2006

Parâmetro I (Impacte da intrusão marinha)

Interpolação da distribuição espacial dos valores da relação $[Cl^-]/[HCO_3^-]$



Aplicação da metodologia GALDIT: Parâmetro T (espessura do aquífero)

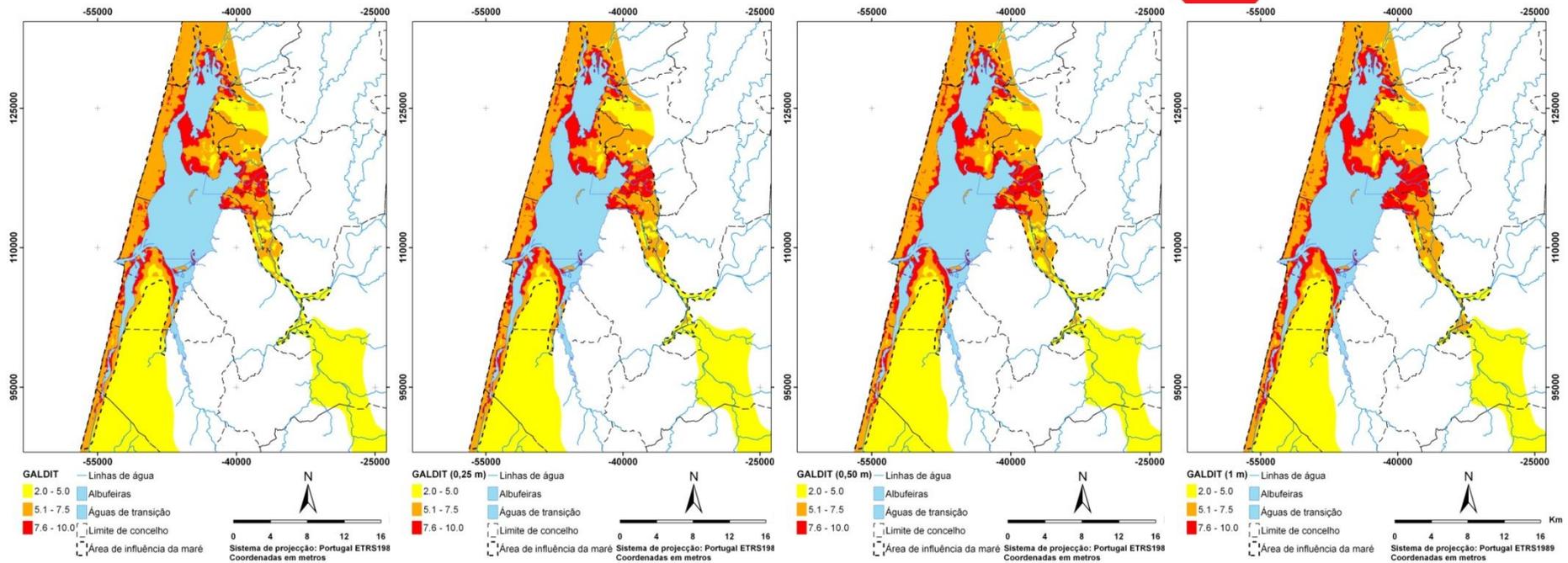


Análise de *logs* de sondagem disponibilizados na base de dados INVENTAR e interpolação da profundidade das sondagens para obter uma superfície correspondente à base do sistema aquífero;

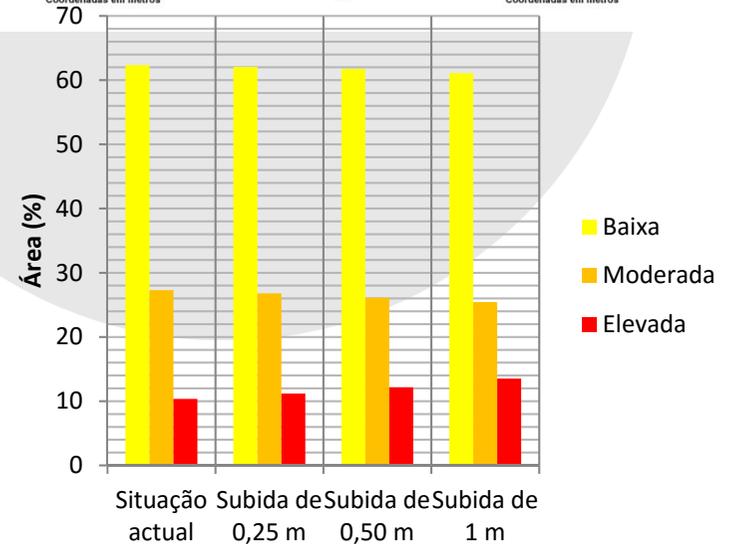
O sistema aquífero possui espessura superior a 10 metros, i.e. parâmetro T igual a 10.



Resultados



A vulnerabilidade elevada concentra-se especialmente em torno da Ria de Aveiro
 Há um progressivo, mas suave, aumento em direcção ao continente da vulnerabilidade elevada com a variação do parâmetro L – subida do NMM



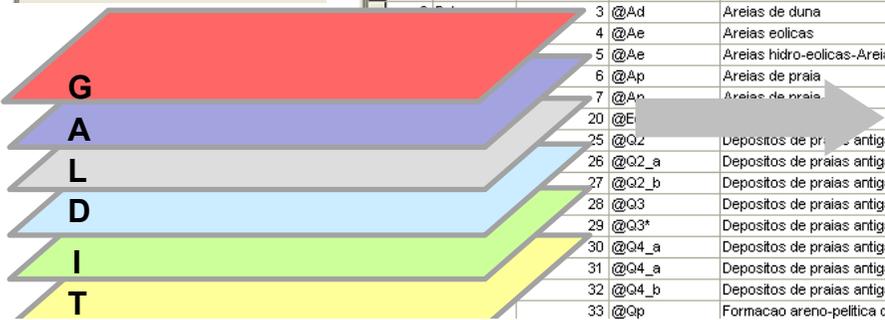
FID	Shape	ID	GRIDCODE	param_t100
486	Polygon	487	2	2.5
624	Polygon	625	2	2.5
641	Polygon	642	2	2.5
897	Polygon	898	2	2.5
959	Polygon	960	2	2.5
965	Polygon	966	2	2.5
1052	Polygon	105	2	2.5
1177	Polygon	117	2	2.5
1199	Polygon	120	2	2.5
1262	Polygon	126	2	2.5
1276	Polygon	127	2	2.5
1514	Polygon	151	2	2.5
1590	Polygon	159	2	2.5
1641	Polygon	164	2	2.5
1818	Polygon	181	2	2.5
1854	Polygon	185	2	2.5
2071	Polygon	207	2	2.5
2099	Polygon	210	2	2.5
2155	Polygon	215	2	2.5
2174	Polygon	217	2	2.5
2196	Polygon	219	2	2.5
2204	Polygon	220	2	2.5
2284	Polygon	228	2	2.5
2425	Polygon	242	2	2.5
2427	Polygon	242	2	2.5
2508	Polygon	250	2	2.5
2532	Polygon	253	2	2.5
2579	Polygon	258	2	2.5
2587	Polygon	258	2	2.5
2594	Polygon	259	2	2.5
2684	Polygon	268	2	2.5
2690	Polygon	269	2	2.5
2720	Polygon	272	2	2.5
2789	Polygon	279	2	2.5
2811	Polygon	281	2	2.5
2815	Polygon	281	2	2.5
2824	Polygon	282	2	2.5

FID	Shape	EU_CD	AREA	DIST_CD	NOME	MS_CD	param_t
0	Polygon	PTO1	930642282.104	PTRH4	QUATERNÁRIO DE AVEIRO	O1	10
1	Polygon	PTO1	930642282.104	PTRH4	QUATERNÁRIO DE AVEIRO	O1	7.5
2	Polygon	PTO1	930642282.104	PTRH4	QUATERNÁRIO DE AVEIRO	O1	5
3	Polygon	PTO1	930642282.104	PTRH4	QUATERNÁRIO DE AVEIRO	O1	7.5

DESCRICA_1	Shape_Leng	Shape_Le_1	Shape_Area	param_g
Areias e cascalheiras de praia	62460.952473	40814.127543	5047244.30218	7.5
Areias de duna	392924.012471	203937.407045	49587350.6103	7.5
Areias eolicas	312980.272034	50624.091523	6113139.21118	7.5
Areias de praia	41858.691667	24527.650472	1012948.88967	7.5
Arenitos de Requeixo	3807.049293	1110.840506	12901.141844	5
Depositos argilo-gresosos	19.138977	19.138977	11.408942	5
Gres de Furadouro (15 +/- 5m)	1029.908819	1029.908819	16532.068582	5
Gres de Oia (40 +/- 10m)	148.503688	148.503688	828.666873	5
Depositos de praias antigas e de terracos fluviais de 45-50m	50315.89297	14520.527152	1780020.89783	7.5
Depositos de praias antigas e de terracos fluviais de 30-40m: seixos e cascalheiras rotadas	22597.454344	14.96791	8.568573	7.5
Depositos de praias antigas e de terracos fluviais de 15-20 m	23797.413532	1412.437259	68137.174527	7.5
Depositos de praias antigas e de terracos fluviais de 15-20m	14805.684521	4976.613557	321986.589352	7.5
Depositos de praias antigas e de terracos fluviais de 5-8m	82030.022415	33396.913262	2987823.39936	7.5
Arenitos de Eirol	52376.311665	2491.843444	199217.36757	5
Aluvioes	281999.941062	38907.865645	8395242.01872	7.5
Aluvioes actuais	260305.388968	196600.675152	203411035.173	7.5
Cordao dunar de praia	41843.280524	24474.109414	1249038.19565	7.5
Dunas com orientacao VW-E	57661.080908	1373.69115	13191.345902	7.5
Dunas parabolicas	59811.802156	2015.253526	120590.909989	7.5
Dunas com orientacao NV-SE	135120.642175	1068.424786	29483.413903	7.5

