

ANÁLISE DE DESEMPENHO E DE INCERTEZAS DA CALIBRAÇÃO REGIONAL DE UM MODELO HIDROLÓGICO SEMI-DISTRIBUÍDO

Alexandre C. Costa¹; Till Francke²; Andreas Güntner³; Axel Bronstert⁴ & Eduardo S. P. R. Martins⁵

RESUMO – Modelagem chuva-deflúvio em bacias não-monitoradas é fundamental para projetos de engenharia, sistemas de previsão e gerenciamento de recursos hídricos. Neste artigo, avaliou-se o desempenho da calibração regional de um modelo hidrológico semi-distribuído espacialmente (12 estações fluviométricas) e temporalmente (dois períodos de 10 anos de séries mensais de vazão), levantando hipóteses sobre as incertezas envolvidas no esquema de regionalização. Esse método foi aplicado para o Estado do Ceará. A vantagem desse procedimento, em relação aos métodos tradicionais de regionalização, é que evita a exigência de uma grande quantidade de séries de deflúvio, que é uma dificuldade fundamental para a regionalização de áreas pobres dados como o Nordeste Brasileiro. Em geral, a mediana dos coeficientes de Nash-Sutcliffe das estações foi 0,77 para validação e 0,80 para calibração (período B: 2000-2010). A validação cruzada aplicada sugere que a diminuição da incerteza do período A (1985-1995) para o período B é fruto das séries de entrada e saída dos dados e/ou dos dados geoambientais, que podem explicar um melhor desempenho do modelo no período B. As diferenças do desempenho da calibração regional em duas zonas geograficamente distintas foram causadas por incertezas na estrutura do modelo devido possivelmente à desconsideração dos processos rio-aquífero na modelagem.

ABSTRACT – Rainfall-runoff modelling of ungauged catchments is pivotal for design applications, forecasting applications and catchment management. In this paper, we aim to evaluate the performance of a regional calibration approach applied to a semi-distributed hydrological model, considering 12 streamgauges and two periods of monthly streamflow series (period A: 1985-1995 and period B: 2000-2010). This regionalization framework was applied to the State of Ceará in northeastern Brazil (NEB). The main advantage of this approach regarding to the traditional regionalization methods (regression, nearest neighbourhoods, geostatistics) is that a large streamflow data set is not mandatory; therefore, it can be applied even to data-scarce regions, such as NEB. In general, the overall median Nash-Sutcliffe coefficient of 12 streamgauges was 0.77 for the validation and 0.80 for the calibration (2000-2010), which can be considered a good simulation result for monthly semiarid streamflows. The cross-validation analysis suggests a model uncertainty decreasing from Period A to Period B due to input/output series and/or geo-data, which may explain the higher model performance in Period B. The model calibration performance differences between two geographically distinct zones in the both analysing periods were caused by model structure uncertainty possibly due to a disregarding of river-aquifer processes in the hydrological modelling.

Palavras-Chave – Calibração Regional, PUB, Análise de Desempenho e de Incertezas

1) Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Campus dos Palmares, Rodovia CE-060 km 51, CEP: 62.785-000, Acarape, Ceará, Brasil, +55 85 3373 1593, cunhacos@unilab.edu.br.

2) University of Potsdam, Karl-Liebknecht-Str. 24/25, 14476 Potsdam, Alemanha, +49 331 977 2671, +49 331 977 2092, francke@uni-potsdam.de.

3) Helmholtz Centre Potsdam, German Research Centre for Geosciences, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Alemanha, +49 331 288 1559, +49 331 288 1570, Güntner@gfz-potsdam.de.

4) University of Potsdam, Karl-Liebknecht-Str. 24/25, 14476 Potsdam, Alemanha, +49 331 977 2548, +49 331 977 2092, axelbron@uni-potsdam.de.

5) Universidade Federal do Ceará, LABOMAR, Av. da Abolição 3207, CEP: 60.165-081, Fortaleza, Ceará, Brasil e espr.martins@gmail.com.

1 – INTRODUÇÃO

Modelagem chuva-deflúvio em bacias hidrográficas não-monitoradas é fundamental para projetos de engenharia (vertedouros, pontes e canais), sistemas de previsão (alerta contra enchentes e operação de hidrelétricas) e gerenciamento de recursos hídricos (alocação de águas e estudos de impacto de mudanças climáticas) (Parajka *et al.* 2007).

