

A DIMINUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO EM ÉPOCAS DO ANO COMO INDÍCIO DE MUDANÇA CLIMÁTICA: CASOS ESTUDADOS EM PORTUGAL CONTINENTAL

Maria Manuela Portela¹ y António de Carvalho Quintela²

Resumo:

Como manifestação da mudança climática que se julga estar a ocorrer no território português, têm sido referidas a maior irregularidade da distribuição da precipitação ao longo do ano e a sua apreciável diminuição em algumas épocas do mesmo.

Para constituir indício de mudança climática, tal diminuição deverá corresponder a uma tendência que se tenha vindo a acentuar ao longo dos anos.

Com o objectivo de detectar variações com carácter tendencial em séries temporais da precipitação registadas no território nacional, aplicaram-se a tais séries dois métodos: o método clássico de médias móveis e um método, expressamente desenvolvido no âmbito do estudo que deu origem a este artigo, que utiliza a comparação, em termos estatísticos, das médias da precipitação em determinados intervalos de tempo em que se dividiram os períodos de registos.

As aplicações efectuadas a séries de precipitação em onze postos do território nacional evidenciam que as precipitações no 2º Trimestre do ano hidrológico (de Janeiro a Março) e, de modo mais acentuado, no mês de Março, exibem uma tendência nítida de redução.

Palavras-chave: mudança climática, diminuição da precipitação, persistência, média móvel, quebra de homogeneidade.

OBJECTIVO E DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Com o objectivo de detectar alterações do comportamento de séries da precipitação registada em vários locais de Portugal Continental que pudessem constituir indícios de mudança climática, seleccionaram-se algumas séries que se analisaram pelo método clássico de médias móveis (item 2) e por um procedimento, expressamente desenvolvido para este estudo, que se baseia na divisão da série de registos num posto em conjuntos sucessivos de duas subséries contíguas, uma anterior e outra posterior (item 3). As médias de tais subséries são, em seguida, comparadas tendo em vista a detecção de quebras de homogeneidade. Neste artigo apresentam-se os procedimentos utilizados, os resultados obtidos e as conclusões alcançadas.

Não obstante o trabalho efectuado carecer ainda de continuação, designadamente pela análise de séries de precipitação em maior número de lo-

cais e de séries de outras variáveis climáticas, por forma a mais consistentemente fundamentar conclusões, considerou-se de interesse divulgar os resultados mais significativos já alcançados. Julga-se que análises do tipo da que se apresenta contribuirão tanto mais para a percepção de eventuais alterações climáticas, quanto os modelos de circulação geral da atmosfera têm actualmente capacidade ainda limitada para descrever o clima às escalas regional ou local pois a dimensão da malha que lhes está normalmente associada (tipicamente 300 km ou mais) não se coaduna com a descrição das singularidades (topográficas e outras) que, àquelas escalas, podem ter influência determinante no clima (Houghton, 1997, p. 98, e Corte-Real et al., 1999).

A mudança climática, a confirmar-se, deve também traduzir-se pela alteração de propriedades estatísticas das séries temporais de algumas variáveis hidrológicas, em particular das que mais directamente exprimem as condições do clima, como sejam a precipitação e a temperatura. Desde que tais

1. Professora Auxiliar, IST, DECivil, Secção de Hidráulica. mps@civil.ist.utl.pt

2. Professor Catedrático, IST, DECivil, Secção de Hidráulica. dulce@civil.ist.utl.pt

Artículo recibido el 18 de noviembre de 1998, recibido en formas revisadas el 11 de junio de 1999 y aceptado para su publicación el 24 de marzo de 2000. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

séries sejam suficientemente longas, admite-se, assim, que a essa mudança correspondam alterações dos valores dos parâmetros estatísticos das séries, em especial, das respectivas médias. Face a esta expectativa, sujeitaram-se séries da precipitação, registadas durante períodos longos em vários locais de Portugal Continental, a um conjunto de procedimentos para avaliar, ao longo do tempo, as alterações das respectivas médias.

Mendes e Coelho (1993) haviam analisado a presença de indícios de mudança climática em séries da precipitação respeitantes ao ano agrícola (de Setembro a Agosto) e às suas quatro estações, cada uma correspondente a um trimestre (Inverno, Primavera, Verão e Outono). Reconheceram que tais séries exibem comportamentos distintos consoante o período de tempo a que se referem (ano ou época do ano), tendo constatado, Alves (1998), que do trinténio de 1931-60 para o trinténio de 1961-90 o total anual não evidenciou variação apreciável, não obstante se ter verificado o decréscimo da precipitação na Primavera (de Março a Maio) e o aumento da precipitação no Inverno (de Dezembro a Fevereiro).

A redução da precipitação em Março observada em Portugal em décadas recentes, especialmente a partir do final da década de 60, é também documentada por Corte-Real et al. (1998). Para o Sul do País, estes autores concluem que o decréscimo da precipitação é acompanhado de modo consistente por alterações dos padrões de clima mais significativos naquela região, correspondendo-lhe a diminuição das ocorrências do padrão que identificam como mais chuvoso e o aumento das ocorrências do padrão seco de Verão.

Assim, sendo de esperar que as séries de precipitação possam exibir diferentes comportamentos consoante a época do ano a que se referem, analisaram-se as séries de precipitação que, nos sucessivos anos de um longo período, se registaram, quer na totalidade do ano, quer em diferentes épocas do mesmo.

ANÁLISE DAS SÉRIES DE PRECIPITAÇÃO POR MÉDIAS MÓVEIS

Para o ano e para cada uma das épocas do mesmo consideradas, a análise em questão baseou-se na determinação das médias dos correspondentes registos da precipitação em grupos de n anos consecutivos, com início sucessivamente em cada um dos anos hidrológicos do período de registos (Figura 1). Trata-se, portanto, de uma análise de médias móveis em grupos de n anos hidrológicos, Papoulis, p. 273 (1985).

Designa-se por p_i a precipitação no ano i (na totalidade do ano ou numa determinada época desse ano) e por N e P a dimensão e a média da correspondente amostra de valores da precipitação

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^N p_i}{N} \quad (1)$$

Seja n o número de anos de cada um dos sucessivos grupos adoptados na descrição por médias móveis da anterior série de valores da precipitação. O primeiro grupo analisado decorre entre o ano 1 e o ano $1+(n-1)=n$ e o grupo de ordem i inicia-se no ano i e termina no ano $i+(n-1)$. O número total de grupos analisados é, portanto, de $N-n+1$, representando, este último resultado, também o número de ordem do ano em que se inicia o último grupo - Figura 1. A média da precipitação respeitante ao grupo de ordem i , \bar{P}_i é dada por

$$\bar{P}_i = \frac{\sum_{k=i}^{i+(n-1)} p_k}{n} \quad (2)$$

A dimensão n deve ser, por um lado, suficientemente longa para que os sucessivos grupos de n anos apresentem condições hidrológicas aproximadamente médias. Por outro lado, se for excessiva, reduz o número de grupos em que é efectuado o cálculo das médias móveis.

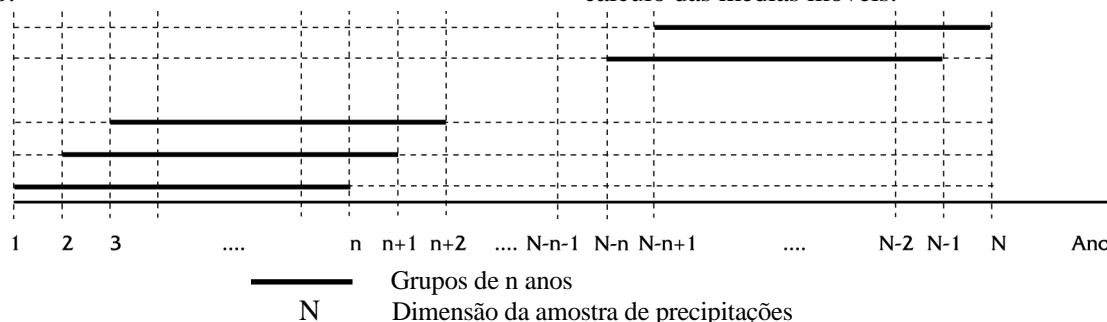


Figura 1. Grupos de n anos hidrológicos consecutivos utilizados na determinação de médias móveis.

