

IMPACTO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS EM ECOSISTEMAS COSTEIROS DEPENDENTES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Caso de estudo: Melides

Maria Emília NOVO

Geóloga, Dr. Engenharia do Ambiente, Investigadora auxiliar, Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa,
enovo@lnec.pt

Manuel M. OLIVEIRA

Geólogo, Dr. Hidrogeologia, Investigador auxiliar, Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa
moliveira@lnec.pt

Luís G. S. OLIVEIRA

Engenheiro do ambiente, Bolseiro de projecto, Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa,
loliveira@lnec.pt

Tiago MARTINS

Geólogo, Bolseiro de projecto Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa,
tmartins@lnec.pt

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se uma análise da evolução expectável das recargas e escoamento superficial na bacia de Melides sob condições de alterações climáticas, para o horizonte temporal de 2100 e para os cenários de emissões IS92a, SRES A2 e SRES B2. Com base nos resultados da alteração do escoamento superficial directo e da recarga natural do aquífero foi analisada a evolução provável em termos de volume e dimensão alagada da lagoa de Melides, e potenciais impactos dessa alteração admitindo que a carga poluente que atingirá a lagoa por via superficial, para pelo menos a fonte poluente dos arrozais, se manterá similar à actual no que diz respeito a nitratos e fosfatos. Os resultados mostraram que ocorrerá uma redução tanto do escoamento superficial como da recarga em todos os três cenários considerados, sendo o cenário de emissões SRES A2 o mais adverso, com reduções de escoamento superficial da ordem dos 43%, e da recarga da ordem dos 60%. Numa análise simplificada, e considerando apenas a variação do escoamento superficial, tais reduções poderão reflectir-se numa redução do volume médio da lagoa dos actuais 1,5 hm³ para valores de 0,86 hm³. Sendo a lagoa um ecossistema parcialmente dependente de águas subterrâneas, as quais actualmente contribuem com cerca de 27 a 30% do volume total da lagoa, a redução da recarga terá efeitos na dimensão da lagoa, tanto em área como em volume, extensão dos períodos de alimentação subterrânea à lagoa, e de um modo geral na inter-relação águas subterrâneas/lagoa/ribeira de Melides.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças que as alterações climáticas poderão impor sobre o funcionamento e resiliência dos recursos hídricos e dos ecossistemas, em particular os ecossistemas costeiros dependentes de águas subterrâneas (ECDAS) constituem um desafio à gestão dos recursos hídricos num enquadramento de escassez. Com efeito, se as alterações climáticas, de acordo com os vários modelos climáticos, indiciam para a região mediterrânica um clima futuro mais árido e de chuvas mais concentradas em períodos muito curtos do ano, para Portugal o estudo SIAM (Santos e Miranda, 2006) os modelos considerados indiciam uma maior seca nas regiões do sul, a qual pode ser expressa por condições médias de precipitação anual iguais ou mesmo inferiores aos actuais anos secos e muito secos (Oliveira et al., 2012; Oliveira et al., 2013). Estas alterações

nos regimes de precipitação, temperatura, humidade relativa, entre outras têm efeitos ao nível do escoamento superficial e consequentes regimes de caudal dos cursos de água, e ao nível da recarga dos aquíferos e consequente volume de reservas hídricas. No caso específico dos ecossistemas dependentes (parcial ou integralmente) de águas subterrâneas (EDAS) esta alteração dos volumes de água que entram nos aquíferos pode ter impactos muito significativos, como por exemplo o fim da alimentação destes ecossistemas por águas subterrâneas – durante períodos mais prolongados ao longo dum ano ou até mesmo cessação completa deste abastecimento – como consequência do abaixamento dos níveis freáticos. Dois exemplos deste aspecto podem ser encontrados nos trabalhos de Lobo Ferreira et al. (2012a) para a área de Monforte-Alter do Chão e Lobo Ferreira et al. (2012b) para a área de Torres Vedras.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A lagoa de Melides situa-se na freguesia de Melides, concelho de Grândola, no litoral alentejano, pertencendo à área hidrográfica das bacias da Costa Alentejana, sendo um sistema lagunar desenvolvido na zona vestibular da ribeira de Melides, da qual recebe todas as águas advindas do escoamento superficial de toda a bacia hidrográfica, assim como águas de descarga do aquífero superficial subjacente desenvolvido nos depósitos terciários e quaternários do sistema aquífero de Sines. Esta lagoa tem aberturas ocasionais ao mar, que são normalmente episódios pouco frequentes ao longo do ano e também de curta duração, estando dependentes da agitação do oceano, marés, ocorrência de tempestades e regime pluviométrico. Nos anos em que a agitação marítima é pouco favorável à ruptura do cordão de areia que separa a lagoa do oceano e em que a quantidade de precipitação não promove um enchimento significativo da lagoa – condições adversas à abertura ao mar – a lagoa é normalmente aberta por acção antrópica, com o fim de renovar as suas águas, permitir a circulação de peixes, em especial as populações juvenis, e favorecer alguma limpeza das águas que entretanto foram acumulando poluentes (nitratos, fosfatos, etc.) e que chegaram à lagoa quer por via da ribeira, quer por descarga do aquífero.

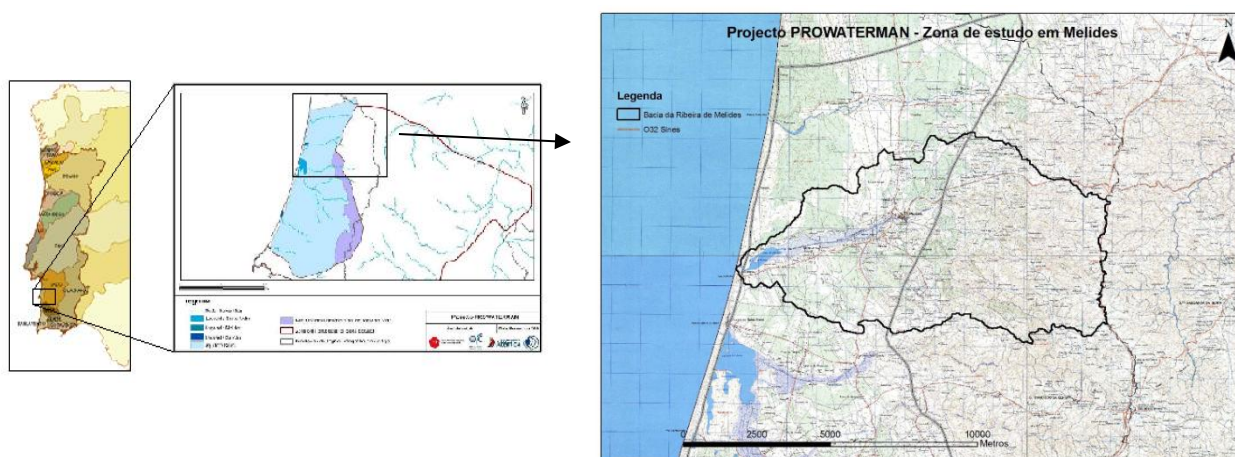


Fig. 1 – Localização da área de estudo

Está-se assim perante um ecossistema influenciado pelos regimes de precipitação e escoamento superficial a montante, pelas oscilações dos níveis freáticos no aquífero subjacente e pelas condições marítimas ao largo. Sob condições de alterações climáticas, tanto a precipitação e escoamento superficial como a recarga do aquífero (e em consequência a posição do seu nível freático) serão alteradas. Do mesmo modo as alterações climáticas podem promover uma subida

média das águas do mar, uma alteração dos regimes de tempestades, das correntes marítimas e das taxas de erosão costeiras, o que terá reflexos nos regimes de abertura da lagoa ao oceano.

