

O Impacto da Oscilação do Atlântico Norte no caudal dos rios ibéricos Intenacionais

Ricardo MACHADO TRIGO

Universidade Lusófona y Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa
rmtrigo@fc.ul.pt

RESUMEN

Apresentam-se as regiões onde o impacto da NAO no campo da precipitação é estatisticamente significativo, à escala do continente Europeu, da Península Ibérica e de Portugal. O regime de precipitação de Portugal é irregular, com grande variabilidade interanual, sendo esta, em grande medida, controlada por este índice. A distribuição da precipitação para índice baixo da NAO (< -0.5) apresenta um valor medio mais elevado (e uma gama de valores maior) que o correspondente compósito elevado do índice da NAO (> 0.5). Analisou-se o impacto da NAO no regime dos três principais rios internacionais Ibéricos, o Douro, o Tejo e o Guadiana. Os resultados confirmam que o caudal destes rios é, em grande medida, modelado pela fase da NAO. Este controlo exercido pela NAO, associado com a tendência crescente do índice NAO, poderá ter efeitos nefastos como uma diminuição do caudal a prazo. Tal redução teria sempre grande impacto económico na agricultura e na produção de energia eléctrica de origem hídrica em Portugal e Espanha.

Palabras clave: Oscilação do Atlântico Norte, trajectórias depressionárias, temperaturas máxima e mínima, taxa de precipitação, água pricipitável, regime fluvial.

The Impact of the North Atlantic Oscillation on river flow of three major Iberian rivers

ABSTRACT

We have assessed the impact of the North Atlantic Oscillation (NAO) on the winter precipitation at various spatial scales, namely; Europe, Iberian Peninsula and Portugal. Results show that the large inter-annual variability of winter precipitation in Portugal is largely modulated by the NAO mode. The precipitation composite corresponding to high NAO (> 0.5) index presents a considerable lower median value than the corresponding low NAO (< -0.5) index class. Furthermore, the entire precipitation distribution associated to the low NAO index composite encompasses a wider range of values than the corresponding high NAO index composite. Finally, we have assessed the impact of the NAO on winter river flow regimes for the three main international Iberian rivers, the Douro (north), the Tagus (centre) and the Guadiana (south). Results show that the large inter-annual variability of flow of these three rivers is largely modulated by the NAO. Such modulation, associated with the recent positive trend of the NAO index, might implicate a significant decrease of the available flow. This reduction can represent an important hazard for the Portuguese and Spanish economy due to its impact in agricultural yield and hydroelectric power production.

Keywords: North Atlantic Oscillation, storm tracks, maximum and minimum temperatures, precipitation rate, precipitable water, river flow regime.

SUMARIO: 1. Introdução. 2. Impacto da NAO na precipitação (Europa, Ibéria, Portugal). 3. Impacto da NAO no caudal dos rios Douro, Tejo e Guadiana. 4. Conclusões e discussão. 5. Agradecimentos. 6. Referencias bibliográficas.

1. INTRODUÇÃO

A oscilação do Atlântico Norte, designada por NAO (North Atlantic Oscillation), constitui um dos modos principais de variabilidade lenta da atmosfera que afecta o clima de Portugal. O índice NAO foi inicialmente proposto por Walker (1924) como a diferença de pressão entre os Açores e a Islândia. Recentemente, outros autores (Jones et al. 1997; Osborn et al. 1999) têm vindo igualmente a utilizar como índice NAO a diferença de pressão entre Lisboa e a Islândia ou entre Gibraltar e a Islândia (definição adoptada neste trabalho. O índice NAO está relacionado com a intensidade do vento de Oeste no Atlântico Norte. A NAO pode ser interpretada em termos de uma troca meridional em larga escala de massa atmosférica (van Loon e Rogers 1978) ou como a oscilação de larga escala de uma configuração do campo da anomalia da pressão (Osborn et al. 1999). Nas últimas décadas tem estado fortemente correlacionada com a precipitação e temperatura médias de certas regiões da Europa (Hurrell 1995; Hurrell e van Loon 1997; Trigo et al. 2002). No caso da Península Ibérica, a tendência da NAO no mês de Março encontra-se negativamente correlacionada com a tendência da precipitação observada nesse mês (Trigo et al. 2004a). As observações indicam que, a valores baixos do índice NAO estão associadas quantidades de precipitação acima da média em Portugal, enquanto valores elevados deste índice correspondem a quantidades de precipitação abaixo da média (Trigo et al. 2002; Trigo et al. 2004a).

