

## FLUXOS DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO SIMULADOS NA AMÉRICA DO SUL - PARTE 1: CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

*Hugo de Oliveira Fagundes<sup>1</sup>; Fernando Mainardi Fan<sup>2</sup>; Rodrigo Cauduro Dias de Paiva<sup>3</sup>; Vinicius Alencar Siqueira<sup>4</sup>; Diogo Costa Buarque<sup>5</sup>; Luísa Weizenmann Kornowski<sup>6</sup>; Leonardo Laipelt dos Santos<sup>7</sup>; Walter Collischonn<sup>8</sup>*

**ABSTRACT** – Rivers of South America carry a large amount of suspended sediment. Global studies have shown an increase in erosion rates and, at the same time, an increase in retention rates by damming rivers. Here, we briefly present the daily continental sediment model for South America MGB-SED SA. The model was calibrated and validated using in-situ sediment measurements, and its performance was evaluated using the correlation coefficient ( $r$ ) and the *BIAS*. Results from the MGB-SED SA model have agreement against observed suspended sediment discharge (QSS). 66% and 54% of sediment stations showed  $r$ -values above 0.5 in the calibration (Cal) and validation (Val), respectively. For *BIAS* (%), 94% (Cal) and 85% (Val) of stations showed values between -100% and 100%. We conclude that the MGB-SED SA model was able to perform sufficient accurate estimates for several stations, which was evaluated using in-situ measurements.

**Palavras-Chave** – Erosão; MUSLE; MGB-SED.

### 1 - INTRODUÇÃO

A importância dos sedimentos em suspensão (SS) vem sendo destacada por diversos trabalhos prévios, que têm mostrado, por exemplo, sua relação com alterações no uso e cobertura do solo (e.g. Oliveira et al., 2015) e com a manutenção dos ecossistemas (e.g. Barbarossa et al., 2020).

A América do Sul (AS) transporta elevadas cargas de sedimentos (e.g. Syvitski et al., 2014), residindo nela 5 dos 10 rios tropicais com maior transporte de SS do planeta. A compreensão dos fenômenos físicos que governam os sedimentos na AS demanda a disponibilidade de dados medidos em campo. Contudo, sabe-se que em todo o mundo as medições de sedimentos são consideradas escassas (e.g. Best, 2019). Uma forma complementar de realizar os estudos é utilizando modelagem matemática.

1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; h.o.fagundes@hotmail.com; 51 33086670

2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; fernando.fan@ufrgs.br; 51 33086670

3) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; rodrigocdpaiva@gmail.com; 51 33086670

4) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; vinisiquera@gmail.com; 51 33086670

5) Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari, Goiabeiras, 514, Vitória; diogo.buarque@gmail.com; 27 33352853

6) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; luisa\_wk@hotmail.com; 51 33086670

7) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; leonardo.laipelt@ufrgs.br; 51 33086670

8) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; waltercollischonn@gmail.com; 51 33086670

Estudos de transporte de sedimentos nos rios da AS foram conduzidos utilizando modelagem na escala global (e.g. Cohen et al., 2013; Pelletier, 2012). Contudo, esses modelos foram pouco validados, focaram em estimar médias anuais de longo e são baseados em metodologias simplificadas para representar processos hidrológicos, hidrodinâmicos e de transporte de sedimentos. No âmbito da modelagem hidrológica-hidrodinâmica, destaca-se o recente trabalho realizado por Siqueira et al. (2018), que aplicaram pela primeira vez e validaram um modelo hidrológico-hidrodinâmico totalmente acoplado e com escala continental para toda a AS.

Alinhando as lacunas existentes no âmbito da modelagem de sedimentos com os esforços já realizados na modelagem hidrológica-hidrodinâmica, surge a oportunidade de desenvolver um modelo de sedimentos continental com propagação hidrodinâmica diária. O modelo denominado MGB-SED SA foi calibrado e validado a fim de investigar esta possibilidade de desenvolvimento e a acurácia de um modelo de sedimentos em escala continental.

