

ESTUDO DO IMPACTO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NA RECARGA DO SISTEMA AQUÍFERO DE TORRES VEDRAS

Manuel M. OLIVEIRA

Geólogo, Dr. Hidrogeologia, Investigador auxiliar, Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, Tel: (+351) 21 844 3436, Email: moliveira@lnec.pt

Maria Emília NOVO

Geóloga, Dr. Engenharia do Ambiente, Investigadora auxiliar, Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, Tel: (+351) 21 844 3538, Email: enovo@lnec.pt

Luís G. S. OLIVEIRA

Engenheiro do ambiente, bolsheiro de projecto, Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, Tel.: (+351) 21 844 3786, Email: loliveira@lnec.pt

João Paulo LOBO FERREIRA

Engenheiro Civil, Investigador-coordenador com Habilitação, Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, Tel: (+351) 21 844 3609, Email: lferreira@lnec.pt

RESUMO

Para a avaliação do impacto das alterações climáticas na recarga do sistemas aquífero de Torres Vedras aplicou-se o modelo de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ_MOD para as condições actuais de precipitação e de evapotranspiração de referência e para condições modificadas de precipitação e de temperaturas para o cenário de emissões A1B.

As taxas de variação nas precipitações e temperaturas provieram do estudo Impactos das Alterações Climáticas Relacionados com os Recursos Hídricos (2010) que utilizou os resultados para o cenário de emissões A1B do estudo ENSEMBLES o qual avaliou as alterações climáticas para a Europa com base em diferentes modelos climáticos regionais, tendo-se também utilizado os resultados do modelo climático modelo SMHIRCA_ECHAM5. O cenário A1B corresponde a um cenário de crescimento económico global rápido, e equilíbrio entre diferentes tipos de fontes energéticas.

As séries foram modificadas para os horizontes temporais de 2050 e de 2080. As séries de precipitação e temperatura foram obtidas por modificação das séries de base a partir das taxas de alteração destas variáveis climatológicas. As séries de base abrangem o período de 1979 a 2009, e foram registadas, para a precipitação, no posto udométrico 19B/03UG-Maxial e, para as temperaturas, na estação climatológica 19B/02 - Dois Portos.

O modelo de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ_MOD foi corrido para a série de 1979-2009 e para 16 cenários de cálculo de precipitação/evapotranspiração de referência.

Apresenta-se um conjunto de figuras que ilustra a distribuição espacial da recarga e da variação da recarga em relação à série 1979-2009.

Para o horizonte de 2050 prevê-se que a recarga média do sistema aquífero de Torres Vedras seja entre 84% e 98% da recarga do período 1979-2009, dependendo das séries de precipitação, temperaturas, e de evapotranspirações de referência utilizadas. Para o horizonte de 2080, dependendo das séries climáticas utilizadas, a recarga média será de 60% a 82% da recarga do período 1979-2009.

Palavras-chave: Alterações climáticas, recarga, Torres Vedras, águas subterrâneas.

1 INTRODUÇÃO

As condições climáticas, nomeadamente os regimes de precipitação, temperatura, humidade atmosférica, entre outras, condicionam os volumes de água que são gastos pelo coberto vegetal em evapotranspirações e os que são transferidos para a recarga dos aquíferos. Em condições de alterações climáticas estes parâmetros climáticos são modificados, tendo impactos directos sobre a evapotranspiração e a recarga. Existe ainda um impacto associado, que é o devido à modificação do coberto vegetal, modificação essa que afectará os volumes de evapotranspiração, escoamento superficial, teor de água no solo e, em consequência, a recarga. Contudo, neste artigo a questão da modificação do coberto vegetal não será abordada, analisando-se simplesmente o impacto da alteração da temperatura e precipitação sobre a evapotranspiração e a recarga.

Devido à incerteza da evolução sócio-económica e tecnológica, evolução esta que determina a quantidade de gases de efeito de estufa que são emitidos para a atmosfera, o IPCC adoptou um conjunto de cenários de emissões (cf. IPCC, 1992; IPCC 1995) sob os quais o clima terá uma evolução específica. Assim, a cada cenário de emissões corresponderão condições climáticas futuras específicas para esse cenário. Neste artigo apresenta-se o estudo do cenário de emissões A1B, um cenário caracterizado por um crescimento económico muito rápido, convergência económica entre as regiões, população em crescimento até 2050, introdução de novas tecnologias mais eficientes, com um equilíbrio no uso entre diferentes tipos de fontes energéticas. (<http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>).

Com vista ao cálculo dos valores de recarga média para os horizontes 2050 e 2080, considerando os efeitos da alteração da temperatura e precipitação devido às alterações climáticas, é necessário construir séries de precipitação e temperatura, assim como das demais variáveis climatológicas que afectem a evapotranspiração (como a humidade relativa, a velocidade do vento, a insolação), modificadas em função dos cenários de alterações climáticas que se projectam para a área de estudo.

No cenário climático A1B estudado para a área do sistema aquífero de Torres Vedras, para os horizontes temporais de 2050¹ e 2080², as taxas de variação provêm do estudo Impactos das Alterações Climáticas Relacionados com os Recursos Hídricos (2010). Este estudo analisou a variação de diversas variáveis climatológicas, assim como do escoamento superficial, para as bacias hidrográficas do Tejo, Vouga, Mondego, Lis e Ribeiras do Oeste, a partir dos resultados para o cenário de emissões A1B do estudo ENSEMBLES. O estudo ENSEMBLES avaliou as alterações climáticas para a Europa com base em diferentes modelos climáticos regionais. As taxas de variação admitidas são os valores médios de alteração das temperaturas e precipitações, por estação do ano, para a região onde se situa o sistema aquífero de Torres Vedras, obtidos dos modelos climáticos regionais usados nestes estudos, e os valores do modelo climático regional SMHIRCA_ECHAM5, conforme ao estudo ENSEMBLES.

De acordo com estes cenários esperam-se as alterações de precipitação e temperatura, de acordo com a estação do ano, referidas nos Quadro 1 e Quadro 2.

Quadro 1 – Taxas de variação da precipitação para o cenário climático A1B e horizontes temporais para a região de Torres Vedras

Modelo climático	Modelo SMHIRCA_ECHAM5	Média dos modelos ENSEMBLES
Horizonte 2080	Inverno: -4,7%; Primavera: -37,5%; Verão: -61%; Outono: -24,6%	Inverno: +2%; Primavera: -33%; Verão: -51%; Outono: -27%
Horizonte 2050	Inverno: +4%; Primavera: -15%; Verão: -26,8%; Outono: -22,6%	Inverno: +12%; Primavera: -11%; Verão: -29%; Outono: -15%

¹ Corresponde à série temporal 2021-2050.

² Corresponde à série temporal 2071-2100.

Quadro 2 – Taxas de variação das temperaturas para o cenário climático A1B e horizontes temporais para a região de Torres Vedras

Modelo climático		Modelo SMHIRCA_ECHAM5	Média dos modelos ENSEMBLES
Horizonte 2080	Máxima mensal	Inverno: +2,1°C; Primavera: +3,1°C; Verão: +6,7°C; Outono: +4,1°C	Inverno: +2,7°C; Primavera: +3,6°C; Verão: +5,8°C; Outono: +4,3°C
	Mínima mensal	Inverno: +1,9°C; Primavera: +1,9°C; Verão: +3,2°C; Outono: +3°C	Inverno: +2,4°C; Primavera: +2,6°C; Verão: +3,4°C; Outono: +3,3°C
Horizonte 2050	Máxima mensal	Inverno: +0,8°C; Primavera: +0,8°C; Verão: +2,6°C; Outono: +1,6°C	Inverno: +1,5°C; Primavera: +1,6°C; Verão: +2,5°C; Outono: = +2,0°C
	Mínima mensal	Inverno: +0,7°C; Primavera: +0,4°C; Verão: +1,2°C; Outono: +1,1°C	Inverno: +1,2°C; Primavera: +1,2°C; Verão: +1,4°C; Outono: +1,5°C

Com estas taxas de variação procede-se à modificação de séries de temperatura e precipitação recentes, com vista a gerar séries artificiais conformes às condições climáticas previstas para cada um dos cenários A1B referidos. A metodologia aplicada para a modificação destas séries é a que se apresenta nas alíneas seguintes.

2 MODIFICAÇÃO DAS SÉRIES CLIMÁTICAS PARA OS CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

2.1 Modificação das séries de precipitação

As séries de precipitação foram modificadas, por estação do ano, para os horizontes temporais de 2050 e 2080, conforme às taxas de variação da precipitação para estes horizontes temporais, para o cenário climático A1B do estudo Impactos das Alterações Climáticas Relacionados com os Recursos Hídricos (2010) – Quadro 1. Os meses constituintes de cada estação do ano são: Inverno: Dezembro, Janeiro, Fevereiro; Primavera: Março, Abril, Maio; Verão: Junho, Julho, Agosto; Outono: Setembro, Outubro, Novembro.

