

## FLUXOS DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO SIMULADOS NA AMÉRICA DO SUL - PARTE 2: ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL

*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** – Erosion and sediment transport models are useful tools to improve the comprehension of sediment-related processes. Using the MGB-SED SA model presented in part 1 of this work, we performed a temporal and spatial analysis of suspended sediment fluxes over South America. We use maps and graphics to show the results of the model simulation. It was estimated using MGB-SED SA that South America naturally (without impoundments) daily delivery to the oceans  $3.10 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup> of water and 2.76 Mt of suspended sediment. The results showed the importance of model calibration at the continental scale and the use of a hydrodynamic routing method, in which both improve model estimates. Floodplains play a essential role trapping sediments and smoothing out the peaks of suspended sediment discharges. The Amazon, Magdalena and La Plata have the highest annual sediment transport and deposition rates.

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

### 1 - INTRODUÇÃO

Modelos de erosão e transporte de sedimentos são ferramentas que permitem representar processos físicos com formulações matemáticas e assim representar os fenômenos que ocorrem na natureza. Na parte 1 desse trabalho, foi apresentado o modelo de sedimentos da América do Sul MGB-SED SA, semi distribuído e com passo de tempo diário. Esse modelo foi calibrado e validado se mostrando capaz de representar os fluxos de sedimentos na escala continental.

Por ser uma região que transporta elevadas cargas de sedimentos (Syvitski et al., 2014), a América do Sul (AS) se torna um objeto de pesquisa importante. De acordo com Borrelli et al. (2017) as taxas de erosão na AS se apresentaram elevadas (>10 t/ha.ano) em 2012 e aumentaram com relação ao ano de 2001.

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

Apesar de muitos estudos já realizados na AS, ainda existem diversas lacunas que não foram preenchidas, tais como: porque as planícies na AS são importantes? Porque considerar a hidrodinâmica fluvial nos estudos de sedimentos? Como se dá os padrões espaço-temporais dos sedimentos em suspensão na AS? O objetivo desse trabalho é, portanto, fornecer primeiras respostas para essas perguntas baseadas em modelagem em grande escala.

## 2 - METODOLOGIA

Um estudo dos padrões das descargas de sedimentos em suspensão foi conduzido usando séries temporais, a partir do modelo calibrado. Para essas mesmas séries, calculou-se as QSS simuladas com os métodos de propagação inercial (com planície) e Muskingun-Cunge (sem planície) para avaliar o impacto da propagação hidrodinâmica, e da representação das planícies de inundação no transporte e deposição dos sedimentos no continente. Para compreender a dinâmica espacial dos fluxos de sedimentos na AS foram calculadas médias de longo período, apresentadas na forma de mapas.

Foi avaliado o impacto global da calibração e da propagação hidrodinâmica (inercial) nas estimativas das cargas de sedimentos em suspensão que chegam aos Oceanos. Para isso nós comparamos as cargas estimadas a partir de uma simulação com propagação hidrodinâmica sem calibração (isto é, atribuindo os valores 11,8 e 0,56 para os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , respectivamente) versus uma simulação com as cargas estimadas com os métodos inercial e Muskingun-Cunge usando a versão calibrada do modelo.

## 3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 - Séries temporais

A Figura 1 apresenta a comparação entre os valores diários simulados e os dados observados de QSS para alguns grandes rios da América do Sul. As métricas apresentadas foram calculadas considerando apenas os valores nas datas das observações.

A estação Apavi, no rio Magdalena (Figura 1-1), apresenta muitos dados observados e, no geral, houve concordância entre os dados simulados e observados ( $BIAS=-14\%$ ). Na bacia Amazônica o modelo simulou de forma adequada os sedimentos, o que pode ser visto nas estações Óbidos (Figura 7-2) e Altamira (Figura 7-3), com essa última apresentando um  $BIAS=0\%$ .

O impacto da hidrodinâmica fluvial no transporte de sedimentos pode ser observado na estação de Óbidos, em que se observa a influência das planícies de inundação no armazenamento de sedimentos e, conseqüente, uma redução dos picos de QSS ( $QSS\ MC > QSS\ IN$ ).

Na estação Propriá o *BIAS* foi de 1.087% e se observa que os valores observados de QSS são sempre muito baixos (Figura 7-3). Nesse caso, esses valores observados baixos estão associados com a retenção de sedimentos em grandes reservatórios a montante da estação. Destacar esse fenômeno é importante, pois nesses casos a dinâmica temporal observada se mostra inconsistente com a descarga natural de sedimentos nos rios simulada pelo modelo.