2. ÍMPACTO DA NAO NA PRECIPITAÇÃO (EUROPA, IBÉRIA, PORTUGAL)

O impacto da NAO no campo da pressão e da precipitação sobre todo o Atlântico Norte e continente Europeu é apresentada na Fig. 1. Para a construção desta figura definiram-se os compósitos sazonais com NAO elevada (NAO baixa) como contendo todos os Invernos (média dos valores para DJFM) com índice $NAO > 0.5$ (< -0.5), sendo o índice NAO normalizado da forma tradicional. As diferenças entre as taxas de precipitação de compósitos com NAO elevada e NAO baixa que são significativas ao nível de 5% estão representadas através de uma escala de cores, tendo a significância estatística dos compósitos sido calculada utilizando um teste *t-student* para a hipótese nula de médias iguais. A anomalia do campo de pressão entre os dois compósitos, NAO elevada e NAO baixa, foi representada usando isolinhas. Uma análise cuidada da Fig. 1 permite concluir que as regiões de impacto positivo da NAO no campo da precipitação se concentram nas latitudes mais a Norte, estendendo-se desde o Sul da Gronelândia até à Finlândia e atingindo valores máximos ao Sul da Islândia e a Oeste da Escócia. Nas latitudes mais a Sul, uma banda extensa de anomalias negativas está situada entre a zona a Oeste dos Açores e a região do Mar Negro, com os valores mais elevados localizados entre o Arquipélago dos Açores e a parte Oeste da Península Ibérica. É esta banda que se pretende analisar de seguida com mais detalhe.

A correlação entre o índice NAO e a precipitação de Inverno na parte Oeste da Península pode ser entendida como uma consequência da precipitação nesta zona ser

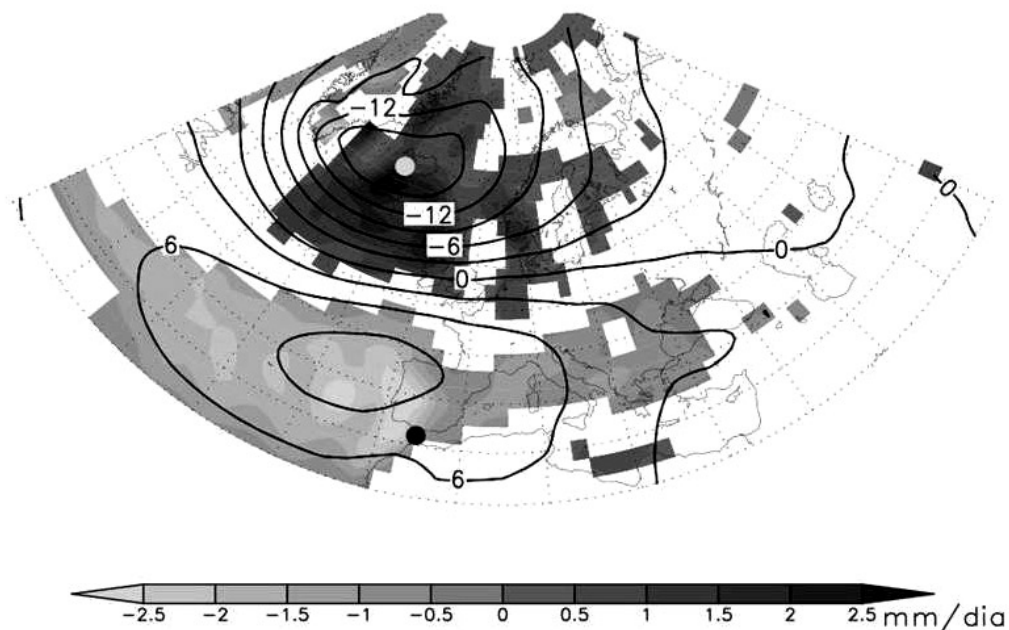


Figure 1. Anomalia da precipitação (cinza) e anomalia da pressão ao nível do mar (hPa - isolinhas) em DJFM entre compósitos com NAO >0.5 e para NAO <-0.5 . Dados NCEP (1958-1997). Índice da NAO calculado entre a Islândia (círculo preto) e Gibraltar (círculo cinzento).

em grande parte de origem frontal e depender fortemente da trajectória das depressões no Atlântico Norte (Ulbrich et al. 1999).

A Fig. 2 apresenta compósitos dos campos de anomalias da precipitação invernal (DJFM), para a zona da Península Ibérica e para o período compreendido entre de 1901 e 1995. Os compósitos relativos a meses com índice NAO elevado (baixo) podem ser observados na Fig. 2a (Fig. 2b). A diferença dos dois compósitos pode ser observada na Fig. 2c, estando unicamente representadas as zonas onde essa diferença é estatisticamente significativa ao nível de 5%.

