

## XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### HIDROLOGIA DA AMAZÔNIA VISTA DO ESPAÇO: AVANÇOS CIENTÍFICOS

*Alice César Fassoni-Andrade<sup>1,2,3</sup>; Ayan Santos Fleischmann<sup>3</sup>; Fabrice Papa<sup>1,2</sup>; Rodrigo Cauduro Dias de Paiva<sup>3</sup>; Sly Wongchuig<sup>4</sup>; John M. Melack<sup>5</sup>; Adriana Aparecida Moreira<sup>3</sup>; Adrien Paris<sup>6,1</sup>; Anderson Ruhoff<sup>3</sup>; Claudio Barbosa<sup>7</sup>; Daniel Andrade Maciel<sup>7</sup>; Evlyn Novo<sup>7</sup>; Fabien Durand<sup>1,2</sup>; Frédéric Frappart<sup>1</sup>; Filipe Aires<sup>8</sup>; Gabriel Medeiros Abrahão<sup>9</sup>; Jefferson Ferreira-Ferreira<sup>10</sup>; Jhan Carlo Espinoza<sup>4</sup>; Leonardo Laipelt<sup>3</sup>; Marcos Heil Costa<sup>9</sup>; Raul Espinoza-Villar<sup>11</sup>; Stéphane Calmant<sup>1</sup>; Victor Pellet<sup>12,8</sup>*

**Palavras-Chave** – Sensoriamento remoto, Ciclo da água.

#### INTRODUÇÃO

A bacia do rio Amazonas é o principal sistema hidrológico do mundo (~6 milhões de km<sup>2</sup>) com diversos rios, várzeas e pântanos. Recebe altas taxas de precipitação anual, e cerca de metade da precipitação na bacia é reciclada por evapotranspiração local (Satyamurty et al., 2013) fornecendo umidade para partes do sul da América do Sul. O rio Amazonas deságua no Oceano Atlântico com uma descarga média anual de 206.10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (Callède et al., 2010), totalizando quase 20% da água doce global que atinge o oceano anualmente.

As altas taxas de precipitação, evapotranspiração e grandes variações no armazenamento de água doce e descarga do rio tornam a bacia Amazônica uma peça chave no sistema climático global, com grandes contribuições para os ciclos de água, energia e carbono (Nagy et al., 2016). As águas superficiais, por exemplo, são uma importante fonte e sumidouro de dióxido de carbono (Abril et al., 2014; Amaral et al., 2020). Variações sazonais na água contribuem para a formação de florestas tropicais (Leite et al., 2012), mantêm alta produtividade aquática (Melack & Forsberg, 2001) e biodiversidade (Junk et al., 2010), e influenciam a distribuição de peixes e rendimento pesqueiro (Lobón-Cerviá et al., 2015). A bacia hospeda ~40% da floresta tropical mundial e ~15% da biodiversidade terrestre global (Marengo et al., 2018). A bacia Amazônica também é o lar de pessoas locais que dependem dos rios como corredores de transporte e utilizam esses ambientes para sua subsistência (Campos-Silva et al., 2020).

1) Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS), Université Toulouse, IRD, CNRS, CNES, UPS, Toulouse, France.

2) Institute of Geosciences, University of Brasília (UnB), Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília, Brazil.

3) Institute of Hydraulic Research, Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brazil.

4) Univ. Grenoble Alpes, IRD, CNRS, Grenoble INP, Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE, UMR 5001), 38000, Grenoble, France.

5) Earth Research Institute, University of California, Santa Barbara.

6) Ocean Next, La Terrasse, 38660 Grenoble, France.

7) Instrumentation Lab for Aquatic Systems (LabISA), National Institute for Space Research (INPE), São José dos Campos, SP, Brazil.

8) Laboratoire d'Etudes du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique et Atmosphères, Observatoire de Paris, UMR 8112, Paris, France.

9) Federal University of Viçosa (UFV), Viçosa, MG, Brazil.

10) Mamirauá Institute for Sustainable Development, Tefé, AM, Brazil.

11) Departamento de Ordenamiento Territorial y Construcción, Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Av. La Molina - Lima 12, Perú.

12) Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Tokyo, Japan.

A região agora está enfrentando riscos devido às mudanças climáticas e antropogênicas, sendo que as mudanças na hidrologia da Amazônia podem ter impactos globalmente (Jimenez et al., 2019). Nas últimas décadas, a bacia passou por diversas secas extremas e inundações (Marengo & Espinoza, 2016). Além disso, os impactos negativos acumulados do aumento das intervenções humanas em toda a região, como barragens (Forsberg et al., 2017), desmatamento (Leite-Filho et al., 2020), incêndios (Aragão et al., 2008) e mineração (Lobo et al., 2015), possivelmente irão desencadear grandes modificações que podem afetar o ciclo da água na bacia Amazônica.

Caracterizar e compreender a dinâmica do ciclo da água na Amazônia é de fundamental importância para a pesquisa climática e ecológica e para o gerenciamento dos recursos hídricos. Consequentemente, existe a necessidade de um monitoramento abrangente da dinâmica espaço-temporal dos componentes do ciclo da água e como eles interagem com a variabilidade climática e a pressão antrópica. Em bacias hidrográficas tropicais grandes e remotas como a bacia Amazônica, as redes de observação in situ são difíceis de operar e manter, e não são capazes de monitorar todos os componentes do ciclo da água.

