

# SPI E SEVERIDADE DA SECA EM CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS. APLICAÇÃO AO SUL DE PORTUGAL

## SPI DROUGHT SEVERITY UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS. APPLICATION IN SOUTHERN PORTUGAL

### Ana Paulo

Professora Adjunta /// Instituto Politécnico de Santarém, Escola Superior Agrária, Investigadora no Centro de Engenharia dos Biosistemas /// email: ana.paulo@desa.ipsantarém.pt

### Sandra Mourato

Professora Adjunta /// Instituto Politécnico de Leiria - Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Investigadora no Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas (ICAAM) /// email: sandra.mourato@ipleiria.pt

**RESUMO:** Relatórios recentes do IPCC indicam diminuição da precipitação na região mediterrânica. As secas poderão tornar-se mais intensas e/ou mais frequentes. O índice de seca SPI baseia-se na distribuição de probabilidades da precipitação. Valores negativos de SPI identificam uma seca e são classificados de acordo com uma escala de severidade. Iguais valores de SPI em diferentes períodos correspondem à mesma severidade relativa mas a alturas de precipitação diferentes. A conversão dos limiares das classes de seca do SPI em precipitação complementa a informação sobre a magnitude do fenómeno.

No Sul de Portugal estudou-se o efeito das alterações climáticas nas séries do SPI e na severidade da seca. Utilizaram-se três modelos regionais de clima, forçados por dois modelos globais e o cenário de emissões A2 no período 2071-2100. Produziram-se mapas de limiares de precipitação para visualizar alterações na severidade da seca. Os limiares de seca obtidos pelos modelos são inferiores aos equivalentes na série 1961-90 projetando alteração do padrão. Este estudo poderá apoiar medidas de adaptação na gestão dos recursos hídricos e medidas de mitigação dos impactos da seca.

**Palavras-chave:** Índice de seca SPI, limiares de severidade de seca, alterações climáticas, Sul de Portugal.

**ABSTRACT:** Late IPCC reports point out to a precipitation decrease in the Mediterranean region. Droughts may become more severe and/or more frequent. The drought index SPI is based on the probability distribution of precipitation. Negative SPI values are categorized according to a scale of drought severity. The same SPI values in distinct time periods express the same relative drought severity but different amounts of precipitation. Drought class thresholds transformed into precipitation amounts complement the information provided by SPI.

SPI and drought severity under climate change scenarios were studied for southern Portugal. SPI series were derived from precipitation projections of three regional climate models forced by two global climate models under A2 emission scenario for the period 2071-2100.

Precipitation thresholds obtained both for climate change scenarios and reference period were mapped aiming at a better visualization of the changes on drought severity. The precipitation thresholds projected by the models are consistently below the ones of the reference period. This study may contribute to support adaptation measures and to reduce drought impacts.

**Keywords:** SPI drought index, drought severity precipitation thresholds, climate change, Southern Portugal.

# 1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

A seca resultada da diminuição significativa da precipitação durante um intervalo de tempo suficientemente longo. Decorre da variabilidade climática natural e também das alterações climáticas de origem antropogénica. Relatórios recentes do IPCC indicam uma diminuição da precipitação na região mediterrânica. As secas poderão no futuro vir a tornar-se mais intensas e/ou mais frequentes.

Estudos efetuados em Portugal utilizando registos históricos de precipitação são concordantes mostrando tendência para uma diminuição da precipitação em março (Mourato *et al.*, 2010; de Lima *et al.*, 2010), embora à escala anual essas tendências não sejam significativas (Paulo *et al.*, 2012.).

As projeções para o clima europeu entre 2071 e 2100 apontam para um aumento da temperatura e diminuição da precipitação anual, e também para um aumento da variabilidade interanual das duas variáveis, conduzindo a uma maior ocorrência de condições meteorológicas extremas.

A precipitação é a variável determinante na ocorrência de secas. O índice de seca SPI, Standardized Precipitation Index (McKee *et al.*, 1993) baseia-se unicamente na precipitação, motivo pelo qual foi escolhido para este estudo. Outros índices requerem mais variáveis climáticas ou hidrológicas frequentemente indisponíveis, com registos menos longos e muitas vezes com menor representatividade espacial. A priori não existe nenhum índice que possa ser considerado mais adequado que o outro, as informações que fornecem complementam-se. No entanto, a habilidade do índice SPI para identificar e quantificar a seca tornam-no uma ferramenta importante quando comparado com outros índices de seca (Keyantash e Dracup, 2002). O índice SPI é simples de calcular, é normalizado e, por esse motivo, integra sistemas de observação e monitorização de secas em todo o mundo. É um índice multi-escala o que o torna apto a quantificar desvios entre a precipitação acumulada em  $k$  meses e a precipitação esperada nesses meses. Embora classificado como índice de seca meteorológico, para escalas de tempo mais longas, 12 ou 24 meses poderá ser também um indicador de seca hidrológica a qual apresenta maior

tempo de resposta à deficiência de precipitação. Em Portugal foi inicialmente aplicado ao Sul do País (Paulo e Pereira, 2006) e posteriormente em estudos de variabilidade espacial e temporal das secas em todo o continente português (Santos *et al.*, 2010; Martins *et al.*, 2012). O índice de seca de Palmer e mais recentemente o SPI são disponibilizados regularmente na página de monitorização da seca meteorológica publicada pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera.

Os valores de SPI resultam da probabilidade de ocorrência da precipitação e são padronizados. O mesmo valor de SPI em locais diferentes, ou, no mesmo local, em períodos distintos, corresponde a alturas de precipitação distintas que podem ser estimadas por inversão do processo de cálculo (Paulo e Pereira, 2008a, 2008b; Portela *et al.*, 2012). Os valores negativos de SPI são classificados em seca extrema, seca severa, seca moderada ou seca ligeira (ou quase normal) de acordo com a escala de classificação adotada.

O estudo é efetuado para o Sul de Portugal numa área correspondente à bacia do Sado (7578km<sup>2</sup>), Mira (1589 km<sup>2</sup>) e Gadiana (11583 km<sup>2</sup>), considerando 34 postos udométricos, com dados diários de precipitação disponibilizados pelo SNIRH.

Neste trabalho obtiveram-se as séries do índice de seca SPI no período controlo (1961-1990) e no período cenário (2071-2100). O objetivo do trabalho consiste em avaliar o efeito das alterações climáticas na severidade da seca comparando os limiares de precipitação das classes de severidade SPI nos dois períodos e mapeando os resultados obtidos.

