

# CARACTERIZAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO MARINHA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO CENTRO

Tiago MARTINS

*Geólogo, LNEC, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, [tmartins@lnec.pt](mailto:tmartins@lnec.pt)*

Maria J. HENRIQUES

*Geóloga, LNEC, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, [mjhenriques@lnec.pt](mailto:mjhenriques@lnec.pt)*

João Paulo LOBO FERREIRA

*Eng.º Civil, LNEC, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, [lferreira@lnec.pt](mailto:lferreira@lnec.pt)*

## RESUMO

O presente artigo tem como principal objectivo apresentar a caracterização da vulnerabilidade à intrusão marinha dos sistemas aquíferos da Região Hidrográfica do Centro através da aplicação do método GALDIT, proposto por CHACHADI e LOBO FERREIRA (2001). Este método incorpora vários factores caracterizadores do sistema em estudo, nomeadamente o tipo e espessura do aquífero, a condutividade hidráulica do meio, o nível piezométrico, a distância à linha de costa e estado actual da intrusão marinha. Esta aplicação foi possível através da análise de diversos tipos de informação, como dados de piezometria (quantidade), qualidade e *logs* de sondagens, provenientes de diversas bases de dados como as redes de monitorização da ARH do Centro, INVENTAR do LNEC ou Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos.

O método GALDIT foi aplicado aos sistemas aquíferos que estão sob a influência dos efeitos de maré, permitindo avaliar a faixa litoral potencialmente sujeita a intrusão marinha em função de uma eventual subida do nível do mar de 0,25 m, 0,50 m e 1 m. Da análise efectuada constatou-se que as zonas potencialmente afectadas pela intrusão marinha são as estreitas faixas costeiras cuja extensão tende a aumentar com a subida do nível do mar face a cenários futuros, e em particular no interior do limite do sistema do Quaternário de Aveiro, que estabelece relações de grande afinidade com a Ria de Aveiro, e consequentemente com os efeitos das marés, o que se considera como potencial factor de avanço da cunha salina.

**Palavras-chave:** Vulnerabilidade, Intrusão marinha, GALDIT, Região Centro.

## 1 – INTRODUÇÃO

Neste estudo apresenta-se a caracterização da vulnerabilidade à intrusão marinha nos sistemas aquíferos litorais sob a jurisdição da ARH do Centro e tem por objectivo criar uma base de conhecimentos, que constituam uma ferramenta de suporte científico ao licenciamento de captações de águas subterrâneas e à gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

A determinação do índice GALDIT de vulnerabilidade à intrusão marinha permite caracterizar o risco associado à entrada de água do mar no sistema aquífero, seja devido a cenários associados a alterações climáticas e à progressiva subida do nível do mar, seja por sobreexploração dos sistemas aquíferos. Assim, da análise do estado actual e dos cenários propostos face à subida no nível médio do mar, é possível prever impactes resultantes da utilização não controlada dos recursos hídricos subterrâneos, definir estratégias de protecção, implementar redes de monitorização, evitando assim a sua degradação em termos quantitativos e qualitativos.

## 2 – ÁREA DE ESTUDO

A análise da vulnerabilidade à intrusão marinha concentra-se nos aquíferos costeiros ou com fortes afinidades com o oceano como o Quaternário de Aveiro, Aluviões do Mondego, Figueira da Foz – Gesteira, Leirosa – Monte Real e Vieira de Leiria – Marinha Grande – Figura 1.

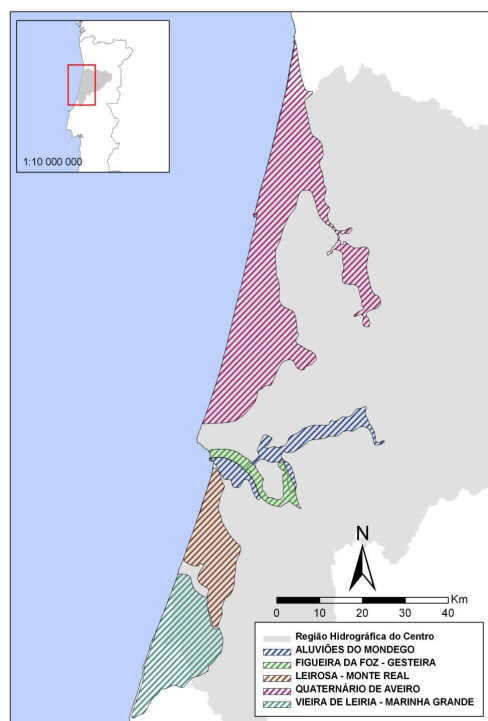


Figura 1 - Área de estudo

### 3 – METODOLOGIA

O método GALDIT foi desenvolvido por Chachadi e Lobo Ferreira (2001) e resulta do acrónimo inglês (**G**roundwater occurrence (aquifer type; unconfined, confined and leaky confined); **A**quifer hydraulic conductivity; **D**epth to groundwater **L**evel above the sea; **D**istance from the shore (distance inland perpendicular from shoreline); **I**mpact of existing status of sea water intrusion in the area; and **T**hickness of the aquifer, which is being mapped). A caracterização espacial de cada um destes factores, e a sua combinação conjunta permite obter um índice ponderado que representa a vulnerabilidade dos sistemas aquíferos à intrusão marinha.

O índice GALDIT é calculado, através da seguinte equação (Chachadi e Lobo Ferreira, 2007):

$$\text{Índice GALDIT} = (1 \times G + 3 \times A + 4 \times L + 4 \times D + 1 \times I + 2 \times T) / 15 \quad (\text{Eq. 1})$$

A metodologia consiste na atribuição de valores com base na parametrização das características hidrogeológicas locais (Figura 2). Os valores dos parâmetros variam entre 2,5 e 10 (Quadro 1) que correspondem, respectivamente, a uma vulnerabilidade à intrusão marinha baixa e elevada. A cada parâmetro é atribuído um peso (coeficiente de ponderação) que varia entre 1 e 4 (Eq. 1) de acordo com a menor ou maior influência na vulnerabilidade.