No presente trabalho analisar-se-á a o impacto das alterações climáticas sobre o regime de recarga do aquífero e os escoamentos na bacia hidrográfica da ribeira de Melides, não sendo versados os aspectos relacionados com as alterações ao nível da dinâmica do litoral e evolução do nível do mar. Refira-se a este último aspecto que, de acordo com Andrade e Freitas (2002, in Andrade et al., 2009), a actual taxa de elevação do nível do mar na costa portuguesa é de cerca de 1,5 mm/ano, o que dará um valor de subida de alguns centímetros no final do séc. XXI, embora naturalmente este valor varie ao longo da costa, em função das condições tectónicas locais. De acordo com o Relatório do Estado do Ambiente (DGA, 1999), os dados existentes para os marégrafos de Tróia e de Sines indicam uma evolução sem tendências significativas de subida do mar, embora o período considerado seja curto (entre 1975 e 1998). Onde, de acordo com Andarade et al. (2009), poderá ocorrer maiores alterações será ao nível do transporte de sólidos no litoral, devido a um aumento da energia associada à ondulação de Inverno e à rotação do rumo médio da agitação marítima, o que poderá originar um aumento da taxa de erosão costeira.

3. ANÁLISE DA ALTERAÇÃO DA RECARGA E ESCOAMENTO SUPERFICIAL SOB CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

3.1. Metodologia do cálculo da recarga e escoamento superficial em cenários de alterações climáticas

Para a análise da alteração das recargas do aquífero e dos escoamentos superficiais na bacia hidrográfica da ribeira de Melides utilizou-se o método do balanço hídrico sequencial diário, calculado através do modelo BALSEQ_MOD (Oliveira et al., 2011). Para a aplicação deste método consideraram-se as condições previstas pelos cenários de emissões IS92a, SREAS A2 e SRES B2 para a área de estudo no horizonte temporal de 2100, em conformidade com os resultados do estudo SIAM (cf. Santos e Miranda, 2006) para as variáveis climatológicas requeridas pelo BALSEQ_MOD.

As séries climatológicas correspondem ao período 2070-2100, tendo sido obtidas por modificação das respectivas séries actuais (período 1979-2009; Oliveira et al., 2011) em conformidade com as taxas de alteração previstas pelos cenários IS92a, SREAS A2 e SRES B2 para cada uma das variáveis climatológicas, para a área de estudo.

3.2. Obtenção dos dados de entrada no modelo de balanço sequencial diário

3.2.1. Modificação das séries de precipitação

A modificação das séries de precipitação realizou-se por estação do ano, considerando as variações médias previstas pelos seguintes modelos climáticos/cenários de emissões – HadRM2/IS92a, HadRM3/SRES A2 e HadRM3/SRES B2 (cf. Santos e Miranda, 2006) – para cada estação do ano. Assim, os dados de precipitação diária da série de referência (série de 1979-2009) foram subtraídos (ou adicionados no caso do cenário IS92a para os períodos de Inverno) do valor de variação média correspondente a estação do ano (Inverno, Primavera, Verão e Outono) a que a precipitação em causa pertence. Esta variação é constante ao longo de uma mesma estação do ano ao longo dos 30 anos, apresentando-se no Quadro 1 os valores de variação para cada estação do ano e para cada cenário climático considerado. Os meses correspondentes a cada estação do ano são os seguintes:

- Inverno – Dezembro, Janeiro, Fevereiro.
- Primavera – Março, Abril, Maio.
- Verão – Junho, Julho, Agosto.
- Outono – Setembro, Outubro, Novembro.

Quadro 1 – Variação média da precipitação em três cenários de alterações climáticas

Estação do ano	Cenário IS92a	Cenário SRES A2	Cenário SRES B2
Inverno	+ 40% a + 50%	- 20% a - 30%	- 20% a - 30%
Primavera	- 20%	- 40% a - 50%	- 20% a - 30%
Verão	-70% a - 85%	- 65%	- 60%
Outono	- 50% a - 60%	- 30% a - 40%	- 10% a - 20%

(Adaptado de Santos e Miranda, 2006)

3.2.2. Modificação das séries de temperatura

Embora o modelo de balanço hídrico sequencial diário utilizado não entre em consideração com a temperatura como parâmetro de entrada no modelo, a temperatura é uma variável climática que afecta a evapotranspiração, sendo esta última um dos parâmetros de entrada no modelo BALSEQ_MOD. Deste modo, para obter as evapotranspirações modificadas para as condições climáticas previstas pelos modelos climáticos/cenários de emissões considerados, é necessário primeiramente proceder à modificação das séries de temperaturas máximas e mínimas mensais da série de referência (série de 1979-2009) para as condições do período 2070-2100.

A modificação destas séries segue a metodologia usada para a modificação das séries de precipitação, isto é, afecta-se a temperatura da série de referência do valor previsto de subida por estação do ano para o ano de 2100 para o cenário de emissões/modelo climático considerado. Neste caso, para cada estação do ano existe uma variação para a temperatura máxima e uma variação para a temperatura mínima, as quais são apresentadas no Quadro 2. A alteração das temperaturas afectará também o parâmetro humidade relativa, necessário para o cálculo das novas evapotranspirações da série de 2070-2100.