## 2. METODOLOGIA

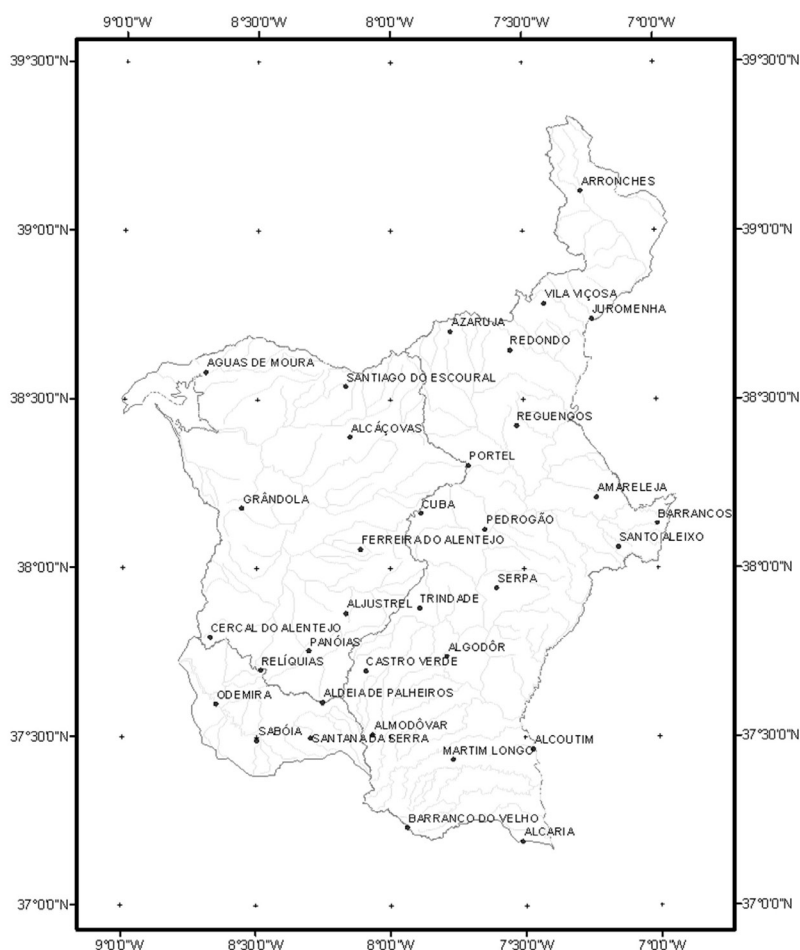
### 2.1. Dados

Na área de estudo foram escolhidos 34 postos que dispõem de dados diários de precipitação para o período 1961-1990 (Mourato *et al.*, 2010) representados na Figura 1.

Às séries anuais e sazonais de precipitação foram aplicados quatro testes de homogeneidade: o teste padrão normal de homogeneidade de Alexandersson, o teste de Pettit, o teste de Von Neumann e o teste de Buishand. A análise mensal dos resultados permitiu identificar o mês de março como o mês onde se verificavam as não homogeneidades.

---

O texto deste artigo foi submetido para revisão e possível publicação em fevereiro de 2015, tendo sido aceite pela Comissão de Editores Científicos Associados em maio de 2015. Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 36, Nº 2, 17-31, novembro de 2015.  
© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh36n2-2



**Figura 1** – Localização geográfica dos 34 postos udométricos estudados nas bacias hidrográficas do Sado, Mira e Guadiana.

## 2.2. Modelos de clima

A construção de cenários utilizando uma gama de modelos (ensemble) permite a avaliação da incerteza das projeções [Déqué *et al.*, 2006; Lopez-Moreno *et al.*, 2007].

Neste estudo obtiveram-se projeções das séries de precipitação diária e temperatura média diária de três modelos regionais de clima (RCM) forçados por dois modelos globais de clima (GCM). Foram considerados os resultados destes modelos para o cenário de emissões A2 [Nakicenovic *et al.*, 2000; IPCC, 2001]. A resolução espacial dos RCM é de aproximadamente 50 km.

No cenário A2, descreve-se um mundo futuro muito heterogéneo onde a regionalização é dominante. É considerado um cenário de emissões médio-elevado. A integração dos RCM, considerando as condições fronteiras dos GCM, encontram-se disponíveis para 30 anos correspondentes ao período entre 1961 e 1990 (período de controlo) e ao período entre 2071 e 2100 (período cenário). As combinações entre os RCM e os GCM, considerados neste estudo, e respetivo acrónimo, pelo qual vão ser designados, encontram-se no Quadro 1.

**Quadro 1** – Combinações de GCM e RCM e respetivos acrónimos.

Instituição	RCM	GCM	Acrónimo
Danish Meteorological Institute	HIRHAM	ECHAM4/OPYC A2	dmi_ec
		HadAM3H A2	dmi_hc
Hadley Centre – UK Met Office	HadRM3P	HadAM3P A2	hc
Swedish Meteorological and Hydrological Institute	RCAO	HadAM3H A2	smhi_hc
		ECHAM4/OPYC A2	smhi_ec

Comparando as variáveis climáticas registadas e o resultado das simulações de todos os modelos de clima para o período de controlo (1961-1990) conclui-se que os desvios dos resultados dos modelos de clima, relativamente aos valores observados, são significativos, variam na área de estudo e variam com os modelos de clima. Os modelos de clima apresentam valores da precipitação anual média em que o desvio relativo aos valores registados está no intervalo entre -10% nas zonas mais afastadas do mar e -80% nas zonas mais próximas da costa. Relativamente à temperatura média anual os modelos de clima sobrestimam a temperatura apresentando um desvio relativo aos valores registados entre +3.5°C no interior norte e +0.5°C no litoral sul. Relativamente à análise sazonal, os modelos de clima apresentam a mesma tendência, demonstrando a necessidade de correção de desvio a aplicar aos resultados dos modelos antes de serem usados como dados de base em estudos de impacto das alterações climáticas.

Os métodos de correção do desvio permitem determinar fatores corretivos dos resultados provenientes dos RCM ou dos GCM, utilizando estatísticas das séries registadas e das séries resultantes do modelo no período de controlo. No entanto, a correção de desvio pode ampliar as incertezas nas respostas para o clima futuro devido à diminuição da confiança na covariância espaço temporal das variáveis climáticas e a uma quebra dos princípios físicos. As respostas obtidas devem ser analisadas numa perspetiva de gama de incerteza (Mourato *et al.*, 2014). Neste estudo foram considerados dois modelos de correção do desvio, Delta Change (Arnell e Reynard, 1996) e Direct Forcing (Graham *et al.*, 2007).

O método Delta Change (da) assume que a variabilidade da série observada é mantida no período de controlo e é apenas corrigida pela evolução projetada pelos modelos de clima. Tem-se

$$P_{\text{cenário}} = P_{\text{obs}} \times \frac{\bar{P}_{\text{RCMcenário}}}{\bar{P}_{\text{RCMcontrolo}}} \quad (1)$$

em que:

$P_{\text{cenário}}$  – Precipitação diária corrigida (mm) no período cenário;  $P_{\text{obs}}$  – Precipitação diária registada (mm);  $\bar{P}_{\text{RCMcenário}}$  – Precipitação média mensal (mm) projetada no período cenário;  $\bar{P}_{\text{RCMcontrolo}}$  – Precipitação média mensal (mm) projetada no período de controlo.

O método Direct Forcing (df) assume que a variabilidade da série do período cenário é apenas corrigida com o desvio encontrado no período controlo entre o modelo e as observações,

$$P_{\text{cenário}} = P_{\text{RCMcenário}} \times \frac{\bar{P}_{\text{obs}}}{\bar{P}_{\text{RCMcontrolo}}} \quad (2)$$

em que:

$P_{\text{RCMcenário}}$  – Precipitação diária no modelo o período cenário (mm);  $\bar{P}_{\text{obs}}$  – Precipitação média mensal observada (mm).

### 2.3. Índice de seca SPI e limiares de precipitação

O SPI é um índice de seca que resulta do ajustamento de uma distribuição de probabilidades às séries de precipitação. A probabilidade de não-excedência da precipitação é transformada na variável normal reduzida, ou seja, no índice SPI (McKee *et al.*, 1993).