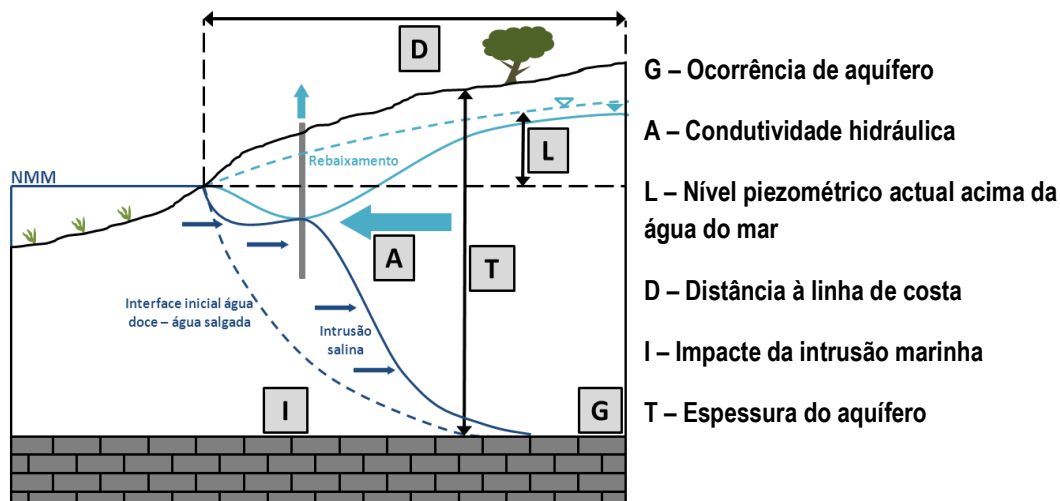


Figura 2 - Parâmetros incorporados no método GALDIT

Quadro 1 Parâmetros GALDIT, Índices de vulnerabilidade e pesos atribuídos por parâmetro

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

<b>Parâmetro L - Classes “nível piezométrico acima do nível do mar”; Peso (4)</b>	<b>Intervalo (m)</b>	<b>Valor do índice</b>
Elevada	< 1	10
Média	1 – 1,5	7,5
Baixa	1,5 – 2	5
Muito Baixa	> 2	2,5
<b>Parâmetro D - Classes “distância à linha de costa”; Peso (4)</b>	<b>Intervalo (m)</b>	<b>Valor do índice</b>
Muito Perto	< 500	10
Perto	500 – 750	7,5
Meia distância	750 – 1000	5
Longe	> 1000	2,5
<b>Parâmetro I - Classes “impacte do estado actual da intrusão marinha na região”; Peso (1)</b>	<b>Razão Cl-/[HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>] na água doce</b>	<b>Valor do índice</b>
Alta	> 2	10
Média	1,5 – 2	7,5
Baixa	1 – 1,5	5
Muito baixa	< 1	2,5
<b>Parâmetro T - Classes “espessura do aquífero”; Peso (2)</b>	<b>Intervalo (m)</b>	<b>Valor do índice</b>
Grande	> 10	10
Média	7,5 – 10	7,5
Pequena	5 – 7,5	5
Muito pequena	< 5	2,5

Ocorrência de Aquíferos (G) – refere-se ao tipo de aquífero, que pode ser confinado, livre, semi-confinado ou limitado por uma ou mais fronteiras. Os autores referem que a ocorrência de intrusão marinha depende do tipo de aquífero. Assim, em condições naturais, os aquíferos livres são mais susceptíveis à intrusão marinha do que os aquíferos confinados, uma vez que estes possuem a protecção de uma carga hidráulica superior à pressão atmosférica. Contudo, quando há exploração, o aquífero confinado torna-se de todos o mais vulnerável, devido à formação de um maior cone de rebaixamento e descarga instantânea de água para as captações durante a bombagem. Os aquíferos semi-confinados são menos susceptíveis uma vez que não só possuem uma carga hidráulica superior à que existiria num aquífero livre, como também podem manter ao longo do tempo pelo menos uma parte dessa carga através da drenância a partir dos aquíferos circundantes. Os aquíferos separados do mar por uma barreira impermeável encontram-se mais protegidos da intrusão marinha, sendo os menos vulneráveis a este fenómeno (Novo (2007) e Chachadi e Lobo Ferreira, 2007).

Condutividade hidráulica (A) – este parâmetro é utilizado para medir a velocidade de fluxo de água no aquífero, para o mar. A condutividade hidráulica de um aquífero define-se como a sua capacidade em transmitir água e depende da porosidade eficaz e da fracturação em rochas consolidadas. A condutividade hidráulica influencia a dimensão da intrusão marinha ou seja, quanto mais elevado for o seu valor maior será o avanço da cunha marinha. A intrusão marinha tende a ser maior não só nos períodos de estio, quando a recarga é menor, como também em regiões sujeitas à sobreexploração, já que o rebaixamento do nível de água doce promove o avanço da água do mar para o continente (Novo, 2007).

Nível piezométrico (acima do nível do mar) (L) – refere-se ao nível de água subterrânea medido em relação ao nível do mar. É um parâmetro bastante importante, uma vez que permite determinar a carga hidráulica que faz recuar o avanço da cunha salina. Neste parâmetro deve ser considerada apenas a variação temporal de longo período dos níveis de água.

Distância à linha de costa (D) – o impacto da intrusão marinha geralmente diminui com o aumento da distância na perpendicular à linha de costa, apresentando valores máximos junto da linha litoral.

Impacte do estado actual da intrusão marinha na região (I) – reflecte o desequilíbrio que pode existir entre a água do mar e a água doce, por alteração do equilíbrio hidráulico em condições naturais, como resultado da actividade antropogénica já existente na zona. Chachadi e Lobo Ferreira (2001) recomendam a utilização da razão  $Cl^- / [HCO_3^- + CO_3^{2-}]$  como um dos possíveis critérios de avaliação da intrusão marinha em aquíferos costeiros. Na ausência de dados hidroquímicos pode usar-se informação recolhida no campo ou dos próprios utilizadores da água. As concentrações devem encontrar-se em miliequivalentes por litro.

Espessura do aquífero (T) – a espessura do aquífero e a espessura saturada do aquífero confinado desempenha um papel importante no controlo da intrusão marinha. Quanto maior for a espessura do aquífero maior a extensão da intrusão.

As classes de vulnerabilidade GALDIT, que se encontram descritas no Quadro 2, são definidas em função do índice calculado utilizando a Eq. 1 (Chachadi e Lobo Ferreira, 2007).

Quadro 2 Classes de vulnerabilidade dos aquíferos à intrusão marinha

Classes de vulnerabilidade	Índice GALDIT
Vulnerabilidade elevada	$\geq 7,5$
Vulnerabilidade moderada	5 – 7,5
Vulnerabilidade baixa	$\leq 5$

## 4 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA GALDIT AOS SISTEMAS AQUÍFEROS COSTEIROS DA REGIÃO CENTRO

Para a definição do parâmetro G foram atribuídos os valores apresentados no Quadro 3 atendendo ao tipo e às características hidrogeológicas dos sistemas em estudo. Note-se que no caso do sistema aquífero da Figueira da Foz – Gesteira, pela sua disposição geográfica optou-se por delimitar a área de estudo ao sector a Norte do rio Mondego, que se encontra em contacto com o litoral.