A alteração das séries de precipitação considerou duas metodologias:

- (1) **Variação constante por estação do ano** – nesta metodologia cada evento de precipitação é afectado da taxa de variação correspondente à estação do ano a que pertence. Assim uma precipitação afectada por uma taxa de variação de -25% corresponde um valor que é o da precipitação inicial subtraído de 25% desta precipitação. Ao longo de cada ano, são aplicadas sucessivamente 4 taxas distintas de variação, uma para a Primavera, outra para o Verão, uma terceira para o Outono e uma última para o Inverno.
- (2) **Variação removendo os eventos menores de precipitação, por estação do ano** – nesta metodologia usa-se igualmente uma taxa de variação por estação do ano, a qual é constante para essa estação ao longo dos 30 anos da série, mas neste caso eliminam-se os eventos menores de precipitação no caso em que as taxas de variação assinalam uma redução da precipitação.

A eliminação dos eventos menores é realizada ordenando os valores da série de precipitação de forma decrescente, acumulando a precipitação da série ordenada, e eliminando os eventos de precipitação a partir do momento em que o total acumulado atinge o valor de precipitação resultante da alteração climática para essa estação do ano.

Exemplificando: se a taxa de variação no Inverno é de -25%, a soma das precipitações de Inverno alterado deve ser 75% da soma das precipitações de Inverno da série actual; Ordenando os valores relativos a todos os invernos de forma decrescente e somando cada valor ao valor anterior, vai-se obtendo um valor de precipitação acumulado; quando este valor atinge os 75% da soma das precipitações de Inverno da série actual, colocam-se todas as restantes precipitações = 0, mantendo-se os valores das precipitações acima iguais aos da série actual.

Com esta metodologia privilegiam-se as precipitações mais elevadas em detrimento das menores tentando assim cumprir a premissa de que nos cenários de alterações climáticas as precipitações são mais concentradas.

Nos casos em que as taxas de variação assinalam um aumento da precipitação (no geral no Inverno), executa-se o critério anterior mas afectando previamente todos os valores da série de precipitação de um factor que é 1,5 vezes a taxa de variação. Exemplificando, se no Inverno a taxa de variação da precipitação é de +4%, todos os valores de precipitação do Inverno são multiplicados por 106%, e depois a série é ordenada de forma decrescente, eliminando-se os valores a partir dos quais a precipitação acumulada é superior a 104% da precipitação acumulada da série de precipitação actual.

De igual modo, ao longo de um ano, são aplicadas sucessivamente 4 taxas distintas de variação, para cada estação do ano.

2.2 Modificação das séries de temperatura

As séries de temperaturas, necessárias para o cálculo da evapotranspiração, são as séries de temperaturas mínimas e máximas mensais. Ao invés das precipitações, que podem não ocorrer num determinado dia ou conjunto de dias, a temperatura só foi modificada através do método da variação constante por estação do ano, onde cada temperatura é somada do valor da variação média correspondente à estação do ano a que pertence (as projecções indicam sempre subidas das temperaturas), sendo essa variação média constante para a mesma estação do ano, ao longo de toda a série de 30 anos, em conformidade com a variação prevista no modelo climático que se esteja a considerar. Deste modo, ao longo de um ano, são aplicadas sucessivamente 4 valores de variação média, uma para a Primavera, outra para o Verão, uma terceira para o Outono e uma última para o Inverno. Estes valores são distintos para as temperaturas máximas e para as temperaturas mínimas - Quadro 2.

2.3 Modificação da série de evapotranspiração de referência

Os modelos de alterações climáticas têm apresentado como resultados as alterações previstas, para além da precipitação média, das temperaturas máxima e mínima médias do ar (Quadro 1 e Quadro 2). As alterações de temperatura influenciam a evapotranspiração. Sendo assim, podem-se introduzir as alterações expectáveis na fórmula de Penman-Monteith para o cálculo da evapotranspiração de referência.

Uma outra variável necessária à corrida do modelo BALSEQ_MOD é a humidade relativa mínima que é influenciada pela alteração das temperaturas mensais mínimas e máximas.

Uma vez que até à data não têm sido publicados resultados relativamente às previsões de alteração da velocidade do vento e da insolação, estas variáveis são congeladas na análise que se apresenta.

Os dados existentes, publicados nos anuários do Instituto de Meteorologia, são a temperatura máxima média mensal (Tmax), a temperatura mínima média mensal (Tmin), a humidade relativa média (HRmed), a velocidade do vento média mensal (u), e a insolação mensal (ins). Estes dados foram utilizados para estimar a evapotranspiração de referência no âmbito do plano de bacia hidrográfica das ribeiras do Algarve utilizando o método Penman-Monteith da FAO (Allen et al, 1998). São estes dados que são utilizados na modificação das séries de evapotranspiração de referência para os cenários de alterações climáticas.

O cálculo da humidade relativa para cenários de alterações climáticas é feito da seguinte forma:

1º - Cálculo da pressão do vapor de água (e_a), utilizando as temperaturas e a humidade relativa média actuais, mediante a equação:

$$e_a = HR_{med} \cdot e_s \quad \text{Eq. 1}$$

sendo HR_{med} a humidade relativa média e e_s a pressão média de saturação do vapor dada pela equação:

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \quad \text{Eq. 2}$$

sendo $e^o(T)$ a pressão do vapor de saturação (kPa) à temperatura T (°C):

$$e^o(T) = 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3}\right) \quad \text{Eq. 3}$$

2º - Assumindo que a pressão do vapor de água se mantém constante, estima-se a humidade relativa máxima e mínima mediante as equações:

$$HR_{max} = \frac{e_a}{e^o(T_{min})}; \quad HR_{min} = \frac{e_a}{e^o(T_{max})} \quad \text{Eq. 4}$$

3º - Fazendo a média destes valores de humidade relativa máxima e humidade relativa mínima recalcula-se a humidade relativa média (HR_{med}^*);

4º - Por este último processo verifica-se que, devido à não linearidade da variação da humidade relativa com a temperatura, o valor da humidade relativa média agora estimado é diferente do valor existente (HR_{med}). Com base nestes valores calcula-se um factor correctivo $corr_{HR}$ fazendo a relação HR_{med}^* / HR_{med} .

5º - No cálculo da evapotranspiração de referência no cenário de alterações climáticas vai-se considerar que a pressão do vapor de água se mantém como na série actual (o que é uma fragilidade do modelo uma vez que a quantidade de humidade do ar também variará).

6º - Assim, obtêm-se as humidades relativas mínimas e máximas considerando as temperaturas máximas e mínimas dadas pelos cenários de alterações climáticas (Eq. 4) e o e_a calculado anteriormente, tendo em atenção o comentário referido em 5º;

7º - Calcula-se a humidade relativa média a partir das humidades relativas calculadas em 6º e corrige-se esta humidade relativa média multiplicando-a pelo factor $corr_{HR}$ obtido em 4º para de alguma forma corrigir a não linearidade da variação da humidade relativa com a temperatura.

8º - O novo valor da humidade relativa média determinado para o cenário de alterações climáticas é utilizado para estimar a humidade relativa mínima necessária ao cálculo do modelo BALSEQ_MOD, rearranjando e resolvendo em ordem a HR_{min} as Eq. 4, Eq. 2 e Eq. 1:

$$HR_{min} = \frac{\frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2}}{e^o(T_{max})} \cdot HR_{med} \quad \text{Eq. 5}$$

Com os novos valores de humidade relativa e de temperatura, e mantendo as restantes variáveis da equação de Penman-Monteith constantes, calculam-se as séries de evapotranspiração de referência em cenários de alterações climáticas.

3 O MODELO BALSEQ_MOD

O modelo numérico de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ_MOD faz o balanço a nível do solo, incorporando metodologias para cálculo de forma sequencial dos processos de infiltração no solo, evapotranspiração real e infiltração profunda do solo. A infiltração profunda é considerada um estimador da recarga do sistema aquífero. O modelo é corrido para cada fracção de território onde se possa assumir homogeneidade no solo e na ocupação do solo; neste modelo cada ocupação do solo pode ser descrita por até três cobertos diferentes: solo com coberto 1, solo com coberto 2, e solo descoberto. O modelo BALSEQ_MOD tem como antecedentes o modelo BALSEQ desenvolvido por LOBO FERREIRA (1981, 1982) para a estimativa da recarga de águas subterrâneas na ilha de Porto Santo.