Enquanto a bacia do rio Amazonas esteve no centro das discussões científicas internacionais nas últimas décadas, o entendimento da hidrologia da bacia co-evoluiu com outro campo inovador: o sensoriamento remoto (SR) do ciclo da água terrestre (Figura 1). Nesse contexto, a bacia tem sido um laboratório ideal para o desenvolvimento de técnicas de SR e esses avanços têm fomentado o entendimento científico da hidrologia da bacia, dos ecossistemas e das mudanças ambientais. Por exemplo, as primeiras aplicações de altímetro e satélites gravimétricos para caracterizar, respectivamente, a elevação da água superficial (Guzkowska et al., 1990) e as variações de armazenamento total de água (Tapley et al., 2004) foram realizadas na bacia Amazônica devido aos seus largos rios e grandes mudanças espaço-temporais do armazenamento de água. As aplicações pioneiras de SR também incluem microondas, Radar de Abertura Sintética e mapeamento interferométrico de inundações em grande escala e caracterização da dinâmica de sedimentos (e.g. Alsdorf et al. 2000; Hess et al. 2003; Mertes, Smith, and Adams 1993). Desde então, várias aplicações usando dados de SR foram realizadas em outras bacias em todo o mundo (Alsdorf, Tshimanga, and Moukandi 2021). Todos esses desenvolvimentos importantes foram realizados por uma comunidade diversificada de cientistas com diferentes interesses e visões sobre o ciclo da água da bacia e, surpreendentemente, há uma falta de artigos de revisão que analisem o crescimento contínuo de publicações que fazem uso de observações de SR para estudar a hidrologia da região.

As várias conquistas de mais de três décadas de avanços científicos sobre a hidrologia da bacia Amazônica com o SR são discutidas por especialistas em SR de diferentes processos hidrológicos no artigo *Amazon hydrology from space: scientific advances and future challenges*. As lacunas e os caminhos para os avanços científicos, incluindo as próximas missões de satélites dedicados à hidrologia, são discutidas no artigo. Aqui, um breve resumo do artigo é apresentado destacando como a maior bacia hidrográfica do mundo tem sido um laboratório ideal para o desenvolvimento de técnicas de SR e suas aplicações para fomentar a compreensão dos processos hidrológicos e dos ecossistemas.

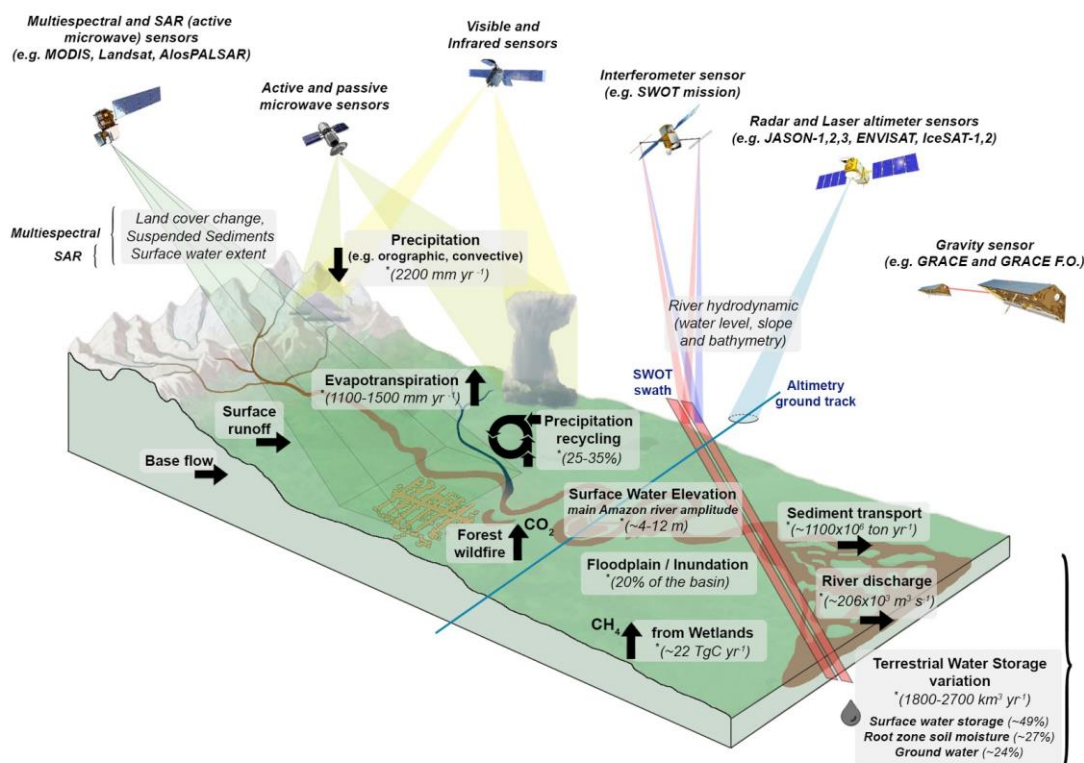


Figura 1 - Ilustração esquemática dos processos hidrológicos integrados do ciclo da água na bacia do rio Amazonas. São indicados os principais sensores a bordo dos satélites em órbita que têm ajudado a medir estes processos e as estimativas médias anuais de cada componente na bacia. As referências (\*) relacionadas a estas estimativas são fornecidas ao longo do texto.

## A BACIA AMAZÔNICA COMO LABORATÓRIO DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA HIDROLOGIA

### Precipitação e evapotranspiração

Avanços nas estimativas de precipitação por SR permitiram a caracterização das distribuições espaciais e temporais da chuva em escala local a regional sobre bacia do rio Amazonas e forneceram registros longos o suficiente para avaliar as tendências de chuva nas últimas décadas. A precipitação média na bacia foi estimada em 2.200 mm ano<sup>-1</sup>, e as chuvas mais intensas ocorrem nas regiões de *hot-spot* na cordilheira dos Andes (Figura 2b), iniciadas por processos de convecção alterados pela topografia, onde as chuvas podem atingir valores superiores a 6000 mm ano<sup>-1</sup> (Chavez & Takahashi, 2017; Espinoza et al., 2015). A análise em larga escala da precipitação derivada do SR também revelou o efeito dos ventos sobre grandes corpos d'água que causam a redução das chuvas nessas áreas (Paiva et al., 2011).