## 2 - UMA BREVE VISÃO DOS SEDIMENTOS NA AMÉRICA DO SUL

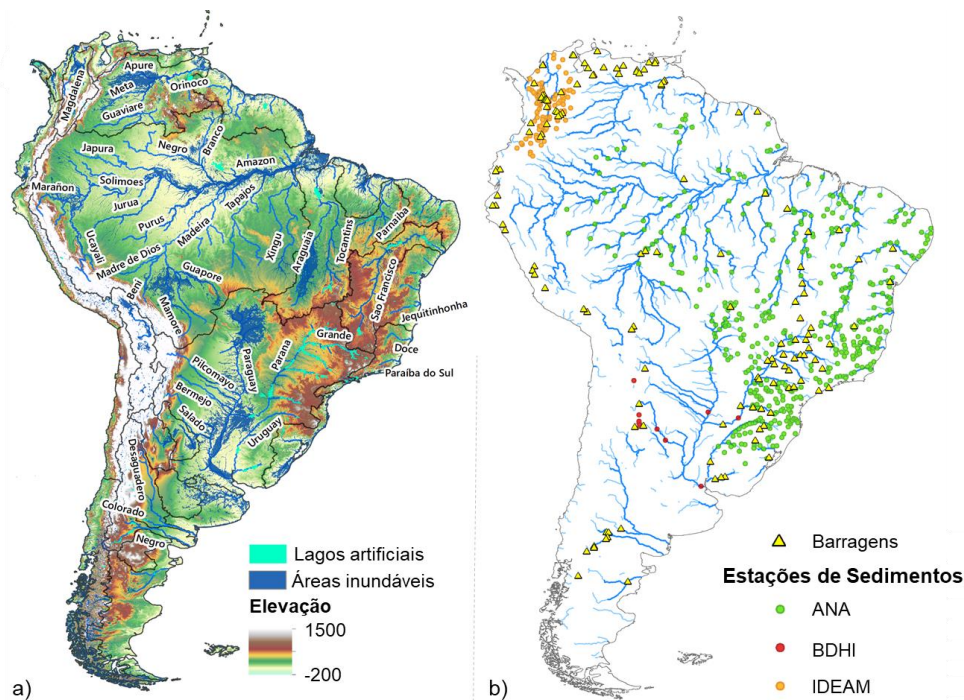


Figura 1 - América do Sul, mostrando: a) maiores regiões hidrológicas de acordo com as classificações da FAO e a Agência Nacional de Águas (ANA), mapa de relevo baseado no SRTM Bare-Earth (O’Loughlin et al., 2016), incluindo os principais rios, áreas inundáveis (Fluet-Chouinard et al., 2015) e lagos artificiais (Lehner et al., 2011); e b) reservatórios da base de dados GRanD v1.3 (>0.1 km<sup>3</sup> Lehner et al., 2011 - <http://globaldamwatch.org>) e da ANA (> 30MW), e estações de sedimentos da ANA, Base de Datos Hidrológica Integrada da Argentina (BDHI) e Instituto de Hidrologia, Meteorologia e Estudos Ambientais da Colômbia (IDEAM).

A América do Sul (AS) transporta cerca de 20% dos sedimentos que chegam aos oceanos (Syvitski et al., 2005) e os rios Amazonas e Magdalena (Figura 1-a) estão entre os que mais exportam sedimentos em todo o mundo (Mouyen et al., 2018). A AS possui a segunda maior taxa de erosão potencial do planeta e é a região que vem tendo o maior aumento dessa taxa no último século (Wuepper et al., 2019).

Os rios que drenam a região Andina são aqueles que transportam a maior carga de sedimentos do continente. De acordo com Restrepo et al. (2006), o rio Magdalena é aquele com a maior produção média de sedimentos (690 t/km<sup>2</sup>.ano). Mais de 90% da carga de sedimentos em suspensão (SS) da bacia Amazônica vem dos Andes (Latrubesse et al., 2005). Os rios que derivam da região Andina mais ao sul do continente também transportam elevadas cargas de SS, como o rio Bermejo (Amsler & Drago, 2009) e o rio Pilcomayo (Latrubesse et al., 2005).