Quadro 2 – Variações das temperaturas máximas e mínimas mensais nos três cenários emissões

Estação do ano		Cenário IS92a	Cenário SRES A2	Cenário SRES B2
Inverno	Máxima	+ 4,25 °C	+ 3 °C	+ 2 °C
	Mínima	+ 5 °C	+ 3,25 °C	+ 1,75 °C
Primavera	Máxima	+ 5,25 °C	+ 3,5 °C	+ 2,5 °C
	Mínima	+ 4,75 °C	+ 3 °C	+ 2 °C
Verão	Máxima	+ 7 °C	+ 3,75 °C	+ 3,5 °C
	Mínima	+ 6 °C	+ 3 °C	2,5 °C
Outono	Máxima	+ 6,75 °C	+ 4 °C	+ 3 °C
	Mínima	+ 5,75 °C	+ 3 °C	+ 2 °C

(Adaptado de Santos e Miranda, 2006)

3.2.3. Modificação da série de evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência para a série 1979-2009 foi determinada pelo método Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), recorrendo aos dados publicados nos anuários do Instituto de Meteorologia, relativos a temperatura máxima média mensal ($T_{máx}$), temperatura mínima média mensal ($T_{mín}$), humidade relativa média ($HR_{méd}$), velocidade do vento média mensal (u), e insolação mensal (ins) conforme explicitado em Oliveira *et al.* (2011) e Oliveira *et al.* (2012).

Adoptando agora as séries modificadas de temperatura máxima e mínima, e aplicando a fórmula de Penman-Monteith, são calculados os novos valores de evapotranspiração de referência para o período 2070-2100, para cada um dos cenários climáticos considerados neste estudo. Para este cálculo é necessário calcular primeiro a nova humidade relativa, tendo-se considerado para efeitos de cálculo que a velocidade do vento e a insolação se mantêm similares às actuais para o período de 2070-2100. Este pressuposto, embora se presumivelmente não reflecta as condições futuras, foi adoptado por os dados existentes para a região não serem suficientes para definir as alterações destes dois parâmetros para os cenários climáticos considerados.

A metodologia utilizada para a alteração da humidade relativa foi a seguinte (cf. Oliveira 2004; 2006):

1.º Passo: Cálculo da pressão do vapor de água (e_a) actual, usando a equação:

$$e_a = HR_{med} * e_z$$

onde:

HR_{med} = humidade relativa média medida nas estações climatológicas.

e_z = pressão média de saturação do vapor.

e_z é por seu turno calculado pela equação:

$$e_z = \frac{e^0 \times T_{max} + e^0 \times T_{min}}{2}$$

onde:

$e^0(T)$ = pressão do vapor de saturação (kPa) a temperatura T (°C), sendo $e^0(T)$ calculado por:

$$e^0 T = 0.6108 \times \exp \frac{17.27 \times T}{T + 237.3}$$

2.º Passo: Assumindo que a pressão do vapor de água se manterá constante, estima-se a humidade relativa máxima e mínima usando as equações:

$$HR_{max} = \frac{e_0}{e^0 \times T_{min}} \quad HR_{min} = \frac{e_0}{e^0 \times T_{max}}$$

3º Passo: Seguidamente procede-se ao cálculo da nova humidade relativa média (HR_{med}^*), com base nas médias da humidade relativas mínimas e máximas.

4º Passo: Dado que a humidade relativa média não corresponde exactamente ao novo valor calculado de HR_{med}^* , devido à não linearidade da relação entre a humidade relativa e a temperatura, calcula-se um factor de correcção ($corrHR$) através da relação HR_{med}^* / HR_{med} .

5º Passo: Para o cálculo da evapotranspiração de referência da série de 2070-2100, para cada um dos cenários considerados (IS92a, SRES A2, SRES B2), é admitido o pressuposto de que a pressão do vapor de água se mantém similar à actual, por falta de dados suficientes para simular as eventuais mudanças associadas a estes cenários. Utilizando as duas últimas equações acima, e usando nos cálculos as temperaturas máximas e mínimas obtidas para os cenários climáticos, tal como se explanou em 3.2.2., e a pressão do vapor de água actual, obtém-se as humidades relativas máximas e mínimas para as séries temporais de 2070-2100.

6º Passo: A humidade relativa média é calculada a partir das humidades relativas máximas e mínimas, determinadas no passo anterior. Uma vez obtida esta humidade relativa média, faz-se a sua correcção com o factor $corrHR$, de modo a corrigir o efeito da não linearidade da variação da humidade relativa com a temperatura.

8º Passo: Com estes novos valores de humidade relativa média, para cada um dos 3 cenários climáticos considerados, calcula-se a humidade mínima relativa que será um dos parâmetros de entrada no modelo de balanço hídrico sequencial diário ao nível do solo BALSEQ_MOD. Combinando as duas primeiras e as duas últimas equações em ordem a HR_{min} obtém-se a expressão de cálculo desta humidade relativa média:

$$HR_{min} = \frac{\frac{e^0 \times T_{máx} + e^0 \times T_{mín}}{2}}{e^0 \times T_{máx}} \times HR_{méd}$$

9º Passo: Obtidos os novos valores de humidade relativa e de temperatura para a série de 2070-2100, para cada um dos cenários climáticos considerados (HadRM2/IS92a, HadRM3/SRES A2, HadRM3/SRES B2), e mantendo as restantes variáveis da equação de Penman-Monteith constantes, calcularam-se as respectivas séries de evapotranspiração de referência para estes cenários de alterações climáticas.

3.3. Resultados do balanço hídrico sequencial diário para os cenários climáticos no horizonte temporal de 2100

Feito correr o modelo BALSEQ_MOD com as novas séries de evapotranspiração de referência, humidade relativa e precipitação, para a sequência temporal 2070-2100, obteve-se a recarga natural e o escoamento superficial directo para este intervalo de tempo e para os cenários climáticos acima referidos, sendo estes valores apresentados no Quadro 3 e nas Figs. 2 a) b) e c). As séries alteradas partem das séries de referência de 1979-2009 registadas na estação meteorológica de Alcácer do Sal e das séries calculadas para estação udométrica fictícia criada a partir dos dados dos postos udométricos de Grândola (24F/01C), de Comporta (23E/01C) e Sines (cf. Oliveira et al., 2011).

Quadro 3 – Recarga natural (RAQ) e escoamento directo (ESC) actuais e em cenários de alterações climáticas

		ESC (mm/ano)	RAQ (mm/ano)	Percentagem do valor actual	
				ESC	RAQ
	<i>Condições actuais</i>	199	119	100%	100%
Cenário emissões/modelo climático	HadRM2/IS92a	179	88	89,8%	73,7%
	HadRM3/SRES A2	114	47	57,5%	39,9%
	HadRM3/SRES B2	142	64	71,5%	53,6%

ESC = escoamento directo; RAQ = recarga natural

Os resultados obtidos mostram que se podem esperar reduções significativas na recarga do sistema aquífero, e reduções menos acentuadas do escoamento superficial. O cenário mais problemático é o associado ao cenário de emissões SERES A2, onde a recarga natural deverá ter reduções da ordem dos 60% e o escoamento superficial directo reduções da ordem dos 43%. Tais resultados indiciam a potencial ocorrência de impactos significativos sobre os caudais das ribeiras e do volume de água na lagoa, comprometendo eventualmente a sua capacidade natural de depuração, e deverá colocar dificuldades ao abastecimento das regas, quer estas se façam por meio de águas subterrâneas, quer por meio de águas superficiais.