Basicamente, a estimativa da dinâmica ou da estatística de processos hidrológicos em bacias não-monitoradas envolve a aplicação de técnicas de regionalização, que transferem parâmetros calibrados em bacias monitoradas para sistemas não monitorados. Para tanto, três tipos de métodos são normalmente utilizados: regressão (estimativa de parâmetros a partir de relações com características físicas e climáticas de bacias), vizinhos mais próximos (transferência de parâmetros de bacias similares mais próximas no espaço) e geoestatística (interpolação espacial dos parâmetros) (ver e.g. Maidment 1993). O principal desafio para a aplicação desses métodos é a disponibilidade de dados de deflúvio para a calibração dos parâmetros de modelos hidrológicos (Parajka *et al.* 2007).

Em regiões pobres de dados de deflúvio, como o Nordeste Brasileiro (NEB), os métodos tradicionais de regionalização supracitados se tornam impraticáveis devido à exigência de uma grande quantidade de bacias monitoradas. Nesse contexto, a modelagem hidrológica orientada a processos e (semi-)distribuída é, provavelmente, a mais adequada ferramenta para compor uma estratégia de estimativa do deflúvio em bacias não-monitoradas (e.g. Lange *et al.* 1999; Gheith e Sultan 2002; Costa *et al.* 2012).

Andersen *et al.* (2001), Drogue *et al.* (2002) e Moussa *et al.* (2007) reportaram as primeiras tentativas de regionalização de modelos hidrológicos (semi-)distribuídos em regiões escassas de séries de deflúvio. Entretanto, Moussa *et al.* (2007) apontam que avanços são necessários para que as estratégias aplicadas devam ser usadas como métodos de regionalização. Já Heuvelmans *et al.* (2004) e Vélez *et al.* (2009) apresentaram formas definitivas de regionalização de modelos hidrológicos (semi-)distribuídos que, entretanto, exigem algum recurso estatístico e, conseqüentemente, uma grande quantidade de dados de deflúvio. Assim, elas não são adequadas para regiões escassas de dados de deflúvio como o NEB.

Neste artigo, é apresentado os principais resultados da análise de desempenho e de incertezas da calibração regional de um modelo hidrológico semi-distribuído (ver também Costa *et al.* 2013a), usado como estratégia de regionalização hidrológica para bacias de grande e médio porte do Estado do Ceará. A vantagem desse procedimento é que evita a necessidade de métodos complementares e de uma grande quantidade de dados de deflúvio, que é uma dificuldade fundamental para a regionalização no NEB.

1.1 – Objetivos

Avaliar o desempenho da calibração regional espacialmente (12 estações fluviométricas) e temporalmente (dois períodos de 10 anos de séries mensais de vazão), levantando hipóteses sobre as incertezas envolvidas no esquema de regionalização.

2 – MÉTODOS

2.1 – Séries Hidrometeorológicas

Todas as bacias hidrográficas, que são consideradas como unidades de gestão dos recursos hídricos do Estado do Ceará, 148.000 km², foram levadas em conta (Figura 1). Elas são ao todo 12 bacias hidrográficas.

Na tentativa de reduzir a influência do tamanho do intervalo e do período das séries temporais de chuva e vazão, assim como dos regimes hidroclimáticos, no processo de calibração e validação, definiram-se os seguintes critérios para a escolha das estações fluviométricas e, conseqüentemente, das séries temporais:

- a) as estações fluviométricas escolhidas devem possuir no mínimo dez anos de monitoramento contínuo de vazão em dois períodos diferentes;
- b) esses dois períodos devem ser os mesmos para todas as estações fluviométricas;
- c) as estações chuvosas abaixo da média histórica, na média e acima da média devem ocorrer na mesma proporção nesses dois períodos;
- d) além disso, o período de *esquentamento* da modelagem hidrológica deve ser de pelo menos cinco anos.