Tal como seria de esperar, existe para a zona da Península Ibérica, uma forte semelhança com as correspondentes figuras relativas à taxa da precipitação. Assim, continua a verificar-se que o impacto da NAO no campo da precipitação observada é mais intenso nas zonas Oeste (Portugal) e Sul de Espanha (Andaluzia), apresentando, no entanto, um prolongamento para Marrocos mais evidente que no campo da taxa de precipitação (ver Fig. 1). Estes resultados vão ao encontro de estudos anteriores realizados por autores que calcularam o coeficiente de correlação da precipitação invernal com o correspondente índice NAO (e.g. Rodó et al. 1997; Trigo et al. 2004b).

As séries temporais da precipitação mensal nos meses de Inverno (DJFM) para Portugal Continental (média de cerca de 50 estações) e do índice NAO apresentam-

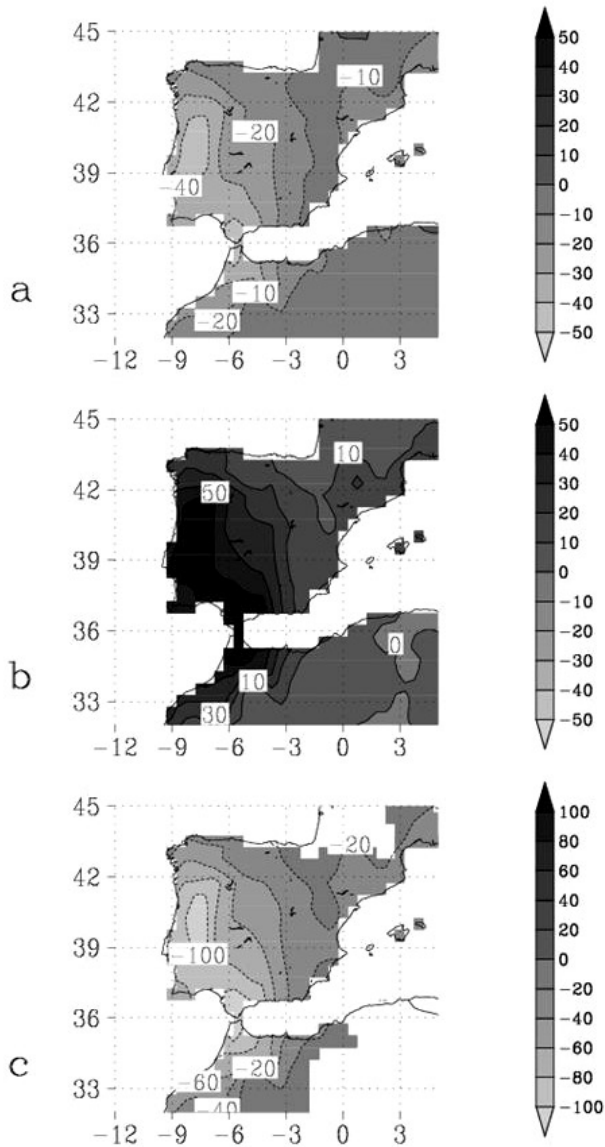


Figure 2. Compósitos do campo de anomalias da precipitação mensal (mm/mês) na zona do sul da europa, para os meses de Inverno (DJFM) relativos ao período 1901-1995: (a) índice NAO > 0.5 , (b) índice NAO < -0.5 e (c) diferença entre os dois compósitos (representada apenas se fôr estatisticamente significativa ao nível de 5%).

se na Fig. 3. As séries foram normalizadas e o índice NAO multiplicado por (-1) para facilitar comparações visuais. O coeficiente de correlação entre as duas curvas é de $r = -0.66$ (estatisticamente significativo ao nível 1%). Entre 1932 e 2001, período que

