

HIDROLOGIA da AMAZÔNIA
AVANÇOS CIENTÍFICOS E DESAFIOS FUTUROS
ONIAVISTA do ESPAÇO

ORGANIZADORES

ALICE Fassoni-Andrade – **AYAN** Fleischmann – **FABRICE** Papa
RODRIGO Paiva – **SLY** Wongchuig – **JOHN** Melack

HIDROLOGIA da AMAZÔNIA VISTA do ESPAÇO

AVANÇOS CIENTÍFICOS E DESAFIOS FUTUROS

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Hidrologia da Amazônia vista do espaço [livro eletrônico] : avanços científicos e desafios futuros / organizadores Alice Fassoni-Andrade... [et al.] ; [coordenação] Alice César Fassoni-Andrade ; tradução Hilcéa Ferreira. -- Porto Alegre, RS : ABRHidro, 2023.
PDF

Vários autores.

Outros organizadores: Ayan Fleischmann, Fabrice Papa, Rodrigo Paiva, Sly Wongchuig, John Melack.

Título original: Amazon hydrology from space : scientific advances and future challenges.

Bibliografia.

ISBN 978-85-88686-48-9

1. Amazônia 2. Amazônia - Aspectos ambientais
3. Hidrologia 4. Sensoriamento remoto I.
Fassoni-Andrade, Alice. II. Fleischmann, Ayan. III.
Papa, Fabrice. IV. Paiva, Rodrigo. V. Wongchuig, Sly.
VI. Melack, John.

23-170901

CDD-574.52642

Índices para catálogo sistemático:

1. Hidrologia florestal : Planejamento : Ecologia
574.52642

Tábata Alves da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9253

Foto da capa: Parque Nacional de Anavilhanas, Amazonas. A imagem não pode ser reproduzida em nenhuma hipótese. **Crédito:** ©SebastiãoSalgado.

Fotos das páginas 8, 9, 16 e 17: Thiago Laranjeira.

Coordenação: Alice César Fassoni-Andrade.

Tradução: Hilcéa Ferreira.

Revisão: Alice César Fassoni-Andrade, Ayan Santos Fleischmann, Evlyn Novo, Sly Wongchuig, John Melack, Adriana Aparecida Moreira, Adrien Paris, Cláudio Barbosa, Daniel Andrade Maciel, Gabriel Medeiros Abrahão, Jefferson Ferreira-Ferreira, Leonardo Laipelt, Marcos Heil Costa.

Projeto gráfico, capa e diagramação: Rebeca Medeiros de Andrade Eugênio - BRAVA DESIGN.



Autores

**Alice César
Fassoni-Andrade**

Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Universidade Federal do Rio Grande do
Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil.

**Ayan Santos
Fleischmann**

Instituto de Desenvolvimento
Sustentável Mamirauá, Tefé, AM, Brasil.

Fabrice Papa

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

Rodrigo Paiva

Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Universidade Federal do Rio Grande do
Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil.

Sly Wongchuig

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

John Melack

Earth Research Institute, University of
California, Santa Barbara.

- Adriana Aparecida Moreira** Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil.
- Adrien Paris** Hydro Matters, 1 chemin de la Pousaraque, 31460 Le Faget, France.
- Anderson Ruhoff** Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil.
- Claudio Barbosa** Laboratório de Instrumentação de Sistemas Aquáticos (LabISA), Coordenação de Observação da Terra (OBT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, Brasil.
- Daniel Andrade Maciel** Laboratório de Instrumentação de Sistemas Aquáticos (LabISA), Coordenação de Observação da Terra (OBT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, Brasil.
- Evlyn Novo** Laboratório de Instrumentação de Sistemas Aquáticos (LabISA), Coordenação de Observação da Terra (OBT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, Brasil.
- Fabien Durand** Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS), Université Toulouse, IRD, CNRS, CNES, UPS, Toulouse, France.
- Frédéric Frappart** INRAE, UMR1391 ISPA, Université de Bordeaux, F-33140 Villenave d'Ornon, France.

Filipe Aires	Laboratoire d'Etudes du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique et Atmosphères, Observatoire de Paris, UMR 8112, Paris, France.
Gabriel Medeiros Abrahão	Potsdam Institute for Climate Impact Research, Member of the Leibniz Association, Potsdam, Germany.
Jefferson Ferreira-Ferreira	World Resources Institute Brasil, São Paulo, Brasil
Jhan Carlo Espinoza	Université Grenoble Alpes, IRD, CNRS, G-INP, IGE (UMR 5001), Grenoble, France.
Leonardo Laipelt	Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil.
Marcos Heil Costa	Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG, Brasil.
Raul Espinoza-Villar	Departamento de Ordenamiento Territorial y Construcción, Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Av. La Molina s/n Lima 12, Perú.
Stéphane Calmant	Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS), Université Toulouse, IRD, CNRS, CNES, UPS, Toulouse, France.
Victor Pellet	Laboratoire d'Etudes du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique et Atmosphères, Observatoire de Paris, UMR 8112, Paris, France.



Apresentação

A ideia de compilar os estudos relacionados ao ciclo hidrológico da bacia Amazônica e ao sensoriamento remoto surgiu em 2020 por um grupo de doutorandos e professores do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH - UFRGS). Cada um era especialista em uma área e não parecia complicado escrever um artigo de revisão. Quando a ideia saiu do papel, outros pesquisadores e colegas, principalmente do IRD e INPE, já estavam envolvidos e animados. Assim, durante a pandemia de COVID-19, um artigo científico foi tomando forma. Cada grupo escreveu um capítulo e pelo menos um autor de outro grupo revisou o manuscrito. Foi um grande desafio escrever o artigo mantendo uma estrutura uniforme nos capítulos, mas o final é enriquecedor: uma coletânea mostrando como a Amazônia foi importante para o desenvolvimento do sensoriamento remoto da hidrologia e as descobertas sobre a hidrologia da Amazônia vista do espaço. Optamos por não fazer uma revisão sistemática, então o leitor pode sentir falta de alguns trabalhos.

Após a publicação do artigo *Amazon Hydrology From Space: Scientific Advances and Future Challenges* no jornal *Review of Geophysics*

(Fassoni-Andrade et al., 2021b), ficamos animados em traduzi-lo para o português e disponibilizar um livro para a comunidade brasileira. Novamente optamos pela tradução sem adicionar novas referências. O leitor também vai notar que nos referimos à missão SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*) como uma missão futura, apesar de o satélite ter sido lançado em 16 de dezembro de 2022 – os dados desta missão só deverão estar disponíveis para a comunidade científica no final de 2023.

Agradecemos à Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH) e ao Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (IDSMA) por tornarem o livro possível a partir do patrocínio da tradução e da diagramação. A ocorrência da exposição “Amazônia” do fotógrafo Sebastião Salgado em 2022 no Brasil também foi ideal para encontrarmos a foto de capa do livro. Generosamente, o fotógrafo permitiu o uso da foto sem custos. Também agradecemos a outros pesquisadores e instituições por terem fornecido fotos e dados para este livro: Thiago Laranjeiras, Mark Trigg, Conrado Rudorff e IDSMA.

O artigo foi escrito quando diversos rios da bacia Amazônica passaram por uma das maiores cheias já registradas (2021) e o desmatamento e os incêndios aumentaram. Em contraste, o livro está sendo publicado quando uma seca muito forte novamente assola grandes partes da bacia. Essas preocupações ressaltam a nossa principal conclusão após a compilação dos estudos: muitas técnicas de sensoriamento remoto já foram desenvolvidas. Agora é urgente avançar na aplicação dessas técnicas para entender as mudanças ambientais e auxiliar os tomadores de decisões.

Esperamos que esse livro entusiasme e motive estudantes a investigar a bacia Amazônica e o ciclo da água por sensoriamento remoto. Também esperamos que esse livro contribua para a conservação da sociobiodiversidade e desenvolvimento sustentável da Amazônia.

Boa leitura,

**Alice Fassoni-Andrade,
Ayan Fleischmann,
Fabrice Papa,
Rodrigo Paiva,
Sly Wongchuig,
John Melack.**



Prefácio

Fiquei muito grata pelo convite para escrever o prefácio desse livro organizado e escrito por ilustres jovens pesquisadores, senão literalmente, mas metafóricamente porque todos que aceitaram essa empreitada tem coração e energia de estudantes.

O livro *Hidrologia da Amazônia vista do espaço: avanços científicos e desafios futuros* começou em 2020 com os organizadores, ainda ao início da pandemia, nos desafiando a preparar uma revisão de literatura em nossos diferentes campos de pesquisa para avaliar a contribuição do sensoriamento remoto por satélite para o avanço do conhecimento sobre o ciclo da água na Amazônia, nas últimas décadas. Depois de um grande esforço conjunto, a revisão foi publicada na *Reviews of Geophysics, em 2021: Amazon hydrology from space: scientific advances and future challenges*.

E quanto aos inúmeros alunos brasileiros que não dominam o inglês? Seriam mais uma vez barrados do banquete do conhecimento? Afinal, língua é matéria, é a pátria e a fratria que todos queremos, porque no princípio era o verbo, e o verbo cria realidades quando assimilado animicamente.

Em 2022, os organizadores vieram com nova investida para traduzir o artigo. O texto em português é mais orgânico e de fácil assimilação para os que não estão familiarizados com a ciência e os métodos de sensoriamento remoto e nem com as diferentes abordagens em que podem ser usados para o estudo e monitoramento do ciclo da água na Amazônia. O livro tem agora 226 páginas, 13 capítulos, 8 tabelas, 14 figuras em que são apresentadas, de maneira fundamentada e crítica, as principais contribuições de tecnologia de sensoriamento remoto para a quantificação dos componentes fundamentais do ciclo da água, a descrição das condições de contorno de diferentes tipos de modelos e do papel que a modelagem hidrológica e o desenvolvimento de produtos de sensoriamento remoto têm se retroalimentado e contribuído para o avanço mútuo.

O livro conclui com um capítulo de síntese dos avanços científicos e futuros desafios, organizada em tópicos que enfatizam a relevância da Amazônia como um laboratório para o sensoriamento remoto aplicado a compreensão do ciclo da água. O que foi aprendido e desenvolvido para a Amazônia pode contribuir para que o conhecimento científico e metodológico alcançado seja aplicado a outras grandes bacias tropicais do planeta, inserindo esses jovens nas redes de pesquisa globais.

Eu quero em nome dos organizadores parabenizar a todos que dedicaram tempo e esforço para que esse livro viesse a público. Tenho certeza de que ele despertará o interesse de alunos de graduação que se motivarão a seguir carreira científica. Esses novos cientistas poderão se beneficiar da grande janela de oportunidade que o século XXI trouxe para as pesquisas de águas continentais, com o desenvolvimento de sensores cada vez mais bem especificados para cobrir as lacunas tecnológicas que limitavam sua aplicação, exceto em grandes bacias.

Enquanto lia o livro, eu me lembrei das imagens do NOAA com a cobertura de nuvens da superfície terrestre eram transmitidas via telefone e impressas em equipamento que depois ficou conhecido por FAX na segunda metade do século 20. Era um universo totalmente analógico ainda. Eu viria a trabalhar com um sistema de processamento de imagens digitais apenas em 1976. Era o único da América Latina a processar imagens digitais do Landsat-1 e os alunos da pós-graduação precisavam agendar horários na madrugada para poder usar o sistema Image-100. Senti-me feliz por ter conseguido acompanhar tão grande avanço tecnológico. E me senti triste ao pensar que o subproduto desse avanço não significou segurança alimentar e hídrica, não evitou as mudanças climáticas e os desastres naturais que assolam o planeta e nos alertam sobre o risco de extinção do mundo como o conhecemos agora. Mas não perdi a esperança, porque me lembrei de quem fui ao iniciar o mestrado e sei que embora não tenha mais o vigor para participar dessa nova era de descobertas, deixo a cena sabendo que há jovens que irão ampliar as aplicações de sensoriamento remoto por satélite para compreender as mudanças do planeta, propor medidas de mitigação, monitorar sua regeneração até que ela volte a ser a Terra que jorra leite e mel.

Dra. Evelyn Novo

*Pesquisadora do Instituto Nacional
de Pesquisas Espaciais (INPE)*

02

Prefácio



Neste livro de revisão, os autores destacam aplicações em que os dados de sensoriamento remoto podem ser usados para fomentar a compreensão do ciclo da água na Amazônia e suas implicações para o entendimento de outras bacias no mundo inteiro. Os dados de sensoriamento remoto ajudaram na compreensão de múltiplos aspectos da hidrologia da região. Embora o uso de dados fluviais tenha permitido a identificação de secas e inundações desde o início dos anos 1900, o uso satélite ajudou a identificar as tendências recentes das chuvas e outros componentes do ciclo da água. Por exemplo, o GRACE tem sido utilizado na avaliação do armazenamento total de água e águas subterrâneas, muito útil nos estudos de secas e enchentes na Amazônia. Os autores se referem à bacia Amazônica como um laboratório de sensoriamento remoto, caracterizado por fortes sinais hidrológicos na precipitação, evapotranspiração, mudança no armazenamento de água e vazão. A bacia é o ambiente ideal para o desenvolvimento de técnicas remotas e suas aplicações para fomentar nossa compreensão dos processos hidrológicos.

O mapeamento da inundação em larga escala e a caracterização da dinâmica dos sedimentos também se beneficiou em grande parte das técnicas de sensoriamento remoto. Uma questão importante deste livro é o crescimento da colaboração entre a comunidade de cientistas com diferentes interesses e visões sobre o ciclo hidrológico da Amazônia usando dados de superfície e derivados de satélite sobre o ciclo hidrológico da Amazônia. Conjuntos de dados como CMAP, CPC, CHIRPS, GPCP, CMORPH, ERA-5, MERRA-2, PERSIANN, SM2RAIN, GSMaP, MOD16, SEBS, GLEAM, Hydroweb, G-REALM, DAHITI, GRRATS, e Hidrosat, entre outros, que são derivados de missões de satélite que fornecem estimativas de precipitação, evapotranspiração e qualidade da água superficial e da água. Muitas delas têm sido utilizadas em estudos sobre a variabilidade climática e o ciclo da água na região amazônica.

Particularmente, tem havido uma grande contribuição para a compreensão da dinâmica das chuvas. Devido a sua grande extensão, os regimes de precipitação na bacia Amazônica diferem de uma região para outra em termos de padrão sazonal, dependendo dos padrões de circulação que fazem com que os regimes de precipitação sejam altamente variáveis no espaço. Vários estudos têm sido realizados para estudar a variabilidade e as tendências pluviométricas em toda a região. No entanto, esses resultados são baseados em pluviômetros que muitas vezes mostram falta de homogeneidade e cobertura espaço-temporal incompleta. Em muitos lugares as estações pluviométricas estão nas cidades, situadas perto dos principais afluentes. Vários bases de dados de precipitação em grade e de reanálise ficaram disponíveis nas últimas décadas, e eles utilizam a precipitação observada derivada de produtos de sensoriamento remoto. Estes produtos fornecem estimativas usando diferentes técnicas e sensores e permitiram identificar as características pluviométricas em grandes regiões da Amazônia onde os pluviômetros são muito esparsos. Os produtos de sensoriamento remoto para identificar a variabilidade dos ciclos hidrológicos e de CO₂, juntamente com a implementação de torres de fluxo, permitiram melhores estudos sobre o carbono, a variabilidade hidrológica e o balanço hídrico.

Finalmente, os autores também discutem as lacunas de conhecimento e oportunidades de pesquisa sobre as águas da Amazônia e discutem como avançar dos avanços científicos para uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos. Novas missões espaciais e produtos derivados delas serão úteis para futuros estudos sobre o ciclo da água na Amazônia, particularmente com medo de que a bacia Amazônica ultrapasse um tipping point que pode levar a um colapso da floresta e a uma perigosa mudança climática regional e global.

Dr. Jose A. Marengo

*Coordenador Geral de Pesquisa e Desenvolvimento,
Centro Nacional de Monitoramento e Alerta
de Desastres Naturais (Cemaden)*

03

Prefácio



O sensoriamento remoto do ciclo da água na Amazônia transformou nosso entendimento da bacia ao longo dos últimos trinta anos. Como resultado dos esforços de vários pesquisadores, grupos e instituições, temos agora uma visão profunda e rica de como funciona a bacia que não pode ser igualada a nenhum dos outros grandes sistemas fluviais do mundo. Agora podemos mapear as chuvas, evapotranspiração, níveis da água de rios e planícies de inundação, armazenamento e umidade do solo em detalhes e de maneiras que não são possíveis apenas a partir de observações in situ. Mais do que isso, a bacia hidrográfica tem funcionado como um laboratório natural para o desenvolvimento de novas técnicas de sensoriamento remoto e modelagem que passaram a ter impacto global. Por exemplo, a bacia Amazônica tem servido como campo de prova para estudos pioneiros que têm demonstrado como a elevação da superfície da água pode ser recuperada usando altímetros de radar, e posteriormente estas técnicas têm sido usadas globalmente para entender uma quantidade inumerável de sistemas de rios, lagos e pântanos. Da mesma forma, a Amazônia central foi o local em que foram desenvolvidos os primeiros modelos hidrodinâmicos em larga escala, e as lições aprendidas são agora aplicadas para mapear o risco de inundação globalmente, impactando assim a vida de um número significativo de pessoas. Seria razoável pensar que documentar o grande volume de estudos de pesquisa hidrológica realizados na bacia seria uma tarefa intransponível, mas é exatamente isso que esse artigo atinge. Os autores fizeram uma revisão da pesquisa hidrológica espacial na bacia Amazônica que é equilibrada, detalhada e abrangente e, ao fazê-lo, prestaram um grande serviço para sua comunidade.

Dr. Paul Bates
*University of Bristol,
Reino Unido*



Sumário

01	Introdução	18
02	Precipitação	24
03	Evapotranspiração	40
04	Nível da Água	51
05	Extensão de Águas Superficiais	62
06	Topografia dos lagos e canais da planície de inundação	74
07	Cor da água: sedimentos, clorofila e matéria orgânica dissolvida colorida	79

08	Armazenamento total de água e armazenamento de águas subterrâneas	88
09	Balanço hídrico	95
10	Modelagem do ciclo hidrológico da Amazônia e suas áreas úmidas	102
11	Ecosistemas Aquáticos	115
12	Mudanças ambientais	122
13	Síntese dos avanços científicos, desafios futuros e prioridades	132
	Referências	166



01 Introdução

Alice Fassoni-Andrade

Ayan Fleischmann

Fabrice Papa

Rodrigo Paiva

Sly Wongchuig

John Melack

A bacia do rio Amazonas é um importante sistema hidrológico (~6 milhões de km² de área de drenagem) com diversos rios, várzeas e áreas alagáveis (Junk et al., 2011; Reis et al., 2019; **Figura 1**). Ela abrange sete países e abriga quatro dos dez maiores rios do mundo, a saber, os rios Solimões-Amazonas*, Madeira, Negro e Japurá (**Figura 2**), recebendo alta precipitação anual (~2200 mm por ano, Builes-Jaramillo e Poveda, 2018; Espinoza et al., 2009). Cerca de 30-40% da precipitação na bacia é reciclada pela evapotranspiração local (Eltahir e Bras, 1994; Salati et al., 1979; Satyamurty et al., 2013a), fornecendo umidade a partes do sul da América do Sul. O rio Amazonas flui para o Oceano Atlântico com uma vazão média anual de 206000 m³s⁻¹ (Callède et al., 2010), totalizando quase 20% do total da água doce global que chega ao oceano anualmente e exporta uma grande quantidade de sedimentos para o oceano (1,1 bilhão de toneladas por ano; Armijos et al., 2020).

As altas taxas de precipitação, evapotranspiração e grandes variações no armazenamento de água doce e vazão fazem da bacia Amazônica uma peça-chave no sistema climático global, com grandes contribuições para os ciclos da água, energia e carbono (Gash et al., 2013; Gatti et al., 2021; Nagy et al., 2016). As águas superficiais da Amazônia, por exemplo, são uma importante fonte e sumidouro de dióxido de carbono (Abril et al., 2014; Amaral et al., 2020; Guilhen et al., 2020; Raymond et al., 2013; Richey et al., 2002) e a maior fonte natural de metano nos trópicos (Kirschke et al., 2013; Melack et al., 2004; Pangala et al., 2017; Pison et al., 2013). As variações sazonais da água contribuem para a formação de florestas tropicais (Leite et al., 2012), mantêm alta produtividade aquática (Melack e Forsberg, 2001) e biodiversidade (Junk, 1997; Junk et al., 2010), e influenciam a distribuição dos peixes e a produção pesqueira (Junk et al., 2010; Lobón-Cerviá et al., 2015; **Figura 1**). A bacia abriga ~40% da floresta tropical mundial e ~15% da biodiversidade terrestre global (Marengo et al., 2018), e é também lar das populações humanas ribeirinhas que dependem dos rios para transporte e utilizam esses ambientes para sua subsistência (Anderson et al., 1991; Campos-Silva et al., 2020; Endo et al., 2016). A Amazônia também atende à população sul-americana em geral em termos de energia, alimentos e outros produtos florestais, além da manutenção de processos climáticos.

*O rio Solimões-Amazonas é chamado rio Solimões antes da confluência com o rio Negro, a partir do qual é chamado rio Amazonas até o oceano.



Figura 1: Diversidade da bacia do rio Amazonas. (a) Imagem da missão espacial MODIS da parte central da bacia, caracterizada por grandes planícies aluviais (Fonte: catálogo da *National Aeronautics and Space Administration* - NASA; <https://visibleearth.nasa.gov/images/62101/the-amazon-Brasil/62104/>); (b) Imagem da missão espacial Sentinel-1 dos rios e lagos do alto rio Solimões (Fonte: catálogo da ESA; https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/09/Amazon_River/); (c) Imagem MODIS mostrando a reduzida cobertura de nuvens sobre corpos de água (Fonte: catálogo da NASA; <https://earthobservatory.nasa.gov/images/145649/mapping-the-amazon/>); (d) Vista aérea do rio Branco (Foto de Thiago Laranjeira); (e) Planície de inundação durante a época de águas altas (Foto de João Paulo Borges Pedro); (f) Canal de várzea na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (Foto de Jefferson Ferreira-Ferreira); (g) Comunidade na margem do rio (Foto de Thiago Laranjeira); (h) Manatins ou Peixe-boi (Foto de Amanda Lelis); (i) Pirarucu, o maior peixe de água doce com escamas do mundo (Foto de Bernardo Oliveira).

A região tem enfrentado múltiplos riscos devido às mudanças climáticas e antropogênicas, e as mudanças na hidrologia amazônica podem ter impactos substanciais a nível global (Jimenez et al., 2019). Nas últimas décadas, a bacia sofreu vários eventos climáticos intensos, como secas e enchentes extremas, sem equivalente nos últimos 100 anos (Barichivich et al., 2018; Marengo e Espinoza, 2016). Secas severas podem levar a perturbações ambientais, desde o aumento da ocorrência de incêndios (Zeng et al., 2008) até mudanças abruptas nos cardumes de peixes (Röpke et al., 2017). Além disso, os impactos negativos acumulados do aumento das intervenções humanas em toda a região, como barragens (Forsberg et al., 2017; Latrubesse et al., 2017), desmatamento (Arias et al., 2020; Coe et al., 2009; Gutierrez-Cori et al., 2021; Leite-Filho et al., 2020; Leite et al., 2012), incêndios (Aragão et al., 2008; Libonati et al., 2021; Xu et al., 2020; Zeng et al., 2008), e mineração (Abe et al., 2019; Lobo et al., 2015), possivelmente desencadearão grandes modificações que podem afetar o ciclo hidrológico da Amazônia.

A caracterização e compreensão do ciclo da água na Amazônia é primordial para as pesquisas climática e ecológica e para a gestão dos recursos hídricos. Consequentemente, é necessário um monitoramento abrangente da dinâmica espaço-temporal dos componentes do ciclo da água e de como eles interagem com a variabilidade climática e as pressões antropogênicas. Em bacias hidrográficas tropicais grandes e remotas como a Amazônica, as redes de observações *in situ* são difíceis de operar e manter, e as observações de sensoriamento remoto trouxeram grandes oportunidades para o monitoramento dos diversos componentes do ciclo da água, embora muitos desafios técnicos ainda precisem ser superados.

Durante as últimas décadas, enquanto a bacia Amazônica esteve no centro das discussões científicas internacionais, o entendimento da hidrologia amazônica coevoluiu com outro campo inovador: o sensoriamento remoto (SR) do ciclo

da água terrestre. Nesse contexto, a bacia Amazônica tem sido um laboratório natural ideal para o desenvolvimento seminal de técnicas de SR com o advento da observação da Terra por satélites. Esses avanços têm fomentado a compreensão científica da hidrologia amazônica, dos ecossistemas e das mudanças ambientais em curso. Por exemplo, as primeiras aplicações dos satélites altimétricos e gravimétricos para caracterizar, respectivamente, a elevação das águas superficiais (Guzkowska et al., 1990) e as variações totais de armazenamento de água (Tapley et al., 2004) foram realizadas na bacia devido à largura do rio e às grandes mudanças espaciais e temporais da água doce. As aplicações pioneiras de SR também incluem micro-ondas, radar de abertura sintética e mapeamento interferométrico de inundações em grande escala e caracterização da dinâmica de sedimentos (Alsdorf et al., 2000; Hess et al., 2003; Mertes et al., 1993; Sippel et al., 1994). Desde então, várias aplicações usando dados de SR foram realizadas em outras bacias em todo o mundo (por exemplo, Alsdorf et al., 2021). Todos esses avanços importantes foram conquistados por uma comunidade diversificada de cientistas com diferentes interesses e visões sobre o ciclo da água Amazônica e, surpreendentemente, até a presente data não havia uma revisão abrangente que analisasse o crescimento contínuo de publicações que fazem uso de observações de SR para estudar a hidrologia da região.

Neste livro, apresentamos uma extensa revisão das conquistas de mais de três décadas de avanços científicos sobre a hidrologia da bacia Amazônica utilizando SR (Figura 2). Apresentamos também perspectivas, atualmente propiciadas por uma disponibilidade sem precedentes de observações da Terra e o lançamento iminente de satélites dedicados à hidrologia, tais como o SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*) e a missão NASA-ISRO SAR (NISAR). Este trabalho reuniu especialistas em SR de diferentes processos hidrológicos da bacia Amazônica para rever tópicos específicos e discutir caminhos para os avanços científicos, assim como as oportunidades que moldam essa área para as próximas décadas. As revisões levaram em conta variáveis do ciclo hidrológico, como precipitação, evapotranspiração, elevação e extensão de águas superficiais, topografia da planície de inundação e dos canais fluviais, qualidade da água (por exemplo, estimativa de sedimentos, clorofila e matéria orgânica dissolvida), armazenamento total de água e de águas subterrâneas, que são apresentados em capítulos separados (Figura 2). Cada capítulo descreve como a variável é estimada por meio do SR, apresenta os avanços científicos que foram alcançados a partir dessas informações, bem como várias aplicações desenvolvidas para a bacia, discutindo os desafios futuros. Em seguida, quatro capítulos são dedicados à integração de dados de SR nas seguintes áreas: análise

de balanço hídrico, modelagem hidrológica e hidráulica, ecossistemas aquáticos e mudanças ambientais na Amazônia. O capítulo 13 resume os avanços científicos, as lacunas de conhecimento e as oportunidades de pesquisa sobre a hidrologia e os ecossistemas da Amazônia, incluindo as próximas missões de observação da Terra. Este capítulo também aborda como as lições aprendidas com as experiências na Amazônia estão beneficiando outras grandes bacias hidrográficas em todo o mundo. O final do capítulo 13 discute como ir dos avanços científicos desenvolvidos para um planejamento efetivo de recursos hídricos em escala de bacia, bem como as novas ferramentas de monitoramento ambiental disponíveis, destacando nossas recomendações para a agenda de pesquisa da hidrologia amazônica a partir do espaço para a próxima década.

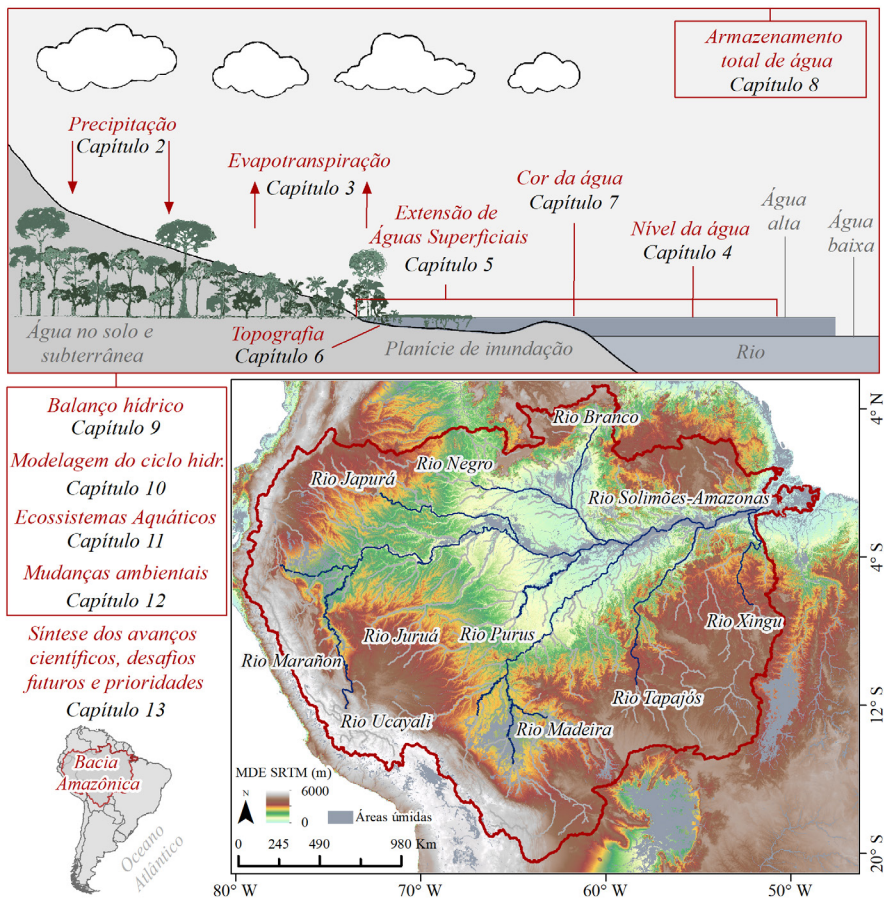


Figura 2: Localização da bacia Amazônica na América do Sul e representação das variáveis hidrologicas observadas pelas técnicas de SR, com os respectivos números dos capítulos deste livro.



02
Precipitação

Sly Wongchuig
Jhan Carlo Espinoza
Gabriel Medeiros Abrahão

A precipitação é uma componente crucial do ciclo da água (Bookhagen e Strecker, 2008; Espinoza Villar et al., 2009b; Salati e Vose, 1984; Trenberth, 2011), caracterizada por alta variabilidade espacial e temporal. Na bacia Amazônica, a precipitação está relacionada às complexas interações de vários processos físicos e dinâmicos de grande escala, bem como às características locais, que são responsáveis pela distribuição temporal e espacial da precipitação (Figuroa e Nobre, 1990). Por exemplo, além das chuvas orográficas que ocorrem na transição entre a Cordilheira dos Andes e a Amazônia, a transpiração substancial da floresta contribui para abundantes fluxos de água para a atmosfera, que eventualmente retornam à terra como precipitação reciclada, contribuindo com até 30% da precipitação da bacia (Bosilovich e Chern, 2006; Eltahir e Bras, 1994; Fisher et al., 2009; Salati e Nobre, 1991; Staal et al., 2018; Van Der Ent et al., 2010; Yang e Dominguez, 2019; Zemp et al., 2014). Esta contribuição é normalmente apresentada como um processo de convecção, que ajuda a manter a circulação de grande escala em altos níveis da atmosfera, conhecida como *Bolivian High* (Lenters e Cook, 1997; Virji, 1981), que juntamente com outros padrões de precipitação são afetados por fenômenos tanto em escala global (por exemplo, *El Niño–Southern Oscillation –ENSO*, *Tropical Atlantic sea surface temperature –SSTemp*) quanto local, como a cobertura do solo (Aceituno, 1988; Gutierrez-Cori et al., 2021; Koren et al., 2008; Leite-Filho et al., 2020; Lin et al., 2006).

Os regimes de precipitação na bacia diferem de uma região para outra em termos de padrão sazonal (**Figura 3c a f**), principalmente por causa de sua grande extensão e, em uma escala mais local, os regimes de chuva são altamente variáveis no espaço (Arias et al., 2021; Espinoza et al., 2009). Portanto, medições precisas e confiáveis da precipitação são fundamentais para o estudo das tendências climáticas e da variabilidade, bem como para a gestão dos recursos hídricos e para previsões meteorológicas, climáticas e hidrológicas na região (Jiang et al., 2012; Liu et al., 2017; Yilmaz et al., 2005).

Pluviômetros são tradicionalmente usados para medir a precipitação diretamente na superfície terrestre (Kidd, 2001), e vários bancos de dados especializados, em diferentes escalas, foram desenvolvidos a partir dessas observações *in situ* (Becker et al., 2013; Kidd et al., 2017). Entretanto, as medições *in situ* apresentam vários inconvenientes, tais como cobertura incompleta em áreas pouco povoadas, o que é comum nos países amazônicos ou em regiões remotas com altas altitudes nos Andes (Condom et al., 2020). Além disso, a variabilidade da precipitação significa que as

medições feitas em estações *in situ* não são normalmente representativas das áreas adjacentes, ou podem ser imprecisas (Kidd et al., 2017; Prabhakara et al., 1986). Na bacia Amazônica, por exemplo, as estações pluviométricas estão tipicamente localizadas nas cidades, perto dos principais rios e tributários, observando-se uma baixa densidade de estações na floresta tropical e em regiões pouco acessíveis. Portanto, a baixa densidade da rede pluviométrica e a falta de homogeneidade nas séries temporais impedem um monitoramento confiável com dados de campo (Debortoli et al., 2015; Delahaye et al., 2015; Espinoza Villar et al., 2009b; Ronchail et al., 2002). Assim, a coleta de observações complementares às medições *in situ* é fundamental para que se obtenha uma estimativa da precipitação sobre as diferentes regiões do continente (Kidd e Levizzani, 2011; Van Dijk e Renzullo, 2011; Wanders et al., 2014).

Observações por satélite de precipitação tornaram-se disponíveis em uma escala global nas últimas décadas. Esses satélites usam principalmente sensores infravermelhos (IR, *InfraRed*) e micro-ondas (MW, *MicroWave*) para fornecer estimativas de precipitação usando diferentes técnicas (Kidd e Huffman, 2011). Os sensores usados para estimar a precipitação podem ser classificados em três categorias (Prigent, 2010): (i) sensores visíveis/IR (VIS/IR) em satélites geoestacionários (GEO) e de baixa órbita terrestre (LEO, *Low Earth Orbit*), (ii) sensores de MW passivos (PMW, *Passive MicroWave*) em satélites LEO, e (iii) sensores de MW ativos (AMW, *Active MicroWave*) em satélites LEO. Os sistemas de imagem em GEO fornecem o rápido ciclo de atualização temporal necessário para capturar o crescimento e o declínio dos sistemas de nuvens de precipitação em uma escala de vários quilômetros. As imagens baseadas em MW a bordo dos satélites LEO são mais adequadas que as baseadas em sensores IR para medições quantitativas de precipitação devido à relação física bem estabelecida entre a radiação ascendente e a estrutura da precipitação em nuvens (Turk et al., 2000; **Figura 3a e b**).

A partir desses sensores, foi desenvolvida uma vasta gama de produtos com a estimativa de precipitação baseados em algoritmos submetidos a rigorosa validação para fornecer informações sobre a qualidade, limitações e incerteza associada aos dados estimados. Esses algoritmos são divididos principalmente nos chamados métodos “calibrados por micro-ondas” e Morphing (Huffman et al., 2007; Joyce et al., 2004; Kidd et al., 2003; Marzano et al., 2004; Paola et al., 2012). No entanto, existem diferenças entre esses conjuntos de dados devido a deficiências nas fontes e na geração dos produtos. Portanto, LEO MW, GEO VIS/IR, dados *in situ* e dados de reanálise foram combinados para

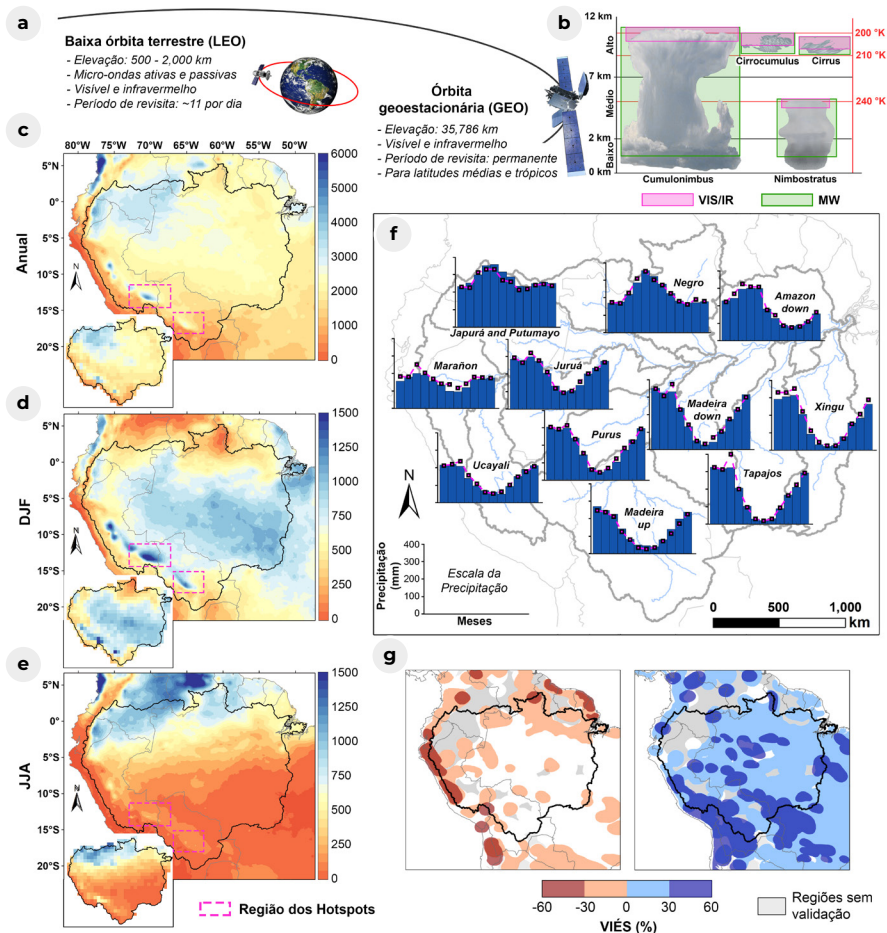


Figura 3: (a) Representação esquemática de sensores remotos para estimativa de precipitação a bordo de satélites. (b) Ilustração da faixa de cobertura do visível/infravermelho e micro-ondas para diferentes tipos de nuvens. Climatologia de precipitação (c) anual, (d) para o verão austral - DJF, e (e) para o inverno austral - JJA, com o conjunto de dados CHIRP v2 (1981-2020) com resolução espacial de 5 km, na imagem maior, e com o banco de dados HOP (1981-2009) com resolução de 100 km (Espinoza et al., 2016; Guimbertau et al., 2012), em pequenas caixas na parte inferior esquerda. (f) Regime anual de precipitação para onze grandes sub-bacias da Amazônia, com o conjunto de dados HOP (1981-2009) (barras), e o baseado nos dados CHIRP (1981-2020) em linhas magentas. (g) Viés médio anual negativo (escala vermelha) e positivo (escala azul) de seis produtos de precipitação baseados em SR e não corrigidos por pluviômetros na bacia Amazônica para o período 2000-2016, adaptados de Beck et al. (2017b).

aproveitar os benefícios relativos inerentes de cada tipo de sensor e produto (Figura 3a). Isto pode aumentar a precisão, cobertura, resolução espaço-temporal, homogeneidade espacial e continuidade temporal (Adler et al., 1994; Huffman et al., 1995; Joyce et al., 2004; Levizzani et al., 2007; Sorooshian et al., 2002; Tapiador et al., 2004; Vicente et al.,

1998; Xie et al., 2003).

Os conjuntos de dados disponíveis em modo operacional incluem a *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM; Huffman et al., 2007), o *Climate Hazards group InfraRed Precipitation* (CHIRP; Funk et al., 2015), a *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks* (PERSIANN; Ashouri et al., 2015), a *Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM* (IMERG; Huffman, Bolvin, e Nelkin, 2015; Huffman, Bolvin, Braithwaite, et al., 2015), a *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation near-real-time* (MSWEP-NRT; Beck et al., 2018) e produtos da técnica *morphing* (CMORPH; Joyce et al., 2004), do Centro de Previsão do Clima (CPC *Climate Prediction Center*), dentre outros. Embora um número crescente de bases de dados de precipitação, com maior resolução espacial e temporal, tenha sido construído e comparado diretamente ou através da aplicação de modelos hidrológicos, incertezas e inconsistências são encontradas entre as diferentes bases de dados (Beck et al., 2018, 2017b; Collischonn et al., 2008; Correa et al., 2017; Sun et al., 2018; Tapiador et al., 2017). Um resumo das bases de dados pluviométricos

TABELA 1

Missões e produtos que fornecem estimativas de chuvas derivadas de dados SR, incluindo resolução temporal-espacial, satélites e algoritmos utilizados e links de repositório (NRT - sigla em inglês para Tempo Quase Real).

NOME	NOME ESTENDIDO	AJUSTE	COBERTURA	RESOLUÇÃO ESPACIAL	RESOLUÇÃO TEMPORAL	COBERTURA TEMPORAL	REFERÊNCIA / LINK
CMORPH v1.0	Técnica CPC MORPHing (CMORPH) V1.0	-	60° N/S	0.07°	30 min	1998-NRT	Joyce et al. (2004); Joyce e Xie (2011); Xie et al., (2017) www.cpc.ncep.noaa.gov
CMORPH-CRT v1.0 CMORPH v1.0	Técnica CPC MORPHing (CMORPH) com vies corrigido (CRT) V1.0	Pluviômetro	60° N/S	0.07°	30 min	1998-2019	https://rda.ucar.edu/datasets/ds502.2 ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/CMORPH_V1.0/CRT/
GSMaP-Std v6	Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) Moving Vector with Kalman (MVK) Standard V6	-	60° N/S	0.1°	Horária	2000-NRT	Ushio et al. (2009)
GSMaP-Std Gauge v7	Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) Moving Vector with Kalman (MVK) Standard gauge-corrected V7	Pluviômetro	60° N/S	0.1°	Horária	2000-NRT	http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/

IMERGHHE v06	<i>Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) early run V06</i>	-	Global	0.1°	30 min	2010-NRT	Huffman et al. (2015a, 2015b); Tan et al. (2019) https://gpm1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/GPM_L3/GPM_3IMERGHHE.06/
IMERGDF v06	<i>Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) final run V06</i>	Pluviômetro	Global	0.1°	Diária	06/2000 - Presente	https://gpm1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/GPM_L3/GPM_3IMERGDF.06/
PERSIANN	<i>Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN)</i>	-	60° N/S	0.25°	Horária	03/2000-NRT	
PERSIANN-CCS	<i>Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN) Cloud Classification System (CCS)</i>	-	60° N/S	0.04°	Horária	01/2003-NRT	Ashouri et al. (2015); Nguyen et al. (2019); Sorooshian et al. (2000) https://chrsdata.eng.uci.edu/
PERSIANN CDR VIRI	<i>Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN) Climate Data Record (CDR) VIRI</i>	Pluviômetro	60° N/S	0.25°	Diária	1983- Presente	
SM2RAIN-CCI v2	Rainfall inferred from European Space Agency's Climate Change Initiative (CCI) satellite near-surface soil moisture V2	Umidade do Solo	Quasi Global / Land	0.25°	Diária	01/1998-12/2015	Brocca et al. (2014); Ciabatta et al. (2018) https://zenodo.org/record/846260 https://doi.org/10.5281/zenodo.846259
SM2RAIN-ASCAT v1.2	Rainfall inferred from Advanced SCATterometer soil moisture	Umidade do Solo	Global	12.5 km	Diária	2007-2019	Brocca et al. (2019) https://doi.org/10.5281/zenodo.3635932
GPM+SM2RAIN v0.1	Rainfall inferred from ASCAT H113 H-SAF, SMOS L3 and SMAP L3 soil moisture	Umidade do Solo	Global	0.25°	Diária	2007-2018	Massari (2020) https://doi.org/10.5281/zenodo.3854817

TMPA-3B42RT v7	TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) 3B42RT V7	-	60° N/S	0.25°	3 horas	03/2000-NRT	Huffman et al. (2007) https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B42RT_7/summary
TMPA-3B42 v7	TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) 3B42 V7	In situ	50° N/S	0.25°	3 horas	12/1997-01/2020	https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B42_7/summary
TMPA-3B43 v7	TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) 3B43 V7	In situ	50N-50S	0.25°	Mensal	1998-2020	Huffman et al. (2010) https://disc2.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/TRMM_L3/TRMM_3B43.7/
GridSat v1.0	P derived from the Gridded Satellite (GridSat) B1 thermal infrared archive v02r01	-	< 50°	0.1°	3 horas	1983-2016	Knapp et al. (2011) https://www.ncdc.noaa.gov/gridsat/
ERA5 -HRES	European Centre for Medium-range Weather Forecasts ReAnalysis 5 (ERA5) High RESolution (HRES)	Reanálise	Global	0.28° (-31 Km)	Horária	2008-NRT	Hersbach et al. (2020, 2018)
ERA5 - EDA	European Centre for Medium-range Weather Forecasts ReAnalysis 5 (ERA5) Ensemble Data Assimilation (EDA) ensemble mean	Reanálise	Global	-0.56°	Horária	2008-NRT	
ERA5-Land	European Centre for Medium-range Weather Forecasts ReAnalysis 5 (ERA5)	Reanálise	Global	0.1°	Horária	01/1981 - Presente	https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#/dataset/reanalysis-era5-land
CHIRP v2.0	Climate Hazards group InfraRed Precipitation (CHIRP) V2.0	Reanálise	50° N/S	0.05°	Diária	1981-NRT	Funk et al. (2015) https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRP/daily/netcdf/
CHIRPS v2.0	Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) V2.0	Reanálise e Pluviómetro	50° N/S	0.05°	Diária	01/1981-present	https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/netcdf/

GPCP-1DD v1.2	<i>Global Precipitation Climatology Project (GPCP) 1-Degree Daily (1DD) Combination V1.2</i>	Pluviômetro	Global	1°	Diária	10/1996 - 11/2015	Huffman et al. (2016, 2001) https://rda.ucar.edu/datasets/ds728.3
GPCP-PEN v2.2	<i>Global Precipitation Climatology Project (GPCP) pentad precipitation analysis (PEN)</i>	Pluviômetro	Global	2.5°	5 vezes ao dia	01/1979 - 06/2017	Xie et al. (2011) https://cmr.earthdata.nasa.gov/search/concepts/C1214566485-NO-AA_NCEI http://apdrc.soest.hawaii.edu/dchart/index.html?dsetid=e-53e32f2c760e6375a-4de86bd4718cba
MERRA-2	<i>Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications 2</i>	Reanálise e Pluviômetro	Global	-0.5°	Horária	1980 - NRT	Gelaro et al. (2017); Reichle et al. (2017)
MSWEP v2.2	<i>Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) V2.2</i>	Reanálise e Pluviômetro	Global	0.1°	3 horas	01/1979 - NRT	Beck et al. (2019, 2017a) www.gloh2o.org
CMAP	<i>CPC Merged Analysis of Precipitation (CMAP)</i>	Pluviômetro	Global	2.5°	Mensal	1979 - Presente	Huffman et al. (1997) ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/cmap/
CPC-Global	<i>CPC Unified Gauge-Based Analysis of Global Daily Precipitation</i>	Pluviômetro	Global	0.5°	Diária	2006 - Presente	Chen et al. (2008) https://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/CPC_UNLPRCP/

derivados de satélite atualmente disponíveis para a região Amazônica é apresentado na **Tabela 1**.

Nas últimas décadas, as informações sobre precipitação baseadas em SR contribuíram substancialmente para a compreensão dos principais processos que causam a variabilidade espacial e temporal da precipitação, bem como os processos atmosféricos locais e regionais relacionados. Essas bases de dados globais, ou quase globais, geralmente fornecem registros de precipitação adequados para estudos climáticos e hidrológicos, tais como iniciativas de reanálise hidrológica avaliadas na Amazônia em escala regional (e.g., Correa et al., 2017; Wongchuig et al., 2019) e global (e.g. Balsamo et al., 2015; Rodell et al., 2004; Van Huijgevoort et al., 2013).

Como exemplo, muitos estudos têm usado bases de dados de chuva por satélite para forçar modelos hidrológicos. Um dos primeiros estudos foi realizado na bacia do rio Tapajós, um dos principais tributários do rio Amazonas, utilizando estimativas de precipitação TRMM como entrada para um modelo hidrológico do tipo chuva-vazão (Collischonn et al., 2008). Diferentes pesquisas foram avaliadas a fim de representar as séries interanual, intrasazonal (30 a 70 dias, Kiladis and Mo, 1998) e multidecadal na Amazônia. As bases de dados por satélite também foram usadas em abordagens de balanço hídrico para avaliar tendências de longo prazo (Espinoza et al., 2019a; Heerspink et al., 2020; Paca et al., 2020; X. Y. Wang et al., 2018) e variações mensais do escoamento (Builes-Jaramillo e Poveda, 2018). Além disso, nas últimas décadas, a utilização de estimativas de precipitação por satélite possibilitou documentar eventos hidrológicos extremos na bacia Amazônica (Barichivich et al., 2018; Espinoza et al., 2014, 2012; Funatsu et al., 2021; Gloor et al., 2013; Marengo e Espinoza, 2016; Satyamurty et al., 2013b; Sena et al., 2012). As aplicações das bases de dados de precipitação para a compreensão do ciclo hidrológico por meio da modelagem hidrológica são descritas no capítulo 10.

Entretanto, devido a inconsistências entre diferentes bases de dados, foram realizadas várias avaliações de conjuntos de dados pluviométricos que consideram a bacia Amazônica a partir de avaliações globais (por exemplo, Beck et al., 2018, 2017; Sun et al., 2018), seja para a bacia inteira (por exemplo, Cavalcante et al., 2020; Correa et al., 2017; Espinoza et al., 2019a; Haghtalab et al., 2020; Mayta et al., 2019; Paca et al., 2019; Zubieta et al., 2019) ou para regiões específicas (por exemplo, Avila-Diaz et al., 2020; Bookhagen e Strecker, 2008; Chavez e Takahashi, 2017; Espinoza et al., 2015; Getirana et al., 2011; Killeen et al., 2007; Manz et al., 2017; Paccini et al., 2018; Zulkaffi et al., 2014). Esses conjuntos de dados têm um desempenho diferente de acordo com a região e a escala de tempo analisada, conforme descrito a seguir, juntamente com os principais avanços científicos que foram elucidados.

As **Figuras 3c-e** mostram a precipitação acumulada na bacia Amazônica para os períodos anual, úmido (DJF) e seco (JJA), respectivamente. Nessas figuras foram utilizados o banco de dados de precipitação (HOP) do sistema de monitoramento HYBAM da bacia Amazônica, composto por 752 estações pluviométricas diárias em toda a Amazônia com resolução espacial de 1° (Espinoza et al., 2016; Guimberteau et al., 2012), e o banco de dados CHIRP com resolução de 5 km.

Os estudos climatológicos na bacia que consideram padrões espaciais começaram nos

anos 1980. A avaliação da radiação de onda longa ascendente (ROL) dos satélites em órbita polar (principalmente os da NOAA), por exemplo, iniciada em 1974, foi particularmente útil para o monitoramento rotineiro das áreas de nebulosidade e convecção profunda sobre os trópicos com o trabalho pioneiro de Gruber e Krueger (1984) e Liebmann e Smith (1996). Outros padrões de precipitação regional foram revelados na transição entre os Andes e a Amazônia na região dos chamados *hotspots* de chuvas, onde a precipitação pode atingir valores superiores a 6000 mm por ano, a maior precipitação média anual na bacia Amazônica (Chavez e Takahashi, 2017; Espinoza et al., 2015; Killeen et al., 2007). Esta região está entre as áreas mais chuvosas do mundo de acordo com o conjunto de dados IMERG *Grand Average Climatology*, que abrange o período de junho de 2000 a maio de 2019, e tem as maiores linhas de instabilidade do mundo (sistemas convectivos quase lineares; Garstang et al., 1994). Estruturas verticais e horizontais extremas ocorrem devido às interações entre a circulação atmosférica em larga escala e a topografia massiva que afetam a convecção atmosférica, produzindo os *hotspots* de chuva durante quase todo o ano (Bookhagen e Strecker, 2008; Espinoza Villar et al., 2009a; Killeen et al., 2007). Além disso, mudanças na cobertura florestal no sul da Amazônia têm sido consideradas como um fator que pode intensificar a presença de células convectivas, resultando em variabilidade espacial e temporal acentuadas (Durieux et al., 2003; Funatsu et al., 2012; Laurance e Bruce Williamson, 2001; Staal et al., 2020). Uma discussão mais detalhada dos efeitos de mudanças da cobertura do solo sobre os padrões de precipitação pode ser encontrada no capítulo 12 sobre mudanças ambientais.

A **Figura 3f** mostra a distribuição espacial do ciclo anual de precipitação com base nos bancos de dados CHIRP e HOP. Os ciclos anuais de precipitação na bacia variam significativamente, em função da latitude, orografia e das características atmosféricas de grande escala (por exemplo, a Zona de Convergência Intertropical- ITCZ, na sigla em inglês), Sistema de Monção Sul-Americano (SAMS, na sigla em inglês) e Zona de Convergência do Atlântico Sul (SACZ, na sigla em inglês; Espinoza Villar et al., 2009b). O viés dos bancos de dados é mostrado na **Figura 3g**, que considera seis conjuntos de dados não corrigidos por pluviômetros (PERSIANN-CCS, MSWEP-ng v2, CHIRP v2.0, CMORPH v1.0, SM2RAIN-ASCAT e TMPA 3B42RT v7, adaptado de Beck et al. (2017b)). O viés na precipitação anual total para o período 2000-2016 é apresentado para valores negativos e positivos, nos quais pelo menos uma dessas base de dados detectou um valor igual ou maior de viés. Esses bancos de dados baseados em satélites foram validados para a bacia

Amazônica contra estações *in situ* globais e locais (por exemplo, GHCN, o banco de dados *Global Summary of the Day - GSOD*, e o *Latin American Climate Assessment & Dataset*). A avaliação dessas bases de dados mostrou grande viés na Amazônia ocidental e sul, na região das cabeceiras nos Andes.

Na região de transição Andes-Amazônia, os dados de precipitação baseados em SR contribuíram para compreender os principais processos orográficos relacionados aos ventos anabáticos e catabáticos, que são essenciais para explicar o ciclo diurno de precipitação nesta área (Junquas et al., 2018). Nesta região específica, os padrões de viés dos conjuntos de dados estão de acordo com outras pesquisas (Chavez e Takahashi, 2017; Espinoza et al., 2015) somente nos *hotspots* peruanos de chuvas, que subestimaram a precipitação anual total em cerca de 35% a 40% do banco de dados TRMM-PR para o período 1998-2012. O viés geral em algumas regiões andinas pode ser explicado, em parte, pela predominância de nuvens cirrus (confundidas por sensores de satélites com nuvens convectivas, tais como cumulonimbus, que têm temperatura similares no topo das nuvens; Paredes Trejo et al., 2016; Thiemig et al., 2013; **Figura 3b**), o que ocorre, por exemplo, sobre o leste das montanhas do sul dos Andes (Planalto do Altiplano, que se estende entre 15°S e 22°S). Isto acontece principalmente durante o verão úmido austral (Barahona et al., 2017; Dinku et al., 2011; Viale et al., 2019), e onde estas formações de nuvens são dependentes da orografia (Chavez e Takahashi, 2017; Giovannettone e Barros, 2009; Junquas et al., 2018; Saavedra et al., 2020; Satgé et al., 2017, 2016).

A circulação de mesoescala entre a superfície terrestre e grandes massas de água na bacia Amazônica produz brisas fluviais e costeiras. Estes sistemas afetam o transporte de umidade e o padrão de precipitação espacial em uma escala local (Fitzjarrald et al., 2008; Santos et al., 2019; Silva Dias et al., 2004). Os dados de SR ajudaram a revelar que a brisa fluvial reduz a precipitação sobre os corpos de água da Amazônia (rios e grandes reservatórios) por meio do uso do TRMM (Paiva et al., 2011a).

Mudanças na cobertura do solo podem produzir padrões complexos de circulação em mesoescala, incluindo a chamada “brisa do desmatamento”, que pode acontecer em pequenas áreas desmatadas, mas perde força em escalas de desmatamento de cerca de 100 km (Lawrence e Vandecar, 2015; Saad et al., 2010). Esses padrões de circulação induzidos pelo desmatamento podem alterar significativamente as tendências de chuva em diferentes escalas (Leite-Filho et al., 2021). Os padrões pluviométricos também podem ser afetados de escalas locais para continentais, sendo que mudanças

desse tipo já foram observadas na Amazônia nas últimas décadas (Butt et al., 2011; Khanna et al., 2017; Leite-Filho et al., 2019). Os efeitos do desmatamento sobre a precipitação serão discutidos mais detalhadamente no capítulo 12.

Os dados de SR foram utilizados para avaliar a variabilidade temporal em diferentes escalas de tempo. As mudanças sinópticas espaciais nos padrões de precipitação, por exemplo, foram avaliadas usando informações de SR devido à distribuição espacial heterogênea das estações meteorológicas e medições temporais inconsistentes nos pluviômetros (Arvor et al., 2017; Silva Junior et al., 2018). Outros estudos em escala diária concentraram-se na avaliação do desempenho dos conjuntos de dados TMPA V7, TMPA RT, CMORPH e PERSIANN para representar o índice de concentração de precipitação durante o período 2001-2009 (Zubieta et al., 2019). Esse índice é um indicador da distribuição temporal da precipitação. Os autores concluíram que os melhores produtos (CMORPH e TMPA V7) podem ser uma fonte alternativa de dados para detectar mudanças na concentração de precipitação diária durante as estações secas ou úmidas em regiões da bacia que experimentam eventos extremos.

Considerando que uma das principais características dos processos de convecção nas regiões tropicais é a sua forte relação com o ciclo diurno (Duvel e Kandel, 1985; Minnis e Harrison, 1984), estudos pioneiros foram realizados desde os anos 1990 para a compreensão dos padrões convectivos na bacia Amazônica. Com base em nove anos (1983-1991) de dados dos satélites GEO IR (especificamente o produto B3 ISCCP) com resolução temporal de 3 horas, Garreaud e Wallace (1997) documentaram várias características da variação diurna da frequência da nebulosidade convectiva. Os dados do SSM/I a bordo do *Defense Meteorological Satellite Program* por meio da aplicação do algoritmo *Goddard Profiling* também foram utilizados para caracterizar a climatologia (10 anos) e a variabilidade diurna (6 anos) da precipitação na bacia (Negri et al., 2000). Oliveira et al. (2016) avaliaram dois produtos GPM a fim de reproduzir o ciclo diurno de precipitação na Amazônia central e obtiveram resultados semelhantes aos de Angelis et al. (2004), que mostraram que a chuva tende a ocorrer principalmente durante a tarde na bacia Amazônia central.

As informações de SR sobre chuvas têm ajudado a identificar a época de início e fim da estação chuvosa (Wright et al., 2017). O interesse pela duração da estação seca é motivado porque o prolongamento da estação seca aumenta a vulnerabilidade dos ecossistemas locais e da agricultura a eventos de seca e queimadas (Arias et al., 2015;

Fu et al., 2013; Marengo et al., 2011). Uma das primeiras avaliações baseadas em SR constatou que o início da estação chuvosa na Amazônia ocorre tipicamente num mesmo mês (Horel et al., 1989). Negri et al. (1994) produziram uma climatologia de precipitação regional sobre a Amazônia durante a estação chuvosa (janeiro-maio) usando três anos dos dados obtidos duas vezes por dia do *Special Sensor Microwave/Imager* (SSM/I). Mudanças na amplitude do ciclo sazonal também foram observadas com os dados do TRMM (Liang et al., 2020).

As informações de SR subsidiaram avanços importantes na compreensão dos processos que regem a sazonalidade das chuvas na bacia Amazônica. A disponibilidade de dados de satélite de precipitação, OLR e reanálise permitiram a descrição dos padrões sazonais termicamente orientados que formam o sistema de monção sul-americana (SAMS, na sigla em inglês), anteriormente não entendido como uma monção, em parte porque não possui a inversão sazonal clássica de ventos zonais absolutos (Zhou e Lau, 1998). Uma característica incomum da monção sobre a Amazônia é que o início das chuvas ocorre antes da migração para o sul da ITCZ, e a zona de pressão da Alta da Bolívia, característica do SAMS, é parcialmente gerada pela liberação de calor latente da precipitação sobre a bacia antes do tradicional início das monções (Fu et al., 1999).

Em escalas sazonal a intrasazonal, os dados OLR dos satélites de órbita polar da NOAA foram utilizados para identificar a intensidade e as características espaciais da SACZ na região da Amazônia brasileira (Carvalho et al., 2004). A SACZ é uma faixa de convecção noroeste-sudoeste que se estende da bacia Amazônica até o sudeste do Oceano Atlântico, cuja intensidade e distribuição geográfica estão associadas a eventos pluviométricos extremos no sul da Amazônia. Em escala intrasazonal, a oscilação em grande escala Madden-Julian (MJO; Madden e Julian, 1994) foi estabelecida como o modo dominante de variabilidade através dos trópicos, modulando a SACZ e outras características climatológicas sobre a bacia. Mayta et al. (2019) e Vera et al. (2018) utilizaram dados de OLR como *proxy* de convecção para analisar a variabilidade intrasazonal da precipitação na América do Sul. Em particular, De Souza e Ambrizzi (2006) mostraram que a MJO é o principal mecanismo atmosférico de variabilidade pluviométrica em escalas de tempo intrasazonal sobre a Amazônia oriental durante a estação chuvosa, o que foi confirmado por meio do uso da rede de pluviometria por Mayta et al. (2019). Além disso, as informações de SR contribuíram para compreender os mecanismos de circulação atmosférica e o desempenho de bancos de dados de precipitação

sazonal e intrasazonal. Na região de transição Andes-Amazônia, por exemplo, padrões particulares de circulação atmosférica foram descritos por Paccini et al. (2018), cujas situações meteorológicas particulares foram relacionadas às anomalias de precipitação regional usando conjuntos de dados TRMM 3B42, TRMM-PR 2A25 e CHIRPS.

Mudanças na distribuição espacial e temporal das chuvas na bacia Amazônica podem fornecer um indicador de variabilidade climática que, por sua vez, é um indicador de variabilidade hidrológica, incluindo eventos extremos, como enchentes e secas (e.g., Lewis et al., 2011; Marengo e Espinoza, 2016). A avaliação direta dessas bases de dados foi feita para caracterizar a evolução temporal das chuvas por meio da análise dos índices de ocorrência, tais como a frequência de dias secos, e a frequência de dias úmidos por meio da base de dados CHIRPS (Espinoza et al., 2019a); ou a avaliação da tendência na duração da estação chuvosa no sul da Amazônia com o PERSIANN-CDR (Arvor et al., 2017). A evolução interanual de processos hidrológicos, como o coeficiente de escoamento, foi avaliada por meio de uma análise do balanço hídrico utilizando a base de dados CHIRPS (Espinoza et al., 2019b). Uma abordagem semelhante, a partir do balanço hídrico superficial de longo prazo sobre o sistema Andes-Amazônia, foi realizada por Builes-Jaramillo e Poveda (2018) por meio do uso de informações *in situ* (precipitação do GPCC e escoamento superficial do HYBAM) e informações baseadas em SR (evapotranspiração do ORCHIDEE, GLEAM, MPI e MOD16). Este estudo apontou que falhas e escassez de informações em altas altitudes nos Andes induzem a incertezas e erros no balanço hídrico. Adicionalmente, o CHIRPS v2.0 foi usado para analisar anomalias de precipitação para a identificação de padrões espaciais de seca na bacia relacionados às anomalias de temperatura da superfície do mar no Atlântico e Pacífico tropicais e diferentes eventos ENSO (Jimenez et al., 2019).