As observações do SR foram fundamentais para fornecer as primeiras estimativas em grande escala da evapotranspiração (ET) em regiões tropicais, especialmente sobre a bacia Amazônica, e também forneceram dados observacionais sem precedentes para a avaliação, calibração e validação de modelos de ET. Além disso, o SR permitiu a caracterização da variabilidade temporal e espacial da ET sobre a bacia e a compreensão de seus fatores ambientais, revelando regimes contrastantes entre os mais limitados em energia na parte equatorial da bacia e os mais limitados em água nas áreas do sul (Maeda et al., 2017). A ET média anual bacia é estimada em 1100 a 1500 mm ano<sup>-1</sup> (Builes-Jaramillo & Poveda, 2018), com taxas mais altas na região norte, como na bacia do rio Negro, diminuindo em direção as regiões do sul (Maeda et al., 2017). Várias abordagens baseadas em SR resultam em divergências significativas na estimativa de ET sobre bacia. Por exemplo, as taxas anuais



de ET com base no SR na escala de bacia foram 15-37% mais altas do que aquelas obtidas de balanços hídricos (Baker et al., 2020).

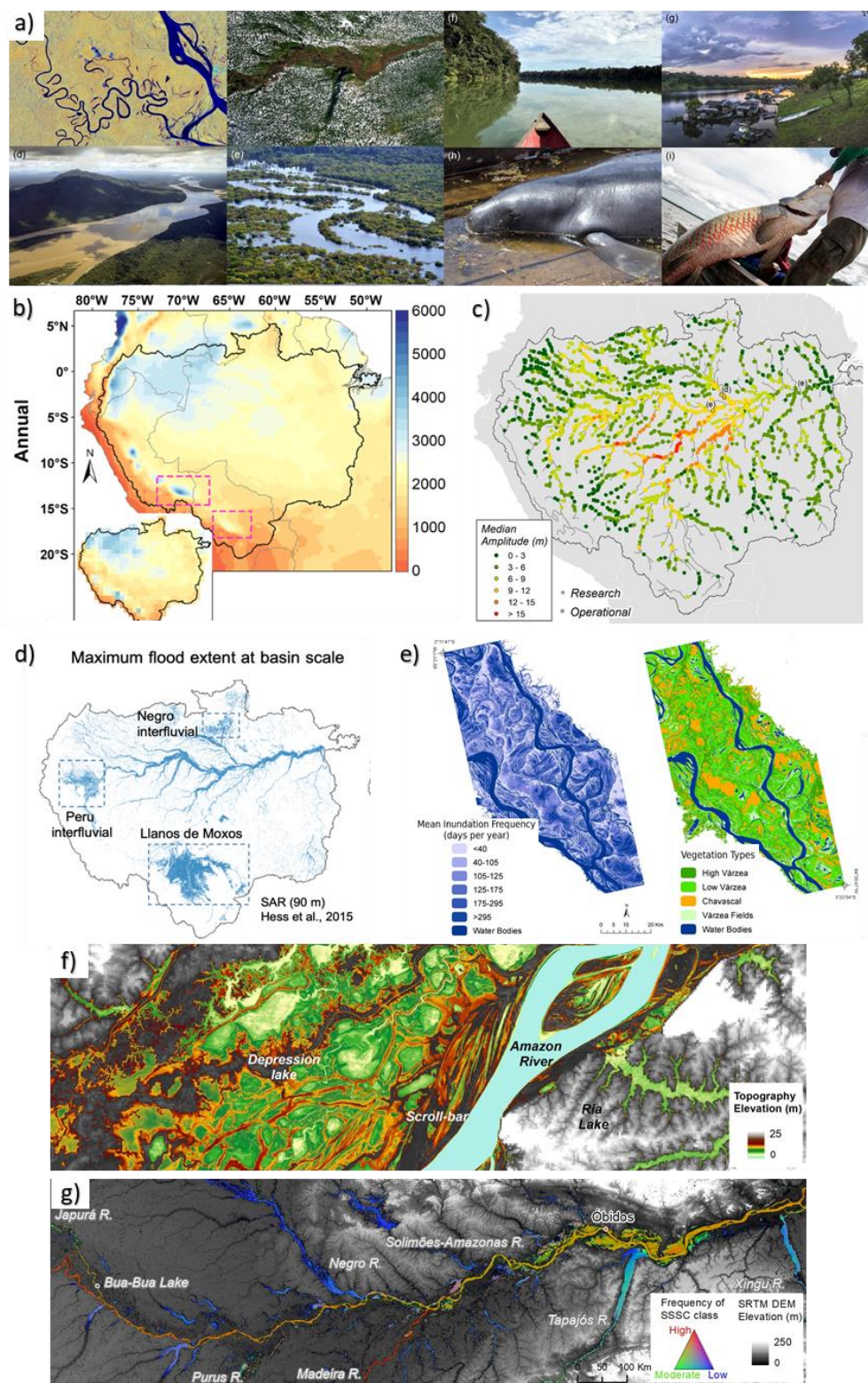


Figura 2 – a) Imagens e fotografias da bacia Amazônica. b) Precipitação média anual derivada de satélite. c) Amplitude média de variação da elevação da superfície da água dos rios da bacia derivada de altímetros. d) Extensão máxima de inundação na bacia. e) Frequência de inundação da planície de inundação e tipos de vegetação relacionados. f) Topografia da planície de inundação estimada por imagens de satélites. g) Estimativa da concentração de sedimentos nos rios por imagens.

