

Águas Superficiais na Amazônia: Descobertas Chave e Perspectivas

John M. Melack

Bren School of Environmental Science and Management and
Department of Ecology, Evolution, and Marine Biology
University of California, Santa Barbara, California, USA

Reynaldo L. Victoria

Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, Brasil

Javier Tomasella

Centro de Ciência do Sistema Terrestre, Instituto Nacional
de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, Brasil

Os quatro capítulos que representam os estudos de águas superficiais na Amazônia abrangem escalas espaciais que vão desde pequenas bacias de drenagem a toda a Bacia Amazônica. Os aspectos hidrológicos são examinados em estudos de campo detalhados, sensoriamento remoto e modelagem. O carbono orgânico em todas as escalas, nitrogênio e fósforo em pequenas bacias de drenagem são também focalizados. Esse capítulo introdutório prioriza descobertas chave discutidas nos quatro capítulos e oferece perspectivas sintetizadas.

A pergunta central para os estudos de águas superficiais do Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA), conforme concebida por *Richey et al.* [1997], acha-se assim formulada no Plano Científico Conciso do LBA: “De que modo os caminhos e os fluxos de matéria orgânica, nutrientes e elementos associados através dos corredores fluviais (zonas ripárias, planícies de inundação, canais e várzeas) mudam em função da cobertura da vegetal?” Os quatro capítulos que representam esses estudos abrangem múltiplas escalas, desde pequenas bacias a bacias de mesoescala, planícies de inundação regionais e a planície da Bacia Amazônica inteira.

Os aspectos hidrológicos desses sistemas são examinados por estudos de campo detalhados, sensoriamento remoto, e modelagem. Os aspectos químicos considerados enfatizam o carbono orgânico em todas as escalas e incluem nitrogênio e fósforo em pequenas bacias de drenagem. Este capítulo introdutório salienta as descobertas chave discutidas nos quatro capítulos, iniciando com a pequena escala, e oferece perspectivas sintetizadas.

Tomasella et al. [neste volume] resumem os estudos de hidrologia e fluxos de nutrientes em pequenas bacias de drenagem e as respostas à conversão de floresta em pastagem. De modo geral, os estudos indicam que a conversão de floresta em pastagem produz aumento de descarga, aumento de escoamento superficial e redução de evaporação. Mudanças da condutividade hidráulica vertical do solo são fundamentais na geração de escoamento superficial e são influenciadas pelo grau de perturbação do solo. A história do uso da terra

anterior ao abandono de áreas desmatadas é crucial para o entendimento dos efeitos potenciais do desmatamento nas propriedades hidráulicas do solo e, em particular, para o entendimento do tempo de recuperação da condutividade hidráulica saturada. Estudos de bacias em vários sítios do LBA indicam que a água subterrânea é importante na geração dos escoamentos subsuperficial e superficial.

Medições recentes realizadas no leste do Pará por *Moraes et al.* [2006] mostraram que a condutividade hidráulica saturada próxima à superfície de uma pastagem foi de cerca de 4 mm h^{-1} , em comparação com 230 mm h^{-1} em uma bacia florestada pareada. Em bacias pareadas na Amazônia central, *Troncoso* [2006] observou uma redução do tempo de recessão e do tempo do pico da descarga, assim como um aumento significativo de escoamento superficial na pastagem, em comparação com a bacia florestada; a evaporação anual na pastagem foi estimada em 876 mm e em 1.277 mm na floresta. Um estudo na bacia do Asu de *Tomasella et al.* [2008] mostraram o modo como o estoque de água subterrânea regulou anomalias climáticas sazonais de um ano ao outro e que a zona profunda não saturada teve um papel importante na redução de grande parte da variabilidade intrassazonal. Um novo descritor de terreno com informações do Shuttle Radar Topographic Mission foi utilizado no entorno da bacia do Asu, o qual indicou que os ambientes saturados e baixios de vales ocupavam 43% da área [*Rennó et al.*, 2008].