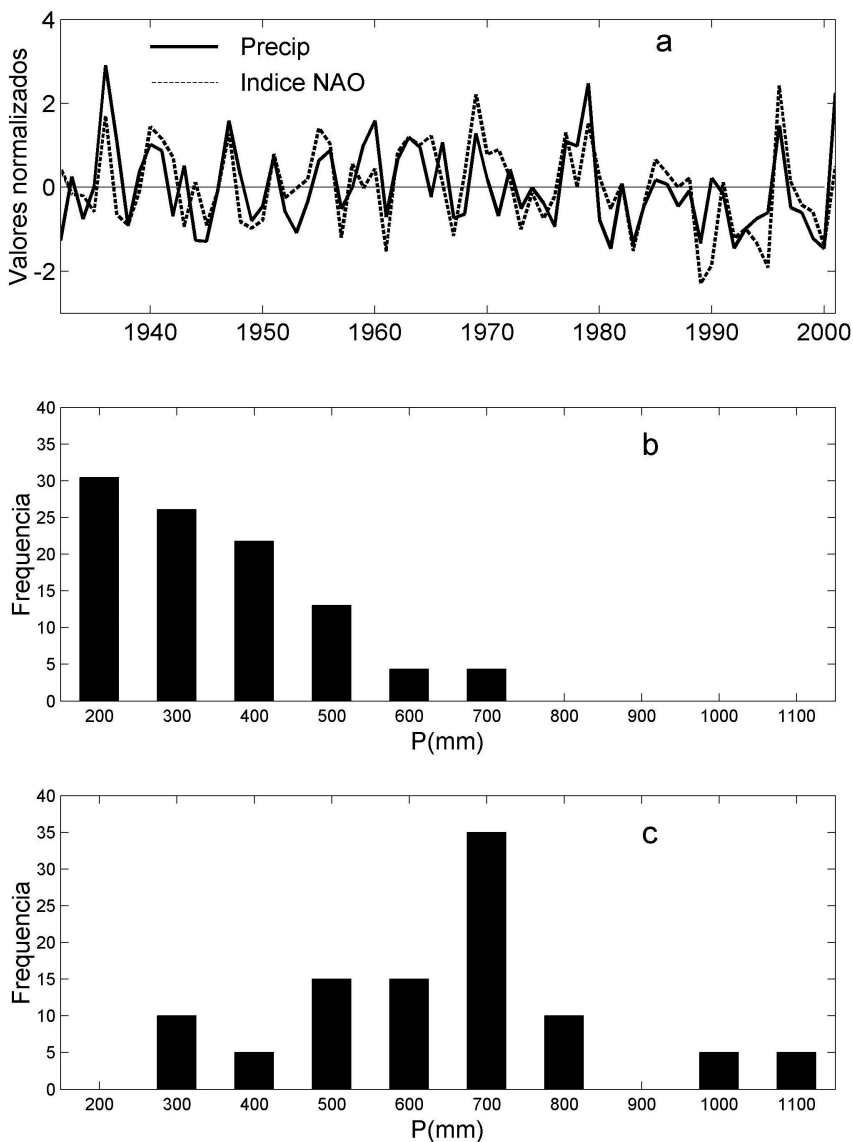


Figure 3. (a) Índice NAO vs precipitação em DJFM em Portugal Continental, valores normalizados, índice NAO multiplicado por -1 . Histograma da precipitação mensal de Inverno (DJFM) para o compósito com (b) $NAO > 0.5$; e (c) com $NAO < -0.5$.

abarca 70 Invernos, a distribuição de Invernos com NAO elevada (20), NAO baixa (24) e NAO média (26) é quase homogénea. As principais características da precipitação de Inverno em geral e para as classes de índice NAO elevada e baixa encontram-se descritas na Tabela 1. Comparando os valores da Tabela 1 conclui-se que, em condições

Tabela 1. Principais características da precipitação média (mm) de Portugal de Inverno (DJFM) entre 1932 a 2001 para a distribuição toda e para os compósitos relativos às classes extremas da NAO. IQR é a diferença entre os percentis 75 e 25

	Media	Desvio padrão	IQR
Todos	477	208	305
NAO > 0.5	344	145	183
NAO < -0.5	649	190	221

de NAO elevada, o valor média da precipitação de Inverno é cerca de metade (344 mm) do valor obtido para o compósito da NAO baixa (649 mm). Analisando os histogramas para os compósitos de NAO elevada (Fig. 3b) e baixa (Fig. 3c) observa-se uma redução muito significativa da frequência das classes de precipitação mais abundante. Por outro lado os histogramas indicam que este aumento não está relacionado com uma simples translação entre as classes. De facto, quando se observa uma redução da NAO, tanto o desvio padrão como a gama inter quartis IQR sofrem um aumento, ou seja, a distribuição da precipitação associada ao compósito com NAO baixa engloba uma gama mais larga de classes de precipitação que o compósito com NAO elevada.