FID	Shape	param_i
0	Polygon	2.5
1	Polygon	10
2	Polygon	7.5
3	Polygon	5

FID	Shape	OBJECTID	UGEO_SIM_2	DESCRICA_1	param_c	param_a
7	Polygon	8	@C1-2	Arenitos de Carrascal	1	2.5
8	Polygon	9	@C1-2	Gres de Palhaca (80 +/- 20m)	1	2.5
9	Polygon	10	@C2	Arenitos de Requeixo	1	2.5
10	Polygon	11	@C2	Depositos argilo-gresosos	1	2.5
11	Polygon	12	@C2-3	Calcarios de Tentugal	1	2.5
12	Polygon	13	@C3	Gres de Furadouro (15 +/- 5m)	1	2.5
13	Polygon	14	@C3-4	Gres de Oia (40 +/- 10m)	1	2.5
14	Polygon	15	@C3_@F	Gres de Furadouro	1	2.5
15	Polygon	16	@C5	Argilas de Vagos (150 +/- 50m)	1	2.5
16	Polygon	17	@C5	Argilas de Viso	1	2.5
17	Polygon	18	@C5*	Arenitos de Viso	1	2.5
18	Polygon	19	@C5*	Conglomerado de Mira (?m)	1	2.5
20	Polygon	21	@J1_cd	Camadas de Coimbra	1	2.5
21	Polygon	22	@J1_ef	Margas e calcarios margosos de Vale das Fontes	1	2.5
22	Polygon	23	@J1_f	Calcarios e calcarios margosos (15m?)	1	2.5
33	Polygon	34	@T	Arenitos de Eirol	1	2.5
34	Polygon	35	a	Aluvioes	1	2.5
35	Polygon	36	a	Aluvioes actuais	1	2.5
23	Polygon	24	@P	Depositos de praias antigas e de	1	2.5
0	Polygon	1	@A	Areias e cascalheiras de praia	1	2.5
1	Polygon	2	@A	Areias eolicas (s.l.) - Areias de	1	2.5
3	Polygon	3	@Ad	Areias de duna	1	2.5
4	Polygon	4	@Ae	Areias eolicas	1	2.5
5	Polygon	5	@Ae	Areias hidro-eolicas-Areias de C	1	2.5
6	Polygon	6	@Ap	Areias de praia	1	2.5
7	Polygon	7	@Ap	Areias de praia	1	2.5
20	Polygon	20	@E		1	2.5
25	Polygon	25	@Q2	Depositos de praias antigas e de	1	2.5
26	Polygon	26	@Q2_a	Depositos de praias antigas e de	1	2.5
27	Polygon	27	@Q2_b	Depositos de praias antigas e de	1	2.5
28	Polygon	28	@Q3	Depositos de praias antigas e de	1	2.5
29	Polygon	29	@Q3*	Depositos de praias antigas e de	1	2.5
30	Polygon	30	@Q4_a	Depositos de praias antigas e de	1	2.5
31	Polygon	31	@Q4_a	Depositos de praias antigas e de	1	2.5
32	Polygon	32	@Q4_b	Depositos de praias antigas e de	1	2.5
33	Polygon	33	@Qp	Formacao areno-pelitica de cobertura	4	7.5



GALDIT =

```
[param_g] * 1 + [param_a] * 3 + [param_i] * 4 + [param_d] * 4 + [param_l] * 1 + [param_t] * 2
```

Conclusões

Sistema aquífero	Cenário	Área analisada (Km2)	Índice GALDIT					
			Baixa (≤ 5)	%	Moderada (5 - 7.5)	%	Elevada (≥ 7.5)	%
Quaternário de Aveiro (O1)	Situação actual	905.36	564.30	62.33	247.05	27.29	93.71	10.35
	Subida de 0,25 m		561.74	62.05	242.52	26.79	101.18	11.18
	Subida de 0,50 m		558.95	61.74	236.39	26.11	110.12	12.16
	Subida de 1 m		553.06	61.09	230.21	25.43	122.20	13.50

O sistema aquífero Quaternário de Aveiro apresenta uma variação de cerca de 10% de área de vulnerabilidade elevada para 13,5% no cenário extremo (subida do nível do mar de 1 m)

Considerações gerais

- Limitações na análise:
 - o Escassez de dados de piezometria que obrigaram à utilização de métodos expeditos para a criação de superfícies piezométricas representativas;
 - o Escassez de dados de qualidade dado que rede de monitorização cobre apenas pequenas áreas do sistema aquífero;
- O facto de predominarem áreas de baixa vulnerabilidade à intrusão salina implica que este método deve ser aplicado em pequenas escalas numa distância que não deve ultrapassar os 3000 m da faixa litoral;
- Esta metodologia de análise pode representar uma componente importante em ferramentas de apoio à decisão e licenciamento.

METODOLOGIAS PARA A DELIMITAÇÃO DE PERÍMETROS DE PROTEÇÃO DE CAPTAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO

Maria José HENRIQUES
João Paulo LOBO FERREIRA
Tiago André MARTINS

Estudo realizado para a



- Introdução
- Enquadramento legislativo
 - Zonas de proteção
 - Atividades e instalações interditas e condicionadas no interior das zonas de protecção
- Metodologias e critérios para a delimitação de perímetros de protecção
 - Vulnerabilidade à poluição de águas subterrânea
- Metodologias e critérios para a delimitação de perímetros de protecção - **métodos analíticos**
 - Método do Raio Fixo Calculado – tempo de propagação
 - Lei de Darcy – Tempo de propagação
 - Método de Wyssling – Rebaixamento
 - Método de Krijgsman e Lobo Ferreira – Rebaixamento
 - Método de Krijgsman e Lobo Ferreira – Condições de aplicação
 - Método de Kreidler e Senger – Rebaixamento
 - Equação de Fluxo Uniforme – Rebaixamento
- Métodos para a delimitação de perímetros de protecção - **métodos numéricos** – exemplo de aplicação
 - Métodos para a delimitação de perímetros de protecção - **métodos analíticos**: exemplo de aplicação: Metodologia Krijgsman e Lobo Ferreira

Enquadramento Legislativo



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

- Lei da Água ([Lei n.º 58/2005](#), de 29 de dezembro) transpõe a Directiva n.º 2000/60/CE do Parlamento Europeu e do conselho, de 23 de Outubro.
- Regime de Utilizações dos Recursos Hídricos ([Decreto-Lei n.º 226-A/2007](#), de 31 de maio) que determina no Artigo 43º que a delimitação dos perímetros de protecção deverá observar o estabelecido na Portaria nº 702/2009 de 6 de Julho e o título de utilização do domínio hídrico destinado à captação para consumo humano pressupõe a prévia delimitação dos respectivos perímetros de protecção.
- O Decreto-Lei 382/99 de 22 de Setembro estabelece as normas e os critérios para a delimitação dos perímetros de protecção de captações para abastecimento público. Aplicado a captações de águas subterrâneas destinadas à produção de água para consumo humano que sirvam, pelo menos, 500 habitantes ou cujo caudal de exploração seja superior a 100 m³/dia (Artigo 1.º). Qualquer que seja a situação, estão sempre obrigadas a ter a zona de protecção Imediata.
- Segundo este diploma o perímetro de captação engloba 3 zonas: imediata, intermédia e alargada cujos critérios para a sua definição se encontram especificados no art. 3º.
- Para além destas ficam igualmente definidos para certos casos específicos a delimitação de zonas especiais. Tais casos englobam zonas de conexão hidráulica directa e zonas costeiras onde exista ou possa existir intrusão marinha.

Decreto-Lei n.º382/99 de 22 de Setembro

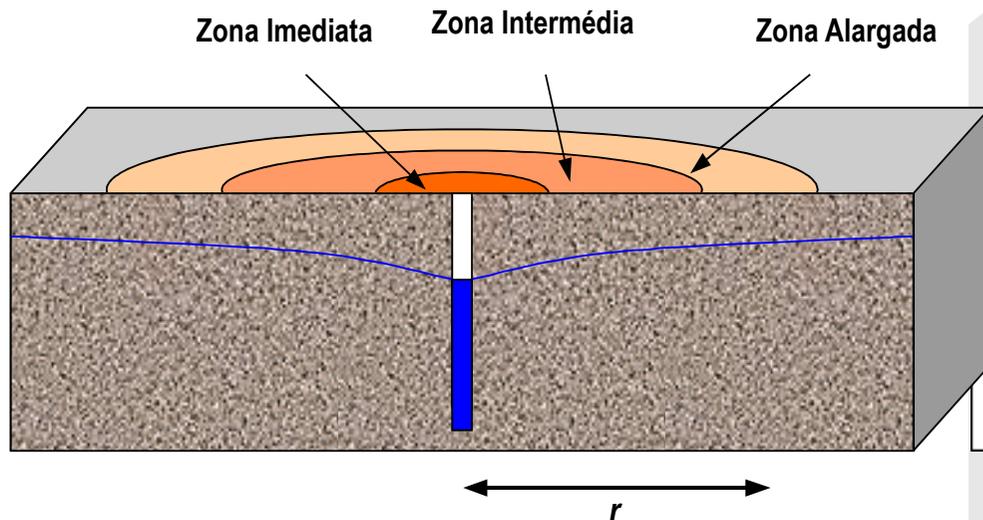
- Define a utilização de perímetros de protecção em captações de água subterrânea como meio de prevenir influências negativas nas águas captadas.
- O perímetro de protecção delimita a área contígua à captação onde se interditam ou condicionam as instalações e as actividades susceptíveis de poluírem as águas subterrâneas.

Os perímetros de protecção das captações de água subterrânea destinadas ao consumo público visam, assim:

- Prevenir, reduzir e controlar a poluição das águas subterrâneas por infiltração de águas pluviais lixiviantes e de águas excedentes de rega e de lavagens;
- Potenciar os processos naturais de diluição e de autodepuração das águas subterrâneas;
- Prevenir, reduzir e controlar as descargas acidentais de poluentes;
- Proporcionar a criação de sistemas de aviso e alerta para a protecção dos sistemas de abastecimento de água com origem nas captações de águas subterrâneas, em situações de poluição acidental dessas águas.

Enquadramento legislativo - Zonas de proteção

- **Zona de proteção** - Área contígua à captação na qual se interditam ou condicionam as instalações e as actividades susceptíveis de poluírem as águas subterrâneas



- O artigo 6.º do Decreto-Lei 382/99 de 22 de Setembro menciona os condicionamentos à ocupação do território considerando as servidões administrativas e restrições de utilidade pública no interior das zonas de proteção



- **Zona de proteção Imediata** - Área do terreno contígua à captação em que todas as actividades são interditas, excepto as que têm por objectivo a conservação, manutenção e exploração.
- **Zona de proteção Intermédia** - Área de terreno contígua à anterior, de extensão variável, cuja função é proteger o aquífero contra a poluição microbiológica (bactérias, vírus, etc.), favorecendo a sua diluição ou eliminação, antes de alcançar a captação. Deve também permitir, após ser detectada a poluição, um tempo de resposta suficiente para que sejam tomadas as medidas necessárias antes do poluente atingir a captação.
- **Zona de proteção Alargada** - Área do terreno, contígua à zona de protecção intermédia, destinada a proteger a água subterrânea de poluentes persistentes, ou seja, de difícil atenuação (compostos orgânicos, substâncias radioactivas, metais pesados, hidrocarbonetos e nitratos). Deve permitir, após ser detectada a poluição, um tempo de resposta suficiente para que seja encontrada uma fonte de água alternativa para consumo humano.

