



Lisboa, 5-6 Março 2009



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

Alterações Climáticas e Águas Subterrâneas

Novo, M. E., Lobo Ferreira, J. P.

Considerações gerais

As alterações climáticas afectam o ciclo hidrológico num conjunto de efeitos conjugados de:

- Variação de temperatura e evapotranspiração
- Variação da precipitação e escoamento/recarga
- Variação do nível do mar e posição da interface água doce/salgada
 - que afecta o volume de recursos hídricos disponíveis para exploração em aquíferos costeiros
- Variação de temperatura, precipitação e ecossistemas
 - que afectam os regimes de infiltração no solo, recarga, escoamento e evapotranspiração

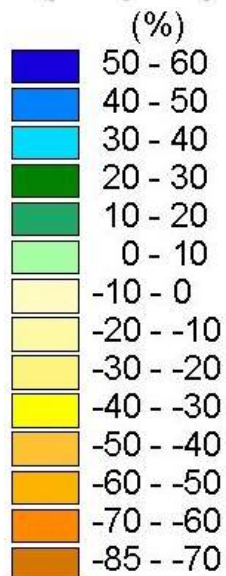
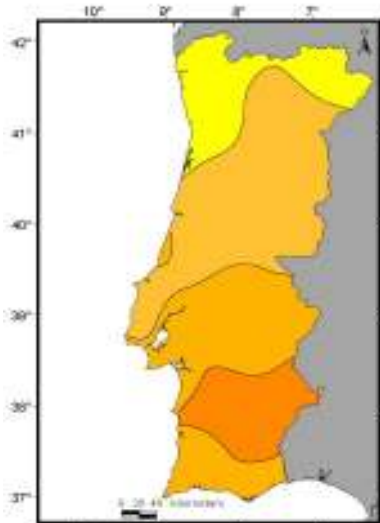
Primeiros estudos

- Os primeiros estudos dos impactos das alterações climáticas sobre o ciclo hidrológico centraram-se sobre a componente superficial:
 - *Alteração dos regimes de precipitação*
 - *Alteração dos regimes de escoamento*
 - *Cheias e secas*
 - *Eventos extremos de precipitação*
- A questão da subida do nível do mar era abordada sempre em termos de vulnerabilidade da perda de terra emersa, destruição dos ecossistemas costeiros e aumento da erosão, ficando em segundo plano ou não sendo abordada a questão do impacto sobre os aquíferos costeiros
- A vulnerabilidade dos aquíferos insulares às alterações climáticas começa por ser levantada pelos países da ASEAN, em especial os países do Pacífico, com particular incidência para os de ilhas de atol, (ilhas de baixo relevo e aquíferos desenvolvidos sobretudo em areias e muito susceptíveis aos efeitos da subida do nível do mar)



Source: stock.xchng, 2004.

Primeiros estudos



© LNEC 2006

National Assessment Team USA (2000)

- primeiros estudos de avaliação de variação a recarga com a variação da precipitação para aquíferos dos Estados Unidos, indiciando redução da recarga para as zonas de climas mais secos (e que sofrerão segundo os modelos climáticos, uma maior redução futura das precipitações)

Projecto GRACE (Younger et al., 2002)

- estudo na zona mediterrânica em aquíferos carbonatados, que indicia redução das recargas com um aumento da variabilidade interanual e deste modo uma maior vulnerabilidade dos recursos neste tipo de aquíferos

SIAM 2 (Santos e Miranda, 2006)

- estudo *landmark* em Portugal. O primeiro a abordar não apenas a componente superficial mas também subterrânea.
- evolução da recarga anual (horizonte 2100) e recarga média sazonal (horizonte 2050) para diferentes regiões do país para um conjunto de cenários de alterações climáticas
- avaliação da evolução temporal dos recursos hídricos em aquíferos cársicos, fracturados e porosos

Estudos LNEC

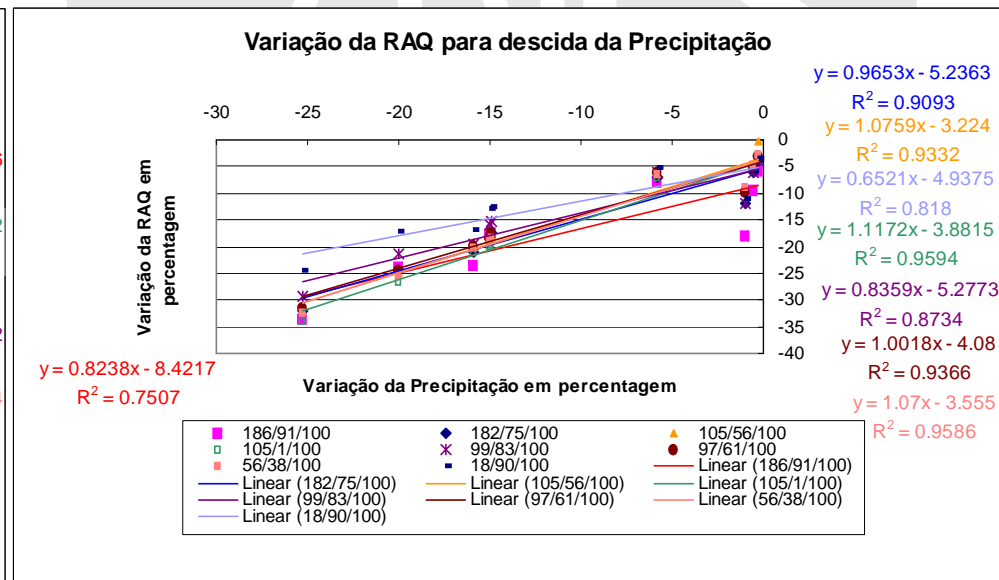
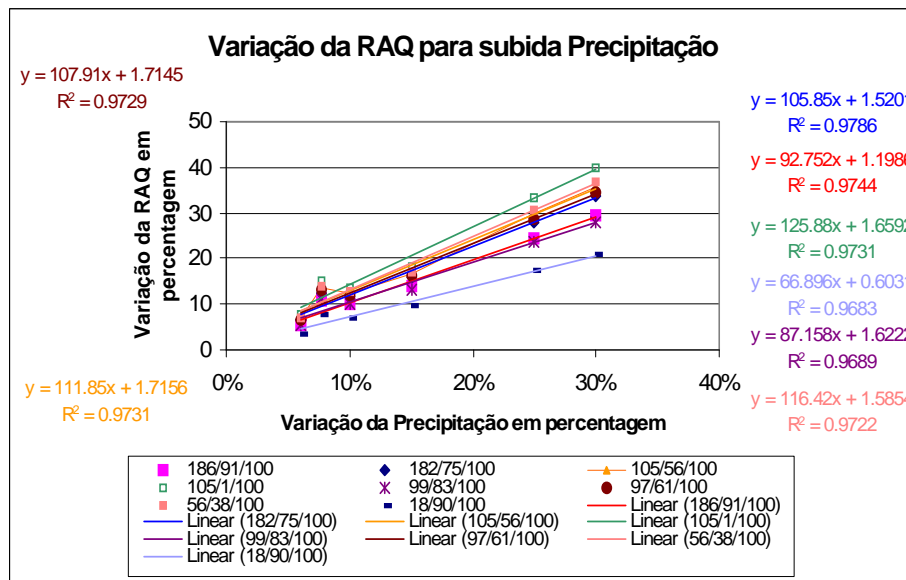
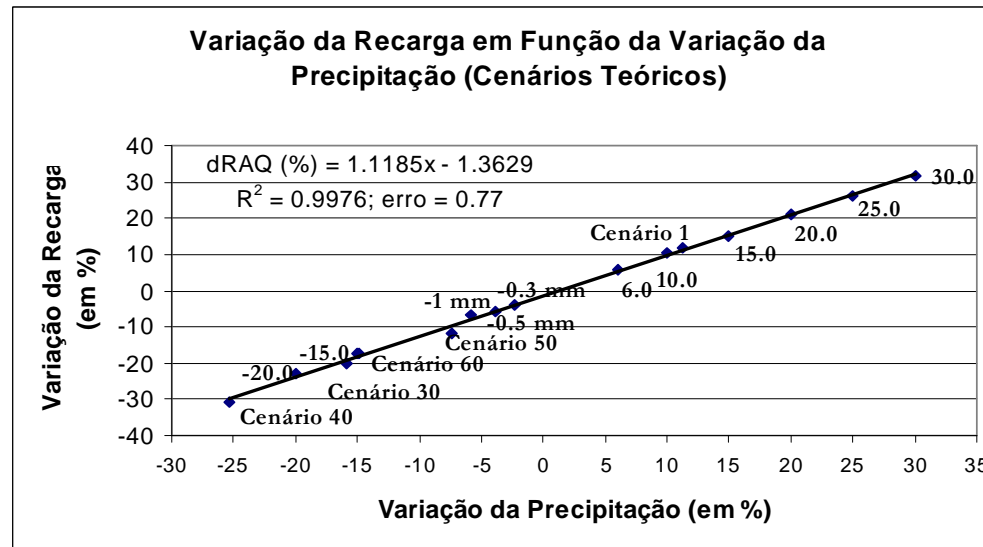
Alterações climáticas/Açores (Novo, 2007)