Desde a década de 1980, as estimativas de precipitação na bacia Amazônica retrataram uma maior quantidade de chuva no norte, particularmente durante a estação chuvosa (Espinoza et al., 2019a; Paca et al., 2020; G. Wang et al., 2018) e menor quantidade no sul, particularmente durante a estação seca (Espinoza et al., 2019a; Leite-Filho et al., 2019). Esse padrão contrastante norte-sul se traduz no comportamento hidrológico das principais bacias que mostram uma intensificação do regime hidrológico no ramo principal do rio Amazonas (Barichivich et al., 2018; Espinoza Villar et al., 2009a; Heerspink et al., 2020).

As características da Amazônia impõem desafios únicos aos algoritmos de estimativa de chuva por satélite, tanto de sensores IR quanto MW, considerando o contraste em termos de orografia, clima e mudanças na cobertura vegetal. Para os sensores IR, os desafios ocorrem principalmente para a estimativa de chuvas orográficas quentes (mostradas ao norte de 10°S), onde os limiares de temperatura de brilho fixo (mais frios que nuvens orográficas quentes) tendem a subestimar as quantidades de chuva. Isso estaria acontecendo em *hotspots*, na região de transição Andes-Amazônia, entre Peru e Bolívia (Espinoza et al., 2015). Para os algoritmos MW, a superestimativa da chuva vem de superfícies frias de gelo sobre os topos das montanhas, que podem ser erroneamente interpretados como precipitação (Dinku et al., 2011; Toté et al., 2015).

Uma vez que as estimativas de precipitação por satélite são ajustadas com base nas observações dos pluviômetros, a precisão dos valores estimados pode ser aumentada. Entretanto, isto requer uma rede de pluviômetros com cobertura espacial adequada em áreas-chave da Amazônia e registros de alta qualidade para calibração e validação adequadas. No caso de estações in situ, alguns aspectos devem ser considerados, pois as estimativas de precipitação pluviométrica provavelmente serão distorcidas pela brisa do rio em algumas épocas do ano, já que as estações meteorológicas estão normalmente localizadas perto de grandes rios e de muitas cidades (Paiva et al., 2011a; Santos et al., 2019; Silva Dias et al., 2004).

As missões atuais de satélite com tecnologia de radar, como o radar de precipitação da missão TRMM, o Radar de Perfil de Nuvem do CloudSat ou o Radar de Precipitação de Dupla Frequência GPM, têm baixa resolução temporal, portanto não conseguem observar a evolução de curto prazo dos processos meteorológicos. Para superar esta limitação, usando apenas radares em LEO, é necessário ter uma constelação deles. Nos últimos anos, os nanosatélites (por exemplo, plataformas SmallSat ou CubeSat) têm trazido a capacidade de miniaturizar, reduzir custos e simultaneamente preservar os requisitos fundamentais de seus pares maiores e mais caros. Nesse sentido, o RainCube é uma missão potencial de demonstração tecnológica para permitir tecnologias de radar de precipitação em uma plataforma de baixo custo (Peral et al., 2019).

Radares terrestres podem medir a estrutura vertical da chuva, já que sua estrutura depende do tipo de chuva, mas com melhor resolução temporal do que MW a bordo de satélites (Kumar et al., 2020). Um exemplo recente é o algoritmo operacional

RAadar Infrared Blending para monitoramento operacional do tempo, que funde a rede de radares terrestres com imagens de satélite no VIS e IR para caracterizar padrões e intensidades de chuva sobre a Itália (Adderio et al., 2020). Novos métodos surgiram aproveitando a rede global de telefonia celular e sua densidade para estimar a intensidade das chuvas, principalmente em áreas urbanas, mas que também podem ser usados em regiões com alta variabilidade topográfica (Gosset et al., 2016; Overeem et al., 2016, 2013; van het Schip et al., 2017), porém eles ainda não foram explorados na bacia Amazônica. Em geral, bancos de dados mensais e anuais são úteis porque estão em conformidade com as observações, mas não com dados diários e muito menos com os dados obtidos várias vezes ao dia.



03 Evapotranspiração

Adriana Moreira
Ayan Fleischmann
Leonardo Laipelt
Anderson Ruhoff

A Evapotranspiração (*ET*) tem uma enorme importância para o sistema climático terrestre, fornecendo umidade para a atmosfera, interligando os ciclos da água, energia e carbono (Fisher et al., 2017; M. Jung et al., 2010), além de ter papel significativo na reciclagem da precipitação e na regulação da temperatura, em escalas locais e regionais (Marengo et al., 2018). Estudos demonstraram que cerca de metade da precipitação na bacia Amazônica é reciclada localmente pela *ET* (Salati et al., 1979; Satyamurty et al., 2013a; Zemp et al., 2017) e, além disso, a *ET* da Amazônia constitui uma importante fonte de umidade para o sudeste da América do Sul, fornecendo cerca de 70% da precipitação nesta região, através dos "rios voadores" (Pearce, 2020; Van Der Ent et al., 2010). Especialmente durante a estação seca, foi demonstrado que a *ET* da Amazônia fornece mais umidade em forma de precipitação para a bacia do rio da Prata do que a própria *ET* local (Martinez e Dominguez, 2014).

Na Amazônia, os fatores espaciais e temporais da *ET* ainda não são totalmente compreendidos, e estas incertezas se refletem em como os modelos estimam a *ET* (Baker et al., 2021; Maeda et al., 2017; Sörensson e Ruscica, 2018). Apesar das substanciais contribuições que as medições de fluxo, como as do projeto *Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in the Amazon* (LBA; Davidson e Artaxo, 2004), aprofundando a nossa compreensão sobre a sazonalidade e a dinâmica de *ET*, existem apenas algumas torres de observação na bacia Amazônica devido ao alto custo destas medições de fluxo e às dificuldades de manutenção das mesmas. Além disso, as torres de medições de fluxo existentes não cobrem toda a complexidade em termos de litologia, topografia, vegetação e condições climáticas na Amazônia. Neste sentido, o uso de dados de *ET* estimados por SR se apresenta como uma grande oportunidade para ampliarmos o nosso entendimento da dinâmica dos processos de *ET*, considerando amplas escalas espaciais e temporais, além da possibilidade de estudarmos locais ainda não monitorados.

Os modelos de SR desenvolvidos para estimar *ET* podem ser divididos em duas abordagens principais, baseadas em: i) balanço de energia (SEB, na sigla em inglês), e ii) índices de vegetação. Um modelo de *ET* bem conhecido, baseado em balanço de energia, é o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), proposto por Bastiaanssen (1995) com o intuito de superar a maioria dos problemas dos primeiros modelos desta abordagem, que eram adequados apenas para estimativas de *ET* em escala de torre de fluxo. Com base nos princípios e métodos adotados no SEBAL, Allen et al. (2007) propuseram o *Mapping EvapoTranspiration at high Resolution*

with Internalized Calibration (METRIC), adicionando um processo de calibração interna com o objetivo de reduzir os vieses computacionais inerentes aos modelos de balanço de energia que usam dados de SR (Allen et al., 2011, 2007). Outros modelos de balanço de energia que utilizam dados de SR também foram propostos, tais como o *Simplified Surface Energy Balance Index* (SEBI; Menenti e Choudhury, 1993), *Simplified Surface Energy Balance Index* (S-SEBI; Roerink et al., 2000), e *Surface Energy Balance System* (SEBS; Su et al., 2001).

Os modelos SEB ainda podem ser divididos em modelos de balanço de energia de ‘uma fonte’ ou ‘duas fontes’ (*Two Source Energy Balance* - TSEB). Os modelos de uma fonte são aqueles que não distinguem entre evaporação do solo e transpiração da vegetação, e desta forma a superfície é considerada como uma única camada (Tang et al., 2013; Zhang et al., 2016). Nos modelos de duas fontes, por sua vez, o sistema solo-vegetação é aproximado a um modelo de duas camadas, no qual os fluxos de energia são divididos em componentes do solo e da vegetação, como proposto no TSEB (Kustas e Norman, 1999; Norman et al., 1995). Com base na abordagem do TSEB, o modelo *Atmosphere-Land Exchange Inverse* (ALEXI) foi desenvolvido por Anderson et al. (1997), com o intuito de representar a troca de energia entre a superfície e a atmosfera em uma ampla gama de condições de cobertura da terra (Zhang et al., 2016).

Os modelos de SR baseados em índices de vegetação são geralmente divididos em abordagens baseadas nas equações *Penman-Monteith* e *Priestley-Taylor*. Penman (1948) foi o primeiro a formular uma equação para calcular a evaporação com base em uma abordagem física usando um termo de energia relacionado à radiação e um termo aerodinâmico relacionado ao déficit de pressão de vapor e velocidade do vento (Shuttleworth, 2012). No entanto, esta equação era mais adequada para a representação de evaporação de uma superfície de água aberta. Posteriormente, Monteith (1965) apresentou uma extensão desta equação, adicionando o termo de resistência superficial, e assim a equação se tornou mais consistente com a estimativa de *ET* de superfícies cobertas por vegetação, resultando na conhecida equação *Penman-Monteith* (Monteith e Unsworth, 2013).

Considerando a abordagem de *Penman-Monteith*, o algoritmo MOD16 foi formulado por Mu et al. (2011, 2007), com base em Cleugh et al. (2007), para calcular a *ET* por meio do uso integrado de dados meteorológicos globais de reanálise e dados de SR do sensor MODIS (*MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Leuning et al.

(2008) também propuseram um modelo de *ET* baseado nesta equação, o *Penman-Monteith-Leuning* (PML), que inclui um modelo biofísico que calcula a condutância de superfície utilizando o produto de índice de área foliar do MODIS.

Outras abordagens para estimativa de *ET* também foram propostas com base na equação de *Priestley-Taylor* (Priestley e Taylor, 1972). A equação de *Priestley-Taylor* tem como objetivo simplificar as parametrizações necessárias na equação de *Penman-Monteith* para estimativa das resistências aerodinâmica e de superfície. Desta forma, por meio do coeficiente de *Priestley-Taylor* (α), essa equação busca minimizar as incertezas relacionadas a essas parametrizações. Com base na abordagem de *Priestley-Taylor*, Fisher et al. (2008) desenvolveram o modelo *Priestley-Taylor Jet Propulsion Laboratory* (PT-JPL), e Miralles et al. (2011) propuseram o *Global Land-Surface Evaporation Amsterdam* (GLEAM). Um resumo dos principais modelos baseados em SR para estimar a *ET*, com aplicações na bacia Amazônica, é apresentado na **Tabela 2**.

Os modelos de *ET* baseados em SR proporcionaram um maior aprofundamento do nosso entendimento sobre os processos de *ET*, melhorando nossa compreensão dos processos hidrológicos desde escalas locais até grandes escalas espaciais e temporais. Em relação aos modelos de balanço de energia, estes têm como vantagem a estimativa de *ET* em maior resolução espacial, além da possibilidade de estimar os impactos humanos nos ciclos de energia e água e nas interações entre superfície e atmosfera. No entanto, por serem dependentes de dados termais de SR, geralmente esses modelos são restritos a condições de céu claro ou sem nuvens, o que é uma grande desvantagem, especialmente em áreas tropicais úmidas como a Amazônia. Adicionalmente, os modelos SEB geralmente exigem a presença de condições de *pixel* quente e frio na região de domínio da imagem. Esse requisito é uma desvantagem, uma vez que a seleção dos *pixels* quente e frio pode gerar resultados subjetivos, especialmente em regiões úmidas como a bacia Amazônica, onde essa seleção durante as estações chuvosa e seca é um desafio (Khand et al., 2017). Já em relação aos modelos baseados em índices de vegetação, estes têm como vantagem a estimativa de *ET* em alta resolução temporal, permitindo avaliações de longo prazo e em larga escala. No entanto, algumas limitações destes modelos incluem a incerteza na parametrização de processos físicos, a baixa resolução espacial, e ainda a utilização de dados globais, que muitas vezes podem não representar acuradamente algumas dinâmicas regionais (Maeda et al., 2017; Miralles et al., 2016). A propagação de erros derivados de forçantes meteorológicas também é uma desvantagem destes

TABELA 2
Resumo dos principais modelos baseados em SR para estimar a ET com aplicações na Amazônia.

PRINCÍPIOS FÍSICOS	MODELO E RESOLUÇÃO ESPACIAL	PRINCIPAIS DADOS DE ENTRADA (SATÉLITES E AUXILIARES - AUX)	VANTAGENS	LIMITAÇÕES	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO
Modelo Biofísico	BESS Ryu et al. (2011) 1 a 5 km	MODIS: Dados atmosféricos (aerossol, vapor de água, nuvem, perfil atmosférico) e propriedades da superfície (temperatura da superfície da Terra, cobertura da terra, LAI, albedo). Aux: Dados meteorológicos (reanálise) e dados de superfície (climas e vegetação globais).	1) Cobertura espacial global e disponibilidade de dados públicos; 2) Independente dos dados da torre de fluxo; 3) Resolução espacial moderada para grandes áreas; 4) Dados atmosféricos múltiplos e da superfície terrestre usados como entrada; 5) Considera o acoplamento entre fluxos de carbono, água e energia.	1) Exige muitos dados (SR e meteorológicos); 2) O efeito da umidade do solo e a evaporação da água da chuva interceptada pelo dossel não estão explicitamente incluídos no modelo; 3) O terreno complexo e a heterogeneidade da superfície terrestre não são considerados; 4) Incertezas nos conjuntos de dados de entrada e métodos de preenchimento de lacunas.	Swann e Koven (2017)
Índice de Vegetação - Penman-Monteith equation	MOD16 Mu et al. (2011, 2007) 500 metros a 0.05°	MODIS: Fenologia da Vegetação (LAI, fPAR) e propriedades da superfície (cobertura da terra, albedo). Aux: Dados Meteorológicos (reanálise).	1) Cobertura espacial global; 2) Dados disponíveis publicamente; 3) Baixa complexidade de implementação.	1) Parametrizações de condutância de superfície; 2) Requer dados medidos para calibração/parametrização do modelo; 3) Limitações em áreas com alta evaporação do solo e da água; 4) Moderado a alto requisito de entrada de dados meteorológicos.	Baker e Spracklen (2019); de Oliveira et al. (2017); Maeda et al. (2016)*; Miralles et al. (2016)*; Paca et al. (2019); Swann e Koven (2017); Vergopolan e Fisher (2016); Xu et al. (2019)
	PML Leuning et al. (2008) 500 metros	Aux: Dados Meteorológicos (reanálise).			Zhang et al. (2016)*
Índice de Vegetação - Priestley-Taylor equation	GLEAM Miralles et al. (2011) 0.25°	AISR, CERES, MODIS: umidade do solo, dados atmosféricos (radiação, precipitação, temperatura do ar, frequência dos raios) e propriedades de superfície (equivalente à água da neve, umidade do solo, fração de cobertura vegetal, profundidade óptica da vegetação) Aux: Dados Meteorológico (reanálise)	1) Pode ser implementado apenas com dados de satélites; 2) Requisitos moderados de dados meteorológicos; 3) Cobertura espacial global e disponibilidade de dados públicos.	1) Simplificação de alguns processos físicos; 2) Dependência excessiva da disponibilidade de água; 3) Limitações em áreas com alta evaporação do solo e da água; 4) Baixa resolução espacial.	Miralles et al. (2016)*; Baker et al. (2021); Baker e Spracklen (2019); Paca et al. (2019); Wu et al. (2020)
	PT-JPL Fisher et al. (2008) 1°	AVHRR, MODIS: Fenologia da Vegetação (NDVI, SAVI). Aux: Meteorológico (reanálise) e climatologia da superfície terrestre por satélite.	1) Cobertura espacial global e disponibilidade de dados públicos; 2) Pode ser aplicado apenas com dados de satélites; 3) Requisitos moderados de dados meteorológicos	1) Simplificação de alguns processos físicos; 2) Muitas parametrizações ecofisiológicas; 3) Limitações em áreas com alta evaporação do solo e da água; 4) Baixa resolução espacial.	Fisher et al. (2009); Miralles et al., (2016)*

Balanco de Energia	ALEXI Anderson et al. (1997)	GOES, MODIS, VIIRS: Termal (temperatura da superfície terrestre) e dados Multiespectrais (reflectância da superfície). Aux: Dados Meteorológicos (reanálise) e de superfície (cobertura da terra)	1) A energia disponível é dividida em componentes do solo e da vegetação; 2) Representação de processos de superfície em áreas com alta disponibilidade de água.	1) Alta complexidade de implementação; 2) Requer condições de céu claro; 3) Exige muitas variáveis meteorológicas.	Paca et al. (2019)
	METRIC Allen et al. (2007)	MODIS, Landsat: Termal (temperatura da superfície terrestre) e dados Multiespectrais (reflectância da superfície). Aux: Dados Meteorológicos (reanálise) e de superfície (cobertura da terra).	1) Aplicações para escala regional em resolução espacial de moderada a alta; 2) Pouca parametrização de superfície; 3) Útil para avaliar os impactos das mudanças na cobertura da terra; 4) Baixos requisitos de entrada de dados meteorológicos (SEBAL); 5) Maior precisão em áreas com medidas de solo disponíveis (METRIC).	1) Requer condições de céu claro; 2) Não há distinção entre evaporação do solo e transpiração do dossel; 3) Exige a presença de condições extremas quentes e frias na área de domínio; 4) Dependência da área de domínio, com limitações para aplicações em larga escala; 5) Moderado a alto requisito de entrada de dados meteorológicos (METRIC); 6) Maior incerteza em áreas com escassez de dados (METRIC).	Khand et al. (2017); Nóbrega et al. (2017); Numata et al. (2017)
	SEBAL (Bastiaanssen, 1995)	AVHRR, MODIS, Landsat, ASTER: Termal (temperatura da superfície terrestre) e dados Multiespectrais (reflectância da superfície). Aux: Dados Meteorológicos (reanálise) e de superfície (cobertura da terra)	1) Acurácia relacionada à temperatura da superfície da Terra; 2) Baixa demanda de dados meteorológicos.	1) Alto requisito para parametrização da superfície; 2) Complexidade de implementação de moderada à alta.	De Oliveira et al. (2019); Laipelt et al. (2020); Nóbrega et al. (2017)
	SEBS Su et al. (2001)	MODIS, Landsat: Termal (temperatura da superfície terrestre) e dados Multiespectrais (reflectância da superfície). Aux: Dados Meteorológicos (reanálise) e de superfície (cobertura da terra)	1) Baixa complexidade de implementação; 2) Cobertura espacial global e disponibilidade de dados públicos.	1) Balanço de energia simplificado; 2) Maior incerteza em áreas com escassez de dados.	Paca et al. (2019)
	SSEBop Senay et al. (2013)	30 metros a 1 km			Paca et al. (2019); Senay et al. (2020)*

modelos, podendo introduzir grandes incertezas nas estimativas de *ET* (Gomis-Cebolla et al., 2019; Miralles et al., 2016; Panday et al., 2015; Talsma et al., 2018).

Os principais achados destes modelos de SR sobre a *ET* na Amazônia mostraram que o padrão espacial da *ET* (Figura 4a), a sazonalidade (Figura 4b) e os principais fatores determinantes da *ET* variam ao longo da bacia (Baker et al., 2021; Maeda et al., 2017). Por exemplo, os dados de modelos de SR (Figura 4) mostraram que as taxas médias mensais de *ET* variam entre 80 mm mês⁻¹ na região sul (incluindo as bacias dos rios Madeira e Tapajós) até 160 mm mês⁻¹ na parte norte da bacia (bacia do rio Negro). No entanto, a maioria dos modelos, como o MOD16, geralmente mostram um aumento da *ET* à medida que a estação seca avança na região nordeste



*Aplicações globais, incluindo análise na bacia Amazônica.

e central amazônica, onde predominam as áreas úmidas equatoriais. Nestas regiões, a sazonalidade de *ET* é impulsionada principalmente pela radiação incidente e pelo LAI (Maeda et al., 2017). Apesar de este padrão ser mostrado pelas medições de torres de fluxo (Christoffersen et al., 2014), nem todos os modelos conseguem capturar esse padrão (**Figura 4c**). Por exemplo, enquanto a sazonalidade do MOD16 *ET* é consistente com as medições de fluxo (em K34 e K83), com taxas mais altas durante a estação seca, a sazonalidade do modelo GLEAM (em K34) mostra maiores valores durante a estação chuvosa e menores durante a estação seca. Essa dinâmica apresentada pelo GLEAM em regiões úmidas na Amazônia pode ser explicada devido à dependência desse modelo aos dados de umidade e precipitação, afetando o seu desempenho em regiões onde a *ET* não é limitada pela disponibilidade de água (Miralles et al., 2016).

Em regiões mais ao sul e sudeste da bacia Amazônica (nas bacias do rio Madeira e rio Tapajós), a maioria dos modelos baseados em SR indicam consistentemente uma diminuição das taxas de *ET* durante a estação seca, seguindo a redução da disponibilidade de água (Maeda et al., 2017; H. J. F. da Silva et al., 2019). Entretanto, quando as estimativas dos modelos baseados em SR são comparadas às medições de fluxo (em uma escala local) ou estimativas de balanço hídrico (em larga escala), a representação da sazonalidade da *ET* ainda é incerta, uma vez que a maioria dos modelos é incapaz de reproduzir consistentemente os ciclos sazonais em áreas tropicais, considerando que múltiplos fatores operam simultaneamente em toda a Amazônia.

Estudos usando medições de fluxo demonstraram em escalas locais que as mudanças no uso e cobertura da terra impactam os fluxos de água e energia. Por exemplo, foram observadas taxas de *ET* significativamente menores em áreas de pastagens, agrícolas e em áreas desmatadas do que em florestas primárias e secundárias (von Randow et al., 2004, 2020). Esses resultados indicam que menos água retorna para a atmosfera, afetando assim a reciclagem da precipitação e contribuindo para mudanças nas estações seca e chuvosa (Costa e Pires, 2010; Panday et al., 2015). Concordando com as medições de fluxo, as análises em grande escala utilizando modelos de SR reforçaram estas descobertas (Baker e Spracklen, 2019; de Oliveira et al., 2019; Khand et al., 2017; Laipelt et al., 2020). Por exemplo, estudos usando modelos de SR demonstraram que eventos de seca tendem a afetar os sistemas antropogênicos como pastagens e áreas agrícolas mais do que florestas primárias e secundárias, levando a um aumento da temperatura do ar e a uma diminuição do

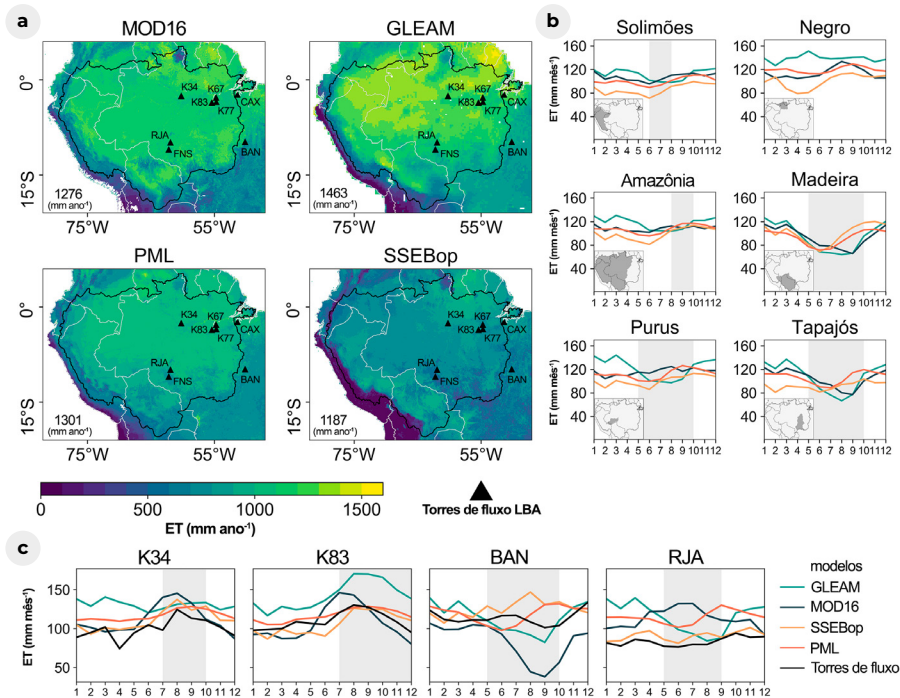


Figura 4: Padrões espaciais e temporais de *ET* na bacia Amazônica são representados de forma diferente pelos modelos que utilizam SR. (a) Variabilidade espacial da média anual da *ET* (2003-2017) para os modelos GLEAM, SSEBop, MOD16 e PML; os números no canto inferior esquerdo de cada plotagem representam a média anual de *ET*. (b) Sazonalidade da *ET* para as principais sub-bacias Amazônicas. (c) Comparação da média mensal entre estimativas e medições de fluxo do projeto LBA, usando dados de Saleska et al. (2013). A estação seca está destacada em cinza como taxas mensais de precipitação menores que 100 mm mês⁻¹.

LAI e da *ET* (Baker e Spracklen, 2019; de Oliveira et al., 2019).

Os modelos de SR também têm ajudado a melhorar nossa compreensão sobre o particionamento da energia disponível em diversas regiões no bioma Amazônia (de Oliveira et al., 2019; Laipelt et al., 2020). As estimativas de *ET* de alta resolução usando SEBAL no sudoeste da Amazônia, por exemplo, mostram diferenças significativas entre fluxos de energia e de água em áreas florestais e não florestais, tais como pastagens e áreas agrícolas. Nessas áreas antropogênicas, os fluxos de calor no solo e o fluxo de calor sensível foram duas a quatro vezes maiores do que em áreas florestais (de Oliveira et al., 2019). Em uma região de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado, onde estão também presentes áreas de desmatamento, foi possível mostrar diferenças significativas de áreas florestais no particionamento dos fluxos de energia. Maiores taxas de fluxo de calor latente (parte da energia disponível

que é utilizada no processão de *ET*) foram observadas em áreas florestais, enquanto em áreas desmatadas observou-se um aumento no fluxo de calor sensível (parte da energia disponível que é utilizada para aquecer a atmosfera) (Laipelt et al., 2020).

Fisher et al. (2017) resumiram em dez perguntas científicas as principais lacunas de conhecimento para a ciência baseada em *ET*. O estudo aponta que para responder à estas questões, as estimativas de *ET* precisam ser melhoradas, visando menores incertezas e maior escala espacial e temporal, além de abranger estimativas de longo período. Em relação às incertezas, estudos recentes demonstraram que os modelos baseados em SR podem estimar *ET* com acurácia razoável e concordância (Gomis-Cebolla et al., 2019; Martens et al., 2017; Michel et al., 2016; Zhang et al., 2019). Entretanto, as componentes individuais de *ET* (evaporação do solo, transpiração da vegetação e evaporação da água interceptada pelo dossel da vegetação) divergem consideravelmente (Miralles et al., 2016; Talsma et al., 2018). Por exemplo, Miralles et al. (2016) mostraram que, em florestas tropicais, a evaporação do solo é quase inexistente nos modelos GLEAM e PT-JPL, enquanto para o MOD16 este componente pode exceder a transpiração na região dos trópicos. Na Amazônia, a interceptação do dossel do PT-JPL e MOD16 é quase duas vezes maior do que com o modelo GLEAM. Além das incertezas relacionadas à transpiração do dossel e à evaporação do solo, a evaporação de água aberta e a *ET* em áreas úmidas amazônicas também são uma grande lacuna de conhecimento.

A *ET* em áreas úmidas pode ser um processo complexo, pois envolve fluxos em diferentes condições de vegetação para transpiração, evaporação da água interceptada no dossel e da água superficial. Mudanças nos padrões de calor latente sobre os corpos de água (rios, áreas úmidas, lagos e reservatórios artificiais) afetam os padrões de circulação climática local, por meio de um efeito de brisa (Silva Dias et al., 2004), e têm o potencial de afetar o clima regional por intermédio da supressão da precipitação sobre as áreas úmidas e da iniciação de convecção sobre as fronteiras das áreas úmidas (Taylor et al., 2018). As diferenças de *ET* em áreas úmidas e montanhosas ainda são mal compreendidas na Amazônia, e apenas algumas medições *in situ*, que poderiam ser usadas para validação de modelos de SR, estão disponíveis em ambientes inundáveis (Borma et al., 2009). Melhorias na precisão das estimativas de componentes da *ET* nos levam a entender melhor os processos de *ET* e como esses componentes são afetados por mudanças na temperatura, concentração de gases de efeito estufa e no ciclo hidrológico (Fisher et al., 2017; Talsma et al., 2018). Outro desafio para a estimativa de *ET* baseada em SR é a minimização do uso de

parametrizações e o melhoramento da acurácia dos dados de entrada. Enquanto o desempenho dos modelos *Penman-Monteith* pode ser influenciado por parametrizações de condutância de superfície, as estimativas dos modelos *Priestley-Taylor* dependem do coeficiente α . Como os modelos *ET* dependem de dados meteorológicos de entrada, os erros associados a estes dados também podem contribuir para maiores incertezas nas estimativas de *ET* (Ershadi et al., 2015; Gomis-Cebolla et al., 2019). Além disso, as medições de fluxo ainda são uma limitação significativa no melhoramento das estimativas de *ET*. No bioma Amazônia, existem apenas oito torres de medição de fluxo com dados públicos disponíveis (projeto LBA; Saleska et al., 2013), e elas não cobrem toda a complexidade de vegetação e climática da bacia Amazônica. Além disso, para os modelos de balanço de energia, o principal desafio, especialmente na Amazônia, é a exigência de condições de céu claro. Os esforços recentes para integrar dados de micro-ondas aos modelos de balanço de energia são promissores (Holmes et al., 2018), uma vez que a faixa do micro-ondas é menos afetada pela cobertura de nuvens do que a faixa do infravermelho termal.

Atualmente, o SR apoia-se em uma gama de sensores e satélites que fornecem imagens na faixa do infravermelho termal e observações meteorológicas e de superfície, essenciais para estimativa de *ET*. A missão ECOSTRESS (*Ecosystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station*), lançada pela Agência Espacial dos Estados Unidos (NASA) em 2018, irá fornecer informações sobre a eficiência do uso da água pelas plantas, e sobre como a vegetação responde ao estresse hídrico, concentrando-se na medição da temperatura da vegetação e permitindo o entendimento da dinâmica e dos processos de *ET* com boa resolução temporal e espacial (Fisher et al., 2017; Sheffield et al., 2018).

Outras missões irão melhorar as estimativas de *ET* e fornecerão informações valiosas para validar os modelos atuais. Por exemplo, o satélite de órbita polar JPSS (*Joint Polar Satellite System*), da NOAA e NASA, inclui uma gama de sensores, como o *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS), que coleta imagens no visível e infravermelho, fornecendo informações globais úteis para monitorar a vegetação, e dados de entrada para estimativa de variáveis hidrológicas (McCabe et al., 2017; Sheffield et al., 2018; Zhou et al., 2016). A missão *Water Cycle Observation Mission* (WCOM), da China, visa adquirir medições consistentes dos componentes do ciclo da água (Levizzani e Cattani, 2019; Shi et al., 2016). A missão *FLourescence EXplorer* (FLEX), da Agência Espacial Europeia, irá mapear a fluorescência da vegetação, fornecendo informações sobre a atividade fotossintética e estresse e saúde

da vegetação, também ajudando a melhorar as restrições à transpiração (Drusch et al., 2017; McCabe et al., 2017). A continuidade da missão Landsat vai permitir estimativas de *ET* em alta resolução espacial e de longo prazo (>30 anos) (McCorkel et al., 2018), e a missão *Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE Follow-On)* irá trazer uma significativa oportunidade para estimar *ET* por meio de abordagem de balanço hídrico (Landerer et al., 2020).

O SR tem sido crucial para melhorar nossa compreensão das interações superfície-atmosfera por meio da *ET*, apesar dos desafios que ainda existem, e as futuras missões espaciais são uma excelente oportunidade para abordar questões científicas importantes oriundas da ciência baseada em *ET*, permitindo-nos aprimorar técnicas, abordagens e nosso conhecimento sobre os processos de *ET* e como o impacto das atividades pode afetar o ciclo da água em toda a Terra, incluindo a bacia Amazônica.



04
Nível
da água

Adrien Paris
Stéphane Calmant
Fabrice Papa
Alice Fassoni-Andrade
Rodrigo Paiva
Frédéric Frappart

As águas superficiais são recursos-chave para todas as comunidades que vivem ao longo do rio Amazonas. No entanto, o monitoramento do nível da água (NA) e da vazão nos rios da bacia Amazônica é um desafio. Enquanto o ciclo hidrológico da bacia vem sendo pressionado pelas atividades humanas, o monitoramento *in situ* diminuiu globalmente nas últimas décadas (Vörösmarty et al., 2000). Isto ameaça nossa capacidade de compreender os impactos das mudanças ambientais e climáticas nos rios amazônicos. Embora, até esta data, nenhuma missão de satélite tenha sido lançada especificamente para monitorar as águas continentais, as observações do NA derivadas de radares altimétricos a bordo dos satélites lançados nas últimas décadas se mostraram complementares às séries históricas de medições (Fekete et al., 2012) e aprimoram o monitoramento dos rios amazônicos (Calmant e Seyler, 2006; Silva et al., 2014).

A bacia Amazônica tornou-se um laboratório ideal para estudos pioneiros que demonstraram a capacidade de estimar informações precisas de NA em locais específicos (cruzamento entre os cursos de água e as trajetórias teóricas dos satélites) graças a tratamentos específicos dos ecos de radar. Os primeiros estudos sobre NA na Amazônia utilizaram observações do Seasat (*Sea Satellite* da NASA), lançado em 1978, para estimar a declividade da linha d'água e sua variação temporal no curso principal do rio Amazonas (Guzkowska et al., 1990).

A configuração da órbita dos satélites com radares altimétricos define as interseções entre as faixas do satélite na Terra e o rio, as chamadas estações virtuais (VSs, na sigla em inglês), onde o NA pode ser estimado. Em uma determinada VS, o NA é estimado por meio de inversão do tempo de propagação do sinal de ida e volta que fornece o alcance. Várias correções de incertezas, devido ao atraso na propagação causada pela atmosfera e a dinâmica da superfície terrestre, por exemplo, devem ser aplicadas para estimar o NA. Stammer e Cazenave (2017) apresentaram uma extensa discussão sobre a estimativa do NA a partir de altimetria por satélite e dos erros associados. Desde os primeiros satélites, a precisão da órbita, que depende da densidade da atmosfera e da resolução do campo gravitacional, melhorou e agora está em torno de um centímetro (comparado aos 60 centímetros do Seasat). No entanto, o cálculo correto do *range* continua sendo um desafio, pois é necessário rastrear (a bordo) ou rastrear novamente (no solo) a forma de onda altimétrica (Frappart et al., 2006; Zhang et al., 2010) usando algoritmos que se adequem melhor à distribuição altamente variável da energia recebida pelo radar, que varia fortemente em função dos diferentes tipos de superfícies no campo de visão do satélite (Calmant et al., 2016).

Desde os primeiros estudos com dados Seasat, hoje já temos mais de 30 anos de monitoramento de águas interiores usando altimetria por satélite. Depois do Seasat, surgiu o *GEodetic and Oceanographic Satellite* (GEOSAT), que foi usado por Koblinsky et al. (1993) para estimar séries temporais do NA sobre a Amazônia com incertezas variando de 0,19 a 1,09 m em relação aos dados *in situ*. O Satélite Europeu de Sensoriamento Remoto (ERS-1, na sigla em inglês; lançado em 1991) iniciou uma longa família de satélites que seguiram a mesma órbita de repetição de 35 dias (ERS-1, ERS-2, ENVISAT -Satélite Ambiental e SARAL -Satélite com ARgos e ALtika), cobrindo o período de 1991 a 2016. Um grande avanço foi feito pelo projeto *Observations des Surfaces Continentales par Altimetrie Radar* (OSCAR), que avaliou o rastreamento específico ICE-2 de ecos de radar para calotas de gelo (Legresy et al., 2005) - um novo processamento (*retracking*) baseado no ajuste da borda de frente (*leading edge*) e da inclinação da borda de fuga (*trailing edge slope*) das formas de onda do radar a uma função Brown - para ERS-1, ERS-2 e ENVISAT, e promoveu sua entrega nos Registros de Dados Geofísicos (arquivos de dados contendo as medidas do altímetro ao longo da faixa e as correções que são necessárias para ser aplicadas à faixa a fim de recuperar o NA).

O novo processamento dos ecos de radar foi analisado por Frappart et al. (2016, 2006) e J. S. Da Silva et al. (2010) para mais de 70 VSs do ERS-2 e ENVISAT para rios de diferentes larguras (de dezenas de metros a quilômetros). Eles relataram que a seleção adequada dos dados considerados representativos do corpo hídrico é tão importante quanto a escolha do algoritmo de processamento (*retracking*). Os dados da órbita de repetição de 10 dias do Topex/Poseidon (T/P) e Jason-2/3 também foram avaliados na bacia Amazônica. Seyler et al. (2013) destacaram o ganho do Jason-2 (variando de 2008 a 2016 em sua órbita nominal) em comparação ao T/P (do final de 1992 a 2005), com uma incerteza em torno de 0,35 m, possivelmente devido à melhor capacidade do sensor de discriminar a planície de inundação circundante do rio.

Todas essas missões operam em modo de baixa resolução, ou seja, a cobertura da terra é grande (alguns quilômetros, dependendo da banda de operação do radar) e os ecos que retornam para a antena são influenciados pelo ambiente. O modo SAR, ativo nos satélites Sentinel-3, permite uma redução das contribuições ao redor, cortando a área circular iluminada pelo eco de radar em um determinado momento (Raney, 1998). Esta redução proporciona uma resolução espacial muito melhor ao longo do traço (*track*), porém não resolve algumas questões como as medidas de

inclinação transversal (Bercher et al., 2013). A adição de uma segunda antena, como no Cryosat-2, permite que o modo Interferométrico SAR corrija essas medições transversais, permitindo assim uma melhoria na precisão das séries temporais de NA. Entretanto, o uso do Cryosat-2 não é comum para o monitoramento do NA dos rios, já que sua órbita se desloca em torno de 30 km a oeste a cada 28,9 dias, 7 km a leste a cada 89 dias e retorna ao mesmo lugar a cada 369 dias. De fato, a maioria dos estudos sobre o uso de altimetria por satélite na bacia Amazônica tem se concentrado em órbitas repetitivas, embora alguns estudos tenham explorado o uso de missões à deriva ou com repetitividade longa encontrando boa precisão para monitoramento do NA (por exemplo, Bogning et al., 2018). Até hoje, as principais aplicações de missões à deriva ou com repetitividade longa consistem em limitar ou calibrar modelos hidrodinâmicos, porém nenhum estudo focou ainda na bacia Amazônica. Tais missões, em vez de fornecer uma observação do NA em uma base de 10 dias ou quase mensalmente, com uma grande distância entre traços no Equador (entre 60 km e 100 km), fornecem uma distribuição espacial muito mais densa, mas com observações menos frequentes. O uso de dados de altimetria a laser do ICESat (*Ice, Cloud, and land Elevation Satellite*) foi investigado por Hall et al. (2012). Eles concluíram que esta missão pode ser uma valiosa fonte de dados para o monitoramento de rios da Amazônia, com precisões de algumas dezenas de centímetros quando comparadas aos dados *in situ*. A missão ICESat foi continuada pelo ICESat-2, lançado em 2018. Estudos realizados por Bercher et al. (2013) e Jiang et al. (2017) concluíram que a missão SAR CryoSat-2 oferece novas oportunidades para monitorar os rios estreitos na bacia Amazônica e deve ajudar a conectar as missões de altimetria presentes e futuras.

A técnica de interferometria diferencial com dados SAR permite obter informações sobre mudanças nos deslocamentos de superfície, tais como mudanças topográficas. Medições em escala de centímetros das mudanças do NA em toda a área alagada na planície de inundação usando SAR interferométrico foram obtidas sobre as planícies de inundação da Amazônia pela primeira vez (Alsdorf et al., 2001a, 2001b, 2000). Esta estimativa é possível devido às interações do pulso de radar com a superfície da água e os troncos da vegetação alagada, causando um caminho de salto duplo (*double-bounce path*) (Alsdorf et al., 2000; Hess et al., 1995). Lee et al. (2020) e Mohammadimanesh et al. (2018) revisaram os métodos e limitações da técnica para aplicações em áreas úmidas.

Até o momento, as informações sobre o NA estão disponíveis como dados brutos

TABELA 3

Conjuntos de dados de séries temporais do nível da água superficial sobre os corpos hídricos de água.

NOME	FONTE	LINK DA WEB	REFERÊNCIA	ALVO	PRAZO DE ENTREGA*
G-REALM	USDA NASA	https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/Default.aspx#SatelliteRadarAltimetry	Birkett et al. (2017)	Lagos e reservatórios	NTC
River & Lake	Universidade De Montfort	http://altimetry.esa.int/riverlake/shared/main.html	Berry et al. (2005)	Rios, lagos e reservatórios	SCT (descontinuado)
Base de dados DAHITI	German Geodetic Research Institute	https://dahiti.dgfi.tum.de/en/	Schwatke et al. (2015)	Rios, lagos, reservatórios e áreas úmidas	NTC e reanálise
Produto GRRATS	Universidade Estadual de Ohio	https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/PRESWOT_HYDRO_GRRATS_L2_VIRTUAL_STATION_HEIGHTS_V2	Coss et al. (2020)	Rios	Somente reanálise
Hidrosat	ORE-HYBAM e ANA	http://hidrosat.ana.gov.br/	Carvalho et al. (2015)	Rios	NTC
Hydroweb	IRD/LEGOS, CNES (Agência Espacial Francesa) e Universidade do Estado de Amazonas	http://hydroweb.theia-land.fr/	Crétaux et al. (2011); J. S. Da Silva et al. (2010)	Rios, lagos e reservatórios	SCT e reanálise

STC: *Slow-Time Critical* - entregue no máximo após três dias; NTC: *Non-Time Critical* - normalmente entregue dentro de um mês.

*Tempo que leva para o dado ser disponibilizado nos sites.

e como dados processados, sendo que alguns grupos ou instituições fornecem as séries temporais já processadas (ver Tabela 3). Cada conjunto de dados fornece o NA em corpos de água selecionados, em todo o mundo ou em regiões específicas, e têm objetivos diferentes em termos de operacionalidade. Os procedimentos de

processamento e filtragem variam entre cada grupo, e as séries temporais das mesmas estações virtuais podem variar de um grupo para outro.

A **Figura 5** fornece a localização de todas as estações virtuais na bacia Amazônica da base de dado Hydroweb. A **Figura 5a** é uma representação da amplitude mediana do NA em cada estação virtual. A amplitude do NA medida pelos satélites é menor nas cabeceiras (0-3 m) e rios de médio porte (3-6 m) em relação ao trecho principal do rio Solimões-Amazonas e seus afluentes (9 - 12 m). Os maiores valores são encontrados para o rio Purus (> 15 m), afluente da margem direita. As **Figura 5b** e **c** fornecem, respectivamente, o mês em que tipicamente ocorrem os níveis altos e baixos, indicando a influência do regime das chuvas nas partes norte e sul da bacia e o deslocamento gradual devido ao tempo de propagação das cheias ao longo dos rios e planícies de inundação (~ 1- 3 meses). As **Figura 5d** e **e** fornecem séries temporais de NA de múltiplas missões, que variam de 2002 até o presente com ENVISAT e Sentinel3-B e de 2008 a 2020 com Jason-2 e Jason-3, respectivamente. Elas mostram o forte sinal sazonal da cheia gradual dos rios amazônicos e a variabilidade interanual dos níveis máximo e mínimo.

Devido à sua cobertura espacial relativamente densa (ver **Figura 5**), a altimetria por satélite tem sido utilizada para derivar os perfis altimétricos dos rios em toda a bacia. Esses perfis, calculados para águas baixas e altas do rio Negro a partir de VSs T/P (Frappart et al., 2005) e VSs ENVISAT (Leon et al., 2006), indicaram uma declividade mais baixa para o rio Negro ao longo de mais de 500 km (de sua foz até o curso de água) do que para o rio Solimões (confirmado por Callède et al., 2013). Tal diferença explica o forte efeito de remanso que ocorre na seção inferior do rio Negro e altera a época de pico e de vazões baixas. Outros efeitos de remanso, principalmente no trecho principal no rio Amazonas e em seus tributários, ficam evidentes nos perfis do rio a partir da altimetria por satélite. As observações de altimetria por satélite, embora escassas no tempo, agora fornecem uma rede densa o suficiente para monitorar eventos extremos, como os ocorridos em 2005 e 2010 na Amazônia (Frappart et al., 2012; Silva et al., 2012).

Uma aplicação direta desses perfis é a obtenção das variações espaço-temporais da declividade da superfície da água. Enquanto os estudos anteriores focaram nas variações espaciais do gradiente da superfície da água, uma primeira tentativa de estimar as variações temporais da declividade do trecho principal do Amazonas foi realizada por Birkett et al. (2002) usando VSs da missão T/P. Eles revelaram

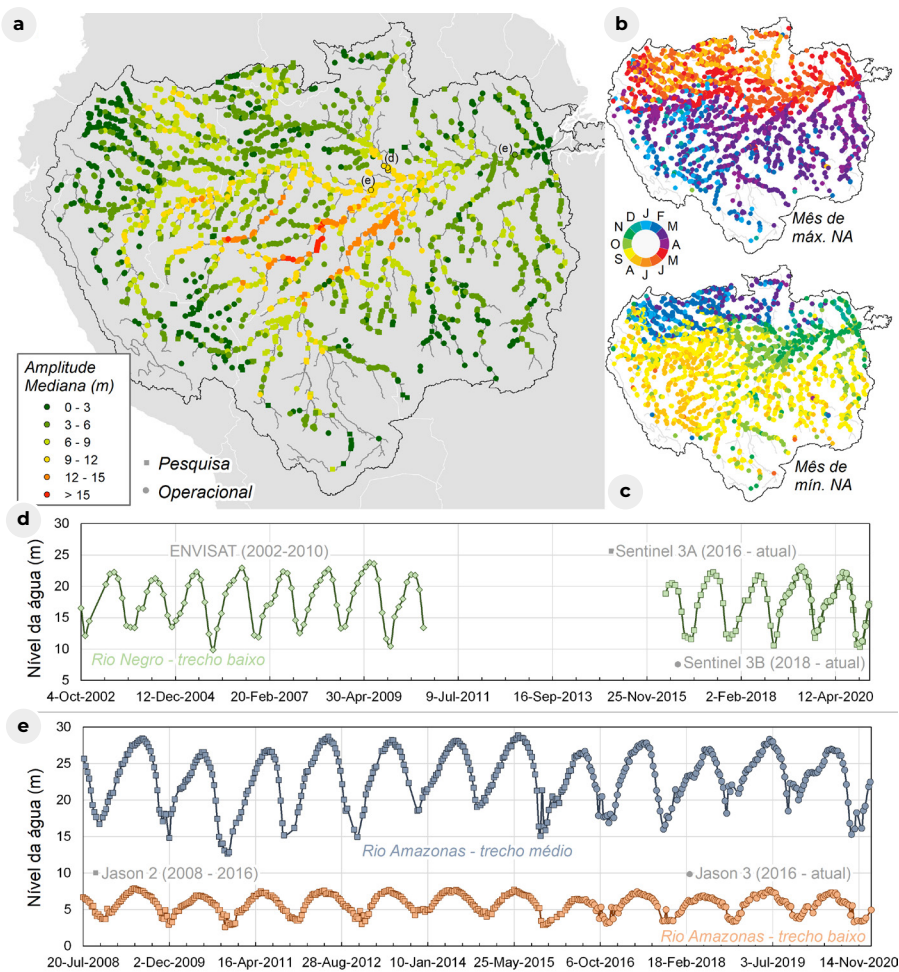


Figura 5: a) Localização das estações virtuais disponíveis gratuitamente no portal Theia-hydroweb (<http://hydroweb.theia-land.fr/>) e amplitude mediana da série temporal. Os pontos se referem as VSs operacionais (missões atuais em operação e atualizados em tempo quase real) e os quadrados são VSs de pesquisa (identificados como reanálise na tabela 3). As VSs estão destacadas por círculos pretos em (d) e (e); b) mês de máximo NA para a média da série temporal mensal em cada VS; c) mês de mínimo NA para a média da série temporal mensal; d) séries temporais compostas das VSs próximas umas das outras no trecho baixo do rio Negro, VSs NEGRO_KM1444, NEGRO_KM1420 e NEGRO_KM1404, e) séries temporais nos trechos médio e baixo do Amazonas compostas pela observação do Jason-2 e Jason-3 na VS AMAZONAS_KM1534 e AMAZONAS_KM0397, respectivamente.

mudanças no sinal da taxa de variação da declividade que foram explicadas pelo fato de o rio não alcançar o equilíbrio. Embora as declividades de Birkett et al. (2002) tenham se comparado bem com a declividade derivada do Modelo Digital de Elevação (MDE) da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) - um

instantâneo de perfis e declividades em fevereiro de 2000 (LeFavour e Alsdorf, 2005) - e com dados de instrumentos *in situ* (Calmant et al., 2013), essas quebras na taxa de variação de declividade não foram encontradas em perfis extraídos de bases de dados altimétricos mais recentes e completas (Calmant et al., 2016). Paris et al. (2016) estimaram duas séries temporais diferentes de declividades a partir da altimetria por satélite no trecho baixo do rio Negro: a primeira foi calculada usando uma interpolação diária das séries temporais de NA a montante e a jusante, fornecendo uma série temporal de declividades diárias, e a segunda foi calculada usando a climatologia média das VSs a montante e a jusante. Embora a curva-chave (relação entre NA e vazão do rio) tenha melhorado se considerarmos a variação da declividade com o tempo, utilizando ambos os métodos, foi a média mensal que forneceu o melhor resultado, ilustrando a dificuldade de inferir declividades a partir de observações incertas não obtidas diariamente.

Acoplando a altimetria por satélite e um modelo hidrológico e hidráulico por meio de curvas-chave, Paris et al. (2016) estimaram mapas da profundidade do rio ao longo da bacia Amazônica usando dados das missões ENVISAT e Jason-2. Esses mapas foram então utilizados por Garambois et al. (2017) em um trecho do rio Xingu para parametrizar um modelo hidráulico. Em casos em que a faixa terrestre do satélite corta várias vezes o mesmo curso do rio, é possível realizar uma análise mais refinada de NA. Isto ocorre em rios sinuosos que fluem de norte a sul (ou o contrário) como o rio Xingu, um tributário da margem direita do rio Amazonas (**Figura 2**). Dadas estas condições, os autores verificaram que a presença de um obstáculo no leito do rio produz alterações temporais no NA a partir de altimetria orbital. Brêda et al. (2019) propuseram um novo método de assimilação de dados altimétricos, desde a inserção direta até um filtro Kalman de base hidráulica, para melhorar as estimativas batimétricas do rio Madeira. Eles concluíram que a altimetria por satélite pode ser usada para limitar melhor as estimativas de NA e de inundação. Uma análise de NA da missão ENVISAT revelou a passagem de água do rio Negro para o rio Solimões através de suas planícies de inundação interligadas em períodos de cheia (Silva et al., 2012).

A capacidade de observar a conectividade entre canal e planície de inundação por meio de altimetria foi investigada por Park (2020). Ao observar mudanças sazonais no NA em rios e planícies de inundação adjacentes, eles separaram o papel dos fluxos canalizados e do escoamento difuso por sobre as margens (*overbank flow*), que contribuem para o armazenamento da água de superfície e suavizam a topografia

induzida pela canalização. A planície de inundação localizada entre os rios Madre-de-Dios, Beni, Guaporé e Mamoré, na bacia do alto rio Madeira, foi caracterizada usando dados ENVISAT e SARAL (Ovando et al., 2018). As diferenças de nível da água entre as regiões frequentemente alagadas, sem conexão direta com os Andes, e as regiões sujeitas a eventos esporádicos, embora com grandes cheias, foram destacadas. Recentemente, Fleischmann et al. (2020) produziram séries temporais de NA nas complexas áreas úmidas interfluviais do rio Negro a partir dos dados do Sentinel3-A. Pela primeira vez, eles relataram variações do nível da água inferiores a 1 m nessas áreas complexas. Seus resultados mostram que a altimetria por satélite pode ajudar a entender o comportamento hidráulico de áreas complexas pouco exploradas e ajudar a validar modelos hidrológicos e hidráulicos.

Alsdorf et al. (2000, 2005, 2007) aplicaram pela primeira vez o SAR interferométrico (InSAR, na sigla em inglês) nas planícies de inundação da Amazônia central e mostraram que nelas os fluxos de água são dinâmicos no espaço e no tempo, mudando de direção ao longo do pulso de inundação anual. Antes da cheia, as vazões são controladas pela topografia local e o NA na planície de inundação não é equivalente ao nível do rio (Alsdorf et al., 2007). Ao assumir que a superfície da água na planície de inundação é equivalente à do canal principal, as estimativas de armazenamento de água derivadas da propagação de cheias podem ser superestimadas, como mostrou Alsdorf (2003). H. C. Jung et al. (2010) compararam as mudanças temporais nas águas das planícies de inundação nas bacias da Amazônia e do Congo. Enquanto o rio Amazonas está conectado por muitos canais às planícies de inundação e tem padrões de fluxo complexos, os rios do Congo (e especialmente o *Cuvette Centrale*) têm conexões esparsas com áreas interfluviais e padrões de fluxo que não são bem definidos e com fronteiras difusas. Os padrões de variações da superfície da água nas planícies de inundação localizadas nos rios Tapajós e Solimões foram analisados por Wang et al. (2011) e Cao et al. (2018), respectivamente. As missões SAR mais recentes permitiram o monitoramento de corpos de água menores.


A altimetria por satélite pode ser usada para derivar variáveis hidrológicas usualmente não medidas, por meio da avaliação direta ou combinação com outros produtos de SR. Pfeiffer et al. (2014) conseguiram inferir as diferentes trocas entre as águas superficiais e subterrâneas a partir de 491 VSs ENVISAT localizados em toda a bacia Amazônica. A estimativas de desvios do nível de base das águas subterrâneas atingiram até 5 m. Frappart et al. (2012) fizeram um uso conjunto de altimetria por satélite e extensão de inundação para gerar variações do armazenamento

de águas continentais superficiais (ver capítulo 8). Estas duas variáveis foram usadas em Frappart et al. (2019) para estimar a variabilidade espaço-temporal do armazenamento de água subterrânea na bacia Amazônica. Campos et al. (2001) e Silva et al. (2019) encontraram marcas de eventos climáticos globais como ENSO e variações da temperatura da superfície do mar nas séries temporais de NA do T/P e do Jason-2, respectivamente. Como as estimativas de NA são agora entregues em tempo quase real, as curvas-chave que relacionam NA com vazão e profundidade têm sido o foco de vários estudos (ver detalhes no capítulo 10). Essas curvas-chave foram calculadas usando altímetros locais (Zakharova et al., 2006) ou resultados de modelos (Getirana et al., 2012; Leon et al., 2006). Ao restringir os parâmetros da curva-chave em limites realistas do coeficiente de rugosidade de Manning, Paris et al. (2016) mostraram que as vazões previstas da altimetria por satélite são comparáveis àquelas medidas in situ. A série temporal original de NA ou sua conversão em vazão oferece uma ferramenta independente para validar modelos hidrológicos (Paris et al., 2016) e seus dados de entrada de chuva (Silva et al., 2014).

Com sua tecnologia inovadora baseada em *swath altimetry* (altimetria de bandas largas, em livre tradução do inglês), cobertura quase global e observação conjunta de NA, largura e declividade da linha da água, a missão SWOT, a ser lançada em 2022, permitirá uma observação sem precedentes de NA em toda a rede fluvial e nos principais lagos e planícies de inundação. Como salientado por Biancamaria et al. (2016), a observação do NA usando o SWOT permitirá um melhor monitoramento das águas transfronteiriças e das planícies de inundação na Amazônia. Dedicada a fazer amostragem de todos os rios com largura superior a 100 m e lagos maiores que 250 x 250 m, a missão permitirá uma consequente redução de incertezas de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos globais e regionais, através de técnicas como assimilação de dados (Emery et al., 2020; Wongchuig et al., 2020). A estimativa da vazão obtida via altimetria por satélite se beneficiará dos dados SWOT, tanto pela cobertura global quanto pela observação de declividade, permitindo uma melhor correção de modelos hidráulicos (Wilson et al., 2015).

Graças a mais de vinte anos de estudos, as bases de dados de observação da Terra por satélite, especialmente as de altimetria por satélite, têm se revelado como uma ferramenta sem precedentes para monitorar bacias hidrográficas continentais e suas secas e enchentes (Lopez et al., 2020). As atuais missões de altimetria por satélite inauguraram a era do monitoramento operacional em larga escala a partir do espaço, e isto será de importância fundamental nas próximas décadas na grande

bacia hidrográfica transfronteiriça tropical que é a bacia Amazônica. Com quase duas mil estações virtuais distribuídas por toda a bacia e disponíveis gratuitamente, e potencialmente centenas mais no futuro próximo, a altimetria por satélite pode complementar, de maneira promissora, a rede tradicional de campo (*in situ*), cuja localização geralmente depende da proximidade de uma cidade ou comunidade. Entretanto, monitorar operacionalmente águas não abertas, como as planícies de inundação cobertas por vegetação permanentemente ou sazonalmente alagadas, continua sendo um desafio. Na verdade, poucos lagos e reservatórios são monitorados por altimetria rotineiramente na bacia, e este número poderia ser maior (Crétau et al., 2011; Crétau e Birkett, 2006). As próximas missões se beneficiarão de pesquisas anteriores para melhorar a precisão das séries temporais de NA e promover seu uso para monitorar mais fenômenos locais, tais como os intercâmbios entre planícies de inundação e canais. Embora limitados devido à disponibilidade de dados apropriados, os conjuntos de dados InSAR ajudam a caracterizar a conectividade e a dinâmica das planícies de inundação e rios. A cobertura global da próxima missão SWOT aumentará muito nossa compreensão do ciclo global da água e deverá permitir uma melhor quantificação dos vieses entre missões passadas e atuais, ajudando a transformar os arquivos de altimetria por satélite em um conjunto de dados climáticos único e a compreender os impactos das mudanças climáticas e das atividades humanas na bacia. Tal tarefa será beneficiada pelo projeto em andamento VASHYB (*Validation of Altimetric Satellites for HYdrology in Brazil*, <https://swot.jpl.nasa.gov/documents/1054/>), que visa a validar observações SAR e InSAR. A missão SWOT irá aumentar drasticamente nossa capacidade de modelar a bacia Amazônica e as variações de seu ciclo da água, graças à nova capacidade de monitorar variáveis hidrológicas (altura, declividade e vazão associada) de centenas de rios de 100 m de largura (Biancamaria et al., 2016). A precisão centimétrica do NA e declividade (Desai, 2018) devem trazer novas percepções sobre os fluxos de água na Amazônia. Como a principal limitação para um uso mais amplo da altimetria por satélite continua sendo sua amostragem temporal relativamente baixa, missões futuras, como a missão SMASH (*SMall Altimetry Satellites for Hydrology*, Blumstein et al., 2019), lançada junto com a constelação atual, devem ajudar a resolver esta questão.



05
Extensão de
Águas Superficiais

Fabrice Papa
Ayan Fleischmann
John Melack
Rodrigo Paiva
Alice Fassoni-Andrade
Filipe Aires

Caracterizar a extensão e variação de corpos de água superficiais e ecossistemas aquáticos, que incluem rios, igarapés, lagos e áreas úmidas como várzeas e igapós, é de importância primordial para o estudo dos ciclos hidrológico, energético e biogeoquímico da bacia Amazônica (Junk, 1997; Melack et al., 2009). Efetivamente, cobrindo cerca de 20% da superfície da bacia e com grande variabilidade temporal, as águas superficiais da Amazônia desempenham um papel fundamental no clima e na manutenção da biodiversidade. As águas superficiais da Amazônia são uma importante fonte e sumidouro de dióxido de carbono (Abril et al., 2014; Amaral et al., 2020; Raymond et al., 2013) e a maior fonte natural de metano nos trópicos (Kirschke et al., 2013; Melack et al., 2004; Pangala et al., 2017; Pison et al., 2013). Nesse contexto, a compreensão da dinâmica das águas superficiais é de extrema importância para a hidrologia amazônica, para os processos biogeoquímicos e sua ligação com o clima, para uma gestão efetiva dos recursos hídricos e pesqueiros e para uma gestão de desastres para cidades que estão sob risco de inundação (por exemplo, Iquitos, Porto Velho, Rio Branco, Cruzeiro do Sul). Isto é particularmente importante no contexto das atuais mudanças globais que impactam a Amazônia (ver capítulo 12), com intensas secas e inundações, que recentemente afetaram grandes áreas desta região (Davidson et al., 2012; Jiménez-Muñoz et al., 2013; Marengo et al., 2011, 2008). Ademais, o monitoramento das variações das águas superficiais é fundamental para apoiar o desenvolvimento de modelos matemáticos do ciclo hidrológico da Amazônia (ver capítulo 10).

Caracterizar a distribuição e quantificar as variações sazonais e interanuais da extensão de águas superficiais na escala da bacia Amazônica é um desafio, dada sua grande variedade e variabilidade, e presença de cobertura de nuvens e vegetação florestal. As primeiras estimativas da distribuição das águas superficiais para grandes áreas foram baseadas em bancos de dados estáticos de cartas aeronáuticas e fotografias aéreas, que frequentemente refletiam a extensão máxima de águas abertas (Cogley, 2013; Matthews e Fung, 1987) e não forneciam informações sobre suas variações temporais e espaciais. O surgimento das observações por satélite permitiu monitorar a dinâmica em larga escala das águas superficiais, incluindo as da bacia Amazônica (Alsdorf et al., 2007; Prigent et al., 2007), avançando na compreensão dos processos físicos, biogeoquímicos, ambientais e ecológicos associados.

Diferentes técnicas baseadas em SR, utilizando observações feitas em uma ampla gama do espectro eletromagnético (visível, infravermelho e micro-ondas; Melack et al., 2004; Prigent et al., 2016), foram desenvolvidas, com diferentes graus de sucesso,

para obter estimativas quantitativas da extensão e da dinâmica das águas superficiais e dos sistemas aquáticos na Amazônia (Tabela 4). Essas técnicas abrangem diversas resoluções espaciais e temporais, muitas vezes baseadas em uma análise de custo-benefício entre coberturas temporais e espaciais. Observações com baixa resolução espacial (por exemplo, ~10-50 km dos sensores de micro-ondas passivos) são geralmente limitadas à detecção de áreas relativamente grandes e alagadas, ou regiões onde a área acumulada de pequenas áreas representa uma porção bastante grande da cobertura do satélite. Elas têm a vantagem de cobertura temporal frequente, às vezes diária. As observações de alta resolução (por exemplo, <100 m do SAR, por exemplo) fornecem informações em uma escala espacial fina, mas têm baixa frequência temporal, muitas vezes limitando as observações sobre grandes áreas a algumas vezes por estação do ano. As observações ópticas e infravermelhas oferecem resolução espacial e temporal boas, mas têm capacidades limitadas na região tropical da Amazônia, pois são incapazes de penetrar nas nuvens e na vegetação densa.

Observações de micro-ondas passivos demonstraram sua utilidade para observar as águas superficiais e a extensão de inundações e forneceram algumas das primeiras estimativas por satélite da extensão de águas superficiais da Amazônia (Giddings e Choudhury, 1989), conforme revisado por Kandus et al. (2018). As emissividades

TABELA 4

Abordagens baseadas em SR desenvolvidas para monitorar a extensão de águas superficiais na Amazônia (lista não exaustiva). São mostradas referências, nome do sensor/satélite, nome do produto (quando disponível), área original de estudo, resolução espacial/temporal e período de disponibilidade dos dados.