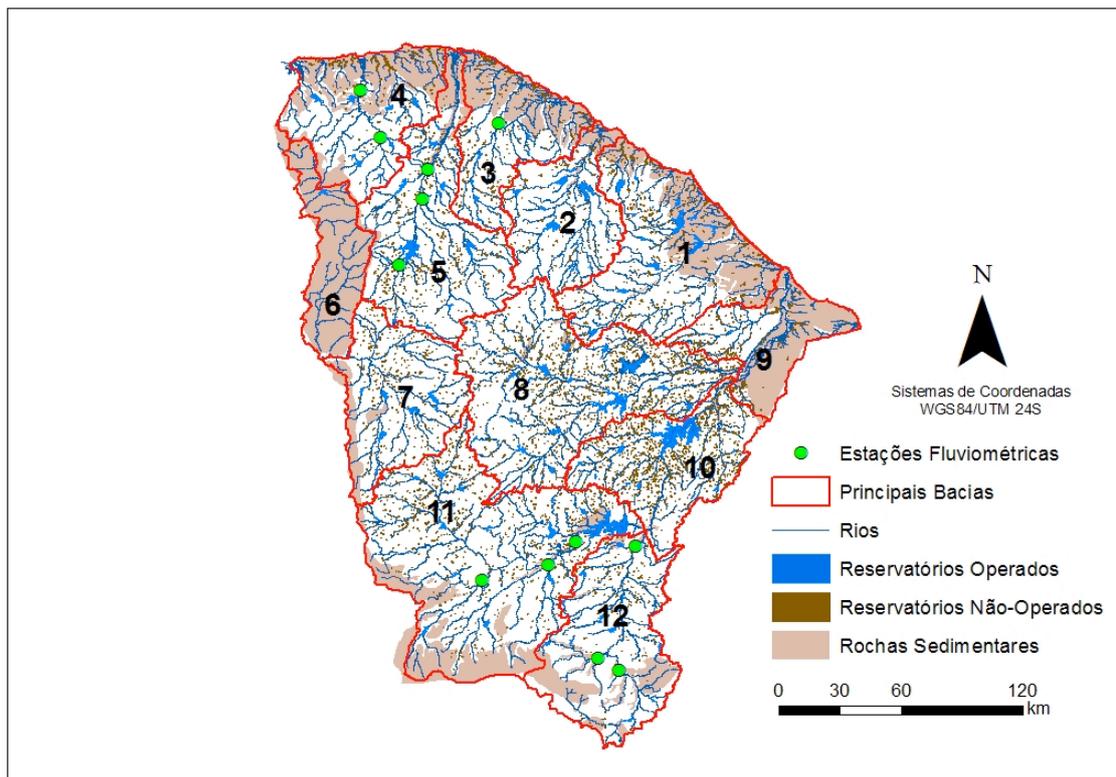


Figura 1 – Distribuição das unidades de gestão dos recursos hídricos do Estado do Ceará e das estações fluviométricas, que foram selecionadas para o presente artigo. O código ANA das estações fluviométricas foi também indicado nesta Figura, dividindo o código ANA original (muito extenso) por 100.

Assim, os períodos escolhidos para a calibração e avaliação da modelagem foram 1985-1995 e 2000-2010, sendo doze estações fluviométricas selecionadas (Figura 1). Considerando um período de 1980 a 1984 para esquentamento do modelo, utilizou-se ao todo o período de 1980 a 2010 para a modelagem hidrológica (simulação contínua).

Os dados das estações fluviométricas foram disponibilizados pela Agência Nacional das Águas (ANA) a partir do sistema Hidroweb (BRASIL 2013). Essas estações vêm sendo monitoradas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Já os dados meteorológicos foram disponibilizados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Esses dados foram interpolados na escala de sub-bacia através do polígono de Thiessen.

2.2 – O Modelo Hidrológico Semi-Distribuído

O modelo escolhido para a calibração regional foi o WASA-SED (Güntner e Bronstert 2004; Mueller *et al.* 2010), que foi desenvolvido especialmente para a simulação da hidrologia em regiões de clima seco e vem sendo utilizado em diversos projetos científicos conduzidos na área de estudo (Medeiros *et al.* 2010; Lima Neto *et al.* 2011; Malveira *et al.* 2012).

O modelo WASA foi inicialmente desenvolvido com o objetivo de estudos do balanço hídrico de longo-prazo em bacias hidrográficas de grande porte em ambientes semiáridos e dos efeitos das

mudanças climáticas globais na disponibilidade hídrica, considerando uma formulação orientada a processos e semi-distribuída (Güntner e Bronstert 2004). Recentemente, erosão, transporte de sedimentos e processos de retenção foram implementados na modelagem, transformando-o em WASA-SED (Mueller *et al.* 2010). Estudos focados tanto em água como em sedimentos já foram realizados, também, em bacias hidrográficas de médio porte (Medeiros *et al.* 2010).