3. IMPACTO DA NAO NO CAUDAL DOS RIOS DOURO, TEJO E GUADIANA

Tendo em vista a quantificação da influência real da NAO no regime fluvial destes rios, foram utilizados dados hidrométricos de estações representadas na Fig. 4b por pequenos pontos, respectivamente Pocinho (rio Douro), Vila Velha do Rodão (rio Tejo) e Pulo do Lobo (rio Guadiana). Os períodos utilizados variam em função da disponibilidade de dados; assim o caudal do rio Douro é referente ao período 1922-1997 (76 anos), para o Tejo é relativo a 1901-1989 (com interrupção entre 1936 e 1939, período para o qual não há dados) e para o Guadiana corresponde ao período 1947-1990 (54 anos).

Para facilitar a comparação dos gráficos relativos aos diversos rios, os dados foram normalizados (eixo das ordenadas) e todos apresentam o período completo compreendido entre o ano 1900 e o ano 2000 (eixo das abcissas). Uma comparação simples entre os caudais mensais para anos caracterizados por índices elevados (curva a ponteados) e índices baixos (curva a tracejado) da NAO indicam diferenças bastante apreciáveis (Figs. 5a, 6a e 7a). De facto, entre os meses de Janeiro e Abril as diferenças entre o caudal mensal dos dois compósitos são estatisticamente significativas a 1%. Tendo em conta a elevada persistência das séries hidrológicas, optou-se de seguida por agrupar num único índice Invernal, os índices mensais, quer da NAO quer dos caudais, relativos aos meses compreendidos entre Dezembro e Março. Gráficos da variação interanual do caudal Invernal e do correspondente índice NAO, permitem constatar para todos os três rios (Figs. 5b, 6b e 7b) que

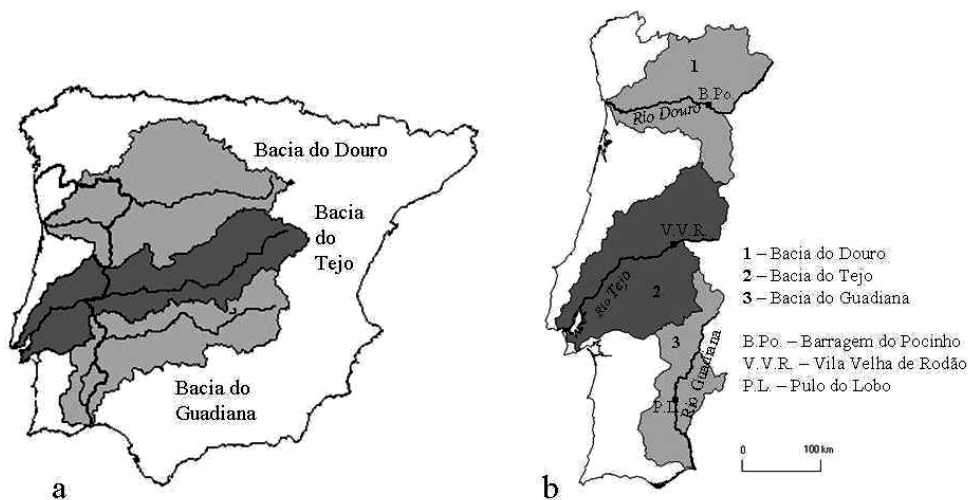


Figure 4. Localização das três bacias hidrográficas internacionais estudadas a) no contexto da Península Ibérica e b) as respectivas secções em território português. Os pequenos pontos representam as estações hidrométricas onde foi registado o caudal relativo a cada uma das bacias.

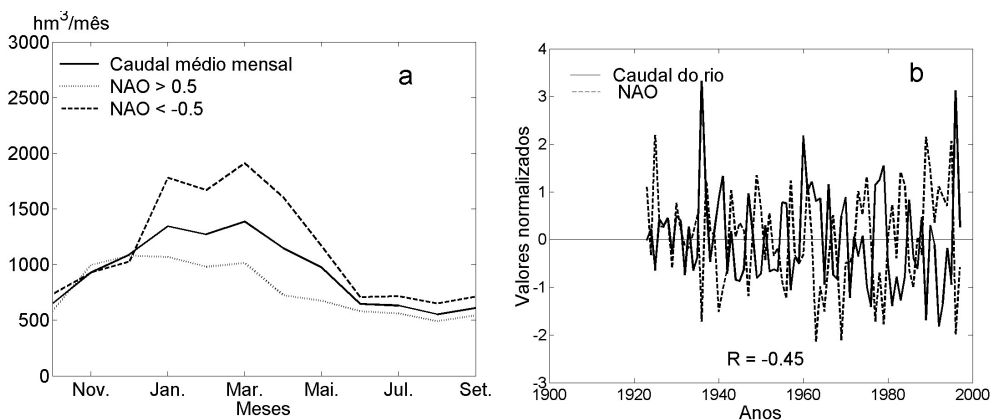


Figure 5. (a) Caudal mensal do rio Douro para invernos com índice NAO elevado (curva a ponteados), índice NAO baixo (curva a tracejado) e para a climatologia (curva a cheio), (b) Variabilidade interanual do caudal médio de Inverno (curva a cheio) e do índice NAO (curva a tracejado). Ambas as curvas foram normalizadas.

