



XVIII  
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE  
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

## ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS USANDO O CONCEITO DE ENTROPIA

Pedro Henrique Lima Alencar<sup>(a)</sup>, Mateus Tomé de Sousa<sup>(a)</sup>, José Carlos de  
Araújo<sup>(c)</sup>

<sup>(a)</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará,  
pedrohlalencar@gmail.com

<sup>(b)</sup> Bolsista de PIBIC, Universidade Federal do Ceará, mateustome@alu.ufc.br

<sup>(c)</sup> Professor, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará,  
jcaraujo@ufc.br

**Eixo: Geotecnologias e modelagem aplicada aos estudos ambientais**

### Resumo

A região semiárida brasileira é um ambiente de extrema vulnerabilidade ambiental e o entendimento dos processos hidrossedimentológicos da região é de fundamental importância para o seu correto manejo e conservação. Este trabalho apresenta uma metodologia, baseada no princípio da entropia máxima (POME) e em dados de campo, para estimar a razão de aporte de sedimentos em bacias com e sem monitoramento. Obteve-se melhora significativa dos valores, com um erro absoluto na estimativa da produção de sedimento de 21% para bacias monitoradas e 27% para bacias não monitoradas, resultado até quatro vezes menor que o erro obtido por metodologias clássicas.

**Palavras chave:** Princípio da Entropia Máxima, Razão de Aporte de Sedimentos, Eventos subdiários

### 1. Introdução

A região semiárida brasileira, que compreende o bioma Caatinga, ocupa uma área de aproximadamente um milhão de quilômetros quadrados (11% do território nacional) e abriga cerca de 25 milhões de habitantes. A região é sujeita a eventos de secas frequentes, o que levou à prática de açudagem, gerando uma densa rede de reservatórios artificiais – cerca de um reservatório a cada 5 km<sup>2</sup> (ARAÚJO e MEDEIROS, 2013). Neste contexto de escassez de recursos hídricos e alta dependência de reservatórios superficiais, o assoreamento está fortemente associado à redução da disponibilidade de água (de ARAÚJO, GÜNTNER e BRONSTERT, 2006).



XVIII  
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE  
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

Este trabalho apresenta uma metodologia para a avaliação da produção de sedimentos em bacias hidrográficas e do assoreamento de reservatórios baseada no Princípio da Entropia Máxima (POME, acrônimo do inglês *Principle Of Maximum Entropy*).

Sistematizado por Jaynes (1957), o Princípio da Entropia Máxima indica que, para um dado sistema, sobre o qual se deseja fazer inferência a partir de um conhecimento incompleto de suas propriedades, a distribuição de densidade de probabilidade que deve ser selecionada é aquela que apresenta maior entropia. A entropia é, nesse contexto, definida como uma medida da desordem sobre dado sistema (SINGH, 2007). A determinação da função de densidade de probabilidade ( $p(x)$ ), portanto, passa pelo processo de maximização descrito da função entropia ( $h$ ) – como indicado na Equação 1 – dadas as restrições, que representam o conhecimento prévio que se tem sobre o sistema analisado.

$$h = - \int p(x) \ln[p(x)] \quad (1)$$

## 2. Modelagem

Partindo-se da premissa que a Razão de Aporte de Sedimentos (SDR) pode ser interpretada como a probabilidade de uma partícula de solo que foi mobilizada pelo processo erosivo chegar à rede de drenagem, a função de densidade de probabilidade que melhor descreve o processo pode ser obtida através do POME (SINGH, 1997).