Quadro 3 Índices G atribuídos aos sistemas aquíferos estudados

Sistema	Descrição	Índice G
Quaternário de Aveiro	Areias de duna, areias de praia e litologias recentes	7.5
	Litologias cretácias, jurássicas e triássicas	5
Aluviões do Mondego	Formações de grande heterogeneidade litológica e variações de fácies importantes	5
Figueira da Foz - Gesteira	Formações cretácias e jurássicas	5
	Formações quaternárias e aluvionares	7.5
Leirosa - Monte Real	Formações plioquaternárias	7.5
Vieira de Leira - Marinha Grande	Miocénico e os Arenitos do Cretácico com expressão importante	5

Os valores de condutividade hidráulica utilizados para a avaliação do parâmetro A, foram determinados de forma expedita a partir do ábaco proposto por Freeze e Cherry (1979) e tendo por base a cartografia geológica do Instituto Geológico e Mineiro à escala 1:50 000 e, no caso dos Aluviões do Mondego, a cartografia geológica proposta por Almeida *et al.* (2000). Apresentam-se no Quadro 4 os valores atribuídos ao parâmetro A de acordo com as características das formações aflorantes e por sistema aquífero.

Quadro 4 Índice A atribuído aos sistemas aquíferos estudados

<b>Quaternário de Aveiro</b>	<b>A</b>	<b>Figueira da Foz - Gesteira</b>	<b>A</b>
Arenitos de Eiról (T)	2.5	Calcários margosos e margas (J1_g)	2.5
Camadas de Coimbra (J1_cd)	2.5	Calcários, margas e calcários margosos (J2_ab)	2.5
Margas e calcários margosos de Vale das Fontes (J1_ef)	2.5	Caloviano (J2_c)	2.5
Calcários e calcários margosos (J1_f)	2.5	Camadas de Abadia (J3_c)	2.5
Arenitos de Carrascal (C1-2)	2.5	Portlandiano e Kimeridgiano (J4-5)	2.5
Gres de Palhaça (C1-2)	2.5	Cenomaniano inferior, Albiano, Aptiano e Neocomiano (C1-2)	2.5
Arenitos de Requeixo (C2)	2.5	Turoniano incluindo as camadas com Pterocera incerta (C2-3)	2.5
Depósitos argilo-gresosos (C2)	2.5	Arenitos finos de Lousões (C4)	2.5
Calcários de Tentúgal (C2-3)	2.5	Arenitos e argilas de Taveiro (C5)	2.5
Grés de Furadouro (C3)	2.5	Depósitos de terraços de 75-100m (Q1)	7.5
Grés de Oia (C3-4)	2.5	Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais de 30-45m (Q3)	7.5
Grés de Furadouro (C3_F)	2.5	Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais de 10-20m (Q4)	7.5
Argilas de Vagos (C5)	2.5	Areias de praia (A)	7.5
Argilas de Viso (C5)	2.5	Aluvião (a)	2.5
Arenitos de Viso (C5*)	2.5	<b>Vieira de Leiria - Marinha Grande</b>	<b>A</b>
Conglomerado de Mira (C5*)	2.5	Andesitos (alfa)	5
Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais (Areias de Cordinhã) (P)	5	Doleritos e rochas afins (delta)	5
Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais (Areias de Cantanhede) (Q2)	7.5	Teschenito (theta)	2.5
Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais de 60-70m (Q2_a)	7.5	Margas de Dagorda: Calcários dolomíticos (J1*_ab)	2.5
Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais de 45-50m (Q2_b)	7.5	Margas de Dagorda: margas e calcários de Dagorda (J1_ab)	2.5
Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais de 30-40m (Q3)	7.5	Sinemuriano (J1_c)	2.5
Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais de 30-40m (seixos e cascalheiras roladas) (Q3*)	7.5	Lotaringiano (J1_d)	2.5
Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais de 15-20 m (Q4_a)	7.5	Toarciano (J1_g)	2.5
Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais de 15-20m (Q4_a)	7.5	Camadas de Cabagos e de Montejunto (J3_ab)	2.5
Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais de 5-8m (Q4_b)	7.5	Cenomaniano inferior, Albiano, Aptiano e Neocomiano (C1-2)	2.5
Formação areno-pelítica de cobertura (Qp)	7.5	Turoniano incluindo as camadas com Neolobites vibrayeanus (C3)	2.5
Areias eólicas (s.l.) - Areias de Gandara (s.l.) (A)	7.5	Oligocénico (phi)	2.5
Areias de duna (Ad)	7.5	Miocénico e Paleogénico indiferenciado (phi-M)	2.5
Areias hidro-eólicas - Areias de Gandara (s.l.) (Ae)	7.5	Miocénico (M)	5
Areias de praia (Ap)	7.5	Formações marinhas de Monte Real: Série continental de Marrazes e de Barracão (P)	5
Cordão dunar de praia (da)	7.5	Plio-Plistocénico indiferenciado (PQ)	5
Dunas com orientação W-E (db)	7.5	Plistocénico indiferenciado (Q)	7.5
Dunas parabólicas (dc)	7.5	Areias de praia (A)	7.5
Dunas parabólicas - Areias de Gandara (s.l.) (dc)	7.5	Dunas, areias de dunas e de praia (d)	7.5
Dunas com orientação NW-SE (dd)	7.5	Aluviões e depósitos de fundo de vale (a)	2.5
Eluviões carbonatados (Ec)	7.5	<b>Leirosa - Monte Real</b>	<b>A</b>
Aluviões (a)	2.5	Doleritos e rochas afins (delta)	5
<b>Aluviões do Mondego</b>	<b>A</b>	Margas de Dagorda: Calcários dolomíticos (J1*_ab)	2.5
Grés de Silves e Margas da Dagorda (T-J1)	2.5	Margas de Dagorda (J1_ab)	2.5
Depósitos de terraços (Q)	7.5	Cenomaniano inferior, Albiano, Aptiano e Neocomiano (C1-2)	2.5
Areias de duna e areias de praia (Q)	7.5	Formação argilo-gresosa e conglomerática de Senhora do Bom Sucesso (phi-M)	2.5
Aluviões (a)	5	Miocénico e Paleogénico indiferenciado (phi-M)	2.5
		Miocénico continental (M)	5
		Formações marinhas de Monte Real: Série continental de Marrazes e de Barracão (P)	5
		Plio-Plistocénico indiferenciado (P-Q)	5
		Cascalheiras de antigas praias (Q)	7.5
		Plistocénico indiferenciado (Q)	7.5
		Depósitos de terraços de 25-40m (Q3)	7.5
		Areias de praia (A)	7.5
		Areias de duna (Ad)	7.5
		Dunas, areias de dunas e de praia (d)	7.5
		Aluviões (a)	2.5

Para a determinação da altura da água acima do nível do mar (nível piezométrico) utilizaram-se os dados de piezometria registados na base de dados INVENTAR do NAS/DHA/LNEC e no SNIRH. Exceptua-se o caso do sistema aquífero do Quaternário de Aveiro em que, devido aos poucos dados existentes em relação à área total do sistema e à fraca correlação entre eles, foi calculado um valor de piezometria médio e subtraído ao modelo digital do terreno.