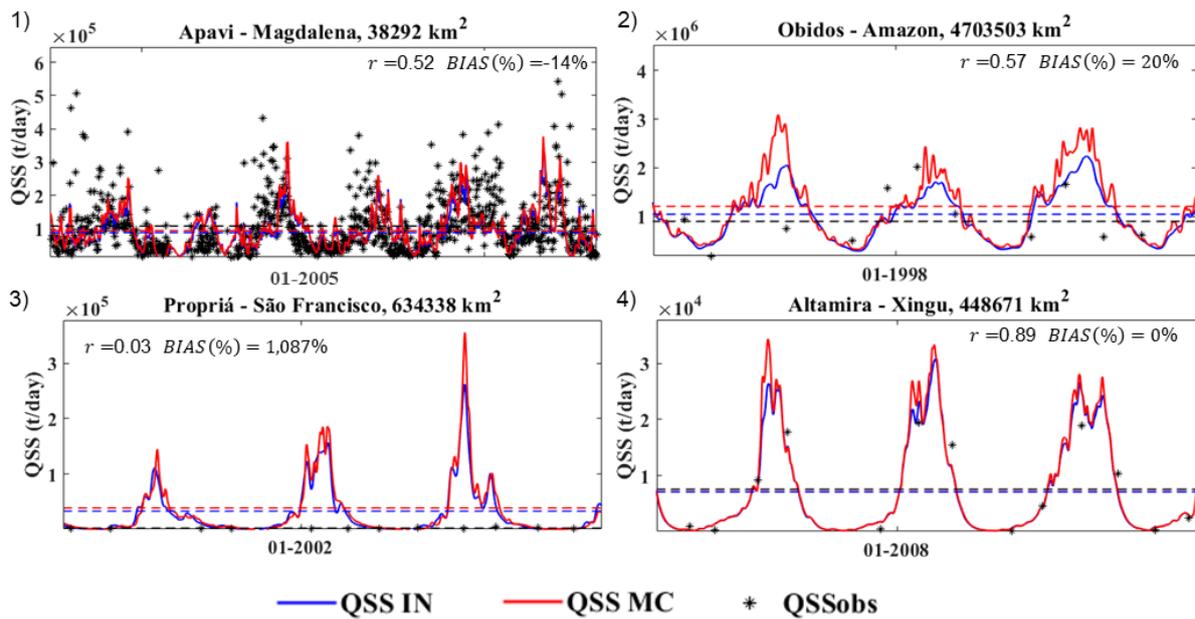


Figura 1 - Comparação entre dados observados (QSSObs – asteriscos pretos) e descarga de sedimentos em suspensão simulada (QSS) para alguns grandes rios da América do Sul. A performance do modelo é apresentada em termos de correlação ( $r$ ) e *BIAS* (%) para a modelagem com propagação inercial. Séries temporais diárias simuladas são apresentadas para os métodos de propagação inercial (QSS IN – linhas azuis) e Muskingum-Cunge (QSS MC – linhas vermelhas). As linhas tracejadas apresentam as respectivas médias de longo período.

### 3.2 - Análises espaciais

Na Figura 2-a se apresenta o valor anual médio de longo período da variável calibrada QSS (t/ano). A partir dos resultados simulados, o rio Amazonas é aquele com maior QSS ( $3,89 \times 10^8$  t/ano), seguido dos rios Magdalena ( $7,57 \times 10^7$  t/ano) e La Plata ( $5,07 \times 10^7$  t/ano). O Magdalena transporta uma carga seis e dez vezes maior que aquelas transportadas pelos rios São Francisco ( $1,20 \times 10^7$  t/ano) e Tocantins ( $7,29 \times 10^7$  t/ano), que possuem o dobro de sua área de drenagem. As vazões médias dos rios São Francisco e Tocantins são 56% menor e 88% maior, respectivamente, que a do rio Magdalena. O rio Doce transporta uma carga em suspensão de  $4,81 \times 10^6$  t/ano, equivalente a 40% da carga transportada pelo rio Tocantins, mesmo possuindo uma área de drenagem (vazão) dez (quatorze) vezes menor. Menciona-se ainda que a Figura 2-a representa uma situação potencial do transporte nos rios, visto que não foi considerado a retenção de sedimentos nos reservatórios.