O SPI pode ser calculado em diferentes escalas temporais. A escala é o número de meses escolhido

para acumulação da precipitação mensal. Para uma dada escala obtêm-se de forma independente doze distribuições de probabilidade, uma para cada mês do ano. Assim, p.e. o SPI-3 em junho resulta da distribuição de probabilidades ajustada à série da precipitação do trimestre abril, maio e junho, enquanto que o SPI-3 em julho resultará do ajustamento à série de precipitação acumulada durante o meses de maio, junho e julho. Escalas mais curtas relacionam-se com os efeitos da seca nas reservas de água no solo e mais longas no escoamento e nas reservas subterrâneas. No cálculo do SPI têm sido usadas as distribuições gama (McKee *et al.*, 1993) ou Pearson-III (Guttman, 1999). Neste trabalho adotou-se a distribuição gama e consideraram-se as escalas temporais de 3 e 12 meses. A seca foi classificada em seca ligeira/quase normal ( $-1 < \text{SPI} < 0$ ), moderada ( $-1.5 < \text{SPI} \leq -1$ ), severa ( $-2 < \text{SPI} \leq -1.5$ ) e extrema ( $\text{SPI} \leq -2$ ) (McKee *et al.*, 1995).

Aos limites superiores das categorias de seca correspondem probabilidades de não excedência do índice normalizado SPI (Quadro 2). Essas probabilidades, por inversão do método de cálculo são transformadas em valores de precipitação recorrendo à distribuição gama ajustada à escala temporal e mês em causa. Esta metodologia foi aplicada no Sul de Portugal para estimar défices de precipitação (Paulo e Pereira, 2008 a, b) e posteriormente para obter superfícies limiares de precipitação (Portela *et al.*, 2012). Obtiveram-se os limiares de precipitação para cada categoria de seca, em todos os postos udométricos, para os dados observados no período controlo e para todos os modelos de clima no período cenário.

O SPI está amplamente divulgado e o seu uso é recomendado para monitorização da seca pela WMO (2012). No entanto vários autores sublinham a necessidade de avaliar a sua aplicação generalizada em climas com estação seca bem pronunciada e em estudos de alterações climáticas (Wu *et al.*, 2007; Sienz,

*et al.*, 2011). As limitações do SPI, comuns a outros índices probabilísticos padronizados, relacionam-se com a dimensão da série de registos, com a escala temporal e com a natureza da distribuição adotada, i.e. a função de distribuição e o método de estimação dos parâmetros (Wu *et al.*, 2007; Mishra e Singh, 2010, Sienz *et al.*, 2011; Núñez *et al.*, 2014). Geralmente escolhe-se uma única função de distribuição, que é ajustada para cada mês estimando os parâmetros. Para monitorização e quantificação da seca em projeções climáticas futuras Sienz *et al.*, (2011) preconizam a seleção, para cada local, escala temporal e mês da distribuição mais adequada, deixando no entanto claro que uma melhor comparabilidade exige a adoção de uma distribuição comum. Para baixas escalas de tempo do SPI, a qualidade do ajustamento poderá diminuir pois a precipitação acumulada em intervalos de tempo inferiores a 3 meses, e.g. 1, 2 ou mesmo 3 meses, por exemplo em junho, julho e agosto ou julho, agosto e setembro, em clima mediterrânico, é frequentemente nula e nestas condições o SPI resulta de uma mistura de duas distribuições (McKee *et al.*, 1993) que será tanto mais fiável quanto mais longa for a série de registos (Wu *et al.*, 2007). Na maior parte dos estudos não são realizados testes de ajustamento às distribuições. No presente estudo avaliou-se a bondade do ajustamento da precipitação à distribuição gama e do SPI à distribuição normal.

### 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Por aplicação das equações e algoritmos de cálculo do SPI obtiveram-se as séries temporais de SPI-12 e SPI-3 e os parâmetros da distribuição gama em cada mês, estação udométrica e cenário climático.

Testou-se o ajustamento da precipitação à distribuição gama através dos testes não paramétricos de Anderson-Darling (AD), Kolmogorov-Smirnov (KS) e Cramer-von-Mises (CVM). Considerou-se um nível de significância de 5%. Para uma escala de 12 meses, no período controlo o mês de novembro apresenta um mau ajustamento tendo sido rejeitado simultaneamente pelos testes AD e CVM em 4 dos 34 postos udométricos embora pelo teste KS não tenha havido rejeições. Globalmente para os 5 cenários climáticos com correção Delta Change os meses de junho e novembro foram os mais críticos com taxas de rejeição na ordem dos 10% para os testes AD e CVM. Mais uma vez pelo teste KS não houve rejeições. Corrigindo os modelos de clima pelo método Direct Forcing verificou-se uma boa aderência da precipitação a 12 meses à distribuição gama em todos os cenários climáticos.

**Quadro 2** - Limite superior das categorias de seca SPI e probabilidades de não excedência (McKee *et al.*, 1995).

Categoria de seca	SPI	Probabilidades acumuladas
Ligeira/Quase normal	0	0.5000
Moderada	-1	0.1587
Severa	-1.5	0.0668
Extrema	-2	0.0228

Para a precipitação acumulada a 3 meses a qualidade de ajuste é inferior. No período controlo o mês de novembro é o que apresenta pior aderência pelos testes AD e CVM. Considerando os 5 cenários e o método de correção do desvio Delta Change o ajustamento da distribuição gama nos meses de maio, novembro e junho foi rejeitado em 15 a 20% dos postos pelos testes AD e CVM. Com o método de correção do desvio Direct Forcing os meses críticos foram agosto e setembro e apenas o RCM HadRM3P revelou uma boa aderência à função gama em todos os meses à exceção de dezembro. O teste KS apresentou taxas de rejeição inferiores a 5% para os dois métodos de correção dos desvios.

A distribuição Pearson III com parâmetros estimados pelos momentos-L (Gutman, 1999) já utilizada em Portugal por Santos *et al.*, [2010] foi testada não havendo melhorias nos ajustamentos. Estes resultados indicam que algumas conclusões, nomeadamente para SPI-3 ou escalas inferiores no Sul de Portugal, deverão ser encaradas como aproximações.

A qualidade de ajuste dos índices SPI-12 e SPI-3 à distribuição normal foi avaliada através do teste KS. A hipótese de normalidade [0,1] de SPI-12 foi aceite em todos os meses e locais quer no período de controlo quer para os cenários climáticos. Apenas para o índice SPI-3 se verificaram rejeições mas com uma taxa inferior a 5%.