Enquadramento legislativo - Atividades e instalações interditas e condicionadas no interior das zonas de protecção



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

Zona Intermédia

Interditas - Infra-estruturas aeronáuticas; Oficinas e estações de serviço de automóveis; Depósitos de materiais radioactivos, de hidrocarbonetos e de resíduos perigosos; Postos de abastecimento e áreas de serviço de combustíveis; Transporte de hidrocarbonetos, de materiais radioactivos ou de outras substâncias perigosas; Canalizações de produtos tóxicos; Lixeiras e aterros sanitários; Unidades industriais; Depósitos de sucata; Estações de tratamento de águas residuais; Cemitérios; Lagos e quaisquer obras ou escavações destinadas à recolha e armazenamento de água ou quaisquer substâncias susceptíveis de se infiltrarem, devendo ser cimentadas todas as captações de água subterrânea existentes que forem desactivadas; Aplicação de pesticidas móveis e persistentes na água ou que possam formar substâncias tóxicas, persistentes ou bioacumuláveis; Fossas.

Condicionadas - Pastorícia; Usos agrícolas e pecuários; Edificações, espaços destinados a práticas desportivas, parques de campismo, colectores de águas residuais, estradas e caminhos-de-ferro, ficando a ampliação e/ou a construção sujeita a parecer prévio; Pedreiras e explorações mineiras em início de actividade, ficando sujeitas a parecer prévio; Sondagens para captação de água subterrânea e trabalhos subterrâneos, ficando a sua realização sujeita a parecer prévio.

Zona Alargada

Interditas - Transporte de hidrocarbonetos, de materiais radioactivos e de outras substâncias perigosas; Depósitos de materiais radioactivos, de hidrocarbonetos e de resíduos perigosos; Canalizações de produtos tóxicos; Refinarias e indústrias químicas; Lixeiras e aterros sanitários; Depósitos de sucata; Infra-estruturas aeronáuticas; Cemitérios; Oficinas e estações de serviço de automóveis; Postos de abastecimento e áreas de serviço de combustíveis; Fossas.

Condicionadas - Aplicação de pesticidas móveis e persistentes na água ou que possam formar substâncias tóxicas, persistentes ou bioacumuláveis; Colectores de águas residuais e estações de tratamento de águas residuais; Lagos e quaisquer obras ou escavações destinadas à recolha e armazenamento de água ou quaisquer substâncias susceptíveis de se infiltrarem; Pedreiras e explorações mineiras em início de actividade, ficando sujeitas a parecer prévio; Realização de aterros, desaterros ou de outras operações que impliquem ou tenham como efeito a alteração da topografia; Sondagens para captação de água subterrânea e trabalhos subterrâneos, ficando a sua realização sujeita a parecer prévio.

Metodologias e critérios para a delimitação de perímetros de proteção



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

- Vulnerabilidade à poluição de águas subterrânea

"sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero".

Definida deste modo vulnerabilidade é distinta de risco de poluição.

O risco de poluição depende não só da vulnerabilidade mas também da existência de cargas poluentes significativas que possam entrar no ambiente subterrâneo. É possível existir um aquífero com um alto índice de vulnerabilidade mas sem risco de poluição, caso não haja carga poluente significativa ou de haver um risco de poluição excecional apesar do índice de vulnerabilidade ser baixo.

Método DRASTIC de cálculo da vulnerabilidade à poluição, baseado em sete parâmetros ou indicadores hidrogeológicos.

D – Profundidade da zona não-saturada do solo (Depth to the water table)

R – Recarga profunda de aquíferos (Net Recharge)

A – Material do aquífero (Aquifer material)

S – Tipo de Solo (Soil type)

T – Topografia (Topography)

I – Impacto da zona não-saturada (Impact of the unsaturated zone)

C – Condutividade hidráulica (Hydraulic Conductivity)

Metodologias e critérios para a delimitação de perímetros de protecção



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

A utilidade do perímetro de protecção aumenta com a complexidade do método utilizado mas aumenta também o custo e o nível de experiência e informação exigida.

Os custos associados a um programa de protecção de água subterrânea são largamente ultrapassados pelos custos e dificuldades envolvidas na reabilitação ou mesmo com a degradação da água de um aquífero por poluição.

Os critérios para a delimitação de perímetros de protecção são: distância, tempo de propagação, rebaixamento, hidrogeológico, poder autodepurador do terreno

As várias metodologias variam de acordo com os custos de implementação e da sua complexidade.

Vão ser abordadas as seguintes metodologias: os métodos analíticos e os métodos numéricos.

Metodologias para a delimitação de perímetros de protecção - métodos analíticos



Cálculo das dimensões das zonas de protecção recorrendo a equações de simples resolução

Conhecimento de alguns parâmetros hidrogeológicos: transmissividade, porosidade, gradiente hidráulico, condutividade hidráulica, caudal de extracção, espessura saturada do aquífero

Cálculos utilizando o tempo de propagação

Cálculos utilizando o rebaixamento

Não são considerados alguns factores hidrogeológicos: fronteiras hidrogeológicas (rios, lagos, canais), heterogeneidades do próprio aquífero e recarga

Não é possível calibrar e validar o modelo, ou seja, não é possível testar se as suposições assumidas reflectem, ou não, o sistema.

Metodologias e critérios para a delimitação de perímetros de proteção



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

- Vulnerabilidade à poluição de águas subterrânea

"sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero".

Definida deste modo vulnerabilidade é distinta de risco de poluição.

O risco de poluição depende não só da vulnerabilidade mas também da existência de cargas poluentes significativas que possam entrar no ambiente subterrâneo. É possível existir um aquífero com um alto índice de vulnerabilidade mas sem risco de poluição, caso não haja carga poluente significativa ou de haver um risco de poluição excepcional apesar do índice de vulnerabilidade ser baixo.

Método DRASTIC de cálculo da vulnerabilidade à poluição, baseado em sete parâmetros ou indicadores hidrogeológicos.

D – Profundidade da zona não-saturada do solo (Depth to the water table)

R – Recarga profunda de aquíferos (Net Recharge)

A – Material do aquífero (Aquifer material)

S – Tipo de Solo (Soil type)

T – Topografia (Topography)

I – Impacto da zona não-saturada (Impact of the unsaturated zone)

C – Condutividade hidráulica (Hydraulic Conductivity)

Enquadramento legislativo - Atividades e instalações interditas e condicionadas no interior das zonas de protecção



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

Zona Intermédia

Interditas - Infra-estruturas aeronáuticas; Oficinas e estações de serviço de automóveis; Depósitos de materiais radioactivos, de hidrocarbonetos e de resíduos perigosos; Postos de abastecimento e áreas de serviço de combustíveis; Transporte de hidrocarbonetos, de materiais radioactivos ou de outras substâncias perigosas; Canalizações de produtos tóxicos; Lixeiras e aterros sanitários; Unidades industriais; Depósitos de sucata; Estações de tratamento de águas residuais; Cemitérios; Lagos e quaisquer obras ou escavações destinadas à recolha e armazenamento de água ou quaisquer substâncias susceptíveis de se infiltrarem, devendo ser cimentadas todas as captações de água subterrânea existentes que forem desactivadas; Aplicação de pesticidas móveis e persistentes na água ou que possam formar substâncias tóxicas, persistentes ou bioacumuláveis; Fossas.

Condicionadas - Pastorícia; Usos agrícolas e pecuários; Edificações, espaços destinados a práticas desportivas, parques de campismo, colectores de águas residuais, estradas e caminhos-de-ferro, ficando a ampliação e/ou a construção sujeita a parecer prévio; Pedreiras e explorações mineiras em início de actividade, ficando sujeitas a parecer prévio; Sondagens para captação de água subterrânea e trabalhos subterrâneos, ficando a sua realização sujeita a parecer prévio.

Zona Alargada

Interditas - Transporte de hidrocarbonetos, de materiais radioactivos e de outras substâncias perigosas; Depósitos de materiais radioactivos, de hidrocarbonetos e de resíduos perigosos; Canalizações de produtos tóxicos; Refinarias e indústrias químicas; Lixeiras e aterros sanitários; Depósitos de sucata; Infra-estruturas aeronáuticas; Cemitérios; Oficinas e estações de serviço de automóveis; Postos de abastecimento e áreas de serviço de combustíveis; Fossas.

Condicionadas - Aplicação de pesticidas móveis e persistentes na água ou que possam formar substâncias tóxicas, persistentes ou bioacumuláveis; Colectores de águas residuais e estações de tratamento de águas residuais; Lagos e quaisquer obras ou escavações destinadas à recolha e armazenamento de água ou quaisquer substâncias susceptíveis de se infiltrarem; Pedreiras e explorações mineiras em início de actividade, ficando sujeitas a parecer prévio; Realização de aterros, desaterros ou de outras operações que impliquem ou tenham como efeito a alteração da topografia; Sondagens para captação de água subterrânea e trabalhos subterrâneos, ficando a sua realização sujeita a parecer prévio.

Metodologias e critérios para a delimitação de perímetros de protecção



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

A utilidade do perímetro de protecção aumenta com a complexidade do método utilizado mas aumenta também o custo e o nível de experiência e informação exigida.

Os custos associados a um programa de protecção de água subterrânea são largamente ultrapassados pelos custos e dificuldades envolvidas na reabilitação ou mesmo com a degradação da água de um aquífero por poluição.

Os critérios para a delimitação de perímetros de protecção são: distância, tempo de propagação, rebaixamento, hidrogeológico, poder autodepurador do terreno

As várias metodologias variam de acordo com os custos de implementação e da sua complexidade.

Vão ser abordadas as seguintes metodologias: os métodos analíticos e os métodos numéricos.

Metodologias para a delimitação de perímetros de protecção - métodos analíticos



Cálculo das dimensões das zonas de protecção recorrendo a equações de simples resolução

Conhecimento de alguns parâmetros hidrogeológicos: transmissividade, porosidade, gradiente hidráulico, condutividade hidráulica, caudal de extracção, espessura saturada do aquífero

Cálculos utilizando o tempo de propagação

Cálculos utilizando o rebaixamento

Não são considerados alguns factores hidrogeológicos: fronteiras hidrogeológicas (rios, lagos, canais), heterogeneidades do próprio aquífero e recarga

Não é possível calibrar e validar o modelo, ou seja, não é possível testar se as suposições assumidas reflectem, ou não, o sistema.