A infiltração superficial é calculada em função da textura do *solo*, da precipitação diária e do teor de humidade do *solo*. A evapotranspiração real é calculada com base na evapotranspiração de referência, nos parâmetros que definem o ciclo vegetativo dos cobertos vegetais (coeficientes culturais, períodos de crescimento, variação da área ocupada pelos cobertos, altura máxima das plantas e profundidades das suas raízes), nos parâmetros do solo (retenção específica e ponto de emurchecimento permanente), e no armazenamento de água no solo. A infiltração profunda é calculada em função da condutividade hidráulica saturada e da água armazenada no *solo* que pode drenar por acção da gravidade.

A descrição de toda a metodologia programada no modelo BALSEQ_MOD pode ser encontrada, entre outros, em Oliveira (2004, 2006) e Oliveira et al. (2008).

4 CORRIDA DO MODELO BALSEQ_MOD PARA A SÉRIE 1979-2009

Calculou-se a recarga utilizando os dados registados para o período de 1-10-1979 até 30-09-2009. Os dados de precipitação diária provieram do posto udométrico 19B/03 – Maxial. A lacuna de apenas 2 dias (21-22/01/2007) foi preenchida com os dados registados em 19B/05 - Orjarica.

Os dados da evapotranspiração de referência provieram do Plano de Bacia Hidrográfica das Ribeiras do Oeste, tendo-se utilizado os dados da estação climatológica 19B/02 - Dois Portos, sendo que a partir de 1-10-1988 os valores apresentados para cada mês são as médias mensais das séries de 1-10-1959 até 30-09-1988.

Os solos (Quadro 3) foram caracterizados a partir da carta de solos do IHERA à escala 1:25 000, folhas 361, 362, 374 e 375. Os solos aí representados foram caracterizados de acordo com OLIVEIRA (2004, 2006), e para aqueles que aí não existiam, foram atribuídos parâmetros em função da informação acessível a partir de <http://www.dgadr.pt/ar/cartografia/notaexplisolo.htm> (ver também explicação em OLIVEIRA *et al.*, 2012).

A ocupação do solo, proveniente da carta Corine Land Cover 2006, à escala 1:100 000, é a representada no Quadro 4.

As corridas do modelo de balanço hídrico sequencial diário foram feitas para cada associação de solo/ocupação do solo. Dado que na cartografia de solos à escala 1:25 000 podem, em cada unidade cartografada, existir associações de até três solos, as corridas do modelo foram feitas para cada combinação de solo / ocupação de solo e depois, para cada unidade, os resultados finais foram ponderados pela área de ocorrência de cada solo nessa associação. Ao todo existem 367 combinações diferentes de solo / ocupação de solo.

A recarga anual média obtida encontra-se representada na Figura 1, tendo sido estimada em 176 mm/ano, o que representa 25% da precipitação (cf. Lobo-Ferreira *et al.*, 2011).

Quadro 3 – Parâmetros característicos do solo

Solo (IHERA)	sr (-)	wp (-)	ne (-)	Ks (mm/d)	Material do horizonte superior do solo	Solo (IHERA)	sr (-)	wp (-)	ne (-)	Ks (mm/d)	Material do horizonte superior do solo
A	0,27	0,12	0,44	91,32	7-Franco Arenoso	Pcst	0,27	0,12	0,46	163,20	6-Franco
Aa	0,36	0,24	0,47	19,52	5-Argiloso	Pcst'	0,4	0,27	0,48	14,40	5-Argiloso
Aac	0,26	0,14	0,42	34,20	9-Franco-argilo-limoso	Ppr	0,17	0,08	0,44	1162,00	2-Arenoso Franco
Ac	0,31	0,18	0,44	17,11	10-Franco Argiloso	Ppt	0,19	0,07	0,33	639,48	7-Franco Arenoso
Al	0,14	0,06	0,44	1466,40	2-Arenoso Franco	Ptp	0,14	0,04	0,45	3569,62	7-Franco Arenoso
Ap	0,11	0,05	0,44	1833,89	2-Arenoso Franco	Pz	0,07	0,02	0,26	3050,55	7-Franco Arenoso
Apr	0,11	0,05	0,44	1833,89	2-Arenoso Franco	Sb	0,31	0,15	0,46	86,16	11-Franco Limoso
Art	0,05	0,02	0,15	0,10	5-Argiloso	Sba	0,36	0,22	0,48	21,60	4-Argilo-limoso
At	0,25	0,12	0,41	102,29	6-Franco	Sbc	0,31	0,16	0,50	316,80	11-Franco Limoso
Atl	0,15	0,06	0,37	356,10	7-Franco Arenoso	Sbl	0,22	0,06	0,43	308,30	7-Franco Arenoso
Ca	0,31	0,17	0,44	26,02	9-Franco-argilo-limoso	Spc'	0,46	0,33	0,51	7,88	4-Argilo-limoso
Cal	0,14	0,06	0,45	969,08	7-Franco Arenoso	Vac'	0,4	0,27	0,48	14,40	5-Argiloso
Et	0,3	0,16	0,48	354,28	2-ArenosoFranco	Vago	0,23	0,11	0,44	170,22	6-Franco

Solo (IHERA)	sr (-)	wp (-)	ne (-)	Ks (mm/d)	Material do horizonte superior do solo	Solo (IHERA)	sr (-)	wp (-)	ne (-)	Ks (mm/d)	Material do horizonte superior do solo
Lpt	0,24	0,11	0,46	258,52	6-Franco	Vao	0,4	0,27	0,48	14,40	5-Argiloso
Lvt	0,25	0,12	0,44	161,54	7-Franco Arenoso	Vato	0,31	0,19	0,46	61,90	8-Franco-argilo-arenoso
Mnt	0,23	0,16	0,42	186,30	2-ArenosoFranco	Vcmo	0,22	0,14	0,45	163,33	5-Argiloso
Paco	0,35	0,22	0,47	33,12	10-Franco Argiloso	Vcso	0,18	0,06	0,39	794,99	8-Franco-argilo-arenoso
Pao	0,4	0,27	0,48	14,40	5-Argiloso	Vcst	0,37	0,21	0,47	36,00	9-Franco-argilo-limoso
Par	0,16	0,03	0,32	332,76	7-Franco Arenoso	Vcst'	0,4	0,27	0,48	14,40	5-Argiloso
Pato	0,35	0,22	0,47	27,44	10-Franco Argiloso	Vt	0,13	0,04	0,38	1080,62	7-Franco Arenoso
Pcs'	0,4	0,27	0,48	14,40	5-Argiloso	Vto	0,20	0,09	0,45	447,54	7-Franco Arenoso
Pcsd	0,30	0,17	0,46	73,42	10-Franco Argiloso	Vtr	0,3	0,17	0,46	82,55	7-Franco Arenoso
Pcsd'	0,4	0,27	0,48	14,40	5-Argiloso						

sr – retenção específica [L³/L³]

wp – ponto de emurchecimento permanente [L³/L³]

n – porosidade [L³/L³]

Ks – condutividade hidráulica saturada (vertical) (mm/dia)

Quadro 4 – Ocupação do solo segundo o CORINE Land Cover 2006 e parâmetros do modelo

