

## MODELAGEM DA PRODUÇÃO E DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DA BACIA DO RIO MADEIRA

*Diogo Buarque<sup>1\*</sup>, Walter Collischonn<sup>1</sup>, Rodrigo C. D. Paiva<sup>1,2</sup>, Carlos E.M. Tucci<sup>1</sup>, Jean Loup Guyot<sup>3,4</sup>*

**Resumo** – Apresenta-se um modelo para estimar a produção e do transporte de sedimentos em grandes escalas. O modelo está acoplado ao modelo hidrológico/hidrodinâmico MGB-IPH. Utiliza-se SIG e adota-se uma discretização em minibacias e o conceito de Unidades de Respostas Hidrológicas. A MUSLE é utilizada para estimar a perda de solo em cada minibacia. Utiliza-se um modelo hidrodinâmico 1D para propagar vazão nos rios e as equações de advecção e da continuidade de sedimentos para transportar sedimentos. Parâmetros do modelo são extraídos do SRTM/DEM ou adotados da literatura. Aplica-se o modelo à bacia do rio Madeira ( $\sim 1.4 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ ) que possui a maior taxa de erosão da bacia do rio Amazonas, contribuindo com quase metade da sua descarga sólida. As descargas de sedimentos em suspensão concordam com dados observados. Observa-se que o rio Madeira recebe um grande volume de sedimentos das regiões Andinas da Bolívia e do Peru, com  $\sim 22\%$  dos sedimentos em suspensão transportados pelo rio Mamoré e  $\sim 78\%$  pelo Beni. Apesar dos bons resultados do modelo, há dificuldade para validá-lo devido à escassez de dados nas grandes escalas, principalmente de cargas de fundo. Maiores esforços serão ainda necessários para considerar os efeitos da troca de sedimentos rio-planície.

**Palavras-Chave** – modelagem de sedimentos, bacia do rio Madeira, SIG.

## MODELLING OF PRODUCTION AND SEDIMENT TRANSPORT ON THE MADEIRA RIVER BASIN

**Abstract** – It is presented a model to predict the basin sediment yield and river sediment transport for large scales. Model has been coupled to the large scale hydrodynamic/hydrological model MGB-IPH. It is used GIS and adopted a catchment discretization and the Hydrological Response Units approach. The MUSLE is used to predict soil loss from each catchment. It uses a 1D hydrodynamic model for river flow routing and the advection and the sediment continuity equations for suspended and bed-load sediment transport. Model parameters are extracted from SRTM/DEM or assigned based on literature. Model has been applied on the Madeira River basin ( $\sim 1.4 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ ), which has the highest erosion rates in the Amazon River basin, contributing with nearly half of its sediment discharge. Simulated suspended sediment discharge agree with observed data. It is observed that Madeira river receives a large amount of sediment from Andean regions of Bolivia and Peru, with  $\sim 22\%$  of suspended sediment transported by Mamoré and  $\sim 78\%$  by Beni rivers. Despite model results are good, difficulties were found to validate it due the scarcity of data at large scales, mainly for bed-load. Further effort is also needed to consider the effects of river-floodplain sediment exchanges.

**Keywords** – sediment modelling, Madeira river basin, GIS.

<sup>1</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/Brasil.

<sup>2</sup> Université Toulouse III Paul Sabatier, OMP, Geosciences Environnement Toulouse (UMR 5563 CNRS IRD UPS), Toulouse/France.

<sup>3</sup> UMR GET (CNRS-IRD-Université de Toulouse 3).

<sup>4</sup> Observatoire HYBAM (SOERE RBV).

\* diogo.buarque@gmail.com

## INTRODUÇÃO

Compreender a dinâmica de sedimentos de uma bacia hidrográfica tem grande importância nas análises, por exemplo, de alterações de uso da terra, da pressão antrópica sobre o desenvolvimento econômico e dos impactos das mudanças climáticas. Neste sentido, modelos matemáticos podem ser utilizados como ferramentas para estimar a erosão e o transporte de sedimentos em diferentes condições, ou cenários, especialmente em locais com limitação de dados, como é o caso geralmente observado em grandes bacias. Em grandes bacias, a variabilidade da topografia, dos tipos de solos, do uso da terra e, conseqüentemente, dos processos hidrológicos interagem de tal forma que necessitam ser avaliados de forma integrada. Para avaliar essa dinâmica, são necessários modelos distribuídos ou semi-distribuídos que consideram não só essa variabilidade como também a limitação de dados. Além disso, considerando que a hidrologia seja, talvez, a chave para a compreensão da erosão do solo, um modelo matemático que integre um módulo hidrológico ao módulo de sedimentos constitui uma ferramenta mais robusta para investigar espacialmente a erosão e o transporte de sedimentos.