No sentido de caracterizar a variação da vulnerabilidade à intrusão marinha face a uma eventual subida do nível do mar na área de influência da maré na zona costeira devido a alterações climáticas recalculou-se o nível piezométrico desde a situação de referência, considerando uma subida de 0,25 m, 0,50 m e 1 m.

O parâmetro D foi calculado através da delimitação de um buffer de 500, 750 e 1000 metros em relação à costa para a maioria dos sistemas. No entanto, para a determinação deste parâmetro foram tidos em conta vários factores para além da distância à costa.

Dado que a influência da maré é muito elevada na Ria de Aveiro, foi necessário adoptar critérios de definição do parâmetro D que reflectam esse comportamento da maré oceânica no seu interior como contributo para o possível avanço da cunha salina. Assim, foram analisados dados relativos à amplitude de maré registados no porto de Aveiro (Intitulo Hidrográfico), e determinou-se como valor máximo de subida da maré 4 m. A este valor foi acrescido 1 metro, que representa o efeito da subida do nível do mar. A partir do modelo digital do terreno foi desenhada a linha de cota correspondente aos 5 m de altitude, e determinou-se que dentro desta área (dos 0 aos 5 m) se teria em consideração o efeito do prisma de maré, delimitando-se para além dos buffers relativos à distância de 500, 750 e 1000 m do NMM, buffers com o mesmo espaçamento em torno do plano correspondente à Ria de Aveiro. Num processo semelhante foi tida em conta a influência da entrada de água a partir do oceano como factor potencial de salinização no estuário do Mondego para os sistemas aquíferos dos Aluviões do Mondego e de Figueira da Foz – Gesteira e da entrada no rio Lis, no sistema de Vieira de Leira – Marinha Grande.

Para a determinação do parâmetro I foram usados os dados de qualidade, também disponibilizados pela ARH do Centro, no sentido de calcular e representar espacialmente a relação entre as concentrações dos iões cloreto (Cl-) e bicarbonato (HCO<sub>3</sub>-) em miliequivalentes. Para tal foi calculada uma superfície de tendência através de métodos estatísticos a partir da qual se atribuíram os índices de vulnerabilidade. Note-se que nesta análise não foram considerados os valores de carbonato pois Domenico e Schwartz (1997) mostram que entre o pH 7 e pH 9 o bicarbonato é a espécie mais abundante, apresentando o carbonato concentrações muito baixas. Todas as amostras utilizadas no cálculo possuem pH inferior a 9.

Após a análise de logs de sondagens de pontos de água subterrânea extrapolaram-se superfícies da base dos aquíferos estudados atendendo às suas características geológicas e às profundidades alcançadas. A interpretação destes dados permitiu concluir que todos os sistemas apresentam uma espessura superior a 10 m, atribuindo-se conseqüentemente para todas as áreas estudadas um índice de vulnerabilidade do parâmetro T igual a 10 (espessura elevada).

## 4.1 Quaternário de Aveiro

Embora a escala a que se apresentam os resultados da vulnerabilidade à intrusão marinha não permita observar instantaneamente variações na vulnerabilidade com a subida do nível do mar, estas podem ocorrer se observarmos em pormenor algumas das áreas circundantes da Ria (focando a sub-área de estudo referida). É possível verificar um progressivo aumento para o continente, ainda que suave, da vulnerabilidade elevada e da moderada à medida que se faz variar o parâmetro L – Figura 3.