Estudos realizados antes e durante o LBA mostraram baixas concentrações de nitrogênio inorgânico dissolvido em água de igarapés (riachos amazônicos), muito abaixo das encontradas nas soluções do solo [*Williams and Melack*, 1997; *Neill et al.*, 2001; *Markewitz et al.*, 2004]. Entretanto, os mecanismos de redução de nitrogênio, presumivelmente em zonas ripárias, permanecem desconhecidos. Concentrações elevadas de nitrato em igarapés ocorrem logo após o desmatamento. Assim que o nitrogênio inorgânico entra em igarapés sob florestas, estudo recente indica que ele tem o potencial de se deslocar por longas distâncias [*Neill et al.*, 2006]. Depois da conversão em pastagem, quando há invasão de gramíneas na

calha do rio, o transporte de nitrogênio é modificado.

Concentrações de fósforo em solução de solo e igarapés florestados são em geral muito baixas [*Lesack*, 1993; *Neill et al.*, 2001; *Markewitz et al.*, 2004]. O desmatamento parece não aumentar as concentrações de fosfato na solução do solo e na água subterrânea, pelo menos em alguns sítios onde foram feitas as medições, o que é consistente com a alta capacidade de absorção dos óxidos de alumínio e ferro que predominam nas planícies da Bacia Amazônica. Em pastagens a distância em trechos de igarapés para a assimilação de fosfato é curta, sugerindo rápida assimilação pela biota aquática e plantas terrestres associadas..

Richey et al. [neste volume] apresentam um resumo do avanço, durante o LBA, do entendimento do processo das múltiplas frações de carbono orgânico oriundas de Terra Firme através de igarapés, pequenos e médios rios. Em igarapés de cabeceira muito pequenos, *Johnson et al.* [2007, 2008] documentaram fluxos de CO_2 em águas subterrâneas e sua subsequente evasão como um condutor de carbono respirado por organismos terrestres. Utilizando as estimativas de fluxos de águas subterrânea e do $p\text{CO}_2$ do solo, foi calculada a evasão de CO_2 de cursos d'água de pequena ordem que drenam as áreas de Terra Firme da Amazônia a $114 \pm 10 \text{ Tg Ca}^{-1}$. Para extrapolar estimativas de evasão de gás de rios pequenos a médios são necessárias informações sobre a área total de suas superfícies, e uma extrapolação a partir de análise feita na bacia do Ji-Paraná para toda a Amazônia para rios de 3ª a 5ª ordens desenvolvida por *Rasera et al.* [2008].

À luz das múltiplas escalas e heterogeneidade da Bacia Amazônica, o rastreamento das fontes de carbono orgânico que alimenta a produção de dióxido de carbono que resulta na supersaturação de quase todas as águas da bacia com respeito ao equilíbrio com a atmosfera é um desafio significativo. Com base em um levantamento de isótopos de carbono em frações orgânica e inorgânica de rios de terras altas e baixas da Bacia Amazônica, *Mayorga et al.* [2005] descobriram que a fonte primária de CO_2 respirado nos baixios foi em média de idade <5anos e que o $p\text{CO}_2$ em geral

foi isotopicamente distinto das frações coincidentes de carbono orgânico [carbono orgânico particulado fino (FPOC) e carbono orgânico particulado grosso]. Entretanto, medições recentes de respiração feitas por Ellis (dados não publicados) revelaram uma correlação positiva com FPOC em rios e igarapés de planícies. Além disso, o exame de $\delta^{13}\text{C}$ de CO_2 respirado revelou que esse CO_2 no Rio Negro e em igarapés pequenos e sombreados no Acre era consistente com o carbono originário de plantas C3, enquanto que no baixo Rio Solimões foi detectada variabilidade temporal na fonte orgânica que alimenta a respiração. Durante o início da elevação da água, o material respirado apresentou $\delta^{13}\text{C}$ de -22.9‰, indicando uma importante contribuição de macrófitas aquáticas C4.