ABORDAGENS BASEADAS EM SR	REFERÊNCIAS	SATÉLITES/ SENSORES (nome do produto)	ÁREA ORIGINAL DE ESTUDO	RESOLUÇÃO ESPACIAL/ TEMPORAL	PERÍODO DE DISPONIBILIDADE
Micro-ondas Passivos	Giddings e Choudhury (1989)	SMMR no Nimbus 7	4 grandes bacias hidrográficas da SA	~25km / Mensal	1979-1985
	Sippel et al. (1994)	SMMR no Nimbus 7	Amazônia Central e planícies de inundação	~25km / Mensal	1979-1985
	Sippel et al. (1998)	SMMR no Nimbus 7	Rio Amazonas e afluentes	~25km / Mensal	1979-1985 (e 1902-1995 reconstrução)
	Hamilton et al. (2002)	SMMR no Nimbus 7	Quatro grandes bacias hidrográficas sobre a SA	~25km / Mensal	1979-1987
	Brakenridge et al. (2007)	AMS/E no Aqua	Global	~25km / Diária	2002-2011
	Parrens et al. (2017)	SMOS (SWAF)	Bacia Amazônica	~25-50km / 3-dias	2009-presente

Micro-ondas Ativos	Hess et al. (2003)	SAR no JERS-1	Amazônia central	100m / Set-Out 95 e Maio-Jun 96	Set-Out 95 e Maio-Jun 96
	Bourrel et al. (2009)	SAR no ERS-2 / RADARSAT	Amazônia Boliviana	2 RADARSAT (50m) / 3 imagens ERS (15m)	1996-1998
	Arnesen et al. (2013)	ScanSAR mode no ALOS/PALSAR	Planície de inundação do trecho baixo do rio Amazonas	100m / Doze imagens ScanSAR	2007-2010
	Ferreira-Ferreira et al. (2015)	SAR no ALOS/PALSAR	Planície de inundação da Amazônia Central	12.5 / 13 ScanSAR fine beam images	2007-2010
	Hess et al. (2015)	SAR no JERS-1	Bacia Amazônica	100m / Set-Out 1995 e Maio-Jun 1996	Set-Out 1995 and Maio-Jun 1996
	Chapman et al. (2015)	Modo ScanSAR no ALOS/PALSAR	Bacia Amazônica	100m / 323 imagens ScanSAR	2007-2010
	Ovando et al. (2018, 2016)	Modo ScanSAR no ALOS/PALSAR e reflectância MODIS	Áreas úmidas Amazônia Boliviana	100m / 45 ScanSAR e 500m / 8-dias / imagens MODIS	2007-2009 e 2001-2014
	Park e Latrubesse (2017)	SAR no ALOS/PALSAR	Planícies de Inundação da Amazônia (Miratuba)	12.350m / 19 imagens	2006-2008
	Pinel et al. (2019)	SAR no ALOS/PALSAR	Rio Solimões (Janauacá)	30m / 23 imagens	2007-2011
	Resende et al. (2019)	SAR no ALOS/PALSAR	Bacia Amazônica	25m / 56 imagens	2006-2011
Rosenqvist et al. (2020)	ScanSAR no ALOS-2 PALSAR-2	Bacia Amazônica	50m / Mínimo e Máximo anuais	2014-2017	
Óptico e infravermelho	Yamazaki et al. (2015)	Landsat (G3WBM)	Global	90m / 4 cenas de corpo de superfície freq. no intervalo de 5 anos	1990-2010
	Pekel et al. (2016)	Landsat (GSW)	Global	30m / ocorrência de águas superficiais	1984-2015
	Allen e Pavelsky (2018)	Landsat (GRWL)	Global	30m / larguras e áreas estáticas	-
	Souza et al. (2019)	Landsat	Bacia Amazônica	30m / Mudanças da água de superfície	1985-2017
Técnica Multissatélite (Micro-ondas passivos em combinação com outras observações de SR)	Prigent et al. (2020, 2007)	SSM/AVHRR/ERS (GIEMS)	Global	-25km / mensal	1992-2015
	Schroeder et al. (2015)	SSM/I, SSMIS, ERS, QuikSCAT, ASCAT (SWAMPS)	Global	-25km / mensal / diária	1992-presente
	Aires et al. (2013)	GIEMS/JERS-1 SAR	Amazônia Central	500m / mensal	1993-2007
	Fluet-Chouinard et al. (2015)	GIEMS reduzido (ou GIEMS-D15)	Global	500m / max. / min. / média	1993-2007
	Aires et al. (2017)	GIEMS reduzido (ou GIEMS-D15)	Global	90m / mensal	1993-2007
	Parrens et al. (2019)	SMOS reduzido (ou SWAF-HR)	Bacia Amazônica	1km / 3-dias	2010-2016

(e temperaturas de brilho) são sensíveis à presença de águas na superfície (Choudhury, 1991; Sippel et al., 1994) com uma diminuição da emissividade em ambas as polarizações lineares (horizontal e vertical) e um aumento da diferença de polarização, especialmente em baixas frequências, devido às diferentes propriedades dielétricas entre água, solo e vegetação. As águas superficiais e padrões de inundação nas grandes planícies de inundação da Amazônia central (Hamilton et al., 2002) foram obtidas por meio da análise da diferença de polarização de 37-GHz observada pelo *Scanning Multichannel Microwave Radiometer* (SMMR; satélite Nimbus-7, 1979-1987). Ao desenvolver uma relação entre a área total inundada ao longo do trecho principal do rio Amazonas e as médias mensais do nível da água do rio em Manaus, elas forneceram a primeira reconstrução de 94 anos de áreas inundadas, estimando a média de longo prazo da área inundada ao longo da várzea do rio Amazonas em ~ 47000 km². Esses estudos foram seguidos por produtos de águas superficiais derivados de sensores micro-ondas passivos sobre a Amazônia, usando o Sensor Especial de Micro-ondas/Imager (SSM/I), *Advanced Microwave Scanning Radiometer* (AMSR-E; Brakenridge et al., 2007) e, mais recentemente, observações de *Soil Moisture Ocean Salinity* (SMOS) (Parrens et al., 2017). Parrens et al. (2017) utilizaram as observações da banda L do micro-ondas (1,4 GHz) de 2010 a 2017 para mapear a evolução temporal dos corpos de água da Amazônia em resolução espacial grosseira (~50 km) e resolução temporal semanal (produto chamado SWAF) com a capacidade, graças à frequência da banda L, de melhor estimar a água sob densos dosséis. As observações de micro-ondas passivo têm limitações inerentes por causa de sua cobertura da terra, tipicamente na ordem de 25-50 km, e sua resolução espacial relativamente baixa é muitas vezes insuficiente para observar pequenos corpos de água.

Metodologias multissatélites que combinam diferentes tipos de observações para estimar a extensão de águas superficiais e suas dinâmicas expandem as informações fornecidas pelos radiômetros de micro-ondas passivo (**Tabela 4**). Embora projetadas originalmente para aplicações em uma escala global, estas abordagens têm sido avaliadas na bacia Amazônica. As bases de dados *Global Inundation Extent from Multi-Satellite* (GIEMS, Papa et al., 2010; Prigent et al., 2007, 2016, 2020) e *Surface Water Microwave Product Series (SWAMPS) Inundated Area Fraction* (Schroeder et al., 2015) detectam e quantificam a variabilidade multidecadal da extensão de águas superficiais sobre diversos ambientes (Frappart et al., 2008; Papa et al., 2013, 2008). A versão atual do GIEMS está disponível mensalmente, de 1992 a 2015, com uma resolução espacial de ~25 km (GIEMS-2, Prigent et al., 2020, **Figura 6a**), enquanto o

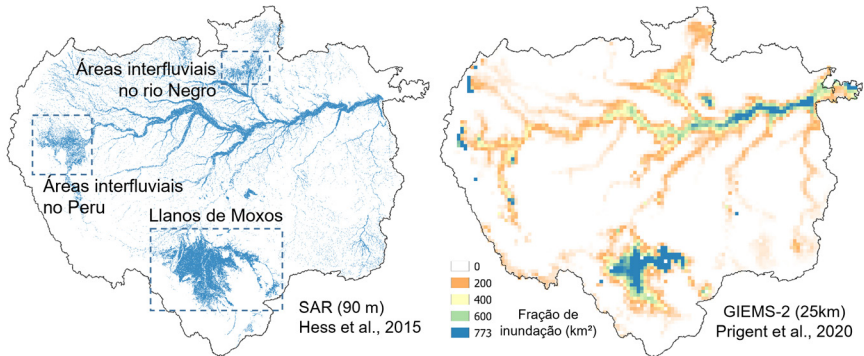
SWAMPS oferece informações atuais e em tempo quase real (Jensen et al., 2018). O uso desses conjuntos de dados provenientes de micro-ondas passivos ajudou a revelar as fontes e características do pulso de inundação e do pulso de inundação anual ao longo do rio Amazonas e seus principais afluentes. Eles contribuíram para mostrar, em escala de bacia, a sazonalidade da extensão de águas superficiais, com a estação de cheias ocorrendo em maio-junho e a de secas em novembro nas planícies de inundação da Amazônia central. Em escala da bacia, a extensão de águas superficiais da Amazônia (Figura 6b) varia de ~100 mil km² (estação de águas baixas) a quase ~400 mil km² (estação de águas altas), mas com uma grande variabilidade interanual, impulsionada principalmente por eventos extremos de secas (1998, 2005, 2010) ou cheias (1997, 2014) (Papa et al., 2010; Prigent et al., 2020). Todavia, as extensões máximas de águas superficiais de GIEMS e SWAMPS são menores do que a das estimativas de SAR (Figura 6b).

Prigent et al. (2007) mostraram que as inundações sazonais diferem entre as partes norte e sul da bacia devido a diferenças sazonais na precipitação. Papa et al. (2008) relataram um atraso no período de precipitação, extensão de cheias e picos da vazão em uma escala de bacia, sugerindo, como em Richey et al. (1989), que planícies de inundação em grandes bacias como a amazônica podem armazenar grande volume de água e alterar o transporte de água. Richey et al. (1989) aplicaram um esquema simples de propagação de água e estimaram que até 30% da vazão do rio Amazonas é conduzido através das planícies de inundação. No entanto, estudos como Getirana et al. (2012), baseados em um modelo hidrológico de larga escala que utilizou o GIEMS para avaliar suas simulações de planícies de inundação, sugeriram que o valor real poderia estar abaixo de 5%. Além disso, Sorribas et al. (2020) relataram que a proporção entre o fluxo de água rio-planície e a vazão escoada no rio principal varia entre 5 e 40%, o que é comparável ao intervalo estimado por Richey et al. (1989) e Alsdorf et al. (2010), que usaram métodos gravimétricos e de imagem por satélite para estimar as quantidades de água que enchem e drenam sazonalmente das planícies de inundação amazônicas. Portanto, é necessário entender melhor os processos que controlam as inundações amazônicas para quantificar os vários fluxos em ambientes de planícies de inundação, como é evidente nas aplicações de modelos de inundação em escala regional (Rudorff et al., 2014a).

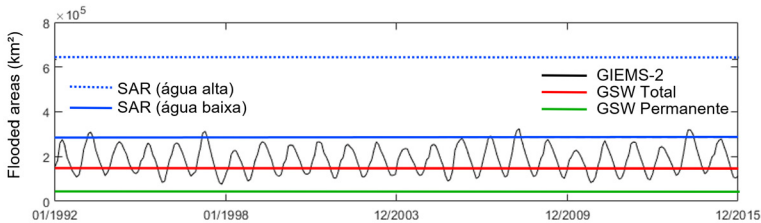
Radares de abertura sintética são instrumentos ativos que medem o retroespalhamento da superfície observada em um ângulo de incidência (*off-nadir*), independentemente da cobertura das nuvens, permitindo delinear águas abertas e áreas alagadas cobertas

por vegetação com uma resolução espacial típica de 10-100 m (Behnamian et al., 2017; Hess et al., 1990; Kasischke et al., 1997). O experimento *Spaceborne Imaging Radar-C* (SIR-C) forneceu dados de alta qualidade, multibanda e multipolarização para a Amazônia que levaram ao desenvolvimento de novas abordagens usando

a Extensão máxima da inundação da bacia Amazônica



b Variabilidade da extensão da água superficial em escala de bacia



c Extensão máxima da inundação em escala regional (*downscaling*)

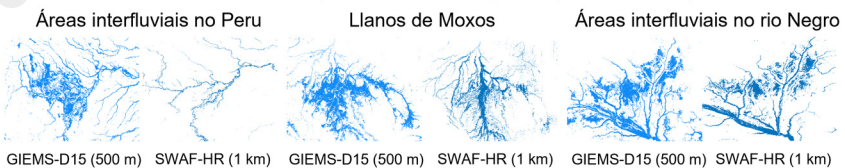


Figura 6: Extensão de águas superficiais da bacia Amazônica. (a) Mapa da extensão máxima de áreas úmidas e águas superficiais (estação de águas altas) do SAR JERS-1 (Hess et al., 2015) e mapa da extensão máxima anual de águas superficiais (fração em km^2 para cada pixel de 773 km^2) com média calculada de 1992 a 2015 do GIEMS2 (Prigent et al., 2020). (b) Variabilidade média mensal da extensão de águas superficiais na escala de bacia para o período 1992- 2015, a partir do GIEMS2 (linha preta sólida), juntamente com estimativas de áreas úmidas derivadas do SAR JERS-1, área inundada para estações de águas altas (linha azul tracejada) e águas baixas (linha azul sólida). Também são mostradas a extensão de águas superficiais permanentes globais (GSW, Pekel et al., 2016) (linha verde, GSW permanente) e a extensão de águas superficiais totais (a permanente mais a temporária) no máximo (linha vermelha, GSW Total). (c) Mapa da extensão máxima de águas superficiais em escala regional (caixas em (a) indicam os locais) do GIEMS-D15 (Fluet-Chouinard et al., 2015) e do SWAF-HR (Parrens et al., 2019).

SAR. Alsdorf et al. (2000) demonstraram a capacidade de análises interferométricas para detectar variações em escala de centímetros na declividade dos rios e planícies de inundação da Amazônia (ver capítulo 4). Hess et al. (1995) desenvolveram algoritmos para detectar inundação e vegetação em áreas úmidas amazônicas, que se beneficiaram da modelagem das interações entre vegetação e radar, incluindo o efeito *double-bounce*. Esta compreensão levou ao uso de dados fornecidos pelo *Japan Earth Resources Satellite-1* (JERS-1) para produzir o primeiro mapa de áreas úmidas de alta resolução para a região central da Amazônia, em períodos de águas baixas e águas altas, a 100 m de resolução (Hess et al., 2003). Esses resultados foram validados com transectos aéreos, de alta resolução e videográficos, em toda a área de imagem (Hess et al., 2003). Hess et al. (2003) descobriram que 17% da área de estudo de 1,77 milhões de km² era ocupada por áreas úmidas, das quais 96% eram inundadas em águas altas e 26% em águas baixas. As florestas inundadas representavam quase 70% da área total das áreas úmidas, mas as proporções dos habitats das áreas úmidas apresentaram grandes variações regionais relacionadas à geomorfologia das planícies de inundação. Essas novas estimativas de grandes áreas inundadas foram de grande importância para compreender a emissão de gás metano e dióxido de carbono das áreas úmidas amazônicas (ver capítulo 11).

As estimativas do SAR JERS-1 foram estendidas a todas as áreas úmidas da bacia Amazônica (região <500 m acima do nível do mar) (**Figura 6a**; Hess et al., 2015). Este produto de Hess et al. (2015) é atualmente uma das principais referências para mapeamento destas áreas na região, sendo frequentemente usado em comparações com outros produtos derivados de satélite. Estima-se que a extensão de áreas inundadas (**Figura 6b**) seja de ~285 mil km² para a época das águas baixas (outubro-novembro de 1995) e de ~634 mil km² para as épocas das águas altas (maio-julho de 1996). Uma comparação interessante foi feita para o corredor central da Amazônia (Prigent et al., 2007) entre o GIEMS e o mosaico da banda L do SAR JERS-1 de 100 m de resolução de Hess et al. (2003) para águas baixas (setembro-outubro de 1995) e altas (maio-junho de 1996). Para ambas as estações do ano, as estruturas espaciais são semelhantes, mas as estimativas da extensão de águas superficiais observadas pelo SAR (118 mil km² para a estação de águas baixas, 243 mil km² para a estação de águas altas) são maiores que a área estimada pelo GIEMS (105 mil km² para a estação de águas baixas, 171 mil km² para águas altas). Graças à sua melhor resolução espacial, as estimativas do SAR são capazes de discriminar corpos de água menores que o GIEMS (tipicamente corpos de água menores que 80 km², ou seja, 10% de um pixel do GIEMS), especialmente para a estação de águas baixas.

Para toda a bacia Amazônica, as estimativas em sua total amplitude do GIEMS não correspondem às do SAR (**Figura 6a e b**), como relatado em Hess et al. (2015), que sugeriu que os conjuntos de dados globais derivados de sensores de menor resolução espacial ou sensores ópticos capturam menos de 25% da área úmida mapeada pelo SAR.

O uso de cobertura multitemporal SAR, como o modo ScanSAR do ALOS/PALSAR, fornece variações de extensão de inundação em escalas mais locais como, por exemplo, a planície de inundação do Lago Grande de Curuai ao longo do baixo rio Amazonas (Arnesen et al., 2013), as várzeas de Mamirauá (Ferreira-Ferreira et al., 2015) ou padrões de inundação na Amazônia central (Pinel et al., 2019; Resende et al., 2019). Rosenqvist et al. (2020) geraram mapas anuais de extensão máxima e mínima de inundação sobre a Amazônia usando o modo ScanSAR do ALOS-2/PALSAR-2, em linha com os mapas de inundação anteriormente gerados com a banda L do JERS-1 e as classificações do radar ALOS/PALSAR (Chapman et al., 2015). Em escala regional, Bourrel et al. (2009) mapearam as inundações na Amazônia Boliviana a partir dos dados da banda C do SAR/Micro-ondas do RADARSAT e do ERS-2. Na mesma região, a dinâmica das águas superficiais das áreas úmidas da Amazônia Boliviana (Ovando et al., 2018), bem como a caracterização de eventos extremos de inundação (Ovando et al., 2016), foram investigados combinando as observações SAR do ALOS/PALSAR com mapas de inundação multitemporais MODIS e variações do nível da água derivadas da altimetria (ENVISAT e SARAL). Outras missões SAR, tais como a do satélite Sentinel-1 do programa Copernicus (lançado em 2014), que oferecem uma revisita global de 6-12 dias, ainda não foram totalmente exploradas na Amazônia e apresentam novas oportunidades para o mapeamento das variações espaciais e temporais das águas superficiais em uma escala espacial fina em ambientes tropicais. O lançamento, no futuro próximo, de novos satélites com tecnologia SAR, como NISAR e SWOT (Prigent et al., 2016), irá oferecer novas oportunidades para monitorar as águas superficiais da Amazônia com sensores especialmente desenvolvidos para estes fins.

As observações de imagens ópticas e infravermelhas (por exemplo, Landsat, SPOT, QuickBird, Ikonos, AVHRR, MODIS, Sentinel 2A/B) oferecem altas resoluções espaciais e temporais (~1-500 m, diárias a semanais), mas geralmente têm uso limitado em ambientes tropicais pela sua incapacidade de penetrar nas nuvens e na vegetação densa. Portanto, continua sendo um desafio monitorar a inundação na Amazônia central durante o período de chuvas, devido à grande cobertura de nuvens

(Asner, 2001; Hess et al., 2015; Klein et al., 2015). Entretanto, a classificação das imagens ópticas usando índices de água e métodos relacionados, conforme revisado por Huang et al. (2018), permite estimar a frequência das inundações com base em mapas temporais da cobertura de águas superficiais, e, apesar das limitações da cobertura vegetal de dosséis e das nuvens, esse tipo de dado pode ser valioso para monitorar águas superficiais abertas. Vários estudos (Tabela 4) baseados em observações do Landsat criaram bancos de dados globais da área de rios (*Global River Widths from Landsat - GRWL*; Allen e Pavelsky, 2018) e águas superficiais (Pekel et al., 2016; Yamazaki et al., 2015), que podem ser usados em escala da bacia Amazônica. Com base no monitoramento em uma escala decadal das missões Landsat, o conjunto de dados *Global Surface Water* (GSW, Pekel et al., 2016) usou três milhões de imagens ao longo de 32 anos (de 1984 a 2015) com uma resolução espacial de 30 m para obter um registro mensal da presença de água em cada *pixel* Landsat.

Na bacia Amazônica, as estimativas GSW de extensão de águas superficiais (permanente e total, como a soma dos corpos de água permanentes e temporários) são inferiores àquelas obtidas por outras técnicas baseadas em SR como SAR ou combinação de múltiplos satélites (Figura 6b), e a comparação de GSW com GIEMS-D3 (veja mais abaixo) mostrou que corpos de água sazonais em savanas e florestas de inundação não foram detectados corretamente (Aires et al., 2018). Souza et al. (2019) desenvolveram outra classificação Landsat para estimar as mudanças de longo prazo nas águas superficiais da Amazônia revelando o recente aumento nas áreas associadas a lagos de hidrelétricas. Missões recentes de satélites como o Sentinel 2A/B (desde 2015, com resolução espacial de 10 m em intervalos de 5-10 dias; Pham-Duc et al., 2020) ou programas como o RapidEye (desde 2008, com resolução espacial de 5 m e resolução temporal de 1-5,5 dias; Garousi-Nejad et al., 2019) ou o PlanetScope (CubeSats, desde 2014, com resolução espacial de 3-5 m e tempo de revisita diária; Cooley et al., 2019) podem trazer novas oportunidades para estudar a extensão de águas superficiais em escala fina da Amazônia.

Com o objetivo de aproveitar os pontos fortes e complementares de múltiplas observações de satélites, como por exemplo as estimativas de baixa resolução e de longo prazo de micro-ondas passivos versus as observações de alta resolução e limitadas no tempo de observações SAR, foi desenvolvida uma metodologia de *downscaling* por Aires et al. (2013). Esta metodologia combina produtos complementares para estimar inundação mensal na Amazônia central com ~500 m de resolução espacial

para o período 1993–2007 (Aires et al., 2013). Vários outros estudos, baseados em abordagens de *downscaling* usando índices de inundação, forneceram mapas de alta resolução da extensão de águas superficiais sobre a Amazônia, tais como GIEMS-D15 (Fluet-Chouinard et al., 2015; ~500 m de resolução espacial e sua adaptação de 1 km como em Reis et al., 2019) e GIEMS-D3 (Aires et al., 2017; 90m). Similarmente, Parrens et al. (2019) propuseram uma metodologia de *downscaling* baseada em múltiplas fontes de SR (SMOS SWAF; combinado com um conjunto global de dados de MDE e GSW) para mapear as águas interiores da Amazônia cobertas por vegetação com ~1 km de resolução espacial, a cada 3 dias, para o período 2010–2016 (denominado SWAF-HR). A **Figura 6c** mostra mapas de extensão máxima de águas superficiais do GIEMS-D15 e SWAF-HR para três regiões, incluindo áreas úmidas interfluviais. Tais observações são valiosas para a tomada de decisão referente à conservação de áreas úmidas, dado que o tempo e a duração da inundação muitas vezes determinam as características ecológicas e a prestação de serviços ecossistêmicos. Reis et al. (2019), por exemplo, classificaram as áreas úmidas da Amazônia de acordo com o tempo e a duração (meses por ano) da inundação detectada com o GIEMS-D15, e o relacionaram com os regimes de precipitação. Revelou-se que as áreas úmidas permanentemente inundadas representam a maior área e são principalmente planícies de inundação localizadas nas áreas baixas da bacia Amazônica. As áreas úmidas sazonalmente inundadas variam na duração da inundação, refletindo diferentes regimes pluviométricos e hidrológicos. Essas diferenças regionais nas características da inundação são importantes para o planejamento da conservação e o manejo das áreas úmidas, especialmente no contexto de intervenções humanas, como barragens e construção de hidrovias.

Finalmente, novas técnicas e metodologias de SR continuam a ser desenvolvidas e podem ajudar a monitorar a extensão de águas superficiais da bacia Amazônica. O potencial do Sistema Global de Navegação por Satélite - Reflectometria (GNSS-R) foi explorado (Chew e Small, 2020; Jensen et al., 2018; Rodriguez-Alvarez et al., 2019) usando a constelação de satélites GNSS Cyclone (CYGNSS) e um modelo que demonstra como a refletividade de superfície medida pelo CYGNSS pode capturar a dinâmica de inundação sobre a região.

Na Seção 5.1 *Methods for Measuring Area* em Alsdorf et al. (2007), os autores sugeriram que “talvez a melhor oportunidade nos próximos anos para medições rotineiras da área alagada resulte da missão ALOS da *Japan Aerospace Exploration*

Agency". Mais de uma década depois, vale notar que a extensão e a variabilidade das águas superficiais da Amazônia ainda são uma das variáveis mais estudadas do ciclo hidrológico, no entanto os estudos que utilizam as observações ALOS continuam recentes e limitados. Mais estudos e novas observações são necessários para caracterizar completamente a extensão de águas superficiais da Amazônia e os processos que determinam seus padrões e dinâmica. Em particular, os dados polarimétricos e interferométricos SAR na banda L da próxima missão SAR da NASA/ISRO e as observações feitas na banda Ka do interferômetro SAR (*Radar Interferometer - KaRIn*) da missão SWOT serão capazes de aprimorar o monitoramento da extensão e dinâmica de águas superficiais na Amazônia.



06
*Topografia dos lagos
e canais da planície
de inundação*

Alice Fassoni-Andrade
Fabien Durand
Ayan Fleischmann
Rodrigo Paiva

As planícies de inundação ao longo do rio Amazonas têm muitos lagos e canais que variam em extensão, profundidade e conectividade (Hess et al., 2015; Rudorff et al., 2014a; Trigg et al., 2012). Esta topografia complexa afeta o fluxo de água através das trocas de água entre rio e planície que, por sua vez, são importantes para os fluxos de carbono, nutrientes e sedimentos (Melack et al., 2009; Walcker et al., 2021). Informações topográficas precisas são essenciais para a caracterização das águas superficiais na planície de inundação, particularmente para modelagem numérica hidráulica (Baugh et al., 2013; Paiva et al., 2013a; Rudorff et al., 2014b). Além disso, o mapeamento topográfico é necessário para o entendimento da morfologia e morfodinâmica dos canais e lagos. O MDE do SRTM é um conjunto de dados topográficos globais, com 30 a 90 m de resolução espacial e precisão de 8 m (Rodríguez et al., 2006), gerado a partir de interferometria na banda C (Farr et al., 2007), que tem sido amplamente utilizado em simulações hidráulicas e caracterização geomorfológica das planícies de inundação amazônicas (**Figura 7a**). No entanto, os dados são afetados pela cobertura de vegetação e possuem erros como viés absoluto, ruídos do tipo *speckle* (aspecto granulado na imagem devido à presença aleatória de *pixels* com valores extremos) e *stripe noise* (ruído em forma de listras) (Rodríguez et al., 2006). Os dados também não são capazes de descrever a batimetria de corpos de água interiores.

A aplicação de dados topográficos, como o SRTM, juntamente com imagens de radar (por exemplo, RADAM, JERS-1) e ópticas (por exemplo, Landsat) permitiram a caracterização geomorfológica de planícies de inundação e canais da bacia Amazônica. Sippel et al. (1992) descreveram lagos de diferentes formas com base em mapas RADAM ao longo de diferentes seções do trecho principal do rio Solimões-Amazonas e seus principais afluentes. Latrubesse e Franzinelli (2002) e Mertes et al. (1996) descreveram regiões geomorfológicamente distintas ao longo do curso superior e médio do rio Amazonas. A topografia em barra (*Scroll-bar topography*), que forma lagos longos e estreitos, e lagos marginais (*oxbow lakes*), localizados em meandros abandonados de rios, são dominantes nos trechos a montante (Mertes et al., 1996; **Figura 7**). Os trechos a jusante são caracterizados por grandes lagos rasos formados pela deposição de sedimentos finos sobre a margem em uma topografia de planície de inundação muito plana (Latrubesse e Franzinelli, 2002; Mertes et al., 1996; **Figura 7**). A deposição ativa de sedimentos nas planícies de inundação também foi identificada e descrita por Lewin et al. (2017), Park e Latrubesse (2019) e Rudorff et al. (2018) usando dados de SR. Já Ahmed et al. (2019), Constantine et al. (2014), Peixoto et al. (2009), Rozo et al. (2012) e Sylvester et al. (2019)

caracterizaram a migração de canais de rios e planícies de inundação. O balanço de sedimentos tem um papel importante na evolução dos rios da Amazônia, pois os rios com altas cargas de sedimentos experimentam uma migração de meandros mais rápida e taxas de corte mais altas do que os rios com cargas de sedimentos mais baixas (Constantine et al., 2014). Mudanças geomorfológicas grandes e rápidas também podem surgir devido às pressões antropogênicas como a pecuária e a irrigação de canais. Essas podem ser as causas da erosão progressiva de um canal ao longo do trecho baixo do rio Amazonas que capturou quase toda a vazão do trecho baixo do rio Araguari, que anteriormente corria diretamente para o Oceano Atlântico (dos Santos et al., 2018; descrito em mais detalhes no capítulo 12).

A fim de melhorar a aplicabilidade dos dados SRTM na modelagem hidráulica

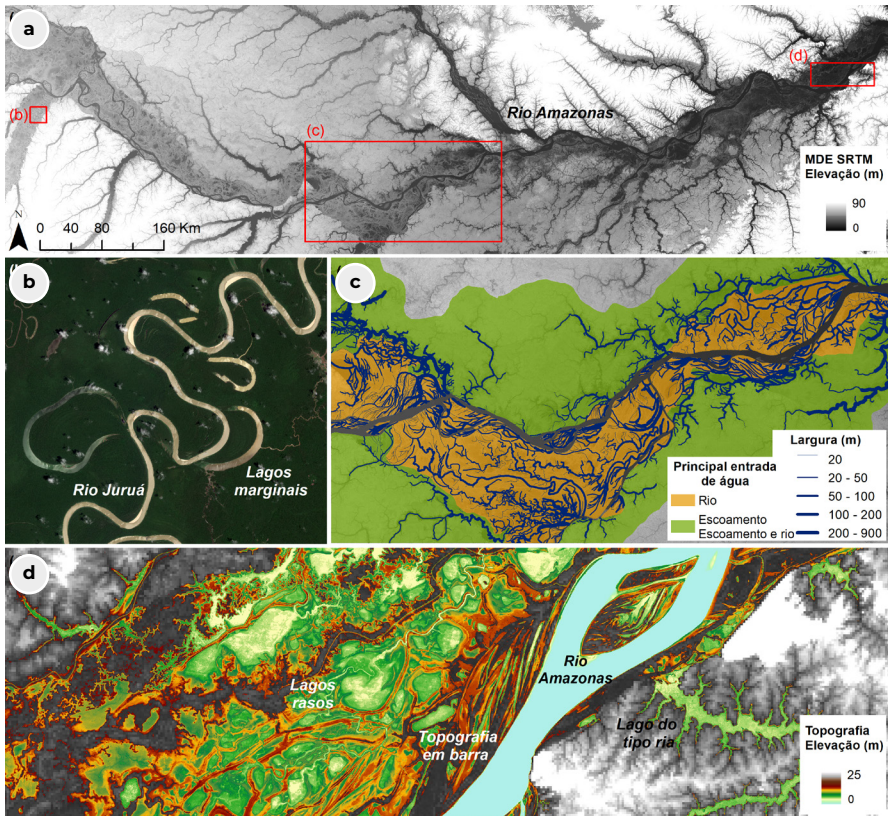


Figura 7: (a) SRTM MDE na Amazônia central. (b) Lagos marginais (*Oxbow lakes*) no rio Juruá (Sentinel-2, outubro de 2020). (c) Largura do canal na planície de inundação (Adaptado de Trigg et al., 2012). (d) Elevação topográfica dos canais e lagos da planície de inundação (Adaptado de Fassoni-Andrade et al., 2020b).

da Amazônia, foram desenvolvidas várias técnicas como a remoção da altura da vegetação (Baugh et al., 2013; O’Loughlin et al., 2016; Paiva et al., 2013a, 2011b; Pinel et al., 2015; Rudorff et al., 2014b; Yamazaki et al., 2017), do viés interferométrico (Pinel et al., 2015; Rudorff et al., 2014b), bem como a suavização e remoção de depressões espúrias (Yamazaki et al., 2012a). Apesar de se ter alcançado uma melhor representação topográfica com a utilização desses métodos, as informações topográficas abaixo da superfície da água não podem ser recuperadas a partir do SRTM. Além disso, o conjunto de dados SRTM conta com uma única passagem em fevereiro de 2000. Portanto, alguns processos, como enchimento e drenagem da planície de inundação, podem não estar bem representados nos modelos numéricos. A batimetria do rio é também uma informação fundamental que não é resolvida sistematicamente. Recentemente, Brêda et al. (2019) demonstraram o potencial de assimilar dados de altimetria por satélite em modelos hidráulicos para sua estimativa. Para estimar a topografia em áreas sazonalmente alagadas, Bonnet et al. (2008) combinaram o nível da água superficial com extensões de inundação derivadas de imagens JERS-1 para estimar um MDE batimétrico da planície de inundação do Lago Grande de Curuai. Park et al. (2020) relacionaram a lâmina da água e um mapa de frequência de inundação, derivado do mapeamento das águas superficiais, para inferir a batimetria do Lago Grande de Curuai. Fassoni-Andrade et al. (2020b) desenvolveram e aplicaram um método sistemático para estimar a topografia de planície de inundação usando uma combinação de mapas de frequência de inundação derivados de SR óptico e dados de nível da água *in situ* (Figure 7d). Esse foi o primeiro mapeamento sistemático e extensivo da batimetria de uma área inundada sazonalmente, mostrando profundidades de planície de inundação inferiores a 5 m (15 m) em águas baixas (altas), e volume de armazenamento ativo na planície de inundação de águas abertas variando em média 104,3 km³ cada ano. Esse conjunto de dados foi complementado sobre regiões permanentemente inundadas por uma compilação de cartas náuticas digitalizadas da Marinha do Brasil. Recentemente, Fassoni-Andrade et al. (2021) aplicaram esta metodologia ao estuário do rio Amazonas mostrando a morfologia da planície de inundação em zonas de maré.

As informações batimétricas em áreas permanentemente inundadas dependem de medições em campo. Entre os estudos citados aqui, apenas alguns obtiveram informações batimétricas *in situ* nas planícies de inundação (Bonnet et al., 2008; Fricke et al., 2019; Pinel et al., 2015) e em rios (Wilson et al., 2007). Estudos adicionais com batimetria detalhada incluem Lesack e Melack (1995), Barbosa et al. (2006), Panosso et al. (1995), e Trigg et al. (2012). Como parte do primeiro

balanço hídrico de um lago de planície de inundação da Amazônia, Lesack e Melack (1995) obtiveram a batimetria do lago, que foi posteriormente utilizada no modelo hidrológico de Ji et al. (2019). Panosso et al. (1995) realizaram um levantamento batimétrico do Lago Batata, localizado próximo à confluência dos rios Trombetas e Amazonas. Esse lago recebeu rejeitos do processamento de bauxita e a estimativa foi utilizada para estudos de conservação e recuperação. Barbosa et al. (2006) conduziram um extenso levantamento batimétrico da planície de inundação do Lago Grande de Curuai, na parte leste da bacia Amazônica. A batimetria foi usada para estimar o volume de água armazenada, em simulação hidráulica (Rudorff et al., 2014b) e avaliação topográfica (Fassoni-Andrade et al., 2020a). Trigg et al. (2012) ilustraram a primeira caracterização sistemática de canais de planície de inundação na Amazônia central com base em imagens Landsat e dados *in situ* (Figura 7c). As larguras dos canais das planícies de inundação variam consideravelmente (10-1000 m), e as profundidades dos canais estão relacionadas com a amplitude local da onda de cheia do rio Amazonas (~10 m), sendo mais profundas quando sujeitas ao escoamento local.

Muitos avanços têm sido alcançados para a caracterização da topografia de rios e planícies de inundação com a utilização do SR, incluindo as perspectivas promissoras dos novos MDEs. A banda L, por exemplo, reduz o viés positivo sistemático da vegetação por causa da sua capacidade de penetrar na copa das árvores. As imagens da missão NISAR, um satélite SAR de duas bandas a ser lançado em 2023, com cobertura global e períodos de revisita de 12 dias, aumentarão a disponibilidade dos dados de radar de banda L. A missão SWOT irá medir, simultaneamente, o nível da água superficial e a extensão de água, abrindo novas oportunidades para criar e melhorar as técnicas para estimar a topografia de rios e planícies de inundação. Novos dados, ainda não explorados, do satélite ICESat-2 (lançado em 2018), poderão ser úteis para a estimativa e validação da topografia.

07

Cor da água:

*sedimentos, clorofila
e matéria orgânica
dissolvida colorida*

Claudio Barbosa

Daniel Maciel

Evlyn Novo

Alice Fassoni-Andrade

Raul Espinoza-Villar

As águas da bacia Amazônica podem ser classificadas em três tipos, de acordo com as suas características físicas e químicas: águas brancas, pretas e claras (Junk et al., 2011; Sioli, 1956). Os rios de águas brancas, ricos em nutrientes, como os rios Madeira e Solimões, respondem por 98% da descarga de sedimentos do rio Amazonas para o Oceano Atlântico, e são dominados por sedimentos inorgânicos originados principalmente dos Andes (Almeida et al., 2015; Meade, 1994). Os rios de águas pretas (por exemplo, Rio Negro; **Figura 8a**) são ricos em matéria orgânica dissolvida derivada de solos podzólicos (Bouchez et al., 2011; Marinho et al., 2020). Os rios de águas claras (por exemplo, o Rio Tapajós; **Figura 8b**) são caracterizados por serem pobres em nutrientes, baixo sedimento e concentração de matéria orgânica dissolvida (Junk et al., 2015). A diversidade de tipos de água e suas interações ao longo da planície de inundação da Amazônia têm implicações significativas para os lagos de várzea e contribuem para sua alta biodiversidade (Junk et al., 2011; Thom et al., 2020).

O uso do SR viabiliza o monitoramento das propriedades biogeoquímicas do sistema aquático, bem como da conexão entre os rios e os lagos da planície de inundação. A interação entre radiação eletromagnética e os corpos de água, descrita pela teoria da transferência radiativa (Mobley, 1994), permite o desenvolvimento e calibração de algoritmos para estimativa de constituintes opticamente ativos nos corpos de água (COAs: Sólidos em Suspensão Totais, TSS; pigmentos fitoplanctônicos como Clorofila-a, Chl-a, e Ficocianina; e Matéria Orgânica Dissolvida Colorida, CDOM da sigla em inglês). Esses COAs influenciam o campo de luz subaquático e, portanto, as propriedades óticas inerentes (por exemplo, coeficiente de absorção e de retroespalhamento) e aparentes (por exemplo, Reflectância de Sensoriamento Remoto - R_{rs}) de corpos de água.

Existem desafios significativos na aplicação do SR para o monitoramento dos ecossistemas aquáticos da bacia Amazônica: i) a cobertura frequente de nuvens dificulta a aquisição de imagens; ii) a complexidade óptica das águas que fluem por toda a bacia, caracterizada pela alta variabilidade na concentração dos COAs; iii) a falta de sensores com alta resolução radiométrica, espectral, espacial e relação sinal/ruído para detectar as pequenas mudanças na radiação emergente da coluna de água; e iv) a dificuldade de usar SR em rios estreitos e pequenos lagos. Estes desafios existem desde o início das aplicações de SR para estudar os ecossistemas aquáticos da Amazônia no início dos anos 1980, quando os estudos se concentravam na calibração e validação de algoritmos baseados em dados *in situ*. Estes métodos

baseavam-se, principalmente, em abordagens empíricas (Bayley e Moreira, 1978; Bradley, 1980; Mertes et al., 1993), com acurácia aceitável limitada no tempo e espaço para o conjunto de dados para o qual o algoritmo havia sido desenvolvido (Matthews, 2011; Odermatt et al., 2012). Na última década, foram feitos esforços para adaptar os protocolos de medidas em oceano (Mueller et al., 2003) com o objetivo de adquirir propriedades ópticas inerentes (por exemplo, o coeficiente de absorção) das águas da Amazônia, permitindo o desenvolvimento de algoritmos semi-analíticos (Costa et al., 2013; de Carvalho et al., 2015; Jorge et al., 2017; Maciel et al., 2020a; Pinet et al., 2017; Valerio et al., 2018). Estes algoritmos,

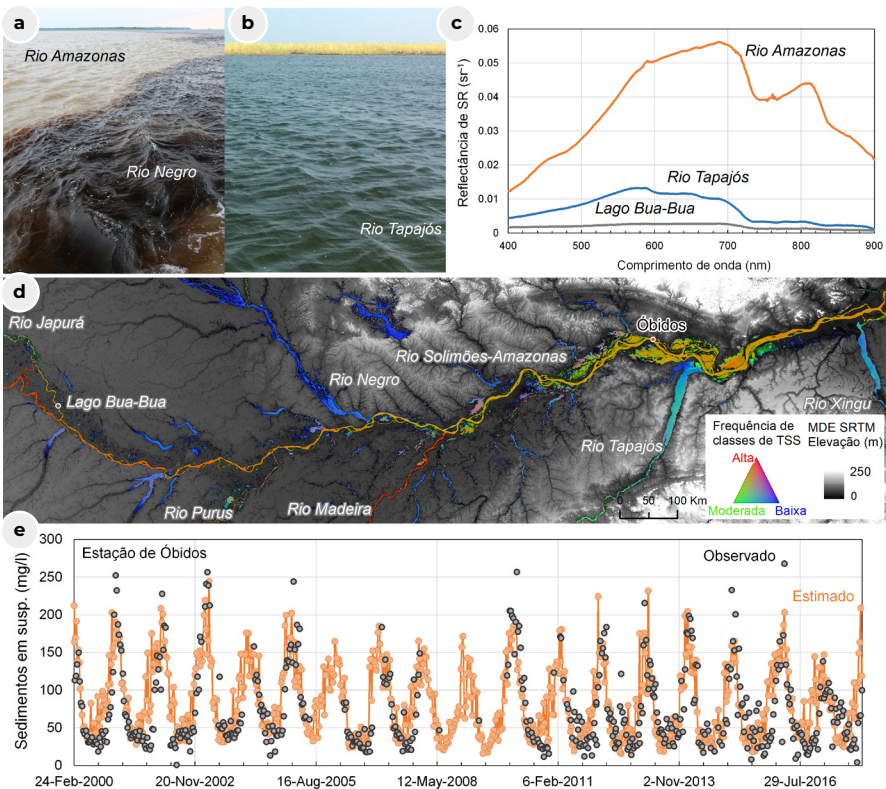


Figura 8: a) Exemplos de águas brancas e pretas, e b) águas claras. c) Exemplos de espectros de três tipos de água (Fonte: LabISA; <http://www.dpi.inpe.br/labisa/>): água branca – rio Amazonas (TSS de 288.5 mg L⁻¹; Chl-a de 2.0 µg L⁻¹; aCDOM in 440 nm of 1.3 m⁻¹); água clara – rio Tapajós (TSS: 5.7 mg L⁻¹; Chl-a: 10.8 µg L⁻¹; aCDOM: 440 nm de 1.2 m⁻¹); água preta – Lago Bua-Bua (TSS: 7.4 mg L⁻¹; Chl-a: 3.6 µg L⁻¹; aCDOM: 440 nm de 2.9 m⁻¹). d) Variabilidade espacial de sedimentos em suspensão na Amazônia central (Adaptado de Fassoni-Andrade e Paiva, 2019). e) Série temporal de sedimentos em suspensão *in situ* (observado) e baseados em satélite com o sensor MODIS (estimado), obtidos do sistema de monitoramento HYBAM (<http://hidrosat.ana.gov.br>).

baseados na teoria de transferência radiativa, utilizam um processo de inversão para estimar as propriedades ópticas inerentes a partir das propriedades ópticas aparentes. Devido a sua base física, este tipo de algoritmo identifica melhor a contribuição de cada constituinte (por exemplo, Chl-a), proporcionando uma cobertura temporal e espacial mais abrangente (Dekker, 1993; Novoa et al., 2017).

O crescimento do uso do SR na segunda década do século 21 se deve a dois avanços tecnológicos cruciais. Primeiro, uma nova geração de sensores com melhor resolução espectral e radiométrica (Landsat-8/OLI, Sentinel-2/MSI, CBERS-04A/MUX, WFI e WPM) foi desenvolvida e possibilitou aplicações e estudos em ambientes aquáticos complexos. Em segundo lugar, o aumento sem precedentes no desempenho computacional e armazenamento de dados melhorou a capacidade de processamento das imagens. Todavia, mesmo a baixa resolução radiométrica dos sensores a bordo dos satélites Landsat-5 e Landsat-7 não impediu o desenvolvimento de estudos aproveitando o banco de dados temporal disponível (de 1972 até hoje), como relatado em Lobo et al. (2015) e Montanher et al. (2018). Em preparação para os novos sensores, foram feitos estudos de comportamento espectral de tipos de água da Amazônia em uma ampla gama de concentrações de COAs (Barbosa, 2005; Nobrega, 2002; Rudorff, 2006). Esses espectros foram organizados em uma biblioteca espectral e, em conjunto com dados limnológicos, foram utilizados para criar espectros de referência para a classificação de tipos de água (Lobo et al., 2012). A biblioteca espectral foi utilizada como dado de entrada para um algoritmo do tipo *Spectral Angle Mapper*, com objetivo de obter mapas de tipos de água a partir de imagens dos sensores Hyperion e *Medium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS) adquiridas simultaneamente com trabalhos de campo, com precisões razoáveis (48% e 67% para Hyperion e MERIS, respectivamente). Essa biblioteca foi atualizada e aplicada para classificar os tipos de água brasileiros (da Silva et al., 2020). Em outros estudos, imagens MODIS dos satélites AQUA e TERRA foram usadas com sucesso para estimar Chl-a (Novo et al., 2006) e TSS (Espinoza-Villar et al., 2018; Fassoni-Andrade e Paiva, 2019; Marinho et al., 2018; Martinez et al., 2009) em corpos de água amazônicos com um tamanho compatível à resolução espacial dos sensores.

A estimativa de Chl-a, um *proxy* para a abundância de fitoplâncton, ainda é um desafio nos lagos das planícies de inundação da Amazônia, devido à alta concentração de TSS que mascara as características espectrais da Chl-a em alguns momentos (Barbosa et al., 2015, 2009; Bourgoïn et al., 2007; Ferreira et al., 2013;

Lee et al., 2016; Maciel et al., 2019). Para superar esse problema, foi desenvolvido um modelo de mistura espectral aplicado à planície de inundação do Lago Grande de Curuai (Novo et al., 2006; Rudorff et al., 2006). Os autores observaram maiores concentrações de clorofila em períodos de águas baixas (novembro e dezembro), como resultado de lagos ricos em nutrientes dissolvidos em águas menos turvas (Novo et al., 2006). Entretanto, a natureza empírica desses algoritmos impede sua ampla aplicação. Logo, novas abordagens foram investigadas, incluindo o uso de algoritmos semi-analíticos (Flores Júnior, 2019). A estimativa de CDOM, baseada em imagens de satélite, é pouco explorada nos lagos da Amazônia, uma vez que a separação da contribuição espectral do CDOM em ambientes turvos é desafiadora (Jorge et al., 2021; Kutser et al., 2016). Apesar deste desafio, estudos como o de (M. P. da Silva et al., 2019) mostram a possibilidade de um algoritmo empírico para estimar a absorção de CDOM em 440 nm a partir de imagens Sentinel-2/MSI. A Tabela 5 apresenta um resumo desses estudos.

Existem muitos estudos sobre a estimativa de sedimentos a partir de dados de satélite na Amazônia. Esses estudos foram focados principalmente em estimativas de TSS para rios (Bernini et al., 2019; Espinoza-Villar et al., 2018; Kilham e Roberts, 2011; Lobo et al., 2015; Maciel et al., 2020b, 2019; Montanher et al., 2014; Park e Latrubesse, 2014; Villar et al., 2013; Yopez et al., 2018) e lagos de planícies de inundação da Amazônia (Alcântara et al., 2009; Fassoni-Andrade e Paiva, 2019; Maciel et al., 2019; Rudorff et al., 2007, 2006). A maioria destes algoritmos são baseados em métodos empíricos, e apenas recentemente alguns algoritmos semi-analíticos foram desenvolvidos (Tabela 5). O sistema de monitoramento HYBAM fornece dados de concentração de TSS obtidos sistematicamente usando algoritmos empíricos do MODIS em 16 estações virtuais (séries temporais de TSS; <http://hidrosat.ana.gov.br>) nos principais rios que contribuem como fontes de sedimentos do rio Amazonas, incluindo os rios da região Amazônica-Andina, no Peru e na Bolívia (Espinoza-Villar et al., 2018; Espinoza Villar et al., 2012; Martinez et al., 2009; Villar et al., 2013). A Figura 8e é um exemplo de uma série temporal de sedimentos em suspensão obtida a partir do HYBAM no Rio Amazonas, entre 1999 e 2017, que ilustra a grande variabilidade da concentração do TSS no intervalo de 25 a 250 mg L⁻¹.

Montanher et al. (2014) mapearam o TSS em cinco rios amazônicos usando métodos de regressão múltipla e observaram que algoritmos calibrados regionalmente tiveram melhor desempenho do que algoritmos globais, devido a mudanças nas propriedades

ópticas dos rios. Park e Latrubesse (2014) também observaram que calibrar um algoritmo empírico separado para as estações de águas baixas e altas forneceu melhor resultado para as águas dos rios amazônicos. Marinho et al. (2021) calibraram um algoritmo empírico usando a refletância na banda do vermelho (Sentinel-2/MSI) para obter a concentração de sedimentos no Rio Negro ($<10 \text{ mg L}^{-1}$), caracterizada por alta absorção de matéria orgânica dissolvida colorida ($a\text{CDOM} > 7 \text{ m}^{-1}$ em 440 nm) e sinais de R_{rs} muito baixos. Marinho et al. (2020) também mostraram que o efeito de remanso do rio Solimões no rio Negro é o principal fator que contribui para a retenção de 55% da carga sedimentar no Arquipélago de Anavilhanas devido à baixa declividade da água e à velocidade reduzida do fluxo.

TABELA 5
Algoritmos utilizados para determinação dos componentes opticamente ativos (COA_s) na bacia Amazônica.*

ÁREA DE ESTUDO	NOME DO SENSOR	COA _s	FAIXA DOS COA _s	TIPO DE ALGORITMO	EQUAÇÃO DO ALGORITMO	RESULTADOS ESTATÍSTICOS DA VALIDAÇÃO	REFERÊNCIA
Baixo Amazonas	MODIS Terra	Chl- α	10-120 $\mu\text{g L}^{-1}$	E	$\text{Chl} = 3.9 \cdot e^{0.0175 \cdot f_{phy}}$	$R^2 = 0.76$ SE = 19 $\mu\text{g L}^{-1}$	Novo et al. (2006)
Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá	Sentinel-2	CDOM	-1 - 6 m^{-1}	E	$\sigma_{\text{cdom}}(440) = 4.39^{B2/B3} + 0.59^{B6/B5} \cdot 6.67$	$R^2 = 0.75$ MSE = 0.53 m^{-1} %NMSE = 15.12%	M. P. da Silva et al. (2019)
Lago Grande de Curuai	Sentinel-2 e Landsat-8	TSS e TSI	7-43.5 mg L^{-1} (TSS) 3.4-33.8 mg L^{-1} (TSI)	E	$\ln(\text{TSS}_{OL}) = 9.656 + 1.672 \cdot \ln(R_{rs} (550))$ $\ln(\text{TSI}_{OL}) = 10.73 + 2.08 \cdot \ln(R_{rs} (550))$ $\ln(\text{TSS}_{MSI}) = 8.318 + 1.336 \cdot \ln(R_{rs} (550))$ $\ln(\text{TSI}_{MSI}) = 8.447 + 1.511 \cdot \ln(R_{rs} (550))$	$R^2 = 0.71$, MAPE = 16.81%, RMSE = 3.54 $R^2 = 0.86$, MAPE = 18.08, RMSE = 1.97 $R^2 = 0.69$, MAPE = 16.67, RMSE = 3.58 $R^2 = 0.81$, MAPE = 18.62, RMSE = 3.1	Maciel et al. (2019)
Lago Grande de Curuai	WFI CBERS-4	TSS	9-28 mg L^{-1}	SA	$\text{TSS} = 293.930 \cdot p550 + 1.341 \cdot (1 - (p / 0.345))$	$R^2 = 0.75$, MAPE = 27.08%, RMSE = 5.73 mg L^{-1}	Maciel et al. (2019)
Rio Tapajós	Landsat-5/TM LISS-III	TSS	-0 - 120 mg L^{-1}	E	$P_{\text{surf(Red)}} = 2.64 \cdot (\text{TSS} - 2.27)^{0.45}$	$R^2 = 0.94$ RMSE = 1.39 mg L^{-1}	Lobo et al. (2015)
Rio Solimões	MODIS	TSS	50-700 mg L^{-1}	E	$\text{TSS} = 759.12 \cdot (P_{\text{Nir}} / P_{\text{Red}})^{1.92}$	$r = 0.89$, RMSE = 70.23 mg L^{-1}	Villar et al. (2018)
Rio Orinoco	Landsat-8	TSS	-25-210 mg L^{-1}	E	$\text{TSS} = 1.35512 \cdot P_{\text{Nir}} \cdot 1000 - 2.9385$	$R^2 = 0.94$, MAPE = 19.8%, RMSE = 12.8 mg L^{-1}	Yepez et al. (2018)

Rio Madeira	MODIS	TSS	25-622 mgL ⁻¹	E	$TSS = 1020 \cdot (P_{nir} / P_{red})^{2.94}$	$r = 0.79$	Villar et al. (2013)
Rio Amazonas	MODIS	TSS	7-130 mgL ⁻¹	E	TSS Fraction from spectral unmixing model	RE = 10 mgL ⁻¹ (estimated)	Kilham e Roberts (2011)
Rios de águas brancas da Amazônia	Landsat-5	TSS	0-3561 mgL ⁻¹	E	Multiple regression	$R^2 = 0.76$	Montanher et al. (2014)
Rio Madeira	TriOS Ramses (In situ)	TSS	0-450 mgL ⁻¹	SA	Relação entre backscattering coefficient em 550nm e TSS	$R^2 = 0.7345$	Bernini et al. (2019)
Rios de águas brancas da Amazônia	TriOS Ramses (In situ)	TSS	5-620 mgL ⁻¹	E	$TSS = 20.41 \cdot (P_{860})^{1.173}$	$R^2 = 0.89$	Martinez et al. (2015)
Rio e lagos da Amazônia	MODIS Terra e Aqua	TSS	0-600 mgL ⁻¹	E	$TSS = \exp^{20 \cdot P_{red} + 7.68 \cdot P_{nir} + 0.31 \cdot (P_{red} / P_{nir})}$	$R^2 = 0.7$, RMSE = 75.6 mgL ⁻¹	Fassoni-Andrade e Paiva (2019)
Rios Branco e Negro	Sentinel-2	TSS	0.44-22.64	E	$TSS = 881.4 \cdot R_{rs}(660) + 2.3$	$R^2 = 0.85$	Marinho et al. (2021)

A alta variabilidade dos COA_s em lagos de planície de inundação dificulta as parametrizações dos algoritmos. Na planície de inundação do Lago Grande de Curuai (baixo Amazonas), por exemplo, as concentrações do TSS podem variar de ~5 mg L⁻¹ na estação de cheia até 1000 mg L⁻¹ na estação de seca devido à ressuspensão dos sedimentos pelos ventos (Bourgoin et al., 2007). Apesar dessas questões, trabalhos recentes fornecem estimativas bem sucedidas de TSS nas planícies de inundação do Baixo Amazonas (Maciel et al., 2020b, 2019).

