

Previsão de Vazão Sazonal no Ceará como Ferramenta para a Gestão Integrada de Recursos Hídricos na Bacia Estendida do Rio São Francisco

José Miguel Delgado⁴, Alexandre Cunha Costa^{1,2}, Robson Silva², Francisco das Chagas Vasconcelos Júnior³, José Marcelo Rodrigues Pereira², Eduardo Martins^{2,3}

1. Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)
2. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME)
3. Universidade Federal do Ceará
4. Universidade de Potsdam, Alemanha

Semiárido, previsão de vazão sazonal, WASA-SED, ECHAM

RESUMO

Apresentamos no presente estudo os primeiros resultados do sistema de previsão de vazão sazonal para o estado do Ceará, em particular para o reservatório de Castanhão, cuja gestão será afectada pelo sistema de transposição do rio São Francisco. A necessidade de ter previsões de vazão para além da previsão meteorológica prende-se com o facto dos processos de precipitação-escoamento serem fortemente não-lineares em regiões semi-áridas.

O modelo de precipitação-escoamento em regiões semi-áridas WASA-SED foi utilizado para a hidrologia. A previsão meteorológica de longo-prazo baseou-se no modelo ECHAM4.6. As previsões sazonais foram regionalizadas através do *Regional Spectral Model* e do modelo *Expanded Downscaling*. Testámos ainda pela primeira vez no Ceará o conjunto de modelos de previsão sazonal do Centro Europeu de Previsão Meteorológica de Médio Prazo.

O viés seco da previsão meteorológica foi transmitida aos resultados do modelo hidrológico. No entanto, a previsão de vazão apresenta melhor variabilidade interanual do a previsão meteorológica. Isso pode indicar que os erros poderão estar concentrados em quantis de precipitação mais baixos, sem influencia na hidrologia do semi-árido. Mais pesquisa será necessária para melhorar a performance da previsão meteorológica, bem como para compreender a importância das falhas de previsão para a gestão de recursos hídricos.

Introdução

A água é um recurso abundante no Brasil, apesar de distribuído de forma assimétrica no seu território. Uma região particularmente afectada por secas é o nordeste do país, que viveu mais de 100 eventos extremos desde o século XVI [Fioreze et al., 2012]. Desde 2012 que um período de seca excepcional vem afectando a região, com consequências económicas, sociais e ambientais severas. Apesar das condições ambientais extremas, o denominado “polígono das secas” abriga mais de 25% da população brasileira [Formiga-Johnsson and Kemper, 2005].

A gestão dos recursos hídricos no nordeste do Brasil tem sido centrada na gestão das águas superficiais, através da açudagem [Araújo, 1990]. No polígono das secas os recursos hidrogeológicos são escassos, levando a que ao longo dos tempos se tenham construído milhares de pequenos e grandes reservatórios para regularizar os cursos de água, na sua grande maioria de carácter efémero. Mais recentemente vem sendo construído um sistema de transposição do rio São Francisco, que irá transpôr água do rio S. Francisco para os sistemas Piranhas-Açu, Jaguaribe, Salgado e Apodi [Nunes, 2012]. Este sistema permitirá suprir a crescente pressão sobre os recursos hídricos nesta região. No entanto é ainda difícil prever como a gestão desse sistema será feita, tendo em conta as diferentes dinâmicas climáticas e de demanda nas diferentes regiões agora interligadas.

Para facilitar a gestão e integração entre duas regiões hídricas distintas, apresentamos no presente estudo os primeiros resultados do sistema de previsão de vazão sazonal para o estado do Ceará, em particular para o reservatório de Castanhão, cuja gestão será directamente afectada pelo sistema de transposição do rio São Francisco.

Um sistema de previsão de vazão sazonal é uma ferramenta que transforma previsões meteorológicas de longo-prazo em vazão prevista. A necessidade de ter previsões de vazão para além da previsão meteorológica prende-se com o facto dos processos de precipitação-escoamento serem fortemente não-lineares em regiões semi-áridas (Figueiredo et al. 2016). A disponibilidade de recursos hídricos é por isso dificilmente prevista tendo apenas como base previsões meteorológicas ou apenas de precipitação. O modelo de precipitação-escoamento WASA-SED (Guentner and Bronstert, 2004) foi desenvolvido especificamente para regiões semiáridas e simula processos de evapotranspiração, infiltração, escoamento, entre outros processos, com metodologias multi-escala.