Na bacia Amazônica, cerca de 50% dos sedimentos que deixam os Andes se depositam em planícies (Guyot et al., 1989). A retenção de sedimentos também ocorre por meio de fatores antrópicos, como a presença de barragens (Figura 1-a).

### 3 - O MODELO DE SEDIMENTOS DA AMÉRICA DO SUL

Para compreender os fluxos de sedimentos na América do Sul, foi usado o modelo de sedimentos MGB-SED (Buarque, 2015; Fagundes et al., 2019) acoplado ao modelo hidrológico-hidrodinâmico MGB-SA apresentado por Siqueira et al. (2018).

#### 3.1 - Modelo hidrológico-hidrodinâmico MGB SA

O modelo MGB SA apresentado por Siqueira et al. (2018) tem como base o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB), inicialmente desenvolvido por Collischonn et al. (2007). A principal forçante do modelo é a chuva (o modelo não considera derretimento de neve ou gelo), a partir da qual são simulados os diversos processos do ciclo hidrológico. Foi utilizado nesse trabalho a mesma configuração e estrutura do MGB SA, bem como os dados de entrada utilizados por Siqueira et al. (2018). A seguir, apresenta-se um breve detalhamento das configurações do modelo.

No MGB SA os autores usaram um limiar de 1.000 km<sup>2</sup> para definição do início da rede de drenagem e os comprimentos de trecho de rio foram estabelecidos usando uma discretização baseada em vetores de comprimento fixo  $\Delta x=15$  km. Utilizou-se o modelo digital de elevação (MDE) SRTM Bare-Earth v.1 (O'Loughlin et al., 2016), para calcular o *Height Above Nearest Drainage* (HAND) e a partir deste estimar a topografia das planícies de inundação ao nível sub-grade.

Os dados de precipitação utilizados vieram do conjunto de dados global Multi-Source Weighted Ensemble Precipitation – MSWEP v1.1 (Beck et al., 2017). As variáveis climáticas utilizadas para estimativa da evapotranspiração foram temperatura, pressão, radiação e velocidade do vento

e foram adquiridas do *Climate Research Unit (CRU) Global Climate v.2* (New et al., 2002) na forma de médias mensais de longo período (1961-1990) com 10' de resolução. Para representar o solo e sua cobertura os autores adotaram o mapa de URHs feito por (Fan et al., 2015) para toda a América do Sul. Na rede de drenagem, a propagação de vazão é realizada utilizando o método de propagação inercial local (Pontes et al., 2017) ou o método Muskingum-Cunge. Para mais detalhes e informações, consultar o trabalho de Siqueira et al. (2018).

### 3.2 - Modelo de sedimentos MGB-SED

O modelo de sedimentos de grandes bacias (MGB-SED) foi apresentado pela primeira vez de forma completa por Buarque (2015). O modelo proposto é dividido em três módulos (bacia, rio e planície) e permite simular os processos de erosão laminar e entressulcos nas encostas, erosão no leito, transporte dos sedimentos ao longo da rede de drenagem e deposição no canal e nas planícies. O volume de sedimentos que deixa as encostas em cada minibacia é a principal informação estimada pelo modelo por meio da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE, Williams., 1975).

Após a quantificação da produção de sedimentos pela MUSLE, o volume gerado é dividido em três classes de tamanhos de partículas (silte, argila e areia), de acordo com o percentual dessas classes no solo, e utilizam-se três reservatórios lineares (um para cada classe) para a propagação dos sedimentos da bacia para a rede de drenagem. As frações de silte e argila são propagadas utilizando a equação de transporte unidimensional sem o termo de difusão e os sedimentos são transportados em suspensão, sem haver deposição no canal. Como não abordaremos o transporte de leito nesse trabalho, recomendamos a leitura completa do trabalho de Buarque (2015).