Tendências do TSS documentadas no rio Amazonas (Martinez et al., 2009; Montanher et al., 2018) e Madeira (Latrubesse et al., 2017; Li et al., 2020) podem estar relacionadas à construção de barragens (ver capítulo 12 para mais detalhes). As dinâmicas sazonais e interanuais dos sedimentos em suspensão no estuário do rio Amazonas foram estudadas usando séries temporais de oito dias (2000-2013)

~~~~~

\*A faixa dos COA<sub>s</sub> refere-se aos valores mínimo e máximo; O tipo de algoritmo refere-se a Empírico (E) ou Semi-Analítico (SA). Na coluna da equação do algoritmo, *fphy* refere-se à fração de fitoplâncton do Modelo de Mistura Linear,  $R_{rs}(\lambda)$  é a refletância de SR,  $p(\lambda)$  é a refletância da água.  $R^2$  é o coeficiente de determinação, SE é o erro padrão, MSE é o erro médio quadrático, %NMSE é o erro médio quadrático normalizado, MAPE é o erro percentual médio absoluto, RMSE é a raiz do erro médio quadrático, PE é o erro percentual. Para as equações de métricas estatísticas, o leitor deve consultar as respectivas referências.

do sensor MODIS a bordo das plataformas de satélites continentais Terra e Aqua (Gensac et al., 2016). As concentrações de TSS foram estimadas usando um algoritmo empírico que utiliza a faixa do infravermelho próximo e que foi desenvolvido anteriormente para as águas turvas do Rio Amazonas (Martinez et al., 2009). Os resultados forneceram uma melhor compreensão da formação de depósitos de lama, migração e geomorfologia da costa, indicando o papel fundamental dos dados de satélite combinados com as medições *in situ*. Os dados de SR na Amazônia também foram usados para avaliar os impactos do assoreamento causados pela mineração artesanal de ouro na bacia do rio Tapajós (Lobo et al., 2015, 2016; ver capítulo 12 para detalhes). Além disso, Fassoni-Andrade e Paiva (2019) mapearam pela primeira vez o padrão espaço-temporal de sedimentos em águas claras, brancas e pretas dos rios amazônicos (Figura 8d). Apesar de incertezas, a refletância filtrada temporalmente no vermelho e infravermelho revelou variações de sedimentos em rios e lagos. Assim, foi possível caracterizar processos hidrológicos, como efeitos de remanso, extravasamento e ressuspensão de sedimentos em lagos. Observou-se que os lagos rasos e grandes do trecho médio do rio Amazonas recebem água rica em sedimentos devido à subida do rio durante a cheia, enquanto que no período da seca ocorre ressuspensão de sedimentos, conforme documentado anteriormente (Bourgoin et al., 2007). Nos lagos do tipo ria (acidente geomorfológico que ocorre na foz de rios), a principal fonte de água vem da bacia local (escoamento superficial e precipitação local) com a entrada de água do rio adicionando sedimentos durante o período de águas baixas.

Um dos maiores desafios do SR da cor da água é identificar e separar, do sinal emergente na coluna de água, cada contribuição dos constituintes opticamente ativos. As altas concentrações de sedimentos, que podem mascarar as contribuições de Chl-a e CDOM, tornam esse desafio especialmente significativo nas águas da Amazônia (Jorge et al., 2021). A abordagem semi-analítica, que possui bom desempenho em outras águas complexas (Gholizadeh et al., 2016; Werdell et al., 2018; Zheng e DiGiacomo, 2017), é uma alternativa para superar esse desafio. No entanto, ela depende de sensores com características espectrais, radiométricas e espaciais, adequadas às águas interiores para calibrar algoritmos com alta acurácia. As aplicações iniciais dessa abordagem em águas amazônicas, utilizando dados Landsat-8/OLI, Sentinel-2/MSI, e Sentinel-3/OLCI, mostraram resultados promissores (Bernini et al., 2019; de Carvalho et al., 2015; Jorge et al., 2017; Maciel et al., 2020a). Além disso, missões de sensores hiperespectrais como *Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem* (PACE; Werdell et al., 2019) da NASA, e PRISMA

da Agência Espacial Italiana (Giardino et al., 2020; Niroumand-Jadidi et al., 2020), podem ajudar a superar esse desafio. Devido à extensa variabilidade temporal na concentração dos COAs, uma abordagem promissora é integrar algoritmos híbridos e semi-analíticos para obter maior precisão em uma ampla gama dos COAs. Para lidar com a frequente cobertura de nuvens e obter dados compatíveis com a dinâmica dos ecossistemas aquáticos, o uso concomitante de dados de sensores inter-calibrados (Landsat-8/OLI, Sentinel-2/MSI, Sentinel-3/OLCI, CBERS-4A/MUX), chamados de constelações virtuais, pode ser uma solução. Nesse sentido, existem diversas iniciativas em andamento, como por exemplo o projeto Brasil Data Cube (<http://brasildatacube.dpi.inpe.br/portal/explore>) e o *Harmonized Landsat Sentinel* (Claverie et al., 2018), que se propõem a fornecer dados intercalibrados de diferentes sensores. Adicionalmente, para investigar processos dinâmicos nos ecossistemas aquáticos, nano-satélites de alta resolução espaço-temporal representam uma ferramenta promissora para compreender as respostas de curto prazo da biota dos lagos às mudanças hidrológicas (Maciel et al., 2020b; Nagel et al., 2020).

Os aperfeiçoamentos nas tecnologias de SR durante as últimas décadas levaram a algoritmos mais precisos para a estimativa de sedimentos em suspensão na Amazônia. Contudo, como demonstrado na **Tabela 5**, as estimativas de Chl-a e CDOM ainda são um desafio nessas águas opticamente complexas. Além disso, a estimativa precisa de Chl-a e CDOM depende de dados precisos de SR, o que exige a inversão desses COAs. Dessa forma, novos sensores com alta resolução radiométrica e espectral são imprescindíveis. Em suma, técnicas mais robustas, tais como algoritmos semi-analíticos, abordagens de aprendizagem de máquinas e plataformas de computação em nuvem (por exemplo, *Google Earth Engine*) podem melhorar os estudos da qualidade da água usando SR na bacia Amazônica.

08

**Armazenamento**  
*total de água e*  
**armazenamento de**  
*águas subterrâneas*

Frédéric Frappart

Fabrice Papa

Alice Fassoni-Andrade



A distribuição da massa de água na Terra é uma informação necessária para entender o sistema climático e suas variações temporais em escalas de tempo mensais a multidecadal. Sobre a terra, ela corresponde à troca contínua de massas de água na superfície (isto é, rios, lagos, áreas úmidas, cobertura de neve e geleiras de montanha) e na subsuperfície (água no solo e águas subterrâneas) com a atmosfera e o oceano por intermédio das chuvas, evapotranspiração e diversas formas de escoamento superficial e subsuperficial. O armazenamento total de água é a soma da água contida nos diferentes estoques hidrológicos. A importância das águas superficiais na bacia Amazônica foi apresentada no capítulo 5. O armazenamento de águas subterrâneas também desempenha um papel importante na hidrologia da Amazônia e exerce uma grande influência na variabilidade climática e nos ecossistemas da floresta tropical (Pokhrel et al., 2013). Os fortes efeitos de memória do sistema de águas subterrâneas da Amazônia propagaram anomalias climáticas sobre a região por vários anos (Frappart et al., 2019; Miguez-Macho e Fan, 2012; Pfeffer et al., 2014).

A missão GRACE, em operação de março de 2002 a junho de 2017, e a missão *GRACE Follow-On*, em órbita desde maio de 2018, têm permitido o monitoramento das mudanças espaço-temporais do armazenamento de água terrestre (*Terrestrial Water Storage*, TWS; Tapley et al., 2004). A anomalia temporal do TWS é proveniente das observações do satélite GRACE, que medem as variações pequenas no campo gravitacional da Terra (Tapley et al., 2004). As observações do GRACE da anomalia do armazenamento de água terrestre (*TWS Anomaly* - TWSA), apesar de sua resolução espacial grosseira de ~200-300 km, têm sido amplamente utilizadas para analisar o impacto da variabilidade climática e das mudanças globais na distribuição das massas de água sobre o solo (Tapley et al., 2019), e dos estoques de água subterrânea em combinação com observações externas (Frappart e Ramillien, 2018).

Considerando toda a bacia Amazônica, a estimativa da amplitude anual do TWS derivada do GRACE varia de 300 a 450 mm (**Figura 9**; Chen et al., 2009; Crowley et al., 2008; Frappart et al., 2013b; Xavier et al., 2010). Essa faixa corresponde ao dobro da amplitude anual do armazenamento de água superficial de toda a bacia (Frappart et al., 2012; Ndehedehe e Ferreira, 2020), o que significa que a amplitude anual das variações de armazenamento subsuperficial (umidade do solo e água subterrânea) também representa metade da amplitude anual do TWS. Grandes variações desse valor foram observadas entre as principais sub-bacias amazônicas, dependendo da extensão de planícies de inundação (Frappart et al., 2019, 2011;

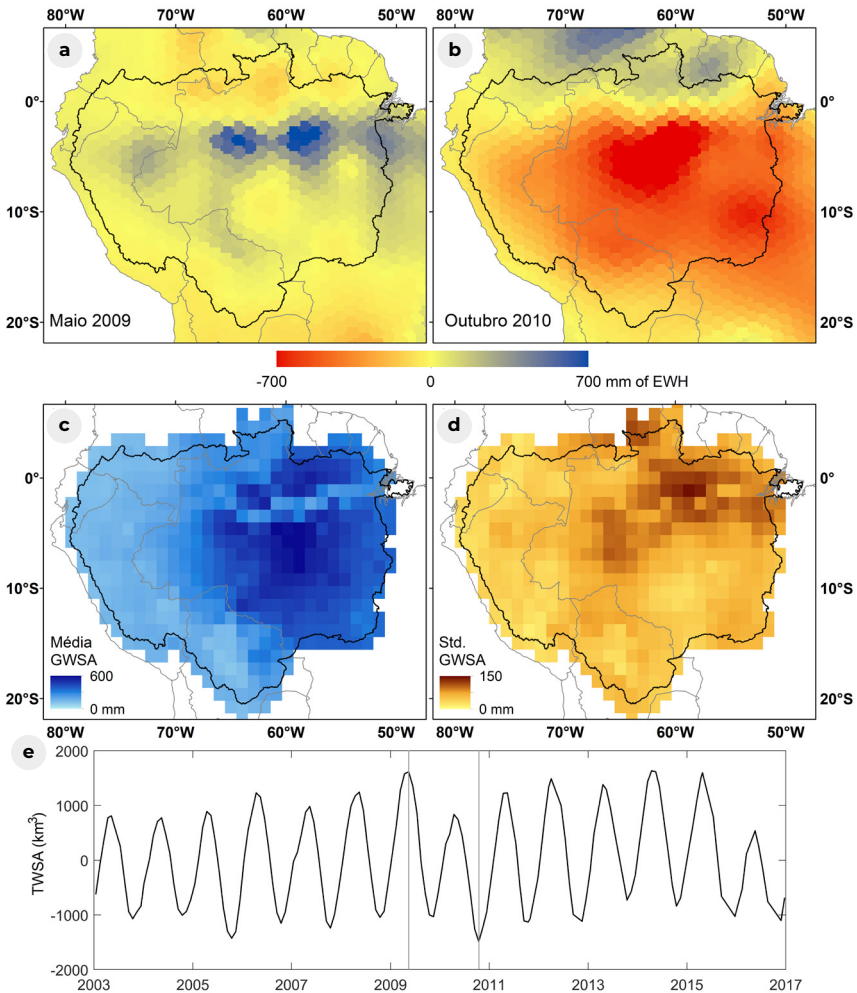
Papa et al., 2013). A chuva e a TWSA baseada no GRACE foram consideradas altamente correlacionadas na Amazônia e suas principais sub-bacias (período de 2003–2010), mesmo em escalas de tempo interanuais, com os coeficientes de correlação de Pearson geralmente superiores a 0,7 (exceto nas bacias localizadas nos Andes), e defasagem de tempo variando de zero a três meses (Frappart et al., 2013a; Ndehedehe e Ferreira, 2020). Resultados semelhantes foram obtidos entre a TWSA e vazões dos rios ao longo dos mesmos períodos (Frappart et al., 2013a). Observou-se também uma boa concordância entre o TWS e a extensão de águas superficiais obtida por satélite (GIEMS), as chuvas e vazões ao longo de vários períodos (Papa et al., 2008; Prigent et al., 2012, 2007; Tourian et al., 2018). Esses estudos revelaram a complexidade do transporte de água entre as diferentes sub-bacias da Amazônia com a presença de histerese na relação entre extensão de água superficial e a TWSA.

A análise dos padrões espaço-temporais das mudanças do TWS forneceu novas informações sobre o impacto dos eventos climáticos extremos (secas e inundações excepcionais que ocorreram em 2005, 2010, 2012–2015 e 2009, 2012, respectivamente) no armazenamento de água terrestre em toda a bacia Amazônica ou em suas principais sub-bacias (Chen et al., 2010, 2009; Espinoza et al., 2013; Ferreira et al., 2018; Frappart et al., 2013a). Exemplos de mapas de diferença na TWSA entre um determinado mês e sua média climatológica são apresentados na **Figura 9a-b** para maio de 2009 e outubro de 2010, respectivamente. Esses meses foram escolhidos por corresponderem ao extremo desses eventos climáticos (secas de 2005, 2010 e 2015, e inundação de 2009). Essa informação é complementar ao que pode ser obtido por meio de dados de chuva, níveis de água e vazões *in situ*. Por exemplo, os padrões da TWSA mínima durante as secas de 2005 e 2010 na bacia foram coincidentes com as áreas com grande atividade de fogo (Aragão et al., 2008; Zeng et al., 2008) e de considerável mortalidade de árvores (Phillips et al., 2009) como relatado em Frappart et al. (2013a). A TWSA também ajudou, em conjunto com a modelagem hidrológica, a caracterizar as recentes secas extremas ocorridas na Amazônia, ressaltando a importância das interações entre os armazenamentos de subsuperfície e de água superficial para mitigar o déficit nos reservatórios superficiais (Chaudhari et al., 2019).

Uma abordagem direta para estimar anomalias de armazenamento de águas subterrâneas (GWSA) é remover a contribuição dos diferentes compartimentos hidrológicos da TWSA, baseada no GRACE, da seguinte forma:

$$\Delta GW = \Delta TWS - \Delta SW - \Delta SM - \Delta CW - \Delta SWE \quad (1)$$

Onde  $\Delta$  representa a anomalia do armazenamento de água nos diferentes compartimentos hidrológicos, SW é o armazenamento de água superficial, SM é a umidade do solo ou água contida na zona da raiz, CW é a água contida no dossel, e SWE é o equivalente à água da neve. Esse último termo foi negligenciado



**Figura 9:** Mapas da TWSA durante dois eventos extremos: (a) a inundação em maio de 2009, e (b) a seca em outubro de 2010. Mudanças anuais médias na anomalia de armazenamento de águas subterrâneas (*Groundwater Storage Anomaly - GWSA*) (c) e desvio padrão associado (d) ao longo de 2003-2010 (adaptado de Frappart et al., 2019). (e) Série temporal de TWSA baseado no GRACE (km<sup>3</sup>) sobre a bacia Amazônica entre 2003-2016. As linhas verticais mostram os meses de valores máximos (maio de 2009) e mínimo (outubro de 2010).

nos estudos realizados na bacia Amazônica, pois não havia informações confiáveis sobre esse tipo armazenamento de água. Na maioria dos casos, a água proveniente dos outros compartimentos (SW e SM) é fornecida por saídas de modelo e/ou por medições *in situ*. Para a Amazônia, é necessário levar em conta, com precisão, o componente SW, pois ele representa cerca de metade da TWSA (Frappart et al., 2019, 2012). Utilizando informações externas de modelos hidrológicos para SW, SM e CW, as anomalias de armazenamento de águas subterrâneas (GWSA) foram estimadas ao longo de 2003-2015, revelando uma forte ligação entre propriedades geológicas e armazenamento de GW: a maior capacidade de armazenamento de águas subterrâneas no Brasil foi encontrada em regiões com maior permeabilidade das camadas rochosas (por exemplo, os aquíferos Guarani e Alter do Chão; Hu et al., 2017). Mas, nesses casos, o armazenamento de SW limitou-se ao armazenamento dos rios, negligenciando o armazenamento nas extensas planícies de inundação da bacia Amazônica. Para levar em conta, adequadamente, a contribuição dos componentes de SW, foram desenvolvidas metodologias para estimar as variações de armazenamento de SW a partir de observações de SR (Frappart et al., 2012, 2008; Ndehedehe e Ferreira, 2020). As anomalias de armazenamento de SW foram obtidas pela combinação da extensão de águas superficiais (geralmente do GIEMS, ver capítulo 5) e da série temporal baseada em altimetria dos níveis de água (ver capítulo 4) sobre rios e planícies de inundação. Frappart et al. (2012) estimaram as variações mensais do armazenamento de SW na escala da bacia durante a seca de 2005 e constataram que a quantidade de água armazenada no rio e nas planícies de inundação da Amazônia, durante este evento extremo, foi 130 km<sup>3</sup> (70%) a menos que sua média de 2003-2007, representando quase metade da anomalia do TWS mínimo, conforme estimado por meio das observações do GRACE.

Usando essas informações externas sobre as variações de armazenamento de SW, juntamente com as estimativas de armazenamento de SM de modelos hidrológicos, as anomalias de armazenamento de GW foram estimadas pela primeira vez ao longo de 2003-2004 na Bacia do rio Negro, um dos maiores afluentes da bacia Amazônica (Frappart et al., 2011). O padrão espacial da amplitude anual das anomalias de GW adequa-se bem aos mapas hidrogeológicos regionais e a amplitude é consistente com as observações do nível da água em poços locais e séries temporais baseadas em altimetria de níveis de água em duas áreas úmidas adjacentes onde o nível da água subterrânea atinge a superfície durante todo o ciclo hidrológico (Frappart et al., 2011).

Essa abordagem foi então estendida para toda a bacia Amazônica ao longo de 2003–2010, usando cerca de 1000 estações virtuais de altimetria ENVISAT RA-2 de nível da água (Frappart et al., 2019). O armazenamento de SW em toda a bacia teve uma amplitude anual variando entre 900 e 1300 km<sup>3</sup> (Frappart et al., 2012). As estimativas da GW adequaram-se bem às observações de águas subterrâneas *in situ* e aos mapas de águas baixas da tabela GW (Frappart et al., 2008). Em escala de bacia, os resultados têm padrões espaciais realistas quando comparados aos mapas hidrogeológicos do Brasil (por exemplo, mapas de porosidade, limites de aquíferos, recarga de GW). Estima-se que a amplitude sazonal de GW contribua entre 20 a 35% da amplitude TWS proveniente de observações do GRACE na bacia Amazônica (Frappart et al., 2019). O impacto da seca extrema de 2005 no armazenamento de GW também foi por vários anos (Frappart et al., 2019).

A altimetria por radar foi usada para estimar mapas de águas baixas da tabela de GW na parte central da bacia Amazônica (Frappart et al., 2008). Devido à conexão entre a superfície e as águas subterrâneas durante o período de águas baixas nas planícies de inundação da Amazônia central (54°–70° W, 0°–5°S), níveis anuais de águas baixas de 593 estações virtuais de altimetria foram interpolados para gerar mapas anuais do nível de base das águas subterrâneas (*Groundwater Base Level*, GWBL) entre 2003 e 2009. Os resultados mostram que o GWBL é regido pela topografia superficial e que vários anos foram necessários para que o GWBL se recuperasse da seca extrema de 2005 (Pfeffer et al., 2014).

O recente lançamento do GRACE *Follow-On* oferece a oportunidade de estender o monitoramento das alterações do TWS e do GWS após 2018. Apesar da falta de dados entre outubro de 2017 (fim da operação do GRACE) e maio de 2018 (lançamento do GRACE *Follow-On*), duas décadas de TWSA estarão disponíveis em breve, permitindo a análise do impacto de eventos climáticos de vários anos, como o ENSO em armazenamento de água terrestres e subterrânea. As principais desvantagens desses dados são suas baixas resoluções espacial (200–300 km) e temporal (1 mês), que não são suficientes para estudar a dinâmica de eventos hidrológicos rápidos. Para superar esses obstáculos, os sensores a bordo do GRACE *Follow-On* são versões avançadas dos sensores que estavam presentes no GRACE, além de um novo interferômetro a laser (LRI), que mede a distância de satélite para satélite em paralelo com o instrumento de radar de banda K. Espera-se que o LRI seja 26 vezes mais preciso que o radar de banda K a bordo do GRACE (Tapley et al., 2019). Essa melhor acurácia provavelmente aperfeiçoará a qualidade e

a resolução espacial da estimativa da TWSA. Novas abordagens baseadas no uso do filtro Kalman foram desenvolvidas para aumentar a resolução temporal da TWSA para quase diária, sem degradar a resolução espacial (Ramillien et al., 2020, 2015).



# Balanço hídrico

Victor Pellet  
Filipe Aires  
Adriana Moreira  
Ayan Fleischmann

Para entender melhor os complexos processos hidrológicos na bacia Amazônica, é necessário monitorar cada componente do ciclo da água e entender como esses componentes se conectam e interagem. Logo, o cálculo do balanço hídrico (BH) na bacia Amazônica requer o uso de uma grande variedade de observações, especialmente porque a bacia inclui ambientes complexos, como as planícies de inundação, e processos como fluxo de água no solo e transpiração da vegetação que são difíceis de caracterizar por observações de satélite.

Diversos estudos se dedicaram a analisar o BH na bacia Amazônica compreendendo que esta é uma das principais bacias hidrográficas do mundo (Azarderakhsh et al., 2011; Builes-Jaramillo e Poveda, 2018; Moreira et al., 2019; Munier e Aires, 2018; Oliveira et al., 2014; Pan et al., 2012; Sahoo et al., 2011; Zhang et al., 2018) A maioria dos estudos de BH usou um produto ou apenas alguns produtos de satélite para cada componente de água (Azarderakhsh et al., 2011; Builes-Jaramillo e Poveda, 2018; Maeda et al., 2015; Moreira et al., 2019; Oliveira et al., 2014; Rodell et al., 2011). O uso de uma multiplicidade de produtos de satélite para cada componente de água pode reduzir as incertezas, por meio de uma abordagem baseada apenas em observações (Aires, 2014), ou de uma integração de modelos de simulações e reanálises (Pan et al., 2012; Zhang et al., 2018).

A melhoria contínua da qualidade e o aumento do uso de produtos de satélite, associados a técnicas de integração mais sofisticadas, permitiram uma caracterização mais adequada do ciclo da água. As análises de BH têm sido utilizadas para i) estimar diretamente um determinado componente do ciclo da água, como a  $ET$  (Maeda et al., 2017; Rodell et al., 2011), Escoamento ( $R$ , *Runoff*) (Azarderakhsh et al., 2011; Oliveira et al., 2014) e mudança no armazenamento de água terrestre  $dS$  (Moreira et al., 2019); ii) diagnosticar a coerência hidrológica de uma combinação de estimativas baseadas em SR e investigação de discrepâncias (Builes-Jaramillo e Poveda, 2018; Moreira et al., 2019; Oliveira et al., 2014); e iii) otimizar as estimativas baseadas em SR para obter um BH coerente em termos hidrológicos (Munier e Aires, 2018; Pan et al., 2012; Pan e Wood, 2006; Pellet et al., 2021; Sahoo et al., 2011). Os três principais usos do fechamento do BH são detalhados nos parágrafos seguintes.

Ao estimar um componente do ciclo da água, o objetivo pode ser investigar padrões sazonais (Azarderakhsh et al., 2011; Moreira et al., 2019) e características mais complexas, como tendências e impactos devido ao uso da terra e mudanças na cobertura da terra (Oliveira et al., 2014). Os estudos fornecem incertezas para suas



estimativas com base nas incertezas relativas dos outros componentes (Rodell et al., 2011). Quando o foco é a *ET*, a literatura ressalta que na bacia Amazônica ela é controlada tanto pela precipitação *P* quanto pela radiação, sem ser limitada por um dos dois (Maeda et al., 2017). No entanto, a sazonalidade permanece incerta devido à grande incerteza na *ET*. Além disso, a estimativa de *ET* como valor residual da equação de BH demonstrou grandes incertezas em diversas bacias ao longo do globo quando analisada na escala mensal. Por outro lado, quando se avaliou estas estimativas na escala anual, foi observada uma menor incerteza das estimativas de *ET* (Rodell et al. 2011). Assim, em escalas temporais maiores (por exemplo, anual), a *ET* obtida como resíduo da equação de BH se apresenta como uma alternativa com alto potencial para a avaliação dos diversos produtos de *ET* por SR.

O diagnóstico da coerência do BH por meio da combinação de produtos de SR é uma ferramenta útil para avaliar a qualidade desses produtos. Moreira et al. (2019), por exemplo, demonstraram que os conjuntos de dados de precipitação do MSWEP e *ET* do GLEAM proporcionam estimativas de BH com menores incertezas em relação aos outros modelos testados. Oliveira et al. (2014) mostraram que versões recentes da TRMM *Multi-satellite Precipitation Analysis* (TMPA) também melhoram o fechamento do BH em comparação com as versões mais antigas. Builes-Jaramillo e Poveda (2018) avaliaram as estimativas de *ET* por BH sobre a Amazônia, e verificaram discrepâncias destas estimativas com diversos produtos de *ET* (baseadas em SR e reanálise). No entanto, os resultados ainda demonstraram que os produtos de *ET* baseados em SR apresentaram uma maior concordância com a *ET* de BH do que com a *ET* proveniente dos modelos de reanálise. Conforme relatado em Builes-Jaramillo e Poveda (2018) e Moreira et al. (2019), o desequilíbrio do BH está relacionado em escala de sub-bacia *r* com a área de drenagem e com as condições climáticas (ou seja, tropicais ou montanhosas), que impactam a relação sinal-ruído de cada componente de água.

Vários estudos usaram o fechamento do BH como uma restrição para a otimização das estimativas por satélite, analisando de forma conjunta para cada componente da água. Pan e Wood (2006) desenvolveram uma otimização dos produtos por satélite utilizando um esquema de assimilação dentro de um modelo de superfície terrestre em escala de bacia. Esse método foi então aplicado à bacia Amazônica (Pan et al., 2012; Sahoo et al., 2011). Zhang et al. (2018) estenderam esse esquema para a escala de *pixel*, considerando apenas o escoamento *R* simulado. Da mesma forma, Aires (2014) descreveu várias abordagens para integrar a observação por

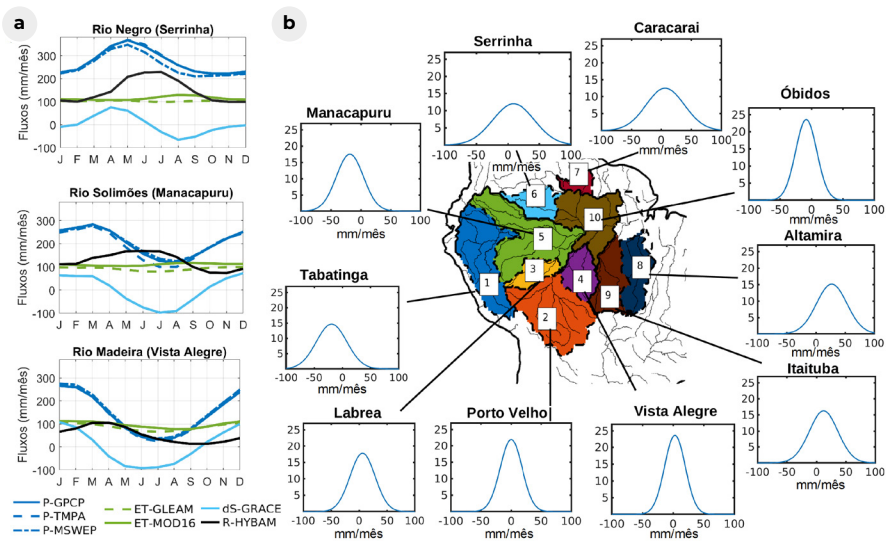
satélite (ponderação simples, interpolação ótima, pós-filtragem e redes neurais) com a restrição de fechamento do BH, mas sem o uso de modelos de superfície ou hidrológicos para obter um banco de dados observacional. Munier e Aires (2018) investigaram a hidrologia amazônica usando essa abordagem, e Pellet et al. (2021) adicionaram restrições entre bacias ao fechamento do BH usando vazões de várias estações *in situ* na bacia. Essa abordagem permitiu a otimização dos conjuntos de dados de satélite e pode ser usada para desenvolver novas ferramentas em hidrologia, como a assimilação de dados GRACE (Zhang et al., 2018). Por exemplo, em Pellet et al. (2021), os padrões espaciais de  $P$ ,  $ET$  e  $dS$  foram usados para estimar as vazões ao longo da rede fluvial.

Um dos principais objetivos de uma análise de BH é a avaliação da incerteza de cada componente do ciclo da água. Tais caracterizações são geralmente específicas de componentes e de locais. Por exemplo, Moreira et al. (2019) avaliaram amplamente a incerteza da estimativa por satélite de  $P$  e  $ET$  usando dados *in situ* (cerca de 300 pluviômetros e quatorze locais de monitoramento de fluxo), porém essa abordagem é limitada devido à escassez da rede de observação. Sahoo et al. (2011) usaram a diferença com relação a estimativas não realizadas por satélite, enquanto Y. Zhang et al. (2018) e Pellet et al. (2021) usaram a variação das estimativas derivadas de observações da Terra como uma aproximação para a incerteza. Azarderakhsh et al. (2011) e Munier e Aires (2018) utilizaram uma revisão de literatura baseada no estado da arte do SR para estimar as incertezas resultantes dos produtos de satélite. Estudos geralmente assumem um valor entre 5% a 10% de erro para  $R$ , enquanto os erros  $dS$  do GRACE são frequentemente computados de acordo com os erros de *leakage* (erros residuais após filtragem e reescalonamento) e erros de medição (Rodell et al., 2004). Todos esses estudos concordam com a contribuição relativamente alta da estimativa no erro no fechamento do BH (~40%). Moreira et al. (2019) e Oliveira et al. (2014) encontraram viés positivo para a  $P$  ao compará-lo com dados *in situ*, mas todas as abordagens de integração (Pan et al., 2012; Pelota et al., 2021; Sahoo et al., 2011) resultam em uma superestimativa de  $P$ . Além disso, Moreira et al. (2019) consideraram que  $dS$  é o segundo a contribuir para o erro no fechamento do BH (~25%), enquanto Sahoo et al. (2011) e Pellet et al. (2021) encontraram uma contribuição maior da  $ET$  (~30%). Todas as estratégias de otimização mostraram que o BH pode ser estimado dentro do intervalo das incertezas baseadas em SR.

A **Figura 10a** representa a climatologia dos quatro componentes da água em três bacias, utilizando vários conjuntos de dados para cada componente. As três bacias

são: norte da bacia do rio Negro, a montante da estação Serrinha, a bacia Amazônica a montante da estação de Manacapuru e a bacia sul a montante da estação Fazenda (Fz) Vista Alegre. A estação climatológica (ou seja, o ciclo anual) de todos os componentes da água são representados em mm mês<sup>-1</sup>. Todos os produtos de satélite têm viés e incertezas, mas essa análise multicomponente pode isolar os padrões espaciais ao longo da bacia Amazônica. Por exemplo, os ciclos anuais do BH diferem nas bacias norte e sul. Conforme relatado na literatura (Espinoza et al., 2019b; Marengo, 2005), sobre a bacia sul, a  $P$  é movida pelas monções com pico em janeiro e tem maiores variações sazonais (por exemplo, faixa mínima-máxima) e média anual menor do que na bacia norte, onde a  $P$  alcança seu pico em maio. A sazonalidade da  $P$  conduz  $R$  sobre todas as bacias (norte e sul) com um intervalo de tempo de um a dois meses. Sobre a bacia centro-oeste,  $R$  pode ser maior do que a  $P$  por um determinado mês e o pico é de cerca de 4 meses relacionado ao escoamento e os tempos de viagem das águas dentro da bacia (Sorribas et al., 2020).  $dS$  está em fase com a  $P$  na bacia sul, mas mostra uma determinada estação sobre as bacias dos rios Negro e Branco:  $dS$  é igual a zero durante a estação seca e existe uma transição linear entre o máximo e o mínimo. Ao longo dessas bacias,  $dS$  tornou-se negativo enquanto  $R$  estava aumentando e atingiu seu máximo 2 meses depois. Isso ilustra o efeito do armazenamento de água na planície de inundação antes de liberá-la no rio. A variação sazonal da  $ET$  é mais fraca, mas seu pico parece estar em fase com a  $P$ , sobre a bacia sul, apresentando um comportamento limitado pela disponibilidade de água, enquanto o pico da  $ET$  segue o mês mínimo de  $P$  na bacia norte de um sistema limitado pela energia (Maeda et al., 2017). Em Pellet et al. (2021), a correção da  $ET$  baseada no fechamento do balanço hídrico aumenta o impacto da limitação de  $ET$  por disponibilidade de água sobre a bacia central e a limitação por disponibilidade de energia sobre o norte da Amazônia. No sul da bacia, durante os meses secos (JJA), a  $ET$  é maior que a  $P$  e a água que evapotranspira é fornecida pelo armazenamento do solo que continua a perder água até novembro. Para esta estação, o papel da  $ET$  no ciclo da água é relativamente mais importante na estação seca do que na estação chuvosa (Marengo, 2005).

Para investigar o erro no fechamento do BH relacionado ao viés e à incerteza de todos os componentes da água, a **Figura 10b** mostra a Função de Densidade de Probabilidade (PDF) desses erros na escala de sub-bacias. Especialmente, há um gradiente na média do PDF entre as sub-bacias do oeste e do sul. Sub-bacias do oeste têm falta de água (viés negativo no PDF), enquanto sub-bacias do sul têm excesso de água (viés positivo). Esse gradiente foi relatado por Builes-Jaramillo e



**Figura 10:** a) climatologia sazonal de todos os componentes da água: precipitação (P), evapotranspiração (ET), troca de armazenamento de água (dS) e vazão (R) descritos por um ou vários conjuntos de dados. b) Função de Densidade de Probabilidade (PDF) do fechamento do BH são mostrados em escala sub-bacia (à direita). A PDF fornece o viés e a variância do erro do fechamento do BH.

Poveda (2018). Além disso, a variância do desequilíbrio do BH aumenta de sul para norte com a média anual de  $P$ , sugerindo que grande parte do desequilíbrio se deve a  $P$  (Moreira et al., 2019; Pelota et al., 2021). A estratégia de otimização baseada no fechamento do BH leva a uma maior correção do componente hídrico sobre sub-bacias do oeste e centrais (Pellet et al., 2021).

As demais incertezas de precipitação dos produtos de satélite calibrados globalmente devem-se, principalmente, ao aumento dos erros de medição de precipitação dos produtos por eles obtidos durante a estação chuvosa, e à falta de medidores *in situ* para a calibração (Moreira et al., 2019). A hidrologia amazônica poderia se beneficiar com o uso de uma rede pluviométrica consolidada, como a do sistema de monitoramento HYBAM (Espinoza Villar et al., 2009b; Guimberteau et al., 2012), para obter um produto gerado por satélite e calibrado regionalmente para precipitação. Sua densidade de pluviômetros sobre a bacia Amazônica é maior do que o conjunto global de dados pluviométricos geralmente usados para calibrar os produtos gerados por satélite (Guimberteau et al., 2012).


A estimativa da  $ET$  na bacia Amazônica continua sendo um desafio (ver capítulo 3). Na **Figura 10**, o uso de diferentes conjuntos de dados de  $ET$  pode levar a uma

diferença de 30-50 mm mês<sup>-1</sup>, que representam até 50% do valor da *ET*. De acordo com Moreira et al. (2019), a consolidação de um método robusto para estimar incertezas também se torna importante para melhorar nossa compreensão sobre as incertezas dos componentes do ciclo da água obtidos por SR. Com relação à *P*, uma das fontes de melhoria será por meio do uso extensivo e o aumento de uma rede de medição de fluxos para aprofundarmos nosso conhecimento sobre as incertezas dos modelos de *ET*.

Uma melhoria técnica na abordagem de otimização baseada em BH pode vir com a resolução espacial da análise. A análise do BH tem sido feita, principalmente, na escala de bacia (Munier e Aires, 2018; Sahoo et al., 2011), mesmo que vários estudos tenham sido realizados em sub-bacias (Azarderakhsh et al., 2011; Pellet et al., 2021). Com o uso de informações topográficas, deve ser possível considerar o escoamento superficial e reduzir a escala dos produtos gerados por satélite enquanto se faz o fechamento do BH em nível de *pixel*.

Como discutido no capítulo 8, foram feitas tentativas de decompor o TWS obtido pelo satélite GRACE para os componentes superficiais (Frappart et al., 2012; Papa et al., 2013) e subsuperficiais (Frappart et al., 2019). Seria possível também buscar tal decomposição no contexto de uma análise terrestre completa do BH, especialmente quando estimativas por satélite confiáveis de umidade do solo sobre a Amazônia estiverem disponíveis. Como mencionado no capítulo 5, também seriam necessários os conjuntos de dados de longo prazo de extensão de água superficial (Aires et al., 2017; Parrens et al., 2019; Prigent et al., 2020).

A missão GRACE *Follow-on* lançada em 2018, a extensão do registro de dados TRMM com a missão GPM, e o lançamento da missão SWOT fornecerão um conjunto abrangente de novas observações oriundas de satélites. A continuidade dessas missões que monitoram os componentes da água é fundamental para melhorar nossa compreensão dos padrões de hidrologia por intermédio de análises mais precisas do BH, permitindo a avaliação de tendências de longo prazo.



10

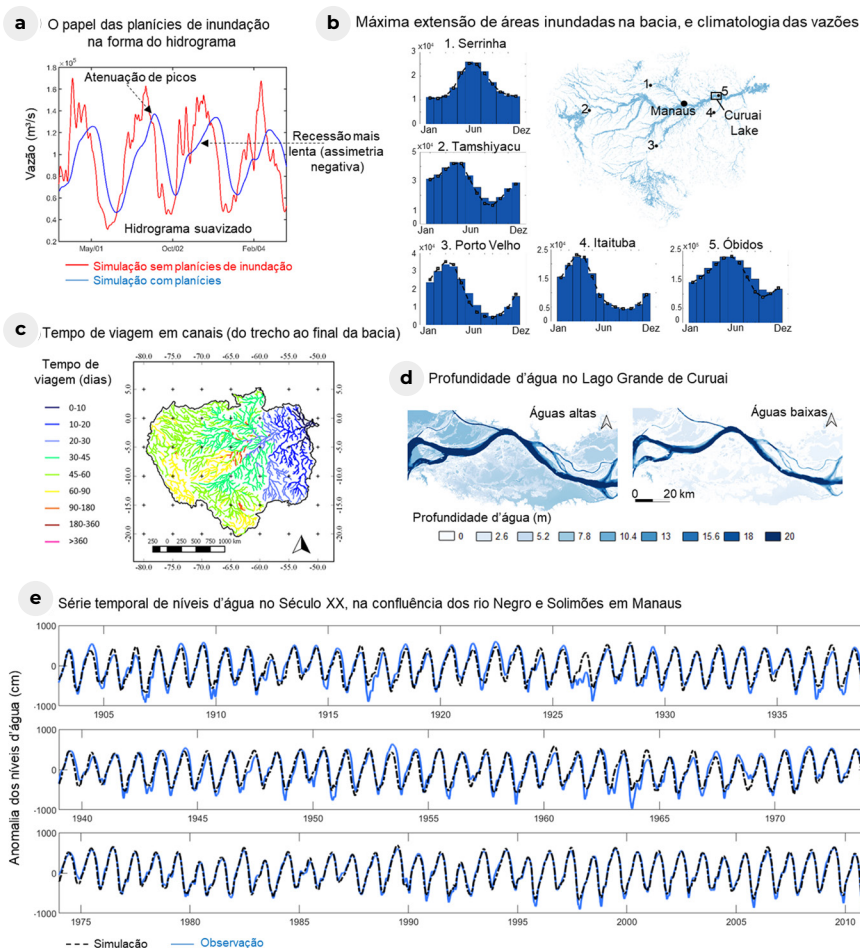
# Modelagem do *ciclo hidrológico* da Amazônia e suas áreas úmidas

Ayan Fleischmann  
Sly Wongchuig  
Rodrigo Paiva  
Fabrice Papa  
John Melack  
Fabien Durand  
Alice Fassoni-Andrade

Modelos hidrológicos e hidráulicos representam os armazenamentos e fluxos do ciclo da água por meio de um conjunto de equações matemáticas. Esses modelos baseados em processos são ferramentas adequadas para entender processos hidrológicos amazônicos, como a troca de água entre rios e planícies de inundação, interações entre águas subterrâneas e superficiais (Miguez-Macho e Fan, 2012; Paiva et al., 2013a) e comportamentos de inundações e secas passadas (Wongchuig et al., 2017). Também são muito úteis para estimar variáveis em regiões sem dados *in situ* (por exemplo, vazão de rios de forma distribuída; Wongchuig et al., 2019) e compreender cenários de alteração hidrológica devido ao desmatamento, regularização de reservatórios e mudanças climáticas (Arias et al., 2020; Guimberteau et al., 2017; Júnior et al., 2015; Lima et al., 2014; Mohor et al., 2015; Pokhrel et al., 2014; Pontes et al., 2019; Sorribas et al., 2016; Zulkaffi et al., 2016).

Durante as últimas décadas, muitos modelos foram aplicados na Amazônia em diferentes escalas, desde escala de trecho (ou seja, estudos mais detalhados abordando alguns quilômetros de área de sistemas rio-planície) até toda a escala da bacia. Dados de SR são geralmente adotados como forçantes (por exemplo, chuva), como informações auxiliares para estimar valores de parâmetros (por exemplo, dados topográficos), ou para validação, calibração e assimilação em modelos (por exemplo, vazão e níveis de água do rio). Uma distinção pode ser feita entre (i) modelos hidrológicos que simulam processos verticais como evapotranspiração, infiltração de água no solo e mecanismos de geração de escoamento superficial, e (ii) modelos hidráulicos de águas superficiais, que representam a propagação da vazão ao longo de rios e planícies de inundação, com equações de base física, e permitem a computação de variáveis como elevação e declividade da água superficial, vazão, e extensão e armazenamento de águas superficiais (**Figura 11**).

Mais recentemente, os chamados modelos hidráulicos-hidrológicos foram desenvolvidos para unir os pontos fortes de ambas as abordagens (Fleischmann et al., 2020; Hoch et al., 2016; Paiva et al., 2013a) que existem casos em que esquemas simplificados de inundação estão representados dentro de modelos hidrológicos para estimar a dinâmica de inundação de áreas úmidas. A **Tabela 6** resume as diferenças entre as duas abordagens.



**Figura 11:** Aplicações recentes de modelos hidrológicos e hidráulicos na bacia Amazônica adicionaram novas perspectivas sobre (a) o papel das planícies de inundação fluviais na forma do hidrograma (Fleischmann et al., 2016), (b) estimativa de vazões de longo prazo (Paiva et al., 2013a), (c) estimativa de tempos de viagem da água (Sorribas et al., 2020), e forneceu a estimativa de (b) climatologia da vazão de longo prazo (Paiva et al., 2013a), (d) profundidades de água de planícies de inundação (exemplo para o Lago Grande de Curuai, temporadas de alta e baixa água de 2014; Rudorff et al., 2014a) e (e) geração de séries temporais de longo prazo de níveis de água (exemplo para a localização de Manaus; Wongchuig et al., 2019).

A primeira geração de modelos na Amazônia envolveu o desenvolvimento de modelos hidrológicos de larga escala, começando pelos estudos de Vörösmarty et al. (1989), Costa e Foley (1997) e Coe et al. (2002). Com o advento dos conjuntos de dados de SR e maior capacidade computacional, diversos modelos foram desenvolvidos, melhorando a representação física dos processos hidrológicos,



aumentando a resolução espacial do modelo e passando de estimativas mensais para diárias (Beighley et al., 2009; Coe et al., 2008; Luo et al., 2017; Miguez-Macho e Fan, 2012; Paiva et al., 2013a). Esses modelos geralmente adotam os seguintes dados de entrada baseados em SR: precipitação com o produto TMPA (Collischonn et al., 2008; Getirana et al., 2012; Zubieta et al., 2015), e mais recentemente GPM-IMERG (Zubieta et al., 2017) e MSWEP (Beck et al., 2017a); propriedades da paisagem que incluem comprimentos de terreno e encostas, baseadas em MDEs (a maioria dos estudos usando o SRTM); e mapas de uso da terra e vegetação (mapas globais como os da FAO, ou regionais como os mapas de solo do projeto brasileiro RadamBrasil). Os conjuntos de dados de validação mais comuns oriundos de SR são

**TABELA 6**

Resumo das principais diferenças entre modelos hidrológicos e hidráulicos de águas superficiais, com exemplos de aplicações de modelos na bacia Amazônica. Alguns exemplos são apresentados em ambas as categorias, uma vez que se referem a modelos hidrológico-hidráulicos.

|                                                   | <b>MODELOS HIDROLÓGICOS</b>                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>MODELOS HIDRÁULICOS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS</b>                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Processo principal simulado</b>                | Processos verticais (por exemplo, evapotranspiração, infiltração de água no solo e geração de escoamento superficial) e dinâmica das águas subterrâneas.                                                                                                                                             | Interação entre rios e planícies de inundação (por exemplo, armazenamento em planície de inundação, efeitos de remanso).                                                                                                                                                                   |
| <b>Forçante principal (condições de contorno)</b> | Precipitação (chuva).                                                                                                                                                                                                                                                                                | Vazão, nível da água do rio e precipitação.                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Principais variáveis de saída</b>              | Balanco hídrico, evapotranspiração, armazenamento de água no solo e águas subterrâneas, vazões.                                                                                                                                                                                                      | Áreas inundadas, profundidades das águas das planícies de inundação, perfis longitudinais do nível da água em rios, vazões.                                                                                                                                                                |
| <b>Resultados típicos</b>                         | Quantificação dos componentes do balanço hídrico, divisão de armazenamento de água entre reservatórios superficiais e subterrâneos, dinâmica de evapotranspiração, impactos da ação humana nos componentes do balanço hídrico (por exemplo, mudanças na partição de precipitação em ET e escoamento) | Armazenamento de água nas planícies de inundação e tempo de residência, tempo de viagem da água através dos sistemas de planícies de inundação, curvas-chave (relações entre nível da água e vazão) para uso operacional, impactos da ação humana na dinâmica das inundações.              |
| <b>Exemplos de estudos</b>                        | Beighley et al. (2009); Coe et al. (2002); Costa e Foley (1997); Cuartas et al. (2012); Miguez-Macho e Fan (2012); Paiva et al. (2013c); Vörösmarty et al. (1989).                                                                                                                                   | Fleischmann et al. (2020); Garambois et al. (2017); Getirana et al. (2012); Miguez-Macho e Fan (2012); Paiva et al. (2013a); Paris et al. (2016); Pinel et al. (2019); Rudorff et al. (2014b); Sorribas et al. (2020); Trigg et al. (2009); Wilson et al. (2007); Yamazaki et al. (2012b). |

o nível da água da altimetria por satélite (capítulo 4), extensão de água superficial (capítulo 5) e armazenamento total de água (capítulo 8).

Essas aplicações de modelos aprofundaram nossa compreensão da partição da água entre o solo, água superficial e água subterrânea, e atuaram como laboratórios para melhorar modelos hidrológicos globais, que por sua vez são elementos fundamentais dos modelos do Sistema Terrestre. A avaliação da superfície terrestre e dos modelos hidrológicos e hidrodinâmicos globais na Amazônia tem sido um procedimento padrão no desenvolvimento de modelos e em projetos de intercomparação de modelos (Alkama et al., 2010; Decharme et al., 2008; Getirana et al., 2017b, 2014, 2012; Guimberteau et al., 2017, 2014; Pilotto et al., 2015; Towner et al., 2019; Yamazaki et al., 2011, 2012a; Zulkafli et al., 2013). Em escala da bacia, a fração do armazenamento total de água correspondente às águas superficiais foi estimada em 56%, 41% e 27% por Paiva et al. (2013a), Getirana et al. (2017) e Pokhrel et al. (2013), respectivamente. Esses valores foram comparados com as estimativas baseadas em SR (Frappart et al., 2019, 2012; Papa et al., 2013). Além disso, a *ET* média em escala de bacia foi estimada em 2,39 a 3,26 mm dia<sup>-1</sup> por um conjunto de modelos (Getirana et al., 2014), e em 2,72 mm dia<sup>-1</sup> por (Paiva et al., 2013a), o que é ligeiramente inferior aos valores em escala de bacia usando SR (Paca et al., 2019) e uma rede *in situ* de torres de fluxo (método de covariância de vórtices turbulentos; Costa et al. (2010), que estimou valores de 3,11 a 3,58 mm dia<sup>-1</sup> através de um gradiente que vai do sul da floresta Amazônica até a floresta úmida equatorial. O papel do armazenamento de água do solo para sustentar a *ET* da estação seca na Amazônia foi mostrado por experimentos de modelagem em escala local (Fang et al., 2017) e de bacia (Getirana et al., 2014). Alguns estudos abordaram o papel das águas subterrâneas e do armazenamento do solo no balanço hídrico, e a importância de sua representação em modelos hidrológicos. As aplicações nas áreas de cabeceira mostraram o predomínio das águas subterrâneas no armazenamento de água (Cuartas et al., 2012; Niu et al., 2017), de acordo com estudos de monitoramento *in situ* (Hodnett et al., 1997). Miguez-Macho e Fan (2012) sugeriram o mesmo padrão em toda a bacia. O modelo deles também indicou uma importante retroalimentação em duas vias entre as áreas inundadas e as águas subterrâneas, e a existência de grandes áreas não sujeitas a inundações superficiais em toda a bacia onde um alto nível de lençol freático seria responsável por manter o alto teor de água do solo durante todo o ano. A simulação de múltiplas camadas de solo no modelo de superfície terrestre ORCHIDEE, em contraste com modelos simples do tipo *bucket* (“balde”) de duas camadas, também foi demonstrada para melhorar a representação da dinâmica da

água do solo e do armazenamento total de água na Amazônia, especialmente para as regiões mais secas nas sub-bacias do sul (Guimberteau et al., 2014).

Entre os modelos hidráulicos de águas superficiais, o estudo pioneiro de Wilson et al. (2007) é um dos primeiros experimentos de modelagem hidráulica realizado em grandes domínios, o que, mais tarde, levou ao desenvolvimento de muitas aplicações globais de modelos hidrodinâmicos (Bates et al., 2018). Os autores aplicaram o modelo LISFLOOD-FP em um trecho de 260 km do rio Solimões, e estimaram a troca de água rio-planície em pelo menos 40% do volume do rio nesse trecho. Para um trecho relativamente diferente na Amazônia Central (de São Paulo de Olivença a Óbidos), Richey et al. (1989) estimaram essa proporção em 30% com base em um método de propagação mais simples, enquanto Sorribas et al. (2020) estimaram um valor de 40% para o sistema amazônico, com base em modelagem hidráulica em larga escala (veja abaixo). Os autores também constataram que a acurácia do modelo foi maior para o período de água alta, como também foi relatado por estudos recentes (Pinel et al., 2019; Rudorff et al., 2014b), provavelmente devido à má representação das heterogeneidades do terreno e pequenos lagos desconectados durante a estação seca. Ademais, uma vez que a troca de água rio-planície ocorre frequentemente através de canais da planície de inundação e diques rompidos, que dificultam sua conceituação como uma simples área de transbordamento do canal fluvial (Trigg et al., 2012), os modelos hidráulicos têm o desafio de estimar parâmetros de canal efetivos que representam esses processos complexos (Fleischmann et al., 2018; Trigg et al., 2009). Esforços recentes vêm abordando esse tema, considerando, por exemplo, a incorporação em modelos de diferentes formas de seção transversal (Neal et al., 2015), bem como a assimilação da altimetria por satélite para inferir a batimetria de canais (Brêda et al., 2019; Garambois et al., 2020; Pujol et al., 2020). Outras aplicações em escala de lagos de várzea foram desenvolvidas por Bonnet et al. (2008, 2017), Ji et al. (2019), Trigg et al. (2009) e Wilson et al. (2007), e abordaram o papel relativo na entrada de água no sistema do escoamento gerado localmente com a vazão proveniente do rio principal. Os estudos abordaram desde sistemas locais dominados pelo escoamento no Lago Calado (Ji et al., 2019; Lesack e Melack, 1995) até os dominados pelo rio nos lagos Lago Grande de Curuai (**Figura 11d**) e Lago Janauacá (Bonnet et al., 2017, 2008; Pinel et al., 2019; Rudorff et al., 2014a, 2014b), através de padrões de fluxo ora canalizados ora difusos. No caso dos lagos Curuai e Janauacá, o rio Solimões-Amazonas foi responsável por 82% e 93% dos fluxos anuais que entram na planície de inundação, respectivamente (Bonnet et al., 2017; Rudorff et al., 2014a).

O primeiro modelo de inundação em escala de bacia foi introduzido por Coe et al. (2002), e inúmeros modelos hidrológicos foram desenvolvidos e acoplados a esquemas de inundação posteriormente (Coe et al., 2008; Getirana et al., 2017b, 2012; Hoch et al., 2016; Luo et al., 2017; Miguez-Macho e Fan, 2012; Paiva et al., 2013a; Yamazaki et al., 2012b, 2011). Os modelos apresentam diferentes graus de representação física, com a simulação de planícies de inundação passando de componentes de armazenamento simples para esquemas hidráulicos dinâmicos, que podem representar processos relevantes como efeitos de remanso.

Para modelos hidráulicos, outras informações baseadas em SR que são necessárias como dados de entrada incluem a geometria do canal do rio, como largura, e topografia de planície de inundação, obtida geralmente por MDEs (principalmente SRTM e seus derivados com remoção de vegetação para representar o terreno descoberto; ver Baugh et al. (2013), O'Loughlin et al. (2016), Yamazaki et al. (2019) e Fassoni-Andrade et al. (2020b)). Para modelos hidráulicos em escala local, a parametrização adicional geralmente envolve a definição de rugosidade da planície de inundação com base em mapas de cobertura da terra (Pinel et al., 2019; Rudorff et al., 2014b). Os conjuntos de dados de validação do SR são tipicamente elevação e extensão de águas superficiais (Hall et al., 2011; Schumann et al., 2009). Essas aplicações de modelos hidráulicos revelaram a combinação de efeitos de remanso e armazenamento de planícies de inundação no processo de propagação de cheias ao longo dos rios amazônicos (Paiva et al., 2013a), causando forte atenuação e atraso de até 2,5 meses. O armazenamento em planícies de inundação também é responsável pela assimetria negativa dos hidrogramas nos principais rios da Amazônia, com uma subida (enchente) mais lenta e uma queda (vazante) mais rápida (Fleischmann et al., 2016; **Figura 11a**). Sorribas et al. (2020) utilizaram métodos de rastreamento de partículas para estimar os tempos de viagem de águas superficiais ao longo da bacia Amazônica em 45 dias (mediana), com 20% das águas do rio Amazonas fluindo através de planícies de inundação (**Figura 11c**).

Embora as aplicações em escala de bacia tenham empregado modelos unidimensionais (direção longitudinal ao longo dos rios), a necessidade de representar o fluxo difuso bidimensional em planícies de inundação, especialmente durante o recuo das águas, foi destacada por Alsdorf et al. (2005), que combinaram dados de interferometria com um modelo simples de continuidade para mostrar que o armazenamento em planícies de inundação diminui com a distância do canal principal. Geralmente, o nível da água no sistema rio-planície não é completamente horizontal, e o rio-

planície não é homoganeamente misturado (Alsdorf et al., 2007), como assumido por vários modelos unidimensionais. Enquanto uma caracterização adequada das complexas interações rio-planície com modelos hidráulicos tem sido feita em escalas locais (Pinel et al., 2019; Rudorff et al., 2014b), isto ainda está para ser desenvolvido para a escala regional – por exemplo, a habilidade de inferir padrões em altíssima resolução (por exemplo, resolução espacial de 30 metros), para toda a Amazônia central, com resolução semanal a mensal. Finalmente, o acoplamento completo entre modelos hidrológicos e hidráulicos tem sido sugerido para melhorar a representação das interações da área inundável com a terra firme, por exemplo, por meio de uma representação mais adequada da evaporação em águas abertas em áreas inundadas (Getirana et al., 2017a). Entretanto, estudos recentes sugerem que este processo tem um impacto relativamente baixo sobre as estimativas de evapotranspiração total devido à evapotranspiração ser geralmente limitada por energia (e não por disponibilidade de água) na Amazônia. Espera-se uma conclusão diferente para áreas úmidas semiáridas (Fleischmann et al., 2018).

A validação em escala regional de modelos de inundação foi feita com estimativas de extensão de águas superficiais (Getirana et al., 2012; Luo et al., 2017; Paiva et al., 2013b; Wilson et al., 2007; Yamazaki et al., 2011), com base nos produtos de Hess et al. (2003), GIEMS de Prigent et al. (2007), e mais recentemente com o banco de dados SWAF (Parrens et al., 2017) (ver capítulo 5 para uma descrição desses produtos). Embora o ciclo sazonal de inundação seja geralmente bem capturado pela maioria dos modelos, as estimativas divergem em termos de magnitude (Fleischmann et al., 2020), e a fusão entre diferentes técnicas é provavelmente a solução ideal. No entanto, são necessários experimentos de validação mais detalhados, por exemplo, com mapas baseados em dados SAR, embora muitas classificações de dados SAR já tenham sido desenvolvidas para áreas úmidas individuais da Amazônia (capítulo 5). Um aplicativo recente utilizou imagens ALOS/PALSAR para validação de modelo local no sistema da planície de inundação Janauacá (Pinel et al., 2019).

Em relação ao nível da água, os modelos hidráulicos são tipicamente capazes de representar anomalias de forma satisfatória. As estimativas dos valores absolutos, no entanto, são geralmente menos acuradas (Fleischmann et al., 2019), embora bons resultados tenham sido alcançados (Wilson et al., 2007). As centenas de estações virtuais disponíveis (ver capítulo 7) proporcionaram melhorias revolucionárias nos métodos de modelagem, especialmente em termos de validação de modelos distribuídos com múltiplas estações virtuais (Fleischmann et al., 2020; Getirana

et al., 2017b; Paiva et al., 2013a) e calibração e assimilação no modelo (Brêda et al., 2019; Oliveira et al., 2021). Os exercícios de validação produziram coeficientes de Nash-Sutcliffe superiores a 0,6 para 60% das 212 estações virtuais ENVISAT avaliadas por Paiva et al. (2013a), e erros de amplitude inferiores a 0,8 m e viés absoluto inferior a 2,3 m para a maioria das estações analisadas por Yamazaki et al. (2012b). A combinação da altimetria por satélite com um modelo hidráulico para um trecho sem dados *in situ* do rio Xingu levou Garambois et al. (2017) a propor o conceito de visibilidade hidráulica por meio de conjuntos de dados de SR, ou seja, a capacidade dos dados de altimetria por satélite atuais e futuros para estimar corretamente as variáveis hidráulicas do rio. Os dados de altimetria mostraram-se relevantes para a compreensão do funcionamento hidráulico de trechos complexos dos rios amazônicos, especialmente ao longo de trechos com morfologia heterogênea do leito e forte controle a jusante, que têm grandes efeitos no nível da água e na declividade (Birkett et al., 2002).

As principais variáveis de saída que foram abordadas pelos modelos hidrológico-hidráulicos são *ET*, armazenamento de água do solo, vazão, nível da água e extensão de água superficial. No entanto, outras variáveis também são importantes para uma compreensão eficaz do ciclo da água, e precisam ser melhor limitadas dentro dos sistemas de modelagem. Por exemplo, apenas alguns estudos abordaram a velocidade da água simulada (Dias et al., 2011; Fassoni-Andrade, 2020; Pinel et al., 2019) e armazenamento de inundações (Fleischmann et al., 2020; Getirana et al., 2017a; Paiva et al., 2013a) nas áreas úmidas amazônicas, que são variáveis fundamentais para entender a dinâmica das inundações, embora esta última (armazenamento de inundações) já tenha sido estimada por diferentes métodos de SR (ver capítulo 9).

Como ainda há incertezas em ambos os modelos e em estimativas de SR, técnicas de calibração de modelos e assimilação de dados (AD) foram desenvolvidas para melhorar a previsibilidade do modelo, com base na combinação de ambas. A calibração do modelo foi realizada com altimetria por satélite por Getirana et al. (2013) e Oliveira et al. (2021), mostrando os benefícios do uso desses conjuntos de dados para a melhoria geral do modelo em termos de estimativa de vazões. Por sua vez, a avaliação das técnicas de AD (principalmente os métodos baseados em Filtros de Kalman) dentro da Amazônia envolveu muitos experimentos com dados de SR (por exemplo, altimetria por satélite), da escala de trecho de rio à regional (Brêda et al., 2019; Emery et al., 2018; Garambois et al., 2017; Paiva et al., 2013b). Esses estudos mostraram a aplicabilidade desses métodos para melhorar as estimativas

do modelo e a representação do ciclo da água em geral. A utilidade dos esquemas de AD para a melhor estimativa de vazões foi demonstrada para previsão (Paiva et al., 2013b), compreensão de eventos extremos passados (Wongchuig et al., 2019) e estimativa da vazão em tempo quase real (Paris et al., 2016). O estudo de Wongchuig et al. (2019) foi o primeiro a estimar vazões de forma espacialmente distribuídas nos últimos 100 anos, estimando eventos extremos de seca e inundação em locais previamente não registrados (**Figura 11e**). Eles seguem um padrão geral de tendência significativa de eventos de seca crescente no sul e eventos de inundação nas regiões oeste e noroeste da Amazônia (Callède et al., 2004; Correa et al., 2017; Espinoza Villar et al., 2009a; Lopes et al., 2016; Molina-Carpio et al., 2017). Além de vazões e níveis da água, outras variáveis estimadas por SR podem também ser usadas por meio da AD e poderiam ser aplicadas na Amazônia, por exemplo, umidade do solo (Baguis e Roulin, 2017; Crowley et al., 2008; Massari et al., 2015), mudança de armazenamento de água terrestre (Khaki et al., 2019, 2018) e extensão de áreas inundadas. Adicionalmente, a futura missão SWOT fornecerá informações inovadoras para a modelagem hidráulica dos rios amazônicos. Muitos estudos têm discutido a utilidade da missão para melhor estimar as variáveis hidráulicas na Amazônia, em escala de trechos de rio (por exemplo, no baixo rio Madeira; Brêda et al., 2019) até a bacia inteira (Emery et al., 2020; Wongchuig et al., 2020). Novas formas de incorporar os níveis da água de altimetria por satélite irão permitir o desenvolvimento da próxima geração de modelos hidráulicos para a Amazônia, visando a uma melhor representação de processos locais, como a heterogeneidade da superfície da água que ocorre devido a controles hidráulicos como reduções de largura de canal (Garambois et al., 2017; Montazem et al., 2019; Pujol et al., 2020).

A maioria das aplicações de modelos em áreas úmidas da Amazônia se concentrou em partes específicas das planícies de inundação da Amazônia central ou em estudos que contemplassem toda a bacia Amazônica. A simulação das planícies de inundação fluviais ainda enfrenta algumas limitações para ser realizada com precisão sobre sistemas fluviais complexos e dinâmicos como nos sopés dos Andes, que estão associados a múltiplos leques aluviais, áreas úmidas desconectadas do rio principal em termos de águas superficiais, mas conectadas através de águas subterrâneas (por exemplo, as florestas de pântanos alimentadas com água subterrânea; Hamilton et al., 2007), e dinâmicas hidrológicas relativamente rápidas, que por sua vez dificultam o monitoramento baseado em SR de variáveis como extensão de inundação e níveis da água. Mais avanços na estimativa da topografia ao longo das áreas úmidas florestadas e canais adjacentes são necessários, bem como técnicas de modelos acoplados de

águas subterrâneas e de superfície. Além das planícies de inundação fluviais, existem outros tipos de áreas úmidas na bacia Amazônica, que muitas vezes são denominadas áreas úmidas interfluviais (Junk et al., 2011). Elas combinam processos de inundação endógeno e exógeno em diferentes graus (Bourrel et al., 2009), e estão mais sujeitas a chuvas locais e menos conectados a rios adjacentes (Reis et al., 2019). Estão também associadas a diferentes tipos de vegetação e ecossistemas (por exemplo, campinas, campinaranas e savanas). Embora os modelos hidráulicos unidimensionais tenham se mostrado satisfatórios para simular os processos ao longo das planícies de inundação fluviais (Trigg et al., 2009), as áreas úmidas interfluviais requerem uma simulação bidimensional para capturar adequadamente o fluxo difuso na área úmida. Fleischmann et al. (2020) apresentaram pela primeira vez uma avaliação de um modelo com foco nas áreas úmidas interfluviais do rio Negro, que estão associadas a eventos neotectônicos e ao ambiente de campinas e campinaranas dentro da floresta Amazônica (Rossetti et al., 2017), e, portanto, diferem muito da Amazônia central em termos de inundações, vegetação e características do solo. Belger et al. (2011) utilizaram uma série temporal de imagens Radarsat e medições *in situ* do nível da água e chuva local para estimar mudanças na inundação em uma área úmida da bacia do rio Negro. Os modelos unidimensionais mostraram-se irrealistas para simular a elevação da superfície da água nessas áreas. Estudos futuros devem abordar ainda mais a hidrologia desses sistemas complexos de áreas úmidas interfluviais, incluindo as áreas de *Llanos de Moxos* (Hamilton et al., 2004; Ovando et al., 2018), Roraima (Hamilton et al., 2002) e Peru (Kvist e Nebel, 2001), visando a entender melhor as diferenças hidrológicas entre planícies de inundação e áreas úmidas interfluviais, e ao mesmo tempo ajudando nossa compreensão sobre os diversos ecossistemas amazônicos particulares que dependem deles, bem como as diferenças em termos de conectividade entre rio e áreas úmidas.


A parte a jusante da bacia Amazônica permanece relativamente inexplorada em termos de modelagem hidráulica e SR. Isso pode ser explicado pela dinâmica complexa do estuário, que é influenciado por uma ampla gama de escalas de tempo, desde as marés com variações intra-diárias que se propagam rio acima a partir do Oceano Atlântico, através do delta da Amazônia, até as escalas de tempo sazonais e interanuais conduzidas pela hidrologia da bacia. Além disso, os efeitos das marés permanecem sensíveis até cerca de 900 km a montante da foz do rio Amazonas (Kosuth et al., 2009). Um dos desafios no *continuum* hidráulico do trecho baixo do rio Amazonas é a compreensão dos papéis relativos da força a montante e da influência oceânica na formação dos padrões espaciais e temporais de variabilidade do nível da água,



velocidade de fluxo e extensão de inundação ao longo do curso do estuário. Iniciativas promissoras têm sido feitas para modelar este complexo estuário, principalmente contando com modelos de circulação oceânica costeira, seja em configurações bidimensionais (Gabioux et al., 2005; Gallo e Vinzon, 2005), ou, mais recentemente, por meio de modelagem tridimensional completa (Molinas et al., 2020). Esses estudos, em particular, lançaram luz sobre o comportamento distinto das ondas marítimas durante sua propagação a montante no estuário Amazônico. No entanto, até o momento, falta uma estrutura de modelagem hidráulica abrangente e de alta resolução, que abrace a complexa geometria de todo o *continuum* hidráulico do baixo rio Amazonas, e contabilize toda a gama de interações entre os fatores forçantes do oceano e do rio. Isso pode ser explicado, pelo menos parcialmente, pelo fato de que o monitoramento da variabilidade do nível da água é fundamental no sucesso de uma modelagem hidráulica do trecho baixo do rio Amazonas para fins de calibração/validação; no entanto, a altimetria por satélites tem sido pouco utilizada no estuário Amazônico. Finalmente, os novos dados de observação da Terra por satélite, como os níveis da água derivados do SWOT (Biancamaria et al., 2016), largura dos canais de água (Allen e Pavelsky, 2018; Yamazaki et al., 2014), topografia das planícies de inundação (Fassoni-Andrade et al., 2020b), e estimativas de umidade do solo (SMOS, SMAP), bem como novos conjuntos de dados de precipitação, por exemplo aquelas oriundas do uso de dados de umidade do solo como o SM2RAIN Brocca et al., 2013, 2014), missões de gravimetria (GRACE *Follow-On*), e técnicas para recuperar armazenamentos de águas subterrâneas (por exemplo, Frappart et al., 2019), irão abrir grandes oportunidades para a próxima década de desenvolvimento de modelagem hidrológica e hidráulica na bacia Amazônica.

Um dos principais objetivos da comunidade de modelagem na Amazônia deve ser avançar em direção a modelos de hiper-resolução, capazes de fornecer estimativas localmente relevantes em todos os lugares (Bierkens et al., 2015; Fleischmann et al., 2019; Wood et al., 2011), bem como representando melhor todos os processos dentro do ciclo da água, incluindo a dinâmica das águas subterrâneas que é tipicamente mal representada na maioria dos modelos hidrológicos, normalmente focados nas águas superficiais (Míguez-Macho e Fan, 2012; Sutanudjaja et al., 2018). O avanço em direção a modelos de hiper-resolução foi promovida em escala global devido ao desenvolvimento de novos métodos numéricos, conjuntos de equações e engenharia de software, bem como, ao aumento da capacidade computacional (Bates et al., 2018). Tais sistemas de modelagem poderiam, então, ser acoplados a modelos de outros processos, como feito recentemente por pesquisadores com o