No presente trabalho são apresentados os primeiros resultados no modelo de previsão da vazão sazonal para o estado do Ceará. Apresentam-se apenas os resultados do trabalho em curso para o período de previsão inversa (*hindcast*) de 1985 a 2010. O modelo empregue para a previsão meteorológica de longo-prazo foi o modelo ECHAM4.6. O modelo foi parameterizado e rodado na FUNCEME. Dada a baixa resolução do modelo, procedeu-se à regionalização das previsões sazonais através de dois métodos distintos: um método dinâmico utilizando o *Regional Spectral Model* (RSM, Juang and Kanamitsu 1994) e o modelo *Expanded Downscaling* (XDS, por Buerger 1996). Testámos ainda pela primeira vez para o Ceará o conjunto de modelos de

previsão sazonal do Centro Europeu de Previsão Meteorológica de Médio Prazo (ECMWF na sigla inglesa, uma previsão baseada no conjunto de 15 membros feita em Janeiro de cada ano).

Metodologia

A cadeia de modelos empregue neste trabalho é composta por modelo de circulação geral da atmosfera (GCM na sigla inglesa), modelo de regionalização (RCM na sigla inglesa) e modelo hidrológico. O GCM usado para a previsão sazonal foi o modelo ECHAM4.6 rodado na FUNCEME sob a forma de um conjunto de previsões inversas (*hincasts*) para o período 1981 a 2010. O conjunto é criado perturbando as condições iniciais dos 20 membros e é forçado por TSMs persistidas com um prazo de 8 meses. A resolução é de 2.8125 graus de longitude por 2.767 graus de latitude. O conjunto de modelos de previsão sazonal do ECMWF foi também usado como GCM (o modelo chama-se MMSF na sigla inglesa). Este conjunto é composto por 15 membros com uma resolução de 0.5 graus. Dada a elevada resolução deste modelo foi possível aplicá-lo directamente como gerador de dados de entrada para o modelo hidrológico sem recurso a modelo de regionalização.

Dois modelos foram empregues para a regionalização das previsões dadas pelo ECHAM4.6. O primeiro foi o RSM, um modelo dinâmico; o segundo foi o modelo estocástico “*expanded downscaling*”.

Por último, o modelo hidrológico WASA-SED foi rodado tendo como dados de entrada as previsões sazonais regionalizadas. O resultado são então as previsões de vazão sazonal para a estação chuvosa, i.e. Fevereiro, Março, Abril e Maio. Por forma a garantir que o nível de água nos diferentes compartimentos do modelo (solo, reservatórios, leito dos cursos de água etc.) tem um valor realista no início de cada rodada (uma rodada para cada ano de previsão entre 1981 e 2010), considerou-se o período entre o ano 1981 e o ano objecto de previsão sazonal como período de aquecimento do modelo. Para este período foram utilizados dados de monitoramento como dados de entrada para o modelo hidrológico. A Fig. 1 resume este procedimento.

Os parâmetros do modelo WASA-SED foram obtidos por uma calibração regionalizada, i.e. os parâmetros de diversas sub-bacias foram calibrados em simultâneo. Desta forma os parâmetros obtidos por calibração são também válidos em bacias não monitorizadas.

Em resumo, três cadeias de modelos foram testadas neste trabalho como fornecedoras de dados de entrada para o modelo de previsão sazonal de vazões. A primeira cadeia de modelos inclui o ECHAM4.6 e o modelo de regionalização RSM (doravante ECHAM+RSM). A segunda, o mesmo ECHAM4.6 e um modelo de regionalização estocástico (ECHAM+XDS). E por último o conjunto de modelos de previsão sazonal do ECMWF associado ao modelo XDS (MMSF+XDS).