Atualmente diversos modelos que integram módulos hidrológicos e de sedimentos estão disponíveis, como o DREAM (Ramsankaran *et al.*, 2013), WEPP (Nearing *et al.* 1989), LISEM (De Roo *et al.* 1996), SHESED (Wicks e Bathrust, 1996) SWAT (Arnold *et al.*, 1998), SWAT-G (Eckhardt *et al.*, 2002), SWIM (Krysanova *et al.*, 1996), SedNET (Prosser *et al.*, 2001), WASA-SED (Mueller *et al.*, 2010) e LASCAM (Sivapalan *et al.*, 1996; Viney e Sivapalan, 1999), mas a sua maioria é limitada à pequenas bacias ou escalas de campo e/ou necessitam de uma grande quantidade de dados de entrada (ex: WEPP, LISEM, SHESED, SWAT), a qual raramente está disponível em grandes bacias. Daqueles existentes para aplicação em grandes escalas, a maioria é capaz de estimar a produção de sedimentos na bacia e o seu transporte ao longo da rede de drenagem com passo de tempo diário, mensal ou anual e, geralmente, utilizam Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para distribuir suas informações de entrada e de saída sobre a bacia (ex: SWAT, WASA-SED). Entretanto, simplificações geralmente são adotadas em alguns componente do modelo, principalmente relacionadas à propagação das vazões e dos sedimentos ao longo dos rios, impedem a representação de efeitos hidrodinâmicos que ocorrem em grandes bacias, tais como efeitos de remanso e das planícies de inundações no retardo e no amortecimento dos hidrogramas, os quais controlam o regime de vazões e a dinâmica de sedimentos. O modelo hidrológico/hidrodinâmico MGB-IPH (Collischonn *et al.*, 2007) possui um grande potencial para ser utilizado acoplado à um modelo para estimativa da produção e do transporte de sedimentos em grandes bacias.

Neste trabalho apresenta-se, então, os resultados preliminares da aplicação de um modelo simplificado para estimar a distribuição espacial e temporal da produção e do transporte de sedimentos, o qual foi incorporado ao modelo hidrológico/hidráulico MGB-IPH. O modelo é aplicado na bacia do rio Madeira, um dos maiores afluentes do rio Amazônia e que corresponde a quase metade da carga de sedimentos em suspensão transporta pelo rio Amazonas para o Oceano. Buscou-se representar a produção e a dinâmica de sedimentos em suspensão na bacia, identificando as principais fontes, com comparações dos resultados com dados observados.

## MÉTODOS

### Modelo hidrológico-hidrodinâmico MGB-IPH

O modelo MGB-IPH (Collischonn *et al.*, 2007) é um modelo hidrológico baseado em processos, desenvolvido especificamente para aplicação em grandes escalas ( $> 10^4$  km<sup>2</sup>). A bacia é dividida em minibacias e trechos de rio, utilizando-se também a abordagem de unidades de respostas hidrológicas (HRUs), dentro das quais os são simulados processos hidrológicos verticais.

O escoamento na rede de rios é simulado com o modelo *Muskingum Cunge* (MC) ou com um modelo hidrodinâmico 1 D (HD) desenvolvido para o MGB-IPH por Paiva *et al.* (2011). Este modelo HD para grandes escalas diferencia-se do MC pela sua capacidade de representar a inundação nas várzeas e os efeitos de remanso. Algoritmos de geoprocessamento são utilizados para extrair parâmetros relacionados à geometria dos rios e às várzeas de inundação a partir, principalmente, de modelos digitais de elevação (DEM). Maiores detalhes deste modelo podem ser obtidos em Collischonn *et al.*, 2007 e Paiva *et al.* (2011).