- Avaliação de variações da recarga para diferentes cenários de precipitação e evapotranspiração, considerando diferentes tipos de solos e coberto vegetal, com quantificação desta variação face aos valores actuais de recarga
- Avaliação da resposta das descargas das nascentes às variações na recarga/ variações na precipitação e evapotranspiração
- Stress hídrico provocado pela variação da recarga e caudais de nascentes, acoplada às alterações previsíveis de consumos devidas às alterações climáticas
- Primeiro esboço de uma metodologia de vulnerabilidade de aquíferos às alterações climáticas considerando:
 - ✓ alterações na recarga
 - ✓ alterações do nível do mar
 - ✓ alterações na qualidade dos recursos hídricos

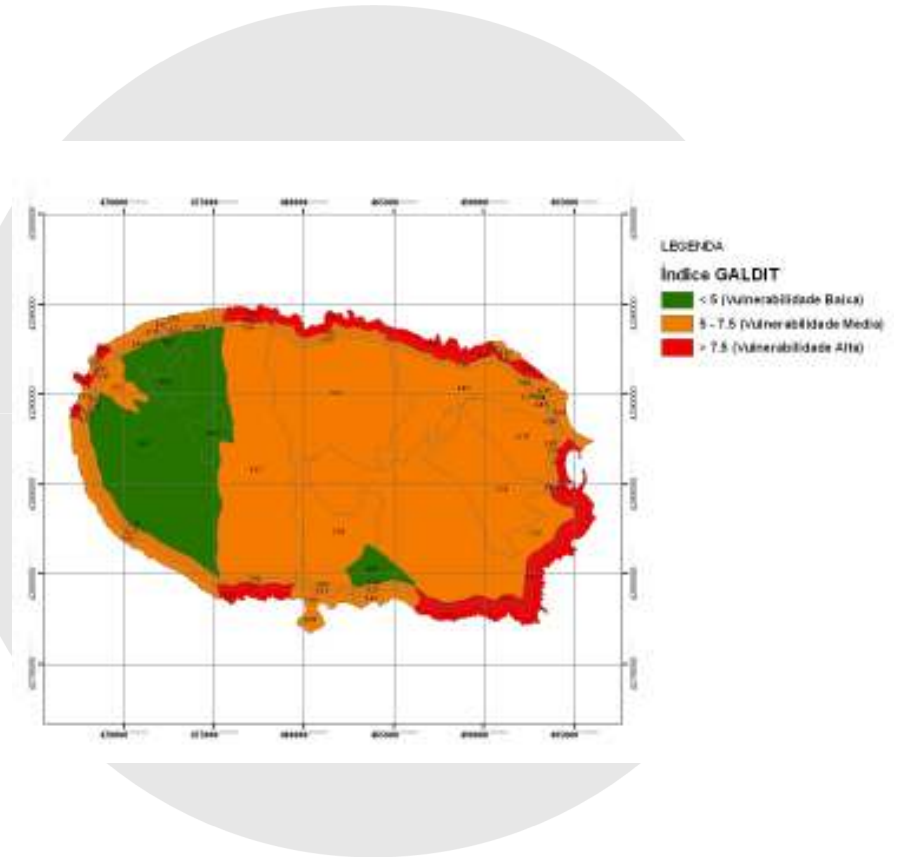
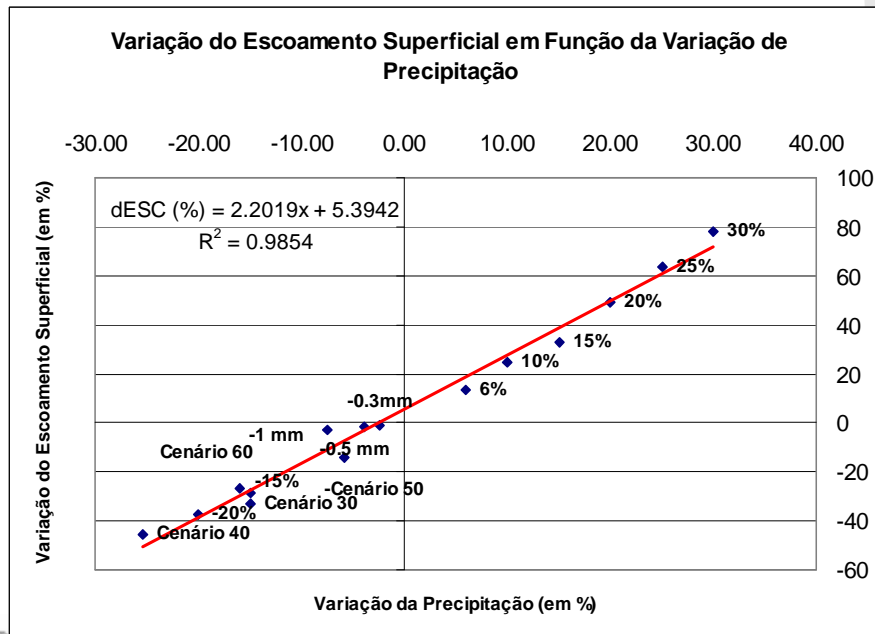
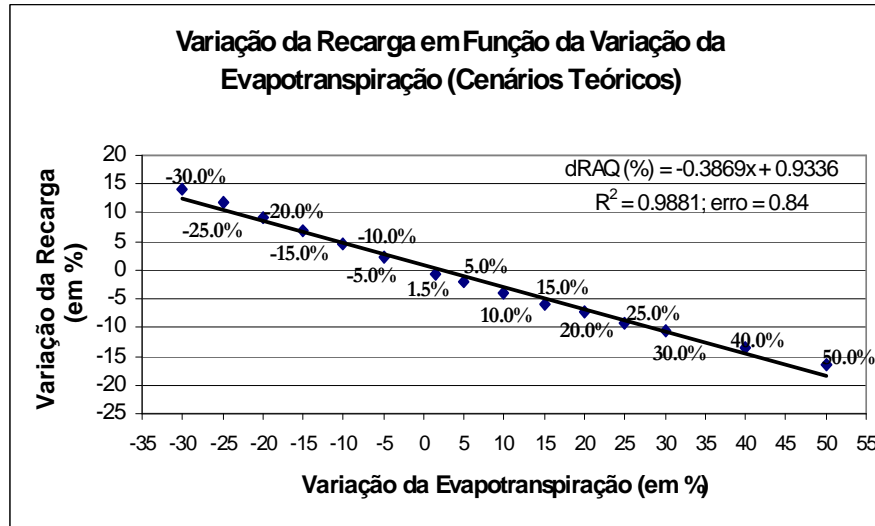
Oliveira e Lobo Ferreira (2006)