Código de Ocupação do Solo	Ocupação	Permeável	Calcula Kcb_esp	Dia_ini	L_ini	L_des	L_med	L_fim	Kcb_ini	Kcb_med	Kcb_fim	h_cult	rp_1	rp_0	slid	Kc_min	Kcb_tot	fraccao	fraccao_0	fraccao_nada
112	Relva	1	0	1	1	1	361	2	0,9	0,9	0,9	0,2	500	500	0,4	0,15	0,9	0,3	0,3	0,3
	Impermeável	0	0	1	1	1	361	2	0,01	0,01	0,01	1	1	1	1	0,01	0,01	0,4	0,4	0,4
121	Indústria	0	0	1	1	1	361	2	0,01	0,01	0,01	1	1	1	1	0,01	0,01	0,6	0,6	0,6
122	Impermeável	0	0	1	1	1	361	2	0,01	0,01	0,01	1	1	1	1	0,01	0,01	0,6	0,6	0,6
131	Impermeável	0	0	1	1	1	361	2	0,01	0,01	0,01	1	1	1	1	0,01	0,01	0,05	0,05	0,05
132	Aterro sanitár.	0	0	1	1	1	361	2	0,01	0,01	0,01	1	1	1	1	0,01	0,01	0,6	0,6	0,6
133	Impermeável	0	0	1	1	1	361	2	0,01	0,01	0,01	1	1	1	1	0,01	0,01	0,3	0,3	0,3
	Mato	1	0	1	1	1	361	2	0,8	0,8	0,8	1	1000	1000	0,5	0,15	0,8	0,2	0,2	0,2
211	Trigo inverno	1	0	32	30	140	40	30	0,15	1,1	0,15	1	1200	150	0,55	0,15	1,1	1	0,1	0
221	Vinhas	1	0	152	20	50	75	60	0,15	0,65	0,4	2	1000	1000	0,45	0,15	0,65	0,75	0,75	0
222	Pomar (maçã)	1	1	152	30	50	130	30	0,5	0,9	0,7	4	1500	1500	0,5	0,15	0,9	0,7	0,7	0
242	Pomar	1	1	152	30	50	130	30	0,5	0,9	0,7	4	1500	1500	0,5	0,15	0,9	0,3	0,3	0
	Tomate	1	1	196	30	31	30	17	0,27	1,1	0,66	0,6	700	150	0,4	0,15	1,1	0,4	0,1	0
243	Tomate	1	1	196	30	31	30	17	0,27	1,1	0,66	0,6	700	150	0,4	0,15	1,1	0,4	0,1	0
	Eucalipto	1	1	1	1	1	361	2	1,2	1,2	1,2	10	2750	2750	0,8	0,15	1,2	0,2	0,2	0,2
311	Eucalipto	1	1	1	1	1	361	2	1,2	1,2	1,2	10	2750	2750	0,8	0,15	1,2	0,2	0,2	0,2
313	Eucalipto	1	1	1	1	1	361	2	1,2	1,2	1,2	10	2750	2750	0,8	0,15	1,2	0,5	0,5	0,5
	Pinheiro	1	1	1	1	1	361	2	0,95	0,95	0,95	10	2750	2750	0,7	0,15	0,95	0,4	0,4	0,4
324	Mato baixo	1	1	1	1	1	361	2	0,8	0,8	0,8	1	1000	1000	0,5	0,15	0,8	0,5	0,5	0,5
	Pinheiro	1	1	1	1	1	361	2	0,95	0,95	0,95	10	2750	2750	0,7	0,15	0,95	0,2	0,2	0,2

Permeável= código para a infiltração superficial: (0) é nula, (1) calculada pelo modelo, Calcula_Kcb_esp=código para calcular (1) ou não (0) o coeficiente cultural basal esperso, Dia_ini=dia de início de desenvolvimento da cultura, L= comprimento (d): L_ini= da fase inicial, L_des= da fase de desenvolvimento, L_med= da meia estação, L_fim= da fase final, Kcb=coeficiente cultural basal: Kcb_ini=da fase inicial, Kcb_med=da meia estação, Kcb_fim= da fase final, h_cult=altura da cultura na fase de meia estação (m), rp_1=profundidade máxima das raízes das plantas (m), rp_0=profundidade mínima das raízes das plantas (m), slid=limite de depleção da água do solo a 100%, Kc_min=coeficiente cultural mínimo, Kcb_tot= coeficiente cultural basal total, fraccao=fracção máxima de terreno ocupada pela cultura, fraccao_0=fracção mínima de terreno ocupada pela cultura no período inicial

5 CORRIDA DO MODELO BALSEQ_MOD PARA OS CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS.

O modelo BALSEQ_MOD foi corrido para as séries de precipitação e de evapotranspiração de referência estimadas para os cenários de alterações climáticas correspondentes aos horizontes 2050 e 2080.

Considerou-se que as variáveis do meio se mantêm constantes. Ou seja, a ocupação do solo mantém-se igual, o que significa que os parâmetros de corrida do modelo dependentes desta ocupação se mantêm inalterados, e os solos e as correspondentes propriedades mantêm-se como na corrida para a série 1979-2009.

Ao todo fizeram-se 16 corridas do modelo BALSEQ_MOD resultantes de: 2 horizontes (2050 e 2080) x 2 modelos (SMHIRCA_ECHAM5 e ENSEMBLES) x 2 formas diferentes de estimar as séries de

precipitação (factor constante ou eliminação de mínimos) x 2 séries distintas de evapotranspiração de referência (a série de evapotranspiração alterada de acordo com a metodologia apresentada e a série de evapotranspiração igual à utilizada na série 1979-2009). As corridas foram identificadas como cenários de acordo com o Quadro 5.

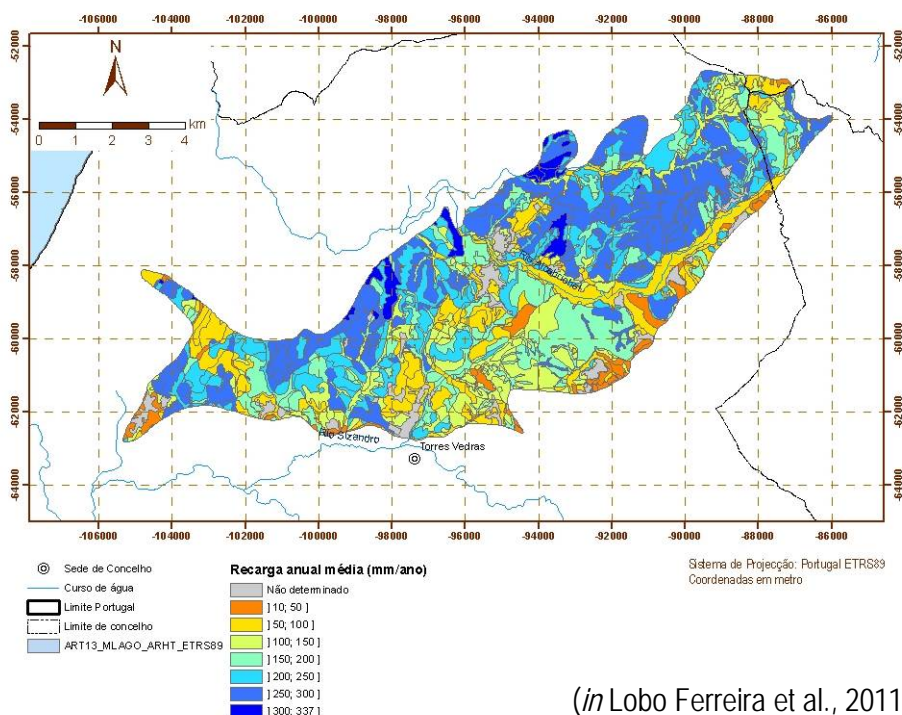


Figura 1 – Recarga anual média da massa de águas subterrâneas de Torres Vedras

Quadro 5 – Corridas do modelo

Corrida	Modelo	Horizonte	Precipitação	Evapotranspiração de referência
Actual	-	1979-2009	1979-2009	1979-2009
Cenário 11	ENSEMBLES	2050	Correcção constante	1979-2009
Cenário 12				alterada
Cenário 13			Elimina mínimos	1979-2009
Cenário 14				alterada
Cenário 21		2080	Correcção constante	1979-2009
Cenário 22				alterada
Cenário 23			Elimina mínimos	1979-2009
Cenário 24				alterada
Cenário 31	SMHIRCA_ECHAM5	2050	Correcção constante	1979-2009
Cenário 32				alterada
Cenário 33			Elimina mínimos	1979-2009
Cenário 34				alterada
Cenário 41		2080	Correcção constante	1979-2009
Cenário 42				alterada
Cenário 43			Elimina mínimos	1979-2009
Cenário 44				alterada

A opção de correr os modelos de previsão da recarga em cenários de alterações climáticas utilizando a série actual de evapotranspiração de referência prende-se com o facto de no processo de estimativa da evapotranspiração utilizando os dados referidos se gerarem algumas incertezas sobre os valores finais obtidos, fruto da não linearidade da variação de alguns parâmetros com a temperatura e da inexistência

nos dados de base das séries de humidade relativa mínima e máxima mensal. Assim, utilizando as duas séries de evapotranspiração obtém-se um intervalo de valores.

Os valores obtidos pela corrida do modelo BALSEQ_MOD são os apresentados no Quadro 6. Os mesmos valores podem ser visualizados na Figura 2.

Especialmente pode-se ver a distribuição da recarga anual média nos diversos cenários (Figura 3 a Figura 6) assim como a variação espacial da recarga em função da série actual 1979-2009 (Figura 7 a Figura 10). As legendas destas figuras encontram-se nas Figura 11 e Figura 12.