Métodos para a delimitação de perímetros de protecção - Métodos analíticos

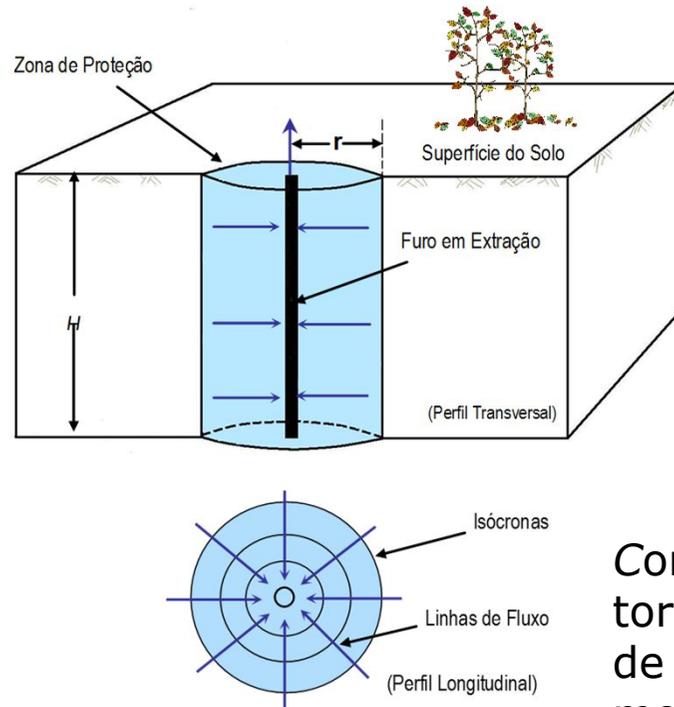


• Método do Raio Fixo Calculado – tempo de propagação (sugerido no Decreto-Lei 382/99 de 22 de Setembro)

O método RFC considera os seguintes tipos de aquíferos e valores para o dimensionamento do raio das três zonas de protecção das captações de águas subterrâneas

Tipo de aquífero	Zona Imediata	Zona Intermédia	Zona Alargada
Tipo 1 – Aquífero confinado	$r = 20 \text{ m}$	r é o maior valor entre 40 m e r_1 ($t = 50$ dias)	r é o maior valor entre 350 m e r_1 ($t = 3500$ dias)
Tipo 2 - Aquífero Livre	$r = 40 \text{ m}$	r é o maior valor entre 60 m e r_2 ($t = 50$ dias)	r é o maior valor entre 500 m e r_2 ($t = 3500$ dias)
Tipo 3 - Aquífero Semiconfinado	$r = 30 \text{ m}$	r é o maior valor entre 50 m e r_3 ($t = 50$ dias)	r é o maior valor entre 400 m e r_3 ($t = 3500$ dias)
Tipo 4 - Formações Carbonatadas	$r = 60 \text{ m}$	r é o maior valor entre 280 m e r_4 ($t = 50$ dias)	r é o maior valor entre 2400 m e r_4 ($t = 3500$ dias)
Tipo 5 - Formações Fissuradas	$r = 60 \text{ m}$	r é o maior valor entre 140 m e r_5 ($t = 50$ dias)	r é o maior valor entre 1200 m e r_5 ($t = 3500$ dias)
Tipo 6 - Formações Fissuradas e/ou Alteradas	$r = 40 \text{ m}$	r é o maior valor entre 60 m e r_6 ($t = 50$ dias)	r é o maior valor entre 500 m e r_6 ($t = 3500$ dias)

•Método do Raio Fixo Calculado



Fonte: Moinante, 2003

Equação volumétrica

$$Q.t = n.\pi.H.r^2 \Leftrightarrow r = \sqrt{\frac{Q.t}{n.H.\pi}}$$

Q - caudal de exploração da captação (m^3/d)

t - tempo de propagação (d);

n - porosidade eficaz do aquífero;

H - espessura saturada na captação (m);

r - raio do perímetro de proteção (m)
(incógnita).

Consiste na definição de uma área circular em torno de uma captação com base na resolução de uma equação analítica, a qual descreve o movimento advectivo para um furo localizado num aquífero em que a superfície piezométrica inicial é horizontal e o caudal de bombagem é constante.

Critério definido no Decreto Lei 382/99 de 22 de Setembro: Utilizado quando não existem dados sobre as características do escoamento subterrâneo e parâmetros hidráulicos do aquífero.

Serve para delimitar a zona imediata.

•Lei de Darcy – Tempo de propagação

Determina a velocidade linear média para o cálculo do tempo de propagação

$$v = \frac{K \cdot i}{n}$$

v - velocidade linear média (m/d)

i - gradiente hidráulico horizontal

K - condutividade hidráulica horizontal (m/d)

n - porosidade eficaz

Válida para aquíferos verdadeiramente confinados, com uma superfície piezométrica quase plana (com gradiente hidráulico até 0,001);

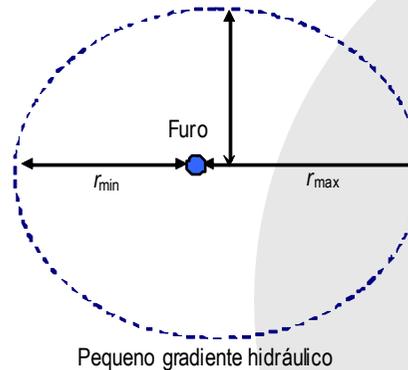
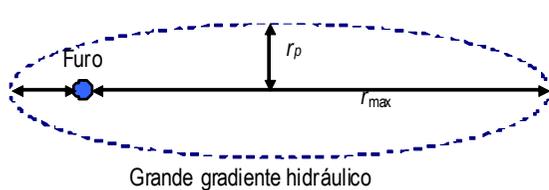
Para aquíferos livres, com uma superfície freática quase plana e com pequeno rebaixamento relativamente à espessura do aquífero ou à zona de ralos (<10%);

No cálculo do tempo de propagação de um poluente desde um ponto de entrada até um ponto a jusante da captação se o aquífero for homogéneo;

Não é válida para aquíferos cársicos e vulcânicos com cavernas; no caso de aquíferos fracturados só é válida se a densidade de fracturação permitir que seja assumido um carácter poroso do aquífero;

•Método de Krijgsman e Lobo Ferreira

Relação entre as propriedades hidrogeológicas de um aquífero livre e a distância correspondente a um determinado tempo de propagação



- i - gradiente hidráulico (obtido a partir dos níveis freáticos)
- Q - caudal de exploração (m³/d)
- K - condutividade hidráulica(m/d)
- b - espessura do aquífero(m)
- n = porosidade eficaz
- t - tempo de propagação (d)

quanto menor for o gradiente mais a sua forma se aproxima de um círculo; o valor de r_p situa-se entre os valores de r_{max} e r_{min} ; quanto maior for a proporção entre r_{max} e r_{min} , menor será o valor de r_p .

$$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}{Q} \quad x = 2 \cdot K \cdot i \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot b \cdot t}{Q \cdot n}}$$

Distância de proteção a montante

$$r_{m\acute{a}x} = \frac{(0,00002 \cdot x^5 - 0,00009 \cdot x^4 + 0,015 \cdot x^3 + 0,37 \cdot x^2 + x)}{F}$$

Distância de proteção a jusante

$$r_{m\acute{i}n} = \frac{(-0,042 x^3 + 0,37 x^2 - 1,04 x)}{F}$$

Distância de proteção perpendicular à direção de fluxo

$$r_p = 4 \sqrt{\frac{Q}{n \cdot b}}$$

•Método de Krijgsman e Lobo Ferreira – Condições de aplicação

Distância de proteção a montante da captação r_{max} :



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

não devem ser utilizadas combinações de parâmetros que conduzam a um valor de $x > 18$, o que pode suceder quando:

- K muito elevada, como acontece, por exemplo, em aquíferos carsificados; este método não se ajusta a estas situações;
- zonas com gradientes muito elevados, que não devem ser incluídas nos mapas, já que as captações não são normalmente construídas nestas zonas;
- furos cuja zona de ralos tem um grande comprimento;
- caudal de extracção muito pequeno, como acontece nas captações privadas, onde este método não se ajusta.

Distância de proteção a jusante da captação r_{min} :

Neste caso as limitações a ter em conta são as seguintes:

- se $x < -3,5$ deve aplicar-se uma distância mínima de protecção igual a 25 m como medida de segurança, uma vez que se torna muito arriscado aplicar distâncias muito pequenas (< 25 m);
- a equação não deve ser aplicada no caso de valores de $n < 0,1$ (10%).

Distância de proteção na perpendicular à direcção do fluxo r_p :

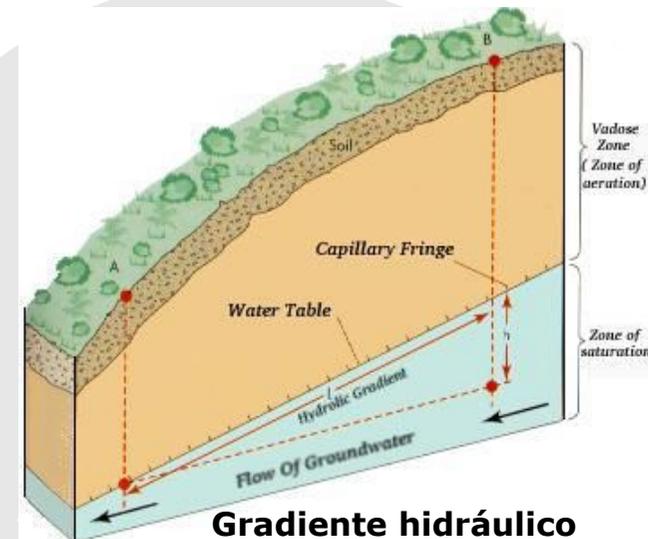
- Se r_{max} for superior a quatro vezes o r_{min} , o erro de cálculo pode ser superior a 15% mas, uma vez que isso conduz apenas a sobreprotecção, não deve ser considerada uma verdadeira limitação, comparada com a incerteza associada aos dados iniciais.