Quanto às planícies de inundação, considera-se que essas não possuem velocidade longitudinal e que apenas trocas laterais com os rios é permitida. O modelo assume que existe uma mistura completa de sedimentos na planície, com concentrações constantes na vertical para as partículas de silte e argila. Como as partículas finas podem se depositar, as planícies funcionam apenas como áreas de armazenamento, sem ressuspensão das partículas depositadas.

### 3.3 - Dados de entrada para a simulação

O MGB-SED precisa de dados topográficos, de tipo, composição e cobertura do solo e de escoamento superficial para calcular os volumes de sedimentos diários estimados pela MUSLE que chegam à rede de drenagem. Para calcular o fator  $K$ , nós usamos percentuais de silte, argila, areia e carbono orgânico para cada tipo de solo a partir dos dados da *Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations* (FAO/UNESCO, 1974). O fator  $LS$  teve como principal dado de entrada o Bare-Earth SRTM v.1 (O'Loughlin et al., 2016). O fator  $C$  foi estimado para cada cobertura de solo identificada nas URHs com base em estudos prévios de literatura (Benavidez et al., 2018; Buarque,

2015; Fagundes et al., 2019). Consideramos as mesmas coberturas de solo usadas por Siqueira et al. (2018) (floresta, agricultura, pastagem, área semi-impermeável, várzea e água). Destaca-se, no entanto, que o valor de  $C$  para floresta não foi o mesmo em toda a AS. O fator  $P$  foi adotado igual a 1, visto que nesta escala não se tem informações detalhadas da distribuição espacial de práticas conservacionistas do solo e nem é possível identificá-las no mapa de uso do solo adotado. O escoamento superficial diário foi calculado pelo MGB SA e também foi usado para computar o  $q_{peak}$ .

### 3.4 - Calibração e Validação do modelo

Para avaliar a performance do modelo, foram usados dados de descarga sólida em suspensão (QSS) de 570 estações de monitoramento (Figura 1-b) do Brasil - ANA (450), Colômbia - IDEAM (109) e Argentina – BDHI (11), com pelo menos 4 medições no período de 1992-2009 e com área de drenagem superior a 1.000km<sup>2</sup>.

Na calibração (2002-2009), utilizou-se 64 estações, com área de drenagem entre 3.045 e 4.700.503 km<sup>2</sup>. As estações para calibração foram selecionadas da seguinte maneira: i) dentro de cada sub-bacia com estações, escolheu-se sempre a estação com maior área de drenagem; ii) caso a estação fosse localizada a jusante de um (ou mais) barramento (apresentados na Figura 1), utilizaria aquela a montante do barramento com maior área de drenagem; iii) quando só havia 1 posto em uma sub-bacia, esse foi utilizado para a calibração do modelo. A exceção foi a estação Brazo Largo.

A calibração se deu em duas etapas: uma calibração automática seguida por uma calibração manual, a fim de aperfeiçoar as estimativas realizadas pelo modelo. Realizou-se a calibração automática usando o algoritmo de otimização MOCOM-UA (Yapo et al., 1998) e com base nas recomendações feitas por Fagundes et al., (2019). Utilizou-se uma população de 100 indivíduos; três funções objetivo: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe ( $NSE$ , Nash and Sutcliffe, 1970),  $BIAS$  e erro da declividade da curva de permanência entre 10% e 50% ( $DCPerm$ , Kollat et al., 2012); número máximo de interações igual a 500; e três parâmetros calibráveis que foram ajustados para cada sub-bacia:  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\Upsilon$  (Equação 2).

$$t_b = \Upsilon \cdot TKS \quad (1)$$

$TKS$  (s) é o parâmetro que indica o tempo de retardo do reservatório linear superficial;  $t_b$  (s) indica o tempo de resposta da chegada dos sedimentos a rede de drenagem;  $\Upsilon$  [-] é o coeficiente de ajuste entre os dois outros parâmetros. As faixas de variação dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\Upsilon$  foram, respectivamente, 0,01-25,0; 0,1-0,5 e 0,1-5,0.