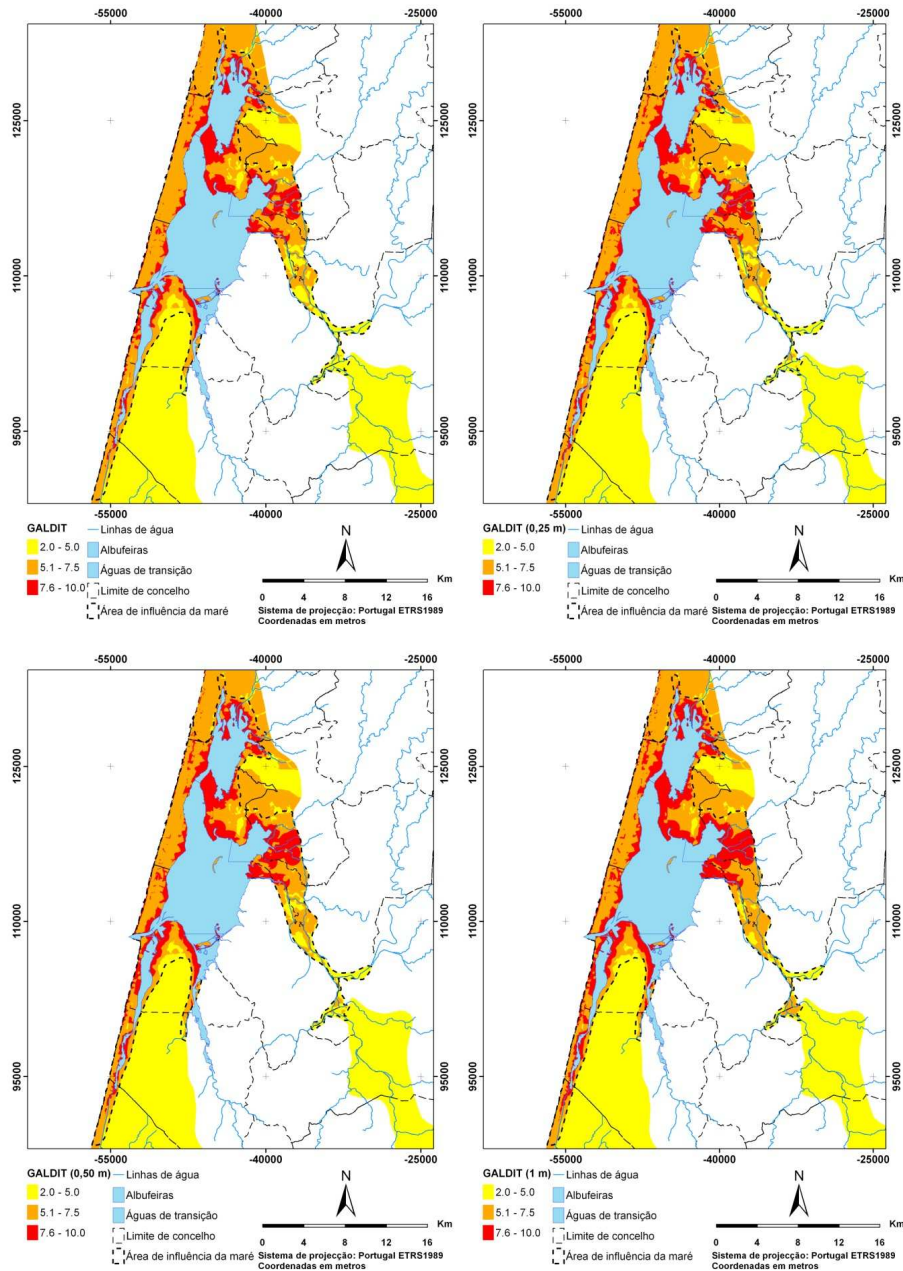


Figura 3 Índice GALDIT de vulnerabilidade à intrusão marinha das águas subterrâneas do sistema aquífero do Quaternário de Aveiro para os cenários actual, 0,25 m, 0,50 m e 1 m



## 4.2 Aluviões do Mondego

A observação da Figura 4, que corresponde respectivamente à situação actual de vulnerabilidade à intrusão marinha, à subida do nível do mar de 0,25 m, 0,50 m e 1 m, permite observar, o aumento significativo da vulnerabilidade elevada para o interior do estuário, ao longo do rio, para Leste da garganta de Lares. Como seria de esperar, a vulnerabilidade nas áreas mais interiores do sistema em relação ao litoral possuem vulnerabilidade ao avanço da cunha salina baixa.

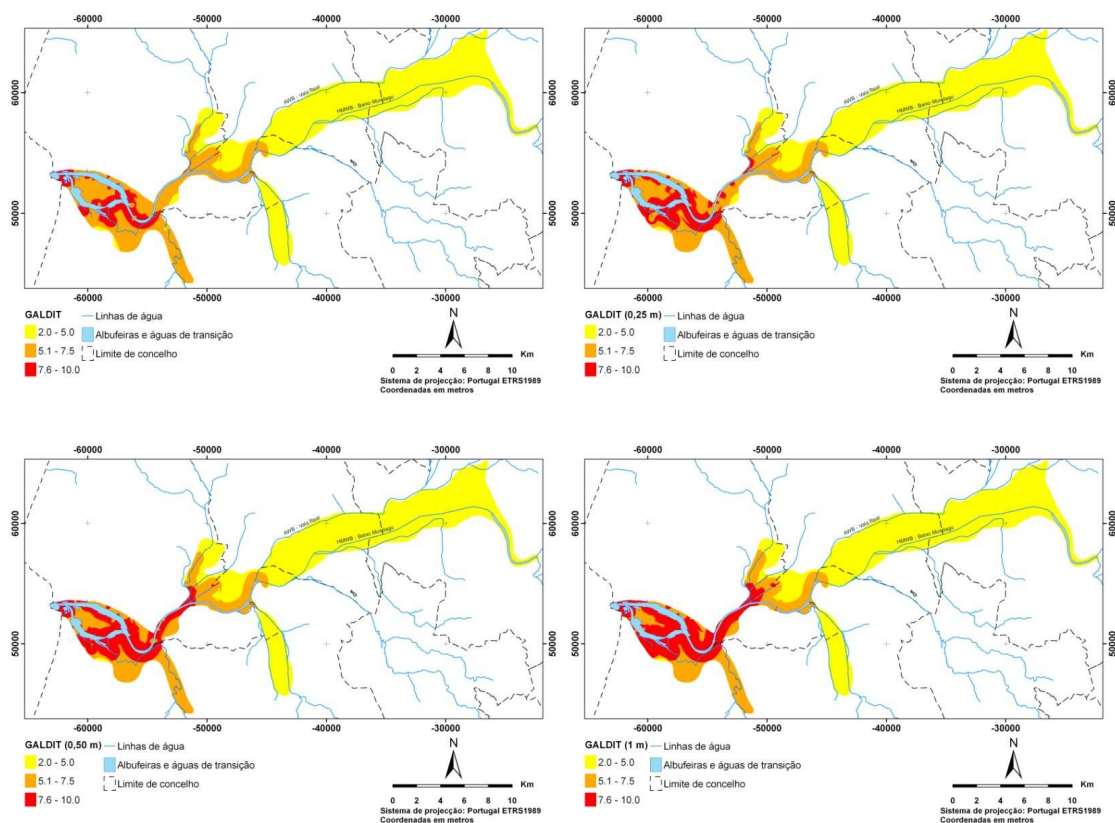


Figura 4 Índice GALDIT de vulnerabilidade à intrusão marinha das águas subterrâneas do sistema aquífero dos Aluviões do Mondego para o cenário actual, 0,25 m, 0,50 m e 1 m

## 4.3 Figueira da Foz – Gesteira

Definiu-se para este sistema que a área a estudar, no que toca à vulnerabilidade à intrusão marinha, seria o sector NW, que se possui um segmento costeiro. Assim, verificou-se para a situação uma estreita faixa de vulnerabilidade elevada, essencialmente perpendicular ao mar, que se estende ligeiramente para o interior, resultado do incremento do nível médio do mar em três fases (0,25, 0,50 e 1 m). Verificou-se um acréscimo da área correspondente à vulnerabilidade moderada, nos três cenários – Figura 5.

