

CONCEPÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO LASH EM MATLAB® COM ÊNFASE EM CALIBRAÇÃO MULTI OBJETIVO

MARCELLE MARTINS VARGAS; CARLOS ROGÉRIO DE MELLO²;
MAÍRA MARTIM DE MOURA³; TAMARA LEITZKE CALDEIRA BESKOW⁴; JOÃO
PEDRO DE MORAIS DA SILVEIRA⁵; SAMUEL BESKOW⁶

¹Discente do PPG Recursos Hídricos / CDTec / UFPel – marcellevarg@gmail.com;

²Docente do PPG Recursos Hídricos / UFPel – crmello@ufpa.br;

³Discente do PPG Recursos Hídricos / CDTec / UFPel – martimdemoura@gmail.com;

⁴Docente do PPG Recursos Hídricos / CEng / UFPel – tamaraleitzkecaldeira@gmail.com;

⁵Discente em Ciência da Computação / CDTec / UFPel - jpdrrslvr@gmail.com;

⁶Docente do PPG Recursos Hídricos / CDTec / UFPel – samuel.beskow@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Com o intuito de prover o gerenciamento dos recursos hídricos frente às distintas esferas da sociedade, se faz necessário compreender o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas. Para tal, modelos hidrológicos são comumente utilizados, com destaque para o *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH) (CALDEIRA et al. 2019), o qual requer poucas informações de entrada e possui um número pequeno de parâmetros a serem calibrados.

O LASH, em sua versão atual, é um modelo determinístico, conceitual, de longo termo, dinâmico e semi-distribuído. Este modelo pode ser aplicado para quantificar vários processos do ciclo do hidrológico: evapotranspiração, interceptação, ascensão capilar, armazenamento de água no solo, escoamento superficial direto, subsuperficial e de base.

Linguagens de programação interpretadas e de altos níveis, e.g. MATrix LABoratory (MATLAB®) e R, quando comparadas às linguagens compiladas (e.g. C e C++), possuem aplicação facilitada no âmbito da Engenharia, dada a simplicidade do código e ao nível de desenvolvimento. O MATLAB® se destaca por apresentar uma sintaxe acessível e *toolboxes* que permitem processamentos laboriosos. Desta forma, o MATLAB® pode subsidiar o desenvolvimento de modelos hidrológicos como o LASH e o teste de diferentes algoritmos de otimização.

Em relação aos algoritmos utilizados para otimização dos parâmetros de modelos hidrológicos, os algoritmos genéticos (AGs) têm adquirido espaço de utilização frente as mais diversas formulações de modelos. Como exemplos de AGs bastante utilizados, pode-se citar o mono-objetivo *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992), utilizado acoplado ao modelo LASH em vários estudos (CALDEIRA et al., 2019). Todavia, o LASH nunca foi avaliado utilizando um algoritmo multiobjetivo, como o *Multi-Algorithm Genetically Adaptive Multiobjective* (AMALGAM) (VRUGT; ROBINSON, 2007).

Múltiplos objetivos em um problema de otimização dão origem a um conjunto de soluções ótimas de Pareto, em vez de uma única solução ótima (VRUGT; ROBINSON, 2007). O uso de várias funções objetivo (FOs) pode reduzir a equifinalidade e a incerteza associadas aos parâmetros (HER; SEONG, 2018), o que justifica a utilização de algoritmos multiobjetivos em modelos hidrológicos.

Mediante ao exposto, este trabalho concerce na apresentação da construção do LASH em ambiente MATLAB®, com vistas a otimizar o processamento do modelo e acoplar os algoritmos de calibração SCE-UA e AMALGAM.

2. METODOLOGIA

A estrutura de implementação do LASH em MATLAB® foi baseada em *functions* a fim de representar os principais componentes do ciclo hidrológico, a saber: interceptação, evapotranspiração potencial e real, escoamento de base, escoamento subterrâneo e escoamento superficial direto. Os processos hidrológicos computados no LASH variam no espaço e no tempo. A implementação desses processos faz uso de estruturas de repetição em relação às sub-bacias e ao passo de tempo da série histórica. Na Figura 1 estão representados os módulos do LASH, bem como os parâmetros calibráveis.