Quadro 6 – Resultados da corrida do modelo de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ_MOD para a totalidade do sistema aquífero de Torres Vedras

Corrida	PRC	ETR	ED	REC	% PRC actual	% ETR actual	% ED actual	% REC actual
Actual	713	310	228	176	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Cenário 11	680	295	215	170	95.3%	95.2%	94.5%	96.4%
Cenário 12	680	309	214	157	95.3%	99.7%	94.1%	89.0%
Cenário 13	679	272	235	172	95.2%	87.8%	103.2%	98.0%
Cenário 14	679	284	234	161	95.2%	91.9%	102.8%	91.4%
Cenário 21	579	267	176	136	81.1%	86.2%	77.2%	77.3%
Cenário 22	579	297	174	108	81.1%	95.8%	76.4%	61.5%
Cenário 23	578	233	200	144	81.0%	75.3%	88.0%	82.1%
Cenário 24	578	260	199	120	81.0%	83.8%	87.2%	68.2%
Cenário 31	634	286	197	151	88.9%	92.4%	86.3%	85.9%
Cenário 32	634	290	196	148	88.9%	93.7%	86.2%	83.9%
Cenário 33	634	260	217	156	88.8%	84.0%	95.2%	88.9%
Cenário 34	634	263	217	154	88.8%	85.0%	95.1%	87.3%
Cenário 41	556	260	167	128	77.9%	84.1%	73.4%	72.9%
Cenário 42	556	284	166	106	77.9%	91.6%	72.7%	60.5%
Cenário 43	555	224	194	137	77.8%	72.4%	85.3%	77.6%
Cenário 44	555	244	193	118	77.8%	78.8%	84.7%	67.2%

Valores em mm/ano: PRC – precipitação, ETR – evapotranspiração real, ED – escoamento directo, REC – recarga.

Valores percentuais: % PRC actual = percentagem da precipitação da série 1979-2009, % ETR actual = percentagem da evapotranspiração da série 1979-2009, % ED actual = percentagem do escoamento directo da série 1979-2009; % REC actual = percentagem da recarga da série 1979-2009.

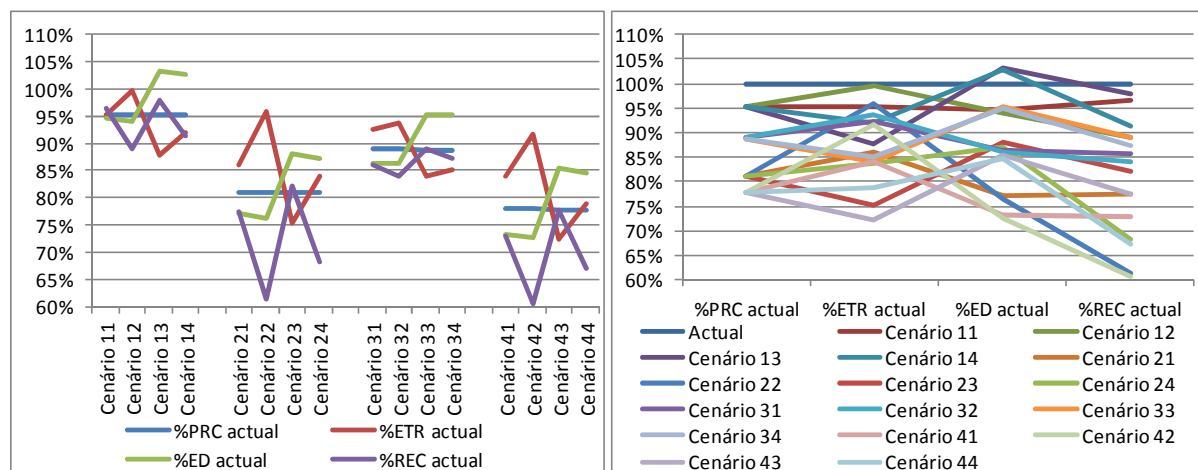
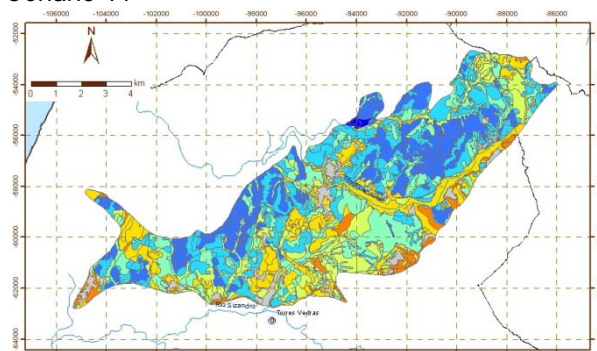
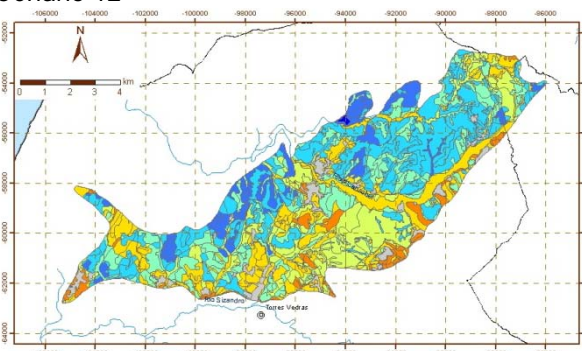


Figura 2 – Resultados da corrida do modelo de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ_MOD para a totalidade do sistema aquífero de Torres Vedras

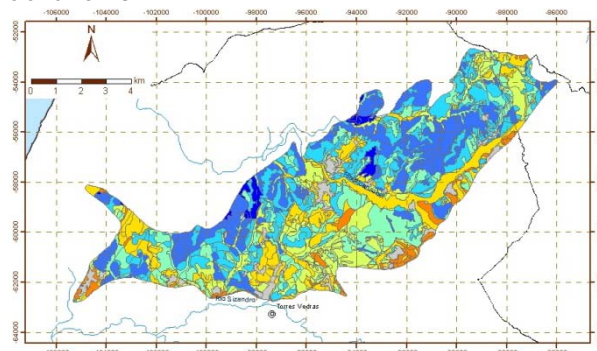
Cenário 11



Cenário 12



Cenário 13



Cenário 14

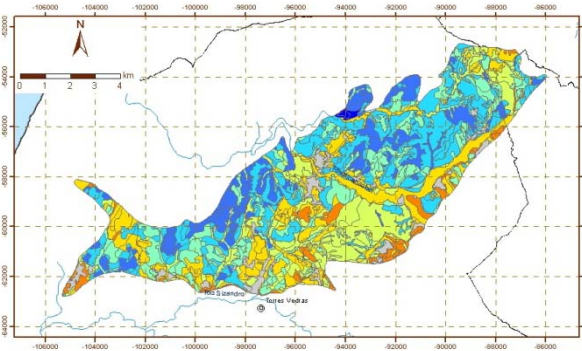
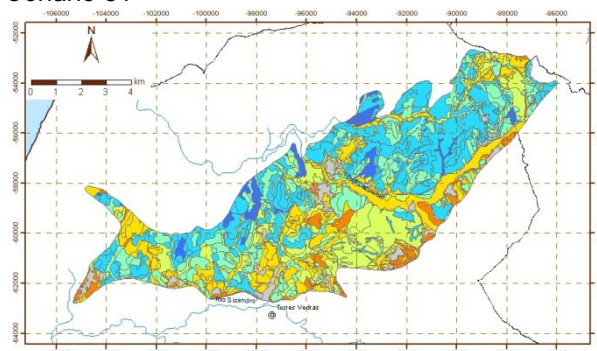
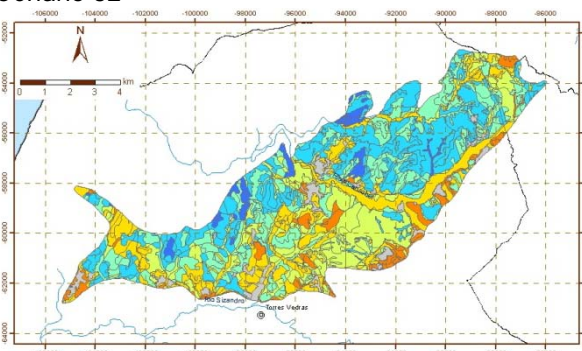


Figura 3 – Resultados da corrida do modelo de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ_MOD para o modelo ENSEMBLES, horizonte 2050 (Identificação de cenários: Quadro 5, Legenda: Figura 11)