Por tal motivo, fixou-se a duração n em quinze anos que se julga adequada em face dos resultados, que se apresentam no item 6, relativamente ao efeito da dimensão n na descrição por médias móveis.

As sucessivas médias móveis das séries das precipitações relativas ao ano e a cada uma das épocas consideradas foram representadas em diagramas cronológicos em que cada média móvel foi imputada ao primeiro ano do correspondente grupo de n anos consecutivos. Para facilitar a apreciação, adimensionalizaram-se as sucessivas médias móveis, \bar{P}_i , expressando-as como fracção da média, P , da amostra de N registos da precipitação no ano ou na época do ano considerada (\bar{P}_i/P).

Não havendo quebras de homogeneidade, a representação cronológica das médias móveis adimensionalizadas deve traduzir uma variação desordenada em torno da unidade. No caso de mudança climática gradual, a quebra de homogeneidade traduzir-se-á pela tendência da diminuição ou do aumento progressivos das sucessivas médias móveis.

3. PESQUISA DE QUEBRAS DE HOMOGENEIDADE NAS MÉDIAS DAS SÉRIES DE PRECIPITAÇÃO

Seja N a dimensão da série de precipitações referentes ao ano ou a uma das épocas do ano, p_i o seu elemento genérico e P a média da série, calculada por (1).

Considere-se a anterior série dividida em duas subséries consecutivas, a primeira, com dimensão N_1 e decorrendo do ano 1 ao ano N_1 , e a segunda, com dimensão N_2 (sendo $N_2=N-N_1$) e correspondente aos anos de N_1+1 a N . Às anteriores subséries atribuíram-se as designações de subsérie anterior e de subsérie posterior, respectivamente (Figura 2).

Designem-se por \bar{P}_1 e \bar{P}_2 as médias das precipitações

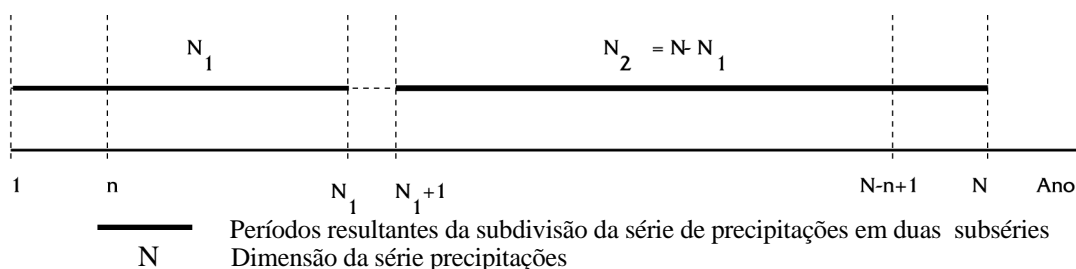


Figura 2. Divisão da série de N anos de precipitação em duas subséries: uma anterior, com dimensão N_1 , e outra, posterior, com dimensão N_2 .

na primeira e na segunda das subséries em que se dividiu a série de N anos

$$\bar{P}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} p_i}{N_1} \quad \text{e} \quad \bar{P}_2 = \frac{\sum_{i=N_1+1}^N p_i}{N_2} \quad (3)$$

A pesquisa de quebras de homogeneidade nas médias utiliza a comparação, em termos estatísticos, das médias \bar{P}_1 e \bar{P}_2 , considerando-se ocorrer uma quebra sempre que estas médias sejam significativamente diferentes entre si.

Para testar a significância da diferença entre as duas médias anteriores utilizaram-se dois testes: um paramétrico - o teste de Student - e outro não paramétrico - o teste de Mann-Whitney. Considerou-se haver quebra de homogeneidade sempre que, pelo menos, um dos anteriores testes a indicasse.

A estatística do teste de Student é dada, Murteira, p. 86-88 (1980), por

$$t_s = \frac{|\bar{P}_1 - \bar{P}_2|}{s \sqrt{1/N_1 + 1/N_2}} \quad (4)$$

em que P_1 , P_2 , N_1 e N_2 têm o significado anteriormente apresentado e s é a estimativa do desvio-padrão da população, calculada a partir dos desvios-padrão s_1 e s_2 , respectivamente das subséries N_1 e N_2 da precipitação, por meio de

$$s = \sqrt{\frac{(N_1 - 1)s_1^2 + (N_2 - 1)s_2^2}{N_1 + N_2 - 2}} \quad (5)$$

em que são

$$s_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} (p_i - \bar{P}_1)^2}{N_1 - 1} \quad \text{e} \quad s_2^2 = \frac{\sum_{i=N_1+1}^{N_2} (p_i - \bar{P}_2)^2}{N_2 - 1} \quad (6)$$

O número de graus de liberdade a considerar para a distribuição de Student é N_1+N_2-2 , ou seja, $N-2$.

Para o nível de confiança de $\eta=1-\alpha$, em que α é o nível de significância, a hipótese das médias \bar{P}_1 e \bar{P}_2 não serem significativamente diferentes é rejeitada desde que se verifique a condição

$$|t_s| > t_{(1-\alpha/2)} \tag{7}$$

em que $t_{(1-\alpha/2)}$ o quantil da distribuição de Student.

Como expresso por (9), considerou-se que a região de rejeição era bilateral, o que também se admitiu na aplicação do teste de Mann-Whitney.

O teste de Student, por se tratar de um teste paramétrico, impõe restrições às séries, as quais, em rigor, deveriam ser previamente confirmadas, Yevjevich, p. 217 e 218 (1972), Murteira, p. 86-88 (1980), e Mendes e Coelho, p. 20 (1993). Tais restrições poderão, em grande parte, não ser exigidas na aplicação de testes não paramétricos. De entre os testes do último tipo optou-se pelo de Mann-Whitney.

Este teste considera a série auxiliar Y, com elemento genérico y_i definido a partir da série de precipitações no ano ou na época do ano por meio de $y_i =$ número de elementos de P menores ou iguais a p_i (incluindo o valor p_i) (8)

A estatística do teste de Mann-Whitney, N_{MW} , é dada, Siegel, p. 131-144 (1975) e Henriques, p. 349 e 350 (1990), por

$$N_{MW} = \min \left\{ N_1(N - N_1) + \frac{N_1(N_1 + 1)}{2} - \sum_{i=1}^{N_1} y_i; \sum_{i=1}^{N_1} y_i - \frac{1}{2} N_1(N_1 + 1) \right\} \tag{9}$$

A estatística N_{MW} tem uma distribuição assintótica normal com média \bar{N}_{MW} e variância s_{MW}^2 , dadas por

$$\bar{N}_{MW} = \frac{N_1(N - N_1)}{2} \tag{10}$$

$$s_{MW}^2 = \frac{N_1(N - N_1)(N + 1)}{12} \tag{11}$$

Observa-se que a dimensão N_2 da subsérie posterior não aparece em (9) e (11) por ter sido expressa em função de N_1 .

A hipótese de homogeneidade da média da série P é rejeitada com o nível de confiança $\eta=1-\alpha$ se se verificar

$$\left| \frac{(N_{MW} - \bar{N}_{MW})}{(s_{MW}^2)^{0.5}} \right| > \phi^{-1}(1-\alpha/2) \tag{12}$$

em que ϕ é a função distribuição de probabilidade da lei normal e ϕ^{-1} , a sua inversa.

Na pesquisa das quebras de homogeneidade, por aplicação dos testes apresentados, fez-se crescer progressivamente de uma unidade a dimensão N_1 da subsérie anterior e diminuir correspondentemente a da subsérie posterior, N_2 . Considerou-se que a dimensão mínima de qualquer uma das duas subséries em que se dividiu a série de N anos com registos deveria ser igual à dimensão n do grupo de anos adoptado na descrição por médias móveis (n=15). O primeiro ano hidrológico em que pode terminar uma subsérie anterior para assegurar a anterior condição é o ano de ordem n e o último, o de ordem N-n+1, conforme se ilustra na Figura 2. Consoante a subsérie anterior termine no ano n ou no ano N-n+1, as dimensões das duas subséries correspondentes serão $N_1=n$ e $N_2=N-n$ ou $N_1=N-n$ e $N_2=n$.