## Águas superficiais

A caracterização das superfícies de água continentais, incluindo sua elevação e extensão, foi possível graças às adaptações de técnicas de satélite não projetadas principalmente para aplicações em hidrologia ou monitoramento de águas interiores. Um exemplo marcante são as missões de satélites de altimetria, inicialmente projetadas para a observação do oceano, mas com aplicações promissoras para os grandes rios da Amazônia (Guzkowska et al., 1990) e com potencial para derivar a elevação da superfície da água de rios e lagos (Figura 2c). Desde então, vários bancos de dados de altimetria para o monitoramento global de lagos e rios foram desenvolvidos. A técnica de interferometria diferencial SAR, originalmente desenvolvida em geofísica, também foi testada e aplicada pela primeira vez em planícies de inundação da Amazônia central para caracterizar as mudanças da água superficial (Alsdorf et al., 2000). Ambas as técnicas de altimetria e SAR foram importantes para caracterizar as variações da elevação da superfície da água nos rios e sua conectividade com as planícies de inundação (Park, 2020). O gradiente da superfície da água do Rio Amazonas varia tanto espacial quanto temporalmente, com valores variando de  $1,5 \text{ cm km}^{-1}$  (800–1020 km a montante) a  $4,0 \text{ cm km}^{-1}$  (2900–4000 km a montante; Birkett et al. 2002). O pulso de inundação monomodal do rio Amazonas principal é bem capturado com altimetria de radar (amplitude de ~4-12 m). Este pulso controla as variações da elevação da superfície da água nas planícies de inundação da Amazônia central. Durante a inundação anual, as variações em rios e planícies de inundação adjacentes são semelhantes (Alsdorf et al., 2007), mas a conectividade é reduzida durante o período de águas baixas (Park, 2020).

O primeiro mapeamento em grande escala da extensão da água superficial a partir do SR também foi realizado para a bacia Amazônica (Sippel et al., 1994). Muitas estimativas e bancos de dados, usando uma ampla gama de sensores, foram desenvolvidos desde então em diferentes escalas espaciais e temporais (Figura 2d). Estes incluem um mapeamento inovador de alta resolução de áreas úmidas e vegetação inundada usando SAR-banda L (Hess et al., 2003), que forneceu as primeiras estimativas da extensão da inundação em toda a área úmida da Amazônia, variando entre  $285.10^3$  e  $635.10^3 \text{ km}^2$  em períodos de vazante (out-dez) e cheia (abr-jun), respectivamente (Hess et al., 2015). Diferenças significativas entre as várias estimativas baseadas em SR da extensão da água superficial existem sobre bacia, em geral, menor área máxima inundada é encontrada por produtos de escala grosseira em comparação com mapas derivados de SAR. Abordagens pioneiras com dados de SR foram usadas para delinear a área de água de superfície em grande escala e extensão de florestas inundadas, águas abertas e plantas herbáceas, revelando seus complexos padrões sazonais e interanuais influenciados pela variabilidade em escala local e regional (Hamilton et al., 2004). Embora a largura da planície de inundação do rio Amazonas seja semelhante em toda a Amazônia central, a área de floresta inundada diminui de montante para jusante, onde tanto o número quanto o tamanho dos lagos de águas abertas aumentam (Mertes et al., 1995).

O mapeamento da extensão da água superficial na bacia, em combinação com dados de campo, permitiu estimativas regionais pioneiras de emissões de metano, com estimativa de emissões de metano de  $\sim 22 \text{ Tg C ano}^{-1}$  (Melack et al., 2004). A configuração espacial dos habitats de várzea amazônica em relação aos tipos de vegetação está relacionada aos padrões de inundação (Ferreira-Ferreira et al., 2015; Figura 2e). Plantas aquáticas herbáceas em planícies de inundação da Amazônia central têm um crescimento relacionado à variação do nível de água e à extensão da inundação (M. Costa, 2005).

A primeira caracterização morfométrica na bacia usando dados do SR mostrou que 11% da planície de inundação ao longo do rio Amazonas e cursos inferiores dos principais afluentes são cobertos por lagos (Sippel et al., 1992). A topografia da planície de inundação ao longo do rio Amazonas é complexa, com vários canais e lagos conectados ao rio (Mertes et al., 1996). As larguras dos canais da planície de inundação variam amplamente (10–1000 m), e as profundidades dos canais estão intimamente ligadas à amplitude local do pulso de inundação do rio Amazonas (Trigg et al.,



2012). A recente captura de quase todo o fluxo de água do rio Araguari pelo rio Amazonas, a primeira observação conhecida do desenvolvimento da rede distributiva estuarina por erosão da cabeceira, também foi documentada com técnicas de SR (dos Santos et al., 2018). A necessidade de dados topográficos precisos para aplicações hidrológicas foi enfatizada em vários estudos na Amazônia central, como remoção da vegetação. Modelos de elevação globais ainda não representam com precisão a topografia da planície de inundação, mas os dados de extensão da água superficial combinados com a elevação da superfície de água permitiram o primeiro mapeamento topográfico em áreas sazonalmente inundadas na Amazônia central (Fassoni-Andrade et al., 2020; Figura 2f). Nessas áreas, 75% das áreas de águas abertas têm profundidade inferior a 2 m (8 m) no período de águas baixas (altas) (Fassoni-Andrade et al., 2020).