### Modelo de produção e transporte de sedimentos

O modelo desenvolvido possui duas componentes principais: 1) estimativa da produção de sedimentos na bacia e aporte de sedimentos para a rede de drenagem; 2) transporte de sedimentos ao longo dos trechos de rio. Assim o MGB-IPH, este o modelo utiliza algoritmos com base em SIG para extração de parâmetros a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE). O passo de tempo do modelo é o diário e os módulos trabalham de forma desacoplada, ou seja, as condições hidrológicas e hidráulicas são calculadas em cada passo de tempo pelo módulo hidrológico e seus resultados utilizados para as estimativas da produção de sedimentos e o transporte ao longo da drenagem.

Utilizando a discretização em minibacias, a produção de sedimentos em cada HRU é estimada em passo de tempo diário utilizando a Equação Universal de Perda de Solo Modificada - MUSLE (Williams, 1975):

$$SED = 11,8 \cdot (Q_{sup} \cdot qp \cdot A)^{0,56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \quad (1)$$

onde *SED* [ton] é a carga de sedimento da erosão do solo; *Qsup* [mm.ha<sup>-1</sup>] é o volume de escoamento superficial por unidade de área; *qp* [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>] é a taxa de pico do escoamento superficial; *A* [ha] é a área da URH; *K* [0,013.t.m<sup>2</sup>.h.(m<sup>3</sup>.t.cm)<sup>-1</sup>] é o fator de erodibilidade do solo; *C* [-] é o fator de manejo e cobertura do solo; *P* [-] é o fator de práticas conservacionistas; e *LS* [-] é o fator topográfico. Exceto para o fator *LS*, os valores de todos os demais parâmetros da MUSLE devem ser fornecidos ao modelo. Porém, o fator de erodibilidade *K* pode ser estimado pelo modelo utilizando a mesma equação adotado no modelo SWAT (Arnold *et al.*, 1998).

Os efeitos da topografia sobre a erosão do solo são considerados implicitamente com a utilização do fator *LS* bi-dimensional desenvolvido por (Desmet and Govers, 1996), o qual utiliza a abordagem de "área de contribuição" e uma declividade local (*S*). Este fator é estimado para cada pixel do MDE utilizando uma rotina computacional específica, com base em SIG.

O total de sedimentos produzido na minibacia é separado em três classes de partícula (areia, silte e argila) definidas de acordo com o percentual delas na textura do solo. O volume de sedimentos que deixa a minibacia e chega ao seu trecho de rio é calculado utilizando reservatórios lineares. Uma vez na rede de drenagem, os volumes correspondentes às partículas de silte e argila são transportados em suspensão utilizando uma equação de advecção (equação 2), enquanto que o volume correspondente às partículas de areia são propagados como cargas de fundo utilizando a equação da continuidade de sedimentos (equação 3).

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial AUC}{\partial x} = ql \quad (2)$$

$$(1 - \lambda) \frac{\partial A_b}{\partial t} + \frac{\partial QS}{\partial x} - ql = 0 \quad (3)$$

onde *A* [m<sup>2</sup>] é a área da seção molhada; *C* [t.m<sup>-3</sup>] é a concentração média de sedimentos na seção; *U* [m.s<sup>-1</sup>] é a velocidade média do escoamento; *x* [m] é a distância na direção do escoamento; *t* [s] é o tempo; *ql* [t.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>] é a contribuição lateral de sedimentos proveniente da minibacia; *A<sub>b</sub>* [m<sup>2</sup>] é a

seção transversal do volume de sedimentos no fundo (erodido ou depositado);  $QS$  [t/s] é a descarga sólida de sedimentos de fundo; e  $\lambda$  é a porosidade.

A equação de Capacidade de Transporte de (Yang, 1984) é utilizada para resolver a equação da continuidade e estimar a quantidade de erosão e deposição de areia. O modelo considera que todo o volume de silte e argila é transportado em suspensão e, portanto, não há erosão ou deposição destas classes de partículas.