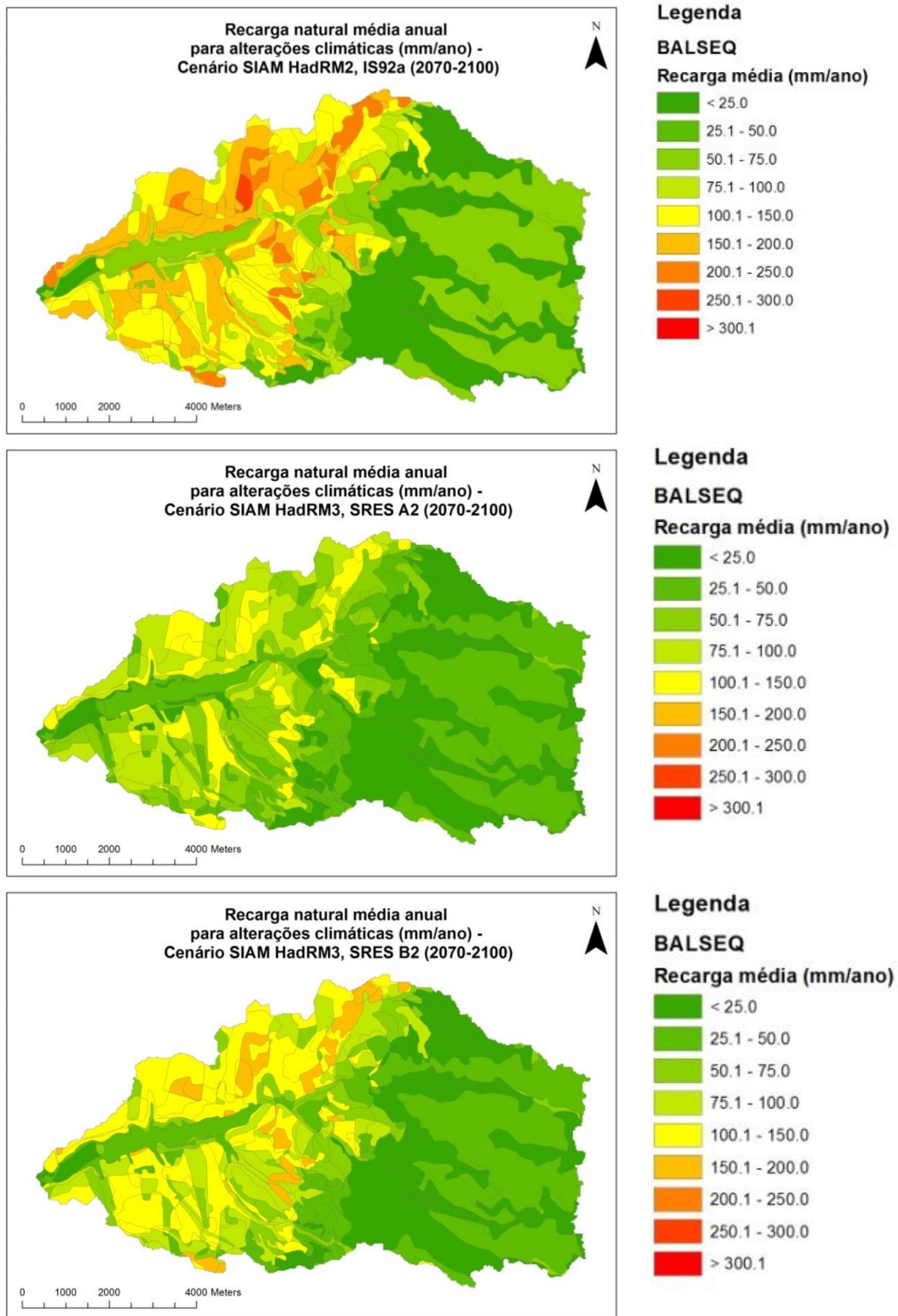


Fig. 2 – Recarga natural média anual, a) cenário HadRM2/IS92a; b) cenário HadRM3/SRES A2; c) cenário HadRM3/SRES B2

4. IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES DA RECARGA E ESCOAMENTO SUPERFICIAL

A redução dos escoamentos superficiais directos e da recarga natural do sistema aquífero tem impactos ao nível dos volumes de água armazenada no aquífero e disponível para abastecimento, e ao nível do volume de água que atinge a lagoa. Tomando os valores de recarga e de escoamento superficial actuais, tal como apresentados em Oliveira et al. (2012a) e as reduções apresentadas em Oliveira et al. (2012) e expressas no Quadro 3 acima, obtêm-se para os cenários climáticos considerados os valores das novas recargas e escoamentos superficiais, que se apresentam no Quadro 4.

Quadro 4 – Volumes de recarga e de escoamento directo nos dois sectores da bacia de Melides

		ESC (mm/ano)	RAQ (mm/ano)	Redução		Volume médio (hm ³ /ano)		
				ESC	RAQ	ESC		RAQ
							xistos	areias
	<i>Condições actuais</i>	199	119	0%	0%	11,226	2,595	5,270
Cenário emissões/modelo climático	HadRM2/IS92a	179	88	10,2%	26,3%	10,098	2,334	3,884
	HadRM3/SRES A2	114	47	42,5%	60,1%	6,431	1,487	2,103
	HadRM3/SRES B2	142	64	28,5%	46,4%	8,011	1,852	2,825

ESC = escoamento directo; RAQ = recarga natural

A redução dos volumes de água que atingem o sistema aquífero poderá colocar dificuldades ao abastecimento das populações, em particular o abastecimento das regas (actualmente feito em larga medida por poços captando no aquífero superficial), quer estas se venham a fazer por meio de águas subterrâneas, quer por meio de águas superficiais, sugerindo a necessidade, nestas condições de se adoptar medidas de abastecimento misto águas superficiais + águas subterrâneas e eventualmente recorrer a recarga artificial, a partir de água que haja sido armazenada nos eventos, que se espera venham a ser mais frequentes, de extremos de precipitação.

A redução dos volumes de escoamento superficial terá impactos directos sobre a lagoa quer em termos do volume debitado para esta, quer em termos de regimes de abastecimento por parte da rede hidrográfica, podendo tornarem-se mais frequentes episódios com grandes descargas muito concentradas no tempo, que decerto estarão associadas a uma maior carga em suspensão nas águas, o que provocará flutuações mais acentuadas e em curtos intervalos e tempo tanto dos parâmetros de salinidade como de sólidos em suspensão, nutrientes e outros poluentes. Isto significa que a alteração dos regimes de escoamento terá impactos ao nível da qualidade das águas da lagoa.