Nas bacias sem dados observados, foi feita uma transferência simples de parâmetros das sub-bacias calibradas, levando-se em conta as características físicas e climáticas dessas regiões.

A validação (1992-2009) consistiu em utilizar os mesmos critérios adotados para a seleção dos postos na calibração, o que resultou na seleção de 52 estações de sedimentos. Uma avaliação da performance global do modelo foi realizada utilizando os 570 postos. Essa foi uma medida conservadora que inclui, portanto: a avaliação do modelo em postos utilizados na calibração no período de 1992 a 2009 e a avaliação do modelo nos demais postos para o mesmo período. Além das métricas já mencionadas, a performance do modelo foi avaliada em termos da correlação de Pearson ( $r$ ).

#### 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A QSS simulada foi comparada com valores diários observados e a performance do modelo foi avaliada na Figura 2 em termos de  $r$  e  $BIAS$ . A Figura 2-a mostra que o modelo apresentou concordância com os dados observados em termos de correlação, com 66% e 54% das estações apresentando valores superiores a 0.5 nas etapas de calibração (Cal) e validação (Val), respectivamente. Em termos de  $BIAS$ , 94% (Cal) e 85% (Val) das estações apresentaram valores entre -100% e 100% (Figura 2-b).

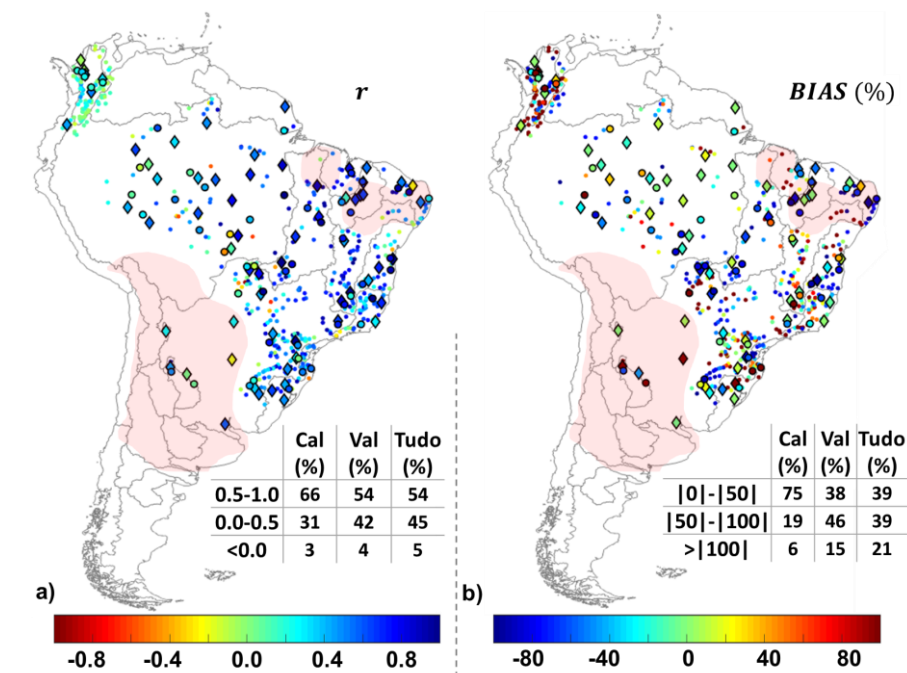


Figura 2 - Performance do modelo MGB-SED SA na América do Sul em termos de descarga de sedimentos em suspensão: a) correlação ( $r$ ); b)  $BIAS$  (%). Diamantes e círculos maiores se referem as estações utilizadas nas etapas de calibração (Cal) e validação (Val), respectivamente. Círculos menores se referem as outras estações utilizadas na avaliação do modelo. Tabelas resumem a porcentagem de estações de sedimentos em cada classe de performance. Regiões destacadas em Vermelho representam aquelas em que o modelo hidrológico-hidrodinâmico apresentou baixa performance (ver Siqueira et al., 2018).