- avaliação da variação RAQ num aquífero fracturado (NE Portugal) para séries modificadas de PP, simulando mudanças na PP devidas às alterações climáticas



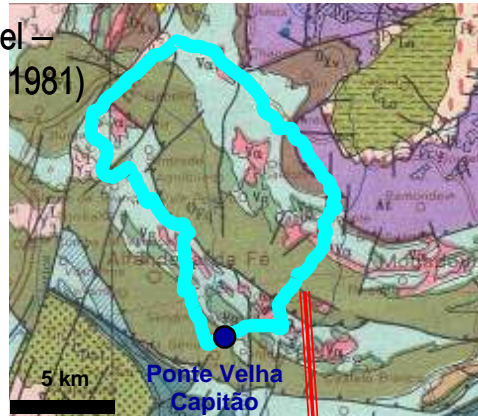
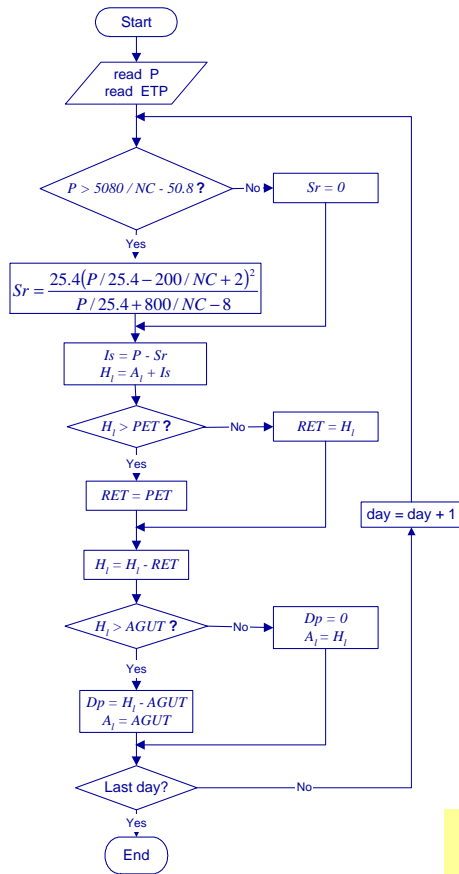


Estudos LNEC

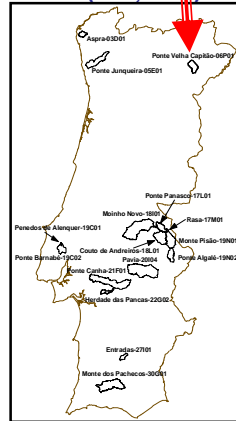


Estudos LNEC

Sequential daily water balance model – the **BALSEQ** model (Lobo Ferreira, 1981)

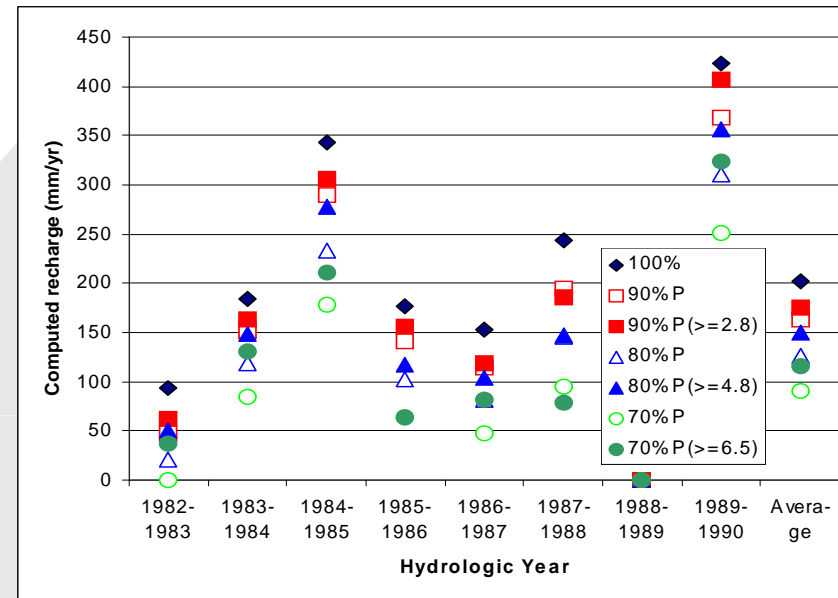


Carta Geológica de Portugal Escala 1:5000 000 (IGM, 1992)



NC = 80
AGUT = 100 mm
hi = 0 mm

9 years
Avg P = 715 mm/yr



- Starting point: source precipitation series - SPS

- 90 % of SPS (1) applying the percentage factor to the SPS – only diminishes the daily amount of precipitation
- 80 % of SPS (2) considering a cut-off value for daily precipitation so that the sum of daily precipitation values larger than that cut-off value would result in the required percentage of SPS – assumes that climatic changes always produce more intensive precipitation episodes
- 70 % of SPS

Novos desenvolvimentos

Impactos de alterações climáticas em aquíferos cársicos:

- Estudos de Ma Teng et al. (2005) na área cársica de Shentou, Frappier (2005) em carsos de Belize, Benderev et al. (2008) nos carsos da Bulgária, Ducci e Tranfaglia (2008) na região de Campânia, Helly e Rapti-Caputo nas nascentes cársicas de Yiperia Krini (2008), entre outros indicam que:

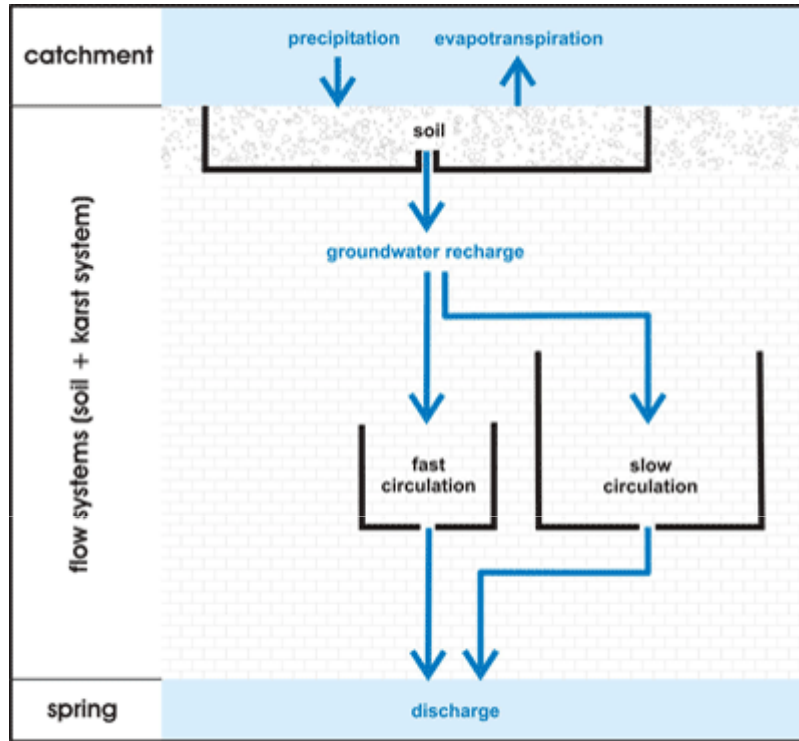
- devido às suas características, são aquíferos são muito sensíveis às alterações climáticas
- os períodos de seca podem ser especialmente críticos (caso da Bulgária, na seca de 1982-1994 houve decréscimos de até 30% das descargas para carsos em rochas pré-câmbricas, jurássicas e cretácicas)
- ao longo do Mediterrâneo os trends de infiltração mostram reduções da ordem dos 30% (ex.: Câmpania), com tendência ao agravamento