Melack et al. [neste volume] examinam as planícies de inundação, com ênfase nos processos hidrológicos e biogeoquímicos e análises de sensoriamento remoto que permitem a regionalização de fluxos de carbono. Ainda que os modelos em escala de bacia com planícies alagáveis pressuponham uma área de inundação aproximadamente igual a área dos canais fluviais principais e operem em resolução média, resultados recentes indicam consideráveis variações espaciais e temporais das profundidades dos corpos d'água através das planícies de inundação do Amazonas [*Alsdorf et al.*, 2000]. Na primeira aplicação de um modelo hidrodinâmico bidimensional para um longo trecho da planície de inundação do Amazonas, *Wilson et al.* [2007] verificaram que mais de 40% da descarga total do rio se propagava através da planície de inundação próxima à confluência dos rios Purus e Solimões.

Durante o LBA, os ecossistemas de planícies de inundação ao norte, a oeste e leste da área central próxima a Manaus, onde a maioria das pesquisas pré-LBA foi desenvolvida, foram examinados em termos de sua ecologia, hidrologia e biogeoquímica (ex. bacia do Jau [*Rosenqvist et al.*, 2002]; savanas interfluviais no alto rio Negro [*Belger*, 2007]; reservatório de Balbina [*Kemenes et al.*, 2007]; Lago Curuaí [*Maurice-Bourgoin et al.*, 2007; *Bonnet et al.*, 2008]; e Lago Amanã [*Silva*, 2005]; *Rodrigues*, 2007].

Com base em uma metodologia para classificação de áreas inundadas utilizando mosaicos de radares JERS-1 [*Hess et al.*, 2003], *Melack e Hess* [2009] mapearam 14% das planícies da Bacia Amazônica (região abaixo de 500 m acima do nível do mar) como alagáveis a 100 m de resolução, das quais cerca de 76% são representadas por vegetação lenhosa e 8% por água aberta. Planícies de inundação desempenham um papel importante no balanço de carbono orgânico da Bacia Amazônica e são sítios com altas taxas de produção em plantas aquáticas e uma fonte importante de metano para a troposfera. Cálculos feitos por *Melack et al.* [neste volume] estimaram a produção líquida atribuída a florestas inundadas (excluindo-se incrementos de madeiras), macrófitas aquáticas, fitoplâncton e perifíton nos 1,77 milhões de km^2 caracterizados por *Hess et al.* [2003] em cerca de 300 Tg C a^{-1} . Florestas alagadas foram estimadas em 62% do total, macrófitas aquáticas em 34% e os 4% restantes associados com perifíton e fitoplâncton. Aproximadamente 10% do valor total equivale à exportação de carbono orgânico pelo Rio Amazonas [*Richey et al.*, 1990], a emissão de metano é de cerca de 2% a 3% [*Melack et al.*, 2004], e uma porcentagem similar pode estar imobilizada em sedimentos. A porção remanescente está perto de ser suficiente para alimentar a respiração que resulta da desgaseificação de 210 ± 60 Tg C a^{-1} como dióxido de carbono provenientes de rios e planícies de inundação [*Richey et al.*, 2002].

Costa et al. [neste volume] revisaram estudos que examinam os efeitos da variabilidade climática e mudanças na cobertura da terra sobre a descarga fluvial em toda a Bacia Amazônica. Foram examinados resultados empíricos e de modelagem. Por exemplo, com base em análises de descarga de rios medidas em estações distribuídas pela bacia, *Marengo* [1995] e *Marengo et al.* [1998] detectaram um componente espacial para o ENSO correlacionado às variações de vazão fluvial que apresentam baixas descargas concentradas nas porções a noroeste da bacia durante os eventos de El Niño, e detectaram uma variabilidade em escala decadal com aumento da descarga nos anos de 1945 a 1960 e redução da descarga de 1970 a 1990. Além disso, *Coe et al.* [2002, 2007] modelaram média mensal de descarga fluvial

usando registros de longo prazo de precipitação e notaram anos de descarga relativamente alta no período de 1940 a 1950 e nos anos 1970, e anos de descarga baixa nos anos 1960, e de 1980 a 1990. Esse padrão, embora espacialmente variável em magnitude, ocorreu em toda a bacia, e os eventos de ENSO são evidentes na variabilidade de um período de 28 anos. Embora grande parte da variabilidade interanual e interdecadal nas descargas fluviais apareça relacionada à variabilidade climática, o aumento do desmatamento parece contribuir em algumas áreas, como na bacia do Tocantins [Costa *et al.*, 2003].