### Área de estudo e base de dados

O modelo foi aplicado na bacia do rio Madeira (Fig. 1). A bacia possui uma área de drenagem de, aproximadamente,  $1,4 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup>, da qual 51% pertence à Bolívia, 7% ao Peru e o restante (42%) ao Brasil. O rio Madeira recebe este nome após a confluência dos rios Beni e Mamoré, sendo responsável por quase 35% ( $\sim 240 \cdot 10^6$  ton/ano) de toda a carga de sedimentos transportada pelo rio Amazonas ao Oceano, dos quais a sua maior parte vem das áreas Andinas da bacia.

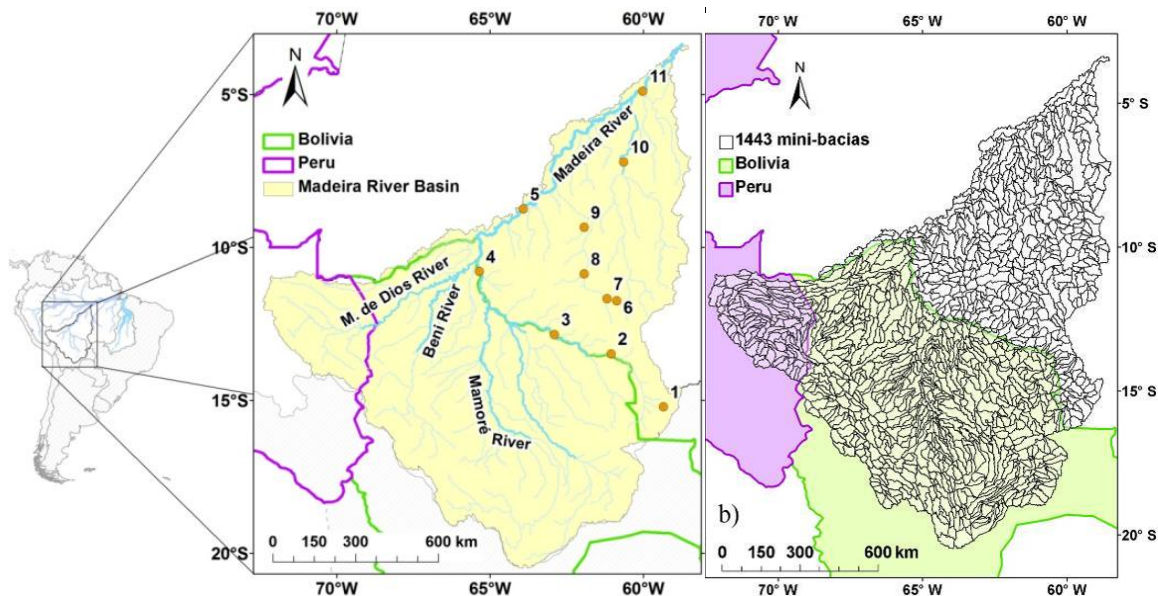


Figura 1 - (a) Bacia do rio Madeira, seus principais tributários e 11 locais de monitoramento com estimativa da carga média anual de sedimentos em suspensão por Filizola and Guyot (2009). (b) Discretização da bacia.

A discretização da bacia em 1443 trechos de rio e minibacias, bem como as seções transversais para o modelo hidrodinâmico e a estimativa de parâmetros topográficos, foram realizadas a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) do SRTM (Farr *et al.*, 2007) com resolução espacial de  $\sim 500$  m. Dados meteorológicos de reanálise foram obtidos do NCEP do EUA (Kalnay *et al.*, 1996). Utilizou-se estimativas diárias de precipitação por satélite do produto TRMM 3B42 (Huffman *et al.*, 2007), com resolução espacial de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  no período de 1998 a 2005. Foi adotado o mapa de cobertura vegetal, ou mapa de uso do solo, desenvolvido por Eva *et al.* (2002), com resolução espacial de 1km. Informações de tipos de solos do RADAM Brasil foram utilizadas na porção brasileira da bacia, enquanto na parte estrangeira foi utilizado o mapa de solos da FAO, na escala 1:5.000.000.

As vazões simuladas foram comparadas com dados diários de 25 estações fluviométricas da Agência Nacional das Águas (ANA). Os parâmetros do modelo relacionados ao balanço hídrico foram calibrados baseados nestes dados de vazão seguindo os métodos de Collischonn *et al.* (2007). As concentrações e cargas médias anuais de sedimentos foram comparadas com dados da concentração de sedimentos na superfície d'água obtidos a cada 10 dias pelo programa HYBAM do

IRD (Institut de Recherche pour le Développement) (<http://www.ore-hybam.org>) e estimativas realizadas por Filizola e Guyot (2009).