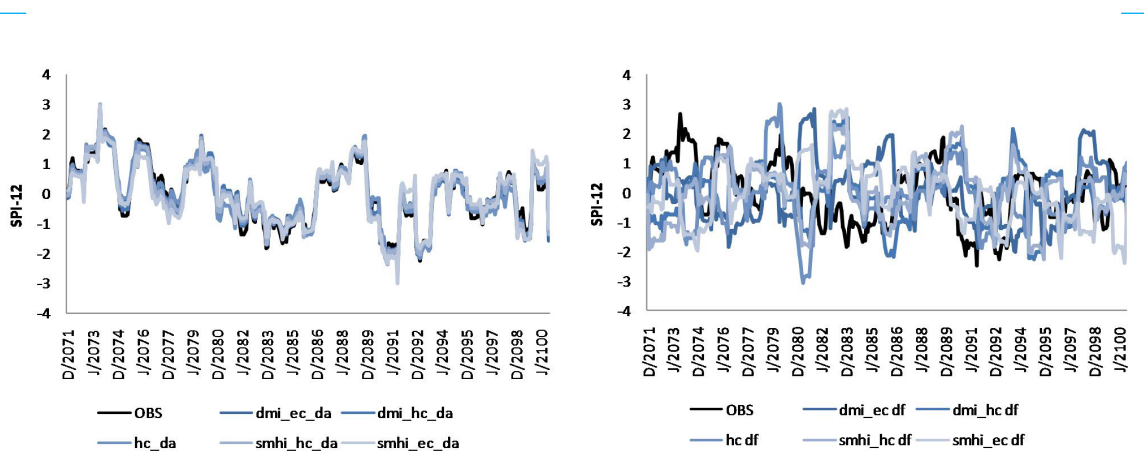
A influência da técnica de correção de desvio dos modelos climáticos no índice SPI exemplifica-se na Figura 2 para Arronches. A série temporal de SPI-12

em Arronches, na série observada e nos 5 modelos de clima com correção Delta Change são bastante próximas evidenciando o carácter padronizado do índice SPI e a correção aplicada. O método Direct Forcing introduz maior variabilidade nas séries.

A frequência conjunta das classes de seca severa e extrema do SPI-12 no posto udométrico de Arronches apresenta maior concordância entre as observações no período controlo e os modelos do Danish Meteorological Institute com correção Delta Change, e entre as observações no período controlo e os modelos Swedish Meteorological and Hydrological Institute com correção Direct Forcing (Figura 3). Menores concordâncias podem observar-se para a categoria quase normal ( $-1 < \text{SPI} < 1$ ) que engloba as categorias de seca ligeira e humidade ligeira.

A inversão do processo de cálculo permitiu obter os limiares de precipitação acumulada a 3 e 12 meses, correspondentes aos limites das classes de seca no SPI-3 e SPI-12. O ciclo anual do limiar de precipitação correspondente a seca severa ( $\text{SPI} = -1.5$ ) para as escalas de 3 e 12 meses em Arronches e Barrancos é apresentado nas Figuras 4 e 5.

A 'seca severa' nos cenários de alterações climáticas corresponde a alturas de precipitação muito inferiores no período controlo. Ao contrário do SPI-12, em que os limiares de precipitação quase não variam com os meses, com o SPI-3 os limiares refletem a sazonalidade da ocorrência de precipitação. O ciclo anual dos limiares de precipitação relativos a seca severa mostra grandes diferenças entre a série observada e os modelos.



**Figura 2** – Comparação, no posto udométrico de Arronches, do SPI-12 determinado para a série observada e para todos os modelos de clima no período 2071-2100 para as duas técnicas de correção do desvio (Delta Change, à esquerda, e Direct Forcing, à direita).

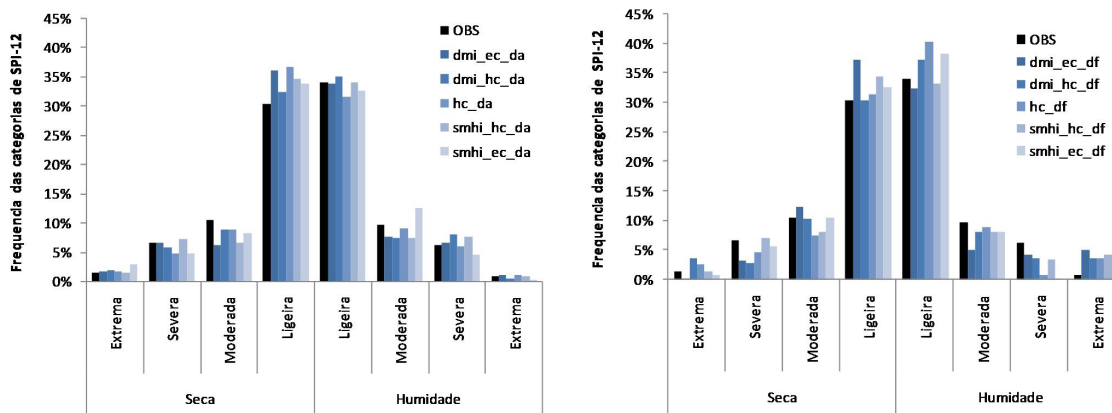


Figura 3 – Distribuição do SPI-12 por categorias na série observada e em todos os modelos de clima no período cenário, para as duas técnicas de correção do desvio (Delta Change, à esquerda, e Direct Forcing, à direita) no posto udométrico de Arronches.

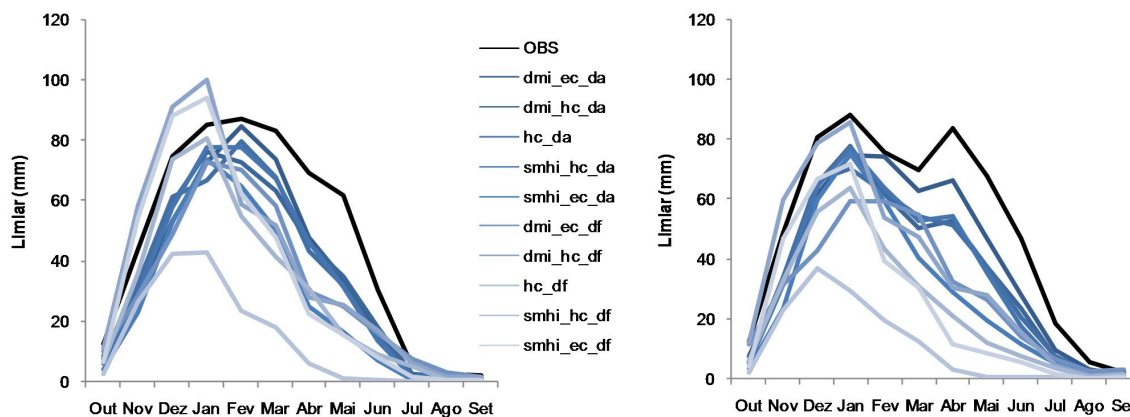
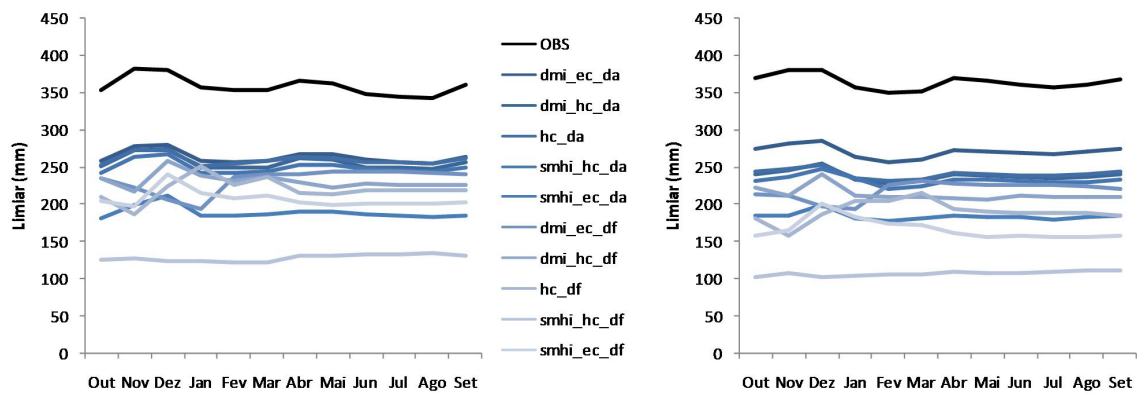


Figura 4 – Inversão de SPI-3=-1.5. Ciclo anual do limiar de seca severa na série observada e em todos os modelos de clima e todas as técnicas de correção do desvio, para os postos udométricos de Arronches (direita) e Barrancos (esquerda).