Como esperado, à medida que mais locais ao longo de períodos mais extensos são investigados em toda a Bacia Amazônica, a heterogeneidade regional e a variabilidade temporal tornam-se mais aparentes assim como as influências das mudanças induzidas pelo homem e clima. Dessa forma, para o avanço do entendimento das águas superficiais da Amazônia será necessário uma maior integração de dados e modelos multiescalares. O sensoriamento remoto continuará a desempenhar um papel importante. Por exemplo, a combinação de medições de campo em grande número de sítios, técnicas inovadoras em sensoriamento remoto, e modelagem hidrológica propiciaram o reconhecimento da importância da evasão de dióxido de carbono de pequenos igarapés, rios de mesoescala, planícies de inundação e de grandes canais fluviais. Experimentos têm refinado as parametrizações dos coeficientes de transferência de gases. Sabe-se agora que o carbono orgânico que alimenta a respiração que produz a supersaturação de dióxido de carbono varia em escala, como por exemplo nos igarapés dominados pelas fontes terrestres, e entre os ecossistemas, como as planícies de inundação, por exemplo, que têm grandes fontes locais, e os grandes rios que têm fontes mistas como indicam as análises isotópicas.

REFERÊNCIAS

Alsdorf, D.E., J.M. Melack, T. Dunne, L.A.K. Mertes, L.L. Hess, and L.C. Smith (2000),

Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon floodplain, *Nature*, 404, 174-177.

Belger, L. (2007), Fatores que influem na emissão de CO₂ e CH₄ em áreas alagáveis interfluviais do médio Rio Negro, Ph.D. thesis, Univ. Federal do Amazonas and Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus.

Bonnet, M.P., G. Barroux, J.M. Martinez, F. Seyler, P. Moreira-Turcq, G. Cochonneau, J.M. Melack, G. Boaventura, L. Maurice-Bourgoin, J.G. Leon, E. Roux, S. Calmant, P. Kosuth, J.L. Guyot, and P. Seyler (2008), Floodplain hydrology in an Amazon floodplain lake (Lago Grande de Curuai), *J. Hydrol.*, 349, 18-30.

Coe, M.T., M.H. Costa, A. Botta and C.M. Birkett (2002), Long-term simulations of discharge and floods in the Amazon Basin. *J. Geophys. Res.-Atm*, 107, D20, 8044.

Coe, M.T., M.H. Costa, and E. Howard (2007), Simulating the surface waters of the Amazon River Basin: Impacts of new river geomorphic and dynamic flow parameterizations. *Hydrol. Processes*, doi:10.1002/hyp.6850.

Costa, M.H., A. Botta, and J.A. Cardille (2003), Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia, *J. Hydrol.*, 283, 206-217.

Costa, M.H., M.T. Coe, and J.L. Guyot (in press), Effects of climatic variability and deforestation on flow regime, in *Amazonis and Global Change*, edited by J. Gash et al., AGU, Washington, DC.

Hess, L.L., J.M. Melack, E.M.L.M. Novo, C.C.F. Barbosa, and M. Gastil (2003), Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin, *Remote Sens. Environ.*, 87, 404-428.

Johnson, M.S., M. Weiler, E.G. Couto, S.J. Riha, and J. Lehmann (2007), Storm pulses of dissolved CO₂ in a forested headwater Amazonian stream explored using hydrograph separation, *Water Resour. Res.*, 43, W11201, doi:10.1029/2007WR006359.