## RESULTADOS

O modelo foi aplicado no período de 1998 a 2005 utilizando o método hidrodinâmico de propagação de vazões, o qual considera os efeitos de remanso e das planícies de inundação sobre o escoamento. Entretanto, os resultados apresentados aqui não consideram a troca de sedimentos entre rio e planícies, o que será considerado em etapas futuras deste trabalho. Os parâmetros da MUSLE foram definidos considerando o mapa de HRU, produzido com a combinação dos mapas e uso e tipos de solo. Os valores do parâmetro K foram estimados com base no percentual de silte, argila e carbono orgânico de cada tipo de solo. O fator C foi definido de acordo com o uso da terra baseado em valores adotados em outros estudos: florestas ( $C=0.02$ ); agricultura ( $C=0.16$ ); cerrado ( $C=0.1$ ); vegetação de baixo porte ( $C=0.05$ ); cerrado/agricultura ( $C=0.08$ ). O valor de P foi adotado igual a 1, visto que não há informação de práticas de conservação do solo na bacia e considerando que, na escala de aplicação do modelo, tais práticas não seriam relevantes.

### Produção de sedimentos na bacia

Na Figura 2 é apresentada a variabilidade espacial da carga média mensal específica de sedimentos ( $\text{ton/mês/km}^2$ ) gerada em cada minibacia e lançada à rede de drenagem. Observa-se que o pico da carga mensal aportada pelas minibacias, ocorre entre fevereiro e abril, sendo o período de menor volume verificado entre os meses de julho e setembro. A Figura mostra que a maior parte da carga de sedimento simulada e que chega aos rios é proveniente das regiões Andinas localizadas parte na Bolívia e parte no Peru. Devido as suas altas declividades e alta produção de sedimentos, o volume de sedimentos aportado dos Andes para os rios são consideráveis mesmo nas épocas mais secas do ano. Por outro lado, regiões muito planas, como na parte central da bacia, ao longo do rio Mamoré até a divisa entre a Bolívia e o Brasil, a geração de sedimentos é baixa.

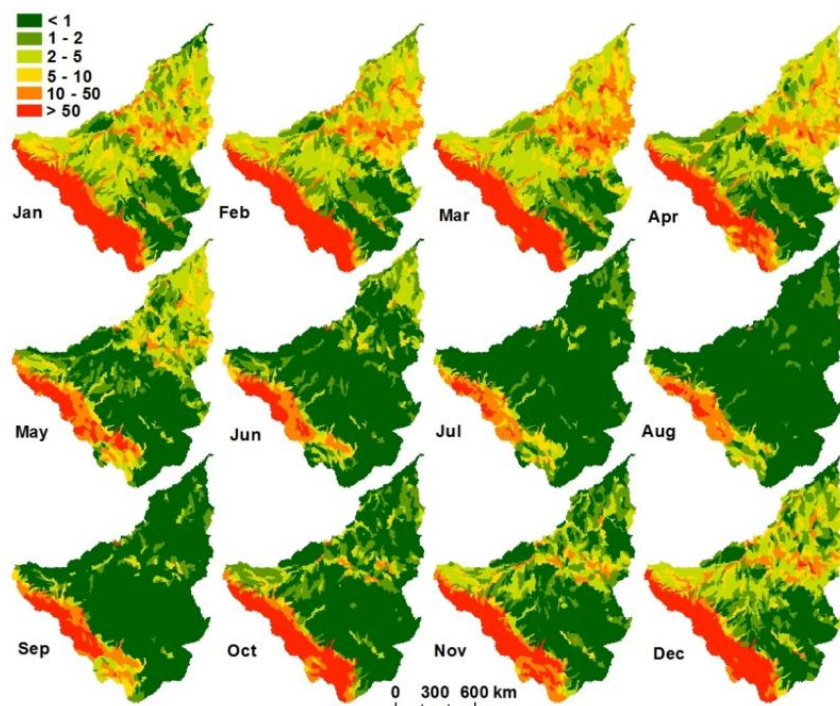


Figura 2 - Média mensal específica ( $\text{ton/mês/km}^2$ ) do aporte de sedimentos das minibacias para os trechos de rios.