O Rio Amazonas exporta a maior carga sedimentar para os oceanos do mundo ( $1,1 \cdot 10^9$  T ano<sup>-1</sup>; Armijos et al., 2020). Vários estudos pioneiros de caracterização da composição da água de rios e lagos com SR foram conduzidas na bacia Amazônica, como as estimativas pioneiras de concentração de sedimentos em rios (Mertes et al., 1993; Figura 2g), clorofila em lagos de várzea (de Moraes Novo et al., 2006) e orgânicos dissolvidos coloridos (Silva et al., 2019). O padrão espaço-temporal desses componentes está relacionado às variações de elevação da superfície da água e aos processos de mistura de diferentes fontes. Por exemplo, as profundidades rasas durante o período de vazante e a grande área de lagos de várzea favorecem condições para ressuspensão de sedimentos (Bourgoin et al., 2007). O mapeamento da clorofila em lagos de várzea mostrou maiores concentrações de pigmento durante a estação baixa (de Moraes Novo et al., 2006). As tendências no aumento da concentração de sedimentos nos rios foram associados a mudanças no uso da terra (Martinez et al., 2009) e o impacto da mineração (Lobo et al., 2015). Por outro lado, a construção das barragens de Santo Antônio e Jirau parece ter contribuído para a redução de concentração de sedimentos no rio Madeira (Latrubesse et al., 2017; Li et al., 2020).

### **Variação do armazenamento total de água**

Devido às grandes mudanças espaciais e temporais da água doce armazenada na superfície, zona radicular do solo e aquíferos, a Amazônia é o laboratório ideal para explorar as medições das variações do campo gravitacional da missão do satélite GRACE e derivar as variações do armazenamento total de água, ligadas à redistribuição da massa de água sobre as superfícies continentais. As primeiras estimativas derivadas do GRACE de variações de totais de água (Tapley et al., 2004) e mudanças de armazenamento de água subterrânea (Frappart et al., 2011) foram apresentadas para a Amazônia. A mudança na bacia é estimada em  $\sim 1800$ - $2700$  km<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> com diferentes contribuições de armazenamento de água superficial ( $\sim 49\%$ ), umidade do solo da zona radicular ( $\sim 27\%$ ) e água subterrânea ( $\sim 24\%$ ) (Frappart et al., 2019). O tempo de residência da água armazenada na bacia, ou seja, o tempo médio que a água permanece na bacia antes de sair por escoamento ou evapotranspiração, foi estimado em dois meses (Tourian et al., 2018). Os dados do GRACE ajudaram a monitorar períodos de secas extremas (por exemplo, 2009) e inundações (por exemplo, 2005, 2010), quantificar o déficit hídrico durante tais eventos (Frappart et al., 2012), compreender a dinâmica das águas subterrâneas em diferentes escalas e climas, e a interação entre várzeas e águas subterrâneas (Miguez-Macho & Fan, 2012).

### **Modelos hidrológicos e hidrodinâmicos**

Os dados de SR provaram ser um grande complemento para observações in situ que têm sido tradicionalmente usadas para calibrar/assimilar e validar modelos hidrológicos e hidrodinâmicos. No caso da bacia Amazônica, o desenvolvimento ou aplicação pioneira de modelos proporcionou maior compreensão dos sistemas em toda a bacia, o papel da água subterrânea no amortecimento hidrológico e dinâmica da bacia de cabeceira, e partição do armazenamento total de água. O estudo de Wilson et al. (2007) foi um dos primeiros modelos hidráulicos de grande escala desenvolvidos, enquanto que com o primeiro modelo hidrológico-hidrodinâmico de grande escala da bacia por Paiva et al. (2013)

foi possível representar processos físicos como os efeitos do remanso no rio principal e a atenuação da onda de inundação devido ao armazenamento de água nas várzeas. Aplicações de modelos bidimensionais em um trecho do rio Amazonas mostraram que a planície de inundação recebe grandes quantidades de água do rio, e pequenos aumentos no pico de vazão promovem grandes mudanças neste fluxo (Rudorff et al., 2014). Recentemente, Sorribas et al. (2020) estimaram, usando um modelo de rastreamento hidrológico inovador, os tempos de viagem das águas superficiais ao longo da bacia em 45 dias (mediana), com 20% das águas do rio Amazonas fluindo através de várzeas.

### Alterações ambientais

As técnicas de RS também foram importantes para entender como o ciclo hidrológico responde às alterações ambientais. Mudanças de longo prazo na descarga podem ser atribuídas a mudanças na cobertura da terra por meio de mudanças na ET, como mostrado pela primeira vez para o rio Tocantins (M. H. Costa et al., 2003). A vazão média anual aumentou 24% entre 1949-1986 e 1979-1998, associada ao aumento do uso da terra agrícola na bacia (de 30% para 49%). A presença da floresta foi estabelecida como importante para determinar os padrões de precipitação dentro e fora da região. As raízes profundas, o baixo albedo e as altas taxas de ET da floresta tropical induzem o início da estação chuvosa várias semanas antes do que seria sem ele, em um mecanismo denominado "*shallow convection moisture pump*" (Wright et al., 2017). As mudanças nos fluxos da superfície da terra causadas pelo desmatamento causaram reduções nos totais de precipitação, atrasos no início da estação chuvosa e estiagens mais longas durante a estação chuvosa, com consequências negativas para a geração de energia hidrelétrica, agricultura regional e a resiliência da própria floresta.