Rios como o São Francisco e Paraná, por exemplo, atualmente apresentam águas mais transparentes a jusante dos barramentos.

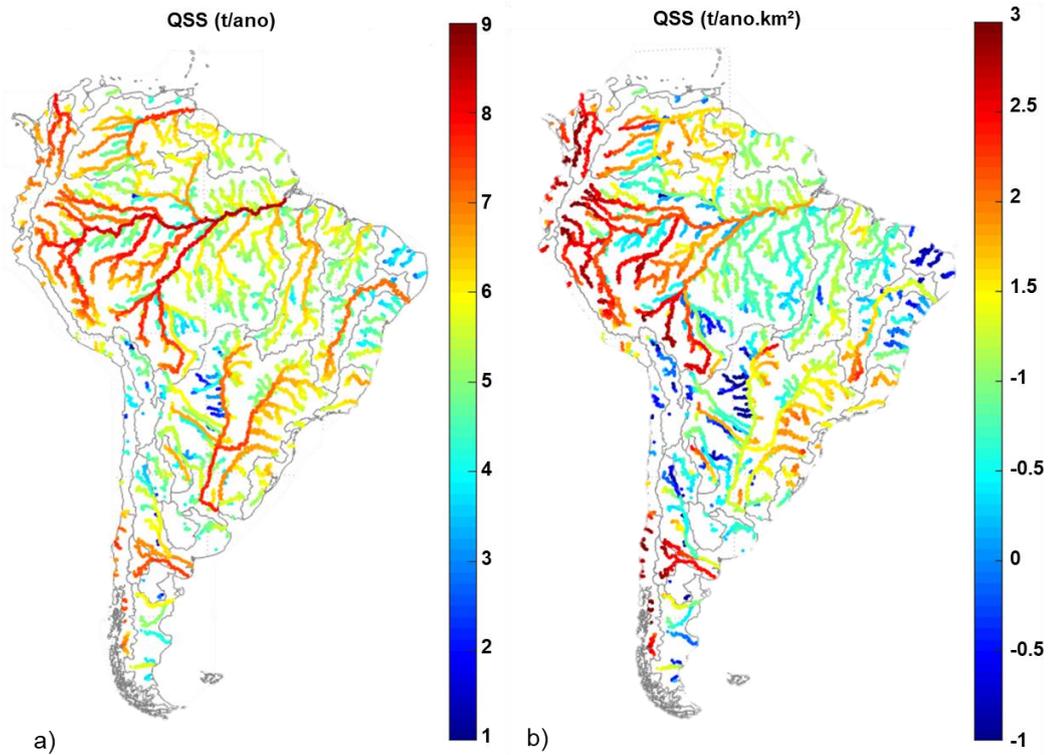


Figura 2 - Média anual da a) descarga de sedimentos em suspensão (QSS) na América do Sul; b) QSS específica. Valores das barras de cores estão em escalas logarítmicas.

A Figura 2-b permite visualizar de forma mais clara quais são as regiões em que ocorrem os maiores aportes de sedimentos para os rios. Se destacam as regiões próximas aos Andes e a região sudesta da América do Sul com aquelas com as maiores valores de QSS ( $t/ano.km^2$ ). As regiões com menores valores na Figura 2-b são observadas nas regiões mais planas, como alguns afluentes do alto Madeira e a parte noroeste da bacia La Plata; e também as regiões com clima árido (deserto do Atacama) ou semiárido (nordeste brasileiro).

A Figura 3 mostra os rios da AS com maiores valores de Q e concentração de sedimentos em suspensão (CSS) segundo os resultados da modelagem. A figura mostra que as maiores concentrações na bacia do rio Amazonas estão localizadas nas cabeceiras do rio Madeira, e os demais que tem suas cabeceiras nos Andes, como já conhecido por trabalhos anteriores (Amsler e Drago, 2009; Cohen et al., 2014; Latrubesse et al., 2005). O padrão encontrado dos trechos de rio com maiores e menores concentrações na Amazônia central se ajustam bem aos resultados encontrados por Fassoni-Andrade e Paiva (2019) utilizando observações por sensoriamento remoto.