Os volumes actuais de escoamento traduzem-se num volume médio da lagoa de 1,5 hm³ (Oliveira et al., 2012a). Considerando somente a redução dos escoamentos superficiais, verifica-se que esta é traduzida por uma redução do volume de água na lagoa que, em especial no caso do cenário HadRM3/SRES A2, é bastante acentuada (Quadro 5).

Quadro 5 – Variação do volume da lagoa de Melides em cenários de alteração climática

		ESC (mm/ano)	RAQ (mm/ano)	Redução		Vol. médio lagoa (hm ³)
				ESC	RAQ	
	<i>Condições actuais</i>	199	119	0%	0%	1,5
Cenário emissões/modelo climático	HadRM2/IS92a	179	88	10,2%	26,3%	1,35
	HadRM3/SRES A2	114	47	42,5%	60,1%	0,86
	HadRM3/SRES B2	142	64	28,6%	46,4%	1,07

Esta redução de volume é traduzida por uma redução da coluna de água, tendo uma análise expedita desta variação apresentado os seguintes valores de altura de coluna média de água:

- Cenário HadRM2/IS92a – 2,95 m, valor próximo dos 3 m, obtidos por Oliveira et al. (2012) para o volume médio da lagoa de 1,5 hm³ sob as actuais condições climáticas.
- Cenário HadRM3/SRES A2 – 2,05 m, valor similar aos cerca de 2 m, que actualmente pode ocorrer em condições de seca prolongada. Note-se que para este cenário climático, na região do Algarve as condições climáticas médias correspondem às actuais condições de anos muito secos e anos extremamente secos (Oliveira et al., 2012; Oliveira e Novo, 2013).
- Cenário HadRM3/SRES B2 – 2,43 m, reflectindo as condições intermédias deste cenário face aos dois anteriores.

Esta variação na altura da coluna de água tem como consequência uma variação espectacular na área alagada da lagoa, com sua provável redução em termos de área média imersa.

Note-se que nesta análise não se consideraram dois aspectos:

1. O efeito do aumento da evaporação do espelho de água da lagoa, que poderá aumentar perante temperaturas médias mais elevadas, embora dependa da humidade média do ar, a qual por seu turno poderá ter um efeito depressor, caso se verifique, como é previsto nalguns cenários, o seu aumento.
2. O efeito da provável menor descarga do aquífero, dado que a recarga terá diminuído e em consequência o nível piezométrico médio deverá descer, podendo nalguns casos cessar completamente de fornecer água à lagoa, ou passar a fornecê-la durante períodos mais curtos, o que pode de alguma forma comprometer a sua sustentabilidade, em especial porque o volume de água que chegará à lagoa por via superficial também sofrerá reduções, que nalguns cenários são muito significativas, como se viu acima.

Relativamente à alteração dos regimes de descarga do aquífero para o meio hídrico superficial, que actualmente correspondem a cerca de 27 a 30% do volume total da lagoa (Oliveira et al., 2012b) e podem perfazer até 95% da recarga na zona arenosa, pretende-se em estudos posteriores avaliar o impacto da redução das recargas e do consequente rebaixamento dos níveis freáticos, utilizando a metodologia já aplicada no âmbito dos planos de bacia para os EDAS dos sistemas aquíferos de Torres Vedras e de Monforte-Alter do Chão (Lobo Ferreira et al., 2012a; 1012b).

Estas alterações terão, expectavelmente, impactos ao nível da capacidade de recepção das cargas poluentes dado que, para uma mesma carga poluente que chegue à lagoa, um menor volume de água será traduzido por um aumento das concentrações dos poluentes, apontando para um cenário de agravamento do actual mau estado, com a possibilidade de ocorrência de maiores blooms de algas e uma maior eutrofização deste ecossistema.

Assim se actualmente as cargas poluentes que atingem a lagoa apenas por via superficial, e considerando apenas os arrozais, se podem expressar numa concentração de 1,8 mg/l de fosfatos e 1,9 mg/l de nitratos (Oliveira et al., 2012 a), se se considerar um cenário teórico de manutenção destas cargas poluentes, dada a redução do volume de água na lagoa estas concentrações – não considerando quaisquer outros factores que afectem ou controlem estes processos – serão as apresentadas no Quadro 6.

Isto significa que se actualmente a concentração em fosfatos, de acordo com os cálculos de Oliveira et al. (2012a) coloca a lagoa em estado Mau, esta situação parece agravar-se significativamente em cenários de alterações climáticas. Note-se que nesta análise não se considerou a variação de cargas poluentes que poderá ocorrer devido à alteração das culturas

e/ou práticas agrícolas ou ao provável aumento dos processos erosivos e consequente arraste de poluentes fixados nas partículas do solo.

Quadro 6 – Variação potencial das cargas poluentes associadas aos arrozais, passíveis de atingir a lagoa em cenários de alterações climáticas

		Vol. médio lagoa (hm ³)	Carga poluente (kg)		Concentração (mg/l)	
			NO ₃	P ₂ O ₅	NO ₃	P ₂ O ₅
	<i>Condições actuais</i>	1,5	2832	2741	1,89	1,83
Cenário emissões/modelo climático	HadRM2/IS92a	1,35	2832	2741	2,10	2,03
	HadRM3/SRES A2	0,86	2832	2741	3,30	3,19
	HadRM3/SRES B2	1,07	2832	2741	2,65	2,56

Se se considerarem todas as cargas poluentes que atingem a lagoa no espaço de 1 ano (agricultura + pecuária + fossas + poluição vinda de origens superficiais como a ETAR), e se se admitir o cenário de que estas cargas se manterão até ao horizonte temporal de 2100, situação pouco provável dado o espectável recuo na área agrícola (cf. Rounsevell et al., 2006) e alterações na população, sem contar já com a expectável redução dos aportes por via subterrânea devido à redução da recarga e concomitante descida dos níveis piezométricos, a concentração na lagoa seria a que se expressa no Quadro 7. Na realidade será de admitir, caso se mantenham as actuais áreas de arrozal, que os valores de concentração de fosfatos e nitratos se situem entre os do Quadro 6 (valores mínimos) e os Quadro 7 (valores máximos).