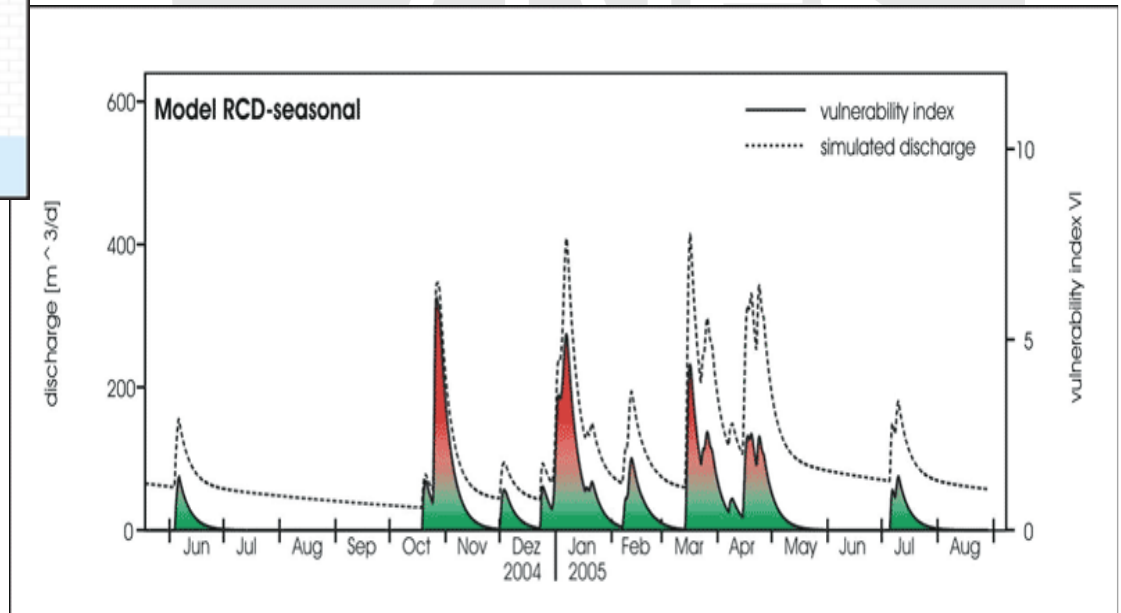
Impactos de alterações climáticas em aquíferos cársticos:

- A variabilidade dos níveis freáticos nestes aquíferos em resposta rápida ao clima e as interacções água-rocha são bons indicadores para o estudo das alterações climáticas podendo inclusive dar indícios sobre as regiões dos carsos mais vulneráveis (ex.: estudo da Bulgária)
- Os estudos isotópicos dos espeleotemas e sedimentos cársticos, em especial quando acoplados com a análise de série temporais de dados podem dar pistas sobre variações ambientais e deste modo sobre os impactos das alterações climáticas e acções humanas associadas sobre a evolução dos aquíferos cársticos, assim como ajudar à previsão
- O estudo dos isótopos dos espeleotemas em Belize, por exemplo, assinalou eventos como El Niños e furacões (registo de 23 anos)
- A modelação matemática do funcionamento destes sistemas pode ser usada para definir a vulnerabilidade, podendo ser aplicada a cenários futuros e deste modo determinar a vulnerabilidade dos carsos às alterações climáticas (Bustscher e Huggenberger, 2008)

Novos desenvolvimentos



Conceptual model of karst groundwater flow and storage as the basis for numerical rainfall-discharge models



The modeled time series of the vulnerability index V can be used to analyze the time dependence of vulnerability.

Novos desenvolvimentos

Impactos das alterações climáticas e subida do nível do mar em aquíferos costeiros:

- Estudos de Carneiro et al. (2006) num aquífero marroquino, Silva (2006), Silva e Ribeiro (2006) de optimização da gestão de aquíferos em cenários de subida do nível do mar, Mizuno e Ibaraki (2007) em aquíferos heterogéneos, Feseker (2007) num aquífero do norte da Alemanha, Vanderbohede et al. (2008) num aquífero heterogéneo belga apontam para que:

- em aquíferos costeiros heterogéneos (permeabilidades heterogéneas) a zona de transição é mais larga do que em meios homogéneos e que com o avanço da cunha salina devido à subida do nível do mar esta largura aumenta grandemente
- este aumento é mais acentuado quanto maior for a heterogeneidade das permeabilidades

Novos desenvolvimentos



- isto indica que a subida do nível do mar devido às alterações climáticas pode diminuir significativamente os recursos hídricos e que a água salobra pode avançar entre +10 a +50%
- estas modificações alteram o fluxo de água, a qualidade da água e sua distribuição espacial, a recarga e as descargas naturais. O estudo belga, numa área de dunas e polder, para cenário de **subida de recarga** (+15%) e do nível do mar mostra, para um horizonte de 100 anos, um aumento do fluxo para o polder e diminuição para o mar pela subida do nível do mar e aumento de fluxo para ambas as zonas pela subida da recarga, donde o resultado final é um balanço entre os dois efeitos, mas com alterações na posição da interface e com aumento do nível de água nas dunas, alterando o seu equilíbrio ecológico e o regime de drenagem dos polder
- no aquífero marroquino de Saïdia, modelado em função dos vários cenários do IPCC, considerando diferentes subidas do nível do mar e recargas, indica um grande declínio nos recursos hídricos renováveis e aumentos bastante grandes de salinidade (junto à área mais próxima da zona de avanço da linha de costa). As reduções do fluxo de água doce podem ir até aos 60% e mesmo com a influência estabilizadora do rio podem decrescer até aos 30%