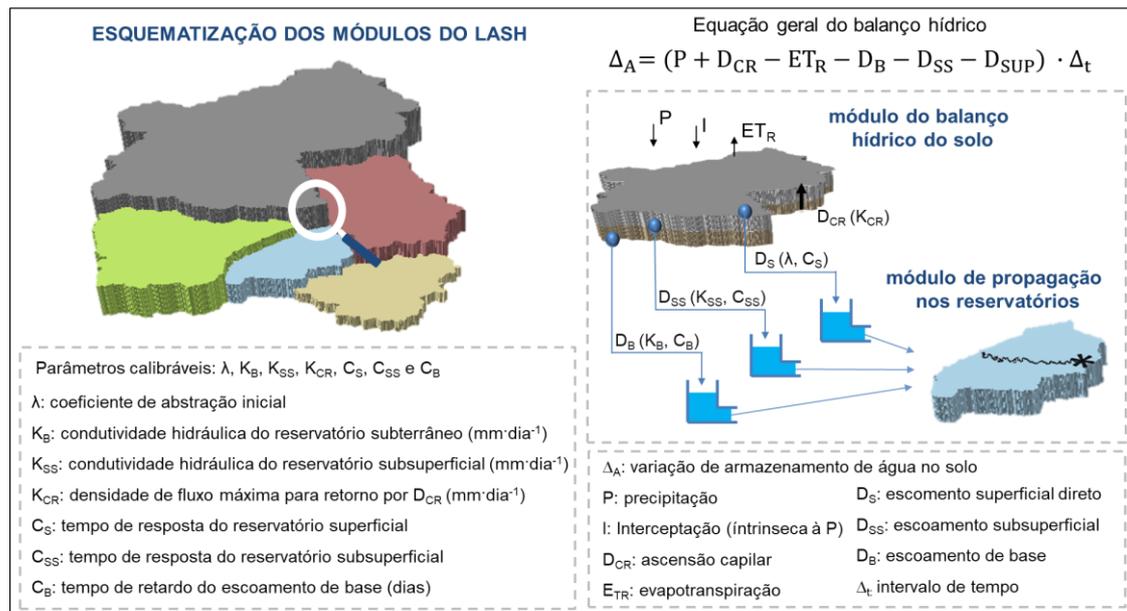


Figura 1: Esquematização dos módulos do modelo *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH).

Com vistas a otimizar o *script* do LASH em MATLAB®, foi realizado um paralelismo explícito, utilizando matrizes distribuídas por meio da pré-alocação e vetorização. E ainda, foi utilizado o artifício de globalização das variáveis, ou seja, como as variáveis globais são acessíveis em qualquer seção do MATLAB®, não há necessidade de repassá-las às funções, otimizando o tempo de processamento.

Frente à estruturação do LASH em MATLAB®, uma premissa inédita implementada foi o módulo de calibração do modelo pautado em um algoritmo multiobjetivo. Para tal, foi testado, comparativamente ao algoritmo mono-objetivo SCE-UA (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992), o algoritmo multiobjetivo AMALGAM (VRUGT; ROBINSON, 2007). As FOs utilizadas foram o coeficiente de Nash-Sutcliffe (C_{NS}), o C_{NS} na sua versão para valores logaritmizados (C_{NS-LOG}) e o percentual de viés (P_{BIAS}).

É importante considerar FOs na modelagem hidrológica que expliquem a resposta da bacia hidrográfica. O C_{NS} é utilizado para verificar se o modelo captou bem as vazões de pico, o C_{NS-LOG} para verificar a adequabilidade do modelo às vazões mínimas e o P_{BIAS} , se o balanço hídrico está sendo bem representado.

Para fins de comparação, foram utilizados os parâmetros calibrados por CALDEIRA (2019) para a base de dados da bacia hidrográfica do rio Piratini (BHRP), com vistas a verificar o modelo LASH em MATLAB®.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da calibração dos parâmetros do LASH para a BHRP estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros calibrados para a BHRP, considerando o estudo de CALDEIRA (2019) e os algoritmos SCE-UA e AMALGAM sob a formulação do LASH em MATLAB®

	λ	K_{SS} (mm·dia ⁻¹)	K_B (mm·dia ⁻¹)	K_{CR} (mm·dia ⁻¹)	C_S	C_{SS}	C_B (dias)
SCE-UA*	0,09	77,08	0,65	2,55	11,63	40,64	43,48
	FO: $C_{NS} = 0,69$						
	Estatísticas de desempenho: $C_{NS-LOG} = 0,71$ e $P_{BIAS} = 21,57\%$						
*Resultados obtidos por Caldeira (2019) no ambiente de programação R							
SCE-UA	λ	K_{SS} (mm·dia ⁻¹)	K_B (mm·dia ⁻¹)	K_{CR} (mm·dia ⁻¹)	C_S	C_{SS}	C_B (dias)
	0,02	51,13	0,54	2,20	14,02	277,03	64,19
	FO: $C_{NS} = 0,66$						
Estatísticas de desempenho: $C_{NS-LOG} = 0,63$ e $P_{BIAS} = 11,25\%$							
Características: 2583 iterações e tempo de processamento de 5,35h							
AMALGAM	λ	K_{SS} (mm·dia ⁻¹)	K_B (mm·dia ⁻¹)	K_{CR} (mm·dia ⁻¹)	C_S	C_{SS}	C_B (dias)
	0,03	81,06	1,66	1,83	11,40	120,22	36,10
	FO: $C_{NS} = 0,66$, $C_{NS-LOG} = 0,62$ e $P_{BIAS} = -0,11\%$						
Características: 2500 iterações e tempo de processamento de 3,90h							

Um ganho importante na formulação do LASH em MATLAB® foi em relação ao tempo de processamento, que antes era entre 48h e 72h (em linguagem R) para a mesma bacia e configuração avaliada. Os tempos de processamento informados na Tabela 1 estão atrelados, principalmente, à consideração de variáveis globais no MATLAB®, margeando diferentes testes considerando as especificidades de cada algoritmo (e.g. número de complexos, número de iterações, etc.).