A produção de sedimento ( $Q_s$ ) pode ser descrita pela Equação 2 (DE ARAÚJO, 2007), em que  $x$  é a distância entre o divisor de águas e o ponto de origem dos sedimentos,  $L_0$  o comprimento da encosta,  $w$  a largura da faixa,  $L_m$  a distância máxima de transporte pela água e  $p$  a probabilidade de a partícula erodida chegar ao corpo hídrico .

$$Q_s = 2 \cdot \int_0^{w_0} \left[ \int_{x_0}^{L_0} \varepsilon(x, w) \cdot \left( \int_{L_0-x}^{L_m} p(x) \cdot dx \right) \cdot dx \right] \cdot dw \quad (2)$$

O termo referente à integral de  $p(x)$  na Equação 2 pode ser interpretado como o SDR da bacia. Utilizando a restrição fundamental (integral da função densidade de probabilidade



XVIII  
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE  
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

igual a 1) e da conservação da massa via equilíbrio da concentração de sedimentos ( $\bar{c}$  – Equação 3), de Araújo (2007) obteve a equação de produção de sedimentos (Equação 4).

$$\bar{c} = \frac{\bar{\varepsilon} \cdot w_0}{T^j \cdot Q(T^j)} \cdot \int_0^{L_0} x \cdot p(x) \cdot dx \quad (3)$$

$$Q_S = \bar{\varepsilon} \cdot A \cdot \frac{e^{\lambda \cdot Lm} \cdot (L_0 - x_0) \cdot \lambda - (e^{\lambda \cdot (L_0 - x_0)} - 1)}{\lambda \cdot L_0 \cdot (e^{\lambda \cdot (x_0 + Lm)} - 1)} \quad (4)$$

onde Q é a vazão, T a duração do escoamento e  $\lambda$  um parâmetro de processo.

Vazão, duração, e produção de sedimento ( $\varepsilon$ ), no entanto, são dependentes de informações relativas à duração e à intensidade das chuvas, somente obtidos em bacias monitoradas com pluviógrafos e pluviômetros de balança, que correspondem a um número sabidamente muito pequeno.

Para lidar com este problema propõe-se a aplicação de um método estocástico para estimativa de escoamento para períodos sub-diários, pela Equação 5.

$$T^j = \bar{T} + k^j \cdot S_T \quad (5)$$

$$k^j = \frac{H^j - \bar{H}}{S_H} \cdot \chi^j \quad (6)$$

onde  $T^j$  é a duração do j-ésimo evento,  $\bar{T}$  a duração média dos eventos,  $S_T$  o desvio padrão na duração dos eventos e  $k^j$  é uma variável estocástica para o j-ésimo evento, dada pela Equação 6. Nesta,  $\bar{H}$  é a média da precipitação,  $H^j$  a precipitação do j-ésimo evento,  $S_H$  o desvio padrão da precipitação e  $\chi^j$  uma variável aleatória de distribuição uniforme variando de zero a  $\chi_{\text{máx}}$ , devendo este ser calibrado para cada bacia hidrográfica.

No caso de bacias não monitoradas, os dados de duração de chuva podem ser estimados via modelos (MAMUN et al., 2018) ou a partir de extrapolação de bacias próximas com dados disponíveis (ALENCAR, 2018). Isto permite a obtenção das características subdiárias de uma chuva a partir de seus dados diários.

### 3. Áreas experimentais



XVIII  
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE  
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

O modelo foi parametrizado e validado para sete bacias experimentais localizadas em climas semiáridos e temperados, como indicado na Figura 1 (Aiuaba, Sumé, Acarape, Canabrava, Várzea da Volta, Nünzenberg e Lanënbachtal), com monitoramento de eventos sub-dirários de precipitação e escoamento (DE ARAÚJO 2007).