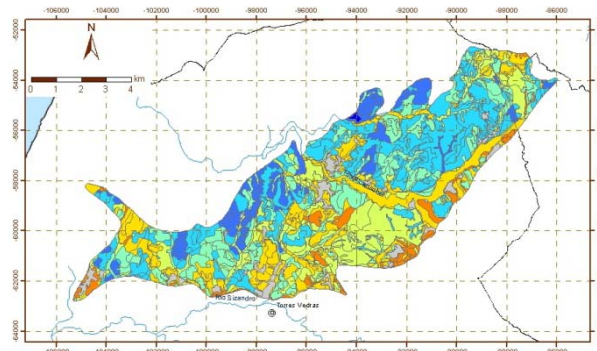
Cenário 31



Cenário 32



Cenário 33



Cenário 34

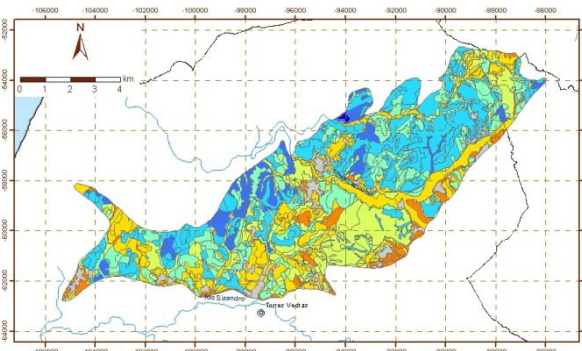
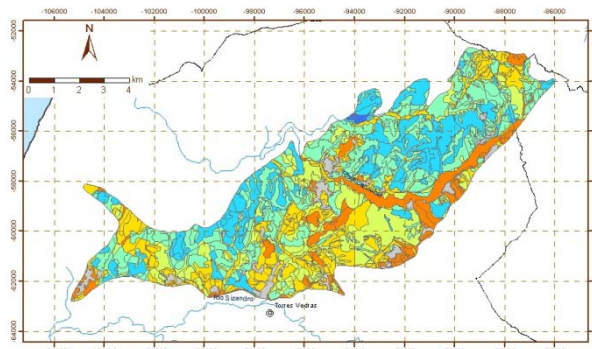
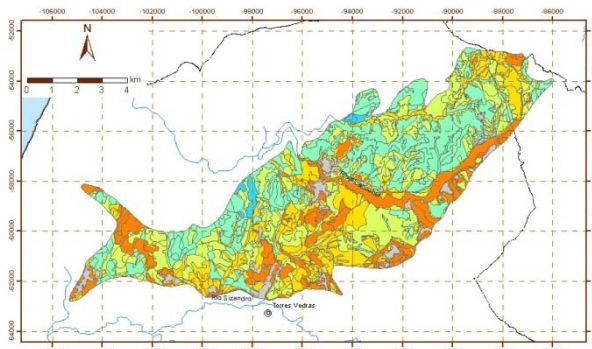


Figura 4 – Resultados da corrida do modelo de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ_MOD para o modelo SMHIRCA_ECHAM, horizonte 2050 (Identificação de cenários: Quadro 5, Legenda: Figura 11)

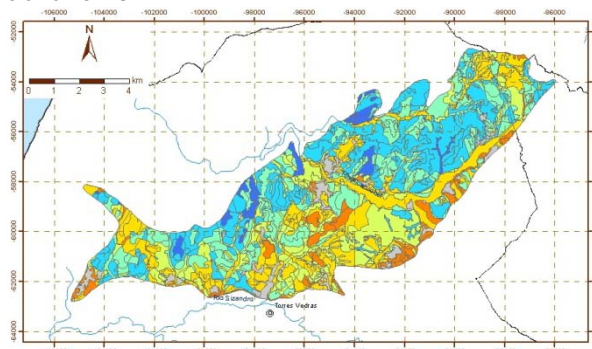
Cenário 21



Cenário 22



Cenário 23



Cenário 24

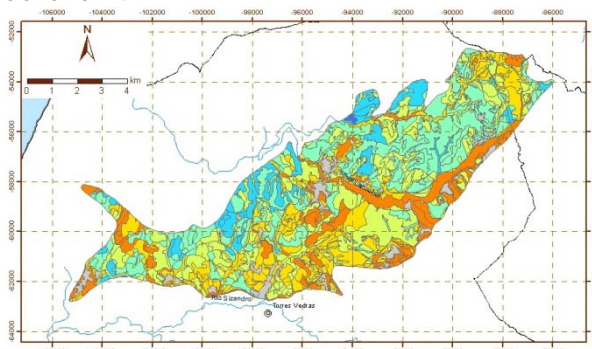
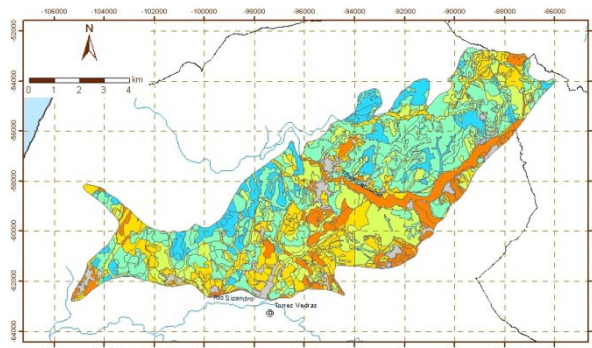
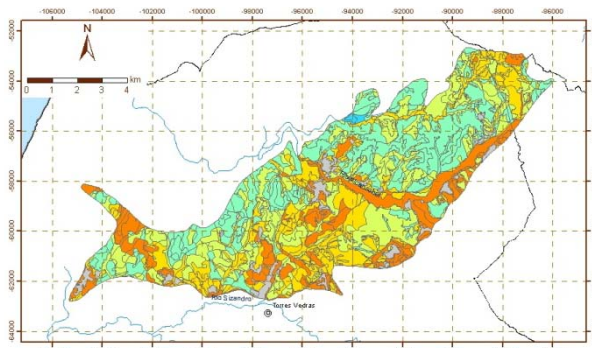


Figura 5 – Resultados da corrida do modelo de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ_MOD para o modelo ENSEMBLES, horizonte 2080 (Identificação de cenários: Quadro 5, Legenda: Figura 11)

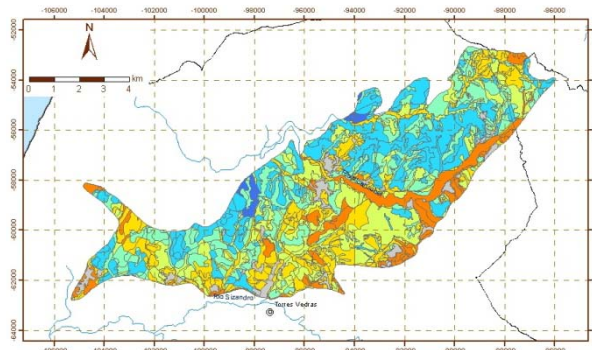
Cenário 41



Cenário 42



Cenário 43



Cenário 44

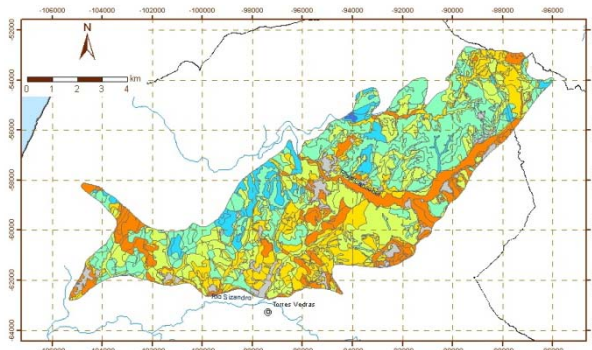
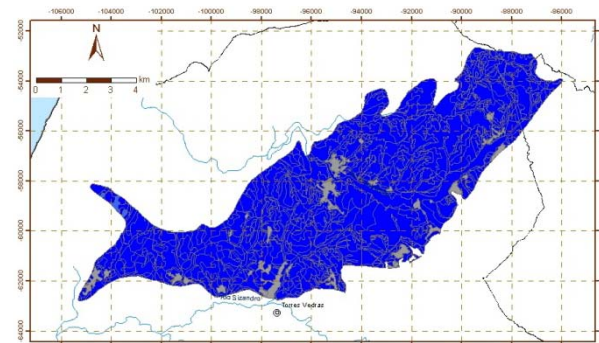
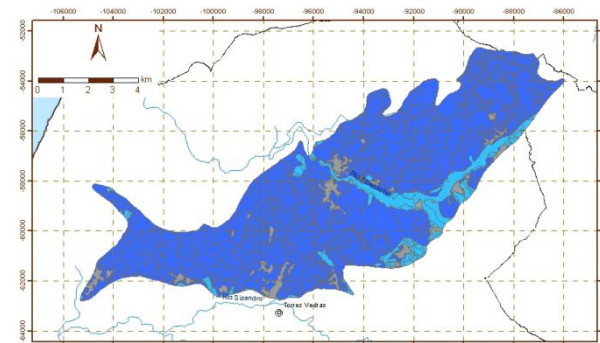


Figura 6 – Resultados da corrida do modelo de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ_MOD para o modelo SMHIRCA_ECHAM, horizonte 2080 (Identificação de cenários: Quadro 5, Legenda: Figura 11)