A estrutura do modelo WASA-SED é inovadora, pois conecta os processos hidrológicos de acordo com a sua ocorrência predominante na escala espacial, começando por bacias hidrográficas, passando por componentes de relevo e terminando com perfis de solo em unidades solo-vegetação. Dado essa concepção semi-distribuída, as suas unidades espaciais são facilmente adaptáveis em relação à disponibilidade e resolução espacial dos dados geoambientais e hidrometeorológicos.

Além de considerar explicitamente a influência do mosaico das combinações de tipo e ocupação do solo nos processos hidrológicos de diferentes paisagens, ele possui um outro aspecto muito relevante para o Semiárido Nordeste, que é a avaliação do impacto da grande e da pequena açudagem na geração dos escoamentos superficiais na escala de bacia hidrográfica. Dessa forma, os efeitos da açudagem nas séries de descargas fluviais podem ser estimadas com o modelo WASA-SED (Malveira *et al.* 2012). O cálculo da cascata de pequenos reservatórios foi apresentado pela primeira vez por Güntner *et al.* (2004) e aperfeiçoado continuamente durante os projetos de pesquisa SESAM I e II.

2.3 – Calibração Regional

Na calibração regional, os parâmetros de um modelo de um certo número de bacias são calibrados simultaneamente (Parajka *et al.* 2007). Como esses parâmetros são relacionados com as características das unidades do modelo adotado, os parâmetros podem ser transferidos diretamente para áreas não monitoradas (Engeland *et al.* 2006). Dessa forma, depois da calibração regional, os parâmetros serão idênticos para todas as bacias em estudo.

O processo de calibração regional engloba basicamente três procedimentos: a preparação do conjunto de parâmetros para a calibração do WASA-SED (incluindo a parametrização como um todo), a implementação de um método matemático para a calibração regional e a aplicação de um esquema de validação de acordo com critérios de desempenho da modelagem. Neste artigo, será focado o último procedimento. A descrição dos dois primeiros procedimentos supracitados pode ser encontrada em Costa *et al.* (2013a).

Invés de usar o clássico procedimento de calibração e validação em hidrologia, em que uma série de vazão é dividida em duas partes, sendo uma para calibração e a outra para validação, a validação cruzada (VC) das estações fluviométricas foi adotada. A VC foi usada para avaliar os efeitos temporais nos resultados de calibração e validação. A VC divide a série de vazão em duas

partes iguais, i.e. 1985-1995 e 2000-2010, então, em um primeiro momento a calibração é realizada para 1985-1995 e a validação para 2000-2010, depois os períodos de calibração e validação são trocados.

A avaliação dos resultados de calibração e validação foi empreendida tendo como base a) a mediana dos coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS), que formam o ótimo de Pareto ou o conjunto de soluções aceitáveis (ver Costa *et al.* 2013a), de cada estação fluviométrica (doze em total) e b) a mediana de todos os coeficientes de NS de cada período (1985-1995 e 2000-2010).

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

O número de soluções aceitáveis (ver descrição em Costa *et al.* 2013a) foi 2.099 para o período de 1985-1995 (período A) e 1.855 para o período de 2000-2010 (período B). Em geral, a mediana NS foi 0,80 para o período B com um desvio-padrão de 0,13 e 0,62 para o período A com um desvio-padrão de 0,17. Dessa forma, para o período B, a mediana NS foi maior e a sua distribuição mais acentuada. Na Tabela 1 é apresentado as estatísticas da calibração regional para cada estação fluviométrica e para ambos os períodos. O desempenho da calibração no período B foi melhor que no período A para dez de doze estações fluviométricas (ver Tabela 1).

Tabela 1 – Estatística básica dos coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS) da calibração regional para os dois períodos analisados: Período A (1985-1995) e Período B (2000-2010), em que DP é o desvio-padrão.