objetivo de compreender os impactos das inundações na fotossíntese e na biosfera em geral (Castro et al., 2018), as interações entre águas superficiais e atmosfera (Santos et al., 2019), as exportações de sedimentos e armazenamento em planícies (Fagundes et al., 2021; Rudorff et al., 2018), o armazenamento de carbono e as emissões através de áreas úmidas e terra firme (Hastie et al., 2019; Lauerwald et al., 2020), e a dinâmica dos ciclos biogeoquímicos em escala da bacia ou sobre áreas úmidas (Guilhen et al., 2020). Todos esses esforços exigirão dados adicionais de SR e avançarão a nossa capacidade de projetar os efeitos das mudanças ambientais em curso na bacia Amazônica.



# **Ecosystemas** *Aquáticos*

John Melack  
Jefferson Ferreira-Ferreira

As áreas úmidas amazônicas sustentam uma biota diversificada e são importantes para a biogeoquímica e economia regionais (Hess et al., 2015; Junk, 1997; Junk et al., 2011; Melack et al., 2009). As planícies de inundação amazônicas contêm milhares de lagos e de quilômetros quadrados de áreas cobertas por vegetação e são caracterizadas por grandes variações sazonais e interanuais de profundidade e extensão da inundação. As condições hidrológicas são essenciais para a estrutura e função ecológica desses ecossistemas aquáticos. A hidrologia das planícies de inundação é complexa porque combina fluxos de entrada locais e fluxos regionais com grande variabilidade espacial. As aplicações das inovações em SR, medições hidrológicas e modelagem para a investigação das planícies de inundação da Amazônia levaram a avanços na compreensão da ecologia de planícies inundáveis.

Os principais aspectos da hidrologia relevantes para os ecossistemas de planícies de inundação na Amazônia e em outros lugares são a amplitude, a duração, a frequência e a previsibilidade das variações na vazão e inundação (Melack e Coe, 2021). Dois arcabouços conceituais de relevância geral para os sistemas fluviais foram motivados por estudos na Amazônia. Junk et al. (1989) enfatizaram a importância do pulso de inundação e definiram as planícies de inundação em termos de altura da inundação, condições físicas e químicas associadas e adaptações de organismos a essas condições; Junk (1997) elaborou esses conceitos para a Amazônia central. Mertes (1997) examinou aspectos hidrológicos da inundação dos sistemas de planícies de inundação utilizando SR e modelos simples, e introduziu o conceito de zona perirrérica (*perirrhic zone*), a zona de mistura de água do rio e da captação local. Ambos os desenvolvimentos conceituais são suportados por medições hidrológicas dos lagos de planícies de inundação da Amazônia, o primeiro por Lesack e Melack (1995), posteriormente modelado por Ji et al. (2019) e Bonnet et al. (2008, 2017). As planícies de inundação desempenham um papel importante no equilíbrio de carbono e na biogeoquímica do nitrogênio da bacia Amazônica e são locais de grandes fluxos de metano e dióxido de carbono para a troposfera e altas taxas de produção de plantas aquáticas. Estudos projetados para estimar a magnitude e a variabilidade dos fluxos de gás e a produtividade na Amazônia combinaram o SR com dados de campo de maneiras inovadoras aplicáveis aos ecossistemas aquáticos em geral. Melack et al. (2004) usaram fluxos de metano de habitats específicos em combinação com mudanças sazonais na extensão de água superficial dos habitats aquáticos, provindos de SR por micro-ondas ativos e passivos, para estimar fluxos regionais de metano. No trecho principal do rio Solimões-Amazonas e suas planícies de inundação, estima-se que as emissões anuais de metano variem entre

aproximadamente 0,7 e 2,4 TgC por ano (Melack et al., 2004). Além disso, os fluxos de metano por m<sup>2</sup> foram mais elevados durante os níveis mais baixos de água do que durante o período de águas altas em um lago de planície de inundação da Amazônia, e os fluxos nas proximidades da vegetação foram maiores do que aqueles em habitats de águas abertas (Barbosa et al., 2020). Richey et al. (2002) e Melack (2016) também usaram estimativas de extensão de água superficial para calcular fluxos de dióxido de carbono. Guilhen et al. (2020) estimaram as emissões de N<sub>2</sub>O da desnitrificação nas áreas úmidas na Amazônia adaptando um modelo simples de desnitrificação forçado pela extensão de águas superficiais abertas do satélite SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*) e relataram um padrão de desnitrificação relacionado à inundação.

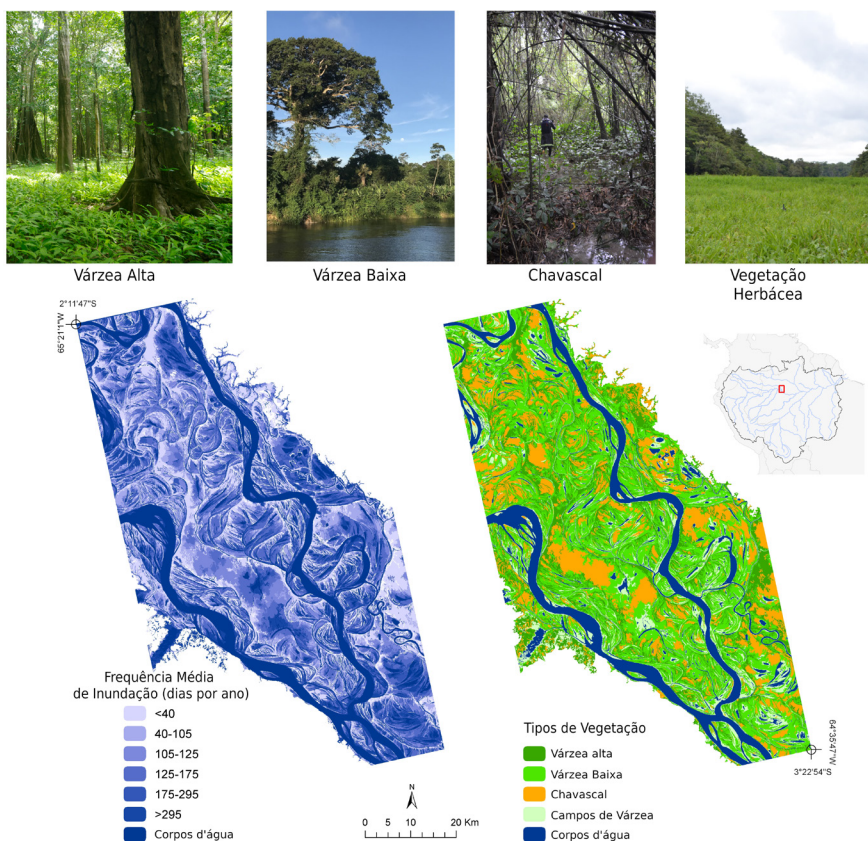
Abordagens pioneiras com dados de SR foram utilizadas para delinear área inundada e extensão de florestas inundadas, águas abertas e plantas herbáceas (por exemplo, Hamilton et al., 2002; Hess et al., 1995, 2003, 2015; Capítulo 5), e usadas para melhorar as estimativas de variações sazonais e interanuais nos fluxos de metano. Conforme descrito no capítulo 5, novos sensores para satélites e produtos de SR podem ser usados agora para atualizar tais abordagens (por exemplo, Parrens et al., 2019; Prigent et al., 2020). Esses dados podem ser combinados com mudanças medidas por SR em habitats aquáticos, medições de campo recentes (por exemplo, Amaral et al., 2020; Barbosa et al., 2020), e modelagem (por exemplo, Potter et al., 2014) para melhorar significativamente as estimativas de emissões. De forma mais geral, o esquema de classificação vegetativo-hidrológico utilizado nessas análises atende aos critérios para uma “parametrização funcional” das áreas úmidas (Sahagian e Melack, 1998), com classes adequadas para aplicações biogeoquímicas e de biodiversidade.

A produtividade primária das plantas aquáticas é frequentemente alta, mas desafiadora de medir, especialmente para plantas herbáceas com grandes variações sazonais e espaciais. Nas planícies de inundação da Amazônia, a produtividade das plantas aquáticas herbáceas é fortemente influenciada pelas variações hidrológicas (Engle et al., 2008; Junk, 1997). Por exemplo, o crescimento de plantas aquáticas herbáceas em lagos de planícies de inundação segue a variação do nível da água. A extrapolação de medições de campo da produtividade vegetal para uma escala regional foi feita pela primeira vez por M. Costa (2005) utilizando estimativas de biomassa vegetal com imagens SAR. Valores mais baixos foram encontrados em regiões onde as plantas se desenvolveram apenas no início da temporada de enchentes, e valores mais elevados

em áreas mais próximas ao rio Amazonas, onde a disponibilidade e influência da água rica em nutrientes é maior. Outros trabalhos de (T. S. F. Silva et al., 2010) e Silva et al. (2013) utilizaram dados SAR de banda C combinados e dados ópticos para investigar respostas de expansão horizontal e crescimento vertical de plantas herbáceas a variações na área inundada e no nível da água em duas grandes planícies de inundação ao longo do rio Amazonas. No período de 1970 a 2011, o crescimento vertical variou por um fator de 2 e a cobertura anual máxima variou por um fator de 1,5. Anos com mudanças excepcionalmente grandes no nível da água resultaram na maior produtividade porque a expansão horizontal e o crescimento vertical foram ambos aumentados.

A produtividade dos ecossistemas aquáticos da Amazônia também está relacionada ao fornecimento de nutrientes e condições ópticas dentro da água (Melack e Forsberg, 2001). Aplicações de espectrômetros a bordo de satélites para as águas opticamente complexas da Amazônia revelaram níveis de clorofila e sedimentos suspensos (por exemplo, Barbosa et al., 2009; Novo et al., 2006; Capítulo 7), o que está relacionado à produtividade planctônica. Outros estudos que empregam dados de sensores ópticos têm sido usados para descrever a vegetação aquática (por exemplo, Josse et al., 2007; Novo e Shimabukuro, 1997; Wittmann et al., 2002) e a dinâmica fluvial (Constantine et al., 2014; Mertens et al., 1995), ambos aspectos importantes dos ecossistemas aquáticos. No entanto, observações ópticas de SR são frequentemente impedidas pela cobertura de nuvens ou de fumaça, e as copas das árvores são muitas vezes muito densas para permitir a detecção de inundações. Alternativamente, séries temporais de dados SAR estão disponíveis para várias sub-regiões dentro da bacia Amazônica e podem ser usadas para gerar mapas de alta resolução de vegetação e inundação. Ferreira-Ferreira et al. (2015), por exemplo, utilizaram uma série temporal de dados SAR do sensor ALOS/PALSAR-1 para distinguir entre as classes de cobertura da terra e mapear a extensão de água e a duração média da inundação (**Figura 12**). Os autores ilustraram a distribuição desigual das áreas inundáveis em diferentes níveis de água, ou seja, alguns estágios do nível da água resultam em grandes expansões das áreas inundadas, enquanto outros estágios têm menos efeito.

Os padrões de fluxos complexos, revelados por análises interferométricas de SAR (Alsdorf et al., 2007) e diferenças nas fontes de água, evidentes em modelos hidrológicos (Bonnet et al., 2017; Ji et al., 2019), explicam, em parte, as variações de nutrientes, sedimentos suspensos e produtividade (Forsberg et al., 2017).



**Figura 12:** Principais tipos de vegetação e mapas de duração média estimada da inundação na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, Amazônia Central, Brasil (Adaptado de Ferreira-Ferreira et al., 2015). Os mapas foram baseados em uma série temporal de dados de imagens ALOS/PALSAR-1 compreendendo nove datas entre 2007 e 2010, escolhidas para fornecer a maior e mais uniforme gama de condições de nível da água dentro das imagens disponíveis para a área. Os corpos de água provêm da classe de inundação de 365 dias por ano, em média, ou seja, corpos de água permanentes. Mais detalhes em Ferreira-Ferreira et al. (2015).

Outro exemplo de como os avanços na modelagem hidrológica contribuíram para a compreensão das planícies de inundação da Amazônia é apresentado por Rudorff et al. (2014a, 2014b). Eles adicionaram um modelo simples de equilíbrio hidrológico ao modelo de inundação hidráulico LISFLOOD-FP e o aplicaram ao longo de 15 anos de simulação. Este trabalho também enfatizou a importância da topografia detalhada que eles obtiveram de uma combinação de dados SRTM com extensos dados de batimetria. O modelo simulou bem as mudanças no nível da água, extensão de inundação e fluxos de planícies de inundação fluviais. Rudorff et al. (2017) combinaram esses resultados com medições de sedimentos suspensos

para demonstrar variações no fornecimento e perda de sedimentos da planície de inundação.

As variações na distribuição e inundação dos habitats das planícies de inundação desempenham um papel fundamental na ecologia e produção de muitos peixes comercialmente importantes na Amazônia. Lobón-Cerviá et al. (2015) demonstraram que o número de espécies de peixes e sua abundância estavam diretamente relacionados com a presença de florestas inundadas e inversamente relacionados à distância do rio. Arantes et al. (2018) utilizaram dados Landsat e SAR para caracterizar habitats aquáticos e descobriram que padrões espaciais de biodiversidade de peixes nas planícies de inundação amazônicas estavam associados à cobertura florestal e aos gradientes de paisagem. Exemplos adicionais de conexões entre a pesca e a ecologia de peixes são mostrados em Melack et al. (2009) e Melack et al. (2021).

A fenologia das árvores tanto em planícies de inundação férteis e eutróficas (várzeas) como em planícies de inundação pobres em nutrientes e oligotróficas (igapós) seguem as variações na inundação (Junk et al., 2010). A inundação sazonal também fornece conectividade que é fundamental para a diversidade gama (Thomaz et al., 2007; Ward et al., 2002). A diversidade de aves varia entre os habitats aquáticos (Cintra, 2015; Laranjeiras et al., 2021). Nas grandes planícies de inundação fluviais, as aves e peixes têm comunidades mais estáveis em ambientes com inundações anuais ritmadas (Jardine et al., 2015; Luz-Agostinho et al., 2009). Em um lago de planície de inundação perto da confluência dos rios Amazonas e Negro, por exemplo, Röpke et al. (2017) detectaram uma mudança abrupta e persistente na estrutura das assembleias de peixes que durou mais de uma década após a seca extrema de 2005. As perturbações das variações naturais da área inundadas, conectividade hidrológica ou cobertura terrestre são disruptivas para os sistemas de áreas úmidas.

Resende et al. (2019) utilizaram SR SAR para avaliar os impactos da barragem de Balbina para as florestas de Igapó, a jusante no rio Uatumã. Os autores mostraram que 12% das florestas da planície de inundação morreram devido ao pulso de inundação alterado e outros 29% das florestas vivas remanescentes podem estar em processo de mortalidade. Schöngart et al. (2021) exibem mais evidências de mudanças nas florestas das planícies de inundação abaixo da barragem de Balbina ao longo de 35 anos. Castello et al. (2018) combinaram dados de pesca e cobertura de habitat provenientes de análises SAR para determinar os efeitos da mudança



da cobertura da terra sobre a produção pesqueira. Eles mostraram que a remoção de florestas inundadas pode reduzir a produção de peixes e que outros habitats das planícies de inundação não podem substituir a remoção de florestas para melhorar a produção de peixes.

Diversos desafios e lacunas de conhecimento ainda existem na relação entre hidrologia e o funcionamento dos ecossistemas aquáticos na bacia Amazônica e em outros lugares. O solo úmido permanente pode ter altas taxas de processos biogeoquímicos, como a liberação de metano. Embora difícil de detectar com SR, os modelos são promissores, se operados nas escalas corretas. Córregos e pequenos rios, bem como lagoas, podem liberar quantidades desproporcionalmente altas de dióxido de carbono, mas suas áreas superficiais raramente são conhecidas; produtos de SR de alta resolução espacial ajudarão a atenuar esse problema. As áreas úmidas interfluviais e savanas, muitas vezes alagadas pela chuva e não pelos rios, não são bem representadas por modelos hidrológicos em escala de bacia e exigirão dados topográficos em escala fina combinados com dados de SR multitemporal de inundação. Dentro da bacia Amazônica, existem lacunas de dados particularmente grandes nos *Llanos de Moxos* (Bolívia), nas turfeiras na bacia do *Pastaza-Marañón* (Peru) e nas áreas úmidas costeiras de água doce.



12  
**Mudanças**  
*ambientais*

Gabriel Medeiros Abrahão  
Marcos Heil Costa

Nas últimas décadas, a Amazônia passou por grandes mudanças ambientais. Extensas áreas de floresta tropical foram desmatadas, sendo convertidas em pastagens, lavouras ou áreas de mineração. Essas mudanças na cobertura do solo alteraram a partição da precipitação entre evapotranspiração, escoamento superficial e drenagem profunda, transporte de sedimentos, vazão e coloração dos rios, e influenciam os processos de formação de chuvas na Amazônia. Ao mesmo tempo, áreas florestais foram inundadas por barragens artificiais para produzir energia hidrelétrica, afetando pulsos de inundação a jusante da barragem, enquanto a ecologia das florestas teve que se adaptar aos padrões de inundação. O SR tem sido uma importante ferramenta para detectar e mapear essas mudanças ambientais e seus impactos no ciclo hidrológico.

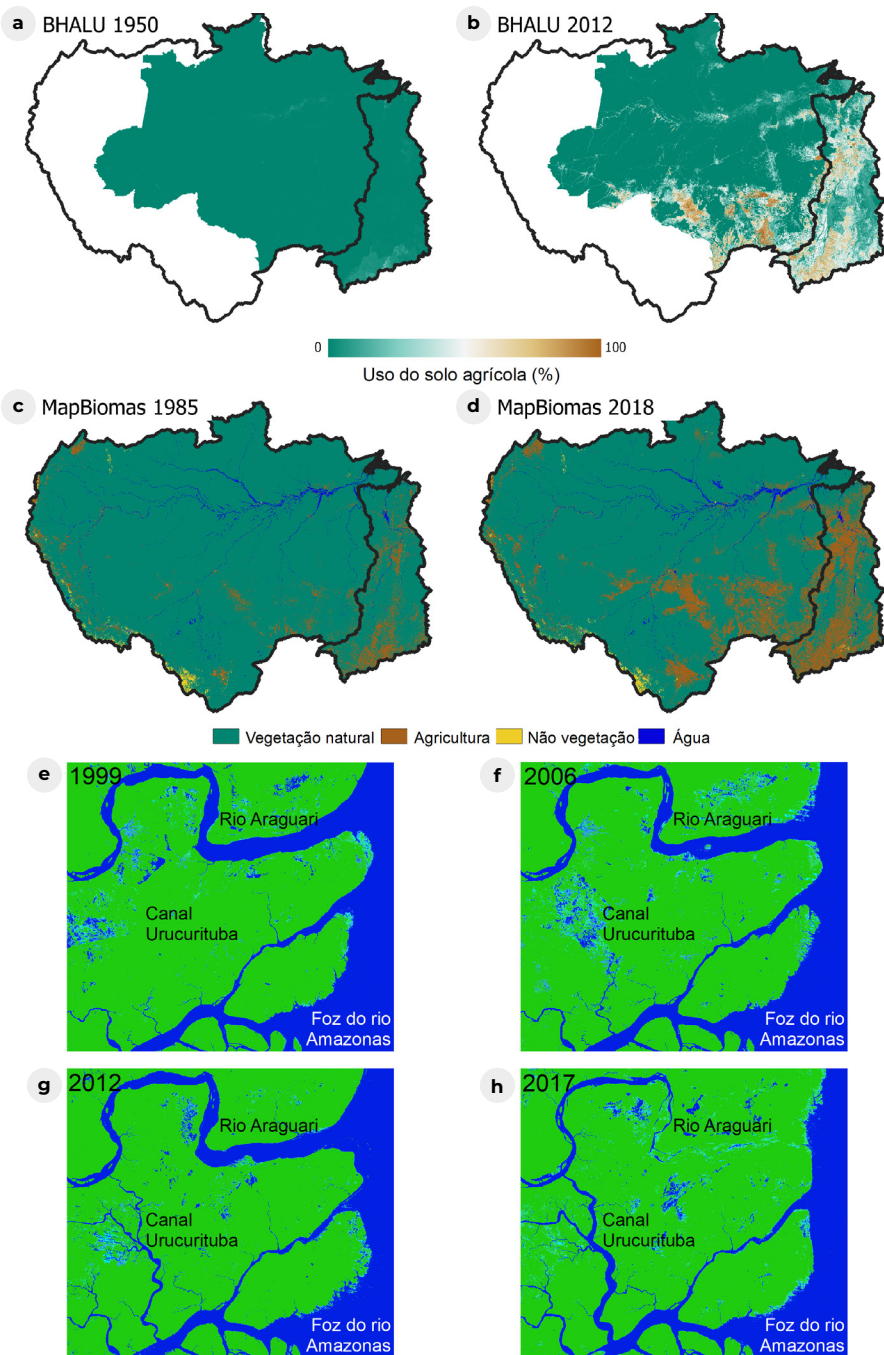
Somente após extenso mapeamento do uso e cobertura do solo (*Land Use and Land Cover*, LULC) na Amazônia foi possível compreender o impacto do desmatamento em seu ciclo hidrológico. O primeiro desses mapas foi produzido por Cardille et al. (2002). Eles realizaram uma fusão de imagens de SR do sensor AVHRR com dados do censo agrícola para produzir um mapa de LULC espacialmente explícito para as bacias do Amazonas e do Tocantins para o ano de 1995. Com base nesse conjunto de dados e nos dados do censo agrícola de 1960, Costa et al. (2003) avaliaram como o aumento do uso do solo na parte superior da bacia do Tocantins afetou as vazões de 1949-1969 a 1979-1999. Embora a precipitação não tenha mudado significativamente do primeiro para o segundo período, a vazão média anual aumentou 24% ( $P < 0,02$ ), enquanto a vazão da estação chuvosa aumentou 28% ( $P < 0,01$ ), e os picos sazonais ocorreram cerca de um mês antes. Tais variações poderiam ser creditadas tanto à redução da *ET* quanto à redução da infiltração durante o período chuvoso. A redução da *ET* é uma consequência de três fatores resultantes da mudança na vegetação: o aumento do albedo reduz a radiação líquida na superfície; a rugosidade reduzida diminui a turbulência atmosférica, enfraquecendo os movimentos verticais; e a menor profundidade das raízes deixa menos umidade no solo disponível para as plantas. Fatores adicionais que também podem influenciar a *ET* local incluem a compactação da superfície ou subsuperfície do solo e a redução do índice de área foliar através do pastejo (M. H. Costa, 2005).

Outros mapas de LULC foram produzidos para a Amazônia brasileira utilizando técnicas semelhantes (Leite et al., 2011 para 1940-1995; Dias et al., 2016 para 1940-2012, **Figura 13ab**). Diversos produtos gerados somente por SR estão disponíveis para períodos mais recentes, como o produto MODIS MOD44 *tree*

cover (2002-presente), o PRODES baseado em Landsat (1988- presente, <http://www.obt.inpe.br/prodes/>) e o TerraClass (2004-2014, <https://www.terraclass.gov.br/>), todos produtos oficiais do governo para a Amazônia brasileira, e o MapBiomias para a Pan Amazônia (1985-recente, <https://mapbiomas.org/> - **Figura 13cd**). Vários autores usaram esses conjuntos de dados para estudar os efeitos das mudanças do LULC no regime hidrológico de vários dos afluentes da Amazônia e do arco do desmatamento Amazônia-Cerrado como um todo (Arias et al., 2018; Cavalcante et al., 2019; Coe et al., 2011; Levy et al., 2018; Panday et al., 2015; Silvério et al., 2015; Spera et al., 2016), geralmente encontrando aumento das vazões média e mínima e a diminuição da evapotranspiração em toda a bacia com o desmatamento.

Além da vazão, as mudanças no uso e cobertura do solo também podem afetar a precipitação, particularmente durante o início e o final da estação chuvosa. A primeira evidência empírica desse efeito na região foi fornecida por Butt et al. (2011). Eles compararam quatro mapas de cobertura da terra baseados em imagens Landsat de 1975 a 2005 com as datas de início da estação chuvosa calculadas a partir de dados diários de pluviômetros, concluindo que, para estações que ficam dentro da região mais desmatada, o início da estação chuvosa mudou significativamente para, em média, 11 dias (e até 18 dias) mais tarde durante as últimas três décadas. No entanto, para as estações que estão em áreas que não foram fortemente desmatadas, o início não mudou significativamente. Estudos recentes confirmaram esses resultados. Em uma análise similar para o sul da Amazônia de 1974 a 2012, e após a remoção das tendências regionais e da variabilidade interanual, Leite-Filho et al. (2019) confirmaram um atraso no início de 1,2 a 1,7 dias para cada aumento de 10% no desmatamento. Além disso, a probabilidade de ocorrência de veranicos no início e no final do período chuvoso é maior em áreas com maior desmatamento.

Adicionalmente, usando dados diários de precipitação do produto TRMM 3B42 e do conjunto de dados com resolução de 1-km de uso da terra de Dias et al. (2016), Leite-Filho et al. (2020) quantificaram os efeitos do desmatamento no início, fim e duração da estação chuvosa no sul da Amazônia para 1998-2012. Após remover os efeitos da posição geográfica e do ano, os autores verificaram uma relação entre o início, o desaparecimento e a duração da estação chuvosa e o desmatamento. Para cada 10% de aumento na fração desmatada, o início da estação chuvosa atrasa  $\sim 0,4 \pm 0,12$  dia, o início adianta  $\sim 1,0 \pm 0,22$  dia, e a duração reduz  $\sim 0,9 \pm 0,34$  dia ( $p < 10^{-5}$  em todas as três tendências).



**Figura 13:** Exemplos de mudanças na Amazônia documentadas por SR. As Figuras a-d mostram dois conjuntos diferentes de dados de uso da terra baseados em satélite para as bacias Amazônica e Tocantins-Araguaia. Na parte superior, o conjunto de dados de

Uso Histórico do Solo Brasileiro (BHALU, Dias et al., 2016), que combina dados de satélite e censitários para estimar a fração de cada pixel de 1x1 km ocupado por diferentes usos do solo de 1950 (a) a 2012 (b) no Brasil. O conjunto de dados BHALU inclui áreas de vegetação natural, pastagens e diferentes culturas agrícolas. Apenas o uso total da terra agrícola (pastagens + culturas) é mostrado. Em (c) e (d), o conjunto de dados MapBiomas Amazônia (Projeto MapBiomas Amazônia, 2021; <https://mapbiomas.org/>), uma classificação detalhada do uso da terra da área combinada de floresta tropical da Pan Amazônia e as bacias Amazônica e Tocantins-Araguaia de 1985 (c) a 2018 (d).

Os quatro painéis inferiores mostram um importante evento hidrogeomorfológico recente na Amazônia, a captura de quase todo o fluxo de água do rio Araguaari pelo rio Amazonas. O Rio Araguaari costumava fluir diretamente para o Oceano Atlântico (e, f). Iniciado por um grande evento de inundação em 2011, o canal de Urucurituba cresceu até o Rio Araguaari ser conectado à foz do Amazonas por volta de 2015 (g, h). Os painéis e-h foram gerados usando dados do *Global Surface Water Explorer* (<https://global-surface-water.appspot.com/>; Pekel et al., 2016).

Outro avanço alcançado devido ao SR foi a identificação do efeito da chamada “brisa do desmatamento”, que afeta a distribuição espacial das chuvas. Khanna et al. (2017) utilizaram dados de SR de uso da terra, precipitação e nebulosidade, combinados com um modelo climático regional, descobrindo que pequenos fragmentos de desmatamento geram células de circulação atmosférica em Rondônia. Esta circulação cria um dipolo de anomalia de precipitação sobre a área desmatada, com aumento da precipitação na direção do vento e supressão da precipitação na direção oposta, no ramo descendente da célula térmica. O dipolo observado em Rondônia é substancial, com a mudança de precipitação nas duas regiões sendo  $\pm 25\%$  da média da área desmatada.

Esses fenômenos de circulação regional fazem com que a relação entre o desmatamento e os totais de chuvas dependa da escala de análise. Combinando os dados TRMM 3B42 de precipitação e de uso da terra do sistema PRODES, Leite-Filho et al., (2021) descobriram que essa relação não é linear em escalas menores, mas em escalas maiores sempre leva a uma diminuição da precipitação total anual no sul da Amazônia. Na mesoescala (uma célula de grade TRMM de 28 km), pequenas frações desmatadas (até um limite de desmatamento de 57%) levam a um ligeiro aumento na precipitação pluviométrica (2,2 mm por ano por ponto percentual da célula desmatada,  $p < 10^{-5}$ ). Entretanto, para frações desmatadas acima deste limite, a precipitação diminui em cerca do dobro desta taxa, 5 mm por ano por ponto percentual de desmatamento ( $p < 10^{-5}$ ). A agregação tanto do desmatamento quanto da precipitação em células de grade maiores (56 km, 112 km) reduz gradualmente o limite não linear para aumentar/diminuir os impactos pluviométricos. Ao atingir a escala subsinótica (224-km de célula de grade, ou 64 *pixels* do TRMM 3B42), o desmatamento leva consistentemente a uma redução linear na precipitação de 4,1

mm por ano por ponto percentual adicional desmatado da célula ( $p < 10^{-5}$ ), mesmo para pequenas frações de desmatamento.

Embora várias técnicas para inferir as propriedades da água superficial e do canal a partir do SR tenham sido desenvolvidas nos últimos anos (conforme descrito nos capítulos 4, 5, 6 e 7), relativamente poucos estudos aplicam essas técnicas para avaliar como as mudanças ambientais antrópicas e naturais afetaram e afetam essas propriedades na bacia Amazônica. Latrubesse et al. (2017) usaram dados de cobertura de árvores de Hansen et al. (2013), imagens Landsat e as estimativas baseadas em SR de TSS de Park e Latrubesse (2014) para investigar os impactos atuais e potenciais de barragens na bacia. Eles descobriram que as represas de Santo Antônio e Jirau causaram uma redução de 20% na concentração média de sedimentos em suspensão superficial no rio Madeira, mesmo apesar das vazões de cheias excepcionalmente altas nos anos analisados após seu início de operação. Eles também utilizaram imagens Landsat para calcular as taxas de migração de canais para cada sub-bacia, encontrando uma taxa média de migração de  $0,02 \pm 20\%$  da largura dos canais por ano.

A estimativa por satélite do TSS também tem sido utilizada para documentar as tendências no trecho principal do rio Amazonas, embora não haja um consenso aparente sobre as causas dessas tendências observadas. Tais técnicas permitem a expansão e extrapolação de conjuntos de dados de campo, sendo especialmente úteis na Amazônia, uma vez que o escoamento e o TSS estão pouco correlacionados nos pontos mais baixos do rio Amazonas devido ao assincronismo dos picos da vazão dos rios Solimões, Madeira e Negro (Filizola e Guyot, 2009). Martinez et al. (2009) usaram amostragem de TSS de 18 trabalhos de campo, de 1995 a 2003, e imagens MODIS para obter uma série contínua de TSS por 12 anos (1995-2007) na estação de Óbidos, a última estação de medição no rio Amazonas antes de alcançar o Oceano Atlântico. Eles encontram um aumento de 20% na descarga de sedimentos no período sem tendências claras na descarga de água e citam mudanças no uso da terra e nos padrões de chuvas como explicações prováveis. Recentemente, Li et al. (2020) usaram técnicas semelhantes para obter uma série temporal atualizada (1996-2018) de TSS e descobriram que o carregamento de sedimentos aumentou até 2007, mas diminuiu depois. Eles inferiram que essa reversão se deve à diminuição da contribuição sedimentar do rio Madeira após a construção das barragens de Santo Antônio e Jirau no final dos anos 2000, concordando com Latrubesse et al. (2017).

Montanher et al. (2018) utilizaram técnicas similares para gerar uma série temporal estendida de 32 anos (1984-2016) de transporte de sedimentos em suspensão (SST, o produto do TSS por vazão). Eles defenderam que existe um padrão recorrente de SST subindo e descendo em ciclos, provavelmente associados a flutuações climáticas, e que tendências como as observadas por Martinez et al. (2009) são uma consequência de séries temporais curtas. Entretanto, a SST depende diretamente da variabilidade da vazão, e Martinez et al. (2009) e Li et al. (2020) não encontraram tendências na vazão em suas séries temporais mais curtas.

Alguns estudos também investigaram o impacto da mineração sobre os sólidos em suspensão nas sub-bacias amazônicas. A mineração artesanal e em pequena escala, especialmente de ouro, é comum em algumas regiões, como na bacia do rio Tapajós. Essas pequenas operações de mineração frequentemente utilizam técnicas de baixo custo, como jatos de água e dragas que podem causar níveis proporcionalmente altos de degradação da terra e contaminação da água (Lobo et al., 2018). Além disso, elas são muitas vezes ilegais e não registradas, tornando o SR uma ferramenta importante para identificá-las e mapeá-las. O único conjunto de dados disponível publicamente (até onde sabemos) sobre áreas de mineração na bacia Amazônica é o projeto TerraClass, que é baseado na interpretação visual de imagens Landsat e está disponível apenas para alguns anos entre 2004-2014. Lobo et al. (2018) combinaram vários conjuntos de dados para desenvolver um método de classificação automatizado que pode distinguir entre mineração industrial e de pequena escala e tipos de minério com base em imagens do Sentinel-2. Eles inferiram que, em 2017, 64% da área total de mineração, em algumas regiões-chave da bacia, eram compostos por mineração de ouro e estanho em pequena escala.

Lobo et al. (2015) estimaram a concentração de TSS na bacia do rio Tapajós com base em imagens Landsat e descobriram que os aumentos de TSS estão fortemente associados aos aumentos relatados na atividade de mineração em escalas de tempo sazonais e decenais. Lobo et al. (2016) atualizaram a identificação de áreas de mineração baseada em Landsat do projeto TerraClass. Eles descreveram a evolução das áreas de mineração na mesma bacia, identificando diferentes épocas de impactos da mineração no TSS relacionados à introdução de diferentes tecnologias e variações no preço do ouro. Comparando sub-bacias com diferentes tipos de alteração de terra, também indicaram que as atividades de mineração têm um efeito muito maior no TSS do que o desmatamento para fins agrícolas.



As imagens Landsat também foram usadas para documentar e entender um grande evento hidrogeomorfológico na Amazônia: a recente captura de quase todo o fluxo de água do rio Araguari pelo rio Amazonas (dos Santos et al., 2018). O Araguari é um rio grande, com uma vazão média anual superior a  $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , que costumava fluir diretamente para o Oceano Atlântico até a rápida formação do canal Urucurituba, que o ligou ao rio Amazonas no início da década de 2010. A migração inicial do proto-canal Urucurituba para o rio foi provavelmente associada ao desmatamento para a criação de búfalos por volta de 2007. A primeira conexão com o Araguari foi atribuída a um evento de alto fluxo em 2011. O rápido crescimento do canal, que aumentou em largura em cerca de 5 m por mês até 2015, é provavelmente uma consequência de complexos processos hidromorfodinâmicos relacionados com correntes de maré e deposição estuarina que, em última instância, levaram ao bloqueio da foz do rio Araguari. A formação deste canal causou grandes mudanças no padrão hidráulico, dinâmica sedimentar e ecossistemas no estuário do Araguari, sendo a primeira observação conhecida do desenvolvimento da rede de distribuição estuarina por erosão das cabeceiras.

As técnicas de SR também contribuíram com dados de entrada, calibração e validação para muitos modelos que forneceram importantes reflexões sobre as consequências das mudanças ambientais na bacia Amazônica (ver capítulo 10). Esses modelos podem integrar processos hidrológicos, hidráulicos, climáticos e de uso da terra e são ferramentas importantes em muitos estudos que investigam os impactos de mudanças passadas e futuras no meio ambiente. Uma das principais aplicações desses modelos é analisar possíveis cenários futuros (por exemplo, mudanças climáticas e desmatamento). Outra aplicação se refere à atribuição dos efeitos de diferentes processos na variabilidade dos dados observados.

Sorribas et al. (2016) examinaram projeções de mudanças climáticas sobre a vazão e extensão de inundação na bacia Amazônica usando o modelo hidrológico regional MGB com simulação de armazenamento de água e hidráulica fluvial unidimensionais em planícies de inundação forçadas por cinco GCMs do Quinto Projeto de Intercomparação de Modelos Climáticos (CMIP5) do IPCC. O modelo foi validado com uma combinação de dados *in situ* e de SR. Os resultados indicam um aumento da vazão média e máxima para os grandes rios que drenam os Andes no Noroeste, causado por mudanças no clima, o que contribuiu para o aumento da vazão e da extensão média e máxima de inundação sobre as áreas úmidas peruanas (a região de Pacaya-Samiria, por exemplo) e o rio Solimões no oeste da Amazônia.


Por outro lado, a diminuição das vazões (principalmente na estação seca) é projetada para as bacias do leste e sul, assim como diminuição da inundação no período seco na Amazônia central.

Com o crescente interesse na construção de hidrelétricas na bacia Amazônica durante as últimas décadas (Castello e Macedo, 2016), muitos estudos de modelagem tentaram quantificar os impactos ambientais de projetos de barragens planejados e construídos. Forsberg et al. (2017) utilizaram vários modelos para avaliar os impactos de seis barragens planejadas para a região andina da Amazônia. Como uma porção considerável da produção de sedimentos na bacia ocorre nessa região, prevê-se que essas barragens reduzam o suprimento de sedimentos, fósforo e nitrogênio em toda a bacia em 64%, 51% e 23%, respectivamente. Juntamente com as mudanças no suprimento de nutrientes e sedimentos, os autores estimam que a dinâmica do mercúrio e a atenuação do pulso de inundação cause grandes impactos sobre o meio aquático a jusante e nas planícies de inundação e na geomorfologia do canal. De fato, Resende et al. (2019) encontraram mortalidade maciça de árvores das florestas de inundação (igapó) a jusante do reservatório de Balbina usando imagens de SAR, com cerca de 40% do igapó 49 km a jusante do reservatório ou morto ou em processo de mortalidade.

As mudanças ambientais esperadas na bacia, como o desmatamento e a mudança climática, também podem ter um impacto significativo na própria produção de energia hidrelétrica, muitas vezes levando à geração bem abaixo da capacidade esperada da barragem. Os projetos mais recentes de barragens seguem um conceito a fio d'água, evitando os grandes impactos ambientais de enormes reservatórios de projetos mais antigos, mas tornando a geração de energia mais dependente das variações naturais da vazão (Costa, 2020). Arias et al. (2020) combinaram mudanças no uso da terra e um modelo hidrológico para avaliar os impactos diretos das mudanças climáticas e do desmatamento na produção de energia hidrelétrica das barragens existentes e planejadas na bacia do Tapajós. Embora a evapotranspiração decrescente do desmatamento tenda a aumentar a vazão média anual, a redução da retenção de água aumenta o escoamento superficial e as enchentes rápidas durante a estação chuvosa e reduz a vazão durante a estação seca. Uma vez que as turbinas normalmente trabalham na capacidade máxima durante a estação chuvosa, este excesso de fluxo é desperdiçado, e a geração na estação seca é reduzida. Arias et al. (2020) descobriram que a combinação da projeção das mudanças climáticas com o desmatamento pode atrasar o pico de geração de energia em um mês (piorando o

descompasso entre o pico de produção e o consumo), reduzir a geração na estação seca em 4-7% e aumentar a variabilidade interanual da produção de energia em 50-69%.

O desmatamento tem o efeito indireto de reduzir a precipitação e atrasar o início da estação chuvosa, o que ilustra ainda mais a dependência da geração de energia hidrelétrica das florestas. Stickler et al. (2013) combinaram modelos de uso da terra, hidrológico e climáticos para avaliar os efeitos diretos e indiretos do desmatamento apenas na geração hidrelétrica do complexo energético de Belo Monte na bacia do rio Xingu. Eles descobriram que, ao considerar apenas os efeitos diretos do desmatamento no fluxo do rio, um desmatamento de 20-40% da bacia levaria a um aumento de 4-12% na vazão média com aumentos similares na geração de energia. Entretanto, quando os efeitos climáticos do desmatamento da região Amazônica foram considerados, a inibição da chuva na bacia contrabalançou os efeitos diretos e levou a uma redução de 6-36% nas vazões. Sob o cenário habitual de desmatamento para 2050 (40% da floresta Amazônica removida), eles simularam que a geração de energia foi reduzida para 25% da produção máxima da planta. No cenário de desmatamento habitual para 2050 (40% da floresta Amazônica removida), eles simularam que a geração de energia foi reduzida para 25% da produção máxima da instalação.



13

***Síntese dos avanços  
científicos, desafios  
futuros e prioridades***

Rodrigo Paiva  
Fabrice Papa  
Alice Fassoni-Andrade  
Ayan Fleischmann  
Sly Wongchuig  
John Melack

As várias conquistas de mais de três décadas de avanços científicos sobre a hidrologia da bacia Amazônica com dados de satélite, juntamente com o desenvolvimento de novas técnicas de SR, e algumas oportunidades de pesquisa selecionadas, estão resumidas na **Tabela 7** e **Tabela 8**. A seção 13.1 apresenta as principais descobertas obtidas na Amazônia, que tem sido um laboratório natural de SR para o avanço da hidrologia. A seção 13.2 destaca como estas experiências podem ser utilizadas para fomentar a compreensão do ciclo da água em outras grandes bacias hidrográficas do mundo. A seção 13.3 discute as lacunas de conhecimento e oportunidades de pesquisa sobre as águas da Amazônia, graças a um monitoramento sem precedentes e contínuo da bacia Amazônica com as próximas e futuras missões de satélites. Finalmente, a seção 13.4 discute como ir dos avanços científicos para uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos, e a seção 13.5 destaca recomendações para futuros estudos sobre as águas da Amazônia a partir do espaço.

**TABELA 7**  
Síntese de avanços científicos, desafios futuros e oportunidades no entendimento da hidrologia da Amazônia usando SR.

| VARIÁVEL                  | DESENVOLVIMENTOS PIONEIROS EM SR REALIZADOS NA AMAZÔNIA                                                                                                                                                                                                                                           | LIÇÕES INOVADORAS SOBRE A AMAZÔNIA / HIDROLOGIA GERAL APRENDIDAS COM O USO DO SR                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | LACUNAS DE CONHECIMENTO E NOVAS OPORTUNIDADES PARA A AMAZÔNIA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Precipitação</b>       | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Distribuição espacial das chuvas em escala regional (Espinoza et al., 2009).</li> <li>2) Tendência de chuva nas últimas décadas (Paca et al., 2020).</li> </ol>                                                                                         | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Distribuição espacial das áreas de hotspot (Chavez e Takahashi, 2017; Espinoza et al., 2015).</li> <li>2) Redução da precipitação sobre os principais rios (Paiva et al., 2011).</li> <li>3) Início da estação chuvosa precocemente induzida pela floresta tropical (Wright et al., 2017).</li> </ol>                                                                                      | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Algoritmos aperfeiçoados para chuvas orográficas (Dinku et al., 2011; Toté et al., 2015).</li> <li>2) Rede estratégica de pluviômetros.</li> <li>3) Constelação de satélites de baixo custo (Peral et al., 2019).</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Evapo-transpiração</b> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Estimativas de fluxo de água nos trópicos em grandes escalas (Fisher et al., 2009).</li> <li>2) Dados observacionais para calibração e validação de modelos e avaliações com múltiplos modelos (Gonçalves et al., 2013; Rocha et al., 2009).</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Compreensão dos fatores ambientais e da sazonalidade da ET em toda a bacia, com maior limitação energética e pequena sazonalidade nas regiões mais úmidas (Amazônia central), e o oposto na região sul.</li> <li>2) Diminuição da ET devido ao desmatamento e expansão da agricultura (de Oliveira et al., 2019; Silvério et al., 2015; Spera et al., 2016; Zemp et al., 2017).</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Modelagem de estimativas de ET de alta resolução espacial (&lt; 30 m) em séries temporais longas (&gt; 40 anos).</li> <li>2) Combinação de modelos de balanço de energia na superfície com modelos menos dependentes da parametrização da cobertura do solo.</li> <li>3) Novas técnicas de fusão de dados usando várias fontes de SR (multiespectrais, térmicas e de micro-ondas) para reduzir os efeitos da cobertura de nuvens nas abordagens de balanço de energia.</li> </ol> |

|                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Nível da água</b></p>                                                                     | <p>1) Estimativas de nível e declividade de água em larga escala por radares altimétricos (Birkett et al., 2002; Guzkowska et al., 1990).</p> <p>2) Mudanças no nível da água em comparação com as estimativas de interferometria (Aldorf et al., 2007, 2000).</p> <p>3) Monitoramento do nível da água e de curvas-chave em rios não monitorados (Paris et al., 2016; Silva et al., 2014).</p>                          | <p>1) Caracterização da variação do nível da água em rios e florestas úmidas (Aldorf et al., 2007; Birkett et al., 2002).</p> <p>2) Conectividade rio-planície de inundação (Aldorf, 2003; Park, 2020).</p> <p>3) Armazenamento de água em sistemas fluviais e áreas úmidas (Aldorf, 2003; Frappart et al., 2005).</p>                                | <p>1) Caracterização bidimensional dos níveis de água (SWOT) (Biancamaria et al., 2016).</p> <p>2) Resolução espaço-temporal mais fina para nível da água e declividade.</p> <p>3) Novas técnicas de fusão com modelagem local para regional (Paiva et al., 2013b; Yamazaki et al., 2011).</p>                                                                                                                      |
| <p><b>Extensão de Água Superficial</b></p>                                                      | <p>1) Primeira estimativa em larga escala da extensão e variabilidade da água superficial em planícies de inundação (Hess et al., 2003; Sippel et al., 1994).</p> <p>2) Relação entre extensão de águas superficiais e vazão (Sippel et al., 1998).</p> <p>3) Dinâmica de planícies de inundação em alta resolução e discriminação de tipos de vegetação aquática em grandes áreas (Ferreira-Ferreira et al., 2015).</p> | <p>1) Padrões sazonais e interanuais de inundação na bacia Amazônica (Aires et al., 2017; Hamilton et al., 2004; Hess et al., 2015).</p> <p>2) Contribuição da variabilidade da água interior e das planícies de inundação para o ciclo de emissões do carbono da Amazônia (Melack et al., 2004; Raymond et al., 2013; Richey et al., 2002).</p>      | <p>1) Resolução espaço-temporal mais fina da água superficial e variabilidade da extensão de inundação da planície com SWOT e NISAR.</p> <p>2) Desenvolvimento de técnicas de fusão com inteligência artificial para combinar várias observações de SR (visível, IV, micro-ondas passivo e ativo, GNSS-R).</p> <p>3) Garantir observações de longo prazo para monitorar as mudanças climáticas/ antropogênicas.</p> |
| <p><b>Topografia de lagos e canais da planície de inundação</b></p>                             | <p>1) Ajuste dos Modelos Digitais de Elevação (Baugh et al., 2013; Yamazaki et al., 2012a).</p> <p>2) Estimativas de topografia em áreas sazonalmente inundadas (Fassoni-Andrade et al., 2020b).</p>                                                                                                                                                                                                                     | <p>1) Caracterização dos canais e lagos da planície de inundação (Fassoni-Andrade et al., 2020b; Sippel et al., 1998; Trigg et al., 2012).</p> <p>2) Avaliação da migração do canal fluvial (Constantine et al., 2014; dos Santos et al., 2018).</p>                                                                                                  | <p>1) Caracterização da topografia em florestas alagadas.</p> <p>2) Estimativa de longo prazo para monitorar mudanças geomorfológicas na planície de inundação e nos canais fluviais.</p>                                                                                                                                                                                                                           |
| <p><b>Qualidade da água: sedimentos, clorofila e matéria orgânica dissolvida colorida</b></p>   | <p>1) Estimativas de concentração de sedimentos em rios (Bayley e Moreira, 1978; Mertes et al., 1993), clorofila em lagos de planícies de inundação (Novo et al., 2006), e matéria orgânica dissolvida colorida em lagos (M. P. da Silva et al., 2019).</p> <p>2) Algoritmos semi-analíticos para estimativas de qualidade da água (Bernini et al., 2019; de Carvalho et al., 2015; Maciel et al., 2020a).</p>           | <p>1) Mapas dinâmicos do campo de luz subaquático e dos constituintes opticamente ativos (Fassoni-Andrade e Paiva, 2019; Maciel et al., 2020a; Martinez et al., 2009; Novo et al., 2006).</p> <p>2) Séries temporais estendidas dos sedimentos em suspensão na região Amazônica (Li et al., 2020; Martinez et al., 2009; Montanher et al., 2018).</p> | <p>1) Avaliação da dinâmica da comunidade de fitoplâncton usando SR como indicador de biodiversidades nas águas amazônicas.</p> <p>2) Algoritmos robustos para CDOM e estimativa de Clorofila-a em águas interiores opticamente complexas.</p>                                                                                                                                                                      |
| <p><b>Armazenamento de Água Terrestre (TWS) e Armazenamento de Águas Subterráneas (GWS)</b></p> | <p>1) Estimativas de larga escala de TWS usando dados GRACE (Tapley et al., 2004).</p> <p>2) Determinação de mudanças no GWS usando produtos de SR e resultados de modelos (Frappart et al., 2011).</p>                                                                                                                                                                                                                  | <p>1) Assinaturas espaciais de secas e cheias no TWS (Chen et al., 2009).</p> <p>2) Assinaturas espaço-temporais de secas no armazenamento de água superficial (Frappart et al., 2012; Papa et al., 2013).</p> <p>3) Variações temporais do GWS (Frappart et al., 2019).</p>                                                                          | <p>1) Aperfeiçoamento de estimativas de anomalias de GWS com estimativas mais acuradas do armazenamento de água superficial com a missão SWOT.</p> <p>2) Monitoramento a longo prazo do TWS e GWS (GRACE e GRACE Follow-on).</p>                                                                                                                                                                                    |

**TABELA 8**

Síntese dos avanços científicos em esforços multidisciplinares e integradores na compreensão da hidrologia e dos ecossistemas da bacia Amazônica.

|                                                                         | LIÇÕES INOVADORAS SOBRE A AMAZÔNIA / A HIDROLOGIA GERAL APRENDIDA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | LACUNAS DE CONHECIMENTO E NOVAS OPORTUNIDADES PARA A AMAZÔNIA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Balanco Hídrico</b>                                                  | <p>1) Análise do ciclo hidrológico em escala de sub-bacia (Azarderakhsh et al., 2011).</p> <p>2) Realização do fechamento do balanço hídrico (Pan et al., 2012).</p> <p>3) Estimativa contínua de vazões dos rios com base no fechamento do balanço hídrico usando estimativas de satélite.</p>                                                                                                                                                                                                               | <p>1) Resolução espaço-temporal mais fina nas análises de balanço hídrico utilizando novas caracterizações de rios a partir de SR.</p> <p>2) Sensibilidade do fechamento do viés de diferentes componentes do balanço, em especial de ET.</p> <p>3) Estimativa da troca entre águas subterrâneas e superficiais em escala fina a partir de métodos de balanço hídricos corrigidos na superfície.</p>                                                                                                                                                                       |
| <b>Modelamento do ciclo hidrológico da Amazônia e suas áreas úmidas</b> | <p>1) Interações hidrodinâmicas rio-planície em múltiplas escalas (Paiva et al., 2013a; Rudorff et al., 2014b; Sorribas et al., 2020; Wilson et al., 2007).</p> <p>2) Dinâmica das águas subterrâneas em múltiplas escalas e climas, e interação água subterrânea-planície de inundação (Miguez-Macho e Fan, 2012).</p> <p>3) Componentes TWS (superfície, subsuperfície) em escala de bacia (Paiva et al., 2013a; Pokhrel et al., 2013).</p>                                                                 | <p>1) Resolução espaço-temporal mais fina da dinâmica de inundações, considerando processos de sedimentação, em diversos tipos de áreas úmidas (planícies de inundação e interflúvias).</p> <p>2) Melhor parametrização dos processos de águas subterrâneas em toda a bacia Amazônica.</p> <p>3) Falta de convergência entre estimativas de partição de armazenamento de água (por exemplo, estimativas divergentes da fração de água superficial).</p>                                                                                                                    |
| <b>Ecossistemas Aquáticos</b>                                           | <p>1) Integração de variações temporais e espaciais de inundações e habitats aquáticos associados à estimativa de fluxos de dióxido de carbono e metano para a atmosfera (Melack et al., 2004; Richey et al., 2002).</p> <p>2) Estimativa da área dos principais habitats aquáticos na Amazônia e variações sazonais e interanuais nestes (Hess et al., 2015; Melack e Hess, 2010).</p> <p>3) Biomassa e crescimento de plantas aquáticas em planícies de inundação (M. Costa, 2005; Silva et al., 2013).</p> | <p>1) Extensão de solos saturados sob florestas e em corredores ripários.</p> <p>2) Modelagem de variações de inundação em áreas úmidas interflúvias e em savanas.</p> <p>3) Extensão de córregos e pequenos rios, especialmente na região Andina.</p> <p>4) Dados topográficos de alta resolução em planícies de inundação.</p>                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Mudanças Ambientais</b>                                              | <p>1) Efeitos das mudanças no uso da terra sobre a vazão (Costa et al., 2003).</p> <p>2) Influência das mudanças no uso da terra no início da estação chuvosa (Butt et al., 2011; Leite-Filho et al., 2019), duração da estação chuvosa (Leite-Filho et al., 2020) e precipitação total (Leite-Filho et al., 2021).</p>                                                                                                                                                                                       | <p>1) Necessidade de entender melhor as interações entre as mudanças locais no uso da terra e os mecanismos climáticos em larga escala no ciclo da água da bacia Amazônica.</p> <p>2) Iniciar o monitoramento da degradação florestal em suas diferentes formas, para que os efeitos a longo prazo sobre a hidrologia florestal possam ser estudados.</p> <p>3) Aplicar as técnicas existentes para avaliar as alterações nas propriedades da água e da planície de inundação causadas por alterações antrópicas (alteração do uso da terra, represamento, mineração).</p> |



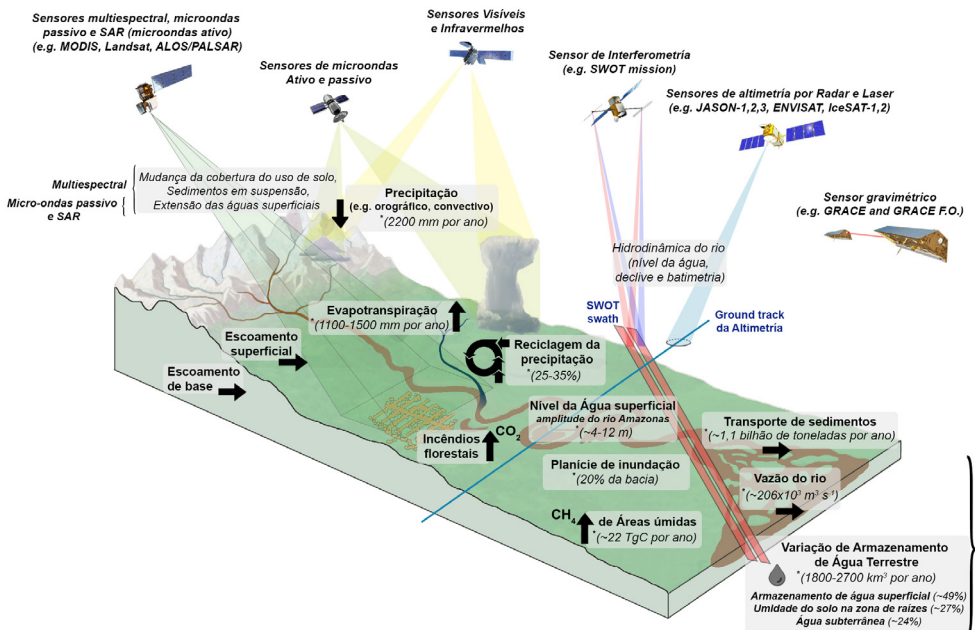
# 131

## **A bacia Amazônica como *laboratório de sensoriamento remoto* para a hidrologia**

Como a maior bacia hidrográfica do mundo, caracterizada por fortes sinais hidrológicos como precipitação, evapotranspiração, mudança de armazenamento de água e vazões fluviais, a bacia Amazônica tem sido um laboratório natural ideal para o desenvolvimento pioneiro de técnicas de SR e suas aplicações para fomentar nossa compreensão dos processos hidrológicos. A **Tabela 7** resume, para múltiplas variáveis hidrológicas, os principais desenvolvimentos realizados no



campo de SR sobre a bacia, juntamente com as lições revolucionárias aprendidas em relação ao funcionamento hidrológico da Amazônia. Adicionalmente, a **Figura 14** ilustra as principais características dos armazenamentos hidrológicos e dos fluxos na Amazônia, caracterizados pelas observações e análises de SR. Nas últimas décadas, a necessidade de entender as mudanças ambientais em curso na bacia Amazônica, que poderiam impactar os ciclos globais de água, energia e carbono, motivou uma série de esforços multidisciplinares e integradores que promoveram avanços científicos em nosso entendimento da hidrologia e dos ecossistemas Amazônicos (**Tabela 8**).



**Figura 14:** Ilustração esquemática dos processos hidrológicos do ciclo da água na bacia Amazônica. Os principais sensores a bordo dos satélites em órbita que têm ajudado a medir esses processos são apresentados. São mostradas as estimativas anuais médias de cada componente em toda a bacia. As referências (\*) relacionadas a essas estimativas são apresentadas juntamente com o texto no capítulo 13.

Os avanços nas estimativas de precipitação usando SR permitiram a caracterização das distribuições espacial e temporal das chuvas em escala local a regional sobre a bacia Amazônica, e forneceram registros suficientemente longos para avaliar as tendências pluviométricas nas últimas décadas (**Tabela 7** e **Tabela 2** para produtos de precipitação desenvolvidos). A precipitação média na bacia foi estimada em 2200 mm por ano (**Figura 3**), e as chuvas mais intensas ocorreram em regiões de *hotspot* na cordilheira dos Andes iniciadas por processos de convecção alterados pela

topografia, onde as chuvas podem atingir valores superiores a 6000 mm por ano (Chavez e Takahashi, 2017; Espinoza et al., 2015; **Figura 3**). A análise em larga escala da precipitação derivada do SR revelou o efeito dos ventos sobre grandes corpos de água que causam a redução das chuvas nessas áreas (Paiva et al., 2011).

As observações de SR foram fundamentais para fornecer as primeiras estimativas de evapotranspiração em larga escala em regiões tropicais, especialmente na Amazônia. Além disso, elas forneceram dados observacionais sem precedentes para a avaliação, calibração e validação de modelos (**Tabela 2**). Além disso, o SR permitiu a caracterização da variabilidade temporal e espacial da *ET* sobre a bacia Amazônica (**Figura 4**) e a compreensão dos fatores ambientais que a determinam, revelando regimes contrastantes entre os mais limitados por energia na parte equatorial da bacia e os regimes mais limitados por disponibilidade hídrica nas áreas ao sul (Maeda et al., 2017). A evapotranspiração média anual da bacia Amazônica é estimada em 1100 a 1500 mm por ano (com base nos modelos globais SSEBOP, MOD16, PML e GLEAM - **Figura 4**, e balanço hídrico em Builes-Jaramillo e Poveda, 2018), com taxas mais altas nas porções norte, como na bacia do rio Negro, diminuindo para as partes sul (Baker et al., 2021; Maeda et al., 2017). Várias abordagens baseadas em SR resultaram em divergências significativas na estimativa da evapotranspiração sobre a bacia (**Figura 4** e **Figura 10**). Por exemplo, as taxas anuais de *ET* baseadas em SR na escala da bacia foram 15-37% mais altas do que as obtidas a partir de balanços hídricos (Baker et al., 2021).

A caracterização de águas superficiais continentais, incluindo sua elevação e extensão, foi possível graças a adaptações de técnicas de satélite não projetadas inicialmente para aplicações de hidrologia ou monitoramento de águas interiores. Um exemplo marcante é o das missões de altimetria espacial, inicialmente projetados para observar o oceano, mas com aplicações promissoras para os grandes rios da Amazônia (Guzkowska et al., 1990) e com potencial para estimar o nível da água superficial de rios e lagos. Desde então, vários bancos de dados de altimetria para o monitoramento global de lagos e rios foram desenvolvidos (**Tabela 3**). A técnica de interferometria diferencial SAR, originalmente desenvolvida na disciplina de geofísica, também foi testada e aplicada pela primeira vez em planícies de inundação da Amazônia central para caracterizar mudanças do nível da água (Alsdorf et al., 2000). As técnicas de altimetria e SAR foram importantes para caracterizar as variações do nível da superfície da água nos rios amazônicos 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 da foz) a  $4,0 \text{ cm km}^{-1}$  (2900–4000 km a montante da foz; Birkett et al., 2002). O pulso de inundação monomodal do rio Amazonas é bem capturado com altimetria por radar (amplitude de ~4-12 m; **Figura 5**). Esse pulso controla as variações da superfície da água nas planícies de inundação da Amazônia central. Durante o processo anual de enchente, as variações nos rios e planícies de inundação adjacentes, obtidas por SAR ou altimetria, são similares (Alsdorf et al., 2007), mas a conectividade é reduzida durante o período de águas baixas (Park, 2020) já que os fluxos são controlados pela topografia local (Alsdorf et al., 2007) e o nível da água superficial em ambos os ambientes nem sempre é equivalente (Alsdorf, 2003).

O primeiro mapeamento por SR em grande escala da extensão de águas superficiais também foi realizado para a bacia Amazônica (Sippel et al., 1994) usando observações de sensores de micro-ondas passivos. A partir de vários sensores, muitas estimativas e bancos de dados foram desenvolvidos em diferentes escalas espaciais e temporais (**Tabela 4**). Eles incluem um mapeamento inovador de alta resolução espacial de áreas úmidas e vegetação inundada usando SAR de banda L (Hess et al., 2003), que forneceu as primeiras estimativas da extensão de inundação na bacia Amazônica, variando entre 285 mil e 635 mil  $\text{km}^2$  em períodos de águas baixas (Out-Dez) e altas (Abr-Jun), respectivamente (Hess et al., 2015; **Figura 6**). Existem diferenças significativas entre as várias estimativas de extensão de águas superficiais baseadas em SR sobre a bacia (**Figura 6**), em geral, com menor área máxima inundada encontrada por produtos em escala grosseira em relação aos mapas derivados de SAR. Abordagens seminais com dados de SR foram realizadas para delinear a área de águas superficiais da Amazônia em larga escala e a extensão de florestas inundável, águas abertas e plantas herbáceas, revelando seus complexos padrões sazonais e interanuais influenciados pela variabilidade local e regional (Aires et al., 2017; Hamilton et al., 2004; Hess et al., 2015; Melack e Hess, 2010). Enquanto a largura da planície de inundação do rio Amazonas é semelhante em toda a Amazônia central, a área de floresta inundável diminui de montante para jusante, onde tanto o número quanto o tamanho dos lagos (áreas de água aberta) aumentam (Hess et al., 2015; Mertens et al., 1996).

Em combinação com os dados de campo, o mapeamento da extensão de águas superficiais na bacia Amazônica permitiu estimativas regionais pioneiras de emissões de metano (**Tabela 7**), com uma estimativa de emissões de metano de ~22

Tg C por ano para a planície (Melack et al., 2004). A configuração espacial dos habitats da planície de inundação da Amazônia em relação aos tipos de vegetação está relacionada com os padrões de inundação (**Figura 14**; Ferreira-Ferreira et al., 2015). As plantas aquáticas herbáceas nas planícies de inundação da Amazônia central têm um crescimento relacionado com a variação do nível da água e a extensão de inundação (M. Costa, 2005; Silva et al., 2013). Além disso, o efeito crescente das barragens na bacia Amazônica tem sido avaliado por meio de análises da dinâmica da extensão de cheias (Li et al., 2020; Souza et al., 2019) e dos impactos na mortalidade de árvores (Resende et al., 2019).

A primeira caracterização morfométrica na bacia Amazônica utilizando dados de SR mostrou que 11% da planície de inundação ao longo do rio Amazonas e dos afluentes mais baixos é coberta 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 (Latrubesse, 2012; Mertes et al., 1996). As larguras dos canais da planície de inundação variam muito (10-1000 m), e as profundidades dos canais estão estreitamente ligadas à amplitude local do pulso de inundação do rio Amazonas (8-12 m, Trigg et al., 2012; **Figura 7**). A recente captura de quase todo o fluxo de água do rio Araguari pelo rio Amazonas, a primeira observação conhecida do desenvolvimento de redes de distribuição estuarinas por erosão das cabeceiras, 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 (Baugh et al., 2013; Wilson et al., 2007; Yamazaki et al., 2012a), nos quais foram feitas melhorias importantes, tais como a remoção da vegetação. Os MDEs globais ainda não representam com precisão a topografia da planície de inundação, mas os dados de extensão de água superficial combinados com o nível da água superficial permitiram o primeiro mapeamento topográfico em áreas sazonalmente inundadas na Amazônia central com uma precisão de 0,89 m (Fassoni-Andrade et al., 2020b). Nessas áreas, 75% das áreas de águas abertas têm uma profundidade inferior a 2 m (8 m) no período de águas baixas (altas) (Fassoni-Andrade et al., 2020b).

O Rio Amazonas exporta o maior suprimento de sedimentos para o oceano do mundo (1,1 bilhão de toneladas por ano); (Armijos et al., 2020; **Figura 14**). Vários estudos precursores e desenvolvimentos de algoritmos usando SR para caracterizar a composição da água de rios e lagos foram conduzidos principalmente na Amazônia (ver **Tabela 5**), tais como as estimativas pioneiras de concentração de sedimentos em

rios (Bayley e Moreira, 1978; Mertens et al., 1993), clorofila em lagos de planícies (Novo et al., 2006) matéria orgânica dissolvida colorida (M. P. da Silva et al., 2019). O padrão espaço-temporal desses componentes está relacionado às variações do pulso de inundação do rio e aos processos de mistura de diferentes fontes. As profundidades rasas durante o período de águas baixas e a grande área de lagos de planície de inundação favorecem as condições de ressuspensão dos sedimentos (Bourgoin et al., 2007; Fassoni-Andrade e Paiva, 2019; **Figura 8**). O mapeamento da clorofila em lagos de planície mostrou maiores concentrações de pigmento durante a baixa estação das águas (Novo et al., 2006). Tendências crescentes na concentração de sedimentos nos rios foram ligadas a mudanças no uso da terra (Martinez et al., 2009; rio Amazonas) e ao impacto da mineração (Lobo et al., 2015, 2016; rio Tapajós). Por outro lado, a construção das barragens de Santo Antônio e Jirau parece ter contribuído para uma redução da concentração de sedimentos no rio Madeira (Latrubesse et al., 2017; Li et al., 2020).

Devido às grandes mudanças espaciais e temporais da água doce armazenada na superfície, zona radicular do solo e aquíferos, a bacia Amazônica é o laboratório ideal para explorar as medições das variações do campo de gravidade da missão do satélite GRACE, as quais causam mudanças no TWS através da redistribuição da massa de água sobre as superfícies continentais (**Figura 9**). As primeiras estimativas provenientes do GRACE de variações de TWS (Tapley et al., 2004) e mudanças no armazenamento de águas subterrâneas (Frappart et al., 2011) foram apresentadas para a bacia Amazônica. A mudança de TWS na Amazônia é estimada em ~1800-2700 km<sup>3</sup> por ano (**Figura 14**) com diferentes contribuições do armazenamento de água superficial (~49%), umidade do solo da zona radicular (~27%), e água subterrânea (~24%) (Frappart et al., 2019). O tempo de residência da água armazenada na bacia Amazônica, 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 GRACE ajudaram a monitorar períodos de secas (por exemplo, 2009) e cheias extremas (por exemplo, 2005, 2010; Chen et al., 2009), quantificar o déficit de água durante tais eventos (Frappart et al., 2012), compreender a dinâmica das águas subterrâneas em diferentes escalas e climas, e a interação entre as planícies de inundação e as águas subterrâneas (Miguez-Macho e Fan, 2012).

O SR provou ser um grande complemento às observações *in situ* que têm sido tradicionalmente usadas para calibração, assimilação e validação de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos (**Tabela 6** e **Figura 11**). No caso da bacia Amazônica,