Invernos com elevado índice NAO são, em geral, caracterizados por valores de caudal abaixo da média (e vice-versa), sendo os respectivos coeficientes de correlação sempre significativos a 1%. São ainda de salientar os seguintes dois aspectos:

1. O coeficiente de correlação do caudal do rio Tejo para o último período (1973-1988) é superior (em módulo) ao valor do mesmo coeficiente para os restantes dois períodos considerados onde é da ordem dos 0.5 (1901-1935 e 1939-1972). Este facto é concordante com o aumento da (anti) correlação entre o índice da NAO e o campo da precipitação, a partir dos anos 60 para o sul da Península Ibérica, tal como foi já referido por alguns autores (Rodo et al. 1997; Trigo et al. 2004a).
2. Apesar do coeficiente de correlação entre o índice da NAO e o caudal do rio Guadiana ser elevado ($R=-0.61$) para o período de 54 anos considerado (1947-1990), verifica-se que, a partir do início dos anos 80, o caudal do rio deixa de variar com a amplitude que seria de esperar face às importantes alterações observadas do índice da NAO. Tal facto parece ficar a dever-se à grande capacidade de armazenamento de água que as barragens espanholas construídas nos finais dos anos 70 vieram proporcionar (Brandão e Rodrigues 2000). Desta forma, e ao contrário do que se passa nos rios Douro e Tejo, o rio Guadiana, na sua secção Portuguesa, passou a ser relativamente «insensível» às variações de fase do índice da NAO, ou seja, o regime fluvial deste rio passou a ser regulado numa base interanual.

Estes resultados permitem enquadrar o problema da elevada variabilidade interanual de caudal que se regista no regime de quase todos os rios Ibéricos, em especial nas zonas mais a sul da Península. Recentemente, vários autores analisaram o comportamento hidrológico dos mesmos três rios aqui considerados, isto é, os rios Douro, Tejo e Guadiana, tendo comprovado que à diminuição do caudal médio do Douro para o Tejo e deste para o Guadiana corresponde um aumento igualmente significativo no índice de irregularidade dos caudais (Ramos e Reis 2001; Brandão e Rodrigues 2000). Estes autores mostram ainda que a construção das grandes barragens no rio Tejo e Guadiana a partir dos anos 60 provocou uma significativa diminuição dos caudais máximos instantâneos. No entanto, as Figs. 5b, 6b, 7b mostram que ao nível do caudal

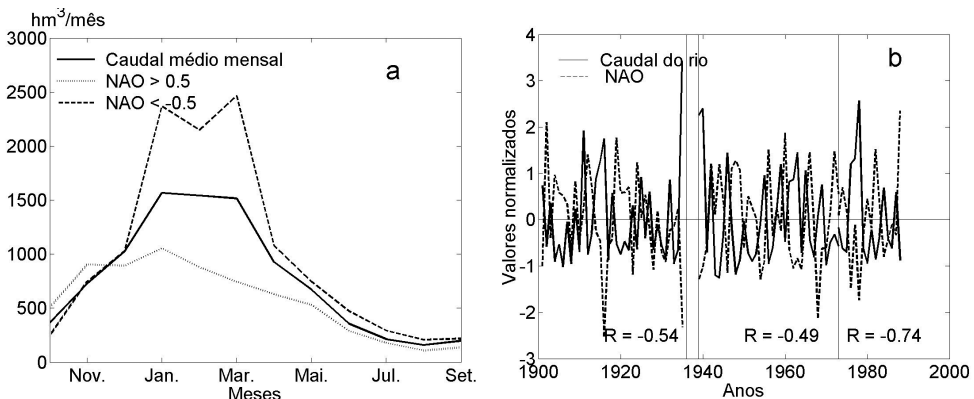


Figure 6. Tal como a Fig. 5 mas para o rio Tejo.