Novos desenvolvimentos

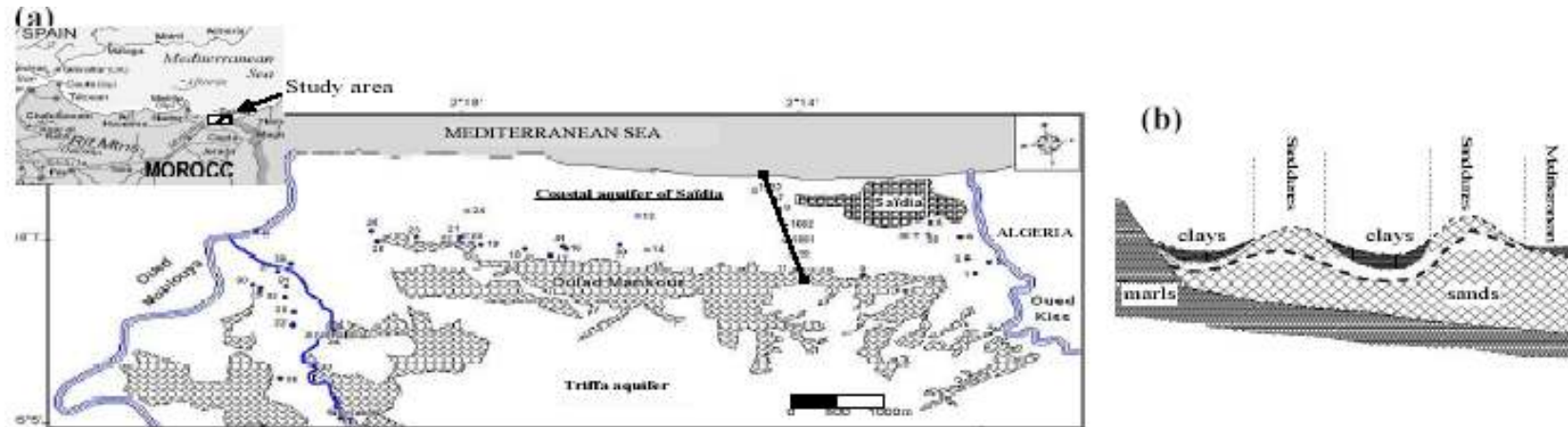


Figure 1. a) map of the study area; b) schematic N-S cross section

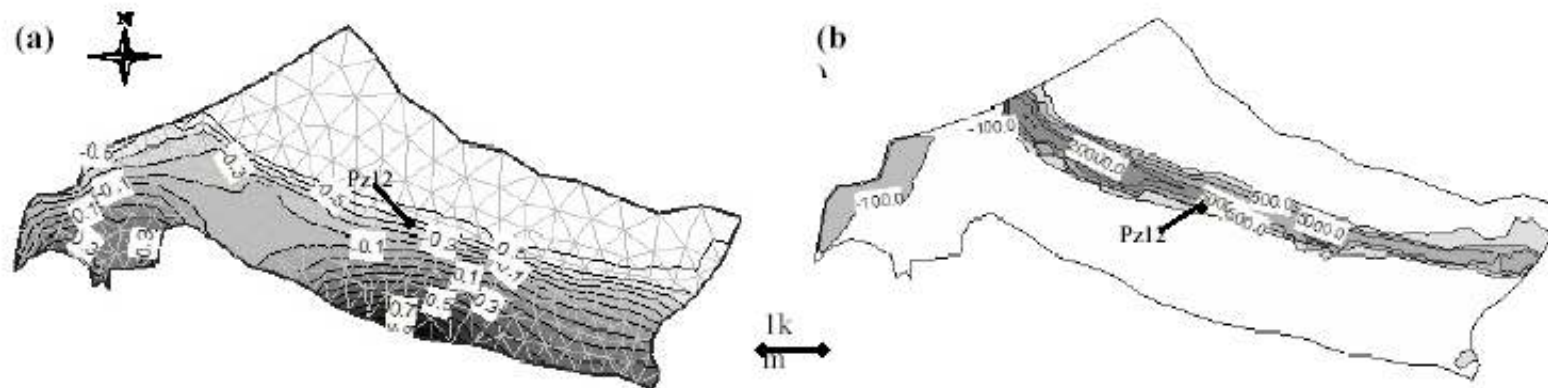
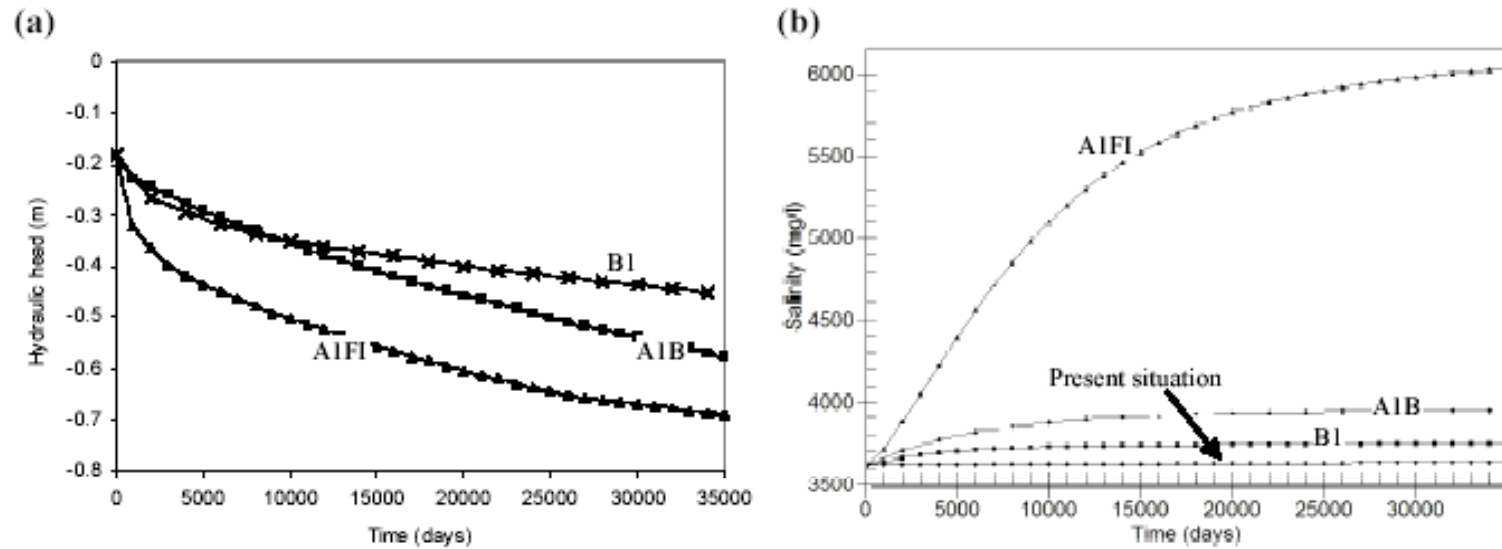


Figure 2. AIFI simulations at 35000 days: a) Decrease in hydraulic head (m). Also shown the finite element mesh; b) Variation of salinity (mg/l)

Novos desenvolvimentos



**Figure 3. a) Decrease in hydraulic head near the Moulouya (m);
b) Increase in salinity expected at piezometer Pz12.**

- no estudo do aquífero alemão que se foca sobre os factores controladores da forma e posição da cunha salina, considerando os efeitos das alterações na recarga, nível do mar e diferentes medidas de drenagem num sistema com 2 aquíferos, e ligação hidráulica a uma zona pantanosa, verifica-se que as trocas entre a água subterrânea e a zona pantanosa são um dos processos chave influenciadores da evolução da cunha salina

Novos desenvolvimentos

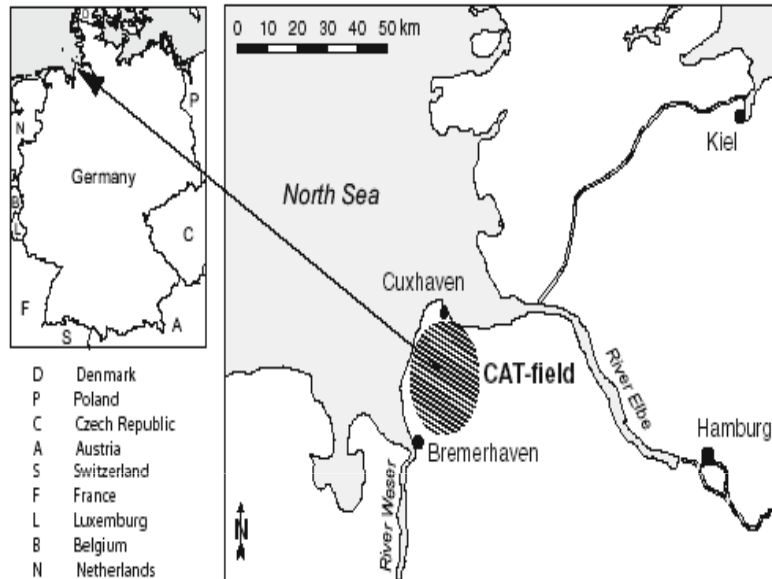


Fig. 1 The coastal aquifer test-field (CAT-field) is located in northwestern Germany, between the estuaries of the rivers *Elbe* and *Weser*

Modelação matemática feita com o modelo SWIMMOC (Feseker, 2004) considerando 4 cenários de alterações climáticas