Outros rios que se apresentam com concentrações elevadas são o Magdalena, Pilcomayo, e os rios mais ao sul da América do Sul (Negro e Desaguadero), mas esses últimos não tinham estações

para que as informações fossem validadas e nem quantificado o erro das estimativas. Os rios amazônicos que não drenam as porções Andinas apresentam baixas concentrações, como o rio Negro, Tapajós e Xingu (Figura 3), e apresentam elevadas vazões ( $>9.700 \text{ m}^3/\text{s}$  na média, ver Latrubesse et al., 2005).

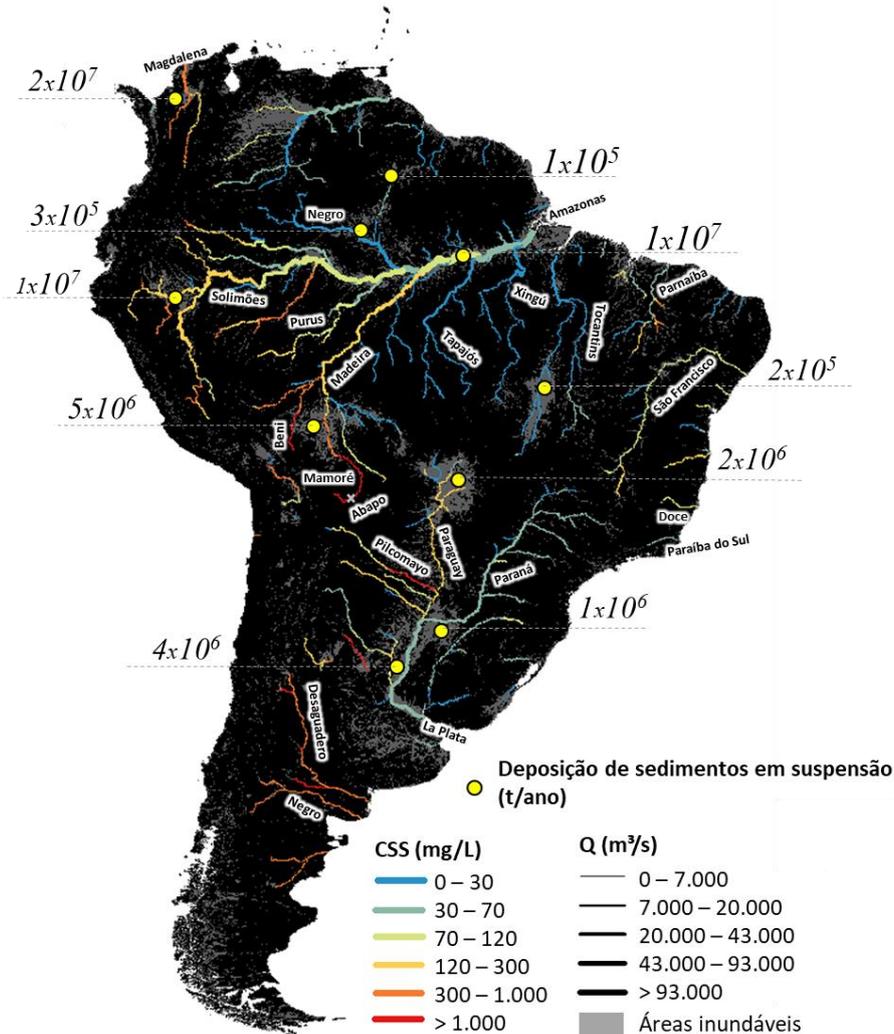


Figura 3 - média anual da carga de sedimentos em suspensão depositada nas principais planícies de inundação da América do sul; e média diária de longo período da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e vazão (Q) para os grandes rios. As áreas inundadas foram obtidas de Fluet-Chouinard et al. (2015).

Estimou-se que  $1,17 \times 10^9$  t/ano de sedimentos em suspensão (SS) chegam aos rios em condições naturais (ou seja, sem barramentos). Desses, cerca de  $1,11 \times 10^8$  t/ano (9,4%) ficam retidos nas planícies de inundação antes de chegar aos Oceanos. O efeito da deposição de SS nas planícies é bastante evidente nas partes altas do rio Madeira (Figura 3), ocasionando uma forte redução nos valores de SSC de montante para jusante. A avaliação nas grandes áreas inundadas (Figura 3) mostrou que 53% ( $5,26 \times 10^7$  t/ano) dos SS ficam depositados nelas. As três planícies com maiores

quantidades de SS depositados são: delta do rio Magdalena ( $2 \times 10^7$  t/ano), Amazônia Central ( $1 \times 10^7$  t/ano) e wetlands interfluviais do Peru ( $1 \times 10^7$  t/ano).