Analisando a Tabela 1, em relação à calibração com o SCE-UA, e comparando os parâmetros calibrados aos obtidos por CALDEIRA (2019), pode-se observar que houve uma similaridade nos valores, com exceção do C_{SS} . Essa diferença pode estar relacionada à escolha do conjunto de parâmetros, dentro de n soluções, em função da combinação das estatísticas de desempenho e é refletida na piora do $C_{NS} = 0,66$ e $C_{NS-LOG} = 0,63$ e na melhora do $P_{BIAS} = 11,25\%$.

Em relação à calibração multiobjetivo ($C_{NS} = 0,66$), embora o C_{NS} tenha sido menor que o obtido por CALDEIRA (2019) ($C_{NS} = 0,69$), este em conjunto com os valores de C_{NS-LOG} ($C_{NS-LOG} = 0,62$) e P_{BIAS} ($P_{BIAS} = -0,11\%$) tendem a garantir uma melhor representação dos processos hidrológicos na BHRP. Esses resultados são fortalecidos, principalmente, por se tratar de uma calibração em escala diária. Nesse sentido, a utilização de estatísticas que contemplem os extremos e o comportamento médio das vazões favorecem a diminuição do número de conjuntos de parâmetros que permitem atender às 3 condições estabelecidas em termos de FOs.

ZHANG et al. (2018) explicam que não se pode presumir que a calibração multiobjetivo irá necessariamente garantir uma melhor acurácia do modelo, mas que o desempenho do modelo depende das FOs utilizadas. Para tal, as estatísticas C_{NS} , C_{NS-LOG} e P_{BIAS} podem ser utilizadas para averiguar a capacidade do modelo em representar os processos do ciclo hidrológico.

NEMRI; KINNARD (2020) compararam o SCE-UA e o AMALGAM para avaliar a equifinalidade e incerteza do modelo hidrológico GR4J-Cemaneige, com

vistas à simulação de água na neve. Os autores constataram que a calibração com o AMALGAM reduziu o número de conjuntos de parâmetros equifinais. Os resultados obtidos pelos autores e os deste estudo enaltecem a utilização do algoritmo no LASH, buscando uma alternativa para diminuir as incertezas associadas aos parâmetros de calibração do modelo sob FOs que representem as especificidades das respostas hidrológicas.

4. CONCLUSÕES

Dentre os resultados apresentados neste trabalho, pode-se ressaltar que: i) a formulação do LASH em uma linguagem interpretada e a utilização de alguns artifícios, permitiu reduzir o tempo de processamento do modelo, o que é um avanço frente ao seu desenvolvimento, facilitando alterações e atualizações; ii) a escolha das FOs para a calibração dos parâmetros do LASH se mostrou adequada, mediante aos processos que estas representam no ciclo hidrológico; e iii) o algoritmo multiobjetivo tem potencial para diminuir as incertezas dos parâmetros do modelo LASH, contribuindo para uma melhor representação dos processos hidrológicos e para facilitar a tomada de decisão por parte do usuário.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALDEIRA, T. L. **Impacto das mudanças climáticas sobre a hidrologia de sub-bacias da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo**. 2019. 243f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

CALDEIRA, T. L *et al.* LASH hydrological model: an analysis focused on spatial discretization. **Catena**, v. 173, p. 183-193, 2019. DOI: 10.1016/j.catena.2018.10.009.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. **Water Resources Research**, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, 1992. DOI: 10.1029/91WR02985.

HER, Y.; SEONG, C. Responses of hydrological model equifinality, uncertainty, and performance to multi-objective parameter calibration. **Journal of Hydroinformatics**, v. 20, n. 4, p. 864-885, 2018. DOI: 10.2166/hydro.2018.108.

NEMRI, S; KINNARD, C. Comparing calibration strategies of a conceptual snow hydrology model and their impact on model performance and parameter identifiability. **Journal of Hydrology**, v. 582, p. 124474, 2020.

VRUGT; J. A.; ROBINSON, B. A. Improved evolutionary optimization from genetically adaptive multimethod search. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. 3, p. 708-711, 2007. DOI: 10.1073/pnas.0610471104.

ZHANG, R. et al. Can multi-objective calibration of streamflow guarantee better hydrological model accuracy? **Journal of Hydroinformatics**, v. 20, n. 3, p. 687-698, 2018.