Estação fluviométrica	Calibração Período A		Calibração Período B	
	Mediana	DP	Mediana	DP
35125*	0,71	0,11	0,74	0,09
35170*	0,86	0,03	0,82	0,06
35275*	0,81	0,06	0,86	0,08
35260*	0,69	0,07	0,80	0,04
35210*	0,63	0,07	0,89	0,03
35370*	0,62	0,06	0,93	0,02
36210**	0,50	0,12	0,55	0,07
36250**	0,40	0,11	0,84	0,04
36290**	0,47	0,09	0,73	0,06
36130**	0,43	0,09	0,75	0,06
36160**	0,85	0,05	0,71	0,22
36045**	0,53	0,06	0,87	0,04

*Grupo de estações fluviométricas próximo ao litoral (bacias 3, 4 e 5 na Figura 1)

** Grupo de estações fluviométricas no sudoeste do Ceará (bacias 11 e 12 na Figura 1)

Agora, avaliando-se a variabilidade espacial do processo de calibração, na Figure 1 é apresentado que as estações fluviométricas selecionadas ficaram concentradas em dois grupos de bacias hidrográficas: uma formada pelas bacias 3, 4 e 5 próximas ao litoral e um outro grupo

formado pelas bacias 11 e 12 no sudoeste do Ceará. A mediana NS foi 0,70 para o primeiro grupo de estações, enquanto o mesmo foi 0,50 para o último grupo de estações para o período A (ver Tabela 1). No caso do período B, a mediana NS foi 0,84 para o primeiro grupo e 0,76 para o último grupo (ver Tabela 1).

Além disso, a análise de desempenho do modelo durante o processo de calibração juntamente com a posição relativa das estações fluviométricas, i.e. a jusante e a montante (ver Figura 1), mostra que a esperada tendência de estudos anteriores (e.g. Andersen *et al.* 2001; Moussa *et al.* 2007), em que os melhores desempenhos devem ser das estações mais a montante, não pôde ser confirmada neste trabalho. Isso pode ser uma característica positiva do método de calibração regional aplicado.

Dessa forma, o padrão espaço-temporal médio do processo de calibração foi que o seu desempenho aumentou do período A para o B e do grupo de estações do sudoeste do Estado para aquele próximo ao litoral, mas sem possuir nenhuma tendência clara em relação à posição relativa da estação fluviométrica, i.e. a jusante e a montante.

A diferença de desempenho em relação aos dois grupos de estações fluviométricas é possivelmente um resultado da incerteza relacionada à estrutura do modelo WASA-SED. O modelo foi estruturado para representar os principais processos hidrológicos superficiais em regiões secas, mas desconsidera a influência dos processos rio-aquífero na geração e transporte do escoamento, incluindo as perdas em trânsito. Esses processos, entretanto, são relevantes para o escoamento de rios de médio e grande porte no sudoeste do Ceará, por causa da presença de grandes corpos aluvionares e rochas sedimentares (ver Figura 1) (Medonça *et al.* 2005; Costa *et al.* 2012, 2013b). Por exemplo, Costa *et al.* (2013b) encontrou que as perdas em trânsito são em média da ordem de 30% do escoamento do rio em um trecho de 30 km exatamente a montante da estação 36160 (ver Figura 1). Essas perdas em trânsito não foram explicitamente consideradas na modelagem e podem ser uma razão de um pior desempenho do modelo no sudoeste do Estado.

Já a validação cruzada (Tabela 2) pode explicar o pior resultado do processo de calibração no período A. O desempenho do modelo na calibração no período A foi pior do que na validação nesse mesmo período em nove das doze estações fluviométricas (ver Tabela 2). Isso pode ser um indicador de que a incerteza relacionada com a séries de dados de entrada e saída e/ou os dados geoambientais (e.g. mapa de cobertura vegetal e distribuição da pequena açudagem) pode ser o fator mais influente na incerteza geral da modelagem no período A, o que diminui o desempenho da otimização dos parâmetros nesse período (não mostrado neste artigo).

Tabela 2 – A mediana dos coeficientes de Nash-Sutcliffe da calibração regional, em que Cal é calibração, Val validação, período A 1985-1995 e período B 2000-2010.