**Figura 5** – Inversão de SPI-12=-1.5. Ciclo anual do limiar de seca severa na série observada e em todos os modelos de clima e todas as técnicas de correção do desvio, para os postos udométricos de Arronches (direita) e Barrancos (esquerda).

As superfícies de precipitação foram obtidas através da aplicação da técnica de interpolação espacial IDW (Inverse Distance Weighting) às precipitações limiares de seca nos 34 postos udométricos considerados.

Os mapas dos limiares de precipitação acumulada em 3 meses consecutivos de seca severa no RCM HadRM3P com os dois métodos de correção do desvio mostram que com o método Direct Forcing é projetada uma diminuição mais severa da precipitação (Figuras 6 e 7). Nos trimestres dezembro-fevereiro, janeiro-março e fevereiro-abril a diferença é evidente.

Precipitações acumuladas inferiores a 30 mm de agosto a outubro classificam toda a área em estudo em seca severa. O mesmo acontece nos períodos consecutivos de 3 meses em que o mês final é junho, julho, agosto e setembro, razão pela qual os mapas não são apresentados.

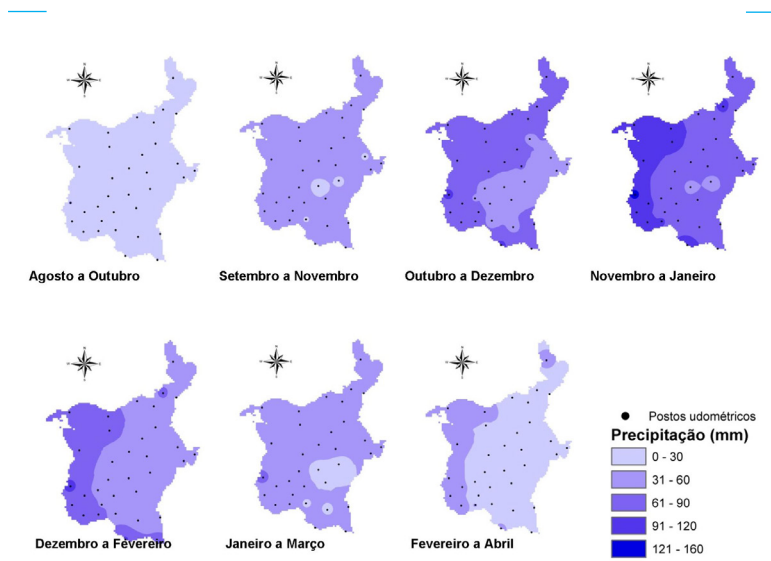
Os mapas e resultados seguintes referem-se apenas ao método de correção Delta Change. Na generalidade dos postos e modelos de clima a aplicação do método Direct Forcing conduz a limiares SPI inferiores.

O limiar de seca severa a 3 meses aumenta com o avanço do ano hidrológico, de outubro a janeiro apresentando padrões espaciais distintos (Figura 7). Nas bacias do Sado e do Mira os limiares são superiores aos obtidos na bacia do Guadiana. Tal significa que uma seca severa na bacia do Guadiana é identificada para alturas de precipitação acumulada em 3 meses inferiores às das bacias do Sado e do Mira. A variação mensal do limiar de seca severa SPI-12 para o modelo RCM HadRM3P é mais baixa do que a do SPI-3 pois os limiares referem-se a precipitação

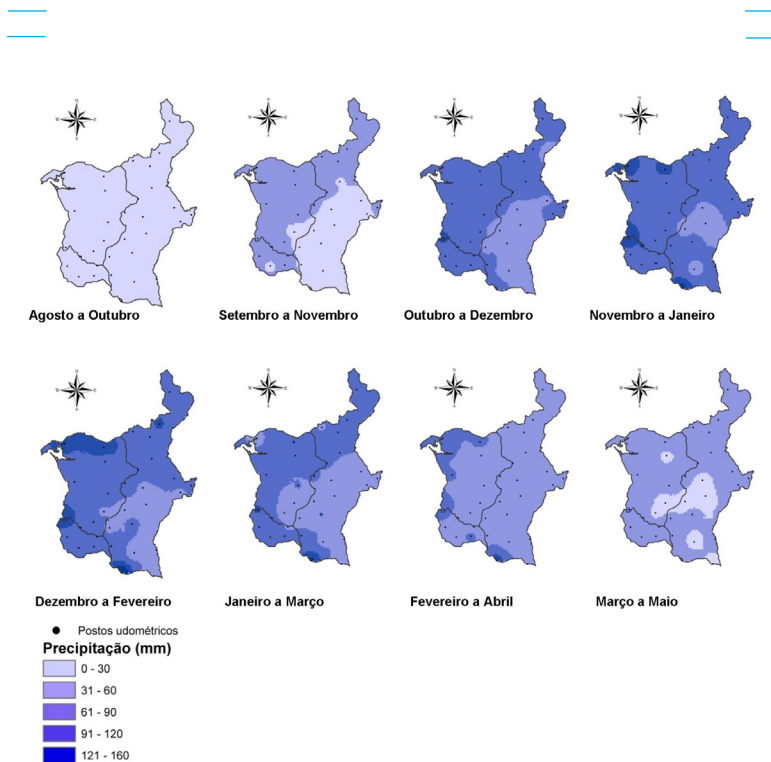
acumulada em 12 meses (Figura 8). Constatase que grande parte da bacia portuguesa do Guadiana apresenta limiares de precipitação inferiores às das bacias do Sado e do Mira.

Os meses de dezembro e março são de especial importância na monitorização/identificação da seca. Na agricultura de sequeiro as culturas de outono/inverno e as pastagens estão dependentes da ocorrência de precipitação no fim do outono. O SPI-3 em dezembro resulta da precipitação acumulada em outubro, novembro e dezembro e limiares de precipitação correspondentes a seca moderada ou a seca severa são indicadores de risco para cereais e pastagens. O SPI-3 em março traduz a precipitação acumulada no período de janeiro a março. A disponibilidade de água no solo durante este período é decisiva pois coincide com as fases de afilhamento e de crescimento ativo dos cereais de sequeiro. O regadio depende das reservas de água armazenadas até ao fim do inverno. Esta dependência é maior nas bacias do Sado e Mira onde a capacidade de armazenamento é menor. Nas albufeiras hidroagrícolas com baixa capacidade de regularização interanual, o volume de água armazenado obedece a um ciclo anual atingindo o mínimo em setembro ou outubro, no fim da campanha de rega, e um máximo em março ou abril, no início da nova campanha. No fim de março início de abril espera-se que as reservas superficiais e subterrâneas garantam as necessidades de rega durante os meses de verão. Por este motivo os limiares de precipitação do SPI-3 correspondentes a seca severa em março, são indicadores de risco para a agricultura de regadio.