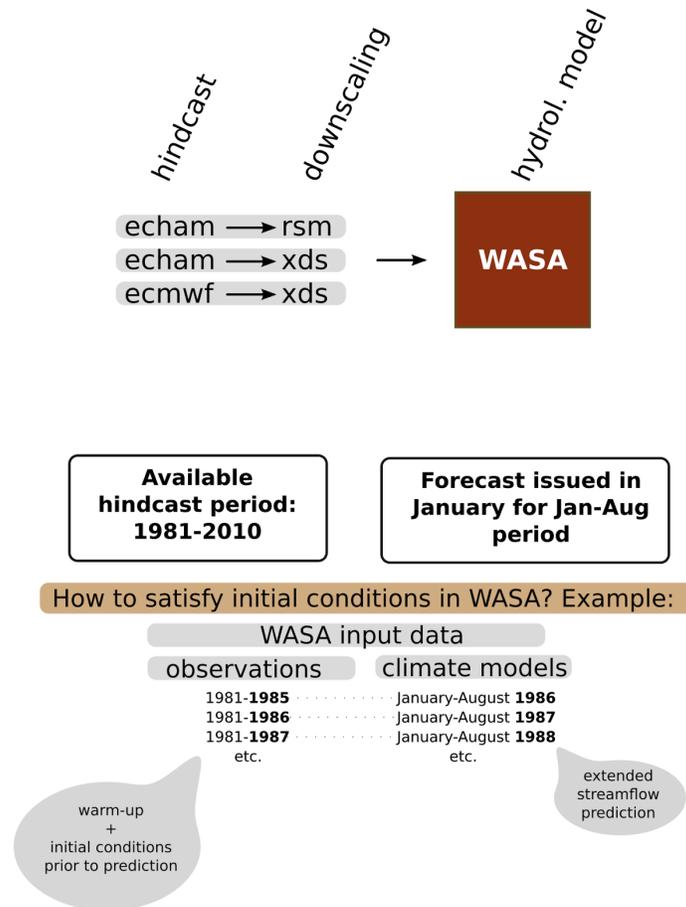


Figura 1: Esquema de processamento das previsões sazonais de vazão. O período de aquecimento do modelo hidrológico começa em 1981 para cada previsão. A previsão só é então possível a partir de 1985, por forma a ter um mínimo de 5 anos de aquecimento.

O sistema de previsão sazonal de vazão foi aplicado para todo o estado do Ceará, 148.000 km², localizado na sua grande maioria no semiárido do nordeste brasileiro. A precipitação anual média neste estado é de 850 mm e concentra-se sobretudo nos meses de Fevereiro a Maio. A variação espacial de precipitação é muito elevada, dos 1200 mm no litoral algumas zonas montanhosas a menos de 600 mm no polígono das secas. A evaporação potencial anual é de cerca de 2200 mm (SUDENE 1980), o que ultrapassa largamente a precipitação anual.

O estado do Ceará apresenta uma estação chuvosa bem definida seguida de um longo período seco. A variabilidade interanual da precipitação é originada principalmente por padrões de TSMs anómalas sobre os Oceanos Atlântico e Pacífico (Moura e Shukla 1981). Durante a estação das chuvas, a zona de convergência intertropical encontra-se no seu ponto mais ao sul, permitindo condições favoráveis ao desenvolvimento de eventos de precipitação sobre o Ceará. Flutuações interanuais ou sazonais nessa precipitação relacionam-se sobretudo com um gradiente interhemisférico de TSMs assimétrico ou com o El Niño (Philander 1990; Rao e Hada 1990).

Dada a preponderância dos recursos hídricos superficiais no Ceará, foram construídos mais de 7000 reservatórios com uma área superior a 5 ha (Mamede et al. 2012). Destes, 150 são considerados estratégicos e operados por agências regionais. A gestão e operação destes reservatórios deverá ser afectada pela transposição do rio São Francisco. O volume destes reservatórios perfaz um total de 18300 hm³. De entre estes reservatórios, para os quais foi feita uma previsão sazonal de vazão, apresenta-se neste trabalho resultados referentes aos mais importantes, nomeadamente Castanhão (67000 hm³), Orós (1940 hm³) e Banabuiú (1600 hm³).

Resultados e Perspectivas Futuras

Relativamente às previsões meteorológicas sazonais, este artigo debruça-se apenas sobre os resultados dos modelos ECHAM+RSM e MMSF, que de momento já estão disponíveis. Os resultados da previsão sazonal de vazão são também aqui apresentados em primeira mão, embora apenas referentes ao modelo WASA-SED com dados de entrada do ECHAM+RSM. O trabalho em curso dedica-se a extrair as previsões do MMSF e a aplicá-las ao WASA-SED.