### 3.3 - Balanço anual de sedimentos

O impacto da calibração do modelo (apresentado na parte 1 desse trabalho) e da propagação hidrodinâmica na América do Sul também foi avaliado por meio das cargas em suspensão que deixam o continente. Quando se utilizou o modelo hidrodinâmico sem calibração, o valor da QSS que chega aos oceanos foi de  $2,86 \times 10^9$  t/ano. Após a calibração, esse valor foi de  $1,00 \times 10^9$  t/ano, o que significa que o MGB-SED SA calibrado estimou valores 65% menores. Ao considerar a calibração e utilizar o método de propagação Muskingum-Cunge o valor aumentou em 12% ( $1,12 \times 10^9$  t/ano). Syvitski et al. (2005) estimaram que a QSS da AS antes da ocupação humana é, na média, de  $2,68 \times 10^9$  t/ano, valor 268% maior que o estimado com o MGB-SED SA calibrado e 6% menor que o modelo sem calibração. Em seu estudo global sobre rios tropicais, Syvitski et al. (2014) destacaram que a maioria dos trabalhos com modelagem usam condições de contorno que não consideram a deposição dos sedimentos nos deltas juntos aos oceanos, o que poderia reduzir o valor dos SS que efetivamente deixam a parte continental. Nesse trabalho, nós representamos parcialmente esse efeito, uma vez que o modelo não considera bacias litorâneas e ilhas com  $A < 1.000 \text{ km}^2$  nem regiões costeiras submersas.

Estimou-se com o MGB-SED SA que a AS naturalmente (sem considerar barramentos) transportaria em média para os oceanos  $3,10 \times 10^{10} \text{ m}^3$  de água e  $2,76 \times 10^6$  t de SS diariamente. Desse total, 57% do volume de água e 39% do volume de sedimentos em suspensão vem da bacia Amazônica.

A Figura 4 apresenta um balanço mensal estimado pela modelagem de sedimentos e descarga líquida para a América do Sul e diversos dos seus principais rios. Nota-se que ao longo do ano os valores de QSS na AS variam entre  $40\text{-}60 \times 10^6$  t/dia, com maiores valores ocorrendo entre fevereiro e julho (Figura 4-a). Já a deposição de SS nas planícies tem maiores valores entre os meses de janeiro e junho. No rio Amazonas, o pico do aporte de sedimentos acontece em Março, junto com o pico da deposição nas planícies, mas o pico da QSS só ocorre em Abril (Figura 4-b). A dinâmica do rio Amazonas é influenciada principalmente pelos aportes que recebe de cada rio, que se relaciona com o a alternância dos períodos chuvosos no sul e no norte da bacia (Villar et al., 2008).

O rio Magdalena apresenta dois picos de Q e dois de QSS (Figura 11-c), estando os primeiros picos deslocados em cerca de 2 meses (maio-julho) e os últimos em cerca de 1 mês (novembro-dezembro). Os picos da deposição de SS nas planícies ocorrem em junho, entre os primeiros picos de QSS e Q, e em novembro, concomitantemente com os picos da Q e QSS. Isso indica que em novembro a inundação nas planícies do rio Magdalena são mais intensas.