Na avaliação com todos os postos (All), a Figura 2 mostra que o modelo teve um desempenho inferior do que aquele encontrado na calibração e na validação. Nós observamos que o modelo apresentou melhor desempenho em simular as QSS nos postos usados para a calibração e uma pior performance do modelo ( $r < 0.0$  e  $BIAS > |100|$ ) foi observada especialmente para três situações. A primeira delas são as regiões em que o modelo hidrológico também apresentou baixa performance (Figura 2), caracterizadas por serem regiões com clima árido ou semiárido, regiões em que o derretimento de neve tem um papel importante para geração de escoamento e regiões influenciadas pela orografia (Siqueira et al., 2018). A segunda, rios com a presença de barramentos que influenciam o transporte de sedimentos, como os rios São Francisco, Jequitinhonha, Tocantins, Paraná, Salado, Madeira, Parnaíba e Doce (ver Figura 1 e Figura 2). A terceira é aquela em que os postos apresentam pequenas áreas de drenagem, principalmente para o *BIAS*.

## 5 - CONCLUSÃO

No presente trabalho foi realizado o acoplamento do modelo de sedimentos MGB-SED com o modelo hidrológico-hidrodinâmico da América do Sul (MGB SA) para simular processos de sedimentos em escala continental. O modelo foi capaz de realizar estimativas consideradas acuradas em diversos locais, o que foi avaliado com medições *in-situ*. A calibração dos parâmetros do modelo MGB-SED SA melhorou as estimativas dos fluxos de sedimentos.

## AGRADECIMENTOS

O primeiro e segundo autor agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelas bolsas concedidas a eles (processos nº 167867/2018-0 e 305636/2019-7).

## 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amsler, M. L., & Drago, E. C. (2009). A review of the suspended sediment budget at the confluence of the Paraná and Paraguay Rivers. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(22), 3230–3235. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Barbarossa, V., Schmitt, R. J. P., Huijbregts, M. A. J., Zarfl, C., King, H., & Schipper, A. M. (2020). Impacts of current and future large dams on the geographic range connectivity of freshwater fish worldwide. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(7), 3648–3655. <https://doi.org/10.1073/pnas.1912776117>
- Beck, H. E., van Dijk, A. I. J. M., de Roo, A., Dutra, E., Fink, G., Orth, R., & Schellekens, J. (2017). Global evaluation of runoff from 10 state-of-the-art hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 2881–2903.
- Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., & Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 6059–6086.
- Best, J. (2019). Anthropogenic stresses on the world's big rivers. *Nature Geoscience*, 12(1), 7–21. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0262-x>
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., et al. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Buarque, D. C. (2015). *Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias: estudo de caso do rio Madeira*. Tese