o desenvolvimento pioneiro ou a aplicação de modelos proporcionou um grande entendimento dos sistemas rio-planície em toda a bacia (Coe et al., 2002; Paiva et al., 2013a; Rudorff et al., 2014b; Sorribas et al., 2020; Trigg et al., 2009; Wilson et al., 2007; Yamazaki et al., 2011), o papel das águas subterrâneas no amortecimento hidrológico e na dinâmica das bacias hidrográficas (Cuartas et al., 2012), e partição do armazenamento total de água (Paiva et al., 2013a; Pokhrel et al., 2013). Enquanto Wilson et al. (2007) desenvolveram um dos primeiros modelos hidráulicos em larga escala, o modelo hidrológico e hidrodinâmico em larga escala de toda a bacia por Paiva et al. (2013a) permitiu a representação de processos físicos como os efeitos do remanso no rio principal e a atenuação do pulso de inundação devido ao armazenamento de água nas planícies de inundação. Essas aplicações em larga escala, que abriram caminho para aplicações de modelos hidrodinâmicos globais, são utilizadas hoje em dia para compreender o risco de inundação desde a escala continental até a escala terrestre (Bates et al., 2021, 2018). As 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 nos picos das vazões promovem grandes mudanças nesse fluxo (Rudorff et al., 2014a). Recentemente, Sorribas et al. (2020) estimaram, utilizando um modelo inovador de rastreamento hidrológico, os tempos de viagem das águas superficiais ao longo da bacia Amazônica em 45 dias (mediana), com 20% das águas do rio Amazonas fluindo através das planícies de inundação. Além disso, com a integração de dados de SR e modelagem hidrológica, foi possível avaliar as inundações e as secas passadas (Frappart et al., 2012; Wongchuig et al., 2019).

As técnicas de SR também foram importantes para entender como o ciclo hidrológico responde às mudanças ambientais. Mudanças a longo prazo na vazão dos rios poderiam ser atribuídas a mudanças na cobertura da terra por meio de mudanças na evapotranspiração, como mostrado pela primeira vez para o rio Tocantins (Costa et al., 2003). A vazão média anual aumentou 24% entre 1949-1986 e 1979-1998, associada ao aumento do uso do solo para agricultura na bacia (de 30% para 49%). A presença da floresta foi estabelecida como importante para determinar os padrões de precipitação, tanto dentro como fora da região. As raízes profundas, o baixo albedo e as altas taxas de *ET* da floresta tropical levam o início da estação chuvosa a ocorrer várias semanas antes do que seria sem ela, em um mecanismo denominado “bomba de umidade por convecção rasa” (*shallow convection moisture pump*) (Wright et al., 2017). Constatou-se que as mudanças nos fluxos da superfície terrestre motivadas pelo desmatamento causaram reduções nos totais de precipitação, atrasos no início

da estação chuvosa e períodos mais longos de seca durante a estação chuvosa, com consequências negativas para a geração de energia hidrelétrica, a agricultura regional e a resiliência da própria floresta (Arias et al., 2020; Butt et al., 2011; Costa, 2020; Leite-Filho et al., 2020; Spera et al., 2014; Stickler et al., 2013).



132

***Os benefícios das  
lições aprendidas  
na Amazônia para  
entender a hidrologia  
de outras grandes  
bacias hidrográficas  
tropicais***



A bacia Amazônica pode ser vista como um laboratório de SR para fomentar a compreensão do ciclo da água e da hidrologia em geral. Embora estes avanços tenham impulsionado o entendimento científico da hidrologia amazônica, eles também criaram desenvolvimentos, técnicas e análises que contribuíram para um melhor entendimento dos ciclos hidrológicos de outras grandes bacias e em escala global. Sem sermos exaustivos, discutimos aqui alguns estudos-chave que se beneficiaram de tais avanços e como eles contribuíram para o avanço da hidrologia em outras regiões. Em particular, como a segunda maior bacia hidrográfica do mundo, com características ambientais semelhantes às da bacia Amazônica, como extensas planícies de inundação e florestas densas, a Bacia do rio Congo é a nova fronteira da pesquisa hidrológica tropical (Alsdorf et al., 2016), atraindo muita atenção da comunidade científica nos últimos anos e se beneficiando das lições aprendidas com a hidrologia amazônica. A conferência *Hydrologic Research in the Congo Basin in Washington, D.C* (EUA), em 2018, delineou novas oportunidades de pesquisa para a bacia. Esse esforço para reunir as comunidades africanas e internacionais em torno de um objetivo comum de melhor compreensão da resposta da bacia do Congo às mudanças climáticas levou à elaboração de um extenso documento (Alsdorf et al., 2021) que indica a utilidade das metodologias de SR e modelos construídos para a bacia Amazônica.

O primeiro desenvolvimento de conjuntos de dados de altimetria por satélite (capítulo 4) na bacia Amazônica foi transformado em conjuntos de dados globais disponíveis livremente, fornecendo estimativa da elevação da superfície da água de longo prazo em milhares de estações virtuais (Tabela 3), permitindo a caracterização da variabilidade da hidrologia superficial a partir da altimetria na bacia do Congo (Paris et al., 2020), nas águas interiores da Índia (Ghosh et al., 2017) e na bacia do rio Níger (Normandin et al., 2018). A integração da altimetria por satélite e da modelagem hidrológica teve avanços inspiradores na Amazônia, incluindo a validação de modelos e o desenvolvimento de curvas-chave (relação entre nível da água e vazão) para monitoramento quase em tempo real das vazões a partir do espaço (capítulo 10), que foram posteriormente realizadas em outras bacias tropicais como o Congo (Kim et al., 2021, 2019; Paris et al., 2020), Tziribihina (Andriambelason et al., 2020), Níger (Fleischmann et al., 2018), e Ogooué (Bogning et al., 2020).

Estudos baseados em desenvolvimentos iniciais de SR na Amazônia realizaram ainda abordagens hidrológicas comparativas, por exemplo, estudando conjuntamente a dinâmica das planícies de inundação na Amazônia central, no Congo e nas áreas

úmidas de Brahmaputra com SAR (H. C. Jung et al., 2010) e GRACE (Lee et al., 2011), destacando as características únicas de cada um desses sistemas fluviais. A bacia Amazônica, com suas extensas planícies de inundação, contrasta amplamente com a *Cuvette Centrale* do Congo, dominada principalmente por áreas úmidas interfluviais, com menor interação entre o rio e as áreas úmidas (H. C. Jung et al., 2010). Após estudos usando observações de SAR para mapear a extensão de inundações e áreas úmidas e distinguir tipos de vegetação na Amazônia (capítulo 5), a dinâmica de inundações sazonais, variações do nível da água, armazenamento de água e tipos de vegetação sobre a bacia do Congo foram geradas pelo JERS-1 (Rosenqvist e Birkett, 2002), ALOS/PALSAR SAR e dados de altimetria do Envisat (Kim et al., 2017; Lee et al., 2015; Yuan et al., 2015) e GRACE (Yuan et al., 2017).

O desenvolvimento de técnicas de SR com uso de múltiplos satélites em grande escala para monitorar a variabilidade do armazenamento de água superficial, com técnicas e análises iniciais desenvolvidas e avaliadas para a bacia Amazônica (capítulos 5 e 8), foram aplicadas ao rio Orinoco na América do Sul (Frappart et al., 2015), ao estudo de secas no rio Ganges-Brahmaputra (Papa et al., 2015) e à quantificação da contribuição relativa das variações das águas superficiais e subterrâneas nos rios Mekong (Pham-Duc et al., 2019), Chad (Pham-Duc et al., 2020) e Congo (Becker et al., 2018; Yuan et al., 2017).

Dada a relevância global em termos de clima e ecossistemas, e a presença de grandes planícies de inundação e dimensões que estão de acordo com a resolução adotada em modelos de escala grosseira, muitos avanços e desenvolvimentos de modelos hidrológicos foram avaliados pela primeira vez na bacia Amazônica (capítulo 10), levando, mais tarde, ao desenvolvimento de modelos em escala global (Yamazaki et al., 2011; Bates et al., 2018). Exemplos incluem a introdução de esquemas de inundação em escala de bacia que foram posteriormente introduzidos em outras bacias hidrográficas (Andriambelison et al., 2020; Paris et al., 2020), em escala continental (Siqueira et al., 2018) e global (Alkama et al., 2010; Decharme et al., 2012; Yamazaki et al., 2011). Avanços recentes no transporte de sedimentos em larga escala usando observações e modelagem de SR seguiram um caminho semelhante, com trabalhos pioneiros na Amazônia (capítulo 7) sendo seguidos por avanços para toda a América do Sul (Fagundes et al., 2021).



# 133

## **Enfrentando *as lacunas de conhecimento atuais* com futuras missões de satélite**

Esta revisão mostrou as enormes conquistas feitas durante mais de três décadas de avanço científico na hidrologia e no ciclo hidrológico da bacia Amazônica com a ajuda do SR. Ela também ajuda a identificar as várias lacunas de conhecimento que restam para promover uma

compreensão abrangente da hidrologia amazônica. Aqui, resumimos estas lacunas de conhecimento (Tabela 7 e Tabela 8) e discutimos as oportunidades de pesquisa com as futuras missões de observação da Terra.

Em relação à precipitação baseada em SR, os desafios atuais do algoritmo envolvem a definição de limiares dinâmicos de brilho de temperatura nos sensores infravermelho e o processamento de dados de micro-ondas para evitar confundir o cume dos picos nevados dos Andes com nuvens frias (Dinku et al., 2011; Toté et al., 2015). São necessários melhores algoritmos de detecção de precipitação sólida para uma melhor compreensão dos processos locais nas cabeceiras da bacia Amazônica, na cordilheira dos Andes (Hurley et al., 2015; Levizzani et al., 2011; Peng et al., 2014). As observações *in situ* são fundamentais para a calibração de sensores remotos. Portanto, uma rede estratégica de estações convencionais e radares terrestres em pontos-chave da Amazônia deve necessariamente fazer parte de uma agenda futura. Finalmente, novas tecnologias de baixo custo, como os nanossatélites, provaram ser viáveis, mantendo os requisitos científicos, e devem continuar a ser incentivados em futuras missões (Peral et al., 2019).

Os modelos SR podem estimar razoavelmente as taxas médias de *ET* na bacia Amazônica, mas representar corretamente a sazonalidade de *ET* ainda é um desafio, bem como compreender as diferenças entre os componentes individuais da *ET* como evaporação do solo, transpiração e interceptação vegetal. Mais estudos são necessários para separar os controles de *ET* através da bacia (limitação de água e energia, e fenologia da vegetação), uma vez que múltiplos fatores operam simultaneamente (Maeda et al., 2017). Além disso, uma grande lacuna de conhecimento é a diferença entre *ET* em terras altas e úmidas da Amazônia, e o efeito da evaporação das águas abertas sobre o clima regional. Os modelos atuais baseados em satélite precisam minimizar o uso da parametrização (ou melhor, restringi-la), enquanto a acurácia dos dados de entrada deve ser melhorada. Uma grande limitação dos modelos SEB é sua exigência de condições de céu limpo, que podem ser melhoradas com o uso de dados de micro-ondas (Holmes et al., 2018) e a combinação com outros tipos de modelos de *ET* como aqueles baseados em índices de vegetação. As medições *in situ* são fundamentais para alcançar esse objetivo, mas hoje existem apenas oito torres de fluxo com dados disponíveis publicamente na bacia Amazônica. Para modelos baseados em índices de vegetação (por exemplo, MOD16, GLEAM), também é necessário melhorar o entendimento do controle do déficit hídrico do solo com a *ET* em toda a bacia, dada a alta dependência desses produtos ao teor de umidade do solo.

Algumas missões em andamento e futuras proporcionarão uma nova compreensão da dinâmica da *ET* na bacia Amazônica. O ECOSTRESS aborda a resposta da vegetação ao déficit de água com detalhes sem precedentes, enquanto o VIIRS coleta imagens visíveis e infravermelhas, estendendo a série temporal de seu predecessor MODIS e melhorando suas estimativas. A missão FLEX irá mapear a fluorescência da vegetação, um *proxy* da atividade fotossintética e do estresse e saúde da vegetação. A continuidade das missões Landsat garantirá o desenvolvimento de *ET* a longo prazo em alta escala espacial, enquanto a missão GRACE-FO fornecerá novos dados para abordagens de balanço hídrico para estimar a *ET*. Isso nos permitirá finalmente modelar a *ET* em alta resolução espacial (< 30 metros) e por longos períodos (> 40 anos).

O mapeamento de corpos de água superficiais e ecossistemas aquáticos da Amazônia ainda é um desafio para as atuais observações de SR disponíveis. Apesar do progresso substancial nas últimas décadas, ainda há limitações. Atualmente, há um *trade-off* na bacia Amazônica entre resoluções espaciais e temporais em observações por satélite, geralmente com alta amostragem temporal associada a uma menor resolução espacial e vice-versa. Portanto, é necessária uma resolução espaço-temporal mais fina para monitorar adequadamente a extensão, nível e declividade das águas superficiais e inundação de áreas úmidas. Há também a necessidade de melhorar a acurácia dessas estimativas para compreender mais fenômenos locais, tais como as trocas e dinâmicas entre rio e planícies ou os complexos processos de inundação de extensas áreas interfluviais. Da mesma forma, apenas alguns lagos e reservatórios na Amazônia são monitorados rotineiramente a partir do espaço, usando altimetria. Com a vegetação densa e a cobertura de nuvens, o contexto da bacia Amazônica ainda torna difícil monitorar águas superficiais como florestas permanentes ou sazonalmente inundadas e plantas herbáceas flutuantes.

A futura missão SAR de banda L da NASA/ISRO, com sua combinação de comprimentos de onda de radar e polarizações e passagens orbitais de 12 dias, ajudará a medir com precisão pequenas mudanças de extensão de águas superficiais na bacia Amazônica, incluindo áreas com floresta. Além disso, com sua tecnologia baseada na altimetria do tipo *swath* (bandas largas) do KaRIn, cobertura quase global e observação conjunta da elevação da superfície da água, extensão, largura do rio e declividade, a missão SWOT, a ser lançada no final de 2022, permitirá um monitoramento sem precedentes das águas superficiais da Amazônia e dos rios com resolução de 100 m. A precisão centimétrica do nível da água e declividade (Desai,

2018) ajudará a caracterizar melhor os fluxos de água doce na bacia Amazônica. As atuais missões de altimetria por satélite, especialmente do programa Copernicus, estão marcando a era do monitoramento operacional do espaço em larga escala para as próximas décadas, com claros benefícios para grandes bacias transfronteiriças tropicais, como a bacia Amazônica. Com quase duas mil estações virtuais distribuídas pela bacia, potencialmente centenas mais, disponíveis gratuitamente em vários locais, a altimetria convencional por satélite pode complementar favoravelmente a tradicional e necessária rede *in situ*. Como a principal limitação para o uso mais amplo da altimetria de satélite atual continua sendo sua amostragem temporal relativamente baixa, futuras missões em desenvolvimento, como SMASH (Blumstein et al., 2019), lançado juntamente com a constelação atual, deve ajudar a resolver esse problema. No entanto, mais desenvolvimentos em observações por satélite são necessários para caracterizar completamente a extensão e elevação da superfície das águas da Amazônia. Eles devem combinar, no futuro, os benefícios das medições globais SWOT com uma alta amostragem temporal de constelações do tipo SMASH em uma constelação de satélites do tipo SWOT, fornecendo observações globais e diárias.

Além dos conceitos inovadores envolvidos nestas novas missões de observação da Terra, vale a pena notar que esta disponibilidade sem precedentes de informações sobre a extensão e elevação da superfície da água da Amazônia desafiará as atuais capacidades de análise. Novos desenvolvimentos de ferramentas de análise ou técnicas de fusão com inteligência artificial para combinar várias observações de SR (visível, IV, MW, GNSS-R) serão necessários. Da mesma forma, novas técnicas de fusão com modelagem local para regional e assimilação de dados também devem aumentar drasticamente nossa capacidade de modelar a bacia Amazônica e as variações de seu ciclo hidrológico.

A topografia e batimetria da planície de inundação e do canal fluvial ainda não foram totalmente caracterizadas na bacia Amazônica, apesar dos esforços recentes com estimativas locais e regionais, impedindo um melhor entendimento dos habitats relacionados ao pulso de inundação e limitando a precisão dos modelos hidráulicos. Além disso, a associação entre a concentração de sedimentos nos rios e a migração dos canais ainda é pouco compreendida (Constantine et al., 2014). É necessário o desenvolvimento de novas técnicas e dados de SR para mapeamento topográfico. O principal desafio é a remoção da vegetação, pois muitas bandas e sensores não conseguem penetrar na vegetação. Dados LiDAR e altimétricos, como o ICESat-2

(lançado em 2018), que permitem o mapeamento do terreno abaixo do dossel, ainda têm sido pouco explorados na bacia Amazônica para essa tarefa.

Os dados de interferometria e altimetria foram utilizados na bacia do Congo para estimar a topografia da planície de inundação (Yuan et al., 2019), apesar de não ser capaz de fornecer a topografia em toda a área. Além disso, os satélites NISAR e SWOT abrirão oportunidades com estimativas mais precisas da extensão de água superficial e da distribuição de NA sobre os corpos de água. Assim, novas metodologias para mapeamentos topográficos, tais como o método da linha da água (Salameh et al., 2019) e o Flood2Topo (Fassoni-Andrade et al., 2020a), podem ser aplicados. Entretanto, a observação da batimetria de rios e planícies de inundação a partir do espaço continuará sendo um desafio contínuo, uma vez que ainda faltam soluções adequadas para sua medição direta, mesmo que futuras observações altimétricas pareçam abrir um novo caminho para o futuro.

Os rios de água branca, preta e clara da bacia Amazônica têm características particulares com grandes variações dos COAs (sedimentos, clorofila e CDOM). Apesar do desenvolvimento de muitos algoritmos para estimar esses componentes, poucos têm sido utilizados para de fato responder questões científicas, como Topp et al. (2020) relataram em todo o mundo. Além disso, a caracterização de processos naturais, como a variação espaço-temporal do fitoplâncton em lagos, não foi amplamente explorada. As estimativas de concentração de sedimentos poderiam ser melhor exploradas para avaliar os efeitos de barragens, mineração e mudanças no uso da terra na bacia Amazônica. Por outro lado, ainda existem desafios técnicos para essas estimativas usando dados de SR, como a alta cobertura de nuvens na bacia. O principal desafio é a discretização dos espectros dos COAs, que pode ser parcialmente superado com novos sensores com alta resolução radiométrica e espectral.

O recente lançamento da missão GRACE *Follow-on* oferece uma oportunidade de estender o monitoramento das mudanças de TWS e GWS por mais de duas décadas, nos permitindo analisar o impacto de eventos climáticos plurianuais, como o ENSO, na terra e no armazenamento de águas subterrâneas em todo a bacia Amazônica. As principais desvantagens desses dados continuam sendo suas baixas resoluções espaciais e temporais (200-300 km e 1 mês), que não são suficientes para estudar a dinâmica de eventos hidrológicos mais locais e rápidos. Para superar essas desvantagens, os sensores a bordo da missão GRACE *Follow-on* contém

versões avançadas dos sensores usados na missão GRACE, permitindo uma melhor precisão, aperfeiçoando a qualidade e a resolução espacial do TWSA estimado. A combinação de novas abordagens metodológicas baseadas em filtro de Kalman deve aumentar a resolução temporal do TWSA para quase diária, sem degradar a resolução espacial (Ramillien et al., 2020, 2015). Com a futura disponibilidade de observações SWOT, estimativas sem precedentes e mais finas de armazenamento de água superficial em grandes áreas irão melhorar a determinação de anomalias GWS. Elas nos permitirão compreender melhor as interações entre a dinâmica das cheias e a recarga de aquíferos na bacia Amazônica. A troca de águas subterrâneas na bacia, que permanece pouco caracterizada com os satélites, também deve se beneficiar da integração dessas novas observações e poderia ser mais bem estimada para melhor restringir o balanço hídrico na superfície. Um conjunto abrangente de observações dedicadas à hidrologia, com a continuidade das missões atuais dos satélites, é obrigatório para melhorar nossa compreensão dos padrões de hidrologia por meio de análises mais precisas do balanço hídrico e para avaliar as tendências de longo prazo.

Dadas as incertezas tanto nos modelos hidrológicos quanto nas estimativas de SR, as técnicas de calibração de modelos e assimilação de dados foram recentemente desenvolvidas incorporando principalmente dados de nível da água (altimetria por satélite) e, em menor grau, TWS da missão GRACE. Outras variáveis a serem melhor assimiladas são a extensão e armazenamento de águas superficiais, a umidade do solo e a evapotranspiração. Enquanto a maioria das aplicações de modelos hidrológicos e hidráulicos tem sido usada para estimar variáveis como *ET*, armazenamento da água do solo, vazão, nível da água e extensão da água superficial, novos estudos devem investigar outras variáveis, como velocidade do de água e armazenamento de águas superficiais. Há também uma falta de convergência entre as partições de armazenamento total de água (por exemplo, estimativas divergentes da fração de água superficial), que deve ser abordada por meio de modelos mais restritivos com dados de satélites e mediante a realização de projetos de intercomparação de modelos. Por outro lado, enquanto as áreas úmidas da Amazônia foram estudadas principalmente para as planícies de inundação da Amazônia central, outros tipos de áreas úmidas existem, como as interflúvias em grandes áreas dos Llanos de Moxos, Pacaya-Samiria, e bacia do rio Negro. Elas merecem mais esforços da comunidade de hidrologia, especialmente considerando sua dinâmica particular de inundação, mais dependente das chuvas locais.



Além disso, a modelagem bidimensional de alta resolução dos campos de velocidade de água em toda a Amazônia e as complexas interações entre rios e planícies de inundação ainda não foram exploradas. As porções mais de jusante da bacia Amazônica permanecem relativamente inexplorada em termos de modelagem hidrodinâmica e de SR, por exemplo, os papéis relativos da forçante hidrológica a montante e a influência oceânica na dinâmica do *continuum* rio-estuário-oceano. Além de uma melhor representação dos processos hidrológicos, ou seja, a dinâmica das águas subterrâneas mal representada nos modelos orientados para hidrologia de superfície, o futuro dos modelos hidrológico-hidrodinâmicos depende da crescente disponibilidade de novas bases de dados de observação da Terra por satélites. Esses dados incluem níveis e vazões derivadas de SWOT, larguras de água de canal, topografia de planície de inundação, umidade do solo (por exemplo, SMOS, SMAP), precipitação (por exemplo, SM2RAIN), gravimetria (GRACE *Follow-On*), e técnicas para estimativa de armazenamento de águas subterrâneas (por exemplo Frappart et al., 2019). Eles promoverão a base para estimativas de modelagem em alta resolução temporal e espacial, visando, em última instância, a fornecer estimativas hidrológicas localmente relevantes em todos os ambientes (Bierkens et al., 2015; Wood et al., 2011).

Embora a maioria dos principais componentes do ciclo da água tenha sido relativamente bem abordada na literatura científica, como mostrado nessa revisão, a umidade do solo destaca-se como o componente com menos confiança nas estimativas. Essa baixa confiabilidade está relacionada à dificuldade de estimar esta variável sob áreas densamente cobertas por vegetação (Prigent et al., 2005). O desempenho relativamente ruim dos atuais conjuntos de dados de umidade do solo (por exemplo, SMAP, AMSR-E e SMOS) nesses ambientes é bem conhecido, mesmo quando os produtos são combinados (Liu et al., 2011) ou mesclados (Aires et al., 2005; Kolassa et al., 2016). A maioria dos estudos sobre umidade do solo foi realizada com modelos hidrológicos e dados *in situ* em algumas áreas de cabeceiras. Além disso, há uma ambiguidade inerente nas observações por micro-ondas passivo entre os solos saturados de água e as águas superficiais. Consequentemente, a grande extensão de água superficial na bacia Amazônica afeta a estimativa da umidade do solo por meio desse tipo de observação. Essa ambiguidade nas observações por satélite levou ao desenvolvimento do *SMOS-based surface water product* (Parrens et al., 2017). Há uma necessidade urgente de melhor monitorar a umidade do solo em diferentes resoluções espaço-temporais na bacia Amazônica, especialmente considerando seu papel principal no controle da dinâmica e fenologia da floresta Amazônica, da *ET*

e do ciclo da água em geral. Essa observação apoia o desenvolvimento do SMOS-HR, a missão com alta resolução espacial que sucederá o satélite SMOS, que está atualmente em estudo de viabilidade pela Agência Espacial Francesa (CNES) e cujo objetivo é assegurar a continuidade das medições da banda L enquanto aumenta a resolução espacial para ~10 km, sem degradar a sensibilidade radiométrica e mantendo inalterado o tempo de revisita de 3 dias.

Da mesma forma, a vazão dos rios, historicamente uma das primeiras variáveis hidrológicas que foram observadas *in situ*, ainda não é medida adequadamente a partir do espaço. Esta revisão enfatiza a necessidade de estimar com precisão a vazão usando o SR na Amazônia com fina resolução espacial e temporal. As vazões dos rios já foram estimadas indiretamente com dados de SR (e.g., Brakenridge et al., 2007; LeFavour e Alsdorf, 2005; Tarpanelli et al., 2013; Zakharova et al., 2006), mas ainda é incapaz de complementar satisfatoriamente a atual rede *in situ* da bacia Amazônica. Futuras missões, como SWOT, em combinação com as atuais missões, em breve nos ajudarão a avançar em direção a um monitoramento mais abrangente das vazões ao longo da bacia Amazônica.

As alterações ambientais na bacia Amazônica, tanto as atuais quanto as futuras, exigem a compreensão da hidrologia da bacia sob a perspectiva de um sistema em mudança. Os efeitos a longo prazo dos múltiplos impactos humanos (mudanças no uso da terra, mudanças climáticas, represas, mineração, queimadas) sobre a Amazônia devem ser mais compreendidos. As mudanças na interação terra-atmosfera devido ao desmatamento afetarão o ciclo da água na Amazônia, mas a magnitude dessa mudança ainda está em debate. Há relativamente pouca compreensão de como elas interagem, especialmente em termos de como o impacto das mudanças no uso da terra no clima local pode ser diferente sob condições meteorológicas em larga escala, que estão mudando com o clima global (por exemplo, Leite-Filho et al., 2020), e como isso afetaria os ecossistemas terrestres e aquáticos da bacia. Além disso, as técnicas para mapear a degradação da floresta e discernir as vegetações primária e secundária ainda são relativamente novas. Os impactos dessas mudanças mais sutis, mas generalizadas no uso da terra, na hidrologia amazônica ainda não são bem compreendidos. Finalmente, embora a influência da Floresta Amazônica sobre o clima e os recursos hídricos fora da Amazônia tenha sido cada vez mais documentada, as consequências de seu desmatamento e degradação fora da bacia ainda não foram compreendidas.

Além disso, a proliferação de barragens em bacias tropicais como a Amazônica, a do Congo e a do Mekong requerem ferramentas de planejamento e análise em escala de bacia para promover benefícios mútuos na compreensão dessas mudanças (por exemplo, Biswas et al., 2021; Latrubesse et al., 2017; Schmitt et al., 2019; Winemiller et al., 2016). Dados de SR se destacam como poderosas ferramentas para monitorar os impactos em larga escala dos reservatórios existentes construídos pelo homem (por exemplo, Resende et al., 2019), e inferir suas características, tais como o nível da água e as relações entre cota-área-volume (Fassoni-Andrade et al., 2020a; Gao et al., 2012; Hoek et al., 2019). Melhores dados e conhecimento desses impactos também são a base para melhores modelos hidrogeomorfológicos, que poderiam quantificar os impactos esperados dos reservatórios planejados e, portanto, ajudar na criação de projetos que minimizassem os impactos ambientais.



134

**Como usar os avanços científicos baseados em SR para *promover a gestão eficiente dos recursos hídricos na bacia Amazônica?***

Enquanto a bacia Amazônica tem servido como um importante laboratório natural para o desenvolvimento do SR, produzindo avanços científicos significativos relacionados aos seus processos hidrológicos nas últimas décadas (Tabela 7 e Tabela 8), a Amazônia está atualmente sofrendo intensas pressões antropogênicas (capítulo 12). Isto exige, urgentemente, um melhor planejamento dos recursos hídricos em escala de bacia e novas ferramentas de monitoramento ambiental. O SR tem o potencial de democratizar informações essenciais para os tomadores de decisão, por exemplo, para monitorar regiões desprovidas de dados *in situ*, onde as informações não estão disponíveis publicamente (Gleason e Durand, 2020). Embora o SR seja agora uma realidade e o conhecimento documentado sobre a bacia Amazônica seja muito melhor do que décadas atrás, ainda há um longo caminho a ser percorrido, levando esses avanços em direção a aplicações eficazes para as tomadas de decisão e gestão de recursos hídricos.

O desmatamento e o monitoramento de incêndios podem ser os exemplos mais avançados e promissores no contexto da gestão ambiental da Amazônia. Desde 1988, os sistemas de monitoramento por satélite usando imagens MODIS, Landsat e CBERS como o DETER (Diniz et al., 2015, <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/deter/>), PRODES (<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>), Imazon (<https://imazon.org.br/categorias/boletim-do-desmatamento/>) e Queimadas (<http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal>) têm apoiado sistematicamente os governos locais e múltiplas organizações no monitoramento e controle do desmatamento e dos incêndios. Os avanços técnicos tornaram possível monitorar o desmatamento em tempo quase real, na escala de dias, semanas ou meses. Entretanto, o fortalecimento institucional e o engajamento da sociedade civil ainda são necessários para promover ações efetivas dentro de estruturas governamentais complexas e fazer a ponte entre tecnologia e política para a redução do desmatamento (Finer et al., 2018).

Os países da Amazônia possuem agências de recursos hídricos, geologia e serviços hidrometeorológicos consolidados como a ANA, os Serviços Nacionais de Meteorologia e Hidrologia do Peru e da Bolívia (SENAMHIs), e o Serviço Geológico Brasileiro (CPRM). Essas instituições têm dedicado esforços à desafiadora tarefa de monitorar sistematicamente o vasto território e os rios da Amazônia, bem como incentivar o livre acesso a dados hidrológicos. Neste sentido, o SR está começando a ser incorporado ao monitoramento operacional (por exemplo, SIPAM <http://hidro.sipam.gov.br/>, Hidrosat, Carvalho et al., 2015; simulações de inundações quase em

tempo real em escala subdiária, Llauca et al., 2021). Em particular, a precipitação tem sido amplamente monitorada por meio do uso de dados de SR por várias agências meteorológicas, enquanto outras variáveis do ciclo da água têm recebido menos atenção. Essas organizações têm desenvolvido relatórios técnicos sobre a situação nacional e planejamento de recursos hídricos, incluindo a bacia Amazônica (por exemplo, Relatório da Situação dos Recursos Hídricos, Agência Nacional de Águas, 2019a; Plano Nacional de Segurança da Água, Agência Nacional de Águas, 2019b; previsões de fluxo em nível nacional e em escala horária e diária pelo SENAMHI Peru, disponível em: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-caudales>). Atualmente, estas instituições são apoiadas principalmente pelas redes hidrometeorológicas nacionais que ainda são escassas e poderiam ser muito melhoradas com os dados e conhecimentos produzidos pelo SR. Alguns destes países também possuem leis e regulamentações avançadas sobre recursos hídricos, como a Política Nacional de Recursos Hídricos do Brasil, criada pela Lei 9433/1997 (Brasil, 1997), mas a maioria dos esforços no desenvolvimento e implementação de tal regulamentação é dedicada a bacias hidrográficas em regiões mais densamente povoadas e não no contexto da complexidade da maior bacia hidrográfica do mundo, com seu contexto internacional e transfronteiriço. Além disso, ainda que a bacia Amazônica esteja no epicentro da discussão científica internacional, parece não ser o foco principal dos desenvolvimentos técnicos e científicos no campo dos recursos hídricos nos países amazônicos, como revela a recente síntese dos avanços da comunidade hidrológica brasileira (Paiva, 2020).

A maioria dos estudos sobre inundações na Amazônia tem visado compreender os serviços ecossistêmicos e o sistema natural (capítulos 5 e 10). Ainda assim, muitos centros urbanos amazônicos estão sob risco de inundação (por exemplo, rio Amazonas em Iquitos, rio Madeira em Porto Velho, rio Acre em Rio Branco, rio Juruá em Cruzeiro do Sul), e sofrem anualmente com o transbordamento de rios (Fleischmann et al., 2020). Enquanto esse documento estava sendo redigido, o estado brasileiro do Acre estava se recuperando de uma crise humanitária causada pelas inundações no rio Acre em Rio Branco, no rio Juruá em Cruzeiro do Sul, e no rio Negro em Manaus, reforçada pela pandemia da COVID-19. Assim, as diversas ferramentas de monitoramento de inundação desenvolvidas poderiam ser traduzidas em um mapeamento eficaz de risco de inundação e monitoramento em tempo real para o gerenciamento de desastres. Iniciativas internacionais como o *Copernicus Emergency Management Service* (<https://emergency.copernicus.eu/>) e a iniciativa *International Charter "Space and Major Disasters"* (<https://disasterscharter.org/>) têm o

potencial de fornecer importantes dados de observação da Terra por satélite para o gerenciamento de desastres em tempo real. Além disso, o caráter transfronteiriço de muitas sub-bacias amazônicas (por exemplo, o rio Madeira, com inundações em Porto Velho no Brasil sendo parcialmente geradas em trechos a montante da Bolívia), faz dos dados de observação da Terra por satélite uma ferramenta fundamental para preencher a disparidade na disponibilidade de dados entre os países. Por outro lado, em muitas áreas da Amazônia, as secas têm um impacto social maior do que as inundações, dada a interrupção do fornecimento de mercadorias e do transporte em geral através dos rios durante períodos extremamente secos (Zeng et al., 2008). Esforços técnicos recentes incluem a avaliação de previsões hidrológicas a partir de modelos hidrológicos de base física apoiados pelo SR, desenvolvimento de previsões estatísticas específicas e sistemas de monitoramento em tempo real (por exemplo, sistema SACE/CPRM de <http://www.cprm.gov.br/sace/>; sistemas disponíveis para o Madeira, Acre, Xingu, Branco e alguns trechos do rio Amazonas), protótipos de sistemas de monitoramento baseados em modelos hidrológicos (por exemplo, *South America River Discharge Monitor - SARDIM* <https://sardim.herokuapp.com/>; Reis et al., 2020), sistemas globais de previsão de inundações (por exemplo, GLOFAS, Alfieri et al., 2013) e esforços de monitoramento e alertas de perigos naturais por centros como o CEMADEN (Centro Nacional de Alerta e Monitoramento de Desastres Naturais) do Brasil. Sistemas de monitoramento de secas baseados em observações *in situ* e SR, com apoio da comunidade local (por exemplo, ANA Monitor de Secas <http://monitordesecas.ana.gov.br/>), estão evoluindo, mas ainda não há sistemas operacionais de previsão hidrológica na bacia Amazônica, em escala nacional ou continental (Fan et al., 2016).

Os impactos das atividades humanas podem se propagar através dos rios amazônicos ao longo dos múltiplos países que compõem a bacia, uma vez que o desenvolvimento contínuo de projetos hidrelétricos e a expansão agrícola alteram as dinâmicas hidrológica, sedimentar e ecossistêmica (Anderson de Castro et al., 2018; Forsberg et al., 2017). Pesquisas recentes exploraram o planejamento integrado em busca de melhores soluções para a expansão da energia hidrelétrica (Almeida et al., 2020; Winemiller et al., 2016), enquanto organizações como a Organização do Tratado de Cooperação Amazônica (OTCA) visam a promover o desenvolvimento sustentável na bacia Amazônica com a participação de todos os países amazônicos. Entretanto, as políticas e regulamentações atuais em escala nacional não promovem um planejamento de recursos hídricos totalmente integrado, uma vez que novos projetos são geralmente avaliados individualmente. O uso do SR pode incentivar a

busca a um entendimento comum e transparente das questões relacionadas à água na Amazônia.

A comunidade científica de SR tem agora o desafio de promover o conhecimento, os conjuntos de dados e aplicações sobre mudanças hídricas e ambientais, visando a uma melhor gestão e planejamento dos recursos hídricos. Os caminhos em potencial incluem: (i) treinamento de tomadores de decisão e múltiplos interessados na linguagem de SR (por exemplo, Programa de Treinamento de Sensoriamento Remoto Aplicado - ARSET <https://appliedsciences.nasa.gov/what-we-do/capacity-building/arset/>); (ii) incentivo ao engajamento local, fazendo a ponte entre a ciência baseada em SR e o conhecimento in situ e tradicional (Runde et al., 2020); (iii) iniciativas de divulgação científica e ciência cidadã (Buytaert et al., 2014; por exemplo [www.amazoniacienciaciudadana.org/](http://www.amazoniacienciaciudadana.org/), <https://conexoesamazonicas.org/>, <https://ipam.org.br/biblioteca/?biblioteca=artigos-cientificos>, <https://amazon.org.br/categorias/outros/>, <https://infoamazonia.org/>) (iv) desenvolvimento de conjuntos de dados de acesso aberto com foco em aplicações específicas (por exemplo, conservação de ecossistemas aquáticos, Venticinque et al., 2016); (v) desenvolvimento de sistemas de monitoramento com foco em mudanças ambientais e desastres relacionados à água; (vi) desenvolvimento de repositórios hidrológicos de livre acesso (por exemplo, HYBAM, <https://hybam.obs-mip.fr/>, SERVIR-Amazônia, <https://servir.ciat.cgiar.org/>); (vii) desenvolvimento de uma agenda de pesquisa em escala de bacia com foco no apoio direto às tomadas de decisão sobre recursos hídricos (por exemplo, cenários de expansão hidrelétrica; Almeida et al., 2020).





# 135 **Recomendações**

Com base nas lacunas de conhecimento e nas perspectivas apresentadas nas seções anteriores, apresentamos as seguintes recomendações para futuros estudos sobre a hidrologia da Amazônia a partir do espaço.

## Recomendação 1:

# Observações

As limitações atuais de dados de satélite para a bacia Amazônica estão frequentemente relacionadas à resolução espaço-temporal (por exemplo, para variáveis como nível e declividade da água, extensão de água superficial, *ET*), ao intervalo de tempo (por exemplo, extensão de águas superficiais, *TWS*, *GWS*, *ET*, topografia), e à acurácia (por exemplo, extensão de águas superficiais, *GWSA*). As maiores limitações no monitoramento da hidrologia da Amazônia a partir do espaço referem-se à umidade do solo e à vazão de rios, que têm sido pouco abordadas devido à interferência da vegetação nos sensores ou pela natureza da variável, respectivamente, o que dificulta suas estimativas com SR. Da mesma forma, a batimetria de canais de rios e planícies de inundação fornece grandes desafios, que podem ser resolvidos com a assimilação de dados de altimetria em modelos matemáticos. A crescente disponibilidade de bases de dados de SR de longo prazo deve ser assegurada pelas agências espaciais nacionais e agências de água, em complemento às redes de monitoramento *in situ* existentes, que são fundamentais também para calibrar e validar corretamente as estimativas de SR. O tempo de latência da distribuição de dados de SR (por exemplo, precipitação e nível da água) deveria ser reduzido para algumas horas para ser usado pelo gerenciamento de desastres em tempo real. Garantir que as observações por satélite sejam arquivadas em bases de dados climáticos pode promover a compreensão dos impactos das mudanças climáticas e das atividades humanas na bacia.



## Recomendação 2:

# Modelos, algoritmos e integração

As limitações técnicas estão relacionadas ao desenvolvimento de algoritmos (por exemplo, para estimativa de chuvas orográficas, CDOM e clorofila, fechamento de balanço hídrico, modelos hidrodinâmicos) e fusão de dados (por exemplo, *ET*, nível e extensão de águas superficiais). O reconhecimento de incertezas em múltiplos dados de SR e o custo-benefício entre resolução temporal e espacial apontam para a necessidade de abordagens mais integrativas, por exemplo, para mapear padrões de inundação e evapotranspiração de longo prazo em altas resoluções espaço-temporais - a inteligência artificial desempenhará um papel importante nisso. O melhor acoplamento das bases de dados de observações da Terra com modelos hidrológico-hidráulicos e modelos de superfície terrestre (por exemplo, assimilação de dados, interpolação espaço-temporal) também é um passo necessário na modelagem do Sistema Terrestre, considerando o aspecto dinâmico da hidrologia amazônica.



## Recomendação 3:

# Caracterização de processos hidrológicos em uma Amazônia sob mudança

O desenvolvimento de bases de dados de longo prazo tem sido fundamental para compreender os processos hidrológicos da Amazônia no decorrer de várias décadas. Enquanto os dados de SR atualmente se concentram em um conjunto de poucas variáveis hidrológicas, existem muitas outras que requerem mais atenção da comunidade de hidrologia, como vazão de rios e velocidade da água, armazenamento de águas superficiais e subterrâneas, umidade do solo, CDOM e Clorofila-a. A maioria dos estudos na bacia Amazônica também se concentra em algumas áreas (por exemplo, os ambientes de várzea das planícies de inundação da Amazônia central), e muitos outros sistemas complexos fluviais, de áreas úmidas e mesmo de igarapés e pequenos rios, especialmente na região andina, também requerem atenção. As futuras observações por satélite trarão novas oportunidades para a bacia Amazônica com relação à caracterização dos processos naturais, incluindo fitoplâncton nas águas, topografia das planícies de inundação, ecossistemas aquáticos, dinâmica das águas subterrâneas e o monitoramento das mudanças ambientais antropogênicas.

## Recomendação 4:

# Utilizando SR para promover o desenvolvimento sustentável da bacia Amazônica

A bacia Amazônica abriga uma biodiversidade incrivelmente grande e ainda pouco conhecida, que fornece serviços ecossistêmicos fundamentais para o globo e alguns dos sistemas fluviais e de áreas úmidas mais complexos e intrigantes do mundo. Enquanto as observações da Terra por satélite proporcionaram avanços científicos revolucionários para a compreensão do ciclo da água da Amazônia nas últimas décadas, os próximos anos com as novas missões orientadas à hidrologia proporcionarão um novo marco no monitoramento das águas da Amazônia a partir do espaço. O conhecimento avançado do SR deve ser traduzido em informações e indicadores valiosos para apoiar a governança ambiental e a ciência sustentável na bacia Amazônica. O SR tem o potencial de democratizar informações essenciais para os tomadores de decisão, caminhando para um futuro mais sustentável para a maior bacia do mundo.





# Referências

Abe, C.A., Lobo, F.L., Novo, E.M.L. de M., Costa, M., Dibike, Y., 2019. Modeling the effects of land cover change on sediment concentrations in a gold-mined Amazonian basin. *Reg. Environ. Chang.* 19, 1801–1813. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01513-8>

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, 395–398. <https://doi.org/10.1038/nature12797>

Acetuno, P., 1988. On the Functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector. Part I: Surface Climate. *Mon. Weather Rev.* 116, 505–524. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116<0505:OTFOTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<0505:OTFOTS>2.0.CO;2)

Adderio, L.P.D., Puca, S., Vulpiani, G., Petracca, M., San, P., Dietrich, S., 2020. RAINBOW : An Operational Oriented Combined IR-Algorithm 1–21.

Adler, R.F., Huffman, G.J., Keehn, P.R., 1994. Global tropical rain estimates from microwave-adjusted geosynchronous IR data. *Remote Sens. Rev.* <https://doi.org/10.1080/02757259409532262>

Ahmed, J., Constantine, J.A., Dunne, T., 2019. The role of sediment supply in the adjustment of channel sinuosity across the Amazon Basin. *Geology* 47, 807–810. <https://doi.org/10.1130/G46319.1>

Aires, F., 2014. Combining Datasets of Satellite-Retrieved Products. Part I: Methodology and Water Budget Closure. *J. Hydrometeorol.* 15, 1677–1691. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0148.1>

Aires, F., Miolane, L., Prigent, C., Pham, B., Fluet-Chouinard, E., Lehner, B., Papa, F., 2017. A global dynamic long-term inundation extent dataset at high spatial resolution derived through downscaling of satellite observations. *J. Hydrometeorol.* 18, 1305–1325. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0155.1>

Aires, F., Papa, F., Prigent, C., 2013. A long-term, high-resolution wetland dataset over the amazon basin, downscaled from a multiwavelength retrieval using SAR data. *J. Hydrometeorol.* 14, 594–607. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-093.1>

Aires, F., Prigent, C., Fluet-Chouinard, E., Yamazaki, D., Papa, F., Lehner, B., 2018. Comparison of visible and multi-satellite global inundation datasets at high-spatial resolution. *Remote Sens. Environ.* 216, 427–441. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.015>

Aires, F., Prigent, C., Rossow, W.B., 2005. Sensitivity of satellite microwave and infrared observations to soil moisture at a global scale: 2. Global statistical relationships. *J. Geophys. Res. Atmos.* 110. <https://doi.org/10.1029/2004JD005094>

Alcântara, E., Barbosa, C., Stech, J., Novo, E., Shimabukuro, Y., 2009. Improving the spectral unmixing algorithm to map water turbidity Distributions. *Environ. Model. Softw.* 24, 1051–1061. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.02.013>

Alfieri, L., Burek, P., Dutra, E., Krzeminski, B., Muraro, D., Thielen, J., Pappenberger, F., 2013. GloFAS - global ensemble streamflow forecasting and flood early warning. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 1161–1175. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1161-2013>

Alkama, R., Decharme, B., Douville, H., Becker, M., Cazenave, A., Sheffield, J., Voldoire, A., Tyteca, S., Le Moigne, P., 2010. Global evaluation of the ISBA-TRIP continental hydrological system. Part I: Comparison to GRACE terrestrial water storage estimates and in situ river discharges. *J. Hydrometeorol.* <https://doi.org/10.1175/2010JHM1211.1>

Allen, G.H., Pavelsky, T., 2018. Global extent of rivers and streams. *Science (80-.)*. 361, 585–588. <https://doi.org/10.1126/science.aat063>

Allen, R.G., Irmak, A., Trezza, R., Hendrickx, J.M.H., Bastiaanssen, W., Kjaersgaard, J., 2011. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrol. Process.* 25, 4011–4027. <https://doi.org/10.1002/hyp.8408>

Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133, 380–394. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:4(380))

Almeida, R.M., Hamilton, S.K., Rosi, E.J., Barros, N., Doria, C.R.C., Flecker, A.S., Fleischmann, A.S., Reisinger, A.J., Roland, F., 2020. Hydropeaking Operations of Two Run-of-River Mega-Dams Alter Downstream Hydrology of the Largest Amazon Tributary. *Front. Environ. Sci.* 8, 120. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00120>

Almeida, R.M., Tranvik, L., Huszar, V.L.M., Sobek, S., Mendonça, R., Barros, N., Boemer, G., Arantes, J.D., Roland, F., 2015. Phosphorus transport by the largest Amazon tributary (Madeira River, Brazil)

and its sensitivity to precipitation and damming. *Inl. Waters* 5, 275–282. <https://doi.org/10.5268/IW-5.3.815>

Alsdorf, D., 2003. Water Storage of the Central Amazon Floodplain Measured with GIS and Remote Sensing Imagery. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 93, 55–66. <https://doi.org/10.1111/1467-8306.93105>

Alsdorf, D., Bates, P., Melack, J., Wilson, M., Dunne, T., 2007. Spatial and temporal complexity of the Amazon flood measured from space. *Geophys. Res. Lett.* 34, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2007GL029447>  
Alsdorf, D., Beighley, E., Laraque, A., Lee, H., Tshimanga, R., O'Loughlin, F., Mahé, G., Dinga, B., Moukandi, G., Spencer, R.G.M., 2016. Opportunities for hydrologic research in the Congo Basin. *Rev. Geophys.* 54, 378–409. <https://doi.org/10.1002/2016RG000517>

Alsdorf, D., Birkett, C., Dunne, T., Melack, J., Hess, L., 2001a. Water level changes in a large Amazon lake measured with spaceborne radar interferometry and altimetry. *Geophys. Res. Lett.* 28, 2671–2674. <https://doi.org/10.1029/2001GL012962>

Alsdorf, D., Dunne, T., Melack, J., Smith, L., Hess, L., 2005. Diffusion modeling of recessional flow on central Amazonian floodplains. *Geophys. Res. Lett.* 32, 1–4. <https://doi.org/10.1029/2005GL024412>

Alsdorf, D., Han, S.C., Bates, P., Melack, J., 2010. Seasonal water storage on the Amazon floodplain measured from satellites. *Remote Sens. Environ.* 114, 2448–2456. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.020>

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, 174–177. <https://doi.org/10.1038/35004560>

Alsdorf, D., Smith, L.C., Melack, J.M., 2001b. Amazon floodplain water level changes measured with interferometric SIR-C radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39, 423–431. <https://doi.org/10.1109/36.905250>

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. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 125. <https://doi.org/10.1029/2019JG005293>

Anderson, A.B., May, P.H., Balick, M.J., 1991. The subsidy from nature: palm forests, peasantry, and development on an Amazon frontier, in: *The subsidy from nature: palm forests, peasantry, and development on an Amazon frontier*. Columbia University Press. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(92\)90157-7](https://doi.org/10.1016/0169-5347(92)90157-7)

Anderson de Castro, A., Cuartas, L.A., Coe, M.T., Von Randow, C., Castanho, A., Ovando, A., Nobre, A.D., Koumrouyan, A., Sampaio, G., Costa, M.H., 2018. Coupling the terrestrial hydrology model with biogeochemistry to the integrated LAND surface model: Amazon Basin applications. *Hydrol. Sci. J.* 63, 1954–1966. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1538592>

Anderson, M.C., Norman, J.M., Diak, G.R., Kustas, W.P., Mecikalski, J.R., 1997. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sens.*



Environ. 60, 195–216. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00215-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00215-5)

Andriambelason, J.A., Paris, A., Calmant, S., Rakotondraompiana, S., 2020. Re-initiating depth-discharge monitoring in small-sized ungauged watersheds by combining remote sensing and hydrological modelling: a case study in Madagascar. *Hydrol. Sci. J.* 65, 2709–2728. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1833013>

Angelis, C.F., McGregor, G.R., Kidd, C., 2004. Diurnal cycle of rainfall over the Brazilian Amazon. *Clim. Res.* 26, 139–149. <https://doi.org/10.3354/cr026139>

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, in: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. p. 1779–1785. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.0026>

Arantes, C.C., Winemiller, K.O., Petre, M., Castello, L., Hess, L.L., Freitas, C.E.C., 2018. Relationships between forest cover and fish diversity in the Amazon River floodplain. *J. Appl. Ecol.* 55, 386–395. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12967>

Arias, M.E., Farinosi, F., Lee, E., Livino, A., Briscoe, J., Moorcroft, P.R., 2020. Impacts of climate change and deforestation on hydropower planning in the Brazilian Amazon. *Nat. Sustain.* 3, 430–436. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0492-y>

Arias, M.E., Lee, E., Farinosi, F., Pereira, F.F., Moorcroft, P.R., 2018. Decoupling the effects of deforestation and climate variability in the Tapajós river basin in the Brazilian Amazon. *Hydrol. Process.* 32, 1648–1663. <https://doi.org/10.1002/hyp.11517>

Arias, P.A., Fu, R., Vera, C., Rojas, M., 2015. A correlated shortening of the North and South American monsoon seasons in the past few decades. *Clim. Dyn.* 45, 3183–3203. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2533-1>

Arias, P.A., Garreaud, R., Poveda, G., Espinoza, J.C., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., Viale, M., Scaff, L., van Oevelen, P.J., 2021. Hydroclimate of the Andes Part II: Hydroclimate Variability and Sub-Continental Patterns. *Front. Earth Sci.* 8, 666. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.505467>

Armijos, E., Crave, A., Espinoza, J.C., Filizola, N., Espinoza-Villar, R., Ayes, I., Fonseca, P., Fraizy, P., Gutierrez, O., Vauchel, P., Camenen, B., Martínez, 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. *Environ. Res. Commun.* 2, 051008. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab9003>

Arnesen, A.S., Silva, T.S.F.F., Hess, L.L., Novo, E.M.L.M.L.M., Rudorff, C.M., Chapman, B.D., McDonald, K.C., 2013. Monitoring flood extent in the lower Amazon River floodplain using ALOS/PALSAR ScanSAR images. *Remote Sens. Environ.* 130, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.035>

Arvor, D., Funatsu, B.M., Michot, V., Dubreui, V., 2017. Monitoring rainfall patterns in the southern Amazon with PERSIANN-CDR data: Long-term characteristics and trends. *Remote Sens.* 9. <https://doi.org/10.3390/rs9090889>

Ashouri, H., Hsu, K.L., Sorooshian, S., Braithwaite, D.K., Knapp, K.R., Cecil, L.D., Nelson, B.R., Prat,

O.P., 2015. PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 96, 69–83. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1>

Asner, G.P., 2001. Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon. *Int. J. Remote Sens.* 22, 3855–3862. <https://doi.org/10.1080/01431160010006926>

Avila-Diaz, A., Benezoli, V., Justino, F., Torres, R., Wilson, A., 2020. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. *Clim. Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z>

Azarderakhsh, M., Rossow, W.B., Papa, F., Norouzi, H., Khanbilvardi, R., 2011. Diagnosing water variations within the Amazon basin using satellite data. *J. Geophys. Res.* 116, n/a--n/a. <https://doi.org/10.1029/2011JD015997>

Baguis, P., Roulin, E., 2017. Soil moisture data assimilation in a hydrological model: A case study in Belgium using large-scale satellite data. *Remote Sens.* 9, 1–26. <https://doi.org/10.3390/rs9080820>

Baker, J., Garcia-Carreras, L., Gloor, M., Marsham, J.H., Buermann, W., da Rocha, H.R., Nobre, A.D., de Araujo, A.C., Spracklen, D. V., 2021. Evapotranspiration in the Amazon: spatial patterns, seasonality, and recent trends in observations, reanalysis, and climate models. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25, 2279–2300. <https://doi.org/10.5194/hess-25-2279-2021>

Baker, J., Spracklen, D. V., 2019. Climate Benefits of Intact Amazon Forests and the Biophysical Consequences of Disturbance. *Front. For. Glob. Chang.* 2, 1–13. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00047>

Balsamo, G., Albergel, C., Beljaars, A., Boussetta, S., Brun, E., Cloke, H., Dec, D., Dutra, E., Muñoz-Sabater, J., Pappenberger, F., De Rosnay, P., Stockdale, T., Vitart, F., 2015. ERA-Interim/Land: A global land surface reanalysis data set. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 389–407. <https://doi.org/10.5194/hess-19-389-2015>

Barahona, D., Molod, A., Kalesse, H., 2017. Direct estimation of the global distribution of vertical velocity within cirrus clouds. *Sci. Rep.* 7, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07038-6>

Barbosa, C.C.F., 2005. Sensoriamento Remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas. *Dissertação* 255.

Barbosa, C.C.F., de Moraes Novo, E.M.L., Melack, J.M., Gastil-Buhl, M., Filho, W.P., 2009. Geospatial analysis of spatiotemporal patterns of pH, total suspended sediment and chlorophyll-a on the Amazon floodplain. *Limnology* 11, 155–166. <https://doi.org/10.1007/s10201-009-0305-5>

Barbosa, C.C.F., Novo, E., Ferreira, R., Carvalho, L., Cairo, C., Lopes, F., Stech, J., Alcantara, E., 2015. Brazilian inland water bio-optical dataset to support carbon budget studies in reservoirs as well as anthropogenic impacts in Amazon floodplain lakes: Preliminary results. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.* 40, 1439–1446. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-1439-2015>

Barbosa, C.C.F., Novo, E.M.L. de M., Melack, J.M., Freitas, R.M. de, Pereira, W., 2006. A methodology for analysis of volume and flooded area dynamics: Lago Grande de Curuai várzea as an example. *Rev. Bras. Cartogr.* 58, 201–210.

Barbosa, P.M., Melack, J.M., Amaral, J.H.F., MacIntyre, S., Kasper, D., Cortés, A., Farjalla, V.F., Forsberg, B.R., 2020. Dissolved methane concentrations and fluxes to the atmosphere from a tropical floodplain lake. *Biogeochemistry* 148, 129–151. <https://doi.org/10.1007/s10533-020-00650-1>

Barichivich, J., Gloor, E., Peylin, P., Brienen, R.J.W., Schöngart, J., Espinoza, J.C., Pattayak, K.C., 2018. Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. *Sci. Adv.* 4. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat8785>

Bastiaanssen, W.G.M., 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: a remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. Dr. thesis, Wageningen Agric. Univ. Wageningen Netherlands.

Bates, P.D., Neal, J., Sampson, C., Smith, A., Trigg, M., 2018. Chapter 9 - Progress Toward Hyperresolution Models of Global Flood Hazard, in: Michel, G.B.T.-R.M. for H. and D. (Org.), Elsevier, p. 211–232. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804071-3.00009-4>

Bates, P.D., Quinn, N., Sampson, C., Smith, A., Wing, O., Sosa, J., Savage, J., Olcese, G., Neal, J., Schumann, G., Giustarini, L., Coxon, G., Porter, J.R., Amodeo, M.F., Chu, Z., Lewis-Gruss, S., Freeman, N.B., Houser, T., Delgado, M., Hamidi, A., Bolliger, I., E. McCusker, K., Emanuel, K., Ferreira, C.M., Khalid, A., Haigh, I.D., Couasnon, A., E. Kopp, R., Hsiang, S., Krajewski, W.F., 2021. Combined Modeling of US Fluvial, Pluvial, and Coastal Flood Hazard Under Current and Future Climates. *Water Resour. Res.* 57, e2020WR028673. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020WR028673>

Baugh, C.A., Bates, P.D., Schumann, G., Trigg, M.A., 2013. SRTM vegetation removal and hydrodynamic modeling accuracy. *Water Resour. Res.* 49, 5276–5289. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20412>

Bayley, P.B., Moreira, J.C., 1978. Preliminary interpretations of aquatic resources in the central Amazon Basin using Landsat multispectral imagery, in: Parada, N. de J. (Org.), Anais... Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, p. 854–865.

Beck, H.E., Pan, M., Roy, T., Weedon, G.P., Pappenberger, F., van Dijk, A.I.J.M., Huffman, G.J., Adler, R.F., Wood, E.F., 2018. Daily evaluation of 26 precipitation datasets using Stage-IV gauge-radar data for the CONUS. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 1–23. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-481>

Beck, H.E., Van Dijk, A.I.J.M., Levizzani, V., Schellekens, J., Miralles, D.G., Martens, B., De Roo, A., 2017a. MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 589–615. <https://doi.org/10.5194/hess-21-589-2017>

Beck, H.E., Vergopolan, N., Pan, M., Levizzani, V., van Dijk, A.I.J.M., Weedon, G.P., Brocca, L., Pappenberger, F., Huffman, G.J., Wood, E.F., 2017b. Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 6201–6217. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6201-2017>

Beck, H.E., Wood, E.F., Pan, M., Fisher, C.K., Miralles, D.G., Van Dijk, A.I.J.M., McVicar, T.R., Adler, R.F., 2019. MSWep v2 Global 3-hourly 0.1° precipitation: Methodology and quantitative assessment. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 100, 473–500. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0138.1>

Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rudolf, B., Schamm, K., Schneider, U., Ziese, M., 2013. A description of the global land-surface precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901–present. *Earth Syst.*

Sci. Data 5, 71–99. <https://doi.org/10.5194/essd-5-71-2013>

Becker, M., Papa, F., Frappart, F., Alsdorf, D., Calmant, S., da Silva, J.S., Prigent, C., Seyler, F., 2018. Satellite-based estimates of surface water dynamics in the Congo River Basin. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 66, 196–209. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.11.015>

Behnamian, A., Banks, S., White, L., Brisco, B., Milard, K., Pasher, J., Chen, Z., Duffe, J., Bourgeau-Chavez, L., Battaglia, M., 2017. Semi-automated surfacewater detection with synthetic aperture radar data: A wetland case study. *Remote Sens.* 9, 1209. <https://doi.org/10.3390/rs9121209>

Bleighley, R.E., Eggert, K.G., Dunne, T., He, Y., Gummadi, V., Verdin, K.L., 2009. Simulating hydrologic and hydraulic processes throughout the Amazon River Basin. *Hydrol. Process.* 23, 1221–1235. <https://doi.org/10.1002/hyp>

Belger, L., Forsberg, B.R., Melack, J.M., 2011. Carbon dioxide and methane emissions from interfluvial wetlands in the upper Negro River basin, Brazil. *Biogeochemistry* 105, 171–183. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9536-0>

Bercher, N., Dinardo, S., Lucas, B., Fleury, S., Calmant, S., Femenias, P., Boy, F., Picot, N., Benveniste, J., 2013. A review of Cryosat-2/SIRAL applications for the monitoring of river water levels. *ESA Living Planet Symp.* 1, 1–30.

Bernini, H., Borges, H.D., Martinez, J., 2019. Quasi-Analytical Algorithm Calibration for Retrieval of Inherent Optical Properties from Extremely Turbid Waters: The Case of Madeira River Basin, in: *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. p. 6150–6153. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8897766>

Berry, P.A.M., Garlick, J.D., Freeman, J.A., Mathers, E.L., 2005. Global inland water monitoring from multi-mission altimetry. *Geophys. Res. Lett.* 32. <https://doi.org/10.1029/2005GL022814>

Biancamaria, S., Lettenmaier, D.P., Pavelsky, T.M., 2016. The SWOT Mission and Its Capabilities for Land Hydrology. *Surv. Geophys.* 37, 307–337. <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9346-y>

Bierkens, M.F.P., Bell, V.A., Burek, P., Chaney, N., Condon, L.E., David, C.H., de Roo, A., Döll, P., Drost, N., Famiglietti, J.S., Flörke, M., Gochis, D.J., Houser, P., Hut, R., Keune, J., Kollet, S., Maxwell, R.M., Reager, J.T., Samaniego, L., Sudicky, E., Sutanudjaja, E.H., van de Giesen, N., Winsemius, H., Wood, E.F., 2015. Hyper-resolution global hydrological modelling: What is next?: “Everywhere and locally relevant” M. F. P. Bierkens et al. Invited Commentary. *Hydrol. Process.* 29, 310–320. <https://doi.org/10.1002/hyp.10391>

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. *J. Geophys. Res. D Atmos.* 107. <https://doi.org/10.1029/2001JD000609>

Birkett, C.M., Ricko, M., Beckley, B.D., Yang, X., Tetrault, R.L., 2017. G-REALM: A lake/reservoir monitoring tool for drought monitoring and water resources management, in: *AGU Fall Meeting Abstracts*. p. H23P-02.

Biswas, N.K., Hossain, F., Bonnema, M., Lee, H., Chishtie, F., 2021. Towards a global Reservoir Assessment Tool for predicting hydrologic impacts and operating patterns of existing and planned reservoirs. *Environ.*

Model. Softw. 140, 105043. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105043>

Blumstein, D., Biancamaria, S., Guérin, A., Maisongrande, P., 2019. A potential constellation of small altimetry satellites dedicated to continental surface waters (SMASH mission), in: AGU Fall Meeting Abstracts. p. H43N-2257.