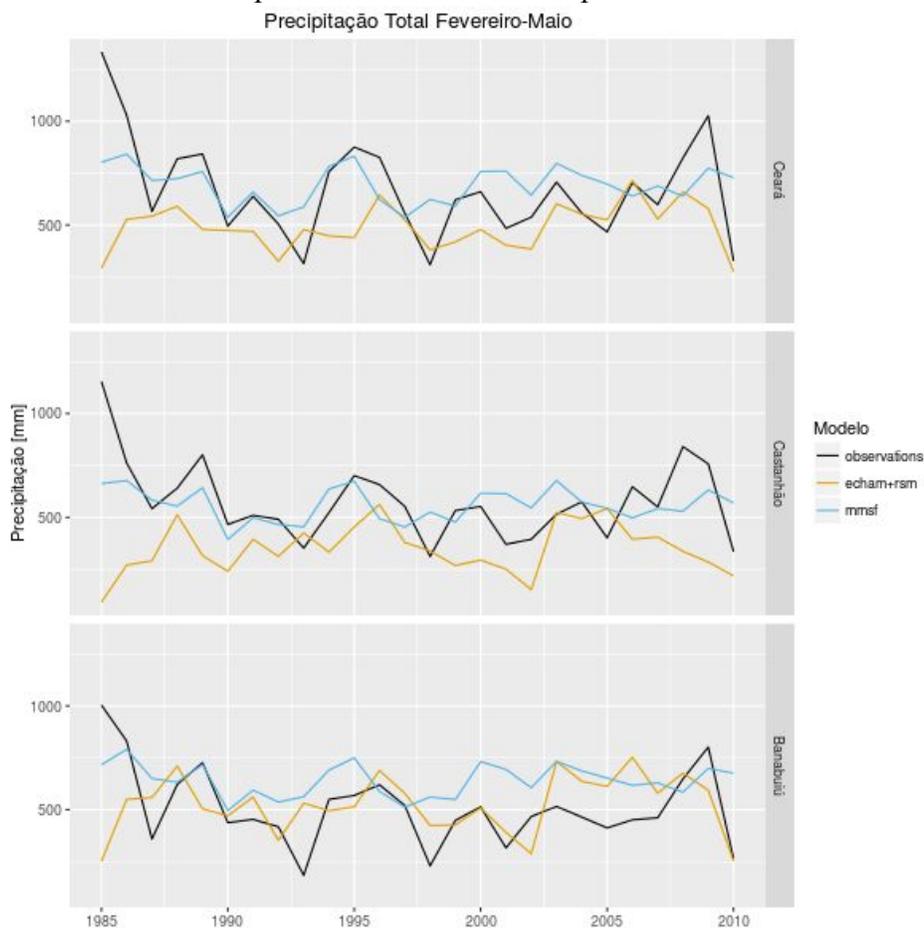


Figura 2: Previsão inversa da precipitação total da estação das chuvas no Ceará, agregada sobre as bacias hidrográficas dos reservatórios estratégicos Castanhão e Banabuiú, bem como sobre todo o Ceará. A previsão é efectuada em cada ano tendo em conta as condições de Janeiro.

As previsões meteorológicas sazonais resultantes do ECHAM+RSM e MMSF apresentam particularidades distintas. A Fig. 2 ilustra a precipitação prevista em Janeiro de cada ano para os meses da estação chuvosa seguinte. As previsões do modelo MMSF apresentam um erro absoluto médio de 152 mm, ao passo que as do modelo ECHAM+RSM apresentam um erro absoluto médio um pouco maior, de 201 mm. Isso deve-se sem dúvida ao viés seco apresentado pelo modelo ECHAM+RSM, que sistematicamente prevê menos precipitação, apesar de aparentar melhor variabilidade interanual na precipitação total.

A curva ROC (*receiver operating characteristic*) para as previsões feitas em Janeiro para a estação das chuvas, tendo em conta os mesmos domínios espaciais e temporais (Fig. 3) revelam uma elevada taxa de falsos positivos para o modelo ECHAM+RSM para os níveis de alarme mais baixos, em particular a bacia do reservatório Castanhão. Este erro é possivelmente causado pelo viés seco observado na Fig. 2. Pelo contrário, o modelo MMSF apresenta uma curva ROC um pouco acima da diagonal, indicando alguma qualidade na previsão sazonal. Os dois modelos combinados não foram suficientes para compensar o viés seco do ECHAM+RSM.