## REFERÊNCIAS

- Abril, G., Martinez, J. M., Artigas, L. F., Moreira-Turcq, P., Benedetti, M. F., Vidal, L., Meziane, T., Kim, J. H., Bernardes, M. C., Savoye, N., Deborde, J., Souza, E. L., Albéric, P., Landim De Souza, M. F., & Roland, F. (2014). Amazon River carbon dioxide outgassing fuelled by wetlands. *Nature*, 505(7483), 395–398. <https://doi.org/10.1038/nature12797>
- Alsdorf, D., Bates, P., Melack, J., Wilson, M., & Dunne, T. (2007). Spatial and temporal complexity of the Amazon flood measured from space. *Geophysical Research Letters*, 34(8), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2007GL029447>
- Alsdorf, D., Melack, J. M., Dunne, T., Mertes, L. A. K., Hess, L. L., & Smith, L. C. (2000). Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon flood plain. *Nature*, 404(March), 174–177. <https://doi.org/10.1038/35004560>
- Alsdorf, D., Tshimanga, R. M., & Moukandi, G. D. (Eds.). (2021). *Congo Basin Hydrology, Climate, and Biogeochemistry: A Foundation for the Future*. Wiley-AGU.
- Amaral, J. H. F., Melack, J. M., Barbosa, P. M., MacIntyre, S., Kasper, D., Cortés, A., Silva, T. S. F., Nunes de Sousa, R., & Forsberg, B. R. (2020). Carbon Dioxide Fluxes to the Atmosphere From Waters Within Flooded Forests in the Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125(3). <https://doi.org/10.1029/2019JG005293>
- Aragão, L. E. O. ., Malhi, Y., Barbier, N., Lima, A., Shimabukuro, Y., Anderson, L., & Saatchi, S. (2008). Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1498), 1779–1785. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.0026>
- Armijos, E., Crave, A., Espinoza, J. C., Filizola, N., Espinoza-Villar, R., Ayes, Fonseca, P., Fraizy, P., Gutierrez, O., Vauchel, P., Camenen, B., Martinez, J. M., Dos Santos, A., Santini, W., Cochonneau, G., & Guyot, J. L. (2020). Rainfall control on Amazon sediment flux: synthesis from 20 years of monitoring. *Environmental Research Communications*, 2(5), 051008. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab9003>
- Baker, J., Garcia-Carreras, L., Gloor, M., Marsham, J., Buermann, W., da Rocha, H., Nobre, A., de Araujo, A. C., & Spracklen, D. (2020). Evapotranspiration in the Amazon: spatial patterns, seasonality and recent trends in observations, reanalysis and CMIP models. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1–32. <https://doi.org/10.5194/hess-2020-523>
- Birkett, C. M., Mertes, L. A. K., Dunne, T., Costa, M. H., & Jasinski, M. J. (2002). Surface water dynamics in the

- Amazon Basin: Application of satellite radar altimetry. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 107(20). <https://doi.org/10.1029/2001JD000609>
- Bourgoin, L. M., Bonnet, M. P., Martinez, J. M., Kosuth, P., Cochonneau, G., Moreira-Turcq, P., Guyot, J. L., Vauchel, P., Filizola, N., & Seyler, P. (2007). Temporal dynamics of water and sediment exchanges between the Curuaí floodplain and the Amazon River, Brazil. *Journal of Hydrology*, 335(1–2), 140–156. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.11.023>
- Builes-Jaramillo, A., & Poveda, G. (2018). Conjoint Analysis of Surface and Atmospheric Water Balances in the Andes-Amazon System. *Water Resources Research*, 54(5), 3472–3489. <https://doi.org/10.1029/2017WR021338>
- Callède, J., Cochonneau, G., Alves, F. V., Guyot, J.-L., Guimarães, V. S., & De Oliveira, E. (2010). The River Amazon water contribution to the Atlantic Ocean. *Revue Des Sciences de l'eau*, 23(3), 247–273. <https://www.erudit.org/en/journals/rseau/2010-v23-n3-rseau3946/044688ar/abstract/>
- Chavez, S. P., & Takahashi, K. (2017). Orographic rainfall hot spots in the Andes-Amazon transition according to the TRMM precipitation radar and in situ data. In *Journal of Geophysical Research* (Vol. 122, Issue 11, pp. 5870–5882). <https://doi.org/10.1002/2016JD026282>
- Costa, M. (2005). Estimate of net primary productivity of aquatic vegetation of the Amazon floodplain using Radarsat and JERS-1. *International Journal of Remote Sensing*, 26(20), 4527–4536. <https://doi.org/10.1080/01431160500213433>
- Costa, M. H., Botta, A., & Cardille, J. A. (2003). Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *Journal of Hydrology*, 283(1–4), 206–217. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00267-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00267-1)
- de Moraes Novo, E. M. L., de Farias Barbosa, C. C., Freitas, R. M., Shimabukuro, Y. E., Melack, J. M., & Filho, W. P. (2006). Seasonal changes in chlorophyll distributions in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images. *Limnology*. <https://doi.org/10.1007/s10201-006-0179-8>
- dos Santos, E. S., Lopes, P. P. P., Pereira, H. H. da S., Nascimento, O. de O., Rennie, C. D., Sternberg, L. da S. L. O., & Cunha, A. C. da. (2018). The impact of channel capture on estuarine hydro-morphodynamics and water quality in the Amazon delta. *Science of the Total Environment*, 624, 887–899. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.211>
- Espinoza, J. C., Chavez, S., Ronchai, J., Junquas, C., Takahashi, K., & Lavado, W. (2015). Rainfall hotspots over the southern tropical Andes: Spatial distribution, rainfall intensity, and relations with large-scale atmospheric circulation. *Water Resources Research*, 1–27. <https://doi.org/10.1002/2015WR017096>. Received
- Fassoni-Andrade, A. C., Paiva, R. C. D., Rudorff, C. M., Barbosa, C. C. F., & Novo, E. M. L. de M. (2020). High-resolution mapping of floodplain topography from space: A case study in the Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 251, 112065. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112065>
- Ferreira-Ferreira, J., Silva, T. S. F., Streher, A. S., Affonso, A. G., De Almeida Furtado, L. F., Forsberg, B. R., Valsecchi, J., Queiroz, H. L., & De Moraes Novo, E. M. L. (2015). Combining ALOS/PALSAR derived vegetation structure and inundation patterns to characterize major vegetation types in the Mamirauá Sustainable Development Reserve, Central Amazon floodplain, Brazil. *Wetlands Ecology and Management*, 23(1), 41–59. <https://doi.org/10.1007/s11273-014-9359-1>
- Forsberg, B. R., Melack, J. M., Dunne, T., Barthem, R. B., Goulding, M., Paiva, R. C. D., Sorribas, M. V., Silva, U. L., & Weisser, S. (2017). The potential impact of new Andean dams on Amazon fluvial ecosystems. *PLoS ONE*, 12(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182254>
- Frappart, F., Papa, F., Güntner, A., Tomasella, J., Pfeffer, J., Ramillien, G., Emilio, T., Schiatti, J., Seoane, L., da Silva Carvalho, J., Medeiros Moreira, D., Bonnet, M. P., & Seyler, F. (2019). The spatio-temporal variability of groundwater storage in the Amazon River Basin. *Advances in Water Resources*, 124(October 2016), 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.12.005>
- Frappart, F., Papa, F., Güntner, A., Werth, S., Santos da Silva, J., Tomasella, J., Seyler, F., Prigent, C., Rossow, W. B., Calmant, S., & Bonnet, M. P. (2011). Satellite-based estimates of groundwater storage variations in large drainage basins with extensive floodplains. *Remote Sensing of Environment*, 115(6), 1588–1594. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.003>
- Frappart, F., Papa, F., Santos Da Silva, J., Ramillien, G., Prigent, C., Seyler, F., & Calmant, S. (2012). Surface freshwater storage and dynamics in the Amazon basin during the 2005 exceptional drought. *Environmental Research Letters*, 7(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044010>