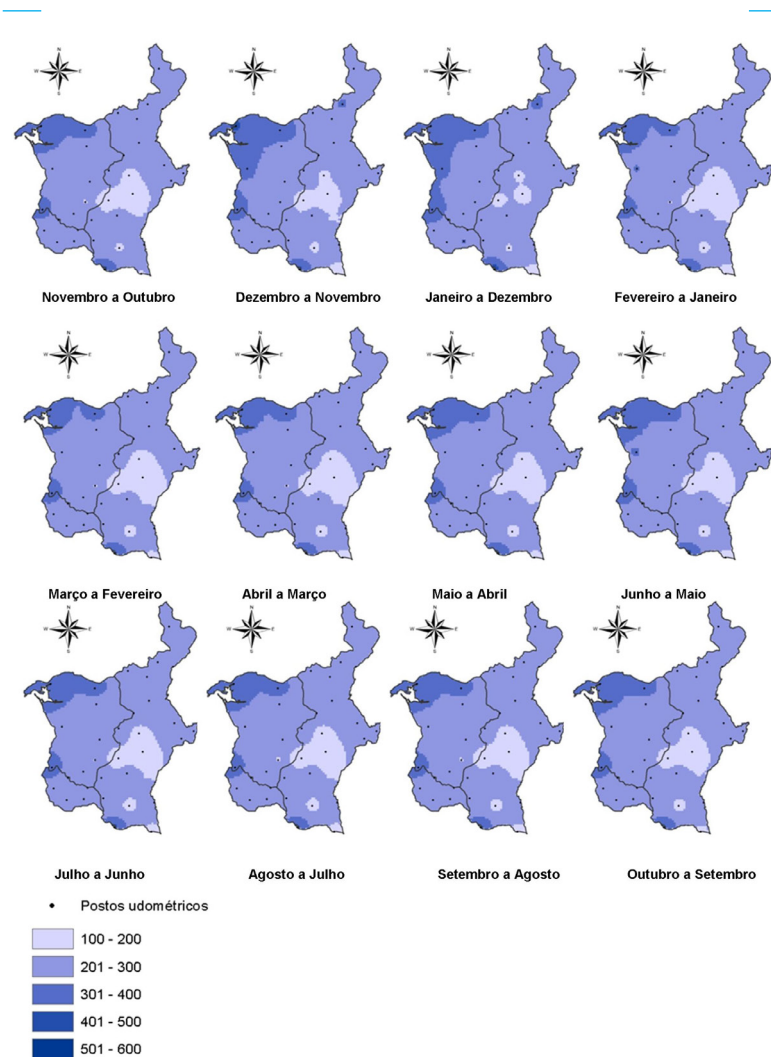




**Figura 6** – Superfícies das precipitações (mm) correspondentes ao limiar de seca severa (SPI=-1.5) obtidas com as séries de precipitação do modelo RCM HadRM3P corrigido pela técnica Direct Forcing, em períodos de 3 meses consecutivos.



**Figura 7** – Superfícies das precipitações (mm) correspondentes ao limiar de seca severa (SPI=-1.5) obtidas com as séries de precipitação do modelo RCM HadRM3P corrigido pela técnica Delta Change, em períodos de 3 meses consecutivos.



**Figura 8** – Superfície das precipitações (mm) correspondentes ao limiar de seca severa [SPI=-1.5] obtidas com as séries de precipitação do modelo RCM HadRM3P corrigido pela técnica Delta Change, em períodos de 12 meses consecutivos.

A Figura 9 mostra as precipitações limiares de seca severa em março e dezembro a 3 meses de acumulação, em todos os modelos de clima e postos udométricos; para o período controlo apresenta-se também o limiar de seca extrema. O limiar de seca severa da série observada é superior, em todos os postos udométricos aos limiares das séries dos modelos climáticos.

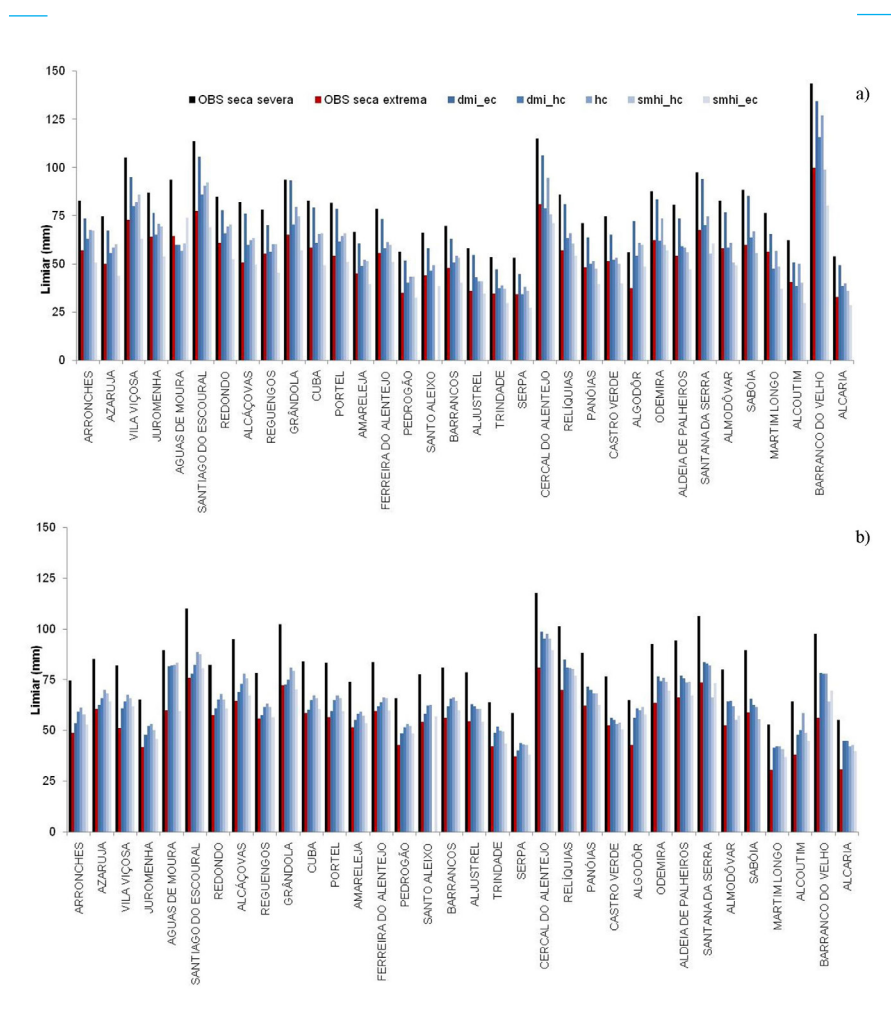
Os mapas da Figura 10 mostram as superfícies limiares de precipitação correspondentes a seca severa em março e em dezembro considerando o

período controlo e todos os modelos de clima no período cenário a 3 meses de acumulação. Em março a superfície correspondente à classe 0-30 mm é sempre menor no período controlo. Em dezembro a superfície correspondente à classe de precipitação mais elevada, 120-150 mm, representada no período controlo é inexistente ou muito baixa nos modelos de clima.