Ao fazer variar as dimensões N_1 e N_2 das subséries anterior e posterior, considerou-se que a primeira de tais subséries poderia terminar em cada um dos sucessivos anos hidrológicos entre n e N-n. Obtiveram-se, deste modo, N-2n+1 conjuntos diferentes de duas subséries, uma anterior e outra posterior, Figura 3. A pesquisa de quebras de homogeneidade foi efectuada sequencialmente para cada um desses conjuntos.

Procedeu-se, ainda, à representação das médias das duas subséries de cada um dos N-2n+1 conjuntos da Figura 3. Para melhor ilustrar o procedimento sequencial adoptado, identificaram-se tais subséries por um mesmo índice superior, j, igual ao número de ordem do ano hidrológico em que termina a subsérie anterior e designaram-se por $N_1^{(j)}$ a dimensão da subsérie anterior e por $N_2^{(j)}$ a dimensão da correspondente subsérie posterior. Nestas condições verificam-se as seguintes relações:

$$N_1^{(j)} = j \quad \text{e} \quad N_2^{(j)} = N - j \tag{13}$$

$$\bar{P}_1^{(j)} = \frac{\sum_{i=1}^j p_i}{N_1^{(j)}} \quad \text{e} \quad \bar{P}_2^{(j)} = \frac{\sum_{i=j+1}^N p_i}{N_2^{(j)}} \tag{14}$$

sujeitas às condições $j \geq n$ e $N - j \geq n$.

Para o ano ou época do ano considerada, $\bar{P}_1^{(j)}$ é a média das precipitações nos primeiros j anos e $\bar{P}_2^{(j)}$, a média nos últimos N-j anos. Na apresentação de resultados tais médias foram simplificada

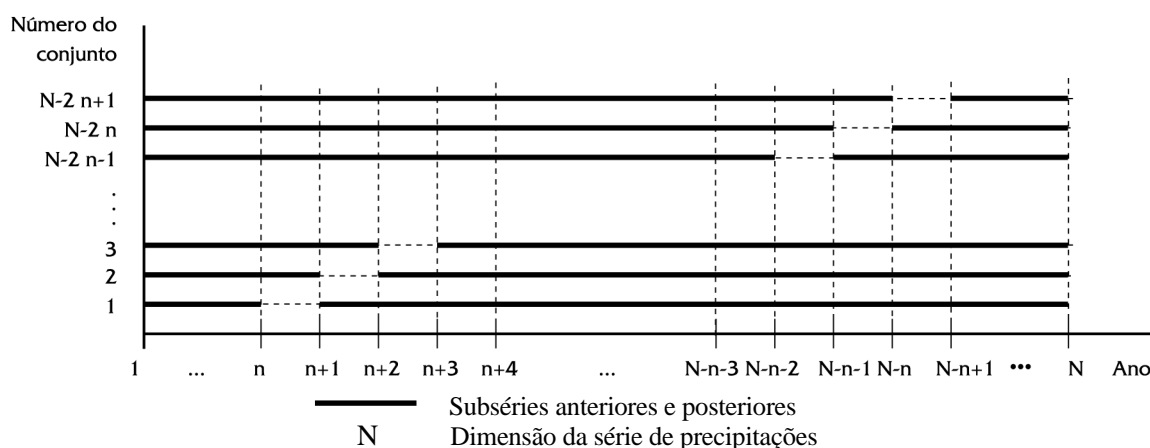


Figura 3. $N-2n+1$ conjuntos de duas subséries, uma anterior e outra posterior.

designadas por média da subsérie anterior e média da subsérie posterior.

Considerou-se ocorrer quebra de homogeneidade entre as médias das subséries relativas aos primeiros j anos e aos $(N-j)$ anos subsequentes quando, de acordo com pelo menos um dos testes anteriormente descritos, tais médias fossem significativamente diferentes, tendo-se imputado a quebra ao ano j .

Os resultados da pesquisa, para cada um dos postos udométricos analisados, de quebras de homogeneidade nas respectivas séries de precipitação relativas ao ano hidrológico ou a uma das épocas do mesmo, foram sintetizados em diagramas cronológicos em que se assinalaram, por meio de círculos, os anos em que ocorreram quebras.

Elaboraram-se ainda diagramas cronológicos com as representações das médias $\bar{P}_1^{(j)}$ e $\bar{P}_2^{(j)}$ adimensionalizadas em relação à média, \bar{P} , da série de precipitações no período de N anos com registos $(\bar{P}_1^{(j)}/\bar{P}$ e $\bar{P}_2^{(j)}/\bar{P})$. Tanto as quebras de homogeneidade, como as anteriores médias foram imputadas aos últimos anos das sucessivas subséries anteriores, pelo que os eixos das abcissas dos diagramas cronológicos foram graduados entre n e $N-n+1$.

Os procedimentos descritos neste item foram expressamente desenvolvidos para o estudo a que respeita o presente artigo. Como mostram os resultados das aplicações efectuadas (itens 4 e 5), considera-se que tais procedimentos se revestem de elevado interesse para detectar, quer quebras de homogeneidade decorrentes de alteração nas condições de observação da precipitação (ou de outras variáveis hidrológicas), quer modificações tendenciais nas propriedades das correspondentes séries.

APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DESCRITOS. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Para aplicação dos procedimentos descritos seleccionaram-se onze postos udométricos das bacias hidrográficas dos rios Tejo e Douro, Figura 4, com séries de precipitações iniciadas anteriormente ao ano hidrológico de 1920/21, ou seja, abrangendo um período suficientemente longo para que uma eventual mudança das características climáticas possa ser detectada.

No Quadro 1 identificam-se os postos seleccionados, as bacias hidrográficas em que se inserem e os períodos de registos considerados. Indicam-se, também, as médias das precipitações referentes ao ano hidrológico (de Outubro a Setembro), ao 1º Trimestre (de Outubro a Dezembro), ao 2º Trimestre (de Janeiro a Março) e ao mês de Março (no qual a tendência de variação da precipitação se revelou mais acentuada). Tais médias estão apresentadas, para os períodos com registos, em termos absolutos e, para os últimos 15 anos de registos, em termos adimensionais em relação às correspondentes médias nos períodos de registos.

Nota-se que, no conjunto dos onze postos considerados, se verificaram falhas em 124 meses, as quais foram preenchidas por regressão linear. Refere-se, ainda, que, nos últimos anos, alguns postos apresentam uma muito maior incidência de falhas de registos que, contudo, não puderam ser preenchidas por ainda não estarem processadas as precipitações em postos geograficamente próximos que permitissem o preenchimento daquelas falhas.

Para cada um dos onze postos udométricos do Quadro 1 e para as séries da precipitação no ano

hidrológico, no 1º Trimestre (de Outubro a Dezembro), no 2º Trimestre (de Janeiro a Março) e no mês de Março, obtiveram-se os seguintes gráficos:

a) Diagramas cronológicos das médias móveis das séries de precipitação em grupos de 15 anos consecutivos.

b) Diagramas cronológicos em que são assinaladas, por meio de círculos, as quebras de homogeneidade entre as médias das precipitações nas subséries anteriores e as médias das precipitações nas correspondentes subséries posteriores.