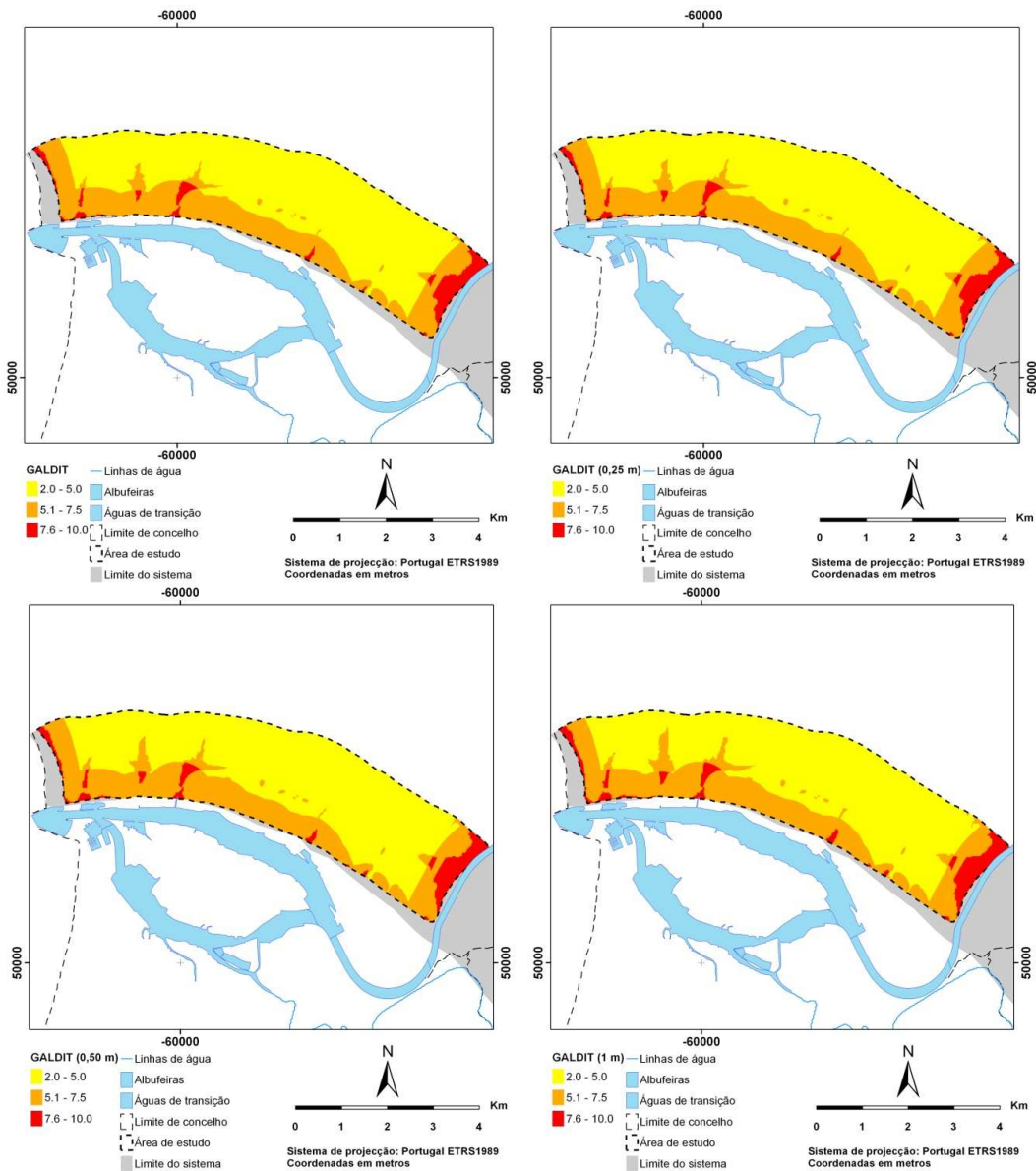


Figura 5 Índice GALDIT de vulnerabilidade à intrusão marinha das águas subterrâneas do sistema aquífero de Figueira da Foz – Gesteira para o cenário actual, 0,25 m, 0,50 m e 1 m

#### 4.4 Leirosa – Monte Real

À semelhança do que foi registado no sistema aquífero do Quaternário de Aveiro, a variação do parâmetro correspondente ao nível piezométrico (L) com a subida do nível do mar manifesta-se por um relativo aumento das zonas de máxima vulnerabilidade do litoral para o interior. Não se registam no entanto o aumento das áreas de vulnerabilidade intermédia. Na

Figura 6 mostram-se respectivamente o cenário actual da vulnerabilidade à intrusão marinha, o cenário de subida 0,25 m, o cenário de 0,50 m e finalmente o cenário de 1 m.