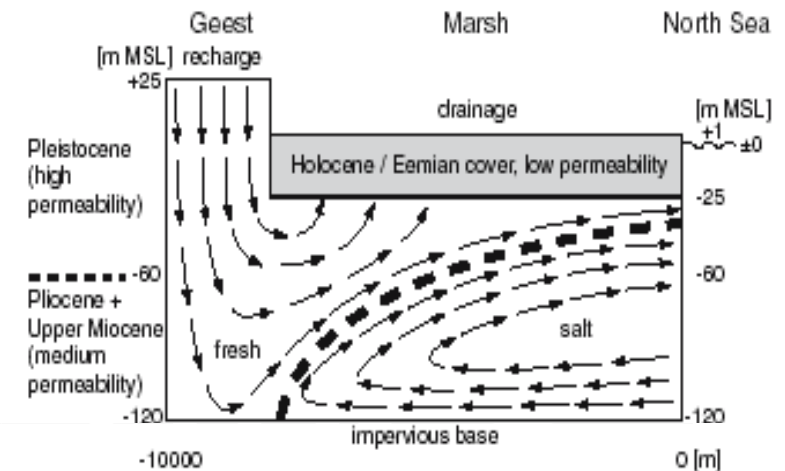


Fig. 3 Conceptual model of a representative cross-section through the upper aquifer. In the *marsh* region, the aquifer is overlain by a low-permeability cover layer, which represents the *Eemian* and *Holocene* deposits. To account for the different lithologies of the upper (*Pleistocene*) and lower (*Pliocene* and *Upper Miocene*) part of the aquifer, it is assumed that the hydraulic conductivity is significantly lower below a depth of -60 m MSL. Groundwater recharge is limited to the *geest* ridge on the inland boundary of the cross-section. Saltwater intrudes into the aquifer from the seaward boundary along the impervious base and forces the fresh groundwater upward, where it is either drained or discharged into the *North Sea*

Novos desenvolvimentos



- observa-se novamente um alargamento da zona de mistura na área de variação das propriedades hidráulicas
- a subida do nível do mar origina uma rápida progressão da cunha salina para o interior
- variações da recarga (subida) eram essencialmente compensadas pelas medidas de drenagem na zona pantanosa, tendo um impacto menor na posição da cunha salina
- o nível da drenagem controla a profundidade da interface salina na zona pantanosa (uma redução no nível da drenagem de 0,5 m pode causar uma subida de 20 m da interface)
- uma subida continuada do nível do mar leva a uma subida linear da concentração salina na área modelada, com uma progressiva salinização do pântano, da linha de costa para o interior
- isto pode levar a uma salinização dos solos

Novos desenvolvimentos

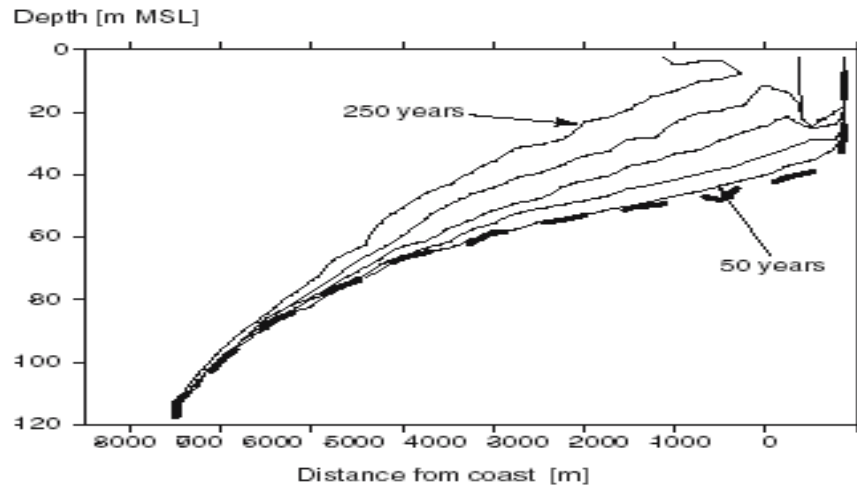


Fig. 12 The sea level is rising at a rate of 0.5 m per century. The *thin lines* mark the position of the freshwater/saltwater interface after 50–250 years of simulated time at increments of 50. The *thick-dashed line* shows the initial position of the interface, which is at equilibrium with a sea level of 0 m MSL.

sistema continuará a evoluir mesmo se nada mais mudasse. As medidas de mitigação, do mesmo modo, terão uma lenta resposta, seguindo a mesma escala temporal

- segundo este estudo a lenta resposta do sistema às condições de fronteira (subida do nível do mar, variação da recarga, etc.) indica que é muito possível que as condições actuais não reflectam uma situação de equilíbrio e que o

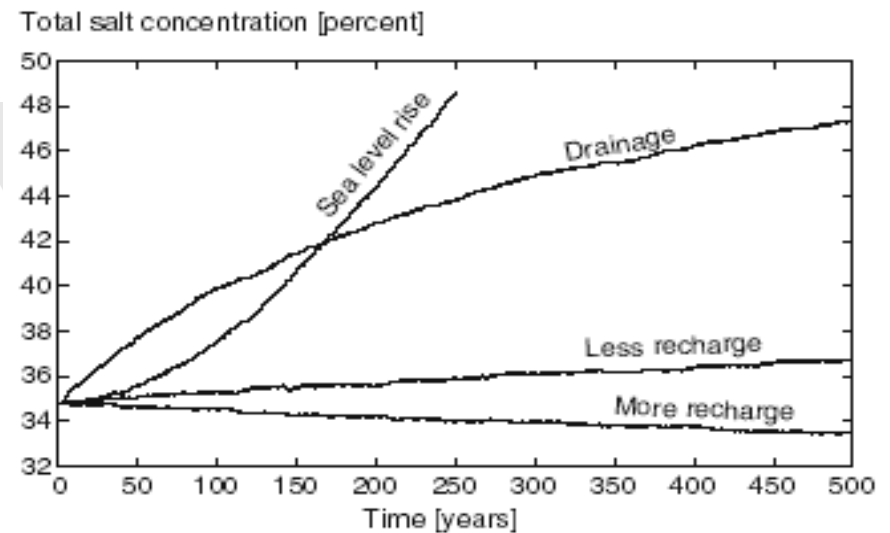


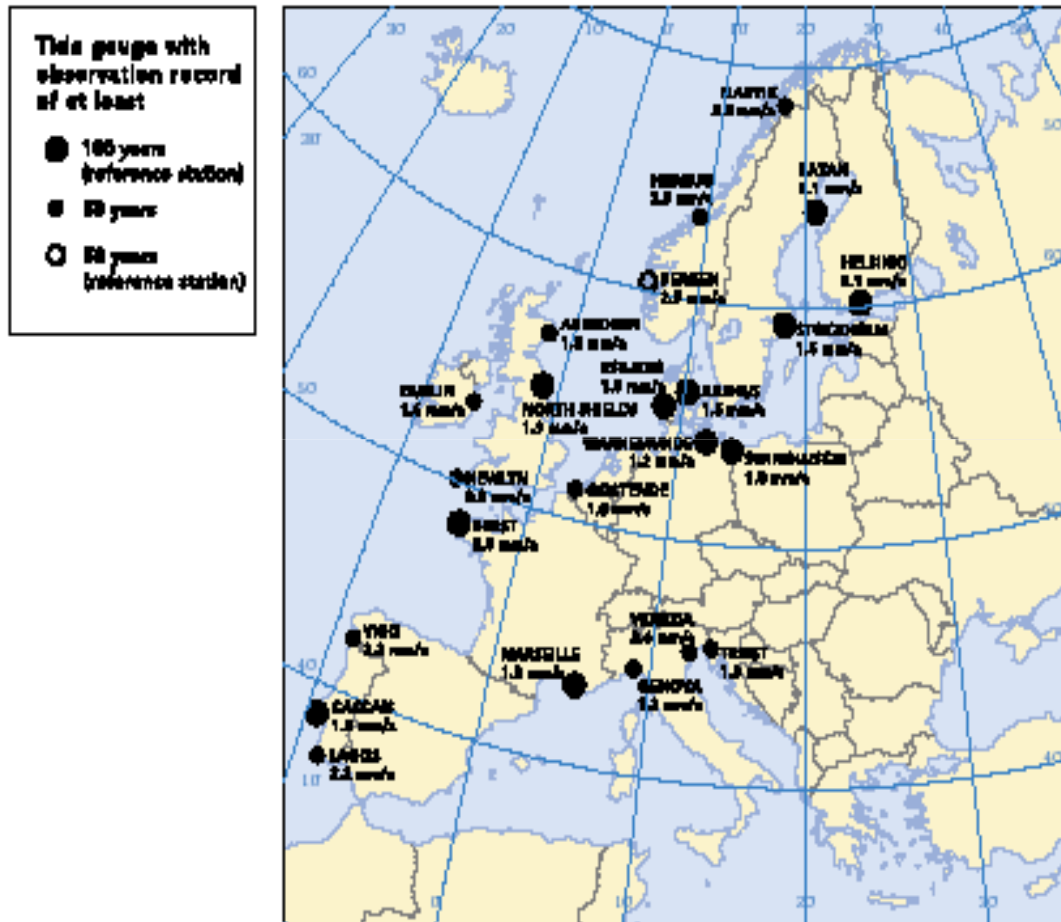
Fig. 14 Comparison of the impact of the studied boundary conditions (*sea level rise, drainage, less recharge, and more recharge*) on the percentage of total salt concentration in the model domain over a span of 500 years