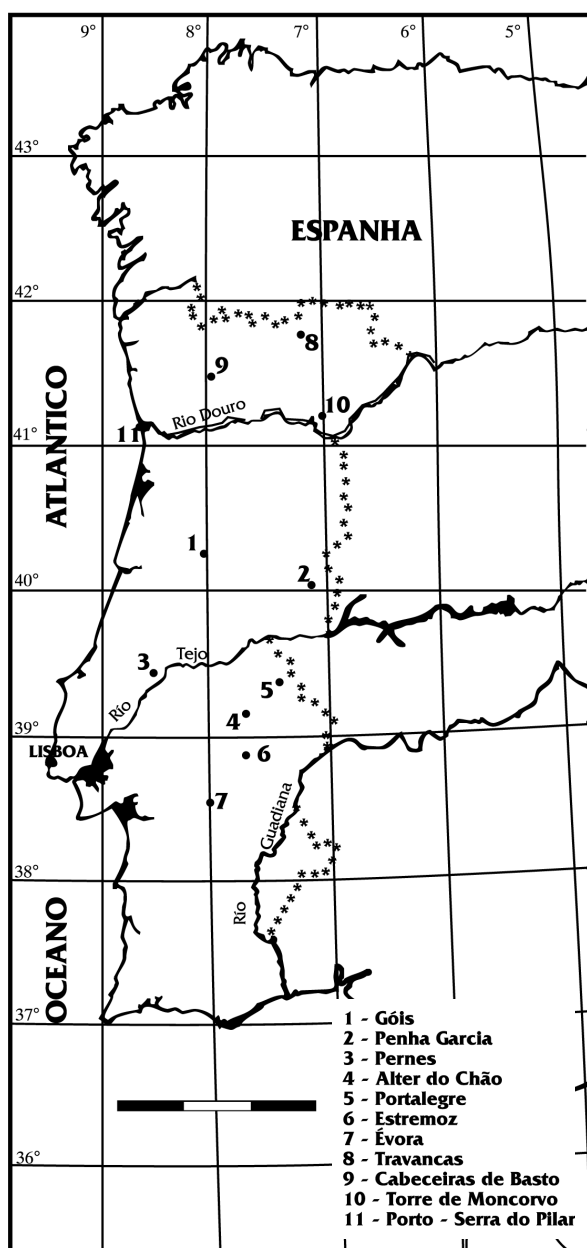


Figura 4. Postos udométricos portugueses analisados. Localização e identificação

c) Diagramas cronológicos das médias dos valores da precipitação que constituem as sucessivas subséries anteriores e posteriores.

Não obstante os anteriores diagramas cronológicos terem sido obtidos para os onze postos estudados e se inclua neste artigo a análise, embora resumida, dos resultados relativos a esses postos, a apresentação dos diagramas cronológicos foi efectuada, a título de exemplo, apenas para os seis postos assinalados no Quadro 1 por meio de asterisco (*).

Os elementos da alínea a) foram obtidos por aplicação dos procedimentos descritos no item 2 a sucessivos grupos de 15 anos consecutivos de registos; os elementos das alíneas b) e c) decorreram dos procedimentos descritos no item 3, tendo-se fixado em 5% o nível de significância associado à não rejeição da hipótese de igualdade das médias entre cada duas subséries anterior e posterior. A dimensão mínima de qualquer subsérie anterior ou posterior foi fixada também em 15 anos.

Nos diagramas cronológicos das alíneas a) e c) os valores das precipitações relativos ao ano ou às épocas do mesmo foram adimensionalizados em relação à correspondente média no período de registos.

Apesar de, na descrição dos procedimentos aplicados, se ter identificado cada ano hidrológico por um número de ordem (entre 1 e a dimensão N da série de precipitações), na apresentação dos diagramas cronológicos optou-se por referenciar tal ano pelo ano civil em que se inicia. Assim, por exemplo, o ano de 1956 indicado numa figura corresponde ao ano hidrológico de 1956/57.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Análise por médias móveis: Figura 5

As representações cronológicas das médias móveis das precipitações no ano (precipitações anuais) nos diferentes postos não exibem um comportamento comum. Nota-se, contudo, que, com excepção dos postos de Alter, Portalegre e Porto-Serra do Pilar, cada um dos restantes postos apresenta médias móveis que, para todos os grupos de 15 anos com início, o mais tardar, após o ano hidrológico de 1968/69, são inferiores à média no período de registos; esta observação é também válida para o posto de Portalegre, mas para os grupos de 15 anos com início posterior a 1976/77.

A DIMINUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO EM ÉPOCAS DO ANO COMO INDÍCIO DE MUDANÇA CLIMÁTICA: CASOS ESTUDADOS EM PORTUGAL CONTINENTAL

Quadro 1. Postos udométricos analisados. Localização. Precipitações médias no período de registos e precipitações médias adimensionais nos últimos 15 anos.

Nome do posto (-)	Bacia hidrográfica (-)	Período (-)	Período de registos			
			Precipitação média			
			Ano (mm)	1º Trimestre (mm)	2º Trimestre (mm)	Março (mm)
Góis (*)		1917/18 - 98/99	1162	404	441	132
Penha Garcia		1910/11 - 98/99	803	306	289	89
Pernes (*)		1915/16 - 94/95	834	310	323	100
Alter do Chão	rio Tejo	1911/12 - 98/99	625	224	236	72
Portalegre		1910/11 - 96/97	854	312	325	101
Estremoz		1911/12 - 94/95	658	243	248	82
Évora (*)		1900/01 - 95/96	640	239	240	76
Travancas (*)		1913/14 - 98/99	993	345	336	101
Cabeceiras Basto	rio Douro	1913/14 - 98/99	1505	527	562	166
Torre Moncorvo (*)		1878/79 - 1994/95	563	204	173	54
Porto-Serra Pilar (*)		1900/01 - 93/94	1187	440	415	127

Nome do posto (-)	Bacia hidrográfica (-)	Período (-)	Último período de 15 anos			
			Precipitação média adimensional			
			Ano (-)	1º Trimestre (-)	2º Trimestre (-)	Março (-)
Góis (*)		1917/18 - 98/99	0,927	1,040	0,755	0,439
Penha Garcia		1910/11 - 98/99	0,976	1,123	0,800	0,368
Pernes (*)		1915/16 - 94/95	0,784	0,922	0,589	0,376
Alter do Chão	rio Tejo	1911/12 - 98/99	1,028	1,212	0,820	0,436
Portalegre		1910/11 - 96/97	0,975	1,105	0,762	0,436
Estremoz		1911/12 - 94/95	0,878	1,022	0,651	0,434
Évora (*)		1900/01 - 95/96	0,924	1,049	0,724	0,418
Travancas (*)		1913/14 - 98/99	0,935	1,061	0,727	0,451
Cabeceiras Basto	rio Douro	1913/14 - 98/99	0,982	1,173	0,775	0,394
Torre Moncorvo (*)		1878/79 - 1994/95	0,882	1,012	0,614	0,442
Porto-Serra Pilar (*)		1900/01 - 93/94	0,985	1,075	0,796	0,651

(*) Postos de que se apresentam diagramas cronológicos _ Figuras 5 a 7.

Deve, porém, registrar-se que nalguns postos, como Portalegre, Cabeceiras de Basto e Torre de Moncorvo, haviam sido registadas anteriormente médias móveis mais baixas do que as relativas aos grupos de 15 anos com início posterior a 1968/69 (ou a 1976/77).

Observa-se ainda que, em seis dos postos analisados (Quadro 1), as médias das precipitações anuais nos últimos períodos de 15 anos se situam sensivelmente entre 78 a 94% das correspondentes médias nos períodos de registos. Nos demais postos as médias das precipitações anuais nos últimos 15 anos são muito próximas das precipitações anuais médias nos períodos de registos e, com exceção do posto de Alter do Chão, sempre ligeiramente inferiores.

Parece, assim, registrar-se uma tendência, embora muito pouco acentuada, para diminuição nas últimas décadas da precipitação anual em grande

parte dos postos analisados.

As médias móveis relativas ao 1º Trimestre do ano hidrológico exibem quase sempre variações desordenadas em torno das correspondentes médias nos períodos de registos, não manifestando, portanto, tendência para uma variação sistemática dos valores da precipitação.

No que respeita às séries de precipitação no 2º Trimestre regista-se que, em cada um dos postos, com exceção do posto de Porto-Serra do Pilar, as médias móveis em grupos de 15 anos com início posterior ao ano hidrológico de 1969/70 são sempre inferiores às médias nos períodos de registos, tendendo a diferença quase sempre a aumentar ao longo do tempo. Naquele posto tal situação só ocorre a partir de 1976/77.