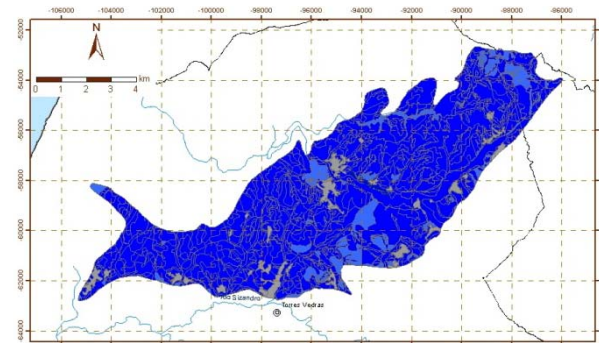
Cenário 11



Cenário 12



Cenário 13



Cenário 14

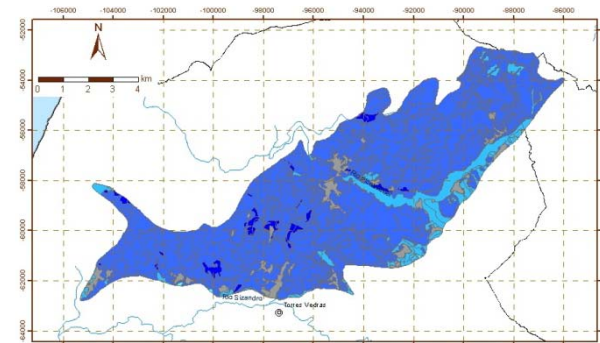
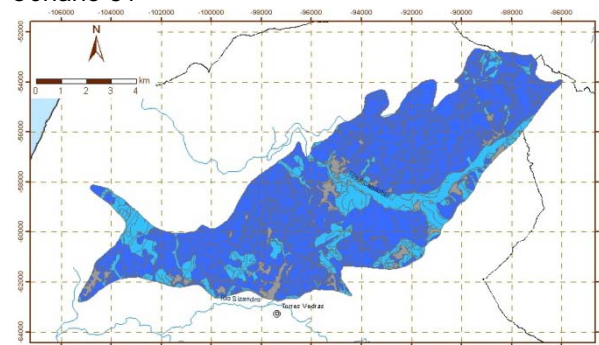
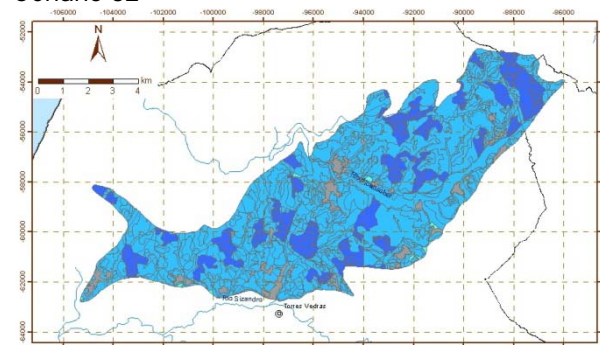


Figura 7 – Variação da recarga estimada pelo BALSEQ_MOD para o modelo ENSEMBLES em relação à recarga da série 1979-2009, horizonte 2050 (Identificação de cenários: Quadro 5, Legenda: Figura 12)

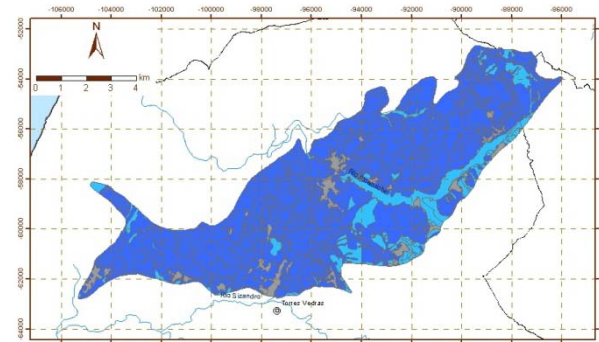
Cenário 31



Cenário 32



Cenário 33



Cenário 34

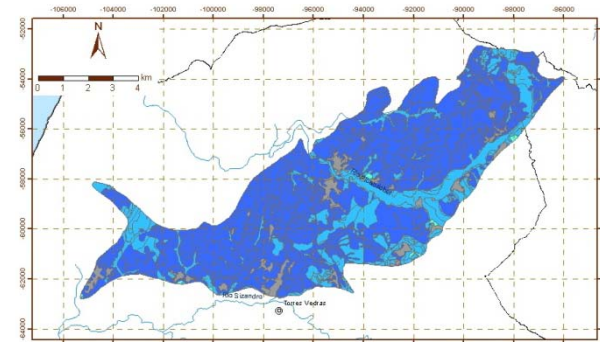
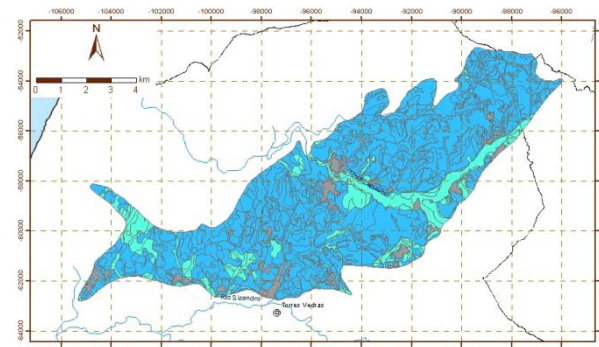
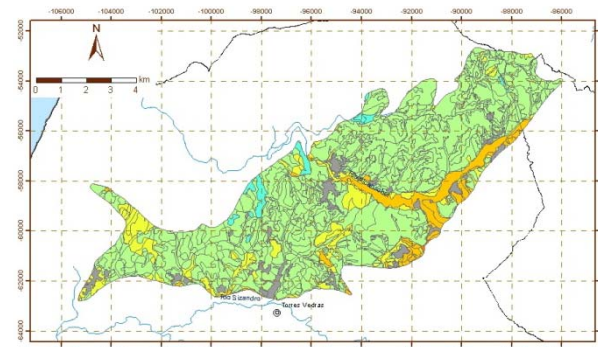


Figura 8 – Variação da recarga estimada pelo BALSEQ_MOD para o modelo SMHIRCA_ECHAM em relação à recarga da série 1979-2009, horizonte 2050 (Identificação de cenários: Quadro 5, Legenda: Figura 12)

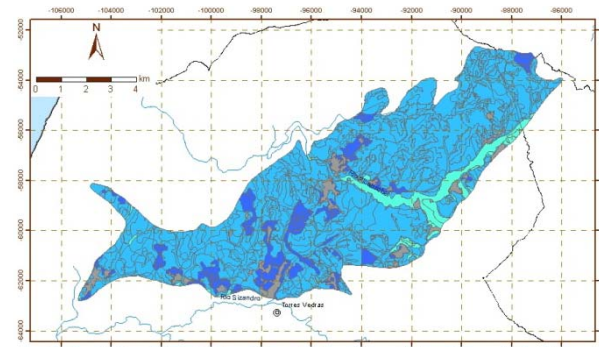
Cenário 21



Cenário 22



Cenário 23



Cenário 24

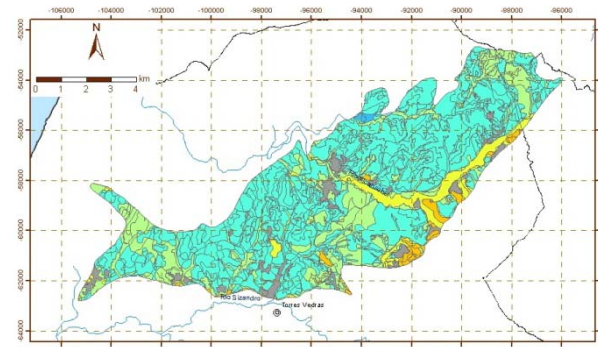
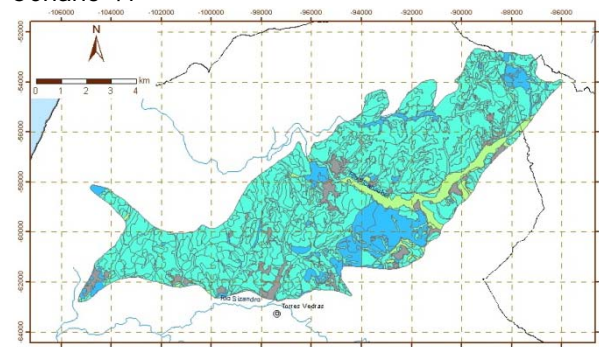
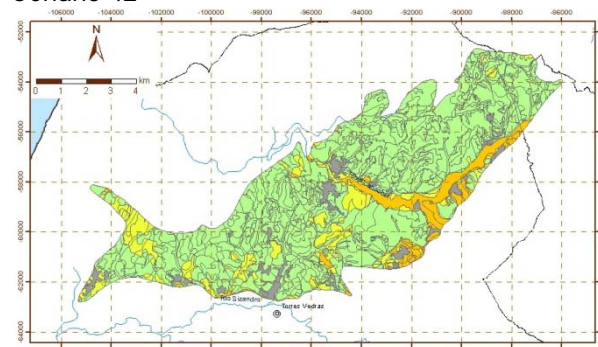