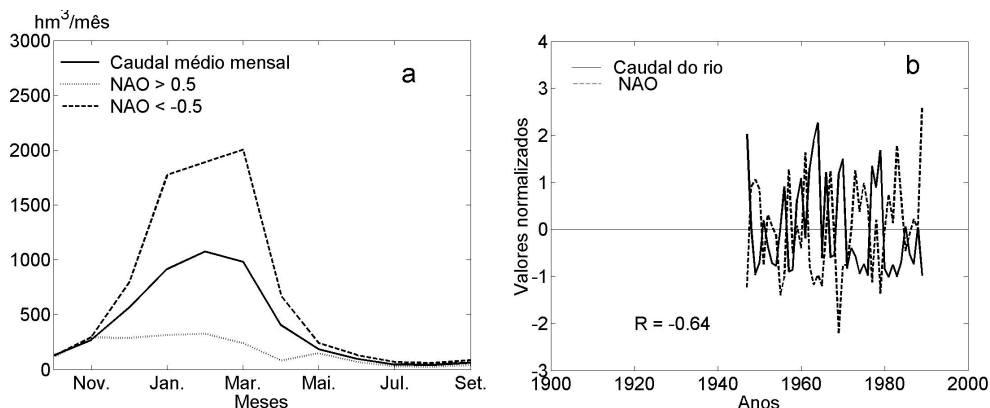


Figure 7. Tal como a Fig. 5 mas para o rio Guadiana.

médio sazonal (média do caudal mensal de Dezembro a Março) tal impacto, a existir, é de menor magnitude, excepto para o rio Guadiana, onde como já referimos aparenta ser importante.

4. CONCLUSÕES E DISCUSSÃO

Este artigo apresenta, de forma resumida mas quantificada, a magnitude da influência da NAO no campo da precipitação do continente Europeu, da Península Ibérica e em Portugal continental. Por outro lado, avalia o impacto da NAO no regime fluvial dos 3 principais rios internacionais da Península. O regime de precipitação de Portugal é irregular, com grande variabilidade interanual, sendo esta, em grande medida, controlada por este índice. A distribuição da precipitação para índice baixo da NAO (< -0.5) apresenta um p dobro do valor médio (e uma gama de valores maior) que o correspondente compósito elevado do índice da NAO (> 0.5).

Se considerarmos o volume de água relativo ao ano hidrológico completo e integrado para todos os rios Portugueses com barragens possuindo capacidade de produção de energia hidroeléctrica, verifica-se que o caudal anual varia, aproximadamente, entre anos secos e anos húmidos por um factor de 3 (Colares Pereira 1998). Tal variação acarreta uma enorme variabilidade interanual da produção eléctrica de origem hídrica em Portugal, apresentando esta um valor médio da ordem dos 11 TWh, mas que varia tipicamente entre os 16TWh nos anos húmidos (índice NAO baixo) e apenas 6TWh nos anos secos (índice NAO elevado). Portugal (e Espanha) juntam-se assim a um conjunto de Países para os quais foi recentemente comprovada a enorme relevância da NAO no controlo dos recursos hídricos em geral e na produção de energia hidroeléctrica em particular (Trigo et al. 2004a). São de salientar os estudos já realizados para os rios Eufrates e Tigre na Turquia (Cullen e DeMenocal 2000), para o Danúbio na Europa central (Rîmbu et al. 2002).

A forte associação entre precipitação mensal/sazonal e o índice da NAO levou vários grupos de investigação da Europa e dos EUA a fazer estudos preliminares sobre previsões com alguns meses de antecedência. Estas previsões podem ser do próprio índice da NAO, usualmente utilizando anomalias da temperatura dos oceanos (Saunders e Qian 2000; Gámiz-Fortis et al. 2002) ou da cobertura de Neve (Saunders et al. 2003). Outros autores tentam prever o próprio campo da precipitação a partir de previsões do índice da NAO e das temperaturas do Oceano (e.g. Rodriguez-Fonseca e Castro 2002). Estes resultados permitem evidenciar as enormes vantagens na gestão de recursos hídricos, quer para o sector da produção de energia hidroelétrica quer para o sector agrícola, que os esquemas de previsão do índice da NAO poderão vir a proporcionar num futuro próximo (Wedgbrow et al. 2002).

5. AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Climatic Research Unit (CRU) o acesso aos dados de precipitação de grande resolução espacial e também a janela de dados das Reanálises do NCEP/NCAR. Agradece igualmente ao Instituto Nacional da Água (INAG) e ao Eng. Rui Pestana (Rede Eléctrica Nacional) por terem fornecido os dados relativos aos caudais de rios Portugueses. Finalmente, o autor agradece à Dra. Célia Gouveia a sua preciosa ajuda na parte gráfica.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRANDÃO, C. & R. RODRIGUES (2000). Hydrological Simulations of the International Catchment of Guadiana River. *Phys. Chem. Earth (B)*, 25, 329-339.
- COLLARES PEREIRA, M. (1998). *Energias Renovaveis, a Opção Inadiável*. Sociedade Portuguesa de Energias Solar, 256 pp.
- CULLEN, H. M. & P. B. DEMENOCAL (2000). North Atlantic Influence on Tigris-Euphrates Streamflow. *Int. J. Climatol.*, 20, 853-863.
- GÁMIZ-FORTIS, S.; D. POZO-VÁZQUEZ, M. J. ESTEBAN-PARRA & Y. CASTRO-DÍEZ (2002). Spectral characteristics and predictability of the NAO assessed through Singular Spectral Analysis. *J. Geophys. Res.*, 107 (D23), 4685. Doi: 10.1029/2001JD001436.
- HURRELL, J. W. (1995). Decadal trends in the north Atlantic oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 269, 676-679.
- HURRELL, J. W. & H. VAN LOON (1997) Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Climatic Change*, 36, 301-326.
- JONES, P. D.; T. JONSSON & D. WHEELER (1997). Extension to the North Atlantic Oscillation using instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland, *Int. J. Climatol.*, 17, 1433-1450.
- OSBORN, T. J.; K. R. BRIFFA, S. F. TETT, P. D. JONES & R. M. TRIGO (1999). Evaluation of the North Atlantic Oscillation as simulated by a climate model. *Climate Dyn.*, 15, 685-702.
- RAMOS, C. & E. REIS (2001). The floods in the South of Portugal in different kinds of drainage basins. *Finisterra*, 71, 61-82.

- RÎMBU, N.; C. BORONEANȚ, B. CARMEN & D. MIHAI (2002). Decadal variability of the Danube river flow in the lower basin and its relation with the North Atlantic Oscillation. *Int. J. Climatol.*, 22, 1169-1179.
- RODÓ, X.; E. BAERT & F. A. COMIN (1997). Variations in seasonal rainfall in Southern Europe during the present century: relationships with the North Atlantic Oscillation and the El Niño-Southern Oscillation. *Climate Dyn.*, 13, 275-284.
- RODRÍGUEZ-FONSECA, B. & M. CASTRO (2002). On the connection between winter anomalous precipitation in the Iberian Peninsula and North West Africa and the Summer subtropical Atlantic sea surface temperature. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1863, doi: 10.1029/2001GL014421.
- SAUNDERS, M. A. & B. QIAN (2000). Seasonal Predictability of the Winter NAO from North Atlantic Sea Surface Temperatures. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 2049, doi:10.1029/2002-GL014952.
- SAUNDERS, M. A.; B. QIAN & B. LLOYD-HUGHES (2003). Summer Snow Extent Heralding of the Winter North Atlantic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1378, doi: 10.1029/2002GL016832.
- TRIGO, R. M.; T. J. OSBORN & J. CORTE-REAL (2002). The North Atlantic Oscillation influence on Europe: climate impacts and associated physical mechanisms. *Climate Res.*, 20, 9-17.
- TRIGO, R. M.; D. POZO-VÁZQUEZ, T. J. OSBORN, Y. CASTRO-DÍEZ, S. GÁMIZ-FORTIS & M. J. ESTEBAN-PARRA (2004). North Atlantic Oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.* (in press)
- TRIGO, R. M.; J. L. ZÊZERE, M. L. RODRIGUES & I. F. TRIGO (2004). The influence of the North Atlantic Oscillation on rainfall triggering of Landslides near Lisbon. *Natural Hazards* (aceite).
- ULBRICH, U.; M. CHRISTOPH, J. G. PINTO & J. CORTE-REAL (1999). Dependence of winter precipitation over Portugal on NAO and baroclinic wave activity. *Int. J. Climatol.*, 19, 379-390.
- VAN LOON, H. & J. C. ROGERS (1978). The seesaw in winter temperatures between Greenland and Northern Europe, part 1: general description. *Mon. Wea. Rev.*, 106, 296-310.
- WALKER, G. T. (1924). Correlations in seasonal variations of weather, *IX Mem. Ind. Meteorol. Dept.*, 24, 275-332.
- WEDGBROW, C. S.; R. L. WILBY, H. R. FOX & G. O'HARE (2002). Prospect for seasonal forecasting of summer drought and low river flow anomalies in England and Wales. *Int. J. Climatol.*, 22, 219-236.