Para o mês de Março todos os grupos de 15 anos consecutivos com início posterior ao hidroló-

gico de 1962/63 exibem, sem excepção e mais acentuadamente, médias móveis também inferiores às correspondentes médias nos períodos de registos. Nota-se que as subséries referentes ao mês de Março constituídas pelos últimos 15 anos de registos apresentam sempre as mais baixas médias.

Conforme assinalado no Quadro 1, exceptuando o posto de Porto-Serra do Pilar, as médias da precipitação no mês de Março nos últimos 15 anos são sempre inferiores a 50% das médias nos respectivos períodos de registos. Para aquele posto a anterior percentagem é de 65%.

Da análise de médias móveis conclui-se, assim, que as precipitações registadas no 2º Trimestre e, de modo mais acentuado, no mês de Março exibem uma nítida redução nas últimas décadas que, embora de modo muito atenuado, poderá notar-se também na precipitação anual.

Análise de quebras de homogeneidade: Figura 6

Os resultados da detecção de quebras de homogeneidade entre sucessivos conjuntos de duas subséries, uma anterior e outra posterior, apresentados nos diagramas cronológicos da Figura 6, reforçam a conclusão do item 5.1.

Uma quebra de homogeneidade assinalada num destes diagramas só corresponderá a uma alteração real das características da correspondente série de precipitações se se mantiver entre subsequentes subséries (anteriores e posteriores). Nestas condições estão claramente as séries das precipitações no mês de Março que, exceptuando os postos de Cabeceiras de Basto e de Porto-Serra do Pilar, exibem quebras de homogeneidade continuadas a partir de anos incluídos nas décadas de 1940 ou de 1950. Tais quebras são sempre no sentido da diminuição das médias das precipitações nas subséries posteriores em relação às médias nos períodos de registos.

Tais quebras de homogeneidade são observadas em grande parte dos postos também para o 2º Trimestre do ano hidrológico e, raramente, para o próprio ano, embora iniciando-se em anos muito posteriores.

Os postos de Cabeceiras de Basto e de Porto-Serra do Pilar apresentam resultados diferentes dos descritos. As séries relativas ao ano e a quase todas as épocas do ano naquele primeiro posto exibem

quebras de homogeneidade logo no início da exploração e que, no caso das séries da precipitação no mês de Março, permanecem ao longo do período de registos. No que respeita ao posto de Porto-Serra do Pilar, as correspondentes séries de precipitação não exibem quebras de homogeneidade continuadas, pelo que se admite a não alteração das características estatísticas das correspondentes séries de precipitação.

Diagramas cronológicos das médias das subséries anteriores e posteriores: Figura 7

Os diagramas cronológicos da Figura 7 relativos às médias adimensionais das sucessivas subséries anteriores e posteriores evidenciam, de modo mais expressivo, os comportamentos já detectados nos diagramas das Figuras 5 e 6 (itens 5.1 e 5.2). Assim, para o 2º Trimestre e para o mês de Março e, por vezes, para o ano, as subséries posteriores apresentam, a partir de determinados anos, médias que, comparativamente com as correspondentes médias nos períodos de registos, são quase sempre tanto menores quanto mais avança no tempo o fim da subsérie anterior, provavelmente pela influência das mais baixas precipitações ocorridas nos últimos anos.

Observa-se que os decréscimos das médias das subséries posteriores em relação às médias nos períodos de registos são aparentes nos diagramas da Figura 7 muito anteriormente a corresponderem a quebras de homogeneidade nas médias daquelas subséries -Figura 6. A evidência da diminuição, a partir de determinados anos, da precipitação no 2º Trimestre e, especialmente, em Março em quase todos os postos confere credibilidade à aceitação de tal diminuição, não obstante só se verificar muito posteriormente o seu reconhecimento pelos testes estatísticos aplicados, como mostra a Figura 6.

De entre todas as subséries posteriores referentes ao mês de Março, as que apresentam as mais baixas médias, ou médias que praticamente não diferem das mais baixas, são constituídas pelos últimos 15 anos de registos. As médias adimensionais nestes últimos anos naquele mês constam do Quadro 1.

Julga-se de interesse salientar que as médias das precipitações no mês de Março relativas às subséries posteriores com início, o mais tardar, após o ano hidrológico de 1934/35 são, para os onze postos analisados, inferiores às médias nos períodos de registos, acentuando-se, de modo geral, a diferença entre tais médias ao longo do tempo.

A DIMINUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO EM ÉPOCAS DO ANO COMO INDÍCIO DE MUDANÇA CLIMÁTICA: CASOS ESTUDADOS EM PORTUGAL CONTINENTAL

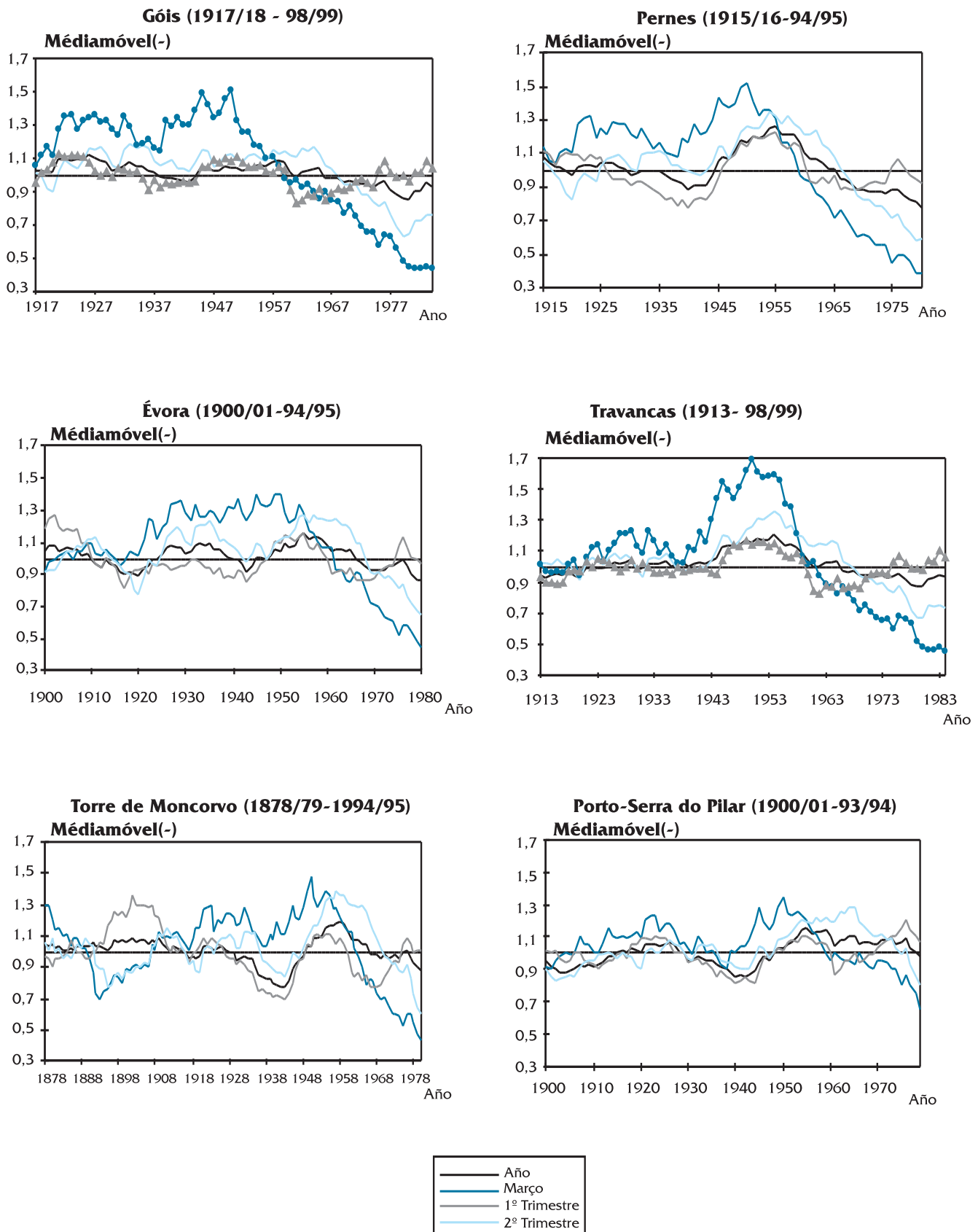


Figura 5. Diagramas cronológicos adimensionais das médias móveis das precipitações em grupos de 15 anos