- Guzkowska, M. A. J., Rapley, C. G., Ridley, J. K., Cudlip, W., Birkett, C. M., & Scott, R. F. (1990). *Developments in inland water and land altimetry: University College of London, Mullard Space Science Laboratory, European Space Agency final contract report 7839/88/F/Fl.*
- Hamilton, S. K., Sippel, S. J., & Melack, J. M. (2004). Seasonal inundation patterns in two large savanna floodplains of South America: The Llanos de Moxos (Bolivia) and the Llanos del Orinoco (Venezuela and Colombia). *Hydrological Processes*, 18(11), 2103–2116. <https://doi.org/10.1002/hyp.5559>
- Hess, L. L., Melack, J. M., Affonso, A. G., Barbosa, C., Gastil-Buhl, M., & Novo, E. M. L. M. (2015). Wetlands of the Lowland Amazon Basin: Extent, Vegetative Cover, and Dual-season Inundated Area as Mapped with JERS-1 Synthetic Aperture Radar. *Wetlands*, 35(4), 745–756. <https://doi.org/10.1007/s13157-015-0666-y>
- Hess, L. L., Melack, J. M., Novo, E. M. L. M. L. M., Barbosa, C. C. F. F., & Gastil, M. (2003). Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. *Remote Sensing of Environment*, 87(4), 404–428. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.04.001>
- Jimenez, J. C., Marengo, J. A., Alves, L. M., Sulca, J. C., Takahashi, K., Ferrett, S., & Collins, M. (2019). The role of ENSO flavours and TNA on recent droughts over Amazon forests and the Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology*, December, 1–20. <https://doi.org/10.1002/joc.6453>
- Junk, W. J., Piedade, M. T. F., Wittmann, F., Schöngart, J., & Parolin, P. (2010). Amazonian Floodplain Forests: Ecophysiology, ecology, biodiversity and sustainable management. In *Ecological Studies*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-8725-6>
- Latrubesse, E. M., Arima, E. Y., Dunne, T., Park, E., Baker, V. R., D’Horta, F. M., Wight, C., Wittmann, F., Zuanon, J., Baker, P. A., Ribas, C. C., Norgaard, R. B., Filizola, N., Ansar, A., Flyvbjerg, B., & Stevaux, J. C. (2017). Damming the rivers of the Amazon basin. In *Nature* (Vol. 546, Issue 7658, pp. 363–369). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/nature22333>
- Leite-Filho, A. T., Costa, M. H., & Fu, R. (2020). The southern Amazon rainy season: The role of deforestation and its interactions with large-scale mechanisms. *International Journal of Climatology*, 40(4), 2328–2341. <https://doi.org/10.1002/joc.6335>
- Leite, C. C., Costa, M. H., Soares-Filho, B. S., & De Barros Viana Hissa, L. (2012). Historical land use change and associated carbon emissions in Brazil from 1940 to 1995. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(2). <https://doi.org/10.1029/2011GB004133>
- Li, T., Wang, S., Liu, Y., Fu, B., & Gao, D. (2020). Reversal of the sediment load increase in the Amazon basin influenced by divergent trends of sediment transport from the Solimões and Madeira Rivers. *Catena*, 195(December 2019), 104804. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104804>
- Lobo, F., Costa, M. P. F., & Novo, E. M. L. M. (2015). Time-series analysis of Landsat-MSS/TM/OLI images over Amazonian waters impacted by gold mining activities. *Remote Sensing of Environment*, 157, 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.030>
- Lobón-Cerviá, J., Hess, L. L., Melack, J. M., & Araujo-Lima, C. A. R. M. (2015). The importance of forest cover for fish richness and abundance on the Amazon floodplain. *Hydrobiologia*, 750, 245–255. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2040-0>
- Maeda, E. E., Ma, X., Wagner, F. H., Kim, H., Oki, T., Eamus, D., & Huete, A. (2017). Evapotranspiration seasonality across the Amazon Basin. *Earth System Dynamics*, 8(2), 439–454. <https://doi.org/10.5194/esd-8-439-2017>
- Marengo, J. A., & Espinoza, J. C. (2016). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1033–1050. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>
- Marengo, J. A., Souza, C. M., Thonicke, K., Burton, C., Halladay, K., Betts, R. A., Alves, L. M., & Soares, W. R. (2018). Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. *Frontiers in Earth Science*. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>
- Martinez, J. M., Guyot, J. L., Filizola, N., & Sondag, F. (2009). Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. *Catena*, 79(3), 257–264. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.011>
- Melack, J. M., & Forsberg, B. R. (2001). The Biogeochemistry of the Amazon Floodplain Lakes and Associated Wetlands. In *The Biogeochemistry of the Amazon Basin and its Role in a Changing World* (pp. 235–276).
- Melack, J. M., Hess, L. L., Gastil, M., Forsberg, B. R., Hamilton, S. K., Lima, I. B. T., & Novo, E. M. L. M. (2004). Regionalization of methane emissions in the Amazon Basin with microwave remote sensing. *Global Change Biology*, 10, 530–544. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00763.x>