Estação Fluviométrica	Mediana dos Coeficientes de Nash-Sutcliffe			
	Cal Período A	Val Período B	Cal Período B	Val Período A
35125	0,71	0,75	0,74	0,45
35170	0,86	0,80	0,82	0,89
35275	0,81	0,87	0,86	0,90
35260	0,69	0,76	0,80	0,53
35210	0,63	0,80	0,89	0,73
35370	0,62	0,88	0,93	0,73
36210	0,50	0,41	0,55	0,72
36250	0,40	0,80	0,84	0,56
36290	0,47	0,58	0,73	0,63
36130	0,43	0,66	0,75	0,55
36160	0,85	0,68	0,71	0,92
36045	0,53	0,82	0,87	0,63

Em resumo, levando em conta o período que apresentou os melhores resultados na calibração e na validação, i.e. o período B, a mediana NS foi 0,77 para validação e 0,80 para calibração. Esse desempenho geral do modelo pode ser considerado de bom à muito bom para séries de vazões mensais em regiões semiáridas, já que é esperado um pior desempenho de modelos hidrológicos quando aplicados em bacias de clima seco ou em condições secas (e.g. Costa *et al.* 2012; Hunukumbura *et al.* 2012; Viviroli *et al.* 2009). Além disso, o método de calibração regional aplicado não permitiu que os parâmetros mudassem localmente para um melhor ajustamento em relação à uma estação fluviométrica específica, mas foram fixados em relação ao padrão espacial imposto pela parametrização inicial da modelagem (ver também Costa *et al.* 2013a).

4 – CONCLUSÕES

Neste trabalho foi aplicado um método de calibração regional à um modelo hidrológico semi-distribuído como estratégia de regionalização hidrológica em regiões secas, mas sendo também aplicável em outras áreas pobres de séries de deflúvio. Essa estratégia foi testada para uma grande área predominantemente semiárida (Estado do Ceará, 148.000 km²).

Os principais resultados deste trabalho podem ser descritos como:

a) A mediana dos coeficientes de Nash-Sutcliffe de 12 estações fluviométricas foi 0,77 para validação e 0,80 para calibração (período B: 2000-2010), o que pode ser considerado um desempenho de bom à muito bom para séries de vazões mensais em regiões semiáridas.

b) A validação cruzada sugere que a diminuição da incerteza do período A para o período B é fruto das séries de entrada e saída dos dados e/ou dos dados geoambientais, que podem então explicar um melhor desempenho do modelo no período B.

c) As diferenças do desempenho da calibração regional em duas zonas geograficamente distintas nos dois períodos de análise foram causadas por incertezas na estrutura do modelo devido possivelmente à desconsideração dos processos rio-aquífero, principalmente perdas em trânsito, na modelagem hidrológica.

Um aperfeiçoamento futuro da modelagem deve efetuar o acoplamento do modelo WASA-SED com um modelo de perdas em trânsito capaz de simular os principais processos hidrológicos envolvidos na interação rio-aquífero em regiões secas e em diferentes escalas (ver Costa *et al.* 2012; Costa *et al.* 2013b). É preferível que a nova combinação de modelos seja testada para as séries temporais do período de 2000-2010, avaliando-se se o desempenho da modelagem converge nas diferentes zonas geográficas, i.e. se a incerteza relacionada à estrutura do modelagem se reduz.

AGRADECIMENTOS

Os Autores agradecem à FUNCEME, à COGERH, à ANA, à CPRM e ao Prof. George Mamede (UNILAB) pela disponibilidade dos dados, e aos colegas Robson Silva e Vicente Pinheiro Filho (FUNCEME) pelo auxílio técnico durante a parametrização do modelo hidrológico.

BIBLIOGRAFIA

ANDERSEN, J.; REFSGAARD, J.C.; JENSEN, K.H. (2001) “*Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin – model construction and validation*”. Journal of Hydrology 247, pp. 200 – 214.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. “*Hidroweb: Sistema de informações hidrológicas*”. Disponível em: www.hidroweb.ana.gov.br. Acesso em: 29 mai. 2013.

COSTA, A.C.; BRONSTERT, A.; DE ARAÚJO, J.C. (2012) “*A channel transmission losses model for different dryland rivers*”. Hydrology and Earth System Sciences 16, pp. 1111 – 1135.

COSTA, A.C.; MARTINS, E.S.P.R.; BARROS, F.V.F.; BRONSTERT, A.; FRANCKE, T.; GÜNTNER, A. (2013a) “*Regionalização de Modelagem Hidrológica Semidistribuída para todo Estado do Ceará*” in Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, Nov. 2013.

COSTA, A.C.; FOERSTER, S.; DE ARAÚJO, J.C.; BRONSTERT, A. (2013b) “*Analysis of channel transmission losses in a dryland river reach in north-eastern Brazil using streamflow series, groundwater level series and multi-temporal satellite data*”. Hydrological Processes 27, pp. 1046 – 1060.