Quadro 7 – Variação potencial das cargas poluentes totais (superficiais e subterrâneas), passíveis de atingir a lagoa no espaço de 1 ano em cenários de alterações climáticas

		Vol. médio lagoa (hm ³)	Carga poluente (kg)		Concentração (mg/l)	
			NO ₃	P ₂ O ₅	NO ₃	P ₂ O ₅
	<i>Condições actuais</i>	1,5	10 200,8	5046	6,41	3,36
Cenário emissões/modelo climático	HadRM2/IS92a	1,35	10 200,8	5046	7,56	3,74
	HadRM3/SRES A2	0,86	10 200,8	5046	11,86	5,87
	HadRM3/SRES B2	1,07	10 200,8	5046	8,48	4,72

Perante estas condições é de esperar que ocorram medidas de mitigação, entre estas as de uma intervenção humana estabelecendo regimes artificiais de abertura da lagoa. Foram considerados os seguintes dois cenários:

- Cenário 1 – o volume de água na lagoa é mantido artificialmente constante. Admitindo condições de não fornecimento de águas subterrâneas à lagoa nos dois cenários de menor recarga (cenários A2 e B2) e condições de abertura da lagoa similares às actuais (por efeito de acção antrópica, que se sobreponha às alterações provocadas pelas novas condições marítimas associadas aos cenários de alterações climáticas).
- Cenário 2 – o volume de água na lagoa altera-se, mas o fluxo de água descarregado para o oceano é igual ao actual, ou seja 92,2% do total entrado, o que ocorrerá apenas se a dinâmica costeira (subida local do nível do mar, taxa de erosão, etc.) mantiver um equilíbrio dinâmico com a lagoa similar ao actual. Admite-se que para os cenários A2 e B2 não há descarga de água subterrânea na lagoa, devido à redução significativa da recarga.

Para estas condições, os volumes que circulam e saem da lagoa são os registados nos Quadros 8 e 9 (Novo et al., 2013):

Quadro 8 – Volumes entrados e saídos da lagoa no Cenário 1

Datas/Cenário de emissões	Volume máximo da Lagoa (hm ³)	Volumes que circulam na Lagoa (hm ³ /ano)			Recarga entrada vs volume total entrado (%)	Escoamento total na bacia (hm ³ /ano)	Escoamento vs total entrado na Lagoa (%)	Total saído vs total entrado (%)	Recarga+recarga artificial vs total entrado (%)	
		Total entrado	Total saído	Recarga entrada						
Atual	1,5	19,25	17,75	5,00	25,97	13,82	71,80	92,21	28,0	
Em 2027	1,5	19,22	17,72	5,00	26,00	13,82	71,90	92,20	27,9	
2100	IS92a	1,5	15,74	14,24	2,96	18,77	12,38	78,67	90,47	21,1
	A2	1,5	8,26	6,76	0,00	0,00	7,86	95,12	81,84	4,4
	B2	1,5	10,23	8,73	0,00	0,00	9,83	96,06	85,34	3,5

Quadro 9 – Volumes entrados e saídos da lagoa no Cenário 2

Datas/Cenário de emissões	Volume máximo da Lagoa (hm ³)	% de variação do volume da Lagoa	Volumes que circulam na Lagoa (hm ³ /ano)			% Recarga entrada face volume total entrado	Escoamento total na bacia (hm ³ /ano)	% face ao total saído		
			Total entrado	Total saído	Recarga entrada			Recarga	Escoamento	
Atual	1,5	0,00	19,25	17,75	5,00	25,97	13,82	28,17	77,88	
Em 2027	1,5	0,00	19,22	17,72	5,00	26,00	13,82	28,20	77,98	
2100	IS92a	1,23	-18,16	15,74	14,51	2,96	18,77	12,38	20,36	85,32
	A2	0,64	-57,06	8,26	7,61	0,00	0,00	7,86	0,00	103,17
	B2	0,80	-46,80	10,23	9,43	0,00	0,00	9,83	0,00	104,19

Tais alterações de volume têm reflexos na concentração dos poluentes que chegam à lagoa. A análise deste aspecto é apresentada em Novo et al. (2013).

4. CONCLUSÕES

A determinação da recarga e do escoamento superficial em cenários de alterações climáticas para avaliar os impactos que poderão daí advir na região da bacia hidrográfica de Melides, mostrou que em todos os três cenários analisados deverá ocorrer uma redução dos valores médios anuais de recarga e de escoamento superficial, situando-se essa redução entre os 10% (cenário de emissões IS92a) e os cerca de 42% (cenário de emissões A2) para o escoamento superficial e entre 26% (cenário IS92a) e 60% (cenário A2) para a recarga directa.

Sendo a lagoa de Melides um ecossistema parcialmente dependente de águas subterrâneas, o seu funcionamento e resiliência serão duplamente afectados pela redução do escoamento superficial – e portanto do volume que é directamente descarregado na lagoa por via superficial – e da recarga. Considerando apenas uma relação directa entre a redução do escoamento e do volume da lagoa, verifica-se que a lagoa pode passar dos actuais 1,5 hm³ de volume médio para, no caso mais adverso (cenário A2), apenas 0,86 hm³, ou seja, uma redução da ordem dos 43%.

Se se considerarem regimes artificiais de abertura da lagoa como medida de mitigação para o cenário de manutenção do volume de água na lagoa verifica-se uma redução de cerca de 10% do volume de água saído, o que poderá propiciar situações de menor renovação da água e consequente acumulação de poluentes. Por seu lado, se se considerar o cenário de manutenção dos fluxos para o oceano e se contabilizarem a alteração nos volumes de recarga e escoamento superficial, o volume da lagoa terá reduções entre os 18% (cenário IS92a) e os 57% (cenário A2). Comparando com os valores de redução obtidos quando se considera apenas os regimes de escoamento e recarga e não se consideram os fluxos de troca com o oceano, conclui-se para a manutenção dos fluxos se exigirá um maior esvaziamento da lagoa, pelo que não se aconselha a adopção desta estratégia. Por outro lado estes valores podem indiciar que, uma vez aberta ao oceano, a lagoa poderá receber maior volume de água salgada do que o que recebe

actualmente, o que irá alterar os equilíbrios químicos, e em consequência as condições de habitat para as espécies que actualmente a utilizam.

Estas alterações no volume da lagoa têm impactos ao nível da capacidade de recepção dos poluentes. Contudo, como ao mesmo tempo existe uma redução das descargas por via subterrânea e, deste modo, uma redução na carga poluente provinda do meio subterrâneo, o que parece suceder é que, caso a recarga sofra reduções que levem a um abaixamento significativo e prolongado no tempo, que reduza ou elimine completamente o fornecimento subterrâneo, a qualidade da água tenderá para uma melhoria. Isto se se não considerar o indiciado maior aporte de água salgada aquando das aberturas ao mar. Note-se que foi considerado que para os cenários A2 e B2 não haveria contribuição subterrânea para a lagoa mas se se considerar a redução do volume da lagoa quando se faz o balanço hídrico e a redução considera um regime de manutenção do fluxo para o mar, o significativo desvio entre os dois valores poderá indiciar que pelo menos no cenário B2 haverá uma contribuição subterrânea significativa, ao invés do que ocorre no cenário A2.