## Fluxo de sedimentos nos trechos de rios

A distribuição espacial da carga média anual de sedimentos em suspensão, simulada na bacia do rio Madeira, nos trechos de rios está apresentada na Figura 3a. Para uma visualização dos locais que mais contribuem com a carga de sedimentos em suspensão na bacia, a carga média anual de cada trecho de rio foi dividida pela área acumulada do trecho, gerando assim um mapa espacial da carga anual média específica de sedimentos em suspensão, a qual está apresentada na Figura 3b.

Os trechos com maior carga média anual de sedimentos em suspensão são aqueles com origem na região Andina, com grande destaque para a contribuição das bacias dos rios Madre de Dios e Beni, o que pode ser comprovado pela Figura 3b. Os trechos do rio Madre de Dios, com nascente no Peru, e do rio Beni, com nascente na Bolívia, possuem uma carga média anual de sedimentos estimada em, aproximadamente, 100 ton/ano na confluência entre eles, enquanto que o rio Mamoré apresentou carga variando entre 35 ton/ano próximo aos Andes e 65 ton/ano na sua confluência com o rio Beni. No rio Madeira, verificaram-se cargas médias anuais superiores a 280 ton/ano. Da Figura 3a observa-se que cerca de 78% do fluxo total de sedimentos em suspensão proveniente dos Andes para o rio Madeira são transportados pelo rio Beni, enquanto 22% provém da bacia do rio Mamoré. Estas estimativas são parecidas com as fornecidas por Guyot (1993), o qual estimou que 72% e 28% do fluxo de sedimentos em suspensão vindo dos Andes são transportados pelos rios Beni e Mamoré, respectivamente. Além disso, os resultados do modelo indicam que a bacia do rio Madre de Dios contribui com 48% da carga total de sedimentos em suspensão da bacia do rio Beni, enquanto que, da carga total de sedimentos de suspensão chegando ao rio Madeira, aproximadamente 7% é transportada pelo rio Guaporé e menos de 1% são provenientes de outros tributários do rio Madeira.

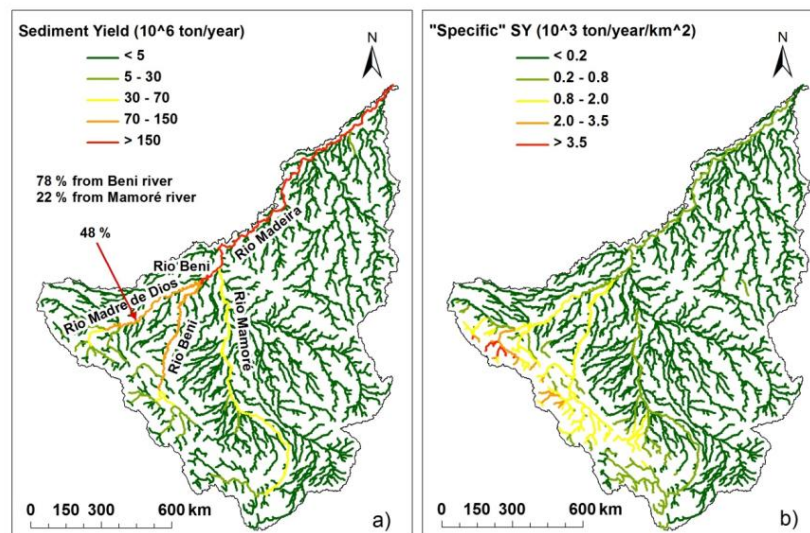


Figura 3 - Carga anual (a) e carga anual específica (b) de sedimentos em suspensão nos trechos de rios da bacia do rio Madeira.

A descarga de sedimentos em suspensão (ton/dia) simulada foi comparada com os valores obtidos da estação de monitoramento do HYBAM em Porto Velho (ponto 5 da Figura 1a). O resultado está apresentado na Figura 4a, em intervalos de 10 dias. Observa-se uma boa concordância entre os dados observado e simulado. A dinâmica geral no período simulado foi bem representada pelo modelo, assim como a ordem de grandeza dos valores, embora seja possível observar que o sedimentograma simulado é um pouco adiantado em relação ao observado. Acredita-se que este adiantamento esteja relacionado com o fato de que, neste estudo, a troca de sedimentos

entre rios e planícies foi desprezada. Comportamento semelhante é verificado com os hidrogramas simulados quando os efeitos da planícies são desconsiderados.