DROGUE, G.; LEVIANDER, T.; PFISTER, L.; EL-IDRISSI, A.; IFFLY, J.F.; HOFFMAN, L.; GUEX, F.; HINGRAY, B.; HUMBERT, J. (2002) “*The applicability of a parsimonious model for local and regional prediction of runoff*”. Hydrological Sciences Journal 47, pp. 905 – 920.

EL-HAMES, A.S.; RICHARDS, S.K. (1998) “*An integrated, physically based model for arid region flash flood prediction capable of simulating dynamic transmission loss*”. Hydrological Processes 12, pp. 1219 – 1233.

ENGELAND, K.; BRAUD, I.; GOTTSCHALK, L.; LEBLOIS, E. (2006) “*Multi-objective regional modelling*”. Journal of Hydrology 327, pp. 339 – 351.

GHEITH, H.; SULTAN, M. (2002) “*Construction of a hydrology model for estimating wadi runoff and groundwater recharge in the Eastern Desert, Egypt*”. Journal of Hydrology 263, pp. 36 – 55.

- 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, pp. 136 – 161.
- HEUVELMANS, G.; MUYS, B.; FEYEN, J. (2004). “Analysis of the spatial variation in the parameters of the SWAT model with application in Flanders, Northern Belgium”. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 8(5), pp. 931 – 939.
- HUNUKUMBURA, P.B.; TACHIKAWA, Y.; SHIIBA, M. (2012) “Distributed hydrological model transferability across basins with different hydro-climatic characteristics”. *Hydrological Processes* 26, pp. 793 – 808.
- LANGE, J.; LEIBUNDGUT, C.; GREENBAUM, N.; SCHICK, A.P. (1999) “A noncalibrated rainfall-runoff model for large, arid catchments”. *Water Resources Research* 35, pp. 2161 – 2173.
- LIMA NETO, I.E.; WIEGAND, M.C.; DE ARAÚJO, J.C. (2011) “Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin”. *Hydrological Sciences Journal* 56, pp. 319 – 333.
- MAIDMENT, D. (Ed.) (1993) *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, USA.
- MALVEIRA, V.T.C.; DE ARAÚJO, J.C.; GÜNTNER, A. (2012) “Hydrological impact of a high-density reservoir network in the semiarid north-eastern Brazil”. *Journal of Hydrologic Engineering* 17, pp. 109 – 117.
- MEDEIROS, P.H.A.; GÜNTNER, A.; FRANCKE, T.; MAMEDE, G.; DE ARAÚJO, J.C. (2010) “Modelling spatio-temporal patterns of sediment yield and connectivity in a semi-arid catchment with the WASA-SED model”. *Hydrological Sciences Journal* 55, pp. 636 – 648.
- MEDONÇA, L.A.R.; FRISCHKORN, H.; SANTIAGO, M.F.; MENDES FILHO, J. (2005) “Isotope measurements and groundwater flow modelling using MODFLOW for understanding environmental changes caused by a well field in semiarid Brazil”. *Environmental Geology* 47, pp. 1045 – 1053.
- MOUSSA, R.; CHAHINIAN, N.; BOCQUILLON, C. (2007) “Distributed hydrological modelling of a Mediterranean mountainous catchment – Model construction and multi-site validation”. *Journal of Hydrology* 337, pp. 35 – 51.
- MUELLER, E.N.; GÜNTNER, A.; FRANCKE, T.; MAMEDE, G. (2010) “Modelling sediment export, retention and reservoir sedimentation in drylands with the WASA-SED model”. *Geoscientific Model Development* 3, pp. 275 – 291.
- PARAJKA, J.; BLÖSCHL, G.; MERZ, R. (2007) “Regional calibration of catchment models: Potential for ungauged catchments”. *Water Resources Research* 43, W06406, doi:10.1029/2006WR005271.
- VÉLEZ, J.J.; PURICELLI, M.; LÓPEZ-UNZU, F.; FRANCÉS, F. (2009) “Parameter extrapolation to ungauged basins with a hydrological distributed model in regional framework”. *Hydrology and Earth Systems Sciences* 13, pp. 229 – 246.
- VIVIROLI, D.; ZAPPA, M.; SCHWANBECK, J.; GURTZ, J.; WEINGARTNER, R. (2009) “Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part I: Modelling framework and calibration results”. *Journal of Hydrology* 377, pp. 191 – 207.