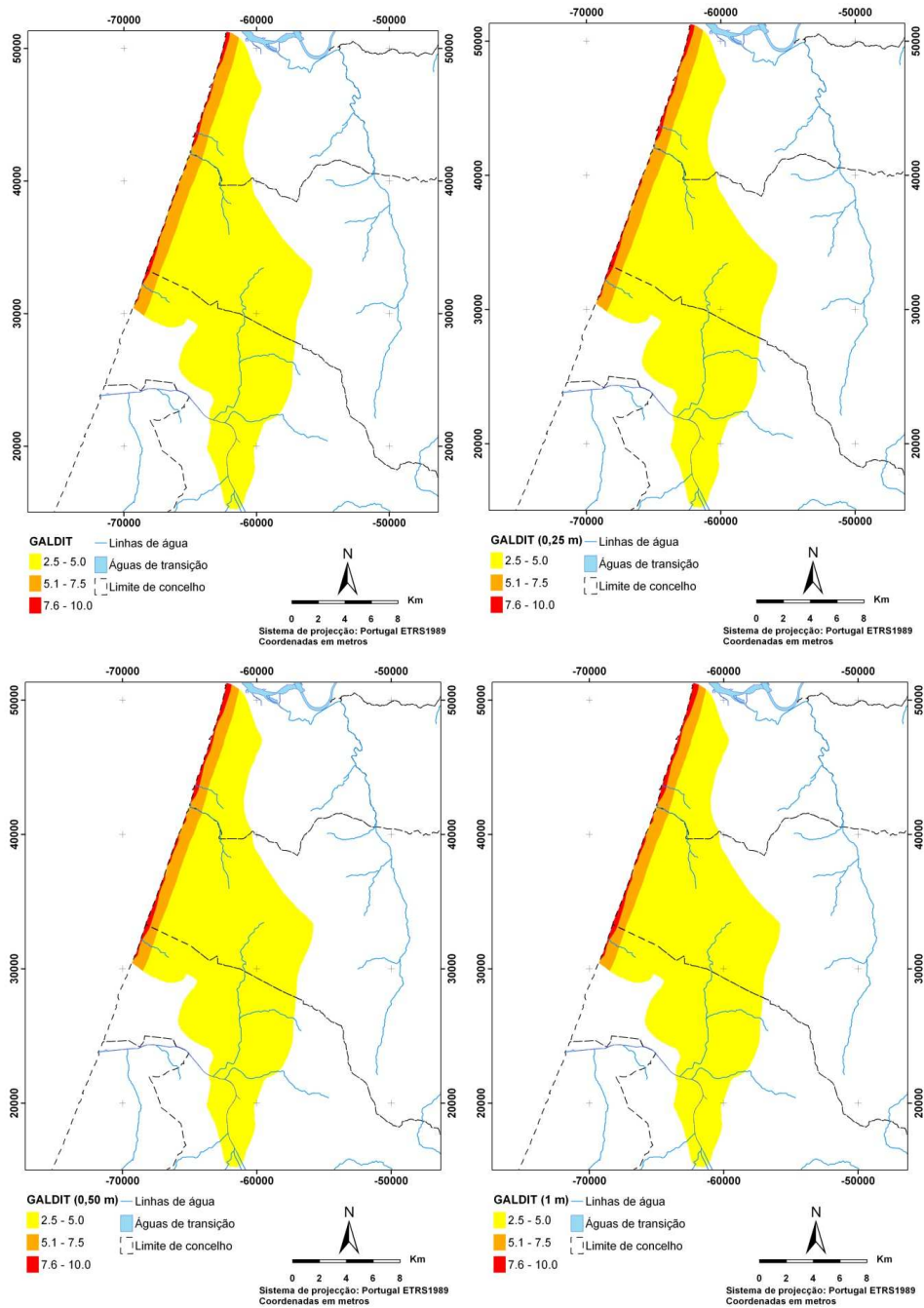


Figura 6 Índice GALDIT de vulnerabilidade à intrusão marinha das águas subterrâneas do sistema aquífero de Leirosa – Monte Real para o cenário actual, 0,25 m, 0,50 m e 1 m

#### 4.5 Vieira de Leiria – Marinha Grande

No caso do sistema aquífero de Vieira de Leira – Marinha Grande, os resultados são muito semelhantes aos do sistema de Leirosa – Monte Real. Assim, tem-se uma faixa que acompanha o litoral em que se registam valores vulnerabilidade máxima à intrusão marinha, e que aumenta para o interior com o incremento do nível do mar. A variação de espessura desta faixa para o interior regista-se essencialmente na área Norte do sistema, e pode ser observada na

Figura 7 (estado actual, cenário de subida do nível do mar em 0,25 m, subida de 0,50 m e subida de 1 m).

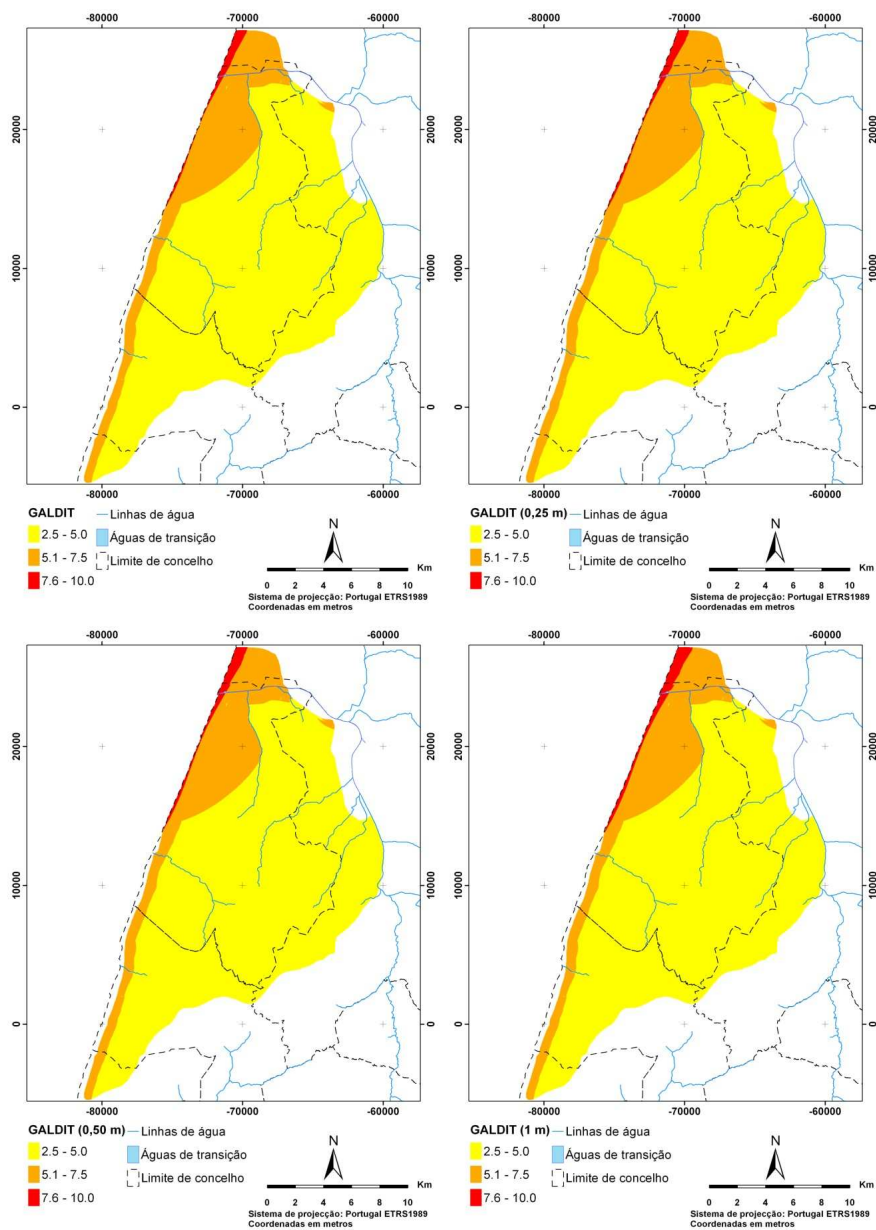


Figura 7 Índice GALDIT de vulnerabilidade à intrusão marinha das águas subterrâneas do sistema aquífero de Vieira de Leiria – Marinha Grande para os cenários actual, 0,25 m, 0,50 m e 1 m

## 5 – CONCLUSÕES

O Quadro 5 sintetiza os resultados obtidos com base na aplicação da metodologia GALDIT, para a situação actual e para os três cenários propostos face à subida no nível da água do mar (0,25 m, 0,50 m e 1 m).