Novos desenvolvimentos



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

Map 3.7 Change of sea level at selected stations in Europe from 1896 to 1996



Note: Data are corrected for post-glacial processes.
Source: Liebsch *et al.*, 2002.

- ainda dentro da questão da otimização da gestão de aquíferos, Silva (2006) fez um estudo nesta área para aquíferos costeiros, considerando a variação do nível do mar e do local de captação, concluindo da necessidade do adequado planeamento dos locais de construção das captações, gestão regrada das extracções e controlo do avanço da intrusão marinha para que os efeitos das alterações climáticas sejam antecipadamente mitigados.

http://www.eea.europa.eu/publications/climate_report_2_2004/impacts_of_europes_changing_climate.pdf

Novos desenvolvimentos

Impactos das alterações climáticas nos regimes de fogos e seus efeitos sobre os recursos hídricos:

- Estudos de Hope (2003), Brown et al. (2004), IPCC (2007), indiciam:
 - um aumento das frequências dos fogos associadas às alterações climáticas em áreas semiáridas (ex.: Mediterrâneo, Califórnia)
 - e regiões que já tiveram uma significativa actividade de fogos ao longo do século XX (ex.: northern Rockies, Great Basin, Southwest in Brown et al., 2004). Nestas regiões, a partir de 2007, quando os níveis de CO₂ tiverem duplicado, o número de dias propensos a fogos aumentará na ordem de semanas
 - os fogos têm impactos ao nível da qualidade e quantidade no ciclo hidrológico. Logo um aumento na frequência dos fogos aumentará os impactos quantitativos e qualitativos sobre o ciclo hidrológico, aos quais se terá de somar os advindos da modificação causada pelas próprias alterações climáticas (PP, EVR, RAQ) e, nas zonas costeiras, a modificação do nível do mar

Novos desenvolvimentos

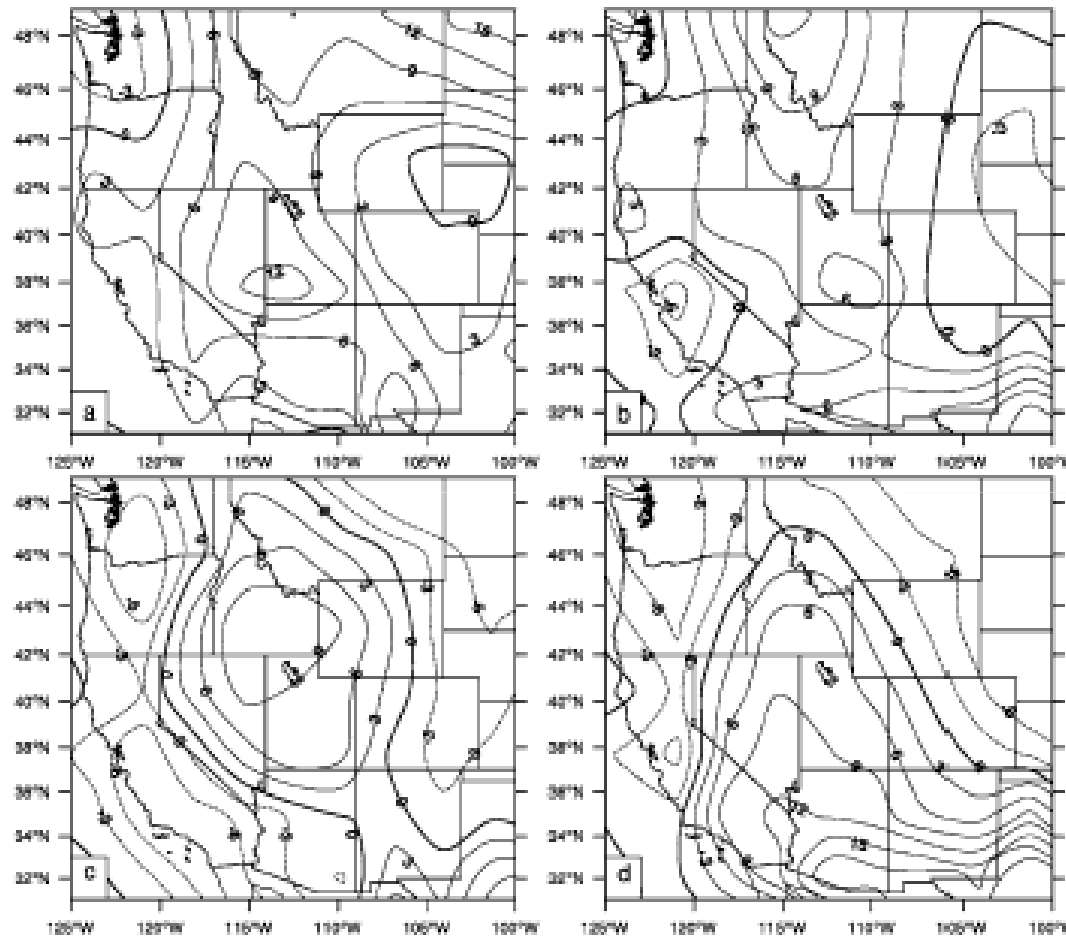
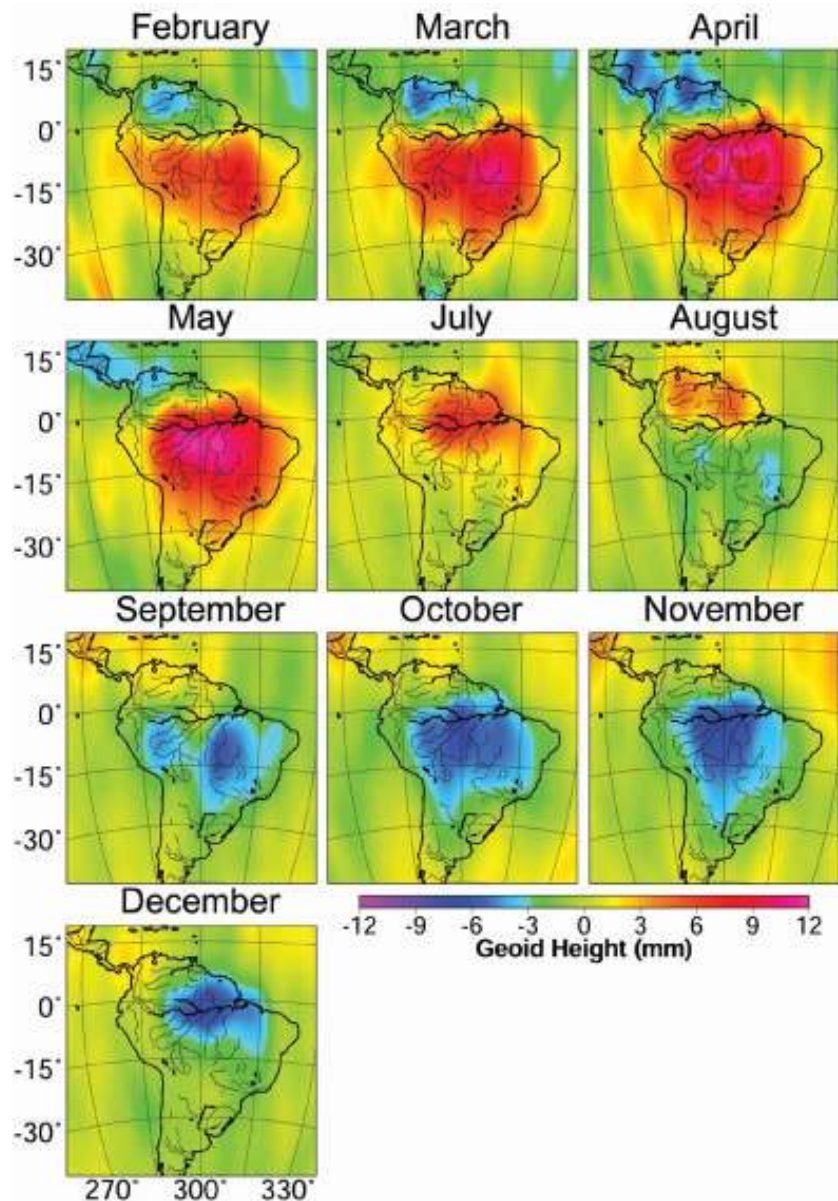