- Mertes, L. A. K., Daniel, D. L., Melack, J. M., Nelson, B., Martinelli, L. A., & Forsberg, B. R. (1995). Spatial patterns of hydrology, geomorphology, and vegetation on the floodplain of the Amazon river in Brazil from a remote sensing perspective. *Geomorphology*, *13*(1–4), 215–232. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00038-7](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00038-7)
- Mertes, L. A. K., Dunne, T., & Martinelli, L. A. (1996). Channel-floodplain geomorphology along the Solimoes-Amazon River, Brazil. *Bulletin of the Geological Society of America*, *108*(9), 1089–1107. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1996\)108<1089:CFGATS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1996)108<1089:CFGATS>2.3.CO;2)
- Mertes, L. A. K., Smith, M. O., & Adams, J. B. (1993). Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon river wetlands from landsat images. *Remote Sensing of Environment*, *43*(3), 281–301. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90071-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90071-5)
- Miguez-Macho, G., & Fan, Y. (2012). The role of groundwater in the Amazon water cycle: 1. Influence on seasonal streamflow, flooding and wetlands. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *117*(15), 1–30. <https://doi.org/10.1029/2012JD017539>
- Nagy, L., Artaxo, P., & Forsberg, B. R. (2016). *Interactions between Biosphere, Atmosphere and Human Land Use in the Amazon Basin* (L. Nagy, P. Artaxo, & B. R. Forsberg (Eds.); 1st ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49902-3>
- Paiva, R. C. D. de, Buarque, D. C., Clarke, R. T., Collischonn, W., & Allasia, D. G. (2011). Reduced precipitation over large water bodies in the Brazilian Amazon shown from TRMM data. *Geophysical Research Letters*, *38*(4). <https://doi.org/10.1029/2010GL045277>
- Paiva, R. C. D. de, Buarque, D. C., Collischonn, W., Bonnet, M. P., Frappart, F., Calmant, S., & Bulhões Mendes, C. A. (2013). Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. *Water Resources Research*, *49*(3), 1226–1243. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20067>
- Park, E. (2020). Characterizing channel-floodplain connectivity using satellite altimetry: Mechanism, hydrogeomorphic control, and sediment budget. *Remote Sensing of Environment*, *243*(February), 111783. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111783>
- Rudorff, C. M., Melack, J. M., & Bates, P. D. (2014). Flooding dynamics on the lower Amazon floodplain: 2. Seasonal and interannual hydrological variability. *Water Resources Research*, *50*(1), 635–649. <https://doi.org/10.1002/2013WR014714>
- Satyamurty, P., da Costa, C. P. W., Manzi, A. O., & Candido, L. A. (2013). A quick look at the 2012 record flood in the Amazon Basin. *Geophysical Research Letters*, *40*(7), 1396–1401. <https://doi.org/10.1002/grl.50245>
- Silva, M. P. da, Sander de Carvalho, L., Novo, E., Jorge, D., & Barbosa, C. (2019). Use of absorption optical indices to assess seasonal variability of dissolved organic matter in Amazon floodplain lakes. *Biogeosciences Discussions*, 1–20. <https://doi.org/10.5194/bg-2019-324>
- Sippel, S. J., Hamilton, S. K., & Melack, J. (1992). Inundation area and morphometry of lakes on the Amazon River floodplain, Brazil. *Archiv Für Hydrobiologie*, *123*, 385–400.
- Sippel, S. J., Hamilton, S. K., Melack, J. M., & Choudhury, B. J. (1994). Determination of inundation area in the Amazon River floodplain using the SMMR 37 GHz polarization difference. *Remote Sensing of Environment*, *48*(1), 70–76. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90115-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90115-5)
- Tapley, B. D., Bettadpur, S., Ries, J. C., Thompson, P. F., & Watkins, M. M. (2004). GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science*, *305*(5683), 503–505. <https://doi.org/10.1126/science.1099192>
- Tourian, M. J., Reager, J. T., & Sneeuw, N. (2018). The Total Drainable Water Storage of the Amazon River Basin: A First Estimate Using GRACE. *Water Resources Research*, *54*(5), 1–27. <https://doi.org/10.1029/2017WR021674>
- Trigg, M. A., Bates, P. D., Wilson, M. D., Schumann, G., & Baugh, C. (2012). Floodplain channel morphology and networks of the middle Amazon River. *Water Resources Research*, *48*(10), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2012WR011888>
- Wilson, M. D., Bates, P., Alsdorf, D., Forsberg, B., Horritt, M., Melack, J., Frappart, F., & Famiglietti, J. (2007). Modeling large-scale inundation of Amazonian seasonally flooded wetlands. *Geophysical Research Letters*, *34*(15), 4–9. <https://doi.org/10.1029/2007GL030156>
- Wright, J. S., Fu, R., Worden, J. R., Chakraborty, S., Clinton, N. E., Risi, C., Sun, Y., & Yin, L. (2017). Rainforest-initiated wet season onset over the southern Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *114*(32), 8481–8486. <https://doi.org/10.1073/pnas.1621516114>