Johnson, M.S., J. Lehmann, S. Riha, A.V. Krusche, J.E. Richey, J.P.H.B. Ometto, and E.G. Couto (2008), CO₂ efflux from Amazonian

- headwater streams represents a significant fate for deep soil respiration. *Geophys. Res. Lett.*, 35:, L17401, DOI10.1029/2008GL034619.
- Kemenes, A., B.R. Forsberg, and J.M. Melack (2007), Methane release below a hydroelectric dam, *Geophys. Res. Lett.*, 34, doi:10.1029/2007GL029479.
- Lesack, L.F.W. (1993), Export of nutrients and major ionic solutes from a rainforest catchment in the central Amazon basin, *Water Resour. Res.*, 29, 743-758.
- Marengo, J. A. (1995), Variations and change in South American streamflow, *Clim. Change*, 21, 99-117.
- Marengo, J.A., J. Tomasella, and C.R. Uvo (1998), Trends in streamflow and rainfall in tropical South America: Amazonia, eastern Brazil, and northwestern Peru. *J. Geophys. Res.-Atm.*, 103, D2, 1775-1783.
- Markewitz D., E.A. Davidson, P. Moutinho, and D. Nepstad (2004), Nutrient loss and redistribution after forest clearing on a highly weathered soil in Amazônia, *Ecolog. Applic.*, 14, S177-S199.
- Maurice-Bourgoin, L., M.P. Bonnet, J.M. Martinez, P. Kosuth, G. Cochonneau, P.M. Turcq, J.L. Guyot, P. Vauchel, N. Filizola, and P. Seyler (2007), Temporal dynamics of water and sediment exchanges between the Curuaí floodplain and the Amazon River main stream, Brazil, *J. Hydrol.*, 335, 140-156.
- Mayorga, E., A.K. Aufdenkampe, A. K., C.A. Masiello, A.V. Krusche, J.I. Hedges, P.D. Quay, P. D., J.E. Richey, and T.A. Brown. (2005), Young organic matter as a source of carbon dioxide outgassing from Amazonian rivers, *Nature* 436, 538-541.
- Melack, J.M., L.L. Hess, M. Gastil, B.R. Forsberg, S.K. Hamilton, I.B.T. Lima, and E.M.L.M. Novo (2004), Regionalization of methane emissions in the Amazon Basin with microwave remote sensing, *Global Change Biol.*, 10, 530-544.
- Melack, J.M., and L.L. Hess (in press), Remote sensing of the distribution and extent of wetlands in the Amazon basin, in *Amazonian Floodplain Forests: Ecophysiology, Ecology, Biodiversity and Sustainable Management*, edited by W.J. Junk and M. Piedade, Springer, Berlin.
- Melack, J.M., E.M.L.M. Novo, B.R. Forsberg, M.T.F. Piedade, and L. Maurice (in press), Floodplain ecosystem processes, in *Amazonia and Global Change*, edited by J. Gash et al., AGU, Washington, DC.
- Moraes, J.M., A. Schuler, T. Dunne, R.O. Figueiredo, and R.L. Victoria (2006), Water storage and runoff processes in lithic soils under forest and pasture in eastern Amazon, *Hydrol. Processes*, 20, 2509-2526.
- Neill, C., L.A. Deegan, S.M. Thomas, and C.C. Cerri (2001), Deforestation for pasture alters nitrogen and phosphorus in soil solution and streamwater of small Amazonian watersheds, *Ecolog. Applic.*, 11, 1817-1828.
- Neill, C., L.A. Deegan, S.M. Thomas, C.L. Hauptert, A.V. Krusche, V.M. Ballester, and R.L. Victoria (2006), Deforestation alters channel hydraulic and biogeochemical characteristics of small lowland Amazonian streams, *Hydrol. Processes*, 20, 2563-2580.
- Rasera, M., M.V.R. Ballester, A.V. Krusche, C. Salimon, L.A. Montebelo, S.R. Alin, R.L. Victoria, and J.E. Richey. (2008). Estimating the surface area of small rivers in the southwestern Amazon and their role in CO₂ outgassing, *Earth Interactions*, 12, 1-16.
- Rennó, C.D., A.D. Nobre, L.A. Cuartas, J.V. Soares, H.G. Hodnett, J. Tomasella, and M.J. Waterloo (2008), HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia, *Remote Sens. Environ.*, 112, 3469-3481.
- Richey, J.E., J.I. Hedges, A.H. Devol, P.D. Quay, R. Victoria, L. Martinelli, and B.R. Forsberg (1990), Biogeochemistry of carbon in the Amazon River, *Limnol. Oceanogr.*, 35, 352-371.
- Richey, J.E., S.R. Wilhelm, M.E. McClain, R.L. Victoria, J.M. Melack, and C. Araujo-Lima. (1997), Organic matter and nutrient dynamics in river corridors of the Amazon Basin and their response to anthropogenic change. *Ciencia e Cultura*, 49, 98-110.
- Richey, J.E., Melack, J.M., Aufdenkampe, A.K., Ballester, V.M., and Hess, L.L. (2002), Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂, *Nature*, 416, 617-620.