- Método de Kreitler e Senger

Kreitler e Senger (1991, in EPA, 1994) definiram a seguinte equação do tempo de propagação, modificada a partir de Bear e Jacob (1965, in EPA, 1994), que se apresenta em seguida:

$$t_x = \frac{n}{K.i} \left[r_x - \left(\frac{Q}{2.\pi.K.b.i} \right) \ln \left\{ 1 + \left(\frac{2.\pi.K.b.i}{Q} \right) . r_x \right\} \right]$$

- r_x - distância percorrida durante t_x (m)
(positiva se o ponto estiver a montante da captação e negativa se estiver a jusante)
- t_x - tempo de propagação a partir do ponto x até à captação (d)
- b - espessura do aquífero (m),
- i - gradiente hidráulico antes da extracção (adimensional)
- K - condutividade hidráulica (m/d).



Quando o gradiente hidráulico regional apresenta um declive significativo, o cone de rebaixamento é assimétrico, estendendo-se a maiores distâncias a montante da captação do que a jusante.

O cálculo da distância para um determinado tempo de propagação implica cálculos de tentativa e erro com diferentes valores de distâncias, até que seja obtido o tempo de propagação desejado.

Desvantagem: não considera a recarga a partir da superfície, no caso de aquíferos livres, nem drenância vertical, no caso de aquíferos semiconfinados.

Métodos para a delimitação de perímetros de protecção - Métodos numéricos



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

- **Modelo conceptual**

Consiste num conjunto de hipóteses que reduz o problema real e o domínio real a uma versão simplificada, adequada aos objectivos da modelação.

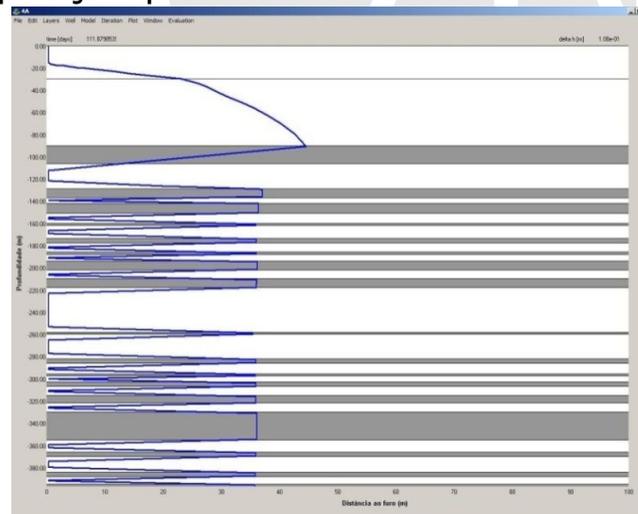
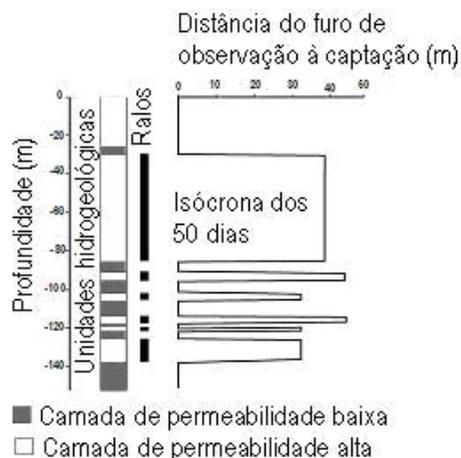
Estas hipóteses dizem respeito a:

- geometria do aquífero;
- tipo de material que constitui o aquífero (com referência à sua homogeneidade e isotropia);
- tipo de escoamento (bi ou tridimensional);
- variação média das variáveis de estado;
- fontes e sumidouros no interior e nas fronteiras do sistema
- condições de fronteira no domínio, exprimindo as relações do sistema com o exterior

Métodos para a delimitação de perímetros de protecção - Métodos numéricos: exemplo de aplicação

- **Exemplo:** modelo *Wellflow* diferenças finitas (Feseker e Lobo-Ferreira, 2000)

Delimitação dos perímetros de protecção em aquíferos multicamada. Permite calcular o tempo de propagação para pontos de entrada das partículas, a diferentes profundidades, sendo possível examinar o efeito protector dos estratos menos permeáveis localizados acima do aquífero. A captação é definida através do seu raio, do caudal de extracção e da posição dos ralos. As unidades hidrogeológicas na captação (dados litológicos) são introduzidas como estratos horizontais homogéneos, com uma espessura constante ao longo da área modelada. A cada estrato é atribuído um valor de piezometria, que funciona como condição de fronteira (piezometria constante) no limite exterior do modelo; o fluxo entre estratos resultante das diferenças de piezometria é tido em conta no processo de iteração. A recarga resultante da precipitação pode ser definida no estrato superior.



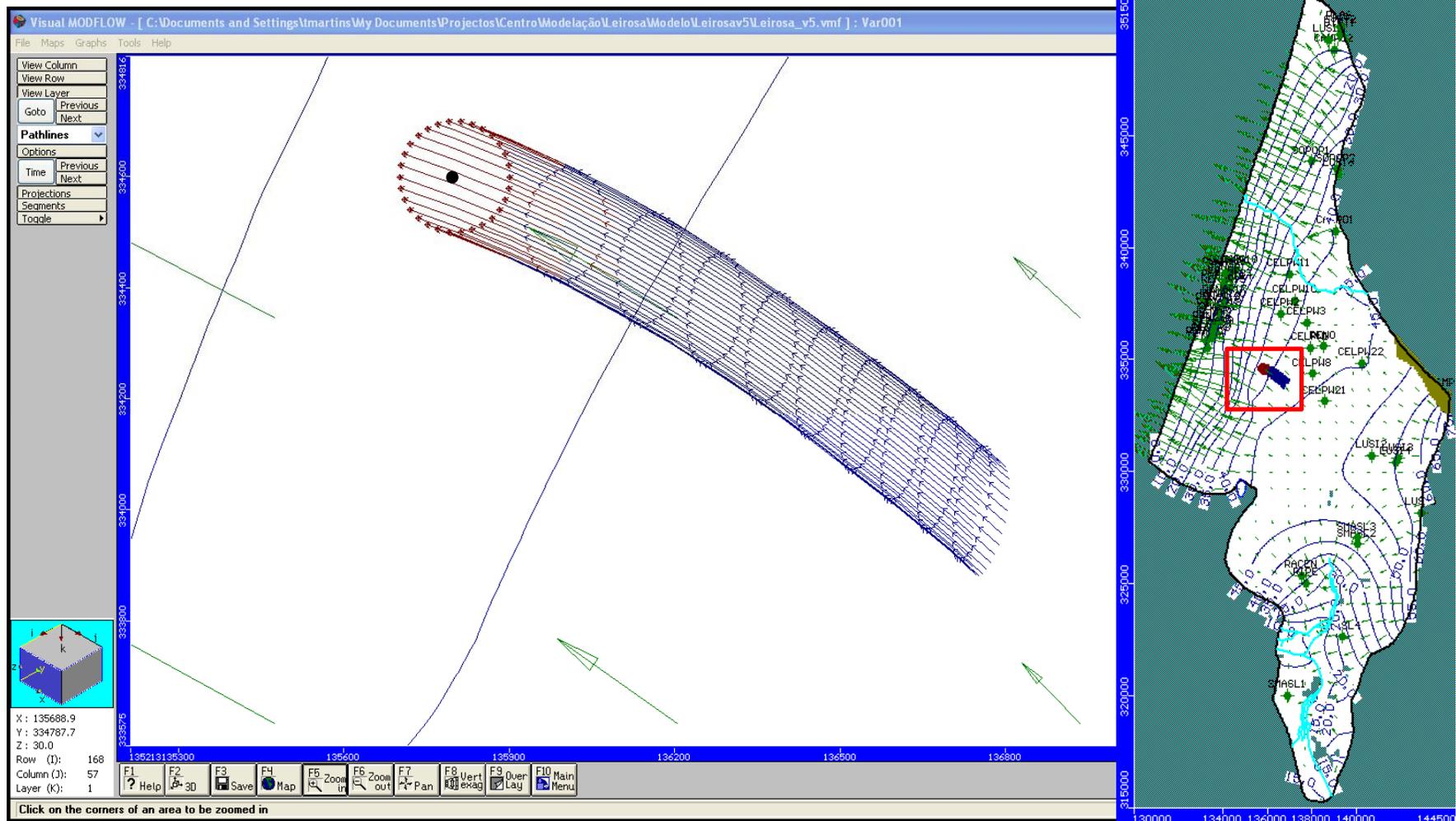
Isócrona de 50 dias obtida com o modelo *Wellflow*, furo 4A(AC1)

Métodos para a delimitação de perímetros de protecção - Métodos numéricos: exemplo de aplicação