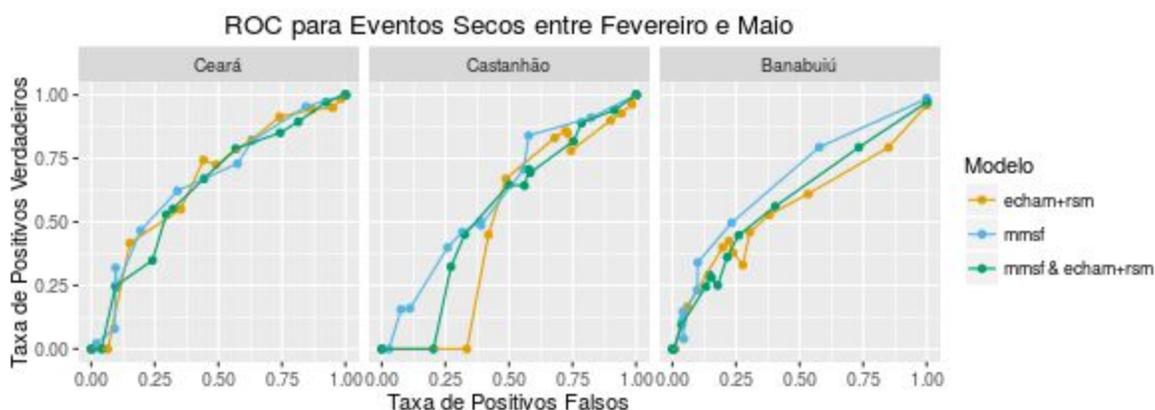


Figura 3: Curva ROC relativa a estações de chuva com baixa precipitação. Os domínios temporais e espaciais são os dados para a Fig. 2.

Outro indicador de performance importante num contexto de semi-árido é o número de dias com precipitação acima de 12 mm. Diversos estudos mostram que na região do semi-árido não ocorre geração de escoamento para eventos de precipitação abaixo de um limite invulgarmente elevado (Figueiredo et al. 2016 apresenta resultados nesses sentido, bem como uma revisão da literatura). Para o Ceará, muitos estudos apontam para diferentes valores em torno de 12 mm, valor aqui adoptado. Eventos de precipitação abaixo dos 12 mm não geram escoamento e como tal devem ser desprezados pelo modelo hidrológico (no caso de o modelo hidrológico simular correctamente os processos). Nesse caso a previsão sazonal de vazão só terá significado prático para a gestão de recursos hídricos se esses eventos estiverem bem representados pelo modelo de previsão meteorológica.

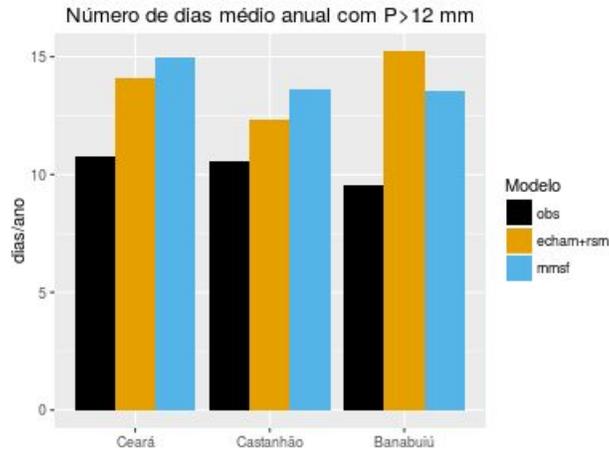


Figura 4: Número médio de dias por ano de precipitação acima de 12 mm para o período de previsão inversa (hindcast). Os domínios temporais e espaciais são os mesmos das Figs. 2 e 3.

Na Fig. 4 apresenta-se o número médio anual de chuvadas com precipitação total maior que 12 mm. Em geral, com exceção de Banabuiú, o sistema de previsão ECHAM+RSM prevê bem o número de eventos.

Por fim, na Fig. 5 apresenta-se os resultados do modelo de previsão sazonal de vazões para o período de *hindcast*. A localização foi a do reservatório de Orós, visto que para este reservatório se encontram dados históricos de elevada qualidade (e de o reservatório Castanhão não existir no período escolhido para a previsão inversa).