Quadro 5 Síntese das classes de vulnerabilidade à intrusão marinha (aplicação do métodoGALDIT)

Sistema aquífero	Cenário	Área analisada (Km2)	Índice GALDIT					
			Baixa	%	Moderada	%	Elevada	%
			(≤ 5)		(5 - 7.5)		(≥ 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
Aluviões do Mondego (O6)	Situação actual	148.12	93.94	63.42	41.09	27.74	13.09	8.84
	Subida de 0,25 m		93.22	62.94	36.25	24.47	18.66	12.60
	Subida de 0,50 m		92.31	62.32	31.42	21.21	24.39	16.47
	Subida de 1 m		91.38	61.70	27.34	18.46	29.39	19.84
Figueira da Foz - Gesteira (O7)	Situação actual	19.46	12.76	65.56	5.57	28.61	1.14	5.84
	Subida de 0,25 m		12.71	65.29	5.56	28.56	1.20	6.15
	Subida de 0,50 m		12.64	64.96	5.56	28.56	1.26	6.47
	Subida de 1 m		12.48	64.14	5.59	28.73	1.39	7.13
Leirosa - Monte Real (O10)	Situação actual	217.86	195.72	89.84	19.64	9.01	2.49	1.14
	Subida de 0,25 m		195.72	89.84	19.21	8.82	2.92	1.34
	Subida de 0,50 m		195.72	89.84	18.34	8.42	3.79	1.74
	Subida de 1 m		195.72	89.84	17.91	8.22	4.22	1.94
Vieira de Leiria - Marinha Grande (O12)	Situação actual	320.38	258.47	80.68	58.78	18.35	3.13	0.98
	Subida de 0,25 m		258.47	80.68	58.28	18.19	3.64	1.13
	Subida de 0,50 m		258.47	80.68	57.80	18.04	4.11	1.28
	Subida de 1 m		258.47	80.68	56.77	17.72	5.15	1.61

A análise da tabela permite-nos concluir que o sistema aquífero que se encontra mais exposto ao avanço da cunha salina é o dos Aluviões do Mondego. Neste caso, a percentagem da área correspondente a vulnerabilidade elevada, varia entre os 9%, na situação actual, para os 20% num cenário de subida de um metro do nível médio do mar. Isto resulta essencialmente da influência da maré dentro do estuário, que se considerou até aproximadamente Montemor-o-Novo.

Conclui-se ainda que o sistema aquífero do Quaternário de Aveiro apresenta igualmente elevada vulnerabilidade à intrusão marinha. Neste caso, a percentagem da área correspondente a vulnerabilidade elevada, varia entre os 10%, no estado actual e os 13,5% no cenário de subida de um metro do nível do mar. Este facto está directamente associado à influência da maré na Ria de Aveiro, concentrando-se essas áreas de maior vulnerabilidade em redor desta massa de água.

A Figueira da Foz – Gesteira, apresenta-se como um sistema igualmente vulnerável ao avanço da cunha salina, com a variação de 6% a 7% de área de elevada vulnerabilidade, para o sector estudado, a NW do rio Mondego, que se considerou sofrer influência da entrada da maré oceânica no estuário deste rio.

Nos restantes sistemas as áreas de vulnerabilidade elevada não ultrapassam os 2% da área total do sistema, sendo em geral sistemas de vulnerabilidade baixa na quase totalidade da sua

extensão, à excepção de estreitas faixas em geral paralelas à linha de costa. Nos cenários de subida do nível do mar, regista-se em todos os sistemas o suave aumento das áreas de vulnerabilidade elevada, que ganham área às zonas de vulnerabilidade intermédia.

O facto de predominarem áreas de vulnerabilidade baixa em todos os sistemas estudados implica que este método é sobretudo aplicável às zonas que fazem fronteira com o mar ou corpos de água que sofrem influência deste, definindo nas zonas próximas da fronteira se são de maior ou menor vulnerabilidade à intrusão marinha. A extensão desta zona próxima da fronteira pode ser definida como 3000 m, tendo em conta que a classe de menor vulnerabilidade do parâmetro D corresponde à distância superior a 1000 m. No caso das zonas interiores do aquífero, que neste caso se assumiria de distância superior a 3000 m da fronteira, a sua exploração não teria consequências a nível de intrusão marinha.

Deve notar-se que a determinação dos índices de vulnerabilidade GALDIT foi dificultada por dois factores distintos: a escassez de dados de piezometria e a escassez de dados de qualidade (Cloratos e Bicarbonatos). No primeiro caso a fraca correlação espacial e temporal dos dados de piezometria inviabilizaram nalguns sistemas a criação de superfícies piezométricas válidas, pelo que foram usados métodos expeditos no sentido de colmatar esta lacuna, procurando validá-los através dos dados existentes (tanto registos piezométricos como bibliográficos).

No segundo caso, relativo aos dados de qualidade, verificou-se que a rede de monitorização não cobre apenas pequenas áreas dos sistemas estudados, sendo por vezes difícil proceder-se à análise da relação  $[Cl^-/HCO_3^-]$  devido essencialmente à escassez de dados. Mais uma vez, uma análise cuidadosa destes parâmetros requer análises qualitativas contemporâneas dos sistemas, no sentido de se conhecer a progressão da cunha salina e definir zona de contacto entre água doce e água do mar. Outro problema associado com a relação  $[Cl^- / HCO_3^-]$  prende-se com o facto de em algumas áreas ser conhecida actividade diapírica. Este facto pode resultar em valores de cloratos elevados nas águas dessas áreas de actividade tectono-diapírica, resultantes da dissolução destes elementos. Por isso podem-se observar concentrações elevadas de cloratos que não estão obrigatoriamente associados ao fenómeno do avanço da cunha marinha, mas sim à salinidade natural das rochas.

## **BIBLIOGRAFIA**

ALMEIDA C., MENDONÇA, J.J.L., JESUS, M.R., GOMES, A.J. – *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*, Centro de Geologia da Faculdade de Ciências de Lisboa e Instituto da Água, 2000.

NOVO, M.E. – *Alterações climáticas e seus impactos nos recursos hídricos subterrâneos em ilhas de pequena dimensão (caso de estudo: Açores – Ilha Terceira)*. Universidade dos Açores, Doutoramento em Engenharia do Ambiente, 2007.

CHACHADI, A.G; LOBO FERREIRA, J.P. – *Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method*. *COASTIN* – a coastal policy research newsletter, n.º4, 2001, pp. 7-9.

CHACHADI, A.G; LOBO FERREIRA, J.P. – *Sea water intrusion vulnerability using GALDIT method: Part 2 – GALDIT indicators description. In Lobo Ferreira, J.P; Vieira, J. (eds) – Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability*, IAHS Red Books, London, IAHS Publication 310, 2007, pp. 172-180.

DOMENICO, P.A., SCHWARTZ, F. W. – *Physical and Chemical Hidrogeology*, Second edition, Wiley & Sons, Inc., EUA, 1997.

FREEZE, R.A. e CHERRY, J.A. – *Groundwater*. Prentice-Hall, EUA, 1979.