Figure 3. Difference in the mean annual number of days of minimum relative humidity $\leq 30\%$ from the PCM BAU scenario and the base run period 1975–1996 for (a) 2010–2029, (b) 2030–2049, (c) 2050–2069, and (d) 2070–2089.

– os fogos afectam o coberto vegetal e a sucessão dos tipos de vegetação, o que por sua vez tem influência no ciclo hidrológico



Áreas de desenvolvimento futuro



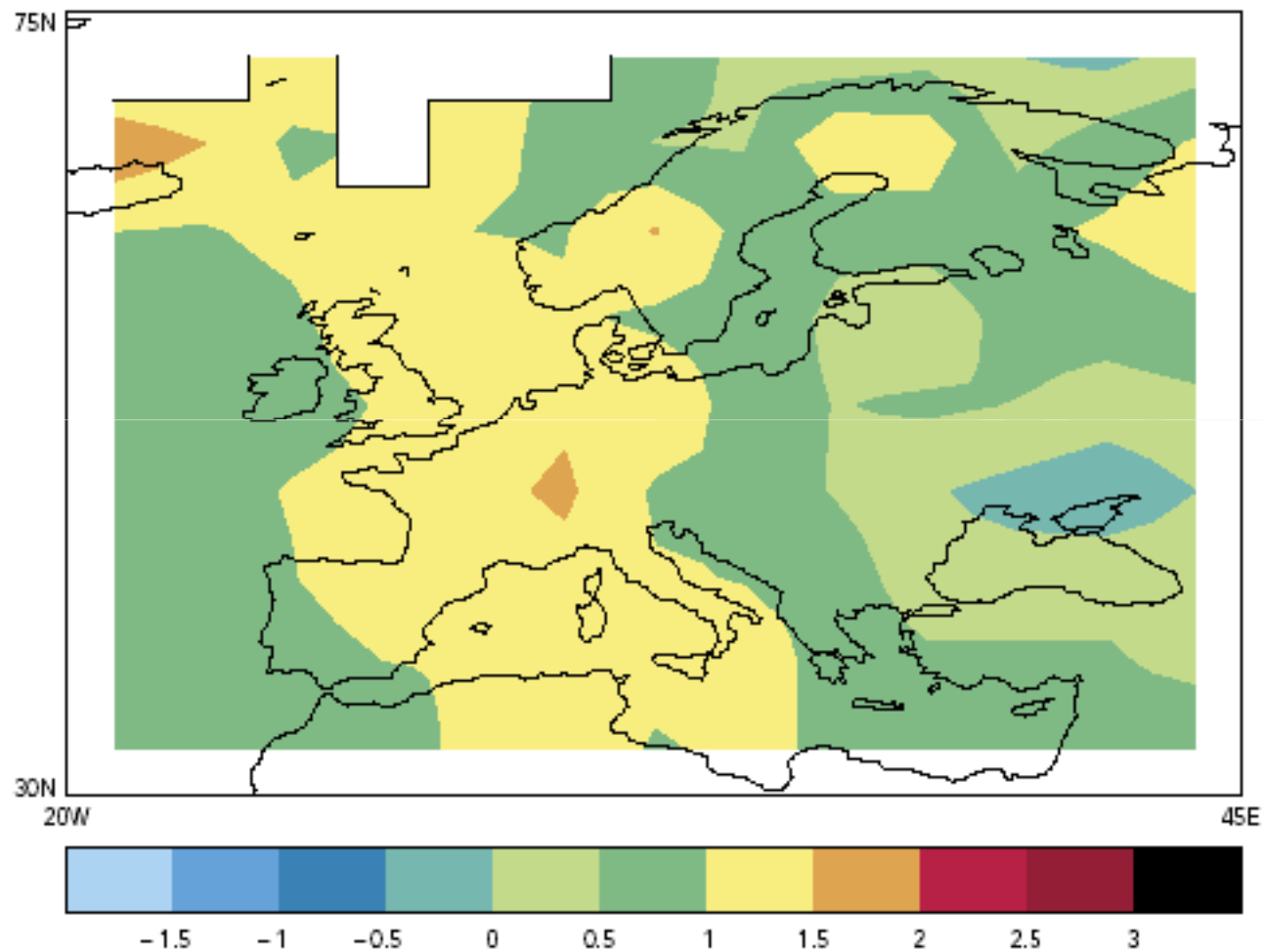
- *As alterações climáticas são um importante aspecto a ter em consideração na gestão e protecção dos recursos hídricos.*
- *Podem constituir uma ameaça a estes recursos – em quantidade e qualidade – nas zonas actualmente propensas a défices hídricos ou que, por via das alterações climáticas, venham a fazer parte de zonas de défices.*
- *Afectam as águas subterrâneas em termos de **quantidade** e **qualidade**, agindo em função de variações: (1) da precipitação, (2) do nível do mar, (3) do coberto vegetal, (3) variabilidade dos fenómenos de precipitação e extremos, (4) **acções humanas de mitigação/adaptação às alterações climáticas.***

Áreas de desenvolvimento futuro

- o Vulnerabilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas em Função da Génese e Estrutura Geológica:
 - Aquíferos Cársicos
 - Aquíferos Fracturados
 - Aquíferos Porosos
- o *Aquíferos Costeiros – impactos da subida do nível do mar, variabilidade nas recargas, alteração na alimentação/recarga dos aquíferos costeiros a partir de aquíferos a montante*
- o *Alterações Climáticas e Qualidade das Águas Subterrâneas*
- o *Alterações Climáticas, Fogos e Impactos sobre a Quantidade e Qualidade das Águas Subterrâneas*
- o *Eco-hidrologia – a modificação do coberto vegetal (e em consequência da água alocada para a recarga) em função das alterações climáticas*



Map 3.1 Annual temperature deviation in Europe in 2003



Note: Temperature deviation, relative to average temperature from 1961–1990 (°C).

Source: CRU, 2003; Jones and Moberg, 2003.

http://www.eea.europa.eu/publications/climate_report_2_2004/impacts_of_europes_changing_climate.pdf