A Figura 4a apresenta as descargas anuais de sedimentos em suspensão ( $QS$  [ $\text{ton}\cdot\text{ano}^{-1}$ ]) simuladas, comparadas com estimativas obtidas por Filizola & Guyot (2009) em 11 estações de medição na bacia do rio Madeira (ver Figura 1a), utilizando 3 metodologias com resultados indicados por  $QS1$ ,  $QS2$  e  $QS3$ . Os resultados do modelo apresentam boa concordância com os observados, apesar de superestimativas de alguns dos valores baixos.

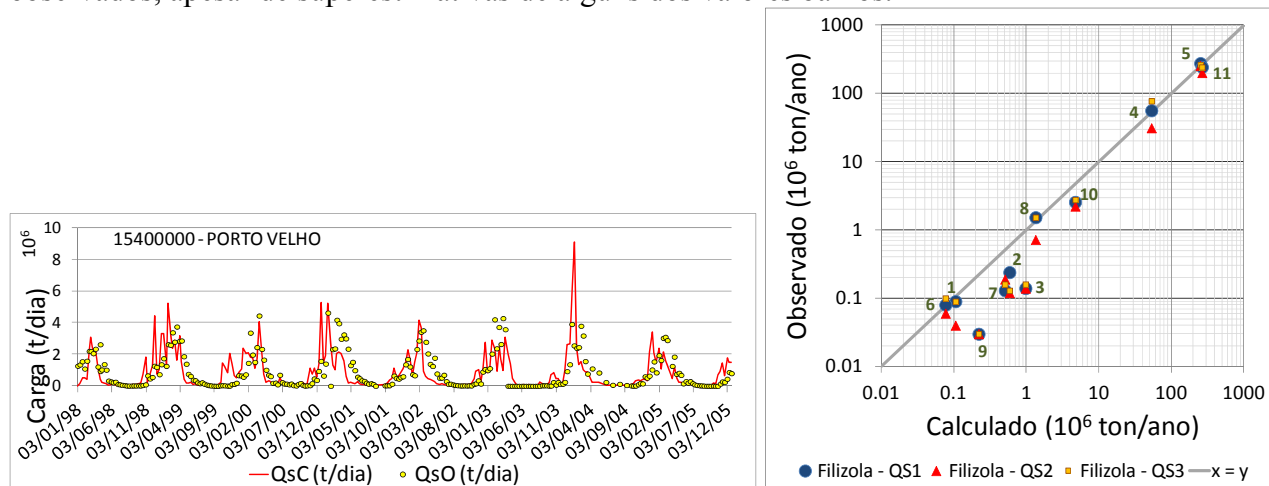


Figura 4 - (a) Descargas de sedimentos em suspensão observadas e simuladas na estação Porto Velho e (b) carga anual de sedimentos estimada pelo modelo e por Filizola & Guyot (2009), nos locais indicados na Figura 1a.

## CONCLUSÕES

Apresenta-se um modelo para estimativa da produção e do transporte de sedimentos desenvolvido integrado ao modelo hidrológico MGB-IPH e resultados preliminares da sua aplicação na bacia do rio Madeira. O modelo é capaz de fornecer estimativas distribuídas temporal e espacialmente das áreas com maior produção de sedimentos e das concentrações de sedimentos nos trechos de rio. Comparações dos resultados do modelo com dados observados apresentaram boas concordâncias. A dinâmica de sedimentos na bacia, com indicação dos locais com maior produção, dos trechos que rio com maiores taxas de sedimentos em suspensão e a variabilidade temporal foram bem representadas. Verificou-se que a maior parte dos sedimentos transportados pelo rio Madeira é proveniente da região Andina, sendo transportados pelos rios Beni e Mamoré, com maior contribuição da bacia do rio Beni. Apesar dos resultados encorajadores, esforços estão sendo despendidos para melhor avaliar os resultados do modelo e a dinâmica de sedimentos na bacia frente a escassez de dados. Considerando que os efeitos das planícies de inundações na dinâmica de sedimentos dos rios são importantes, pretende-se ainda incluir um mecanismo simplificado de troca de sedimentos entre rios e planícies utilizando o modelo de propagação hidrodinâmica (HD).