- Richey, J.E., A.V. Krusche, M.S. Johnson, H.B. da Cunha, and M.V. Ballester (in press), The role of rivers in the regional carbon balance, in *Amazonis and Global Change*, edited by J. Gash et al., AGU, Washington, DC.
- Rodrigues, R. (2007), Diversidade florística, estrutura da comunidade arbórea e suas relações com variáveis ambientais ao longo do lago Amanã, RDSA, Amazônia Central, Masters thesis, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia.
- Rosenqvist, A., B.R. Forsberg, T. Pimentel, Y.A. Rauste, and J.E. Richey (2002), The use of spaceborne radar data to model inundation patterns and trace gas emissions in the central Amazon floodplain, *Int. J. Remote Sens.*, 23, 1303-1328.
- Silva, R.M. (2005), Fisicoquímica e macrófitas no lago Amanã, Masters thesis, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus.
- Tomasella, J. , M.G. Hodnett, L.A. Cuartas, A.D. Nobre, M.J. Waterloo, and S.M. Oliveira, (2008), The water balance of an Amazonian micro-catchment: the effect of interannual variability of rainfall on hydrological behaviour. *Hydrol. Processes*, 22, 2133-2147.
- Tomasella, J., C. Neill, R. Figueiredo, and A.D. Nobre (in press), Water and chemical budgets at catchment scale including nutrient exports from intact forests and disturbed landscapes, in *Amazonis and Global Change*, edited by J. Gash et al., AGU, Washington, DC.
- Trancoso, R. (2006), Mudanças na cobertura da terra e alterações na resposta hidrológica de bacias hidrográficas da Amazônia, Masters thesis, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus.
- Williams M.R., T.R. Fisher, and J.M. Melack (1997), Solute dynamics in soil water and groundwater in a central Amazon catchment undergoing deforestation, *Biogeochemistry*, 38, 303-335.
- Williams, M.R., and J.M. Melack (1997), Solute export from forested and partially deforested catchments in the central Amazon, *Biogeochemistry*, 38, 67-102.
- Wilson, M.D., P.D. Bates, D. Alsdorf, B. Forsberg, M. Horritt, J. Melack, F. Frappart, and J.S. Famiglietti (2007), Modeling large-scale inundation of Amazonian seasonally flooded wetlands, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L15404, doi:10.1029/2007GL030156.
-
- J. M. Melack, Department of Ecology, Evolution, and Marine Biology, University of California, Santa Barbara, CA 93106, USA. (melack@bren.ecsb.edu).
- J. Tomasella, Centro de Ciência do Sistema Serrestre, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP 12630-00, Brasil. (javier@cptec.inpe.br).
- R. L. Victoria, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, SP 13400-000, Brasil. (reyna@cena-usp.br).

Tradução: Ivani Pereira

Revisão: Ricardo Figueiredo

Copyright © 2010 American Geophysical Union, Washington, D.C., USA. All rights reserved.

These materials are protected by the United States Copyright Law, International Copyright Laws and International Treaty Provisions.

Estes materiais são protegidos pela Lei de Direitos Autorais dos Estados Unidos, por Leis Internacionais de Direitos Autorais e Disposições de Tratados Internacionais.