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

Programa Visual MODFLOW 2010.1 de elementos finitos

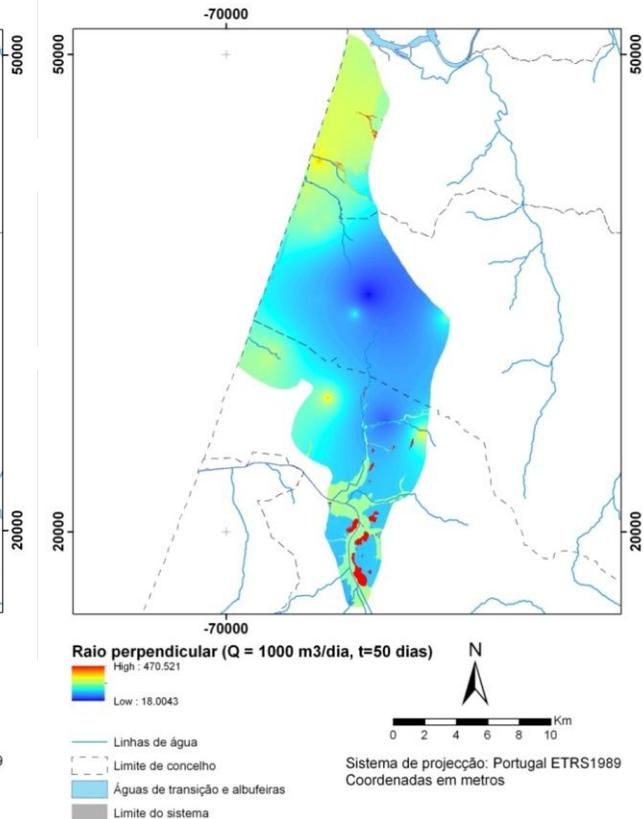
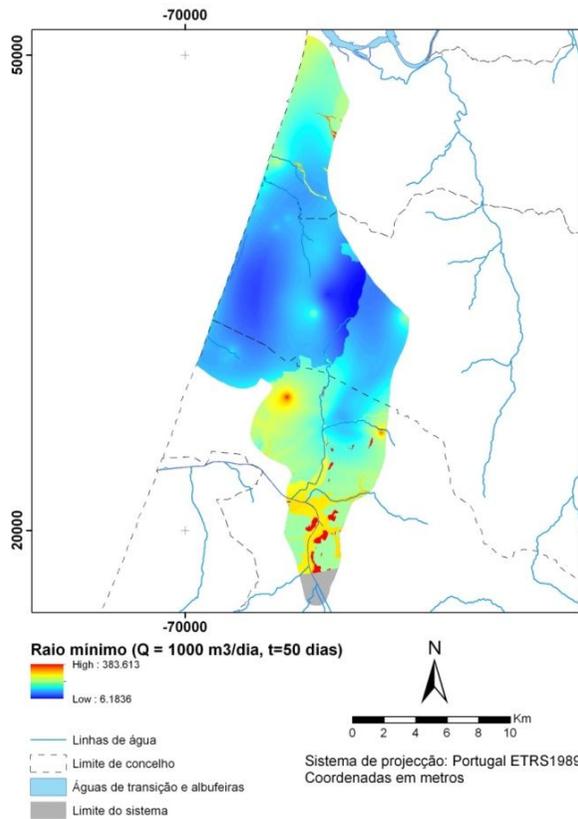
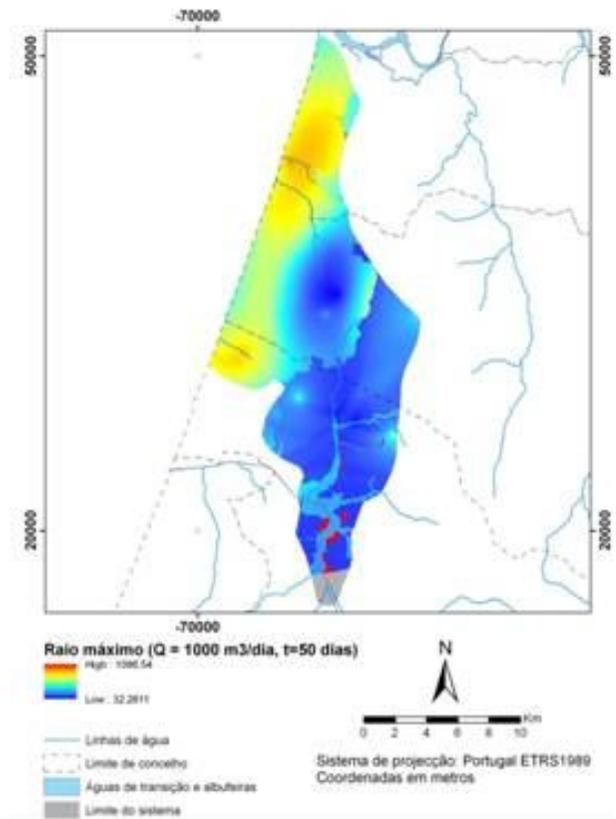


Perímetro de protecção de 3500 dias obtido com o modelo MODFLOW, furo hipotético

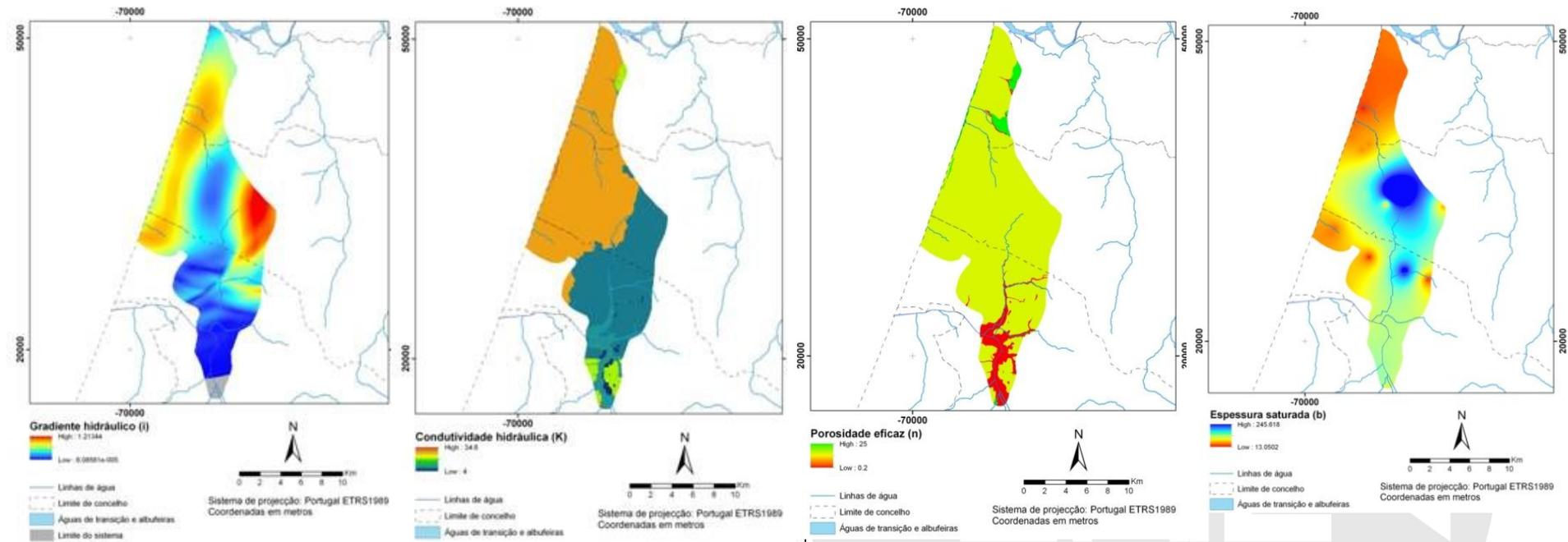
Métodos para a delimitação de perímetros de protecção - Métodos analíticos: exemplo de aplicação

Método de Krijgsman e Lobo Ferreira - permite o mapeamento em SIG das zonas de protecção

Raio de protecção máximo, mínimo e perpendicular (m) para a zona intermédia ($t = 50$ dias) e caudal de $1000 \text{ m}^3/\text{dia}$



Aplicação em SIG da metodologia Krijgsman e Lobo Ferreira: dados necessários



Gradiente hidráulico (i) e
Condutividade hidráulica (K)

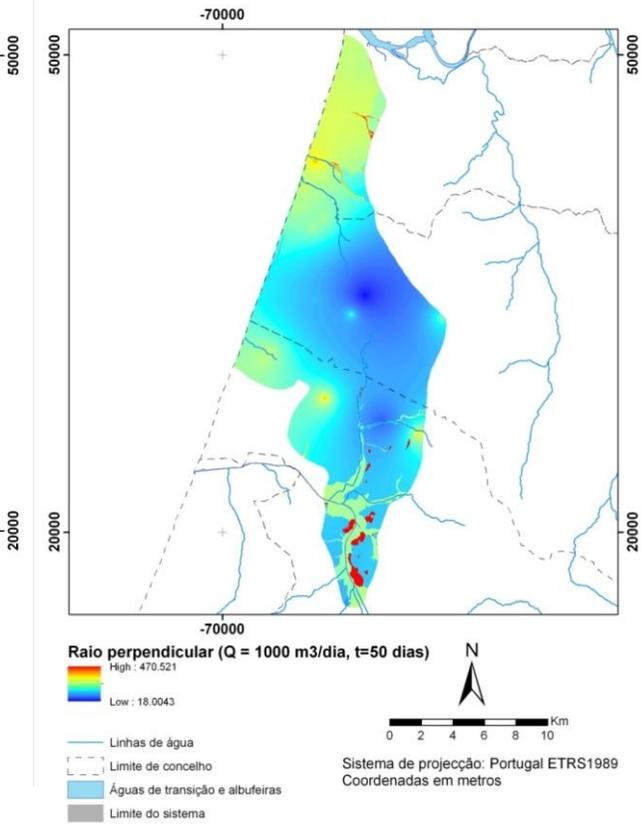
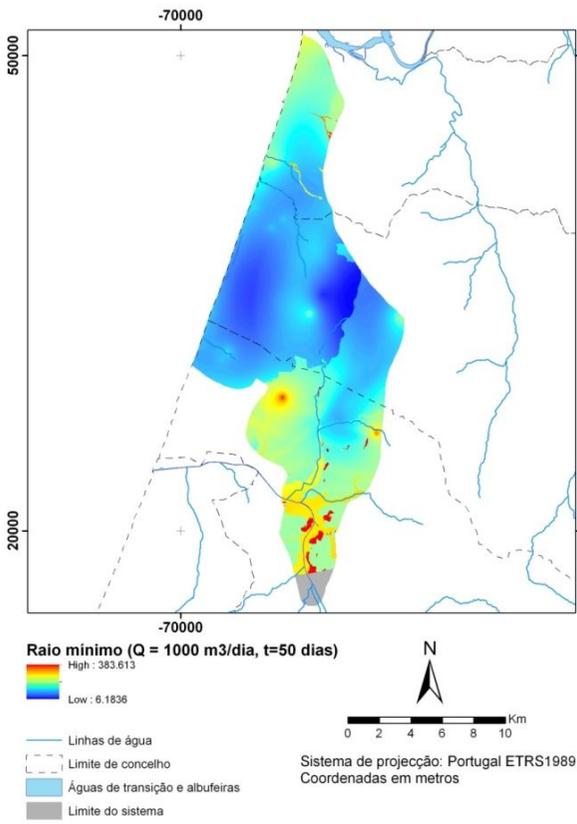
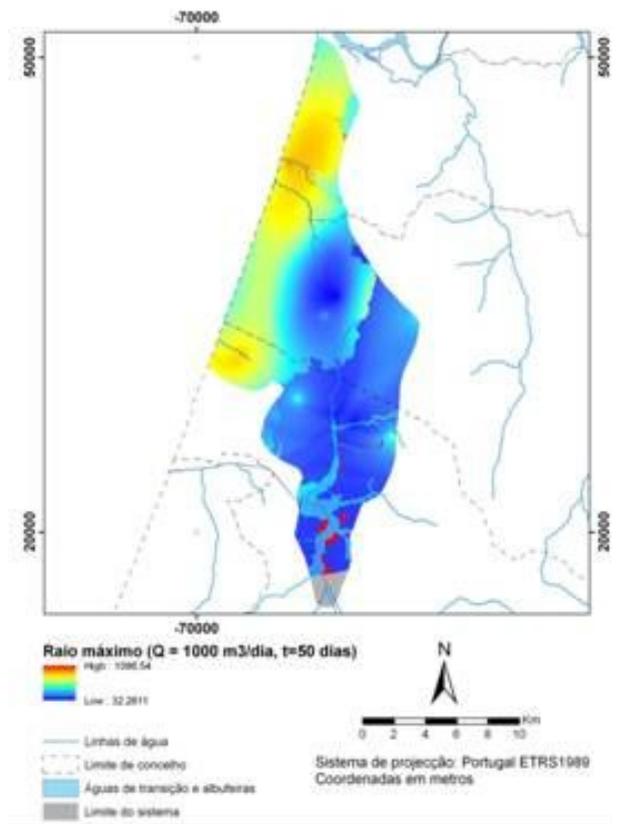
$i = \text{MDT} - \text{Profundidade ao nível freático} = \text{Superfície freática} \longrightarrow \text{SLOPE}$