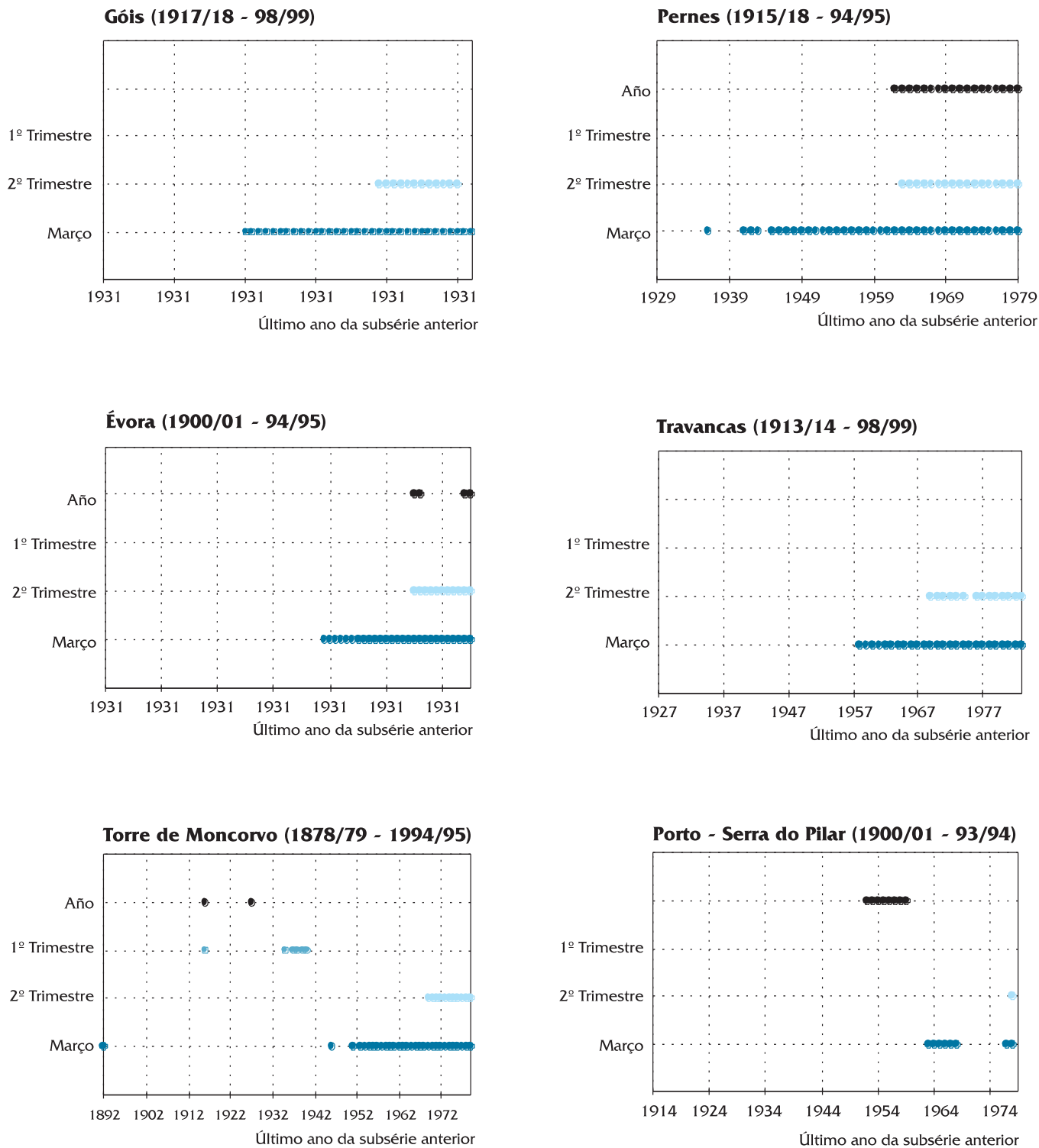
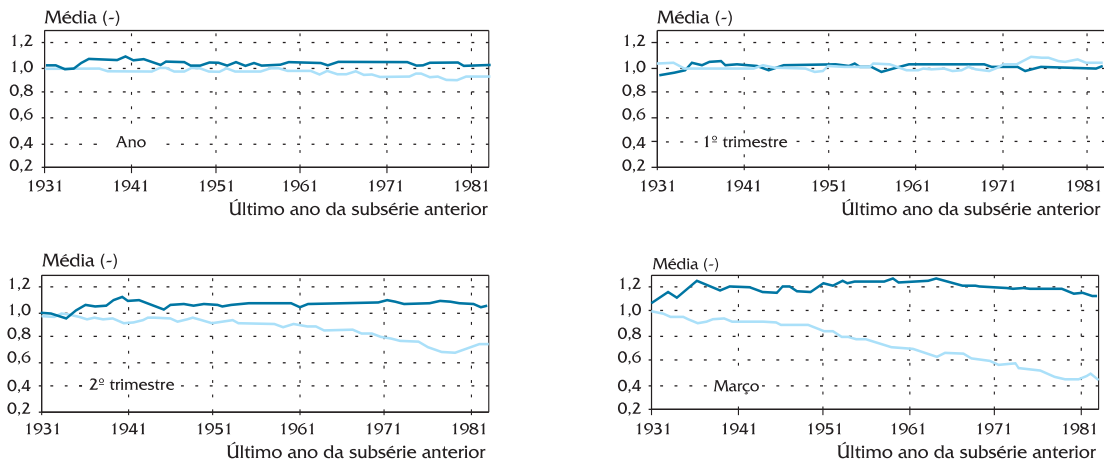


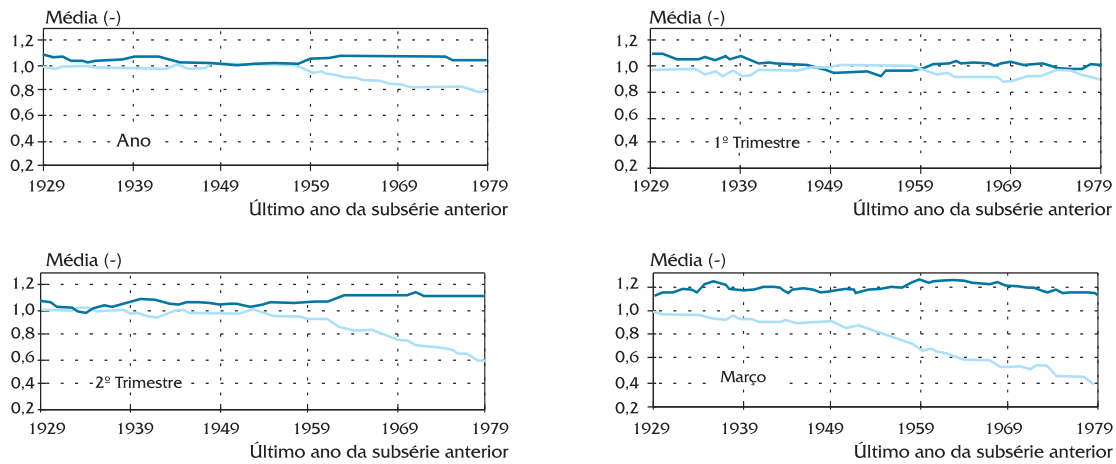
Figura 6. Anos com médias das subséries anteriores e posteriores significativamente diferentes

A DIMINUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO EM ÉPOCAS DO ANO COMO INDÍCIO DE MUDANÇA CLIMÁTICA: CASOS ESTUDADOS EM PORTUGAL CONTINENTAL