## REFERÊNCIAS

- ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J.R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34, pp. 73–89.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. (2007). The MGB-IPH model for largescale rainfall-runoff modeling. *Hydrological Sciences Journal*, 52, 878-895 pp.
- De ROO, A.P.J.; WESSELING, C.G.; RITSEMA, C.J. (1996). LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins: I. Theory, input and output. *Hydrological Processes*, 10, pp. 1107–1117.

- DESMET P. J. J. e GOVERS G. (1996). A GIS-procedure for automatically calculating the USLE LS-factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51 (5): pp. 427-433.
- ECKHARDT, K.; HAVERKAMP, S.; FOHRER, N.; FREDE, H. G. (2002). SWAT-G: a version of SWAT99.2 modified for application to low mountain range catchments. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27, pp. 641-644.
- FARR, T.G.; CARO, E.; CRIPPEN, R. et al. (2007). The shuttle radartopography mission. *Rev. of Geophysics*, 45, 2.
- FILIZOLA, N. e GUYOT, J. L. (2009). Suspended sediment yields in the Amazon basin: an assessment using the Brazilian national data set. *Hydrol. Process.* 23, 3207-3215.
- GUYOT, J. L. (1993). *Hydrogéochimie des feuves de l'Amazonie bolivienne*. Coll. Etudes et Thèses, ORSTOM, Paris, France, 262 pp.
- HUFFMAN, G.; ADLER, R.; BOLVIN, D. et al. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TCMA): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J. Hydromet*, 8, 38-55.
- KRYSAKOVA, V.; MILLER-MOHLFEIL, D. I.; BECKER, A. (1996). Mesoscale integrated modelling of hydrology and water quality with GIS Interface. In *Anais do Troc. Third Int. Conf. on Integrating GIS and Env. Modeling*, California National Center for Geographical Information and Analysis, Santa Barbara.
- MUELLER, E. N.; GÜNTNER, A.; FRANCKE, T.; MAMEDE, G. (2010). Modelling sediment export, retention and reservoir sedimentation in drylands with the WASA-SED model. *Geosci. Model Dev.*, 3, 275-291, 2010. [www.geosci-model-dev.net/3/275/2010/](http://www.geosci-model-dev.net/3/275/2010/).
- NEARING, M.A., et al., (1989). A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 32, pp. 1587-1593.
- PAIVA, R.C.D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. (2011). Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. *J. Hydrol.*, 406, pp. 170-181
- PROSSER, I. P.; YOUNG, B.; RUSTOMJI, P.; HUGHES, A.; MORAN, C. (2001). A model of river sediment budgets as an element of river health assessment. In *Anais do International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'2001)*, December 10-13, pp. 861-866.
- RAMSANKARAN, R.; KOTHYARI, U. C.; Ghosh S. K.; Malcherek, A.; MURUGESAN, K. (2013). Physically-based distributed soil erosion and sediment yield model (DREAM) for simulating individual storm events. *Hydrological Sciences Journal*, DOI:10.1080/02626667.2013.781606
- SIVAPALAN, M.; VINEY, N. R.; JEEVARAJ, C. G. (1996). Water and salt balance modelling to predict the effects of land-use changes in forested catchments. 3. The large catchment model. *Hydrological Processes*, 10, 429-446.
- VINEY, N. R.; SIVAPALAN, M. (1999). A conceptual model of sediment transport: application to the Avon River Basin in Western Australia. *Hydrological Processes*, 13, pp. 727-743.
- WICKS, J.M.; BATHURST, J.C. (1996). SHESED: a physically based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE hydrological modeling system. *Journal of Hydrology*, 175, pp. 213-238.
- WILLIAMS, J. R. (1975). Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*. Publication ARS-S-40. US Department of Agriculture: Washington, DC; pp. 244-252.
- YANG, C. T. 1984. Unit stream power equation for gravel. *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, 110(12).