A redução da recarga, escoamento superficial e a consequente redução no volume de água da lagoa tem repercussões a vários níveis:

1 – Abertura ao oceano: se se mantiver um funcionamento mais ou menos natural da lagoa, em condições de alterações climáticas, verificando-se a redução da recarga do aquífero e expectavelmente do volume de descarga subterrânea para a rede de drenagem e lagoa, e uma redução dos volumes escoados pela rede de drenagem, a consequente redução do seu volume implicará uma maior dificuldade da lagoa para romper o cordão arenoso e deste modo receber renovação a partir do mar. Contudo o regime de abertura da lagoa está dependente do equilíbrio entre a capacidade da lagoa romper o cordão litoral e a capacidade do oceano romper igualmente este cordão. Em cenários de alterações climáticas é expectável um aumento da subida do nível do mar, e um aumento da erosão costeira por deriva expectável das correntes marítimas, pelo que na realidade poderá ocorrer a situação inversa, ou seja, uma abertura mais frequente da abertura da lagoa. Deste modo o regime de abertura da lagoa dependerá das novas condições de equilíbrio que se atingirem entre a expectável subida do nível do mar e da erosão costeira e a redução da capacidade da lagoa em romper o cordão litoral. Actualmente a abertura ao oceano é a forma de evitar a proliferação de algas, pelo que menos frequentes aberturas ao mar em regime natural implicarão uma maior probabilidade de ocorrência de “blooms” algais e uma maior intervenção humana para evitar estes eventos.

2 – Redução da recarga: actualmente as águas subterrâneas contribuem com cerca de 26,5% de todo o volume de água da lagoa (Novo et al., 2013). Uma redução da recarga do aquífero implicará um abaixamento do nível freático e deste modo uma alteração da ligação hidráulica entre o meio superficial e subterrâneo, com a consequente redução dos volumes de água cedidos para a lagoa e rede hidrográfica. Temporalmente esta cedência pode também ocorrer por períodos mais curtos, causando impactos nos regimes de caudal da rede hidrográfica e estabilidade dos volumes da lagoa. Tal pode ter impactos quer na resiliência da lagoa e sua capacidade de recepção das cargas poluentes, como ao nível do funcionamento dos ecossistemas aquáticos da região.

3 – Concentrações de poluentes: um menor volume de água na lagoa implica que, se a carga poluente recebida for similar à actual, a sua concentração na lagoa será mais acentuada, o que, associado a um expectável aumento das águas por via do aumento da temperatura atmosférica e das alterações da insolação, promoverá a maior frequência de “blooms” de algas. No entanto, segundo alguns cenários, os regimes modificados de precipitação levam a uma redução da recarga do aquífero e a um expectável abaixamento do nível freático, o que poderá limitar e, nos casos mais adversos interromper, a chegada de cargas poluentes por via subterrânea à lagoa.

4 – Redução dos volumes de água subterrânea descarregados para a lagoa: a espectável redução dos volumes de água fornecidos à lagoa por descargas subterrâneas terá dois efeitos algo antagónicos. Por um lado a redução do volume de água cedido contribuirá, de forma significativa, para a redução do volume da lagoa, tanto mais que se prevê uma redução simultânea do escoamento superficial, e perante uma mesma carga poluente, poderão potenciar-se condições para uma maior degradação da qualidade da água e eclosão de “blooms” de algas. Por outro lado, e como mais de 50% da carga poluente que atinge a lagoa terá proveniência subterrânea (Novo et al., 2013), uma redução dos volumes de água subterrânea que chegam à lagoa poderá ter um efeito muito sensível de redução da carga poluente total na lagoa e, conseqüentemente, uma melhoria do seu estado qualitativo. Tudo dependerá dos novos equilíbrios entre os volumes de água que atinjam a lagoa e as cargas poluentes transportadas nesses volumes de água.

5 – Alteração dos regimes de escoamento superficial: o escoamento tenderá a ser mais concentrado, sendo mais elevado no Inverno no caso do cenário IS92a, e sofrendo reduções em todas as estações nos restantes cenários. Esta situação criará períodos mais prolongados de baixos caudais na ribeira, limitando assim a mobilização mais continuada no tempo dos poluentes provenientes das escorrências superficiais dos campos agrícolas. Contudo, aquando dos eventos de precipitação que gerem escoamento superficial, estas cargas acumuladas ao longo de maiores períodos serão transportadas, originando picos mais acentuados de poluição nas águas da ribeira e na lagoa, contribuindo para uma maior oscilação na qualidade da água ao longo do ano. Há ainda a ter em conta o regime de rega e descargas dos arrozais que, deverá ser mantido desde Abril a Setembro (Loureço et al., 2012), período em que os volumes de caudal na ribeira deverão ser inferiores aos actuais devido às condições de maior sequia previstos nestes cenários climáticos. Deste modo o efeito diluidor da ribeira será minimizado e as cargas poluentes dos arrozais e de quaisquer outras fontes poluentes com descarga superficial atingirão a lagoa de modo mais concentrado, agravando o estado de qualidade das suas águas.

5 – Redução dos volumes totais de água que chegam à lagoa: terá como consequência a redução da área emersa e da altura média da coluna de água, a qual passaria dos actuais cerca de 3 m para valores da ordem dos 2,05 m no caso do cenário A2 (mais desfavorável). Note-se que actualmente valores de altura de coluna de água da ordem dos 2 m são registados na lagoa em períodos de maior sequia, estando com frequência associados a condições eutrofização. Por seu lado, a redução da coluna de água poderá favorecer ainda mais o seu aquecimento, ao longo de toda a sua extensão, o que terá reflexos ao nível da reprodução dos microorganismos, aporte e circulação de nutrientes, circulação e estratificação da água, podendo favorecer a ocorrência, e mais frequente, de “blooms” de algas,

6 – Mais área emersa implicará (1) uma perda de nichos ecológicos aquáticos, podendo afectar de modo ainda não conhecido o funcionamento da lagoa como berçário de peixes, (2) a alteração da distribuição da vegetação nas margens da lagoa, com conseqüente alteração, embora admissivelmente pouco significativa, do escoamento superficial e transporte sólido nessas zonas, (3) redução do volume médio efectivo da lagoa e conseqüente diminuição da capacidade de recepção dos poluentes.

Deste modo é espectável que as alterações climáticas produzam sérios impactos sobre a lagoa de Melides, tanto em termos de quantidade como de qualidade das suas águas e conseqüentemente do seu funcionamento ecológico. Perspectiva-se (1) redução acentuada da alimentação de origem subterrânea e (2) também por via da rede hidrográfica, (3) a conseqüente redução do seu volume, o qual poderá ser ainda agravado com o eventual aumento da evaporação, (4) com a conseqüente perda de nichos ecológicos e alteração do funcionamento dos que permanecerem, (5) e a criação de condições mais frequentes e mais favoráveis à eclosão de “blooms” de algas. Contudo, e dado que muita da poluição da lagoa provirá do meio

subterrâneo, a redução da descarga de águas subterrâneas poderá ser um factor positivo, reduzindo deste modo o aporte de nutrientes, contrabalançando o efeito adverso da redução do fornecimento de água subterrânea à lagoa. Tudo dependerá dos equilíbrios que se estabelecerem entre a redução dos volumes descarregados, temperaturas médias ao longo da coluna de água e aportes de nutrientes tanto por via superficial como subterrânea.