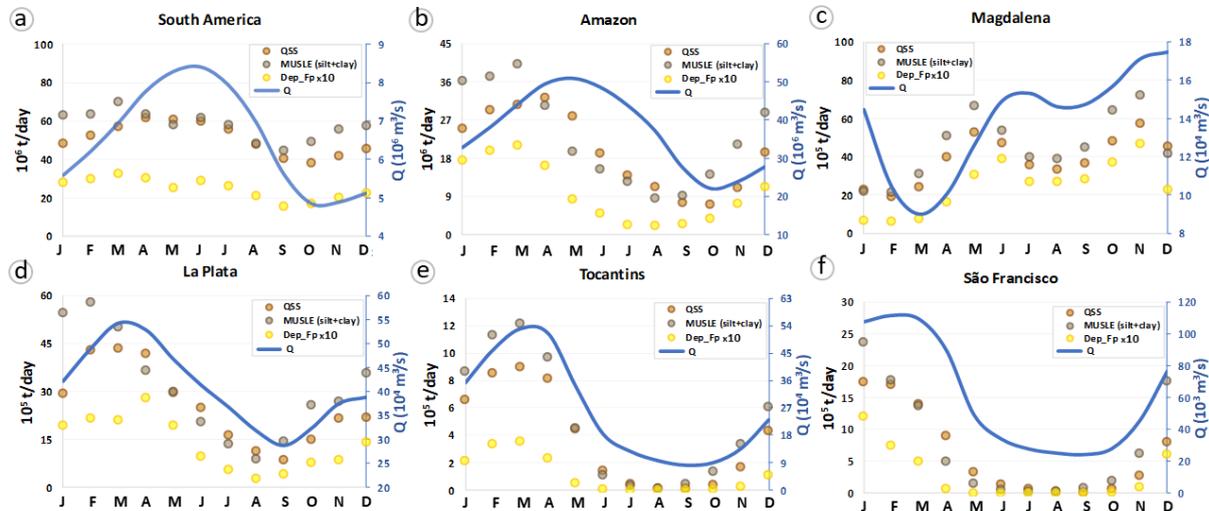


Figura 4 - Balanço anual de sedimentos da América do Sul e de alguns grandes rios. As figuras a-f mostram a vazão (Q) em linhas azuis, a carga de sedimentos em suspensão estimada com a equação MUSLE em círculos cinzas, a descarga de sedimentos em suspensão (QSS) em círculos marrons e os sedimentos em suspensão depositados nas planícies de inundação (Dep\_fp) em círculos amarelos. Os valores de Dep\_fp são uma ordem de grandeza menor que os demais valores de sedimentos, assim, nós multiplicamos esses valores em dez vezes para apresentar na figura.

## 4 - CONCLUSÃO

A partir das análises das séries temporais e das análises espaciais a partir dos resultados do modelo MGB-SED SA, as principais conclusões obtidas foram:

- A utilização do método de propagação hidrodinâmica permitiu melhores estimativas dos sedimentos em suspensão, especialmente os picos de QSS simulados em locais com planícies de inundação. Ao utilizar o método de propagação simplificado e sem planícies, as estimativas das cargas anuais aumentaram em 12%.
- Os rios Amazonas ( $3.89 \times 10^8$  t/ano), Magdalena ( $7.57 \times 10^7$  t/ano) e La Plata ( $5.07 \times 10^7$  t/ano) foram aqueles que apresentaram as maiores produções de sedimentos em suspensão.
- As planícies de inundação exercem um papel importante retendo cerca de 9.4% ( $1.11 \times 10^8$  t/ano) dos sedimentos em suspensão que chegam aos rios. Cerca de 53% do total depositado ocorrem nas grandes áreas alagadas, com as planícies do delta do rio Magdalena river delta ( $2 \times 10^7$  t/ano), da Amazônia central ( $1 \times 10^7$  t/ano) e as planícies interfluviais do Peru ( $1 \times 10^7$  t/ano) representando as três regiões com maiores taxas de deposição.
- O aumento da Q nem sempre resulta em aumento da SSC/QSS. Especialmente em rios com grandes planícies de inundação, os picos da Q e da SSC/QSS podem acontecer com até meses de diferença.

É importante ressaltar que todos os resultados foram obtidos sem a consideração da existência dos reservatórios nos rios da América do Sul. Além disso os resultados possuem as limitações relacionadas com as simplificações e incertezas do modelo (apresentadas na Parte 1), e não devem ser tratados como valores absolutos finais para os rios analisados. Trabalhos futuros e melhorias contínuas nesta linha de pesquisa visarão diminuir estes erros e incertezas.

## 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).

## 5 - 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>
- 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>
- Cohen, S., Kettner, A. J., & Syvitski, J. P. M. (2014). Global suspended sediment and water discharge dynamics between 1960 and 2010: Continental trends and intra-basin sensitivity. *Global and Planetary Change*, 115, 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.01.011>
- Fassoni-Andrade, A. C., & Paiva, R. C. D. de. (2019). Mapping spatial-temporal sediment dynamics of river-floodplains in the Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 221(March 2018), 94–107. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.10.038>
- Latrubesse, E. M., Stevaux, J. C., & Sinha, R. (2005). Tropical rivers. *Geomorphology*, 70(3-4 SPEC. ISS.), 187–206. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.02.005>
- 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>
- Villar, J. C. E., Ronchail, J., Guyot, J. L., Cochonneau, G., Filizola, N., Lavado, W., et al. (2008). Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 2009, 1574–1594. <https://doi.org/10.1002/joc>