Bogning, S., Frappart, F., Blarel, F., Niño, F., Mahé, G., Bricquet, J.-P., Seyler, F., Onguéné, R., Etamé, J., Paiz, M.-C., Braun, J.-J., 2018. Monitoring Water Levels and Discharges Using Radar Altimetry in an Ungauged River Basin: The Case of the Ogooué. *Remote Sens.* 10. <https://doi.org/10.3390/rs10020350>

Bogning, S., Frappart, F., Paris, A., Blarel, F., Niño, F., Saux Picart, S., Lanet, P., Seyler, F., Mahé, G., Onguene, R., Bricquet, J.-P., Etame, J., Paiz, M.-C., Braun, J.-J., 2020. Hydro-climatology study of the Ogooué River basin using hydrological modeling and satellite altimetry. *Adv. Sp. Res.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.045>

Bonnet, M.P., Barroux, G., Martinez, J.M., Seyler, F., Moreira-Turcq, P., Cochonneau, G., Melack, J.M., Boaventura, G., Maurice-Bourgoin, L., León, J.G., Roux, E., Calmant, S., Kosuth, P., Guyot, J.L., Seyler, P., 2008. Floodplain hydrology in an Amazon floodplain lake (Lago Grande de Curuaí). *J. Hydrol.* 349, 18–30. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.055>

Bonnet, M.P., Pinel, S., Garnier, J., Bois, J., Resende Boaventura, G., Seyler, P., Motta Marques, D., 2017. Amazonian floodplain water balance based on modelling and analyses of hydrologic and electrical conductivity data. *Hydrol. Process.* 31, 1702–1718. <https://doi.org/10.1002/hyp.11138>

Bookhagen, B., Strecker, M.R., 2008. Orographic barriers, high-resolution TRMM rainfall, and relief variations along the eastern Andes. *Geophys. Res. Lett.* 35, L06403. <https://doi.org/10.1029/2007GL032011>

Borma, L.S., Da Rocha, H.R., Cabral, O.M., Von Randow, C., Collicchio, E., Kurzatkowski, D., Brugger, P.J., Freitas, H., Tannus, R., Oliveira, L., Rennó, C.D., Artaxo, P., 2009. Atmosphere and hydrological controls of the evapotranspiration over a floodplain forest in the Bananal Island region, Amazonia. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 114. <https://doi.org/10.1029/2007JG000641>

Bosilovich, M.G., Chern, J.D., 2006. Simulation of water sources and precipitation recycling for the MacKenzie, Mississippi, and Amazon River basins. *J. Hydrometeorol.* 7, 312–329. <https://doi.org/10.1175/JHM501.1>

Bouchez, J., Lupker, M., Maurice, L., Perez, M., Gaillardet, J., 2011. Prediction of depth integrated fluxes of suspended sediment in the Amazon River: particle aggregation as a complicating factor. *Hydrol. Process.* 794, 778–794. <https://doi.org/10.1002/hyp.7868>

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. *J. Hydrol.* 335, 140–156. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.11.023>

Bourrel, L., Phillips, L., Moreau, S., 2009. The dynamics of floods in the Bolivian Amazon Basin. *Hydrol. Process.* 23, 3161–3167. <https://doi.org/10.1002/hyp.7384>

Bradley, J., 1980. Remote sensing of suspended sediment in Amazonian rivers using satellite multispectral

imagery. Royal Holloway, University of London.

Brakenridge, G.R., Nghiem, S. V., Anderson, E., Mic, R., 2007. Orbital microwave measurement of river discharge and ice status. *Water Resour. Res.* 43. <https://doi.org/10.1029/2006WR005238>

Brasil, 1997. Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1o da Lei no 8.001, de 13. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília.

Brêda, J.P.L.F., Paiva, R.C.D., Bravo, J.M., Passaia, O.A., Moreira, D.M., 2019. Assimilation of Satellite Altimetry Data for Effective River Bathymetry. *Water Resour. Res.* 55, 7441–7463. <https://doi.org/10.1029/2018wr024010>

Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Moramarco, T., Hahn, S., Hasenauer, S., Kidd, R., Dorigo, W., Wagner, W., Levizzani, V., 2014. Soil as a natural rain gauge: Estimating global rainfall from satellite soil moisture data. *J. Geophys. Res. Atmos.* 119, 5128–5141. <https://doi.org/10.1002/2014JD021489>

Brocca, L., Filippucci, P., Hahn, S., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., Schüller, L., Bojkov, B., Wagner, W., 2019. SM2RAIN-ASCAT (2007-2018): Global daily satellite rainfall data from ASCAT soil moisture observations. *Earth Syst. Sci. Data* 11, 1583–1601. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1583-2019>

Brocca, L., Moramarco, T., Melone, F., Wagner, W., 2013. A new method for rainfall estimation through soil moisture observations. *Geophys. Res. Lett.* 40, 853–858. <https://doi.org/10.1002/grl.50173>

Builes-Jaramillo, A., Poveda, G., 2018. Conjoint Analysis of Surface and Atmospheric Water Balances in the Andes-Amazon System. *Water Resour. Res.* 54, 3472–3489. <https://doi.org/10.1029/2017WR021338>

Butt, N., De Oliveira, P.A., Costa, M.H., 2011. Evidence that deforestation affects the onset of the rainy season in Rondonia, Brazil. *J. Geophys. Res. Atmos.* 116, 2–9. <https://doi.org/10.1029/2010JD015174>

Buayaert, W., Zulkaffi, Z., Grainger, S., Acosta, L., Alemie, T.C., Bastiaensen, J., De Bièvre, B., Bhusal, J., Clark, J., Dewulf, A., Foggin, M., Hannah, D.M., Hergarten, C., Isaeva, A., Karpouzoglou, T., Pandeya, B., Paudel, D., Sharma, K., Steenhuis, T., Tilahun, S., Van Hecken, G., Zhumanova, M., 2014. Citizen science in hydrology and water resources: opportunities for knowledge generation, ecosystem service management, and sustainable development. *Front. Earth Sci.* 2, 26. <https://doi.org/10.3389/feart.2014.00026>

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. *Rev. des Sci. l'Eau* 23, 247–273.

Callède, J., Guyot, J.L., Ronchail, J., L'Hôte, Y., Niel, H., De Oliveira, E., 2004. Evolution of the River Amazon's discharge at Óbidos from 1903 to 1999. *Hydrol. Sci. J.* 49, 85–98. <https://doi.org/10.1623/hysj.49.1.85.53992>

Callède, J., Moreira, D.M., Calmant, S., 2013. Détermination de l'altitude du zéro des stations hydrométriques en amazonie brésilienne. Application aux lignes d'eau des Rios Negro, Solimões et Amazone. *Rev. des Sci. l'Eau* 26, 153–171. <https://doi.org/10.7202/1016065ar>

Calmant, S., Crétaux, J.F., Rémy, F., 2016. Principles of Radar Satellite Altimetry for Application on

Inland Waters. *Microw. Remote Sens. L. Surfaces Tech. Methods* 175–218. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-159-8.50004-9>

Calmant, S., Da Silva, J.S., Moreira, D.M., Seyler, F., Shum, C.K., Crétaux, J.F., Gabalda, G., 2013. Detection of Envisat RA2/ICE-1 retracked radar altimetry bias over the Amazon basin rivers using GPS. *Adv. Sp. Res.* 51, 1551–1564. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.07.033>

Calmant, S., Seyler, F., 2006. Continental surface waters from satellite altimetry. *Comptes Rendus - Geosci.* 338, 1113–1122. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.05.012>

Campos-Silva, J.V., Hawes, J.E., Freitas, C.T., Andrade, P.C.M., Peres, C.A., 2020. Community-Based Management of Amazonian Biodiversity Assets, in: Baldauf, C. (Org.), *Participatory Biodiversity Conservation: Concepts, Experiences, and Perspectives*. Springer International Publishing, Cham, p. 99–111. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-41686-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-41686-7_7)

Cao, N., Lee, H., Jung, H.C., Yu, H., 2018. Estimation of Water Level Changes of Large-Scale Amazon Wetlands Using ALOS2 ScanSAR Differential Interferometry 10. <https://doi.org/10.3390/rs10060966>

Cardille, J.A., Foley, J.A., Costa, M.H., 2002. Characterizing patterns of agricultural land use in Amazonia by merging satellite classifications and census data. *Global Biogeochem. Cycles* 16, 18–1–18–14. <https://doi.org/10.1029/2000gb001386>

Carvalho, J.C., Cochoneau, G., Piscoya, R. de C.C.C. de, Martinez, J., Souza, E.A. De, Antunes, M.A., Ventura, D.T., Oliveira, E., Lopes, W.T.A., Guimarães, V.S., 2015. HIDROSAT - Sistema Integrado para Gerenciamento, Processamento e Difusão de Dados Hidrológicos Obtidos a Partir de Monitoramento por Satélites, in: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, Brasília, DF.

Carvalho, L.M. V., Jones, C., Liebmann, B., 2004. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall. *J. Clim.* 17, 88–108. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2)

Castello, L., Hess, L.L., Thapa, R., McGrath, D.G., Arantes, C.C., Renó, V.F., Isaac, V.J., 2018. Fishery yields vary with land cover on the Amazon River floodplain. *Fish Fish.* 19, 431–440. <https://doi.org/10.1111/faf.12261>

Castello, L., Macedo, M.N., 2016. Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems. *Glob. Chang. Biol.* 22, 990–1007. <https://doi.org/10.1111/gcb.13173>

Cavalcante, R.B.L., Ferreira, D.B. da S., Pontes, P.R.M., Tedeschi, R.G., da Costa, C.P.W., de Souza, E.B., 2020. Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. *Atmos. Res.* 238, 104879. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104879>

Cavalcante, R.B.L., Pontes, P.R.M., Souza-Filho, P.W.M., de Souza, E.B., 2019. Opposite Effects of Climate and Land Use Changes on the Annual Water Balance in the Amazon Arc of Deforestation. *Water Resour. Res.* 55, 3092–3106. <https://doi.org/10.1029/2019WR025083>

Chapman, B., McDonald, K., Shimada, M., Rosenqvist, A., Schroeder, R., Hess, L., 2015. Mapping Regional Inundation with Spaceborne L-Band SAR. *Remote Sens.* 7, 5440–5470. <https://doi.org/10.3390/rs70505440>

Chaudhari, S., Pokhrel, Y., Moran, E., Miguez-Macho, G., 2019. Multi-decadal hydrologic change and variability in the Amazon River basin: Understanding terrestrial water storage variations and drought characteristics. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 23, 2841–2862. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2841-2019>

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. *J. Geophys. Res.* <https://doi.org/10.1002/2016JD026282>

Chen, J.L., Wilson, C.R., Tapley, B.D., 2010. The 2009 exceptional Amazon flood and interannual terrestrial water storage change observed by GRACE. *Water Resour. Res.* 46, 1–10. <https://doi.org/10.1029/2010WR009383>

Chen, J.L., Wilson, C.R., Tapley, B.D., Yang, Z.L., Niu, G.Y., 2009. 2005 drought event in the Amazon River basin as measured by GRACE and estimated by climate models. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 114, 1–9. <https://doi.org/10.1029/2008JB006056>

Chen, M., Shi, W., Xie, P., Silva, V.B.S., Kousky, V.E., Wayne Higgins, R., Janowiak, J.E., 2008. Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. *J. Geophys. Res.* 113, D04110. <https://doi.org/10.1029/2007JD009132>

Chew, C., Small, E., 2020. Estimating inundation extent using CYGNSS data: A conceptual modeling study. *Remote Sens. Environ.* 246, 111869. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111869>

Choudhury, B.J., 1991. Passive microwave remote sensing contribution to hydrological variables. *Surv. Geophys.* 12, 63–84. <https://doi.org/10.1007/BF01903412>

Christoffersen, B.O., Restrepo-Coupe, N., Arain, M.A., Baker, I.T., Cestaro, B.P., Ciais, P., Fisher, J.B., Galbraith, D., Guan, X., Gulden, L., van den Hurk, B., Ichii, K., Imbuzeiro, H., Jain, A., Levine, N., Miguez-Macho, G., Poulter, B., Roberti, D.R., Sakaguchi, K., Sahoo, A., Schaefer, K., Shi, M., Verbeeck, H., Yang, Z.L., Araújo, A.C., Kruijt, B., Manzi, A.O., da Rocha, H.R., von Randow, C., Muza, M.N., Borak, J., Costa, M.H., Gonçalves de Gonçalves, L.G., Zeng, X., Saleska, S.R., 2014. Mechanisms of water supply and vegetation demand govern the seasonality and magnitude of evapotranspiration in Amazonia and Cerrado. *Agric. For. Meteorol.* 191, 33–50. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.02.008>

Ciabatta, L., Massari, C., Brocca, L., Gruber, A., Reimer, C., Hahn, S., Paulik, C., Dorigo, W., Kidd, R., Wagner, W., 2018. SM2RAIN-CCI: A new global long-term rainfall data set derived from ESA CCI soil moisture. *Earth Syst. Sci. Data* 10, 267–280. <https://doi.org/10.5194/essd-10-267-2018>

Cintra, R., 2015. Spatial distribution and composition of waterbirds in relation to limnological conditions in the Amazon basin. *Hydrobiologia* 747, 235–252. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2148-2>

Claverie, M., Ju, J., Masek, J.G., Dungan, J.L., Vermote, E.F., Roger, J., Skakun, S.V., Justice, C., 2018. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote Sens. Environ.* 219, 145–161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.002>

Cleugh, H.A., Leuning, R., Mu, Q., Running, S.W., 2007. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. *Remote Sens. Environ.* 106, 285–304. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.007>

Coe, M.T., Costa, M.H., Botta, A., Birkett, C., 2002. Long-term simulations of discharge and floods in



- the Amazon Basin. *J. Geophys. Res. Atmos.* 107, 1–17. <https://doi.org/10.1029/2001JD000740>
- Coe, M.T., Costa, M.H., Howard, E.A., 2008. Simulating the surface waters of the Amazon River basin: Impacts of new river geomorphic and flow parameterizations. *Hydrol. Process.* 22, 2542–2553. <https://doi.org/10.1002/hyp.6850>
- Coe, M.T., Costa, M.H., Soares-Filho, B.S., 2009. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River - Land surface processes and atmospheric feedbacks. *J. Hydrol.* <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.043>
- Coe, M.T., Latrubesse, E.M., Ferreira, M.E., Amsler, M.L., 2011. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. *Biogeochemistry* 105, 119–131. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9582-2>
- Cogley, J.G., 2013. GGHYDRO - Global Hydrographic Data, Release 2.3.1 Trent Technical Note 2003-1.
- Collischonn, B., Collischonn, W., Tucci, C.E.M., 2008. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *J. Hydrol.* 360, 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.032>
- Condom, T., Martínez, R., Pabón, J.D., Costa, F., Pineda, L., Nieto, J.J., López, F., Villacis, M., 2020. Climatological and Hydrological Observations for the South American Andes: In situ Stations, Satellite, and Reanalysis Data Sets. *Front. Earth Sci.* 8, 1–20. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00092>
- Constantine, J.A., Dunne, T., Ahmed, J., Legleiter, C., Lazarus, E.D., 2014. Sediment supply as a driver of river meandering and floodplain evolution in the Amazon Basin. *Nat. Geosci.* 7, 899–903. <https://doi.org/10.1038/ngeo2282>
- Cooley, S.W., Smith, L.C., Ryan, J.C., Pitcher, L.H., Pavelsky, T.M., 2019. Arctic-Boreal Lake Dynamics Revealed Using CubeSat Imagery. *Geophys. Res. Lett.* 46, 2111–2120. <https://doi.org/10.1029/2018GL081584>
- Correa, S.W., Paiva, R.C.D. de, Espinoza, J.C., Collischonn, W., 2017. Multi-decadal Hydrological Retrospective: Case study of Amazon floods and droughts. *J. Hydrol.* 549, 667–684. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.019>
- Coss, S., Durand, M., Yi, Y., Jia, Y., Guo, Q., Tuozzolo, S., Shum, C.K., Allen, G.H., Calmant, S., Pavelsky, T., 2020. Global River Radar Altimetry Time Series (GRRATS): New river elevation earth science data records for the hydrologic community. *Earth Syst. Sci. Data* 12, 137–150. <https://doi.org/10.5194/essd-12-137-2020>
- Costa, M., 2005. Estimate of net primary productivity of aquatic vegetation of the Amazon floodplain using Radarsat and JERS-1. *Int. J. Remote Sens.* 26, 4527–4536. <https://doi.org/10.1080/01431160500213433>
- Costa, M.H., 2020. When more trees mean more power. *Nat. Sustain.* 3, 410–411. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0511-z>
- Costa, M.H., 2005. Large-scale hydrological impacts of tropical forest conversion, in: Bonell, M., Bruijnzeel, L.A.S. (Eds.), *Forests, Water and People in the Humid Tropics*. Cambridge University Press, p. 590–597. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/CBO9780511535666>

Costa, M.H., Biajoli, M.C., Sanches, L., Malhado, A.C.M., Hutyrá, L.R., da Rocha, H.R., Aguiar, R.G., de Araújo, A.C., 2010. Atmospheric versus vegetation controls of Amazonian tropical rain forest evapotranspiration: Are the wet and seasonally dry rain forests any different? *J. Geophys. Res.* 115, G04021. <https://doi.org/10.1029/2009JG001179>

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. *J. Hydrol.* 283, 206–217. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00267-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00267-1)

Costa, M.H., Foley, J.A., 1997. Water balance of the Amazon Basin: Dependence on vegetation cover and canopy conductance. *J. Geophys. Res. Atmos.* 102, 23973–23989. <https://doi.org/10.1029/97JD01865>

Costa, M.H., Pires, G.F., 2010. Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. *Int. J. Climatol.* 30, 1970–1979. <https://doi.org/10.1002/joc.2048>

Costa, M.P.F., Novo, E.M.L.M., Telmer, K.H., 2013. Spatial and temporal variability of light attenuation in large rivers of the Amazon. *Hydrobiologia* 702, 171–190. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1319-2>

Crétaux, J.F., Birkett, C., 2006. Lake studies from satellite radar altimetry. *Comptes Rendus - Geosci.* 338, 1098–1112. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.08.002>

Crétaux, J.F., Jelinski, W., Calmant, S., Kouraev, A., Vuglinski, V., Bergé-Nguyen, M., Gennero, M.C., Nino, F., Abarca Del Rio, R., Cazenave, A., Maisongrande, P., 2011. SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data. *Adv. Sp. Res.* 47, 1497–1507. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.01.004>

Crowley, J.W., Mitrovica, J.X., Bailey, R.C., Tamisiea, M.E., Davis, J.L., 2008. Annual variations in water storage and precipitation in the Amazon Basin: Bounding sink terms in the terrestrial hydrological balance using GRACE satellite gravity data. *J. Geod.* 82, 9–13. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0153-1>

Cuartas, L.A., Tomasella, J., Nobre, A.D., Nobre, C.A., Hodnett, M.G., Waterloo, M.J., Oliveira, S.M. de, Randow, R. de C. von, Trancoso, R., Ferreira, M., 2012. Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. *J. Hydrol.* 462–463, 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.047>

da Silva, E.F.F., Novo, E.M.L. de M., Lobo, F. de L., Barbosa, C.C.F., Noernberg, M.A., Rotta, L.H. da S., Cairo, C.T., Maciel, D.A., Flores Júnior, R., 2020. Optical water types found in Brazilian waters. *Limnology*. <https://doi.org/10.1007/s10201-020-00633-z>

Davidson, E.A., Artaxo, P., 2004. Globally significant changes in biological processes of the Amazon Basin: Results of the large-scale Biosphere-Atmosphere Experiment. *Glob. Chang. Biol.* 10, 519–529. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00779.x>

Davidson, E.A., De Araújo, A.C., Artaxo, P., Balch, J.K., Brown, I.F., Mercedes, M.M., Coe, M.T., Defries, R.S., Keller, M., Longo, M., Munger, J.W., Schroeder, W., Soares-Filho, B.S., Souza, C.M., Wofsy, S.C., 2012. The Amazon basin in transition. *Nature* 481, 312–328. <https://doi.org/10.1038/nature10717>

de Carvalho, L.A.S., Faria Barbosa, C.C., Leão de Moraes Novo, E.M., de Moraes Rudorff, C., 2015. Implications of scatter corrections for absorption measurements on optical closure of Amazon floodplain lakes using the Spectral Absorption and Attenuation Meter (AC-S-WETLabs). *Remote Sens. Environ.* 157, 123–137. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.06.018>

de Oliveira Campos, I., Mercier, F., Maheu, C., Cochonneau, G., Kosuth, P., Blitzkow, D., Cazenave, A., 2001. Temporal variations of river basin waters from Topex/Poseidon satellite altimetry. Application to the Amazon basin. *Comptes Rendus l'Académie des Sci. IIA-Earth Planet. Sci.* 333, 633–643.

de Oliveira, G., Brunsell, N.A., Moraes, E.C., Shimabukuro, Y.E., dos Santos, T. V., von Randow, C., de Aguiar, R.G., Aragao, L.E.O.C., 2019. Effects of land-cover changes on the partitioning of surface energy and water fluxes in Amazonia using high-resolution satellite imagery. *Ecohydrology* 12. <https://doi.org/10.1002/ecco.2126>

De Souza, E.B., Ambrizzi, T., 2006. Modulation of the intraseasonal rainfall over tropical Brazil by the Madden-Julian oscillation. *Int. J. Climatol.* 26, 1759–1776. <https://doi.org/10.1002/joc.1331>

Debortoli, N.S., Dubreuil, V., Funatsu, B., Delahaye, F., de Oliveira, C.H., Rodrigues-Filho, S., Saito, C.H., Fetter, R., 2015. Rainfall patterns in the Southern Amazon: a chronological perspective (1971–2010). *Clim. Change* 132, 251–264. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1415-1>

Decharme, B., Alkama, R., Papa, F., Faroux, S., Douville, H., Prigent, C., 2012. Global off-line evaluation of the ISBA-TRIP flood model. *Clim. Dyn.* 38, 1389–1412. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1054-9>

Decharme, B., Douville, H., Prigent, C., Papa, F., Aires, F., 2008. A new river flooding scheme for global climate applications: Off-line evaluation over South America. *J. Geophys. Res. Atmos.* 113. <https://doi.org/10.1029/2007JD009376>

Dekker, A.G., 1993. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing, *Management*.

Delahaye, F., Kirstetter, P.E., Dubreuil, V., Machado, L.A.T., Vila, D.A., Clark, R., 2015. A consistent gauge database for daily rainfall analysis over the Legal Brazilian Amazon. *J. Hydrol.* 527, 292–304. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.012>

Desai, S., 2018. Surface Water and Ocean Topography Mission Project - Science Requirements Document. JPL documentD-61923., Jet Propulsion Laboratory.

Dias, C.M., Pastore, D.H., Borma, L.S., Bevilacqua, L., 2011. Modelling and numerical simulation of the velocity field in the Parque Estadual do Cantão (TO), Brazil. *Math. Comput. Model.* 53, 1575–1581. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.06.021>

Dias, L.C.P., Pimenta, F.M., Santos, A.B., Costa, M.H., Ladle, R.J., 2016. Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. *Glob. Chang. Biol.* 22, 2887–2903. <https://doi.org/10.1111/gcb.13314>

Diniz, C.G., d. A. Souza, A.A., Santos, D.C., Dias, M.C., d. Luz, N.C., d. Moraes, D.R. V, Maia, J.S., Gomes, A.R., d. S. Narvaes, I., Valeriano, D.M., Maurano, L.E.P., Adami, M., 2015. DETER-B: The New Amazon Near Real-Time Deforestation Detection System. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs.*

Remote Sens. 8, 3619–3628. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2437075>

Dinku, T., Ceccato, P., Connor, S.J., 2011. Challenges of satellite rainfall estimation over mountainous and arid parts of east africa. *Int. J. Remote Sens.* 32, 5965–5979. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.499381>

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. *Sci. Total Environ.* 624, 887–899. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.211>

Drusch, M., Moreno, J., Del Bello, U., Franco, R., Goulas, Y., Huth, A., Kraft, S., Middleton, E.M., Miglietta, F., Mohammed, G., Nedbal, L., Rascher, U., Schuttemeyer, D., Verhoef, W., 2017. The FLuorescence EXplorer Mission Concept-ESA's Earth Explorer 8. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 55, 1273–1284. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2621820>

Durieux, L., Toledo Machado, L.A., Laurent, H., 2003. The impact of deforestation on cloud cover over the Amazon arc of deforestation. *Remote Sens. Environ.* 86, 132–140. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00095-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00095-6)

Duvel, J.F., Kandel, R.S., 1985. Regional-Scale Diurnal Variations of Outgoing Infrared Radiation Observed by METEOSAT. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 24, 335–349. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1985\)024<0335:RSDVOO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1985)024<0335:RSDVOO>2.0.CO;2)

Eltahir, E.A.B., Bras, R.L., 1994. Precipitation recycling in the Amazon basin. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 120, 861–880. <https://doi.org/10.1002/qj.49712051806>

Emery, C.M., Biancamaria, S., Boone, A., Ricci, S., Rochoux, M., Pedinotti, V., David, C., 2020. Assimilation of wide-swath altimetry observations to correct large-scale river routing model parameters. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 24, 2207–2233. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-242-RC3>

Emery, C.M., Paris, A., Biancamaria, S., Boone, A., Calmant, S., Garambois, P.A., Da Silva, J.S., 2018. Large-scale hydrological model river storage and discharge correction using a satellite altimetry-based discharge product. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* <https://doi.org/10.5194/hess-22-2135-2018>

Endo, W., Peres, C.A., Haugaasen, T., 2016. Flood pulse dynamics affects exploitation of both aquatic and terrestrial prey by Amazonian floodplain settlements. *Biol. Conserv.* 201, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.07.006>

Engle, D.L., Melack, J.M., Doyle, R.D., Fisher, T.R., 2008. High rates of net primary production and turnover of floating grasses on the Amazon floodplain: Implications for aquatic respiration and regional CO<sub>2</sub> flux. *Glob. Chang. Biol.* 14, 369–381. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01481.x>

Ershadi, A., McCabe, M.F., Evans, J.P., Wood, E.F., 2015. Impact of model structure and parameterization on Penman-Monteith type evaporation models. *J. Hydrol.* 525, 521–535. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.008>

Espinoza-Villar, R., Martinez, J.M., Armijos, E., Espinoza, J.C., Filizola, N., Dos Santos, A., Willems, B., Fraizy, P., Santini, W., Vauchel, P., Dos, A., Willems, B., Fraizy, P., Santini, W., Vauchel, P., 2018. Spatio-temporal monitoring of suspended sediments in the Solimões River (2000–2014). *Comptes*

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 Resour. Res.* 1–27. <https://doi.org/10.1002/2015WR017096>. Received

Espinoza, J.C., Marengo, J.A., Ronchail, J., Carpio, J.M., Flores, L.N., Guyot, J.L., 2014. The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: The role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. *Environ. Res. Lett.* 9. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124007>

Espinoza, J.C., Ronchail, J., Frappart, F., Lavado, W., Santini, W., Guyot, J.L., 2013. The Major Floods in the Amazonas River and Tributaries (Western Amazon Basin) during the 1970–2012 Period: A Focus on the 2012 Flood. *J. Hydrometeorol.* 14, 1000–1008. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0100.1>

Espinoza, J.C., Ronchail, J., Guyot, J.L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., De Oliveira, E., Pombosa, R., Vauchel, P., 2009. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *Int. J. Climatol.* 29, 1574–1594. <https://doi.org/10.1002/joc.1791>

Espinoza, J.C., Ronchail, J., Guyot, J.L., Junquas, C., Drapeau, G., Martinez, J.M., Santini, W., Vauchel, P., Lavado, W., Ordoñez, J., Espinoza, R., 2012. From drought to flooding: Understanding the abrupt 2010–11 hydrological annual cycle in the Amazonas River and tributaries. *Environ. Res. Lett.* 7. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024008>

Espinoza, J.C., Ronchail, J., Marengo, J.A., Segura, H., 2019a. Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). *Clim. Dyn.* 52, 5413–5430. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>

Espinoza, J.C., Segura, H., Ronchail, J., Drapeau, G., Gutierrez-Cori, O., 2016. Evolution of wet-day and dry-day frequency in the western Amazon basin: Relationship with atmospheric circulation and impacts on vegetation. *Water Resour. Res.* 52, 8546–8560. <https://doi.org/10.1002/2016WR019305>

Espinoza, J.C., Sörensson, A.A., Ronchail, J., Molina-Carpio, J., Segura, H., Gutierrez-Cori, O., Ruscica, R., Condom, T., Wongchuiig-Correa, S., 2019b. Regional hydro-climatic changes in the Southern Amazon Basin (Upper Madeira Basin) during the 1982–2017 period. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 26, 100637. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100637>

Espinoza Villar, J.C., Guyot, J.L., Ronchail, J., Cochonneau, G., Filizola, N., Fraizy, P., Labat, D., de Oliveira, E., Ordoñez, J.J., Vauchel, P., 2009a. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974–2004). *J. Hydrol.* 375, 297–311. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.004>

Espinoza Villar, J.C., Ronchail, J., Guyot, J.L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., Oliveira, E., de Pombosa, R., Vauchel, P., 2009b. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *Int. J. Climatol.* 29, 1574–1594. <https://doi.org/10.1002/joc.1791>

Espinoza Villar, R., Martinez, J.M., Guyot, J.L., Fraizy, P., Armijos, E., Crave, A., Bazán, H., Vauchel, P., Lavado, W., 2012. The integration of field measurements and satellite observations to determine river solid loads in poorly monitored basins. *J. Hydrol.* 444–445, 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.024>

Fagundes, H.O., Fan, F.M., Paiva, R.C.D., Siqueira, V.A., Buarque, D.C., Kornowski, L.W., Laipelt, L., Collischonn, W., 2021. Sediment Flows in South America Supported by Daily Hydrologic-Hydrodynamic Modeling. *Water Resour. Res.* 57. <https://doi.org/10.1029/2020wr027884>

Fan, F.M., Paiva, R.C.D., Collischonn, W., 2016. Chapter 2 - Hydrological Forecasting Practices in Brazil, in: Adams, T.E., Pagano, T.C.B.T.-F.F. (Orgs.), *Flood Forecasting A Global Perspective*. Academic Press, Boston, p. 41–66. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801884-2.00002-5>

Fang, Y., Leung, L.R., Duan, Z., Wigmosta, M.S., Maxwell, R.M., Chambers, J.Q., Tomasella, J., 2017. Influence of landscape heterogeneity on water available to tropical forests in an Amazonian catchment and implications for modeling drought response. *J. Geophys. Res. Atmos.* 122, 8410–8426. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2017JD027066>

Farr, T., Rosen, P., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D., 2007. The shuttle radar topography mission. *Rev. Geophys.* 45, 1–33. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

Fassoni-Andrade, A.C., 2020. Mapping and characterization of the central Amazon river-floodplain system by remote sensing and hydraulic modeling. *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*.

Fassoni-Andrade, A.C., Durand, F., Moreira, D., Azevedo, A., Santos, V., Funi, C., Laraque, A., 2021a. Comprehensive bathymetry and intertidal topography of the Amazon estuary. *Earth Syst. Sci. Data* 13, 2275–2291. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2275-2021>

Fassoni-Andrade, A.C., Fleischmann, A.S., Papa, F., Paiva, R.C.D. de, Wongchuig, S., Melack, J.M., Moreira, A.A., Paris, A., Ruhoff, A., Barbosa, C., Maciel, D.A., Novo, E., Durand, F., Frappart, F., Aires, F., Abrahão, G.M., Ferreira-Ferreira, J., Espinoza, J.C., Laipelt, L., Costa, M.H., Espinoza-Villar, R., Calmant, S., Pellet, V., 2021b. Amazon Hydrology From Space: Scientific Advances and Future Challenges. *Rev. Geophys.* 59, 1–97. <https://doi.org/10.1029/2020RG000728>

Fassoni-Andrade, A.C., Paiva, R.C.D. de, 2019. Mapping spatial-temporal sediment dynamics of river-floodplains in the Amazon. *Remote Sens. Environ.* 221, 94–107. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.10.038>

Fassoni-Andrade, A.C., Paiva, R.C.D., Fleischmann, A.S., 2020a. Lake topography and active storage from satellite observations of flood frequency. *Water Resour. Res.* 56. <https://doi.org/10.1029/2019wr026362>

Fassoni-Andrade, A.C., Paiva, R.C.D., Rudorff, C.M., Barbosa, C.C.F., Novo, E.M.L. de M., 2020b. High-resolution mapping of floodplain topography from space: A case study in the Amazon. *Remote Sens. Environ.* 251, 112065. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112065>

Fekete, B.M., Looser, U., Pietroniro, A., Robarts, R.D., 2012. Rationale for monitoring discharge on the ground. *J. Hydrometeorol.* 13, 1977–1986. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-0126.1>

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. *Wetl. Ecol. Manag.* 23, 41–59. <https://doi.org/10.1007/s11273-014-9359-1>

Ferreira, R.D., Barbosa, C.C.F., Novo, E.M.L. de M., 2013. Assessment of in vivo fluorescence method for chlorophyll-a estimation in optically complex waters (Curuai floodplain, Pará - Brazil). *Acta Limnol. Bras.* 24, 373–386. <https://doi.org/10.1590/s2179-975x2013005000011>

Ferreira, V.G., Montecino, H.C., Ndehedehe, C.E., Heck, B., Gong, Z., de Freitas, S.R.C., Westerhaus, M., 2018. Space-based observations of crustal deflections for drought characterization in Brazil. *Sci. Total Environ.* 644, 256–273. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.277>

Figueroa, S.N., Nobre, C.A., 1990. Precipitation Distribution over Central and Western Tropical South America. *Climanalise* 6, 36–40.

Filizola, N., Guyot, J., 2009. Suspended sediment yields in the Amazon basin: an assessment using the Brazilian national data set. *Hydrol. Process.* 23, 3207–3215. <https://doi.org/10.1002/hyp.7394>

Finer, M., Novoa, S., Weisse, M.J., Petersen, R., Mascaro, J., Souto, T., Stearns, F., Martinez, R.G., 2018. Combating deforestation: From satellite to intervention. *Science (80-. )*. 360, 1303–1305. <https://doi.org/10.1126/science.aat1203>

Fisher, J.B., Malhi, Y., Bonal, D., Da Rocha, H.R., De Araújo, A.C., Gamo, M., Goulden, M.L., Rano, T.H., Huete, A.R., Kondo, H., Kumagai, T., Loescher, H.W., Miller, S., Nobre, A.D., Nouvellon, Y., Oberbauer, S.F., Panuthai, S., Rouspard, O., Saleska, S., Tanaka, K., Tanaka, N., Tu, K.P., Von Randow, C., 2009. The land-atmosphere water flux in the tropics. *Glob. Chang. Biol.* 15, 2694–2714. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01813.x>

Fisher, J.B., Melton, F., Middleton, E., Hain, C., Anderson, M., Allen, R., McCabe, M.F., Hook, S., Baldocchi, D., Townsend, P.A., Kilic, A., Tu, K., Miralles, D.D., Perret, J., Lagouarde, J.P., Waliser, D., Purdy, A.J., French, A., Schimel, D., Famiglietti, J.S., Stephens, G., Wood, E.F., 2017. The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. *Water Resour. Res.* <https://doi.org/10.1002/2016WR020175>

Fisher, J.B., Tu, K.P., Baldocchi, D.D., 2008. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. *Remote Sens. Environ.* 112, 901–919. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.06.025>

Fitzjarrald, D.R., Sakai, R.K., Moraes, O.L.L., Cosme de Oliveira, R., Acevedo, O.C., Czirkowsky, M.J., Beldini, T., 2008. Spatial and temporal rainfall variability near the Amazon-Tapajós confluence. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 113, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2007JG000596>

Fleischmann, A.S., Paiva, R., Collischonn, W., 2019. Can regional to continental river hydrodynamic models be locally relevant? A cross-scale comparison. *J. Hydrol. X* 3, 100027. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100027>

Fleischmann, A.S., Paiva, R.C.D., Collischonn, W., Siqueira, V.A., Paris, A., Moreira, D.M., Papa, F., Bitar, A.A., Parrens, M., Aires, F., Garambois, P.A., 2020. Trade-Offs Between 1-D and 2-D Regional River Hydrodynamic Models. *Water Resour. Res.* 56. <https://doi.org/10.1029/2019WR026812>

Fleischmann, A.S., Paiva, R.C.D., Collischonn, W., Sorribas, M. V., Pontes, P.R.M., 2016. On river-floodplain interaction and hydrograph skewness. *Water Resour. Res.* 52, 7615–7630. <https://doi.org/10.1002/2016WR019233>

Fleischmann, A.S., Siqueira, V., Paris, A., Collischonn, W., Paiva, R., Pontes, P., Crétaux, J.F., Bergé-Nguyen, M., Biancamaria, S., Gosset, M., Calmant, S., Tanimoun, B., 2018. Modelling hydrologic and hydrodynamic processes in basins with large semi-arid wetlands. *J. Hydrol.* 561, 943–959. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.041>

Flores Júnior, R., 2019. Parametrização de algoritmos empíricos e algoritmo quasi-analítico QAA para estimativa de clorofila-a em lagos da várzea do rio Amazonas. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Fluet-Chouinard, E., Lehner, B., Rebelo, L.M., Papa, F., Hamilton, S.K., 2015. Development of a global inundation map at high spatial resolution from topographic downscaling of coarse-scale remote sensing data. *Remote Sens. Environ.* 158, 348–361. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.015>

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. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182254>

Frappart, F., Calmant, S., Cauhopé, M., Seyler, F., Cazenave, A., 2006. Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon basin. *Remote Sens. Environ.* 100, 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.027>

Frappart, F., Legrésy, B., Niño, F., Blarel, F., Fuller, N., Fleury, S., Birol, F., Calmant, S., 2016. An ERS-2 altimetry reprocessing compatible with ENVISAT for long-term land and ice sheets studies. *Remote Sens. Environ.* 184, 558–581. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.037>

Frappart, F., Papa, F., Famiglietti, J.S., Prigent, C., Rossow, W.B., Seyler, F., 2008. Interannual variations of river water storage from a multiple satellite approach: A case study for the Rio Negro River basin. *J. Geophys. Res. Atmos.* 113. <https://doi.org/10.1029/2007JD009438>

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. *Adv. Water Resour.* 124, 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 Sens. Environ.* 115, 1588–1594. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.003>

Frappart, F., Papa, F., Malbeteau, Y., León, J.G., Ramillien, G., Prigent, C., Seoane, L., Seyler, F., Calmant, S., 2015. Surface Freshwater Storage Variations in the Orinoco Floodplains Using Multi-Satellite Observations. *Remote Sens.* 7, 89–110. <https://doi.org/10.3390/rs70100089>

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. *Environ. Res. Lett.* 7. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044010>

Frappart, F., Ramillien, G., 2018. Monitoring groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission: A review. *Remote Sens.* <https://doi.org/10.3390/rs10060829>



Frappart, F., Ramillien, G., Ronchail, J., 2013a. Changes in terrestrial water storage versus rainfall and discharges in the Amazon basin. *Int. J. Climatol.* 33, 3029–3046. <https://doi.org/10.1002/joc.3647>

Frappart, F., Seoane, L., Ramillien, G., 2013b. Validation of GRACE-derived terrestrial water storage from a regional approach over South America. *Remote Sens. Environ.* 137, 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.06.008>

Frappart, F., Seyler, F., Martinez, J.M., León, J.G., Cazenave, A., 2005. Floodplain water storage in the Negro River basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels. *Remote Sens. Environ.* 99, 387–399. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.08.016>

Fricke, A.T., Nittrouer, C.A., Ogston, A.S., Nowacki, D.J., Asp, N.E., Souza Filho, P.W.M., 2019. Morphology and dynamics of the intertidal floodplain along the Amazon tidal river. *Earth Surf. Process. Landforms* 44, 204–218. <https://doi.org/10.1002/esp.4545>

Fu, R., Yin, L., Li, W., Arias, P.A., Dickinson, R.E., Huang, L., Chakraborty, S., Fernandes, K., Liebmann, B., Fisher, R., Myneni, R.B., 2013. Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 110, 18110–18115. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302584110>

Fu, R., Zhu, B., Dickinson, R.E., 1999. How Do Atmosphere and Land Surface Influence Seasonal Changes of Convection in the Tropical Amazon? *J. Clim.* 12, 1306–1321. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1306:HDAALS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1306:HDAALS>2.0.CO;2)

Funatsu, B.M., Dubreuil, V., Claud, C., Arvor, D., Gan, M.A., 2012. Convective activity in Mato Grosso state (Brazil) from microwave satellite observations: Comparisons between AMSU and TRMM data sets. *J. Geophys. Res. Atmos.* 117, 1–16. <https://doi.org/10.1029/2011JD017259>

Funatsu, B.M., Le Roux, R., Arvor, D., Espinoza, J.C., Claud, C., Ronchail, J., Michot, V., Dubreuil, V., 2021. Assessing precipitation extremes (1981–2018) and deep convective activity (2002–2018) in the Amazon region with CHIRPS and AMSU data. *Clim. Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05742-8>

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., Michaelsen, J., 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Sci. Data* 2, 1–21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

Gabioux, M., Vinzon, S.B., Paiva, A.M., 2005. Tidal propagation over fluid mud layers on the Amazon shelf. *Cont. Shelf Res.* 25, 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.09.001>

Gallo, M.N., Vinzon, S.B., 2005. Generation of overtides and compound tides in Amazon estuary. *Ocean Dyn.* 55, 441–448. <https://doi.org/10.1007/s10236-005-0003-8>

Gao, H., Birkett, C., Lettenmaier, D.P., 2012. Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing. *Water Resour. Res.* 48, 1–12. <https://doi.org/10.1029/2012WR012063>

Garambois, P.-A., Larnier, K., Monnier, J., Finaud-Guyot, P., Verley, J., Montazem, A.-S., Calmant, S., 2020. Variational estimation of effective channel and ungauged anabranching river discharge from multi-satellite water heights of different spatial sparsity. *J. Hydrol.* 581, 124409. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124409>

Garambois, P.A., Calmant, S., Roux, H., Paris, A., Monnier, J., Finaud-Guyot, P., Samine Montazem, A., Santos da Silva, J., 2017. Hydraulic visibility: Using satellite altimetry to parameterize a hydraulic model of an ungauged reach of a braided river. *Hydrol. Process.* 31, 756–767. <https://doi.org/10.1002/hyp.11033>

Garousi-Nejad, I., Tarboton, D.G., Aboutalebi, M., Torres-Rua, A.F., 2019. Terrain Analysis Enhancements to the Height Above Nearest Drainage Flood Inundation Mapping Method, *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2019WR024837>

Garreaud, R.D., Wallace, J.M., 1997. The diurnal march of convective cloudiness over the Americas. *Mon. Weather Rev.* 125, 3157–3171. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<3157:TDMOCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<3157:TDMOCC>2.0.CO;2)

Garstang, M., Massie Jr., H.L., Halverson, J., Greco, S., Scala, J., 1994. Amazon Coastal Squall Lines. Part I: Structure and Kinematics. *Mon. Weather Rev.* 122, 608–622. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0608:ACSLPI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0608:ACSLPI>2.0.CO;2)

Gash, J., Keller, M., Bustamante, M., Dias, P.S., 2013. Amazonia and Global Change, *Amazonia and Global Change*. <https://doi.org/10.1029/GM186>

Gatti, L. V., Basso, L.S., Miller, J.B., Gloor, M., Gatti Domingues, L., Cassol, H.L.G., Tejada, G., Aragão, L.E.O.C., Nobre, C., Peters, W., Marani, L., Arai, E., Sanches, A.H., Corrêa, S.M., Anderson, L., Von Randow, C., Correia, C.S.C., Crispim, S.P., Neves, R.A.L., 2021. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature* 595, 388–393. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>

Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M.J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C.A., Darmenov, A., Bosilovich, M.G., Reichle, R., Wargan, K., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Akella, S., Buchard, V., Conaty, A., da Silva, A.M., Gu, W., Kim, G.K., Koster, R., Lucchesi, R., Merkova, D., Nielsen, J.E., Partyka, G., Pawson, S., Putman, W., Rienecker, M., Schubert, S.D., Sienkiewicz, M., Zhao, B., 2017. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *J. Clim.* 30, 5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>

Gensac, E., Martinez, J.M., Vantrepotte, V., Anthony, E.J., 2016. Seasonal and inter-annual dynamics of suspended sediment at the mouth of the Amazon river: The role of continental and oceanic forcing, and implications for coastal geomorphology and mud bank formation. *Cont. Shelf Res.* 118, 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.02.009>

Getirana, A.C.V., Boone, A., Yamazaki, D., Decharme, B., Papa, F., Mognard, N., 2012. The Hydrological Modeling and Analysis Platform (HyMAP): Evaluation in the Amazon Basin. *J. Hydrometeorol.* 13, 1641–1665. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-021.1>

Getirana, A.C.V., Boone, A., Yamazaki, D., Mognard, N., 2013. Automatic parameterization of a flow routing scheme driven by radar altimetry data : Evaluation in the Amazon basin. *Water Resour. Res.* 49, 614–629. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20077>

Getirana, A.C.V., Dutra, E., Guimberteau, M., Kam, J., Li, H.-Y., Decharme, B., Zhang, Z., Ducharme, A., Boone, A., Balsamo, G., Rodell, M., Toure, A.M., Xue, Y., Peters-Lidard, C.D., Kumar, S. V., Arsenault, K., Drapeau, G., Ruby Leung, L., Ronchail, J., Sheffield, J., 2014. Water Balance in the Amazon Basin from a Land Surface Model Ensemble. *J. Hydrometeorol.* 15, 2586–2614. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0068.1>

Getirana, A.C.V., Espinoza, J.C.V., Ronchail, J., Rotunno Filho, O.C., 2011. Assessment of different precipitation datasets and their impacts on the water balance of the Negro River basin. *J. Hydrol.* 404, 304–322. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.04.037>

Getirana, A.C.V., Kumar, S., Giroto, M., Rodell, M., 2017a. Rivers and Floodplains as Key Components of Global Terrestrial Water Storage Variability. *Geophys. Res. Lett.* 44, 10,359–10,368. <https://doi.org/10.1002/2017GL074684>

Getirana, A.C.V., Peters-Lidard, C., Rodell, M., Bates, P.D., 2017b. Trade-off between cost and accuracy in large-scale surface water dynamic modeling. *Water Resour. Res.* 53, 4942–4955. <https://doi.org/10.1002/2017WR020519>

Gholizadeh, M.H., Melesse, A.M., Reddi, L., 2016. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors (Switzerland)* 16. <https://doi.org/10.3390/s16081298>

Ghosh, S., Thakur, P.K., Sharma, R., Nandy, S., Garg, V., Amarnath, G., Bhattacharyya, S., 2017. The Potential Applications of Satellite Altimetry with SARAL/AltiKa for Indian Inland Waters. *Proc. Natl. Acad. Sci. India Sect. A Phys. Sci.* 87, 661–677. <https://doi.org/10.1007/s40010-017-0463-5>

Giardino, C., Bresciani, M., Braga, F., Fabretto, A., Ghirardi, N., Pepe, M., Giannineto, M., Colombo, R., 2020. First evaluation of PRISMA Level 1 data for water applications. *Sensors (SUBMITTED)*. <https://doi.org/10.3390/s20164553>

Giddings, L., Choudhury, B.J., 1989. Observation of hydrological features with Nimbus-7 37 GHz data, applied to South America. *Int. J. Remote Sens.* 10, 1673–1686. <https://doi.org/10.1080/01431168908903998>

Giovannetone, J.P., Barros, A.P., 2009. Probing regional orographic controls of precipitation and cloudiness in the Central Andes using satellite data. *J. Hydrometeorol.* 10, 167–182. <https://doi.org/10.1175/2008JHM973.1>

Gleason, C.J., Durand, M.T., 2020. Remote sensing of river discharge: A review and a framing for the discipline. *Remote Sens.* 12, 1–28. <https://doi.org/10.3390/rs12071107>

Gloor, M., Brienen, R.J.W., Galbraith, D., Feldpausch, T.R., Schöngart, J., Guyot, J.-L., Espinoza, J.C., Lloyd, J., Phillips, O.L., 2013. Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophys. Res. Lett.* 40, 1729–1733. <https://doi.org/10.1002/grl.50377>

Gomis-Cebolla, J., Jimenez, J.C., Sobrino, J.A., Corbari, C., Mancini, M., 2019. Intercomparison of remote-sensing based evapotranspiration algorithms over amazonian forests. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 80, 280–294. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.009>

Gonçalves, L.G., Borak, J.S., Costa, M.H., Saleska, S.R., Baker, I., Restrepo-Coupe, N., Muza, M.N., Poulter, B., Verbeeck, H., Fisher, J.B., Arain, M.A., Arkin, P., Cestaro, B.P., Christoffersen, B., Galbraith, D., Guan, X., van den Hurk, B.J.J.M., Ichii, K., Imbuzeiro, H.M.A., Jain, A.K., Levine, N., Lu, C., Miguez-Macho, G., Roberti, D.R., Sahoo, A., Sakaguchi, K., Schaefer, K., Shi, M., Shuttleworth, W.J., Tian, H., Yang, Z.L., Zeng, X., 2013. Overview of the large-scale biosphere-atmosphere experiment in amazonia data model intercomparison project (LBA-DMIP). *Agric. For. Meteorol.* 182–183, 111–127. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.030>

Gosset, M., Kunstmann, H., Zougmore, F., Cazenave, F., Leijnse, H., Uijlenhoet, R., Chwala, C., Keis, F., Doumounia, A., Boubacar, B., Kacou, M., Alpert, P., Messer, H., Rieckermann, J., Hoedjes, J., 2016. Improving rainfall measurement in gauge poor regions thanks to mobile telecommunication networks. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 97, ES49–ES51. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00164.1>

Gruber, A., Krueger, A.F., 1984. The status of the NOAA outgoing longwave radiation data set. *Bull. - Am. Meteorol. Soc.* 65, 958–962. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1984\)065<0958:TSOTNO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1984)065<0958:TSOTNO>2.0.CO;2)

Guilhen, J., Al Bitar, A., Sauvage, S., Parrens, M., Martinez, J.-M., Abril, G., Moreira-Turcq, P., Sánchez-Pérez, J.-M., 2020. Denitrification and associated nitrous oxide and carbon dioxide emissions from the Amazonian wetlands. *Biogeosciences* 17, 4297–4311. <https://doi.org/10.5194/bg-17-4297-2020>

Guimberteau, M., Ciais, P., Ducharne, A., Boisier, J.P., Dutra Aguiar, A.P., Biemans, H., De Deurwaerder, H., Galbraith, D., Kruijt, B., Langerwisch, F., Poveda, G., Rammig, A., Rodriguez, D.A., Tejada, G., Thonicke, K., Von Randow, C., Von Randow, R.C.S., Zhang, K., Verbeek, H., 2017. Impacts of future deforestation and climate change on the hydrology of the Amazon Basin: a multi-model analysis with a new set of land-cover change scenarios. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 1455–1475. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1455-2017>

Guimberteau, M., Drapeau, G., Ronchail, J., Sultan, B., Polcher, J., Martinez, J.M., Prigent, C., Guyot, J.L., Cochonneau, G., Espinoza, J.C., Filizola, N., Fraizy, P., Lavado, W., De Oliveira, E., Pombosa, R., Noriega, L., Vauchel, P., 2012. Discharge simulation in the sub-basins of the Amazon using ORCHIDEE forced by new datasets. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 911–935. <https://doi.org/10.5194/hess-16-911-2012>

Guimberteau, M., Ducharne, A., Ciais, P., Boisier, J.P., Peng, S., De Weirtd, M., Verbeek, H., 2014. Testing conceptual and physically based soil hydrology schemes against observations for the Amazon Basin. *Geosci. Model Dev.* 7, 1115–1136. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1115-2014>

Gutierrez-Cori, O., Espinoza, J.C., Li, L.Z.X., Wongchuig, S., Arias, P.A., Ronchail, J., Segura, H., 2021. On the Hydroclimate-Vegetation Relationship in the Southwestern Amazon During the 2000–2019 Period. *Front. Water* 3, 1–20. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.648499>

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.

Haghtalab, N., Moore, N., Heerspink, B.P., Hyndman, D.W., 2020. Evaluating spatial patterns in precipitation trends across the Amazon basin driven by land cover and global scale forcings. *Theor. Appl. Climatol.* <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03085-3>

Hall, A.C., Schumann, G.J., Bamber, J.L., Bates, P.D., Trigg, M.A., 2012. Geodetic corrections to Amazon River water level gauges using ICESat altimetry 48. <https://doi.org/10.1029/2011WR010895>

Hall, A.C., Schumann, G.J.P., Bamber, J.L., Bates, P.D., 2011. Tracking water level changes of the Amazon Basin with space-borne remote sensing and integration with large scale hydrodynamic modelling: A review. *Phys. Chem. Earth* 36, 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.12.010>

Hamilton, S.K., Kellendorfer, J., Lehner, B., Tobler, M., 2007. Remote sensing of floodplain geomorphology as a surrogate for biodiversity in a tropical river system (Madre de Dios, Peru). *Geomorphology* 89,

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). *Hydrol. Process.* 18, 2103–2116. <https://doi.org/10.1002/hyp.5559>

Hamilton, S.K., Sippel, S.J., Melack, J.M., 2002. Comparison of inundation patterns among major South American floodplains. *J. Geophys. Res. Atmos.* 107, 1–14. <https://doi.org/10.1029/2000JD000306>

Hansen, M.C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S.J., Loveland, T.R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C.O., Townshend, J.R.G., 2013. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science* (80-. ). 342, 850–854. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>

Hastie, A., Lauerwald, R., Ciais, P., Regnier, P., 2019. Aquatic carbon fluxes dampen the overall variation of net ecosystem productivity in the Amazon basin: An analysis of the interannual variability in the boundless carbon cycle. *Glob. Chang. Biol.* 25, 2094–2111. <https://doi.org/10.1111/gcb.14620>

Heerspink, B.P., Kendall, A.D., Coe, M.T., Hyndman, D.W., 2020. Trends in streamflow, evapotranspiration, and groundwater storage across the Amazon Basin linked to changing precipitation and land cover. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 32, 100755. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100755>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.N., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1–51. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Hersbach, H., Rosnay, P. de, Bell, B., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Alonso-Balmaseda, M., Balsamo, G., Bechtold, P., Berrisford, P., Bidlot, J.-R., de Boissésón, E., Bonavita, M., Browne, P., Buizza, R., Dahlgren, P., Dee, D., Dragani, R., Diamantakis, M., Flemming, J., Forbes, R., Geer, A.J., Haiden, T., Hólm, E., Haimberger, L., Hogan, R., Horányi, A., Janiskova, M., Laloyaux, P., Lopez, P., Munoz-Sabater, J., Peubey, C., Radu, R., Richardson, D., Thépaut, J.-N., Vitart, F., Yang, X., Zsótér, E., Zuo, H., 2018. Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP, ERA Report Series, ERA Report.

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, 745–756. <https://doi.org/10.1007/s13157-015-0666-y>

Hess, L.L., Melack, J.M., Melack, J.M., Filoso, S., Wang, Y., Wang, Y., 1995. Delineation of Inundated Area and Vegetation Along the Amazon Floodplain with the SIR-C Synthetic Aperture Radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 33, 896–904. <https://doi.org/10.1109/36.406675>

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 Sens. Environ.* 87, 404–428. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.04.001>

Hess, L.L., Melack, J.M., Simonett, D.S., 1990. Radar detection of flooding beneath the forest canopy: A review. *Int. J. Remote Sens.* 11, 1313–1325. <https://doi.org/10.1080/01431169008955095>

Hoch, J.M., Haag, A. V., van Dam, A., Winsemius, H.C., van Beek, L.P.H., Bierkens, M.F.P., 2016. Assessing the impact of hydrodynamics on large-scale flood wave propagation - a case study for the Amazon Basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 1–25. <https://doi.org/10.5194/hess-2016-442>

Hodnett, M.G., Vendrame, I., De O. Marques Filho, A., Oyama, M.D., Tomasella, J., 1997. Soil water storage and groundwater behaviour in a catenary sequence beneath forest in central Amazonia: I. Comparisons between plateau, slope and valley floor. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 1, 265–277. <https://doi.org/10.5194/hess-1-265-1997>

Hoek, J. Van Den, Getirana, A., Jung, H.C., Okeowo, M.A., Lee, H., 2019. Monitoring reservoir drought dynamics with landsat and radar/lidar altimetry time series in persistently cloudy eastern Brazil. *Remote Sens.* 11. <https://doi.org/10.3390/rs11070827>

Holmes, T.R.H., Hain, C.R., Crow, W.T., Anderson, M.C., Kustas, W.P., 2018. Microwave implementation of two-source energy balance approach for estimating evapotranspiration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 1351–1369. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1351-2018>

Horel, J.D., Hahmann, A.N., Geisler, J.E., 1989. An investigation of the Annual Cycle of Convective Activity over the Tropical Americas. *J. Clim.* 2, 1388–1403. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1989\)002<1388:AIOTAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1989)002<1388:AIOTAC>2.0.CO;2)

Hu, K., Awange, J.L., Khandu, Forootan, E., Goncalves, R.M., Fleming, K., 2017. Hydrogeological characterisation of groundwater over Brazil using remotely sensed and model products. *Sci. Total Environ.* 599–600, 372–386. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.188>

Huang, C., Chen, Y., Zhang, S., Wu, J., 2018. Detecting, Extracting, and Monitoring Surface Water From Space Using Optical Sensors: A Review. *Rev. Geophys.* 56, 333–360. <https://doi.org/10.1029/2018RG000598>

Huffman, G.J., Adler, R.F., Arkin, P., Chang, A., Ferraro, R., Gruber, A., Janowiak, J., McNab, A., Rudolf, B., Schneider, U., 1997. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Combined Precipitation Dataset. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 78, 5–20. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0005:TGP\\_CPG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0005:TGP_CPG>2.0.CO;2)

Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Gu, G., Nelkin, E.J., Bowman, K.P., Hong, Y., Stocker, E.F., Wolff, D.B., 2007. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J. Hydrometeorol.* 8, 38–55. <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>

Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., 2010. The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA). Chapter 1 in *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7>

Huffman, G.J., Adler, R.F., Morrissey, M.M., Bolvin, D.T., Curtis, S., Joyce, R., McGavock, B., Susskind, J., 2001. Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. *J. Hydrometeorol.* 2, 36–50. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2001\)002<0036:GPAODD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2001)002<0036:GPAODD>2.0.CO;2)

Huffman, G.J., Adler, R.F., Rudolf, B., Schneider, U., Keehn, P.R., 1995. Global Precipitation Estimates Based on a Technique for Combining Satellite-Based Estimates, Rain Gauge Analysis, and NWP Model Precipitation Information. *J. Clim.* 8, 1284–1295. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1995\)008<1284:GPEBOA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<1284:GPEBOA>2.0.CO;2)

Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Adler, R.F., 2016. GPCP Version 1.2 One-Degree Daily Precipitation Data Set. <https://doi.org/10.5065/D6D50K46>

Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Xie, P., 2015a. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 4.5. NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG).

Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., 2015b. Integrated MultisatellitE Retrievals for GPM (IMERG) technical documentation.

Hurley, J. V., Vuille, M., Hardy, D.R., Burns, S.J., Thompson, L.G., 2015. Cold air incursions,  $\delta^{18}O$  variability, and monsoon dynamics associated with snow days at Quelccaya Ice Cap, Peru. *J. Geophys. Res. Atmos.* 120, 7467–7487. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2015JD023323>

Jardine, T.D., Bond, N.R., Burford, M.A., Kennard, M.J., Ward, D.P., Bayliss, P., Davies, P.M., Douglas, M.M., Hamilton, S.K., Melack, J.M., Naiman, R.J., Pettit, N.E., Pusey, B.J., Warfe, D.M., Bunn, S.E., 2015. Does flood rhythm drive ecosystem responses in tropical riverscapes? *Ecology* 96, 684–692. <https://doi.org/10.1890/14-0991.1>

Jensen, K., McDonald, K., Podest, E., Rodriguez-Alvarez, N., Horna, V., Steiner, N., 2018. Assessing L-Band GNSS-reflectometry and imaging radar for detecting sub-canopy inundation dynamics in a tropical wetlands complex. *Remote Sens.* 10, 1431. <https://doi.org/10.3390/rs10091431>

Ji, X., Lesack, L.F.W., Melack, J.M., Wang, S., Riley, W.J., Shen, C., 2019. Seasonal and inter-annual patterns and controls of hydrological fluxes in an Amazon floodplain lake with a surface-subsurface processes model. *Water Resour. Res.* 55, 3056–3075. <https://doi.org/10.1029/2018WR023897>

Jiang, L., Schneider, R., Andersen, O.B., Bauer-Gottwein, P., 2017. CryoSat-2 altimetry applications over rivers and lakes. *Water* 9, 211. <https://doi.org/10.3390/w9030211>

Jiang, S., Ren, L., Hong, Y., Yong, B., Yang, X., Yuan, F., Ma, M., 2012. Comprehensive evaluation of multi-satellite precipitation products with a dense rain gauge network and optimally merging their simulated hydrological flows using the Bayesian model averaging method. *J. Hydrol.* 452–453, 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.055>

Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A., Mattar, C., Malhi, Y., 2013. Spatial and temporal patterns of the recent warming of the Amazon forest. *J. Geophys. Res. Atmos.* 118, 5204–5215. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50456>

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. *Int. J. Climatol.* 1–20. <https://doi.org/10.1002/joc.6453>

Jorge, D.S.F., Barbosa, C.C.F., de Carvalho, L.A.S., Affonso, A.G., Lobo, F.D.L., Novo, E.M.L.D.M., 2017. SNR (Signal-To-Noise Ratio) Impact on Water Constituent Retrieval from Simulated Images of Optically Complex Amazon Lakes. *Remote Sens.* 9, 644. <https://doi.org/10.3390/rs9070644>

Jorge, D.S.F., Loisel, H., Jamet, C., Dessailly, D., Demaria, J., Bricaud, A., Maritorena, S., Zhang, X., Antoine, D., Kutser, T., Bélanger, S., Brando, V.O., Werdell, J., Kwiatkowska, E., Mangin, A., D'Andon, O.F., 2021. A three-step semi analytical algorithm (3SAA) for estimating inherent optical properties over oceanic, coastal, and inland waters from remote sensing reflectance. *Remote Sens. Environ.* 263. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112537>

Josse, C., Navarro, G., Encarnación, F., Tovar, A., Comer, P., Ferreira, W., Rodríguez, F., Saito, J., Sanjurjo, J., Dyson, J., Celis, E.R. de, Zárate, R., Chang, J., Ahuite, M., Vargas, C., Paredes, F., Castro, W., Maco, J., Reátegui, F., 2007. Ecological Systems of the Amazon Basin of Peru and Bolivia: Classification and Mapping. NatureServe, Virginia.

Joyce, R.J., Janowiak, J.E., Arkin, P.A., Xie, P., 2004. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *J. Hydrometeorol.* 5, 487–503. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2)

Joyce, R.J., Xie, P., 2011. Kalman filter-based CMORPH. *J. Hydrometeorol.* 12, 1547–1563. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-022.1>

Jung, H.C., Hamski, J., Durand, M., Alsdorf, D., Hossain, F., Lee, H., Azad Hossain, A.K.M.M., Hasan, K., Khan, A.S., Zeaul Hoque, A.K.M.M., 2010. Characterization of complex fluvial systems using remote sensing of spatial and temporal water level variations in the Amazon, Congo, and Brahmaputra rivers. *Earth Surf. Process. Landforms* 35, 294–304. <https://doi.org/10.1002/esp.1914>

Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P., Seneviratne, S.I., Sheffield, J., Goulden, M.L., Bonan, G., Cescatti, A., Chen, J., De Jeu, R., Dolman, A.J., Eugster, W., Gerten, D., Gianelle, D., Gobron, N., Heinke, J., Kimball, J., Law, B.E., Montagnani, L., Mu, Q., Mueller, B., Oleson, K., Papale, D., Richardson, A.D., Rouspard, O., Running, S., Tomelleri, E., Viovy, N., Weber, U., Williams, C., Wood, E., Zaehle, S., Zhang, K., 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature* 467, 951–954. <https://doi.org/10.1038/nature09396>

Júnior, J.L.S., Tomasella, J., Rodríguez, D.A., 2015. Impacts of future climatic and land cover changes on the hydrological regime of the Madeira River basin. *Clim. Change* 129, 117–129. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1338-x>

Junk, W.J., 1997. The Central Amazon Floodplain: ecology of a pulsing system., *Ecological Studies*. Springer-Verlag, Berlin.

Junk, W.J., Bayley, P.B., Sparks, R.E., 1989. The flood pulse concept in river-floodplain-systems. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 106, 110–127. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0028909>

Junk, W.J., Piedade, M.T.F., Schöngart, J., Cohn-Haft, M., Adeney, J.M., Wittmann, F., 2011. A classification of major naturally-occurring amazonian lowland wetlands. *Wetlands* 31, 623–640. <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0190-7>

Junk, W.J., Piedade, M.T.F., Wittmann, F., Schöngart, J., Parolin, P., 2010. Amazonian Floodplain Forests: Ecophysiology, ecology, biodiversity and sustainable management, *Ecological Studies*. Springer, Berlin, Germany. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-8725-6>

Junk, W.J., Wittmann, F., Schöngart, J., Piedade, M.T.F., 2015. A classification of the major habitats of