Figura 9 – Variação da recarga estimada pelo BALSEQ_MOD para o modelo ENSEMBLES em relação à recarga da série 1979-2009, horizonte 2080 (Identificação de cenários: Quadro 5, Legenda: Figura 12)

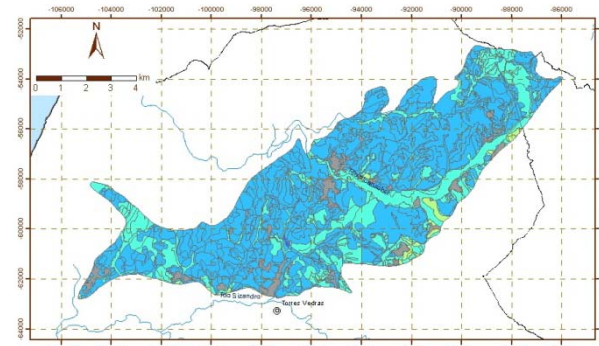
Cenário 41



Cenário 42



Cenário 43



Cenário 44

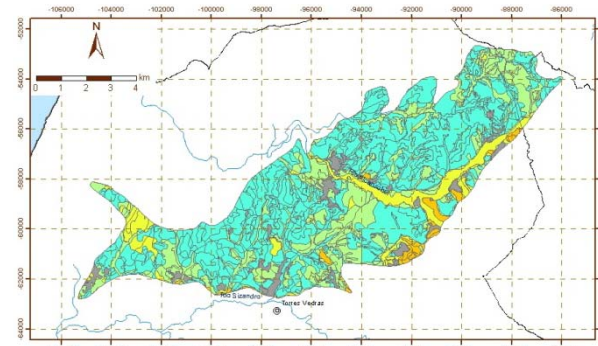


Figura 10 – Variação da recarga estimada pelo BALSEQ_MOD para o modelo SMHIRCA_ECHAM em relação à recarga da série 1979-2009, horizonte 2080 (Identificação de cenários: Quadro 5, Legenda: Figura 12)

Recarga anual média (mm/ano)



Figura 11 – Legenda das Figura 3 a Figura 6

Relação recarga cenário / Recarga 1979-2009

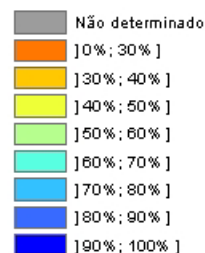


Figura 12 – Legenda das Figura 7 a Figura 10

6 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados mostram que os modelos são muito sensíveis quer à distribuição da precipitação, quer ao valor da evapotranspiração.

Se se comparar os métodos de cálculo das séries de precipitação verifica-se que aquele que elimina os mínimos das séries por estação do ano produz resultados de recarga sempre mais elevados do que aquele que aplica a taxa de variação constante por estação do ano a toda a série. Isto explica-se pela formulação subjacente ao modelo BALSEQ uma vez que precipitações menores tendem a ficar armazenadas no solo e a serem evapotranspiradas, não constituindo por isso recarga de aquíferos.

Comparando as corridas que utilizam a evapotranspiração actual (série 1979-2009) ou a modificada de acordo com as estimativas de variação das temperaturas, verifica-se que as séries modificadas originam maiores reduções da recarga, o que se explica por maior quantidade de água ser evapotranspirada.

Em qualquer dos casos apontados, as taxas de variação de recarga menores ocorrem para as corridas que utilizam a evapotranspiração actual e que utilizam como método de cálculo da série de precipitação aquele que preserva os seus valores mais elevados (ou seja que elimina os mínimos das séries).

Verifica-se que os resultados obtidos também variam em função do modelo de alterações climáticas. Tomando o horizonte de 2050, as variações previstas pela média dos modelos ENSEMBLES apontam para reduções da recarga anual média do sistema aquífero de Torres Vedras entre 11% e 2%, dependendo da forma de estimar as séries de precipitação e de evapotranspiração de referência. Já o modelo SMHIRCA_ECHAM5 estima reduções que podem ser superiores, entre 16% e 11%. Esta situação deve-se a uma taxa de variação positiva superior nos meses de Inverno no caso do modelo ENSEMBLES.

Para o horizonte de 2080, as variações previstas são muito superiores: a média dos modelos ENSEMBLES, origina reduções entre 39% e 18% da recarga anual média e o modelo SMHIRCA_ECHAM5 origina reduções entre 40% e 22%.

Em resumo, para o horizonte de 2050 prevê-se que a recarga média do sistema aquífero de Torres Vedras seja entre 84% e 98% da recarga do período 1979-2009, dependendo das séries de precipitação, temperaturas, e de evapotranspirações de referência utilizadas. Para o horizonte de 2080, dependendo das séries climáticas utilizadas, a recarga média será de 60% a 82% da recarga do período 1979-2009.

AGRADECIMENTOS

Estudo desenvolvido no âmbito dos estudos "Gestão quantitativa de sistemas aquíferos" (Proc. LNEC 0607/11/17760) e "Alterações Climáticas e Águas Subterrâneas" (Proc. LNEC 0607/11/17762) do Plano de Investigação Programada do LNEC para o Quadriénio 2009-2012, e do Plano de Bacia Hidrográfica das Ribeiras do Oeste – Lote 2: Recursos Hídricos Subterrâneos (Proc. LNEC 0607/11/17628).

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, nr. 56.

Impactos das Alterações Climáticas Relacionados com os Recursos Hídricos (2010) – Região Hidrográfica do Vouga, Mondego, Lis e Ribeiras do Oeste (RH4) (versão de trabalho). Estratégia Nacional de Adaptação aos Impactos das Alterações Climáticas Relacionados com os Recursos Hídricos. Lisboa, Agosto 2010, pp. 49.

IPCC (1992) – Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. In: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_supplementary_report_1992_wg1.shtml.

IPCC (1995) – IPCC Second Assessment Climate Change 1995. In: <http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd-assessment/2nd-assessment-en.pdf>.

LOBO FERREIRA, J.P. (1981, 1982) – "Mathematical Model for the Evaluation of the Recharge of Aquifers in Semiarid Regions with Scarce (Lack) Hydrogeological Data". Proceedings of Euromech 143/2-4 Setp. 1981, Rotterdam, A.A. Balkema (Ed. A. Verruijt e F.B.J. Barends). Também: 1982, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Memória N° 582.

LOBO FERREIRA, J.P.; VAZ PINTO, I.; MONTEIRO, J.P.; OLIVEIRA, M.M.; LEITÃO, T.E.; NUNES, L.; NOVO, M.E.; SALVADOR, N.; POMBO, S.; SILVA, M.F.; IGREJA, A.; NUNES, J.F.; LEAL, G.; HENRIQUES, M.J.; SILVA, D.; OLIVEIRA, L.; MARTINS, T.; MARTINS, R.; MONTE, M.; MARTINS, J.; BRACEIRO, A.; HENRIQUES, R.S.; QUARESMA, M. (2011) – Plano das bacias hidrográficas das Ribeiras do Oeste - Lote 2: Recursos Hídricos Subterrâneos (Versão de Agosto de 2011). Consórcio Hidroprojecto/LNEC/ICCE. Rel. 290/2011 – NAS. Estudo realizado para a Administração da Região Hidrográfica do Tejo, I.P., 597pp.

OLIVEIRA, M.M. (2004, 2006) – "Recarga de águas subterrâneas: Métodos de avaliação". Doutoramento em Geologia (Hidrogeologia), Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, 440 pp., 2004. Também: Teses e Programas de Investigação - TPI 42, ISBN 972-49-2093-3, Editora LNEC, 2006.

OLIVEIRA, M.M.; OLIVEIRA, L.; LOBO FERREIRA, J.P. (2008) – "Estimativa da recarga natural no sistema aquífero de Querença-Silves (Algarve) pela aplicação do modelo BALSEQ_MOD". 9.º Congresso da Água. 2 a 4 de Abril de 2008, Cascais, 15 pp.

OLIVEIRA, M.M.; MARTINS, T.A.; LOBO FERREIRA, J.P. (2012) – "Avaliação da recarga dos sistemas aquíferos abrangidos pelas regiões hidrográficas do Vouga, Mondego, Lis, Ribeiras do Oeste e Tejo". 11.º Congresso da Água. 6 a 8 de Fevereiro de 2012, Porto, 15 pp.

SIAM, 2006 – Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação. Projecto SIAM II. Santos e Miranda (editores). Editora Gradiva, pp. 505.