Bibliografia:

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO, Irrigation and Drainage Paper n.º 56.
- Andrade, C., H. Oliveira Pires, P. Silva, R. Taborda e M. C. Freitas (2006). *Zonas Costeiras*. In: Alterações Climáticas em Portugal, Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação, Projecto SIAM II, Santos, F.D. e Miranda, P. (eds.). Lisboa, Gradiva, pp. 169-208.
- Andrade, C. e M. C. Freitas (2002). *Coastal Zones*. In: Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts and Adaptation Measures, SIAM Project, Santos, F.D. e Miranda, P. (eds.). Lisboa, Gradiva, pp. 173-219.
- Andrade, F., Cabral, H., Borges, M.F. (2009). *Ambientes Costeiros*. In: Ecossistemas e Bem-Estar Humano: Resultados da Avaliação para Portugal do Millennium Ecosystem Assessment. Pereira, H.M., Domingos, T. Vicente, L., Proença, V. (eds.). Lisboa, Escolar Editora, pp. 413-435.
- Antunes, C., Taborda, R. (2009). *Sea Level at Cascais Tide Gauge: Data, Analysis and Results*. Journal of Coastal Research, Vol. especial n.º 56, pp.218-222.
- Antunes, C., Taborda, R., Mendes, V.B. (2010). Analysis of the Most Recent Data of Cascais Tide Gauge. Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU General Assembly 2010.
- Antunes, C. (2011). *Monitoring Sea Level Change at Cascais Tide Gauge*. Journal of Coastal Research, Vol. especial n.º 64, pp.870-874.
- DGA (1999). *Alterações Climáticas*. in: Relatório do Estado do Ambiente 1999. Lisboa, Direcção Geral do Ambiente, pp. 31-50.
- Lobo Ferreira, J.P., Monteiro, J.P., Oliveira, M.M., Martins, T., Novo, M., Oliveira, L., Leitão, T., Henriques, M.J. (2012a). *Plano de Gestão da Bacia Hidrográfica do Tejo. Modelação do Sistema Aquífero de Monforte-Alter do Chão e Análise dos Impactos das Alterações Climáticas nos Ecossistemas Dependentes das Águas Subterrâneas (EDAS)*. Lisboa, LNEC, Relatório 288/2012 – DHA/NAS, 115 pp.
- Lobo Ferreira, J.P., Monteiro, J.P., Oliveira, M.M., Martins, T., Novo, M., Oliveira, L., Leitão, T., Henriques, M.J. (2012b). *Plano das Bacias Hidrográficas das Ribeiras do Oeste. Modelação do Sistema Aquífero de Torres Vedras e Análise dos Impactos das Alterações Climáticas nos Ecossistemas Dependentes das Águas Subterrâneas (EDAS)*. Lisboa, LNEC, Relatório 289/2012 – DHA/NAS, 113 pp.
- Lourenço, N., Machado, C.R., Pires, A., Vilhena, J., Rodrigues, L., Norberto, S., Almeida, A., Tomé., M., Esteves, L. (2012). *PROWATERMAN – Água, Ecossistemas Aquáticos e Actividade Humana. Uma Abordagem Integrada e Participativa na Definição de Estratégias Inovadoras e Prospectivas de Gestão Integrada de Recursos Hídricos no Sul de Portugal. Actividades da Equipa de Investigação da Universidade Atlântica*. LNEC, Lisboa, 20 de Janeiro, Reunião Anual do Projecto, Power Point, 25 slides.
- Novo, M.E., Oliveira M.M., Oliveira L.S. (2013). *Utilização de Cenários de Mudança para a Previsão da Evolução das Pressões e do Estado das Massas de Água Subterrânea e EDAS. Caso de estudo: Melides. Parte II. Cenários de Alterações Climáticas*. Artigo submetido à 10ª Conferência Nacional do Ambiente/XII Congresso Nacional de Engenharia do Ambiente, 6 a 8 Novembro 2013, Aveiro, Universidade de Aveiro, pp. 19 (in press).
- Oliveira, L., Leitão, T.L., Lobo Ferreira, J.P., Oliveira, M.M., Novo, M.E. (2011). *Água, Ecossistemas Aquáticos e Actividade Humana – Projecto PROWATERMAN. Terceiro Relatório Temático – Resultados Quantitativos e Qualitativos das Campanhas de 2011 e Balanços Hídricos*. Lisboa, LNEC, Relatório 291/2011-NAS, pp. 94.

- Oliveira, L., Martins, T., Lobo Ferreira, J.P., Oliveira, M. M., Novo, M. E., Leitão, T. E. (2012). *Água, Ecossistemas Aquáticos e Actividade Humana – Projecto PROWATERMAN. Quarto Relatório Temático – Contributos para o Desenvolvimento de Medidas para uma Gestão Sustentável dos Recursos Hídricos no Sul de Portugal*. Lisboa, LNEC, Relatório 153/2012-NAS. pp. 44.
- Oliveira, L., Novo, M. E., Lobo Ferreira, J.P. (2012a). *Água, Ecossistemas Aquáticos e Actividade Humana – Projecto PROWATERMAN. Componente do Núcleo de Águas Subterrâneas para o Desenvolvimento de Medidas de Mitigação em Melides*. Lisboa, LNEC, Relatório 182/2011-NAS, pp. 35.
- Oliveira, L., Novo, M.E. (2013). *Análise do Risco de Seca no Aquífero Querença-Silves*, 18 pp (**in press**).
- Oliveira, M.M. (2004). *Recarga de Águas Subterrâneas: Métodos de Avaliação*. Doutoramento em Geologia (Hidrogeologia), Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, pp. 440.
- Oliveira, M.M. (2006). *Recarga de Águas Subterrâneas: Métodos de Avaliação*. Teses e Programas de Investigação – TPI 42, ISBN 972-49-2093-3, Editora LNEC, 2006.
- Rounsevell, M.D.A., Reginster, I., Araújo, M.B., Carter, T.R., Dendoncker, N., Ewert, F., House, J.I., Kankaapää, S., Leemans, R., Metzger, M.J., Schmit, C., Smith, P., Tuck, G., (2006). *A Coherent Set of Future Land Use Change Scenarios for Europe*. *Agricultural Ecosystems & Environment*, Vol. 114, pp. 57-68.
- Santos, F.D. e Miranda, P. (2006). *Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação*. Projecto SIAM II. Lisboa, Editora Gradiva, pp. 505.