Góis (1917/18 - 1998/99)



Pernes (1915/16 - 1994/95)



Évora (1900/01 - 1994/95)

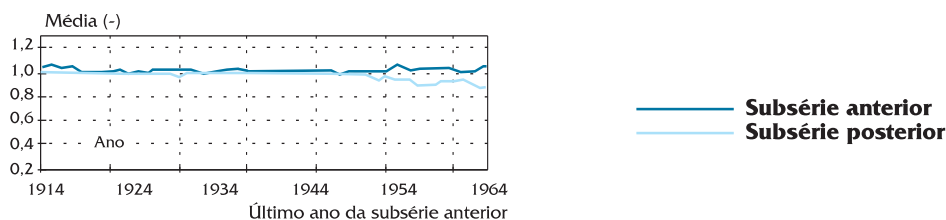


Figura 7 (1/2). Médias adimensionais das subséries anteriores e posteriores

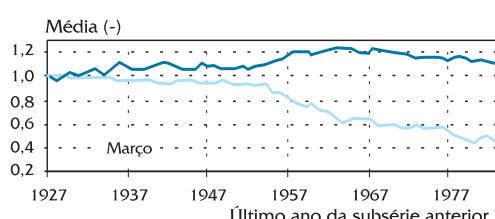
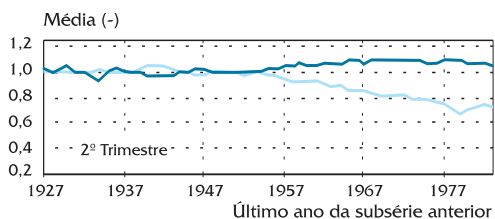
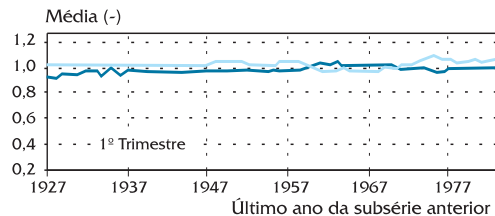
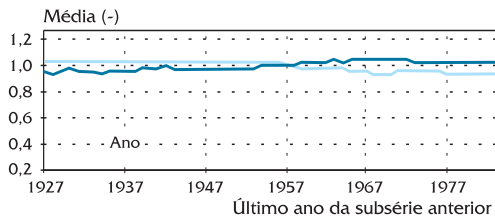
6. EFEITOS DA DIMENSÃO DO GRUPO DE ANOS ADOPTADO NA DESCRIÇÃO POR MÉDIAS MÓVEIS E DA DIMENSÃO MÍNIMA DAS SUBSÉRIES ANTERIORES E POSTERIORES

Como referido, os resultados apresentados pressupuseram que a dimensão, n , tanto do grupo de anos consecutivos adoptado na descrição por médias móveis, como mínima das subséries anteriores e posteriores era de 15 anos. Ao adoptar esta

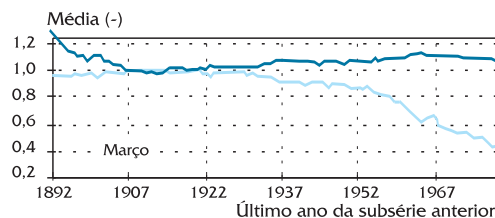
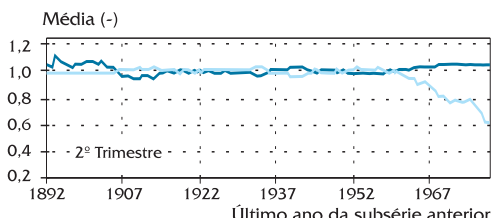
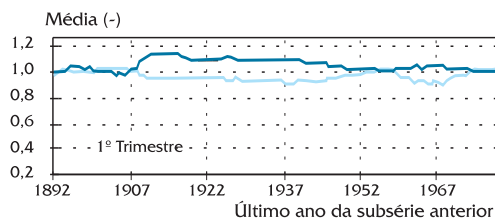
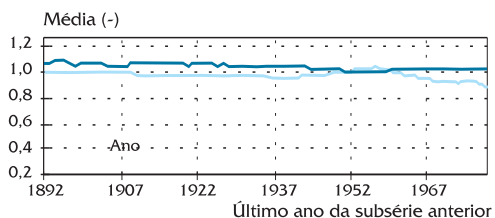
dimensão pretendeu-se, por um lado, assegurar que as características das séries de precipitação nos menores períodos de registos analisados representavam condições aproximadamente médias e, por outro lado, aplicar os procedimentos propostos ao maior número possível de períodos.

Por forma a reconhecer em que medida a dimensão em causa interfere na apreciação do comportamento das séries de precipitação, aplicaram-se aqueles procedimentos ao posto de Alter do Chão

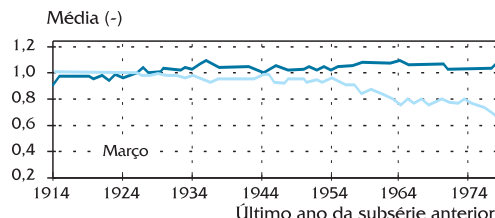
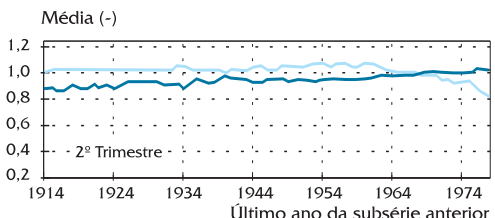
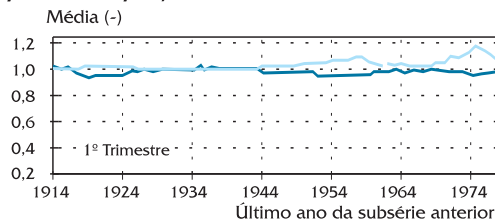
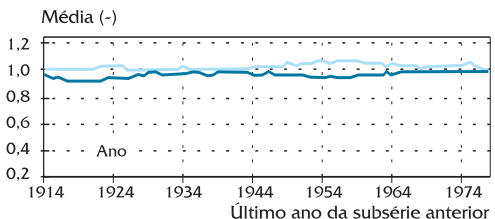
Travancas (1913/14 - 1998/99)



Torre de Moncorvo (1878/79 - 1994/95)



Porto Serra do Pilar (1900/01 - 1993/94)



— Subsérie anterior
— Subsérie posterior

Figura 7 (2/2). Médias adimensionais das subséries anteriores e posteriores

considerando, para o efeito, valores de n de 5, 15 e 25 anos. Na Figura 8 apresentam-se, de entre os resultados obtidos, as médias móveis relativas ao mês de Março, a análise de quebras de homogeneidade e os diagramas cronológicos das médias das subséries anteriores e posteriores, também para aquele mês.

A anterior figura evidencia como aumento da dimensão n reduz o número de períodos a que é aplicada a análise desenvolvida. Mostra, ainda, que, exceptuando as médias móveis - Figura 8, a) -, a única consequência do aumento da dimensão n é reduzir a “janela” para a qual são apresentados resultados. De facto, designando por n_{max} a maior das dimensões consideradas para n ($n_{max} = 25$ anos), são coincidentes os resultados, tanto da análise de quebras de homogeneidade - Figura 8, b) - como da comparação das médias das subséries anteriores e posteriores - Figura 8, c) -, referentes às subséries anteriores terminando entre os anos n_{max} e $N - n_{max}$ (em que N é a dimensão do período de registos).

No que respeita à análise por médias móveis, a diminuição de n faz com que a ocorrência de anos com características extremas (anos muito húmidos ou muito secos) apareça muito evidenciada sem que tais anos impliquem, contudo, alteração das condições médias de precipitação.

CONCLUSÕES E PROSSEGUIMENTO DO ESTUDO

Da análise efectuada nos postos udométricos seleccionados resultou evidente que as precipitações no 2º Trimestre do ano hidrológico (de Janeiro a Março) e, de modo mais acentuado, no mês de Março, exibem uma tendência nítida de redução: nos últimos 15 anos e em relação às médias nos períodos de registos, a precipitação ocorrida naquele trimestre representa entre 59% e 82% e a precipitação no mês de Março, entre 37% e 65%. Alguns dos postos analisados poderão sustentar a hipótese de tendência para diminuição, embora muito atenuada, também da precipitação anual.