Porosidade eficaz (n) e
espessura saturada (b)

$b = \text{Profundidade da base do aquífero} - \text{Profundidade do nível freático}$

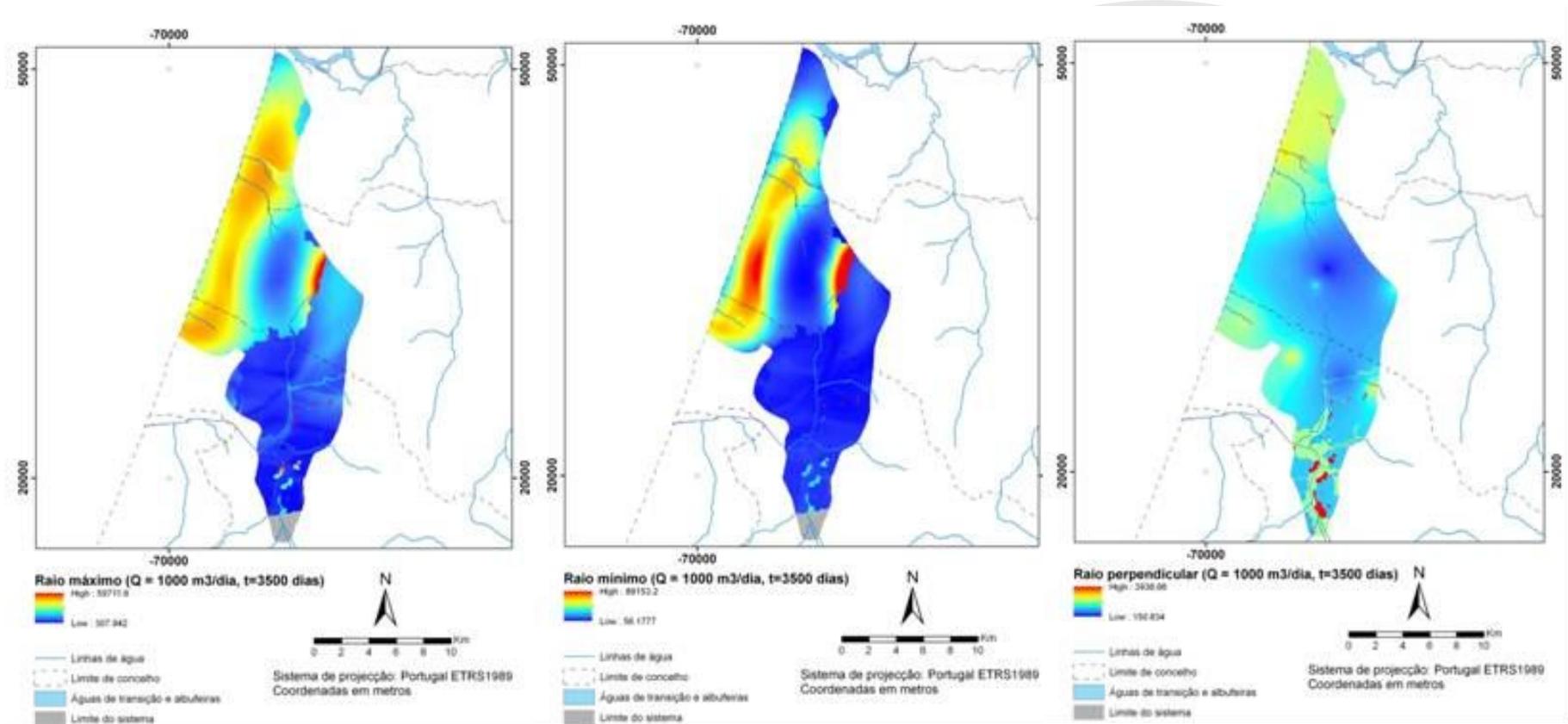
Aplicação em SIG da metodologia Krijgsman e Lobo Ferreira: resultados

Raio de protecção máximo, mínimo e perpendicular (m) para a zona intermédia (t = 50 dias) e caudal de 1000 m³/dia



Aplicação em SIG da metodologia Krijgsman e Lobo Ferreira: resultados

Raio de protecção máximo, mínimo e perpendicular (m) para a zona alargada ($t = 3500$ dias) e $Q = 1000$ m³/dia

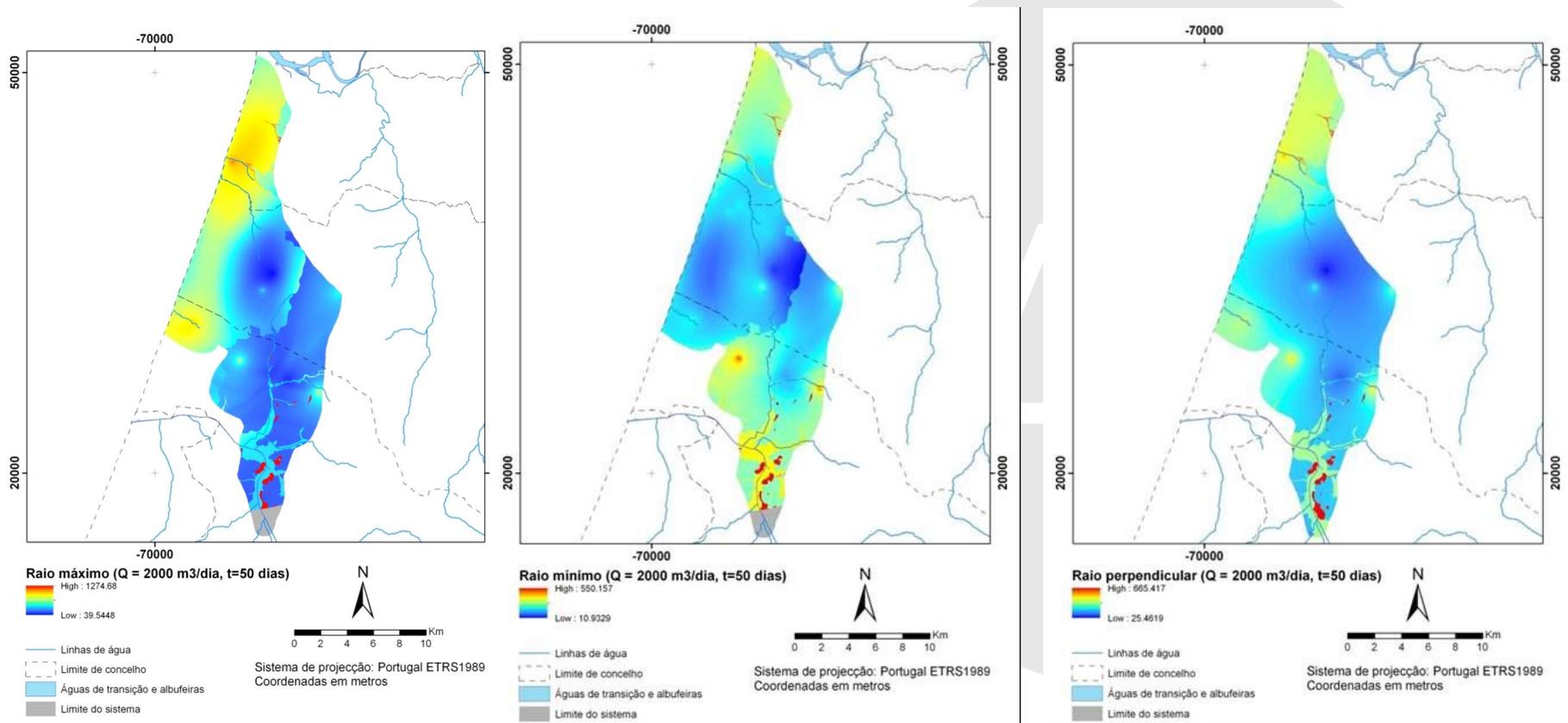


As distâncias de protecção tendem a aumentar com o aumento do caudal de exploração. A única excepção verifica-se na relação entre o raio mínimo para o período de 3500 dias.

Quanto maior a espessura saturada, menor é a distância de protecção

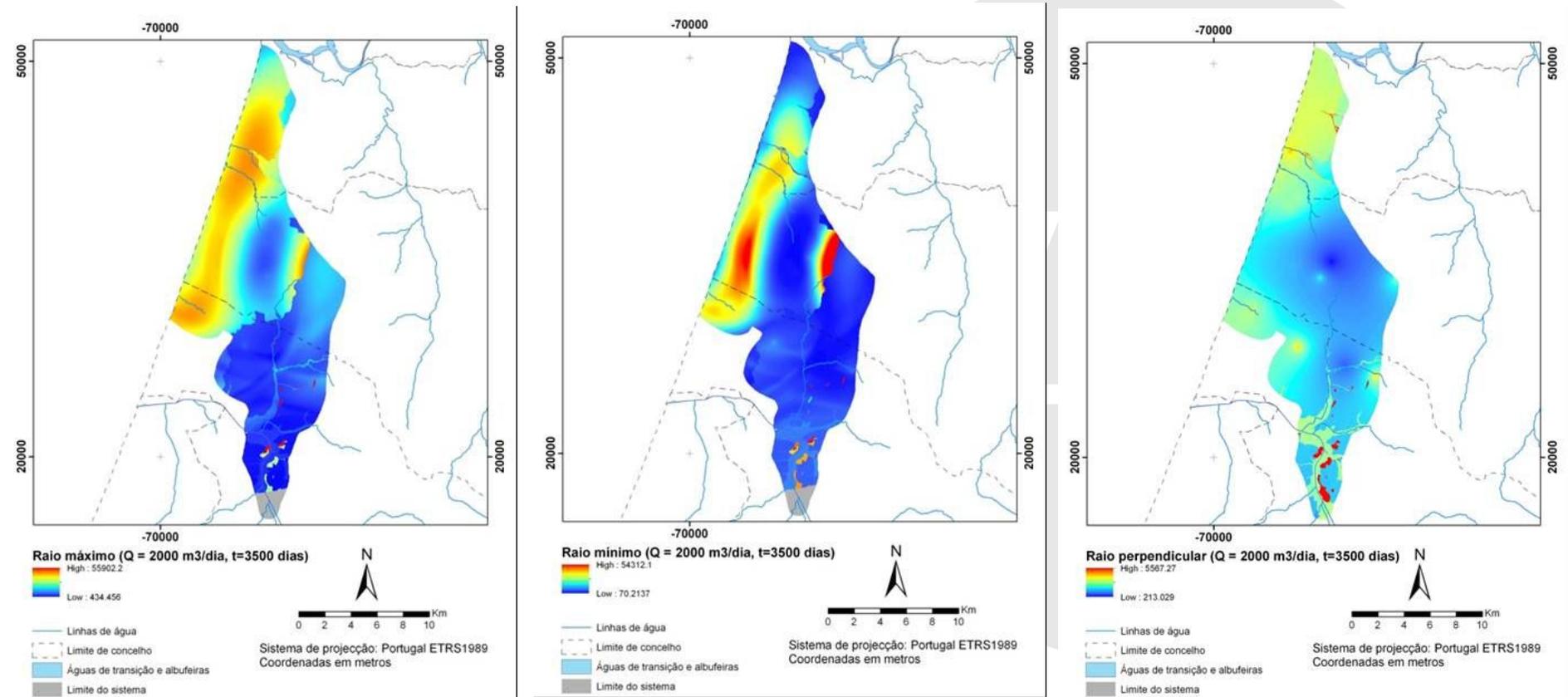
Aplicação em SIG da metodologia Krijgsman e Lobo Ferreira: resultados