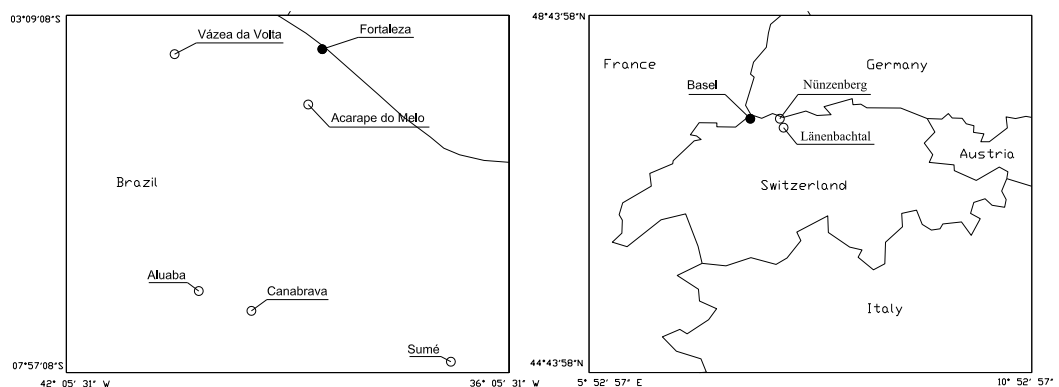


Figura 1 - Localização das bacias experimentais

#### 4. Resultados e discussão

O modelo resultou em um erro absoluto de 21% para as bacias monitoradas, utilizando-se o modelo apresentado nas equações 2 a 4 (DE ARAÚJO, 2007). Para as bacias não monitoradas, o erro absoluto foi de 27%, quando utilizada a rotina de eventos sub-diários juntamente com o modelo baseado no POME, como indicado na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados de assoreamento para bacias não monitoradas

Bacia	Area (km <sup>2</sup> )	Período de assoreamento (anos)	Produção de sedimentos (Mg.km <sup>-2</sup> .ano <sup>-1</sup> )	Erro (SDR Roehl) <sup>1</sup>	Erro (SDR Maner) <sup>1</sup>	Erro (SDR POME)
Canabrava	3	57	704	-34%	-20%	+14%
Acarape	208	74	233	+118%	+48%	-39%

<sup>1</sup> Dado disponível em de Araújo (2003).

Ainda acerca das bacias não monitoradas, observa-se um ganho significativo de precisão na determinação do aporte de sedimentos à rede de drenagem quando comparado com métodos clássicos, como Roehl (1962 citado por de ARAÚJO, 2003) e Maner (1958 citado por de ARAÚJO, 2003). Os modelos citados levam em conta na estimativa da razão de aporte de sedimentos fatores topográficos, como cota de divisor de águas e do exultório, comprimento e declividade da bacia, que na escala temporal de análise não variam. Ao passo que o modelo



XVIII  
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE  
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

proposto lança mão de equações de equilíbrio de massa (de sedimentos), potência de corrente e processos estocásticos em seu equacionamento, sem no entanto inserir hipóteses não comprovadas, graças à aplicação do Princípio da Entropia Máxima.

## 5. Conclusão

O modelo proposto, baseado no Princípio da Entropia Máxima, apresentou ganho significativo de desempenho frente a modelos tradicionais. O trabalho também apresenta uma proposta para estimativa da produção de sedimentos em eventos de escoamento para bacias não monitoradas, resultando em um avanço na modelagem ambiental.

## 6. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e dentro do contexto do Projeto Entropia (CNPq – processos 301677/2015-8 e 407999/2016-7).

## 7. Referências Bibliográficas

- ALENCAR, P. H. L.; PATON, E. N.; ARAÚJO, J. C. Gully-walls soil loss effect on gully modelling: a Brazilian Semiarid case of study. **Geophysical Research Abstracts**. v. 20. EGU2018-15389-1, 2018.
- de ARAÚJO, J. C.; MEDEIROS, P. H. A. Impact of dense reservoir networks on water resources in semiarid environments, **Aust J Water Resour**, v. 17, n. 1, p. 87–100. 2013.
- de ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil, **Hydrolog Sci J**, v. 51, p. 157–170. 2006.
- de ARAÚJO, J. C. Entropy-based equation to assess hillslope sediment production, **Earth Surf Proc Land**, v. 32, n. 1, p. 2005–2018. 2007.
- JAYNES, E. T. Information theory and statistical mechanics. **Physical Review**. v. 106, n. 4, p. 620–630. 1957.
- MAMUN, A.; SALLEH, M. N.; NOOR, H. M. Estimation of short-duration rainfall intensity from daily rainfall values in Klang Valley, Malaysia, **Applied Water Science**. v. 8, n. 7, p. 203. 2018.
- SINGH, V. P. The Use of Entropy in Hydrology and Water Resources, **Hydrol Proces**, v. 11, n. 6, p. 587–626. 1997.