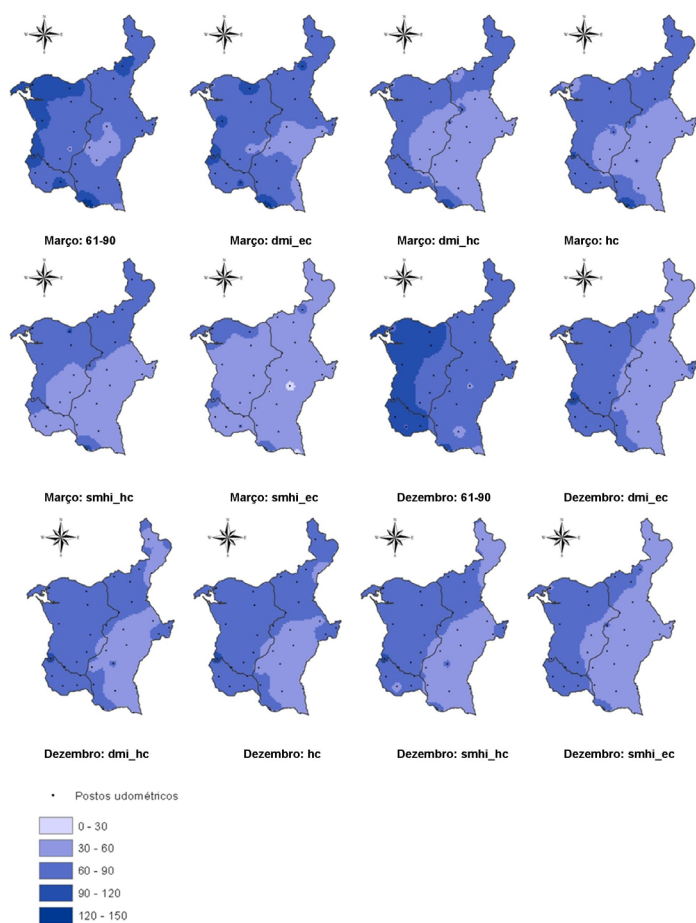
O SPI-12 é um indicador do estado das reservas superficiais e do escoamento. Os períodos críticos coincidem com o mês de março, no fim do inverno,

em que se espera que as reservas tenham sido repostas. Os limiares de seca severa no período controlo, com valores que variam entre os 300 e os 500 mm são superiores aos obtidos com os modelos de clima, em todos os postos udométricos (Figura 11). Adicionalmente verifica-se que na maioria dos postos os limiares de seca severa nos modelos de clima são inferiores aos limiares de seca extrema (SPI-12=-2) das observações no período controlo, os quais variam entre 200 e 400 mm.

Os limiares de precipitação em março das observações no período controlo são superiores a todos os modelos de clima no período cenário (Figura 12). No período controlo é identificada na bacia do Sado uma seca severa para 500 a 600 mm de precipitação acumulada nos meses de abril a março a norte e oeste e 400 a 500 mm a leste. Em todos os modelos de clima exceto para o dmi\_ec as superfícies limiares de precipitação de seca severa estão identificadas para valores de precipitação acumulada inferiores a 200 mm em áreas consideráveis da bacia do Guadiana.



**Figura 9** – Inversão de SPI-3=-1.5. Limiar de seca severa nos meses de a) Março e b) Dezembro considerando as observações no período controlo, todos os modelos de clima (correção de desvio – Delta Change) e todos os postos udométricos.



**Figura 10** – Superfície das precipitações (mm) correspondentes ao limiar de seca severa (SPI=-1.5) nos meses de Março e Dezembro considerando as observações no período controlo e todos os modelos de clima (correção de desvio – Delta Change) no período cenário, em períodos de 3 meses consecutivos.

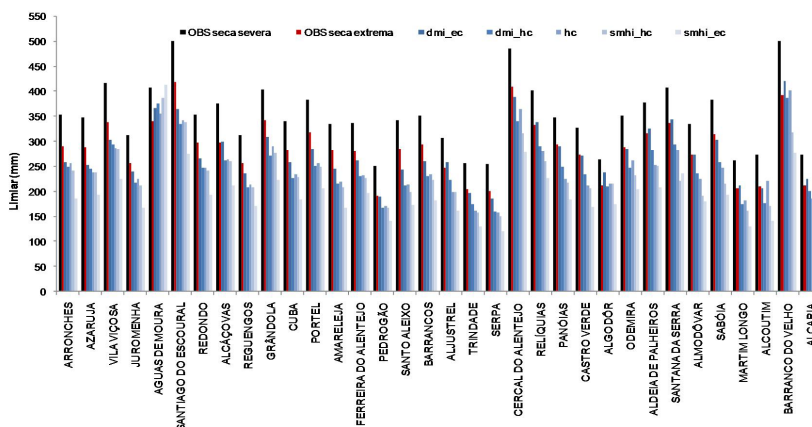


Figura 11 – Inversão de SPI-12=-1.5. Comparação em todos os postos udométricos do limiar de seca severa no mês de Março para todos os modelos de clima no período controlo e os limiares de seca severa e seca extrema das observações.

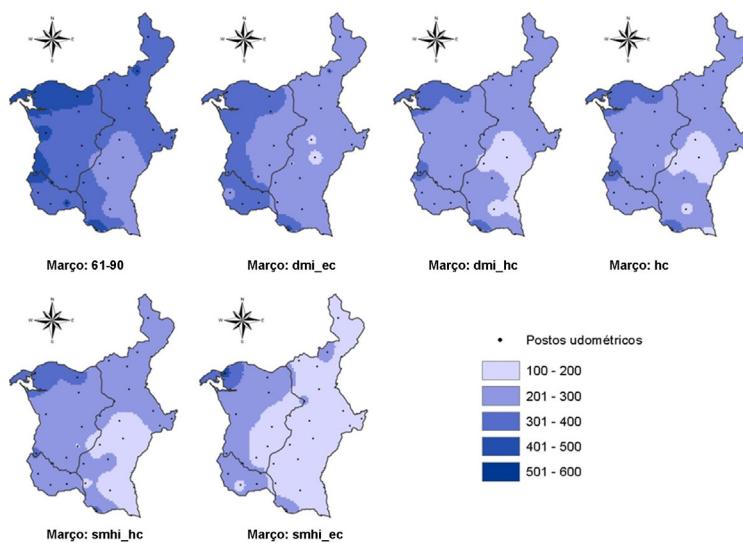


Figura 12 – Superfície das precipitações (mm) em períodos de 12 meses consecutivos correspondentes ao limiar de seca severa (SPI=-1.5) para Março considerando o período controlo e todos os modelos de clima (correção de desvio - Delta Change).

## 4. CONCLUSÕES

O índice de seca padronizado SPI é aplicado em todo o Mundo e a sua utilização para identificar, monitorizar e caracterizar a seca é generalizada devido à sua simplicidade. Este trabalho pretende avaliar a severidade da seca obtida com o SPI projetada pelos cenários de alterações climáticas, no Sul de Portugal. Consideraram-se as séries de precipitação observadas no período controlo e cinco séries resultantes dos modelos de clima para o período cenário (2071-2100) com os desvios corrigidos através do métodos Delta Change e Direct Forcing. Devido ao carácter probabilístico do SPI a frequência de ocorrência das classes de seca é similar no período controlo e nos modelos de clima independentemente da função de distribuição de probabilidades ajustada. A análise prévia do ajustamento da distribuição de probabilidades gama às séries de precipitação revela, nalguns meses, uma fraca aderência, principalmente na escala temporal de 3 meses. A normalidade do SPI foi aceite na maioria dos meses e dos modelos. Estimaram-se os limiares de precipitação correspondentes aos limites das classes de severidade de SPI em 34 postos udométricos.