Raio de protecção máximo, mínimo e perpendicular (m)
para a zona intermédia (t= 50 dias) e Q = 2000 m³/dia



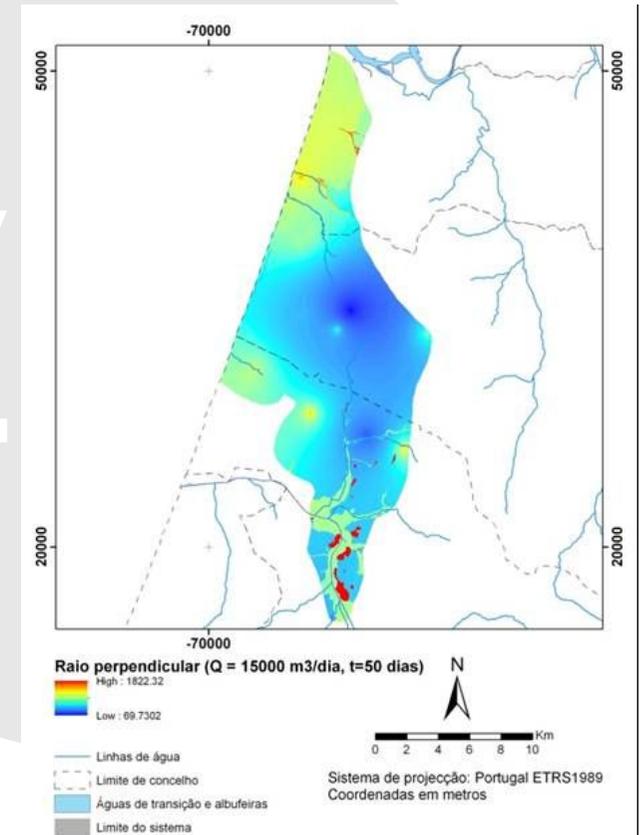
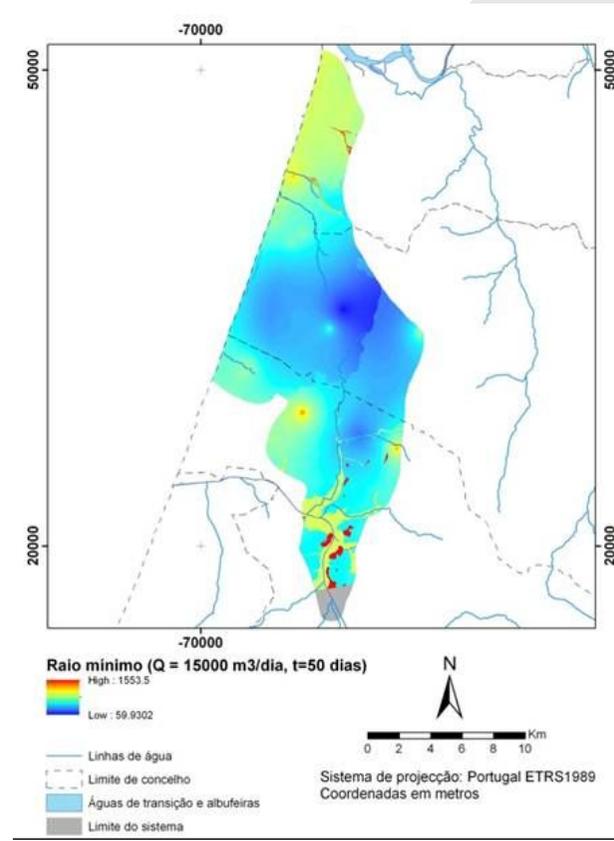
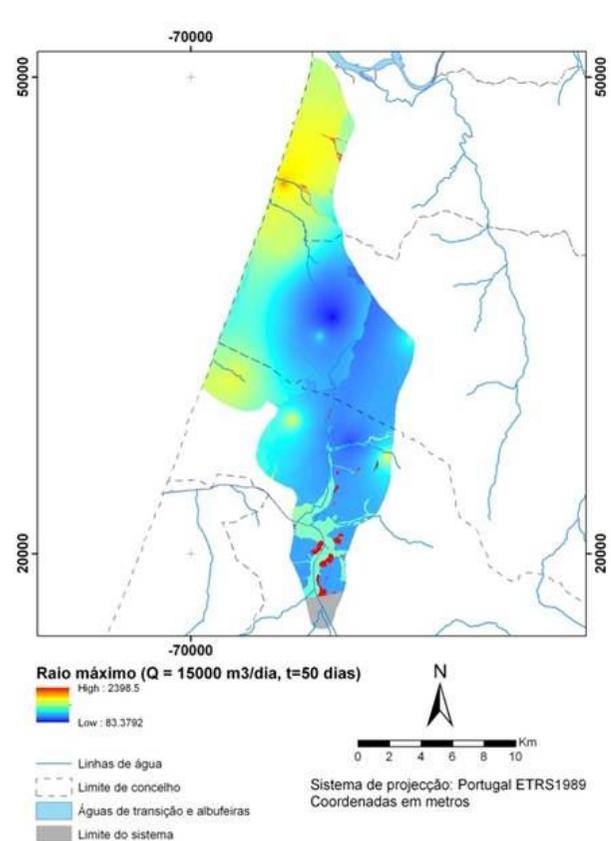
Aplicação em SIG da metodologia Krijgsman e Lobo Ferreira: resultados

Raio de protecção máximo, mínimo e perpendicular (m) para a zona alargada ($t=3500$ dias) e $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{dia}$



Aplicação em SIG da metodologia Krijgsman e Lobo Ferreira: resultados

Raio de protecção máximo, mínimo e perpendicular (m) para a zona intermédia
($t=50$ d) e $Q = 15000$ m³/dia



Mais informação em:

www.marsol.eu / www.eip-water.eu/MAR_Solutions



EIP Water Online Market Place
Matchmaking for water innovation

Contact | Register | Login
Subscribe to monthly Newsletter

Home > Working Groups > MAR Solutions - Managed Aquifer Recharge Strategies ...

ABOUT | EVENTS | WATER INNOVATION NEWS | ACTION GROUPS | FUNDING | MY MARKET PLACE

Profile | Members | Documents | News

MAR Solutions - Managed Aquifer Recharge Strategies and Actions (AG128)

Managed Aquifer Recharge technique, or simply MAR, has become, perhaps, the best technique within the Integrated Water Resources Management (IWRM) framework, to palliate Climate Change adverse effects. As some impacts are increasing rapidly in scale and intensity, permanent "technological solutions" are required as a "water innovation in action" line. It is worth mentioning that FP7 INNO-DEMO MARSOL project, that started Dec. 1st 2013, is supporting this AG making available 8 demo sites to show the suitability of MAR techniques.

M.A.R. TO MAR-k€t

RECENT NEWS OF THIS GROUP

7th October 2015
Presentations from the International Joint Workshop "Advantages of using Numerical Modeling in Water Resources Management and Managed Aquifer Recharge Schemes"

6th July 2015
Algarve Water Quality Workshop a great success

19th May 2015
MARSolutions participates in workshop on cooperation between Innovation partnerships

MARSOL
Managed Aquifer Recharge Solutions

Home
News
The Project
Partners
Demo Sites
Publications
Links
Contact
Internal
Imprint

Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought

MARSOL

An Environment 2013 Cooperation Project funded by the European Commission

How can the increasingly scarce resource called water be exploited and used intelligently? The joint project MARSOL is aiming to demonstrate that Managed Aquifer Recharge techniques are able to secure 'excess' water and store it in the soil. The EU is funding the MARSOL project with 5.2 million Euros over 3 years under the WATER-INNO-DEMO scheme.

It is estimated that due to climatic changes only about 50 percent of today's amount of water will be available in the Mediterranean region by 2100 – while the population continues to grow. The lack of water will result in drought and crop losses.

The project consortium will demonstrate that Managed Aquifer Recharge is a viable approach to address the predicted water shortages over the long term. The basic idea is simple: Collect water when there is too much of it and store it for dry times in aquifers. This subsurface storage works even under deserts. Managed Aquifer Recharge can also be utilised to combat sea water intrusion in coastal areas and to give pre-treated waste water a final clean-up.

MARSOL deals with some of the overriding questions concerning the method such as risks.

MARSOL
Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought
An EU FP7 Project

Coordination & Contact:
Prof. Dr. Christoph Schüth
Darmstadt Technical University
Institute of Applied Geosciences
Schmittspahnstr. 9
64287 Darmstadt
Germany

EUROPEAN COMMISSION | CORDEX | f | in

EIP Water Online Market Place
Matchmaking for water innovation



Video tutorial de introdução de dados base em ferramentas de modelação

Modelos_leirosa_estarreja - Modelos_I

SILUSBA 25 anos

14.ª SILUSBA

Praia 2019 16 a 20 de setembro



Obrigado pela vossa atenção !