- (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Cohen, S., Kettner, A. J., Syvitski, J. P. M., & Fekete, B. M. (2013). WBMsed, a distributed global-scale riverine sediment flux model: Model description and validation. *Computers and Geosciences*, 53, 80–93. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.08.011>
- Collischonn, W., Allasia, D., Da Silva, B. C., & Tucci, C. E. M. (2007). The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), 878–895. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>
- Fagundes, H. de O., Fan, F. M., & Paiva, R. C. D. (2019). Automatic calibration of a large-scale sediment model using suspended sediment concentration, water quality, and remote sensing data. *Brazilian Journal of Water Resources*, 24, 1–18.
- Fan, F. M., Buarque, D. C., Pontes, P. R. M., & Collischonn, W. (2015). Um Mapa de Unidades de Resposta Hidrológica para a América do Sul. *XXI Simpósio Brasileiro e Recursos Hídricos*, 1–8.
- FAO/UNESCO. (1974). FAO/UNESCO Soil Map of the World | Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fluet-Chouinard, E., Lehner, B., Rebelo, L. M., Papa, F., & Hamilton, S. K. (2015). Development of a global inundation map at high spatial resolution from topographic downscaling of coarse-scale remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 158, 348–361.
- Guyot, J., Bourges, J., Calle, H., Cortes, J., Hoorelbecke, R., & Roche, M. (1989). Transport of suspended sediments to the Amazon by the Andean river: The River Mamore, Bolivia. In *Fourth International Symposium on River Sedimentation. ISRS, Beijing, China* (pp. 106–113).
- Kollat, J. B., Reed, P. M., & Wagener, T. (2012). When are multiobjective calibration trade-offs in hydrologic models meaningful? *Water Resources Research*, 48(3), 1–19. <https://doi.org/10.1029/2011WR011534>
- Latrubesse, E. M., Stevaux, J. C., & Sinha, R. (2005). Tropical rivers. *Geomorphology*, 70(3-4 SPEC. ISS.), 187–206.
- Lehner, B., Liermann, C. R., Revenga, C., Vörösmarty, C., Fekete, B., Crouzet, P., et al. (2011). High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. *Frontiers in Eco. and the Environment*, 9(9), 494–502.
- Mouyen, M., Longuevergne, L., Steer, P., Crave, A., Lemoine, J. M., Save, H., & Robin, C. (2018). Assessing modern river sediment discharge to the ocean using satellite gravimetry. *Nature Communications*, 9(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05921-y>
- Naipal, V., Reick, C., Pongratz, J., & Van Oost, K. (2015). Improving the global applicability of the RUSLE model - Adjustment of the topographical and rainfall erosivity factors. *Geoscientific Model Development*, 8, 2893–2913. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2893-2015>
- Nash, J. E.; Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I—a Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 282–290.
- New, M., Lister, D., Hulme, M., & Makin, I. (2002). A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Research*, 21, 1–25.
- O’Loughlin, F. E., Paiva, R. C. D., Durand, M., Alsdorf, D. E., & Bates, P. D. (2016). A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. *Remote Sensing of Environment*, 182, 49–59.
- Oliveira, P. T. S., Nearing, M. A., & Wendland, E. (2015). Orders of magnitude increase in soil erosion associated with land use change from native to cultivated vegetation in a Brazilian savannah environment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(11), 1524–1532.
- Pelletier, J. D. (2012). A spatially distributed model for the long-term suspended sediment discharge and delivery ratio of drainage basins. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(2), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2011JF002129>
- Phinzi, K., & Ngetar, N. S. (2019). The assessment of water-borne erosion at catchment level using GIS-based RUSLE and remote sensing: A review. *International Soil and Water Conservation Research*. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.12.002>
- Pontes, P. R. M., Fan, F. M., Fleischmann, A. S., Paiva, R. C. D., Buarque, D. C., Siqueira, V. A., et al. (2017). MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. *Environmental Modelling and Software*, 94, 1–20.
- Restrepo, J. D., Kjerfve, B., Hermelin, M., & Restrepo, J. C. (2006). Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: The Magdalena River, Colombia. *Journal of Hydrology*, 316, 213–232. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.05.002>
- Siqueira, V. A., Paiva, R. C. D., Fleischmann, A. S., Fan, F. M., Anderson, L., Pontes, P. R. M., et al. (2018). Toward continental hydrologic – hydrodynamic modeling in South America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 4815–4842.
- Syvitski, J. P.M., Vörösmarty, C. J., Kettner, A. J., & Green, P. (2005). Impact of Humans on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Coastal Ocean. *Science*, 308(5720), 376–380.
- Syvitski, James P.M., Cohen, S., Kettner, A. J., & Brakenridge, G. R. (2014). How important and different are tropical rivers? - An overview. *Geomorphology*, 227, 5–17. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.029>
- Williams, J. R. (1975). Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources, ARS S-40*. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Williams, J. R. (1975). SEDIMENT ROUTING FOR AGRICULTURAL WATERSHEDS’. *Water Resources Bulletin*, 11(5).
- Williams, J. R. (1995). The EPIC model. In *Computer models of watershed hydrology*. (pp. 909–1000).
- Wuepper, D., Borrelli, P., & Finger, R. (2019). Countries and the global rate of soil erosion. *Nature Sustainability*, 1–5.
- Yapo, P. O., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (1998). Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 204(1–4), 83–97.