Produziram-se mapas com as superfícies das precipitações e compararam-se os limiares de precipitação correspondentes a seca severa e seca extrema resultantes das observações e dos modelos. Apresentam-se resultados para as escalas temporais de 3 e 12 meses e para os meses de março e dezembro. Mostra-se que os limiares de precipitação correspondentes a uma dada severidade e probabilidade de ocorrência no período de controlo são sempre superiores aos seus equivalentes nos modelos de clima com a técnica de correção Delta Change. A diferença relativa a seca severa pode ser superior a 150 mm para o SPI-12 e a 30 mm para o SPI-3. Na bacia do Guadiana os limiares de precipitação para identificação de seca severa são geralmente inferiores aos das bacias do Sado e do Mira.

A metodologia utilizada estima os quantis de precipitação correspondentes a limiares de severidade da seca no período cenário e no período controlo. Os resultados obtidos dependem da adequação dos modelos probabilísticos às séries de precipitação, dos modelos de clima e técnicas de correção dos desvios e da variabilidade da precipitação. Apesar das limitações associadas à modelação climática, os resultados são concordantes e apontam para limiares de precipitação nos cenários inferiores aos seus equivalentes no período de controlo. Estes resultados estão diretamente associados aos outputs dos modelos que projetam decréscimos da precipitação.

Não se pretende indicar qual o modelo de clima ou método de correção do desvio mais adequado para

a projeção de SPI em cenários futuros, mas sim dar ênfase à importância da utilização de *ensembles* de modelos de modo a considerar as incertezas existentes. A estimativa dos limiares de precipitação permite comparar secas com um dado grau de severidade no período cenário com secas de igual severidade relativa no período controlo e quantificar as diferenças de precipitação, contribuindo para o planeamento de medidas de adaptação às alterações climáticas e à seca no domínio da gestão da água.

## BIBLIOGRAFIA

Arnell N.W., Reynard N.S. [1996] - The effects of climate change due to global warming on river flows of Great Britain. *Journal of Hydrology*, 183: 397-424.

de Lima M.I.P., Carvalho S.C.P., de Lima, J.L.M.P., Coelho, M.F.E.S. [2010] - Trends in precipitation: analysis of long annual and monthly time series from mainland Portugal, *Adv. Geosci.*, 25, 155-160, doi:10.5194/adgeo-25-155-2010.

Déqué M, Rowell D, Schär C, Giorgi F, Christensen JH, Rockel B, Jacob D, Kjellstrom E, De Castro M, van den Hurk B. [2006] - An intercomparison of regional climate models for Europe: Assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change* 81: 53-70.

Graham L.P., Andreasson J., Carlsson B. [2007] - Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods - A case study of the Lule River basin. *Climatic Change*, 81 (Suppl. 1), 293-307.

Guttman N.B. [1999] - Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm, *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 35: 311-322.

IPCC [2001] - *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K.Maskell and C.A. Johnson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, pp. 881.

Keyantash, J., Dracup, J.A. [2002] - The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 83: 1167-1180.

Lopez-Moreno J, Goyette S, Beniston A. [2007] - Climate change prediction over complex areas: spatial variability of uncertainties and predictions over the Pyrenees from a set of regional climate models. *International Journal of Climatology* 28(11): 1535-1550.

- Martins D.S., Raziei T., Paulo A.A., Pereira L.S. (2012) - Spatial and temporal variability of precipitation and drought in Portugal, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 1493–1501. DOI: 10.5194/nhess-12-1493-2012.
- McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J. (1993) - The relationship of drought frequency and duration to time scales, in Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, American Meteorology Society, 179-184.
- McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J. (1995) - Drought monitoring with multiple time scales. In: 9th Conference on Applied Climatology, Am. Meteor. Soc, Boston, pp. 233-236.
- Mishra A.K., Singh V.P. (2011). Drought modelling – a review. *J. Hydrology*, 403: 157-175.
- Mourato S., Moreira M., Corte-Real J. (2010) - Interannual variability of precipitation distribution patterns in Southern Portugal, *Int. J. Climatol.* 30: 1784–1794.
- Mourato S., Moreira M., Corte-Real J. (2014) - Water availability in southern Portugal for different climate change scenarios subjected to bias correction. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 8 (1) 09-117.
- Mourato S. (2010) - Modelação do Impacte das Alterações Climáticas e do Uso do Solo nas Bacias Hidrográficas do Alentejo. Tese de doutoramento. Universidade de Évora.
- Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, de Vries HJM, Fenhann J, Gaffin S, Gregory K, Grubler A, Jung TY, Kram T, La Rovere EL, Michaelis L, Mori S, Morita T, Papper W, Pitcher H, Price L, Riahi K, Roehrl A, Rogner H-H, Sankovski A, Schlesinger M, Shukla P, Smith S, Swart R, van Rooijen S, Victor N, Dadi Z. (2000) - *Special Report on Emissions Scenarios*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- Núñez, J., Rivera, D., Oyarzún, R., Arumí, J.L. (2014) - On the use of Standardized Drought Indices under decadal climate variability: Critical assessment and drought policy implications. *Journal of Hydrology*, 517: 458–470.
- Paulo A.A., Pereira L.S. (2006) - Drought Concepts and Characterization. Comparing Drought Indices, *Water International*, 31: 37-49.
- Paulo A.A., Pereira L.S. (2008a) - Stochastic prediction of drought class transitions, *Water Resour Manage* 22: 1277-1296.
- Paulo A.A., Pereira L.S. (2008b) - Secas e gestão do risco: caracterização e predição de secas e sua aplicação ao Sul de Portugal, *Recursos Hídricos* 29(01) 73-86.
- Paulo A. A., Rosa R. D., Pereira L. S. (2012) - Climate trends and behaviour of drought indices based on precipitation and evapotranspiration in Portugal. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12: 1481–1491.
- Portela M.M., Santos J.F.F., Naghettini N., Matos J.P., Silva A.T. (2012) - Superfícies de limiares de precipitação para identificação de secas em Portugal continental: uma aplicação complementar do índice de precipitação padronizada, SPI, *Recursos Hídricos* 33(02), 5-23.
- Santos J.F., Pulido-Calvo I., Portela M.M. (2010) - Spatial and Temporal Variability of Droughts in Portugal, *Journal of Water Resources Research*, 46, W03503. ISSN 0043–1397 (IF: 2.957).
- Sienz F., Bothe O., Fraedrich K. (2011) - Monitoring and quantifying future climate projections of dryness and wetness extremes: SPI bias, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 8: 10635–10677.
- WMO (2012) - Standardized precipitation index user guide. No. 1090.
- Wu H., Svoboda M., Hayes M.J., Wilhite, D.A., Wen, F. (2007) - Appropriate application of the Standardized Precipitation Index in arid locations and dry seasons. *Int. J. Climatol.* 27: 65–79.