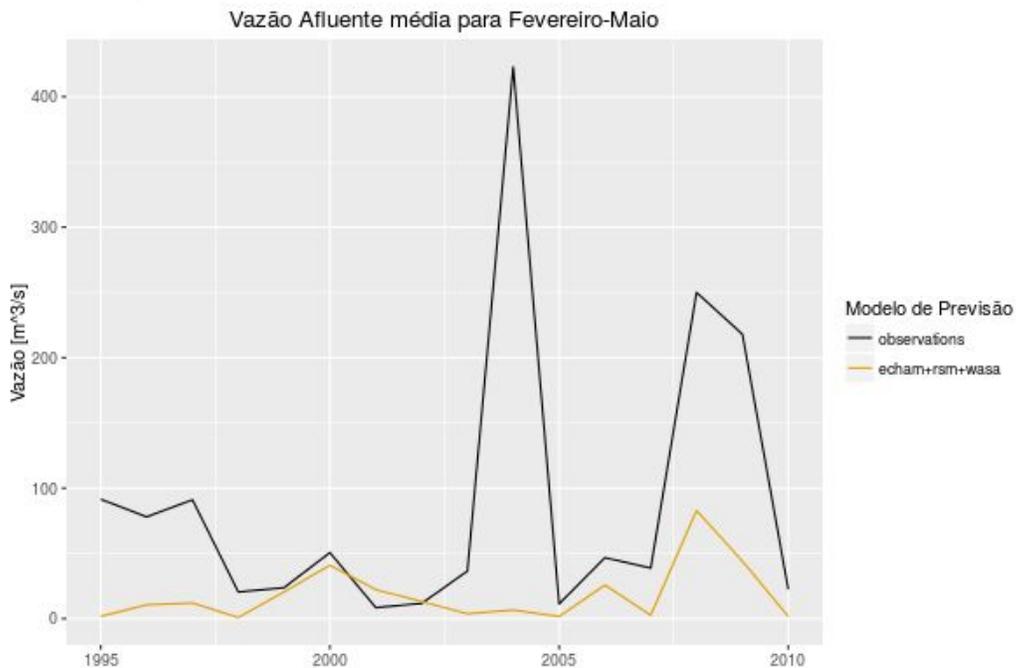


Figura 5: Previsão inversa da vazão sazonal para a estação das chuvas no Ceará com recurso aos modelos ECHAM4.6, RSM e WASA-SED.

O viés seco do ECHAM+RSM foi transmitido aos resultados do modelo hidrológico. No entanto, aparentemente há uma melhor simulação da variabilidade interanual do que se se avaliar somente os resultados da previsão meteorológica. Isso pode significar que os erros no ECHAM+RSM poderão estar concentrados em quantis de precipitação mais baixos, que não têm tanta influencia na hidrologia do semi-árido. Mais pesquisa será necessária para melhorar a performance dos modelos de previsão meteorológica, bem como para compreender onde eles falham presentemente e se essas falhas são ou não importantes para a previsão hidrológica.

Bibliografia

BÜRGER, G. (1996) Expanded downscaling for generating local weather scenarios *Climate Research* 7, 111–28.

FIGUEIREDO, J. V.; ARAÚJO, J. C.; MEDEIROS, P. H. A.; COSTA, A. C. (2016) Runoff Initiation in a Preserved Semiarid Caatinga Small Watershed, Northeastern Brazil. *Hydrological Processes*, doi:10.1002/hyp.10801.

GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. (2004): Representation of Landscape Variability and Lateral Redistribution Processes for Large-Scale Hydrological Modelling in Semi-Arid Areas. *Journal of Hydrology*, 297, 1-4, 136-161.

JUANG, H.-M. H.; KANAMITSU, M. (1994). The NMC nested regional spectral model. *Mon. Wea. Rev.*, 122-1, p.3-26.

MAMEDE, G.; ARAÚJO, N.; SCHNEIDER, C.; ARAÚJO, J. C.; HERRMAN, H. (2012). Overspill avalanching in a dense reservoir network. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, doi:10.1073/pnas.1200398109.

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. (1981). On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 38, 2653-2675.

PHILANDER, S. G. H. (1990) *El Niño, La Niña and the Southern Oscillation*. Academic Press, San Diego, CA, 289 pp.

PRAO, V. B.; HADA, K. (1990). Characteristics of rainfall over Brazil: Annual and variations and connections with the Southern Oscillation, *Theor. Appl. Climatol.*, 42, 81 – 91.

Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE). (1980). Plano de Aproveitamento Integrado de Recursos Hídricos do Nordeste do Brasil, SUDENE, Recife, Brasil.