A importância dos resultados obtidos na substanciação da hipótese da precipitação ter diminuído em consequência de mudança climática justifica o prosseguimento dos estudos. Tal prosseguimento deverá dar prioridade à confirmação ou não das variações da precipitação agora detectadas, mediante a análise de séries de precipitação em maior número de postos udométricos que disponham de longos períodos de registo.

Se os postos analisados forem em número significativo e cobrirem razoavelmente o território nacional, procurar-se-á proceder à identificação de zonas exibindo semelhantes tendências de variação da precipitação.

Tanto para os postos agora seleccionados, como para os que venham a ser estudados, analisar-se-á o comportamento das séries de precipitação noutros meses que não somente o de Março. De facto, o estudo efectuado permitiu concluir que a acentuada redução da precipitação no mês de Março se atenua progressivamente ao passar-se para o 2º Trimestre do ano hidrológico (de Janeiro a Março) e também para o ano hidrológico (de Outubro a Setembro). Esta verificação sugere que poderão ocorrer aumentos da precipitação em meses do ano que contrabalancem, em parte, a redução registada no mês de Março, não obstante se não excluir a hi-

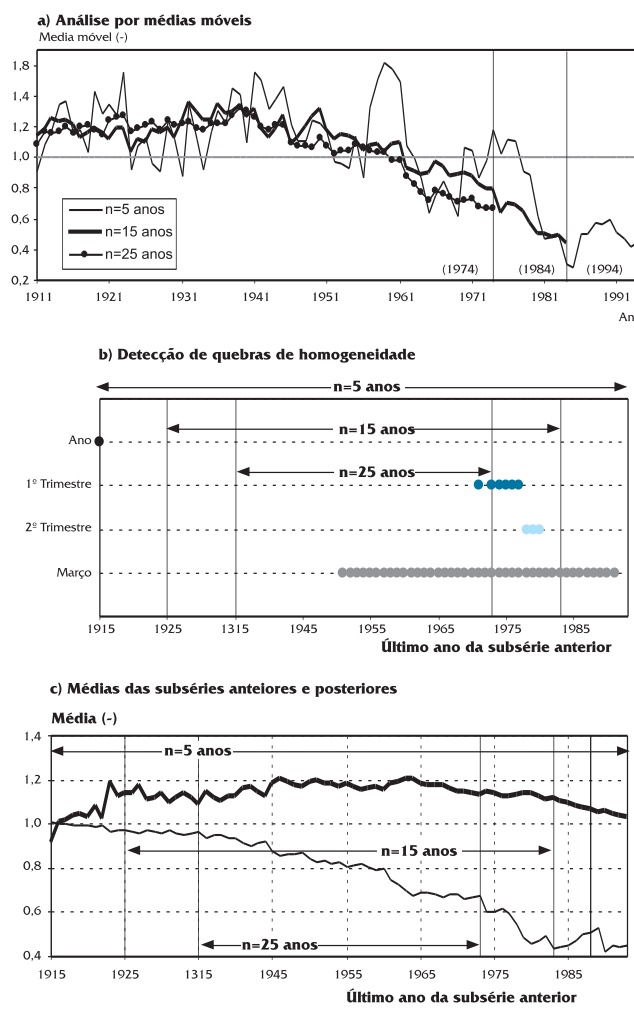


Figura 8 - Posto de Alter do Chão. Precipitação em Março. Efeito da dimensão, n , do grupo de anos consecutivos adoptada na descrição por médias móveis e considerada mínima na análise por subséries anteriores e posteriores.

pótese de também haver redução da precipitação noutros meses.

Para além da análise, que se preconiza, da variação da precipitação a nível de cada mês, procurar-se-á quantificar a eventual alteração da repartição por meses da precipitação em cada ano do período de registos.

BIBLIOGRAFIA

- Alves, M. C., 1998, "Os recursos hídricos e a possibilidade de mudança climática", 4º Congresso da Água, Lisboa.
- Corte-Real, J., Qian, B. e Xu, H., 1998, "Regional climate change in Portugal. Precipitation variability associate with large-scale atmospheric circulation", *International Journal of Climatology*, 18, p. 619-635.
- Corte-Real, J., Xu, H. e Qian, B., 1999, "A waether generator for obtaining daily precipitation scenarios based on circulation patterns2, *Climate Research*, Vol. 13, p. 61-75.
- Henriques, A. G., 1990, Modelos de distribuição de frequências de caudais de cheia, Dissertação de Doutoramento, IST, Lisboa.
- Houghton, J., 1997, *Global warming*. Cambodge University Press, 2nd Edition, United Kingdom.
- Mendes, J. C. e Coelho, M. F. E. S., 1993, Variabilidade climática em Portugal Continental. Quantidade de precipitação. Índice regional de anomalia; tendência; variabilidade por decénios e trinténios, INMG, Monografia de Meteorologia e Geofísica nº 43, Lisboa.
- Murteira, B. J. F., 1980, Probabilidade e estatística. Volume II, McGraw-Hill de Portugal.
- Papoulis, A., 1985, *Probability, random variables, and stochastic processes*, McGraw-Hill, International Student Edition, Singapore.
- Siegel, S., 1975, *Estatística não-paramétrica para as Ciências do Comportamento*, McGraw-Hill, Brasil.
- Yevjevich, V., 1972, *Probability and statistics in Hydrology*, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA, 1972.

SIMBOLOGIA

- α nível de significância;
- ϕ função distribuição de probabilidade da lei normal;
- ϕ^{-1} inversa da função distribuição de probabilidade da lei normal;
- i índice de ano; número de ordem do grupo de n anos consecutivos;
- j número de ordem, quer da subsérie anterior referente aos primeiros j anos hidrológicos (entre os anos 1 e j), quer da correspondente subsérie posterior relativa aos últimos $N-j$ anos hidrológicos (entre os anos $j+1$ e N , sendo $j \geq n$ e $N-j \geq n$);
- η nível de confiança;
- n número de anos hidrológicos consecutivos;
- n_{\max} número máximo de anos hidrológicos consecutivos;
- N dimensão do período de registos;
- N_1 número de ordem do último ano hidrológico de uma subsérie anterior; dimensão da subsérie anterior entre os anos hidrológicos 1 e N_1 ;
- N_2 dimensão da subsérie posterior entre os anos hidrológicos N_1+1 e N ($N_2=N-N_1$);
- $N_1^{(j)}$ dimensão da subsérie anterior de ordem j ;
- $N_2^{(j)}$ dimensão da subsérie posterior de ordem j ;
- N_{MW} estatística do teste de Mann-Whitney,
- \bar{N}_{MW} média da distribuição assimpótica da estatística N_{MW} ;
- p_i precipitação no ano i (na totalidade do ano hidrológico ou em determinada época do ano hidrológico);
- P série de precipitações (na totalidade do ano hidrológico ou em determinada época do ano hidrológico);
- \bar{P} média de P no período de registos;
- \bar{P}_1 média de P nos primeiros N_1 anos hidrológicos consecutivos;
- \bar{P}_2 média de P nos últimos N_2 anos hidrológicos consecutivos;
- $\bar{P}_1^{(j)}$ média de P na subsérie anterior de ordem j ;
- $\bar{P}_2^{(j)}$ média de P na subsérie posterior de ordem j ;
- s desvio-padrão da população;
- s_1 desvio-padrão referente à subsérie anterior com dimensão N_1 ;
- s_2 desvio-padrão referente à subsérie posterior com dimensão N_2 ;
- s_1^2 variância referente à subsérie anterior com dimensão N_1 ;
- s_2^2 variância referente à subsérie posterior com dimensão N_2 ;
- s_{MW}^2 variância da distribuição assimpótica da estatística N_{MW} ;
- t_s estatística do teste de Student;
- $t_{(1-\alpha/2)}$ quantil da distribuição de Student.