Amazonian black-water river floodplains and a comparison with their white-water counterparts. *Wetl. Ecol. Manag.* 23, 677–693. <https://doi.org/10.1007/s11273-015-9412-8>

Junquas, C., Takahashi, K., Condom, T., Espinoza, J.C., Chavez, S., Sicart, J.E., Lebel, T., 2018. Understanding the influence of orography on the precipitation diurnal cycle and the associated atmospheric processes in the central Andes. *Clim. Dyn.* 50, 3995–4017. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3858-8>

Kandus, P., Minotti, P.G., Morandeira, N.S., Grimson, R., Trilla, G.G., González, E.B., Martín, L.S., Gayol, M.P., 2018. Remote sensing of wetlands in South America: Status and challenges. *Int. J. Remote Sens.* 39, 993–1016. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1395971>

Kasischke, E.S., Melack, J.M., Dobson, M.C., 1997. The use of imaging radars for ecological applications - A review. *Remote Sens. Environ.* 59, 141–156. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00148-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00148-4)

Khaki, M., Forootan, E., Kuhn, M., Awange, J., Longuevergne, L., Wada, Y., 2018. Efficient basin scale filtering of GRACE satellite products. *Remote Sens. Environ.* 204, 76–93. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.040>

Khaki, M., Hoteit, I., Kuhn, M., Forootan, E., Awange, J., 2019. Assessing data assimilation frameworks for using multi-mission satellite products in a hydrological context. *Sci. Total Environ.* 647, 1031–1043. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.032>

Khand, K., Numata, I., Kjaersgaard, J., Vourlitis, G.L., 2017. Dry season evapotranspiration dynamics over human-impacted landscapes in the southern Amazon using the landsat-based METRIC model. *Remote Sens.* 9. <https://doi.org/10.3390/rs9070706>

Khanna, J., Medvigy, D., Fueglistaler, S., Walko, R., 2017. Regional dry-season climate changes due to three decades of Amazonian deforestation. *Nat. Clim. Chang.* 7, 200–204. <https://doi.org/10.1038/nclimate3226>

Kidd, C., 2001. Satellite rainfall climatology: A review. *Int. J. Climatol.* 21, 1041–1066. <https://doi.org/10.1002/joc.635>

Kidd, C., Becker, A., Huffman, G.J., Muller, C.L., Joe, P., Skofronick-Jackson, G., Kirschbaum, D.B., 2017. So, How Much of the Earth's Surface Is Covered by Rain Gauges? *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 98, 69–78. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00283.1>

Kidd, C., Huffman, G., 2011. Global precipitation measurement. *Meteorol. Appl.* 18, 334–353. <https://doi.org/10.1002/met.284>

Kidd, C., Kniveton, D.R., Todd, M.C., Bellerby, T.J., 2003. Satellite Rainfall Estimation Using Combined Passive Microwave and Infrared Algorithms. *J. Hydrometeorol.* 4, 1088–1104. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)004<1088:SREUCP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004<1088:SREUCP>2.0.CO;2)

Kidd, C., Levizzani, V., 2011. Status of satellite precipitation retrievals. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 1109–1116. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1109-2011>

Kiladis, G.N., Mo, K.C., 1998. Interannual and Intraseasonal Variability in the Southern Hemisphere, in: Karoly, D.J., Vincent, D.G. (Eds.), *Meteorology of the Southern Hemisphere*. American Meteorological

Society, Boston, MA, p. 307–336. [https://doi.org/10.1007/978-1-935704-10-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-935704-10-2_11)

Kilham, N.E., Roberts, D., 2011. Amazon river time series of surface sediment concentration from MODIS. *Int. J. Remote Sens.* 32, 2659–2679. <https://doi.org/10.1080/01431161003713044>

Killeen, T.J., Douglas, M., Consiglio, T., Jørgensen, P.M., Mejia, J., 2007. Dry spots and wet spots in the Andean hotspot. *J. Biogeogr.* 34, 1357–1373. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01682.x>

Kim, D., Lee, H., Beighley, E., Tshimanga, R.M., 2021. Estimating discharges for poorly gauged river basin using ensemble learning regression with satellite altimetry data and a hydrologic model. *Adv. Sp. Res.* 68, 607–618. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.08.018>

Kim, D., Lee, H., Laraque, A., Tshimanga, R.M., Yuan, T., Jung, H.C., Beighley, E., Chang, C.-H., 2017. Mapping spatio-temporal water level variations over the central Congo River using PALSAR ScanSAR and Envisat altimetry data. *Int. J. Remote Sens.* 38, 7021–7040. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1371867>

Kim, D., Yu, H., Lee, H., Beighley, E., Durand, M., Alsdorf, D.E., Hwang, E., 2019. Ensemble learning regression for estimating river discharges using satellite altimetry data: Central Congo River as a Test-bed. *Remote Sens. Environ.* 221, 741–755. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.010>

Kirschke, S., Bousquet, P., Ciais, P., Saunois, M., Canadell, J.G., Dlugokencky, E.J., Bergamaschi, P., Bergmann, D., Blake, D.R., Bruhwiler, L., Cameron-Smith, P., Castaldi, S., Chevallier, F., Feng, L., Fraser, A., Heimann, M., Hodson, E.L., Houweling, S., Josse, B., Fraser, P.J., Krummel, P.B., Lamarque, J.F., Langenfelds, R.L., Le Quéré, C., Naik, V., O’Doherty, S., Palmer, P.I., Pison, I., Plummer, D., Poulter, B., Prinn, R.G., Rigby, M., Ringeval, B., Santini, M., Schmidt, M., Shindell, D.T., Simpson, I.J., Spahni, R., Steele, L.P., Strode, S.A., Sudo, K., Szopa, S., Van Der Werf, G.R., Voulgarakis, A., Van Weele, M., Weiss, R.F., Williams, J.E., Zeng, G., 2013. Three decades of global methane sources and sinks. *Nat. Geosci.* 6, 813–823. <https://doi.org/10.1038/ngeo1955>

Klein, I., Dietz, A., Gessner, U., Dech, S., Kuenzer, C., 2015. Results of the Global WaterPack: A novel product to assess inland water body dynamics on a daily basis. *Remote Sens. Lett.* 6. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.1002945>

Knapp, K.R., Ansari, S., Bain, C.L., Bourassa, M.A., Dickinson, M.J., Funk, C., Helms, C.N., Hennon, C.C., Holmes, C.D., Huffman, G.J., Kossin, J.P., Lee, H.T., Loew, A., Magnusdottir, G., 2011. Globally Gridded Satellite observations for climate studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 92, 893–907. <https://doi.org/10.1175/2011BAMS3039.1>

Koblinsky, C.J., Clarke, R.T., Brenner, A.C., Frey, H., 1993. Measurement of river level variations with satellite altimetry. *Water Resour. Res.* 29, 1839–1848. <https://doi.org/10.1029/93WR00542>

Kolassa, J., Gentine, P., Prigent, C., Aires, F., 2016. Soil moisture retrieval from AMSR-E and ASCAT microwave observation synergy. Part 1: Satellite data analysis. *Remote Sens. Environ.* 173, 1–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.011>

Koren, I., Martins, J. V., Remer, L.A., Afargan, H., 2008. Smoke Invigoration Versus Inhibition of Clouds over the Amazon. *Science* (80-. ). 321, 946–949. <https://doi.org/10.1126/science.1159185>

Kosuth, P., Callede, J., Laraque, A., Filizola, N., Guyot, J.L., Seyler, P., Fritsch, J.M., Guimaraes, V., 2009.

Sea-tide effects on flows in the lower reaches of the Amazon River. *Hydrol. Process.* 23, 3141–3150. <https://doi.org/10.1002/hyp.7387>

Kumar, S., Del Castillo-Velarde, C., Prado, J.M.V., Rojas, J.L.F., Gutierrez, S.M.C., Alvarez, A.S.M., Martine-Castro, D., Silva, Y., 2020. Rainfall characteristics in the mantaro basin over tropical andes from a vertically pointed profile rain radar and in-situ field campaign. *Atmosphere (Basel)*. 11. <https://doi.org/10.3390/atmos11030248>

Kustas, W.P., Norman, J.M., 1999. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover, *Agricultural and Forest Meteorology*.

Kutser, T., Pascual, G.C., Barbosa, C., Paavel, B., 2016. Mapping inland water carbon content with Landsat 8 data. *Int. J. Remote Sens.* ISSN. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1186852>

Kvist, L.P., Nebel, G., 2001. A review of Peruvian flood plain forests: Ecosystems, inhabitants and resource use. *For. Ecol. Manage.* 150, 3–26. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00679-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00679-4)

Laipeit, L., Ruhoff, A.L., Fleischmann, A.S., Bloedow Kayser, R.H., Kich, E. de M., Rocha, H.R. da, Usher Neale, C.M., 2020. Assessment of an automated calibration of the SEBAL Algorithm to estimate dry-season surface-energy partitioning in a Forest-Savanna Transition in Brazil. *Remote Sens.* 12. <https://doi.org/10.3390/rs12071108>

Landerer, F.W., Flechtner, F.M., Save, H., Webb, F.H., Bandikova, T., Bertiger, W.I., Bettadpur, S. V., Byun, S.H., Dahle, C., Dobslaw, H., Fahnestock, E., Harvey, N., Kang, Z., Kruizinga, G.L.H., Loomis, B.D., McCullough, C., Murböck, M., Nagel, P., Paik, M., Pie, N., Poole, S., Strelakov, D., Tamisiea, M.E., Wang, F., Watkins, M.M., Wen, H.Y., Wiese, D.N., Yuan, D.N., 2020. Extending the Global Mass Change Data Record: GRACE Follow-On Instrument and Science Data Performance. *Geophys. Res. Lett.* 47. <https://doi.org/10.1029/2020GL088306>

Laranjeiras, T.O., Naka, L.N., Leite, G.A., Cohn-Haft, M., 2021. Effects of a major Amazonian river confluence on the distribution of floodplain forest avifauna. *J. Biogeogr.* 1–14. <https://doi.org/10.1111/jbi.14042>

Latrubesse, E.M., 2012. Amazon lakes, in: Bengtsson, L., Herschy, R.W., Fairbridge, R.W. (Eds.), *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*. Springer Verlag, p. 13–26. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4410-6>

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. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/nature22333>

Latrubesse, E.M., Franzinelli, E., 2002. The Holocene alluvial plain of the middle Amazon River, Brazil. *Geomorphology* 44, 241–257. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00177-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00177-5)

Lauerwald, R., Regnier, P., Guenet, B., Friedlingstein, P., Ciais, P., 2020. How Simulations of the Land Carbon Sink Are Biased by Ignoring Fluvial Carbon Transfers: A Case Study for the Amazon Basin. *One Earth* 3, 226–236. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.009>

Laurance, W.F., Bruce Williamson, G., 2001. Positive feedbacks among forest fragmentation, drought, and climate change in the Amazon. *Conserv. Biol.* 15, 1529–1535. <https://doi.org/10.1046/j.1523->

Lawrence, D., Vandecar, K., 2015. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. *Nat. Clim. Chang.* 5, 27–36. <https://doi.org/10.1038/nclimate2430>

Lee, H., Beighley, R.E., Alsdorf, D., Jung, H.C., Shum, C.K., Duan, J., Guo, J., Yamazaki, D., Andreadis, K., 2011. Characterization of terrestrial water dynamics in the Congo Basin using GRACE and satellite radar altimetry. *Remote Sens. Environ.* 115, 3530–3538. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.015>

Lee, H., Yuan, T., Jung, H.C., Beighley, E., 2015. Mapping wetland water depths over the central Congo Basin using PALSAR ScanSAR, Envisat altimetry, and MODIS VCF data. *Remote Sens. Environ.* 159, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.030>

Lee, H., Yuan, T., Yu, H., Jung, H.C., 2020. Interferometric SAR for Wetland Hydrology: An Overview of Methods, Challenges, and Trends. *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.* 8, 120–135. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2019.2958653>

Lee, Z.-P., Shang, S., Lin, G., Chen, J., Doxaran, D., 2016. On the modeling of hyperspectral remote-sensing reflectance of high-sediment-load waters in the visible to shortwave-infrared domain. *Appl. Opt.* 55, 1738–1750. <https://doi.org/10.1364/AO.55.001738>

LeFavour, G., Alsdorf, D., 2005. Water slope and discharge in the Amazon River estimated using the shuttle radar topography mission digital elevation model. *Geophys. Res. Lett.* 32, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2005GL023836>

Legresy, B., Papa, F., Remy, F., Vinay, G., Van Den Bosch, M., Zanife, O.Z., 2005. ENVISAT radar altimeter measurements over continental surfaces and ice caps using the ICE-2 retracking algorithm. *Remote Sens. Environ.* 95, 150–163. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.018>

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. *Int. J. Climatol.* 40, 2328–2341. <https://doi.org/10.1002/joc.6335>

Leite-Filho, A.T., Pontes, V.Y. de S., Costa, M.H., 2019. Effects of Deforestation on the Onset of the Rainy Season and the Duration of Dry Spells in Southern Amazonia. *J. Geophys. Res. Atmos.* 124, 5268–5281. <https://doi.org/10.1029/2018JD029537>

Leite-Filho, A.T., Soares-Filho, B.S., Davis, J.L., Abrahão, G.M., Börner, J., 2021. Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. *Nat. Commun.* 12, 2591. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22840-7>

Leite, C.C., Costa, M.H., de Lima, C.A., Ribeiro, C.A.A.S., Sedyama, G.C., 2011. Historical reconstruction of land use in the Brazilian Amazon (1940–1995). *J. Land Use Sci.* 6, 33–52. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2010.501157>

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 Biogeochem. Cycles* 26. <https://doi.org/10.1029/2011GB004133>

- Lenters, J.D., Cook, K.H., 1997. On the origin of the Bolivian high and related circulation features of the South American climate. *J. Atmos. Sci.* 54, 656–677. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054<0656:ootoot>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054<0656:ootoot>2.0.co;2)
- Leon, J.G., Calmant, S., Seyler, F., Bonnet, M.P., Cauhopé, M., Frappart, F., Filizola, N., Fraizy, P., 2006. Rating curves and estimation of average water depth at the upper Negro River based on satellite altimeter data and modeled discharges. *J. Hydrol.* 328, 481–496. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.12.006>
- Lesack, F.W., Melack, J.M., 1995. Flooding hydrology and mixture dynamics of lakewater derived from multiple sources in an Amazon floodplain lake. *Water Resour. Res.* 31, 329–345.
- Leuning, R., Zhang, Y.Q., Rajaud, A., Cleugh, H., Tu, K., 2008. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation. *Water Resour. Res.* 44. <https://doi.org/10.1029/2007WR006562>
- Levizzani, V., Cattani, E., 2019. Satellite remote sensing of precipitation and the terrestrial water cycle in a changing climate. *Remote Sens.* <https://doi.org/10.3390/rs11192301>
- Levizzani, V., Laviola, S., Cattani, E., 2011. Detection and measurement of snowfall from space. *Remote Sens.* 3, 145–166. <https://doi.org/10.3390/rs3010145>
- Levizzani, V., Porcú, F., Marzano, F.S., Mugnai, A., Smith, E.A., Prodi, F., 2007. Investigating a SSM/I microwave algorithm to calibrate Meteosat infrared instantaneous rainrate estimates. *Meteorol. Appl.* 3, 5–17. <https://doi.org/10.1002/met.5060030102>
- Levy, M.C., Lopes, A. V., Cohn, A., Larsen, L.G., Thompson, S.E., 2018. Land use change increases streamflow across the arc of deforestation in Brazil. *Geophys. Res. Lett.* 3520–3530. <https://doi.org/10.1002/2017GL076526>
- Lewin, J., Ashworth, P.J., Strick, R.J.P., 2017. Spillage sedimentation on large river floodplains. *Earth Surf. Process. Landforms* 42, 290–305. <https://doi.org/10.1002/esp.3996>
- Lewis, S.L., Brando, P.M., Phillips, O.L., Van Der Heijden, G.M.F., Nepstad, D., 2011. The 2010 Amazon drought. *Science* (80-. ). 331, 554. <https://doi.org/10.1126/science.1200807>
- 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, 104804. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104804>
- Liang, Y.C., Lo, M.H., Lan, C.W., Seo, H., Ummenhofer, C.C., Yeager, S., Wu, R.J., Steffen, J.D., 2020. Amplified seasonal cycle in hydroclimate over the Amazon river basin and its plume region. *Nat. Commun.* 11, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18187-0>
- Libonati, R., Pereira, J.M.C., Da Camara, C.C., Peres, L.F., Oom, D., Rodrigues, J.A., Santos, F.L.M., Trigo, R.M., Gouveia, C.M.P., Machado-Silva, F., Enrich-Prast, A., Silva, J.M.N., 2021. Twenty-first century droughts have not increasingly exacerbated fire season severity in the Brazilian Amazon. *Sci. Rep.* 11, 4400. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82158-8>
- Liebmann, B., Smith, C.A., 1996. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*

- Lima, Leticia S., Coe, M.T., Soares Filho, B.S., Cuadra, S. V., Dias, L.C.P., Costa, M.H., Lima, Leandro S., Rodrigues, H.O., 2014. Feedbacks between deforestation, climate, and hydrology in the Southwestern Amazon: Implications for the provision of ecosystem services. *Landsc. Ecol.* 29, 261–274. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9962-1>
- Lin, J.C., Matsui, T., Pielke, R.A., Kummerow, C., 2006. Effects of biomass-burning-derived aerosols on precipitation and clouds in the Amazon Basin: a satellite-based empirical study. *J. Geophys. Res.* 111, D19204. <https://doi.org/10.1029/2005JD006884>
- Liu, X., Yang, T., Hsu, K., Liu, C., Sorooshian, S., 2017. Evaluating the streamflow simulation capability of PERSIANN-CDR daily rainfall products in two river basins on the Tibetan Plateau. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 169–181. <https://doi.org/10.5194/hess-21-169-2017>
- Liu, Y.Y., Parinussa, R.M., Dorigo, W.A., De Jeu, R.A.M., Wagner, W., van Dijk, A.I.J.M., McCabe, M.F., Evans, J.P., 2011. Developing an improved soil moisture dataset by blending passive and active microwave satellite-based retrievals. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 425–436. <https://doi.org/10.5194/hess-15-425-2011>
- Llaura, H., Lavado-Casimiro, W., León, K., Jimenez, J., Traverso, K., Rau, P., 2021. Assessing Near Real-Time Satellite Precipitation Products for Flood Simulations at Sub-Daily Scales in a Sparsely Gauged Watershed in Peruvian Andes. *Remote Sens.* 13, 826. <https://doi.org/10.3390/rs13040826>
- Lobo, F., Costa, M., Novo, E., Telmer, K., 2016. Distribution of Artisanal and Small-Scale Gold Mining in the Tapajós River Basin (Brazilian Amazon) over the Past 40 Years and Relationship with Water Siltation. *Remote Sens.* 8, 579. <https://doi.org/10.3390/rs8070579>
- 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 Sens. Environ.* 157, 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.030>
- Lobo, F., Novo, E.M.L. de M., Barbosa, C.C.F., Galvão, L.S., 2012. Reference spectra to classify Amazon water types. *Int. J. Remote Sens.* 33, 3422–3442. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.627391>
- Lobo, F., Souza-Filho, P.W.M., Novo, E.M.L. de M., Carlos, F.M., Barbosa, C.C.F., 2018. Mapping mining areas in the Brazilian amazon using MSI/Sentinel-2 imagery (2017). *Remote Sens.* 10. <https://doi.org/10.3390/rs10081178>
- Lobón-Cervía, 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>
- Lopes, A. V., Chiang, J.C.H., Thompson, S.A., Dracup, J.A., 2016. Trend and uncertainty in spatial-temporal patterns of hydrological droughts in the Amazon basin. *Geophys. Res. Lett.* 43, 3307–3316. <https://doi.org/10.1002/2016GL067738>
- Lopez, T., Al Bitar, A., Biancamaria, S., Güntner, A., Jäggi, A., 2020. On the Use of Satellite Remote Sensing to Detect Floods and Droughts at Large Scales. *Surv. Geophys.* <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09618-0>
- Luo, X., Li, H.Y., Ruby Leung, L., Tesfa, T.K., Getirana, A., Papa, F., Hess, L.L., 2017. Modeling surface

water dynamics in the Amazon Basin using MOSART-Inundation v1.0: Impacts of geomorphological parameters and river flow representation. *Geosci. Model Dev.* 10, 1233–1259. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1233-2017>

Luz-Agostinho, K.D.G., Agostinho, A.A., Gomes, L.C., Júlio-Jr., H.F., Fugi, R., 2009. Effects of flooding regime on the feeding activity and body condition of piscivorous fish in the Upper Paraná River floodplain. *Brazilian J. Biol.* 69, 481–490. <https://doi.org/10.1590/s1519-69842009000300004>

Maciel, D.A., Barbosa, C.C.F., Novo, E.M.L. de M., Cherukuru, N., Martins, V.S., Flores Júnior, R., Jorge, D.S., Sander de Carvalho, L.A., Carlos, F.M., 2020a. Mapping of diffuse attenuation coefficient in optically complex waters of amazon floodplain lakes. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 170, 72–87. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.10.009>

Maciel, D.A., Novo, E., Sander de Carvalho, L., Barbosa, C., Flores Júnior, R., de Lucia Lobo, F., de Carvalho, L.S., Barbosa, C., Júnior, R.F., Lobo, F.L., 2019. Retrieving Total and Inorganic Suspended Sediments in Amazon Floodplain Lakes: A Multisensor Approach. *Remote Sens.* 11, 1744. <https://doi.org/10.3390/rs11151744>

Maciel, D.A., Novo, E.M.L. de M., Barbosa, C.C.F.C.F.C., Martins, V.S., Flores Júnior, R., Oliveira, A.H., Sander de Carvalho, L.A., Lobo, F. de L., de Carvalho, L., Lobo, F. de L., Márcia, E., Moraes, L. De, Barbosa, C.C.F.C.F.C., Martins, V.S., Júnior, R.F., Oliveira, H., Augusto, L., Carvalho, S. De, Lobo, F. de L., Novo, E.M.L. de M., Barbosa, C.C.F.C.F.C., Martins, V.S., Júnior, R.F., Oliveira, A.H., Sander de Carvalho, L.A., Lobo, F. de L., 2020b. Evaluating the potential of CubeSats for remote sensing reflectance retrieval over inland waters. *Int. J. Remote Sens.* 41, 2807–2817. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2019.1697003>

Madden, R.A., Julian, P.R., 1994. Observations of the 40–50-Day Tropical Oscillation—A Review. *Mon. Weather Rev.* 122, 814–837. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0814:OOTDTP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0814:OOTDTP>2.0.CO;2)

Maeda, E.E., Kim, H., Aragão, L.E.O.C., Famiglietti, J.S., Oki, T., 2015. Disruption of hydroecological equilibrium in southwest Amazon mediated by drought. *Geophys. Res. Lett.* 42, 7546–7553. <https://doi.org/10.1002/2015GL065252>

Maeda, E.E., Ma, X., Wagner, F.H., Kim, H., Oki, T., Eamus, D., Huete, A., 2017. Evapotranspiration seasonality across the Amazon Basin. *Earth Syst. Dyn.* 8, 439–454. <https://doi.org/10.5194/esd-8-439-2017>

Manz, B., Páez-Bimos, S., Horna, N., Buytaert, W., Ochoa-Tocachi, B., Lavado-Casimiro, W., Willems, B., 2017. Comparative ground validation of IMERG and TMPA at variable spatiotemporal scales in the tropical Andes. *J. Hydrometeorol.* 18, 2469–2489. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0277.1>

Marengo, J.A., 2005. Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon river basin water budget. *Clim. Dyn.* 24, 11–22. <https://doi.org/10.1007/s00382-004-0461-6>

Marengo, J.A., Espinoza, J.C., 2016. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. *Int. J. Climatol.* 36, 1033–1050. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>

Marengo, J.A., Nobre, C.A., Tomasella, J., Cardoso, M.F., Oyama, M.D., 2008. Hydro-climatic and ecological behaviour of the drought of Amazonia in 2005. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 363, 1773–1778. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.0015>

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. *Front. Earth Sci.* <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>

Marengo, J.A., Tomasella, J., Alves, L.M., Soares, W.R., Rodriguez, D.A., 2011. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophys. Res. Lett.* 38, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2011GL047436>

Marinho, R.R., Filizola Junior, N.P., Cremon, É.H., 2020. Analysis of Suspended Sediment in the Anavilhanas Archipelago, Rio Negro, Amazon Basin. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w12041073>

Marinho, R.R., Harmel, T., Martinez, J.M., Junior, N.P.F., 2021. Spatiotemporal dynamics of suspended sediments in the negro river, amazon basin, from in situ and sentinel-2 remote sensing data. *ISPRS Int. J. Geo-Information* 10. <https://doi.org/10.3390/ijgi10020086>

Marinho, T., Filizola, N., Martinez, J.M., Armijos, E., Nascimento, A., 2018. Suspended sediment variability at the Solimões and negro confluence between May 2013 and February 2014. *Geosci.* 8. <https://doi.org/10.3390/geosciences8070265>

Martens, B., Miralles, D.G., Lievens, H., Van Der Schalie, R., De Jeu, R.A.M., Fernández-Prieto, D., Beck, H.E., Dorigo, W.A., Verhoest, N.E.C., 2017. GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geosci. Model Dev.* 10, 1903–1925. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1903-2017>

Martinez, J., Espinoza-villar, R., Armijos, E., Moreira, L.S., 2015. The optical properties of river and floodplain waters in the Amazon River Basin: Implications for satellite-based measurements of suspended particulate matter - Supplementary material. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 1, 1–11. <https://doi.org/10.1002/2014JF003404>. Received

Martinez, J.A., Dominguez, F., 2014. Sources of Atmospheric Moisture for the La Plata River Basin\*. *J. Clim.* 27, 6737–6753. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00022.s1>

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, 257–264. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.011>

Marzano, F.S., Member, S., Palmacci, M., Cimini, D., Giuliani, G., Turk, F.J., 2004. Multivariate Statistical Integration of Satellite Infrared and Microwave Radiometric Measurements for Rainfall Retrieval at the Geostationary Scale 42, 1018–1032.

Massari, C., 2020. GPM+SM2RAIN (2007-2018): quasi-global 25km/daily rainfall product from the integration of GPM and SM2RAIN-based rainfall products. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3854817>

Massari, C., Brocca, L., Tarpanelli, A., Moramarco, T., 2015. Data assimilation of satellite soil moisture into rainfall-runoffmodelling: A complex recipe?, *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs70911403>

Matthews, E., Fung, I., 1987. Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources. *Global Biogeochem. Cycles* 1, 61–86. <https://doi.org/10.1029/GB001i001p00061>



Matthews, M.W., 2011. A current review of empirical procedures of remote sensing in Inland and near-coastal transitional waters. *Int. J. Remote Sens.* 32, 6855–6899. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.512947>

Mayta, V.C., Ambrizzi, T., Espinoza, J.C., Silva Dias, P.L., 2019. The role of the Madden–Julian oscillation on the Amazon Basin intraseasonal rainfall variability. *Int. J. Climatol.* 39, 343–360. <https://doi.org/10.1002/joc.5810>

McCabe, M.F., Rodell, M., Alsdorf, D.E., Miralles, D.G., Uijlenhoet, R., Wagner, W., Lucieer, A., Houborg, R., Verhoest, N.E.C., Franz, T.E., Shi, J., Gao, H., Wood, E.F., 2017. The future of Earth observation in hydrology. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 3879–3914. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3879-2017>

McCorkel, J., Montanaro, M., Efremova, B., Pearlman, A., Wenny, B., Lunsford, A., Simon, A., Hair, J., Reuter, D., 2018. Landsat 9 Thermal Infrared Sensor 2 Characterization Plan Overview, in: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE*, Valencia, Spain, p. 8845–8848.

Meade, R.H., 1994. Suspended sediments of the modern Amazon and Orinoco rivers. *Quat. Int.* 21, 29–39. [https://doi.org/10.1016/1040-6182\(94\)90019-1](https://doi.org/10.1016/1040-6182(94)90019-1)

Melack, J.M., 2016. Aquatic ecosystems, in: Nagy, L., Artaxo, P., Forsberg, B.R. (Orgs.), *Interactions Between Biosphere, Atmosphere, and Human Land Use in the Amazon Basin*. Springer, p. 117–145. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-49902-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-49902-3_1)

Melack, J.M., Amaral, J.H.F., Kasper, D., Barbosa, P.M., Forsberg, B.R., 2021. Limnological perspectives on conservation of aquatic ecosystems in the Amazon basin. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 30. <https://doi.org/10.1002/aqc.3556>

Melack, J.M., Coe, M., 2021. Amazon floodplain hydrology and implications for aquatic conservation. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 31, 1029–1040.

Melack, J.M., Forsberg, B.R., 2001. The Biogeochemistry of the Amazon Floodplain Lakes and Associated Wetlands. *Biogeochem. Amaz. Basin its Role a Chang. World*.

Melack, J.M., Hess, L.L., 2010. Remote sensing of the distribution and extend of wetlands in the Amazon Basin, in: W., J., Piedade, M.T.F., Wittmann, F., Schöngart, J., Parolin, P. (Orgs.), *Amazonian Floodplain Forests: Ecophysiology, ecology, biodiversity and sustainable management*. Ecological Studies. Springer, Dordrecht, p. 43–59. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-8725-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-90-481-8725-6_3)

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. *Glob. Chang. Biol.* 10, 530–544. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00763.x>

Melack, J.M., Novo, E.M.L.M., Forsberg, B.R., Piedade, M.T.F.F., Maurice, L., 2009. Floodplain Ecosystem Processes. *Amaz. Glob. Chang.* 525–541. <https://doi.org/10.1029/2008GM000727>

Menenti, M., Choudhury, B.J., 1993. Parameterization of land surface evaporation by means of location dependent potential evaporation and surface temperature range, in: *Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales*. IAHS Publ, Yokohama, Japan, p. 561–568.

Mertes, L.A.K., 1997. Documentation and significance of the perirheic zone on inundated floodplains. *Water Resour. Res.* 33, 1749–1762. <https://doi.org/10.1029/97WR00658>

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, 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. *Bull. Geol. Soc. Am.* 108, 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 Sens. Environ.* 43, 281–301. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90071-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90071-5)

Michel, D., Jiménez, C., Miralles, D.G., Jung, M., Hirschi, M., Ershadi, A., Martens, B., McCabe, M.F., Fisher, J.B., Mu, Q., Seneviratne, S.I., Wood, E.F., Fernández-Prieto, D., 2016. The WACMOS-ET project - Part 1: Tower-scale evaluation of four remote-sensing-based evapotranspiration algorithms. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, 803–822. <https://doi.org/10.5194/hess-20-803-2016>

Miguez-Macho, G., Fan, Y., 2012. The role of groundwater in the Amazon water cycle: 1. Influence on seasonal streamflow, flooding and wetlands. *J. Geophys. Res. Atmos.* 117, 1–30. <https://doi.org/10.1029/2012JD017539>

Minnis, P., Harrison, E.F., 1984. Diurnal Variability of Regional Cloud and Clear-Sky Radiative Parameters Derived from GOES Data. Part II: November 1978 Cloud Distributions. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 23, 1012–1031. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<1012:DVORCA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<1012:DVORCA>2.0.CO;2)

Miralles, D.G., Holmes, T.R.H., De Jeu, R.A.M., Gash, J.H., Meesters, A.G.C.A., Dolman, A.J., 2011. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 453–469. <https://doi.org/10.5194/hess-15-453-2011>

Miralles, D.G., Jiménez, C., Jung, M., Michel, D., Ershadi, A., McCabe, M.F., Hirschi, M., Martens, B., Dolman, A.J., Fisher, J.B., Mu, Q., Seneviratne, S.I., Wood, E.F., Fernández-Prieto, D., 2016. The WACMOS-ET project - Part 2: Evaluation of global terrestrial evaporation data sets. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, 823–842. <https://doi.org/10.5194/hess-20-823-2016>

Mobley, C.D., 1994. *Light and water: radiative transfer in natural waters*. Academic press.

Mohammadimanesh, F., Salehi, B., Mahdianpari, M., Brisco, B., Motagh, M., 2018. Wetland Water Level Monitoring Using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR): A Review. *Can. J. Remote Sens.* 0, 1–16. <https://doi.org/10.1080/07038992.2018.1477680>

Mohor, G.S., Rodriguez, D.A., Tomasella, J., Siqueira Júnior, J.L., 2015. Exploratory analyses for the assessment of climate change impacts on the energy production in an Amazon run-of-river hydropower plant. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 4, 41–59. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.04.003>

Molina-Carpio, J., Espinoza, J.C., Vauchel, P., Ronchail, J., Gutierrez Caloir, B., Guyot, J.L., Noriega, L., 2017. Hydroclimatology of the Upper Madeira River basin: spatio-temporal variability and trends.

Hydrol. Sci. J. 62, 911–927. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1267861>

Molinas, E., Carneiro, J.C., Vinzon, S., 2020. Internal tides as a major process in Amazon continental shelf fine sediment transport. *Mar. Geol.* 430. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106360>

Montanher, O.C., Novo, E.M.L. de M., Barbosa, C.C.F.F., Rennó, C.D., Silva, T.S.F.F., 2014. Empirical models for estimating the suspended sediment concentration in Amazonian white water rivers using Landsat 5/TM. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 29, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.01.001>

Montanher, O.C., Novo, E.M.L. de M., Filho, E.D.S., 2018. Temporal trend of the suspended sediment transport of the Amazon River ( 1984 – 2016 ). *Hydrol. Sci. J.* 63, 1901–1912. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1546387>

Montazem, A., Garambois, P., Calmant, S., Finaud-Guyot, P., Monnier, J., Medeiros Moreira, D., Minear, J.T., Biancamaria, S., 2019. Wavelet-based river segmentation using hydraulic control-preserving water surface elevation profile properties. *Geophys. Res. Lett.* 2019GL082986. <https://doi.org/10.1029/2019GL082986>

Monteith, J., 1965. Evaporation and the Environment in the State and Movement of Water in Living Organisms, in: *Proceedings of the Society for Experimental Biology*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 205–234.

Monteith, J., Unsworth, M., 2013. *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere*, Fourth. ed, *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere: Fourth Edition*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66393-0>

Moreira, A.A., Ruhoff, A.L., Roberti, D.R., Souza, V. de A., da Rocha, H.R., de Paiva, R.C.D., 2019. Assessment of terrestrial water balance using remote sensing data in South America. *J. Hydrol.* 575, 131–147. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.021>

Mu, Q., Heinsch, F.A., Zhao, M., Running, S.W., 2007. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sens. Environ.* 111, 519–536. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.04.015>

Mu, Q., Zhao, M., Running, S.W., 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sens. Environ.* 115, 1781–1800. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019>

Mueller, J.L., Morel, A., Frouin, R., Davis, C.O., Arnone, R. a., Carder, K.L., Lee, Z.-P., Steward, R.G., Hooker, S.B., Mobley, C.D., McLean, S., Holben, B.N., Miller, M., Pietras, C., Knobelspiesse, K.D., Fargion, G.S., Porter, J., Voss, K.J., 2003. Vol 3: Radiometric Measurements and Data Analysis Protocols. *Ocean Opt. Protoc. Satell. Ocean Color Sens. Validation, Revis.* 4 III, 78.

Munier, S., Aires, F., 2018. A new global method of satellite dataset merging and quality characterization constrained by the terrestrial water budget. *Remote Sens. Environ.* 205, 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.008>

Nagel, G.W., Novo, E.M.L. de M., Kampel, M., 2020. Nanosatellites applied to optical Earth observation: a review. *Rev. Ambient. e Agua* 9, 445–458. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>

Nagy, L., Artaxo, P., Forsberg, B.R., 2016. *Interactions between Biosphere, Atmosphere and Human Land Use in the Amazon Basin*, 1o ed. Springer, Berlin Heidelberg. [203](https://doi.org/10.1007/978-3-</a></p></div><div data-bbox=)

- Ndehedehe, C.E., Ferreira, V.G., 2020. Assessing land water storage dynamics over South America. *J. Hydrol.* 580. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124339>
- Neal, J.C., Odoni, N.A., Trigg, M.A., Freer, J.E., Garcia-Pintado, J., Mason, D.C., Wood, M., Bates, P.D., 2015. Efficient incorporation of channel cross-section geometry uncertainty into regional and global scale flood inundation models. *J. Hydrol.* 529, 169–183. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.026>
- Negri, A.J., Adler, R.F., Nelkin, E.J., Huffman, G.J., 1994. Regional Rainfall Climatologies Derived from Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) Data. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 75, 1165–1182. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1994\)075<1165:RRCDFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1994)075<1165:RRCDFS>2.0.CO;2)
- Negri, A.J., Anagnostou, E.N., Adler, R.F., 2000. A 10-yr climatology of amazonian rainfall derived from passive microwave satellite observations. *J. Appl. Meteorol.* 39, 42–56. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039<0042:AYCOAR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039<0042:AYCOAR>2.0.CO;2)
- Nguyen, P., Shearer, E.J., Tran, H., Ombadi, M., Hayatbini, N., Palacios, T., Huynh, P., Braithwaite, D., Updegraff, G., Hsu, K., Kuligowski, B., Logan, W.S., Sorooshian, S., 2019. The CHRS data portal, an easily accessible public repository for PERSIANN global satellite precipitation data. *Sci. Data* 6, 1–10. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.296>
- Niroumand-Jadidi, M., Bovolo, F., Bruzzone, L., 2020. Water quality retrieval from PRISMA hyperspectral images: First experience in a turbid lake and comparison with sentinel-2. *Remote Sens.* 12, 1–21. <https://doi.org/10.3390/rs12233984>
- Niu, J., Shen, C., Chambers, J.Q., Melack, J.M., Riley, W.J., 2017. Interannual Variation in Hydrologic Budgets in an Amazonian Watershed with a Coupled Subsurface–Land Surface Process Model. *J. Hydrometeorol.* 18, 2597–2617. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0108.1>
- Nobrega, I.W. da, 2002. Análise espectral de sistemas aquáticos da Amazônia para a identificação de componentes opticamente ativos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.
- Nóbrega, R.L.B., Guzha, A.C., Torres, G.N., Kovacs, K., Lamparter, G., Amorim, R.S.S., Couto, E., Gerold, G., 2017. Effects of conversion of native cerrado vegetation to pasture on soil hydro-physical properties, evapotranspiration and streamflow on the Amazonian agricultural frontier. *PLoS One* 15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179414>
- Norman, J.M., Kustas, W.P., Humes, K.S., 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature, *Agricultural and Forest Meteorology*.
- Normandin, C., Frappart, F., Diepkil, A.T., Marieu, V., Mougou, E., Blarel, F., Lubac, B., Braquet, N., Ba, A., 2018. Evolution of the Performances of Radar Altimetry Missions from ERS-2 to Sentinel-3A over the Inner Niger Delta. *Remote Sens.* 10, 833. <https://doi.org/10.3390/rs10060833>
- Novo, E.M.L. de M., 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* 7, 153–161. <https://doi.org/10.1007/s10201-006-0179-8>

Novo, E.M.L. de M., Shimabukuro, Y.E., 1997. Identification and mapping of the Amazon habitats using a mixing model. *Int. J. Remote Sens.* 18, 663–670. <https://doi.org/10.1080/014311697218999>

Novoa, S., Doxaran, D., Ody, A., Vanhellemont, Q., Lafon, V., Lubac, B., Gernez, P., 2017. Atmospheric corrections and multi-conditional algorithm for multi-sensor remote sensing of suspended particulate matter in low-to-high turbidity levels coastal waters. *Remote Sens.* 9. <https://doi.org/10.3390/rs9010061>

Numata, I., Khand, K., Kjaersgaard, J., Cochrane, M.A., Silva, S.S., 2017. Evaluation of Landsat-Based METRIC Modeling to Provide High-Spatial Resolution Evapotranspiration Estimates for Amazonian Forests. *Remote Sens.* . <https://doi.org/10.3390/rs9010046>

O'Loughlin, F.E., Paiva, R.C.D., Durand, M., Alsdorf, D.E., Bates, P.D., 2016. A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. *Remote Sens. Environ.* 182, 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.018>

Odermatt, D., Gitelson, A., Brando, V.E., Schaepman, M., 2012. Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery. *Remote Sens. Environ.* 118, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.013>

Oliveira, A.M., Fleischmann, A.S., Paiva, R.C.D., 2021. On the contribution of remote sensing-based calibration to model hydrological and hydraulic processes in tropical regions. *J. Hydrol.* 126184. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126184>

Oliveira, P.T.S., Nearing, M.A., Moran, M.S., Goodrich, D.C., Wendland, E., Gupta, H. V., 2014. Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. *Water Resour. Res.* 50, 7100–7114. <https://doi.org/10.1002/2013WR015202>

Oliveira, R., Maggioni, V., Vila, D., Morales, C., 2016. Characteristics and diurnal cycle of GPM rainfall estimates over the Central Amazon region. *Remote Sens.* 8. <https://doi.org/10.3390/rs8070544>

Ovando, A., Martinez, J.M., Tomasella, J., Rodriguez, D.A., von Randow, C., 2018. Multi-temporal flood mapping and satellite altimetry used to evaluate the flood dynamics of the Bolivian Amazon wetlands. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 69, 27–40. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.02.013>

Ovando, A., Tomasella, J., Rodriguez, D.A., Martinez, J.M., Siqueira-Junior, J.L., Pinto, G.L.N., Passy, P., Vauchel, P., Noriega, L., von Randow, C., 2016. Extreme flood events in the Bolivian Amazon wetlands. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 5, 293–308. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.004>

Overeem, A., Leijnse, H., Uijlenhoet, R., 2016. Two and a half years of country-wide rainfall maps using radio links from commercial cellular telecommunication networks. *Water Resour. Res.* 52, 8039–8065. <https://doi.org/10.1002/2016WR019412>

Overeem, A., Leijnse, H., Uijlenhoet, R., 2013. Country-wide rainfall maps from cellular communication networks. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 110, 2741–2745. <https://doi.org/10.1073/pnas.1217961110>

Paca, V.H. da M., Espinoza-Dávalos, G., Moreira, D., Comair, G., 2020. Variability of Trends in Precipitation across the Amazon River Basin Determined from the CHIRPS Precipitation Product and from Station Records. *Water* 12, 1244. <https://doi.org/10.3390/w12051244>

Paca, V.H. da M., Espinoza-Dávalos, G.E., Hessels, T.M., Moreira, D.M., Comair, G.F., Bastiaansen, W.G.M., 2019. The spatial variability of actual evapotranspiration across the Amazon River Basin based

on remote sensing products validated with flux towers. *Ecol. Process.* 8. <https://doi.org/10.1186/s13717-019-0158-8>

Paccini, L., Espinoza, J.C., Ronchail, J., Segura, H., 2018. Intra-seasonal rainfall variability in the Amazon basin related to large-scale circulation patterns: a focus on western Amazon-Andes transition region. *Int. J. Climatol.* 38, 2386–2399. <https://doi.org/10.1002/joc.5341>

Paiva, R.C.D. de, 2020. Advances and challenges in the water sciences in Brazil: a community synthesis of the XXIII Brazilian Water Resources Symposium. *Rev. Bras. Recur. Hídricos* 5. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020200136>

Paiva, R.C.D. de, Buarque, D.C., Clarke, R.T., Collischonn, W., Allasia, D.G., 2011a. Reduced precipitation over large water bodies in the Brazilian Amazon shown from TRMM data. *Geophys. Res. Lett.* 38. <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., 2013a. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. *Water Resour. Res.* 49, 1226–1243. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20067>

Paiva, R.C.D. de, Collischonn, W., Bonnet, M.P., De Gonçalves, L.G.G., Calmant, S., Getirana, A., Santos Da Silva, J., 2013b. Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 2929–2946. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2929-2013>

Paiva, R.C.D. de, Collischonn, W., Buarque, D.C., 2013c. Validation of a full hydrodynamic model for large-scale hydrologic modelling in the Amazon. *Hydrol. Process.* 27, 333–346. <https://doi.org/10.1002/hyp.8425>

Paiva, R.C.D. de, Collischonn, W., Tucci, C.E.M., 2011b. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. *J. Hydrol.* 406, 170–181. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.007>

Pan, M., Sahoo, A.K., Troy, T.J., Vinukollu, R.K., Sheffield, J., Wood, A.E.F., 2012. Multisource estimation of long-term terrestrial water budget for major global river basins. *J. Clim.* 25, 3191–3206. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00300.1>

Pan, M., Wood, E.F., 2006. Data Assimilation for Estimating the Terrestrial Water Budget Using a Constrained Ensemble Kalman Filter. *J. Hydrometeorol.* 7, 534–547. <https://doi.org/10.1175/JHM495.1>

Panday, P.K., Coe, M.T., Macedo, M.N., Lefebvre, P., Castanho, A.D. de A., 2015. Deforestation offsets water balance changes due to climate variability in the Xingu River in eastern Amazonia. *J. Hydrol.* 523, 822–829. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.018>

Pangala, S.R., Enrich-Prast, A., Basso, L.S., Peixoto, R.B., Bastviken, D., Hornibrook, E.R.C., Gatti, L. V., Marotta, H., Calazans, L.S.B., Sakuragui, C.M., Bastos, W.R., Malm, O., Gloor, E., Miller, J.B., Gauci, V., 2017. Large emissions from floodplain trees close the Amazon methane budget. *Nature* 552, 230–234. <https://doi.org/10.1038/nature24639>

Panosso, R.D.F., Muehe, D., Esteves, F.D.A., 1995. Morphological characteristics of an Amazon floodplain lake (Lake Batata, Para State, Brazil). *Amazonia* 13, 245–258.

- Paola, F. Di, Casella, D., Dietrich, S., Mugnai, A., Ricciardelli, E., Romano, F., San, P., Paola, F. Di, 2012. Combined MW-IR Precipitation Evolving Technique ( PET ) of convective rain fields 3557–3570. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3557-2012>
- Papa, F., Frappart, F., Güntner, A., Prigent, C., Aires, F., Getirana, A.C. V, Maurer, R., 2013. Surface freshwater storage and variability in the Amazon basin from multi-satellite observations, 1993–2007. *J. Geophys. Res. Atmos.* 118, 11951–11965. <https://doi.org/10.1002/2013JD020500>
- Papa, F., Frappart, F., Malbeteau, Y., Shamsudduha, M., Vuruputur, V., Sekhar, M., Ramillien, G., Prigent, C., Aires, F., Pandey, R.K., Bala, S., Calmant, S., 2015. Satellite-derived surface and sub-surface water storage in the Ganges–Brahmaputra River Basin. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 4, 15–35. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.03.004>
- Papa, F., Günther, A., Frappart, F., Prigent, C., Rossow, W.B.B., Güntner, A., Frappart, F., Prigent, C., Rossow, W.B.B., 2008. Variations of surface water extent and water storage in large river basins: A comparison of different global data sources. *Geophys. Res. Lett.* 35, L11401. <https://doi.org/10.1029/2008GL033857>
- Papa, F., Prigent, C., Aires, F., Jimenez, C., Rossow, W.B., Matthews, E., 2010. Interannual variability of surface water extent at the global scale, 1993–2004. *J. Geophys. Res. Atmos.* 115. <https://doi.org/10.1029/2009JD012674>
- Paredes Trejo, F.J., Barbosa, H.A., Peñaloza-Murillo, M.A., Alejandra Moreno, M., Fariás, A., 2016. Intercomparison of improved satellite rainfall estimation with CHIRPS gridded product and rain gauge data over Venezuela. *Atmosfera* 29, 323–342. <https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.04.04>
- Paris, A., Calmant, S., Gosset, M., Fleischmann, A., Conchy, T., Bricquet, J.-P., Garambois, P.-A., Papa, F., Tshimanga, R., Gulemvuga Guzanga, G., et al., 2020. Monitoring hydrological variables from remote sensing and modelling in the Congo River basin. *Earth Sp. Sci. Open Arch.* 53. <https://doi.org/10.1002/essoar.10505518.1>
- Paris, A., Paiva, R.D. de, Silva, J.S. da, Moreira, D.M., Calmant, S., Garambois, P.-A., Collischonn, W., Bonnet, M.-P., Seyler, F., 2016. Stage-discharge rating curves based on satellite altimetry and modeled discharge in the Amazon basin. *Water Resour. Res.* 52, 3787–3814. <https://doi.org/10.1002/2014WR016618>.Received
- Park, E., 2020. Characterizing channel-floodplain connectivity using satellite altimetry: Mechanism, hydrogeomorphic control, and sediment budget. *Remote Sens. Environ.* 243, 111783. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111783>
- Park, E., Emadzadeh, A., Alcântara, E., Yang, X., Ho, H.L., 2020. Inferring floodplain bathymetry using inundation frequency. *J. Environ. Manage.* 273. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111138>
- Park, E., Latrubesse, E.M., 2019. A geomorphological assessment of wash-load sediment fluxes and floodplain sediment sinks along the lower Amazon River. <https://doi.org/10.1130/G45769.1>
- Park, E., Latrubesse, E.M., 2017. The hydro-geomorphologic complexity of the lower Amazon River floodplain and hydrological connectivity assessed by remote sensing and field control. *Remote Sens. Environ.* 198, 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.021>
- Park, E., Latrubesse, E.M., 2014. Modeling suspended sediment distribution patterns of the

Amazon River using MODIS data. *Remote Sens. Environ.* 147, 232–242. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.013>

Parrens, M., Bitar, A. Al, Frappart, F., Paiva, R., Wongchuig, S., Papa, F., Yamasaki, D., Kerr, Y., 2019. High resolution mapping of inundation area in the Amazon basin from a combination of L-band passive microwave, optical and radar datasets. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 81, 58–71. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.011>

Parrens, M., Bitar, A. Al, Frappart, F., Papa, F., Calmant, S., Crétaux, J.F., Wigneron, J.P., Kerr, Y., 2017. Mapping dynamic water fraction under the tropical rain forests of the Amazonian basin from SMOS brightness temperatures. *Water* 9, 350. <https://doi.org/10.3390/w9050350>

Pearce, F., 2020. Weather makers. *Science* (80-. ). 368, 1302–1305. <https://doi.org/10.1126/science.368.6497.1302>

Peixoto, J.M.A., Nelson, B.W., Wittmann, F., 2009. Spatial and temporal dynamics of river channel migration and vegetation in central Amazonian white-water floodplains by remote-sensing techniques. *Remote Sens. Environ.* 113, 2258–2266. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.06.015>

Pekel, J.F., Cottam, A., Gorelick, N., Belward, A.S., 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 540, 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>

Pellet, V., Aires, F., Yamazaki, D., 2021. Coherent Satellite Monitoring of the Water Cycle Over the Amazon. Part 2: Total Water Storage Change and River Discharge Estimation. *Water Resour. Res.* 57. <https://doi.org/10.1029/2020WR028648>

Peng, B., Shi, J., Ni-Meister, W., Zhao, T., Ji, D., 2014. Evaluation of TRMM multisatellite precipitation analysis (tmpa) products and their potential hydrological application at an arid and semiarid basin in china. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 7, 3915–3930. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2320756>

Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. Lond. A. Math. Phys. Sci.* 194, 120–146. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>

Peral, E., Tanelli, S., Statham, S., Joshi, S., Imken, T., Price, D., Sauder, J., Chahat, N., Williams, A., 2019. RainCube: the first ever radar measurements from a CubeSat in space. *J. Appl. Remote Sens.* 13, 1. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.13.032504>

Pfeffer, J., Seyler, F., Bonnet, M.-P., Calmant, S., Frappart, F., Papa, F., Paiva, R.C.D., Satgé, F., Silva, J.S. Da, 2014. Low-water maps of the groundwater table in the central Amazon by satellite altimetry. *Geophys. Res. Lett.* 41, 1981–1987. <https://doi.org/10.1002/2013GL059134>

Pham-Duc, B., Papa, F., Prigent, C., Aires, F., Biancamaria, S., Frappart, F., 2019. Variations of Surface and Subsurface Water Storage in the Lower Mekong Basin (Vietnam and Cambodia) from Multisatellite Observations. *Water* 11. <https://doi.org/10.3390/w11010075>

Pham-Duc, B., Sylvestre, F., Papa, F., Frappart, F., Bouchez, C., Crétaux, J.F., 2020. The Lake Chad hydrology under current climate change. *Sci. Rep.* 10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62417-w>

Phillips, O.L., Aragão, L.E.O.C., Lewis, S.L., Fisher, J.B., Lloyd, J., López-González, G., Malhi, Y.,



Monteagudo, A., Peacock, J., Quesada, C.A., Van Der Heijden, G., Almeida, S., Amaral, I., Arroyo, L., Aymard, G., Baker, T.R., Bánki, O., Blanc, L., Bonal, D., Brando, P., Chave, J., De Oliveira, Á.C.A., Cardozo, N.D., Czimczik, C.I., Feldpausch, T.R., Freitas, M.A., Gloor, E., Higuchi, N., Jiménez, E., Lloyd, G., Meir, P., Mendoza, C., Morel, A., Neill, D.A., Nepstad, D., Patiño, S., Peñuela, M.C., Prieto, A., Ramírez, F., Schwarz, M., Silva, J., Silveira, M., Thomas, A.S., Steege, H. Ter, Stropp, J., Vásquez, R., Zelazowski, P., Dávila, E.A., Andelman, S., Andrade, A., Chao, K.J., Erwin, T., Di Fiore, A., Honorio, E.C., Keeling, H., Killeen, T.J., Laurance, W.F., Cruz, A.P., Pitman, N.C.A., Vargas, P.N., Ramírez-Angulo, H., Rudas, A., Salamão, R., Silva, N., Terborgh, J., Torres-Lezama, A., 2009. Drought sensitivity of the amazon rainforest. *Science* (80-. ). 323, 1344–1347. <https://doi.org/10.1126/science.1164033>

Pilotto, I.L., Rodríguez, D.A., Tomasella, J., Sampaio, G., Chou, S.C., 2015. Comparisons of the Noah-MP land surface model simulations with measurements of forest and crop sites in Amazonia. *Meteorol. Atmos. Phys.* 127, 711–723. <https://doi.org/10.1007/s00703-015-0399-8>

Pinel, S., Bonnet, M.-P., Santos Da Silva, J., Moreira, D., Calmant, S., Satgé, F., Seyler, F., 2015. Correction of Interferometric and Vegetation Biases in the SRTMGL1 Spaceborne DEM with Hydrological Conditioning towards Improved Hydrodynamics Modeling in the Amazon Basin. *Remote Sens.* 7, 16108–16130. <https://doi.org/10.3390/rs71215822>

Pinel, S., Bonnet, M., Silva, J.S. Da, Sampaio, T.C., Garnier, J., Fragoso, C.R.J., Moreira, D., Motta Marques, D.M.L., Seyler, F., 2019. Flooding dynamics within a Amazonian floodplain: Water circulation patterns and inundation duration. *Water Resour. Res.* 1–23.

Pinet, S.Y.P., Artínez, J.E.A.N.I.M., Uillon, S.Y.O., Runo, B., Artiges, L., Illar, R.A.U.L.E.S. V, 2017. Variability of apparent and inherent optical properties of sediment-laden waters in large river basins – lessons from in situ measurements and bio-optical modeling. *Opt. Express* 25, 283–310.

Pison, I., Ringeval, B., Bousquet, P., Prigent, C., Papa, F., 2013. Stable atmospheric methane in the 2000s: Key-role of emissions from natural wetlands. *Atmos. Chem. Phys.* 13, 11609–11623. <https://doi.org/10.5194/acp-13-11609-2013>

Pokhrel, Y.N., Fan, Y., Miguez-Macho, G., 2014. Potential hydrologic changes in the Amazon by the end of the 21st century and the groundwater buffer. *Environ. Res. Lett.* 9, 084004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/084004>

Pokhrel, Y.N., Fan, Y., Miguez-Macho, G., Yeh, P.J.F., Han, S.C., 2013. The role of groundwater in the Amazon water cycle: 3. Influence on terrestrial water storage computations and comparison with GRACE. *J. Geophys. Res. Atmos.* 118, 3233–3244. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50335>

Pontes, P.R.M., Cavalcante, R.B.L., Sahoo, P.K., Silva Júnior, R.O. d., da Silva, M.S., Dall'Agnol, R., Siqueira, J.O., 2019. The role of protected and deforested areas in the hydrological processes of Itacaiúnas River Basin, eastern Amazonia. *J. Environ. Manage.* 235, 489–499. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.090>

Potter, C., Melack, J.M., Engle, D., 2014. Modeling methane emissions from amazon floodplain ecosystems. *Wetlands* 34, 501–511. <https://doi.org/10.1007/s13157-014-0516-3>

Prabhakara, C., Short, D.A., Wiscombe, W., Fraser, R.S., Vollmer, B.E., 1986. Rainfall over Oceans Inferred from Nimbus 7 SMMR: Application to 1982–83 El Niño. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 25, 1464–1474.

Priestley, C.H.B., Taylor, R.J., 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Mon. Weather Rev.* 100, 81–92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:otaosh>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:otaosh>2.3.co;2)

Prigent, C., 2010. Precipitation retrieval from space: An overview. *Comptes Rendus - Geosci.* 342, 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.01.004>

Prigent, C., Aires, F., Rossow, W.B., Robock, A., 2005. Sensitivity of satellite microwave and infrared observations to soil moisture at a global scale: Relationship of satellite observations to in situ soil moisture measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.* 110. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2004JD005087>

Prigent, C., Jimenez, C., Bousquet, P., 2020. Satellite-Derived Global Surface Water Extent and Dynamics Over the Last 25 Years (GIEMS-2). *J. Geophys. Res. Atmos.* 125. <https://doi.org/10.1029/2019JD030711>

Prigent, C., Lettenmaier, D.P., Aires, F., Papa, F., 2016. Toward a High-Resolution Monitoring of Continental Surface Water Extent and Dynamics, at Global Scale: from GIEMS (Global Inundation Extent from Multi-Satellites) to SWOT (Surface Water Ocean Topography). *Surv. Geophys.* 37, 339–355. <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9339-x>

Prigent, C., Papa, F., Aires, F., Jimenez, C., Rossow, W.B., Matthews, E., 2012. Changes in land surface water dynamics since the 1990s and relation to population pressure. *Geophys. Res. Lett.* 39. <https://doi.org/10.1029/2012GL051276>

Prigent, C., Papa, F., Aires, F., Rossow, W.B., Matthews, E., 2007. Global inundation dynamics inferred from multiple satellite observations, 1993–2000. *J. Geophys. Res. Atmos.* 112. <https://doi.org/10.1029/2006JD007847>

Pujol, L., Garambois, P.-A., Finaud-Guyot, P., Monnier, J., Larnier, K., Mosé, R., Biancamaria, S., Yesou, H., Moreira, D., Paris, A., Calmant, S., 2020. Estimation of Multiple Inflows and Effective Channel by Assimilation of Multi-satellite Hydraulic Signatures: The Ungauged Anabranching Negro River. *J. Hydrol.* <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125331>

Ramillien, G., Frappart, F., Gratton, S., Vasseur, X., 2015. Sequential estimation of surface water mass changes from daily satellite gravimetry data. *J. Geod.* 89, 259–282. <https://doi.org/10.1007/s00190-014-0772-2>

Ramillien, G., Seoane, L., Schumacher, M., Forootan, E., Frappart, F., Darrozes, J., 2020. Recovery of rapid water mass changes (RWMC) by Kalman filtering of GRACE observations. *Remote Sens.* 12, 1299. <https://doi.org/10.3390/RS12081299>

Raney, R.K., 1998. The delay/Doppler radar altimeter. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 36, 1578–1588. <https://doi.org/10.1109/36.718861>

Raymond, P.A., Hartmann, J., Lauerwald, R., Sobek, S., McDonald, C., Hoover, M., Butman, D., Striegl, R., Mayorga, E., Humborg, C., Kortelainen, P., Dürr, H., Meybeck, M., Ciais, P., Guth, P., 2013. Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature* 503, 355–359. <https://doi.org/10.1038/nature12760>

Reichle, R.H., Liu, Q., Koster, R.D., Draper, C.S., Mahanama, S.P.P., Partyka, G.S., 2017. Land Surface Precipitation in MERRA-2. *J. Clim.* 30, 1643–1664. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0570.1>

Reis, G.G. dos, Paiva, R.C.D. de, Brêda, J.P.L.F., Medeiros, M.S., 2020. SARDIM - UMA PLATAFORMA PARA ACOMPANHAMENTO HIDROLÓGICO EM TEMPO REAL DOS RIOS DA AMÉRICA DO SUL, in: II END - Encontro Nacional de Desastres da Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre.

Reis, V., Hermoso, V., Hamilton, S.K., Bunn, S.E., Fluet-Chouinard, E., Venables, B., Linke, S., 2019. Characterizing seasonal dynamics of Amazonian wetlands for conservation and decision making. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 29, 1073–1082. <https://doi.org/10.1002/aqc.3051>

Resende, A.F. de, Schöngart, J., Streher, A.S., Ferreira-Ferreira, J., Piedade, M.T.F., Silva, T.S.F., 2019. Massive tree mortality from flood pulse disturbances in Amazonian floodplain forests: The collateral effects of hydropower production. *Sci. Total Environ.* 659, 587–598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.208>

Richey, J.E., Melack, J.M., Aufdenkampe, A.K., Ballester, V.M., Hess, L.L., 2002. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature* 416, 617–620. <https://doi.org/10.1038/416617a>

Richey, J.E., Mertes, L.K., Dunne, T., Victoria, R.L., Forsberg, B.R., Tancredi, A.C.N.S., Oliveira, E. de, 1989. Sources and routing of the Amazon River flood wave 3, 191–204.

Rocha, H.R., Manzi, A.O., Cabral, O.M., Miller, S.D., Goulden, M.L., Saleska, S.R., Coupe, N.R., Wofsy, S.C., Borma, L.S., Artaxo, R., Vourlitis, G., Nogueira, J.S., Cardoso, F.L., Nobre, A.D., Kruijt, B., Freitas, H.C., Von Randow, C., Aguiar, R.G., Maia, J.F., 2009. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 114, 1–8. <https://doi.org/10.1029/2007JG000640>

Rodell, M., Houser, P.R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J.K., Walker, J.P., Lohmann, D., Toll, D., 2004. The Global Land Data Assimilation System. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 85, 381–394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>

Rodell, M., McWilliams, E.B., Famiglietti, J.S., Beaudoing, H.K., Nigro, J., 2011. Estimating evapotranspiration using an observation based terrestrial water budget. *Hydrol. Process.* 25, 4082–4092. <https://doi.org/10.1002/hyp.8369>

Rodríguez-Alvarez, N., Podest, E., Jensen, K., McDonald, K.C., 2019. Classifying inundation in a tropical wetlands complex with GNSS-R. *Remote Sens.* 11, 1053. <https://doi.org/10.3390/rs11091053>

Rodríguez, E., Morris, C.S., Belz, J.E., 2006. A Global Assessment of the SRTM Performance. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 72, 249–260. <https://doi.org/10.14358/PERS.72.3.249>

Roerink, G.J., Su, Z., Menenti, M., 2000. S-SEBI: A Simple Remote Sensing Algorithm to Estimate the Surface Energy Balance, *P&S. Chem. Earth (B)*.

Ronchail, J., Cochonneau, G., Molinier, M., Guyot, J.L., De Miranda Chaves, A.G., Guimarães, V., De Oliveira, E., 2002. Interannual rainfall variability in the Amazon basin and sea-surface temperatures in the equatorial Pacific and the tropical Atlantic Oceans. *Int. J. Climatol.* 22, 1663–1686. <https://doi.org/10.1002/joc.815>

Röpke, C.P., Amadio, S., Zuanon, J., Ferreira, E.J.G., De Deus, C.P., Pires, T.H.S., Winemiller, K.O., 2017. Simultaneous abrupt shifts in hydrology and fish assemblage structure in a floodplain lake in the central Amazon. *Sci. Rep.* 7, 40170. <https://doi.org/10.1038/srep40170>

Rosenqvist, Å., Birkett, C.M., 2002. Evaluation of JERS-1 SAR mosaics for hydrological applications in the Congo river basin. *Int. J. Remote Sens.* 23, 1283–1302. <https://doi.org/10.1080/01431160110092902>

Rosenqvist, J., Rosenqvist, A., Jensen, K., McDonald, K., 2020. Mapping of maximum and minimum inundation extents in the amazon basin 2014–2017 with ALOS-2 PALSAR-2 scan SAR time-series data. *Remote Sens.* 12. <https://doi.org/10.3390/RS12081326>

Rossetti, D.F., Gribel, R., Rennó, C.D., Cohen, M.C.L., Moulatlet, G.M., Cordeiro, C.L. de O., Rodrigues, E. do S.F., 2017. Late Holocene tectonic influence on hydrology and vegetation patterns in a northern Amazonian megafan. *Catena* 158, 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.022>

Roza, M.G., Nogueira, A.C.R., Truckenbrodt, W., 2012. The anastomosing pattern and the extensively distributed scroll bars in the middle Amazon River. *Earth Surf. Process. Landforms* 37, 1471–1488. <https://doi.org/10.1002/esp.3249>

Rudorff, C.M., 2006. Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de reflectância do sensor hyperion/EO-1 e de espectrômetro de campo visando a compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.

Rudorff, C.M., Dunne, T., Melack, J.M., 2018. Recent increase of river-floodplain suspended sediment exchange in a reach of the lower Amazon River. *Earth Surf. Process. Landforms* 43, 322–332. <https://doi.org/10.1002/esp.4247>

Rudorff, C.M., Melack, J.M., Bates, P.D., 2014a. Flooding dynamics on the lower Amazon floodplain: 2. Seasonal and interannual hydrological variability. *Water Resour. Res.* 50, 635–649. <https://doi.org/10.1002/2013WR014714>

Rudorff, C.M., Melack, J.M., Bates, P.D., 2014b. Flooding dynamics on the lower Amazon floodplain: 1. Hydraulic controls on water elevation, inundation extent, and river-floodplain discharge. *Water Resour. Res.* 50, 619–634. <https://doi.org/10.1002/2013WR014091>

Rudorff, C.M., Novo, E.M.L.M., Galvão, L.S., 2006. Spectral Mixture Analysis of Inland Tropical Amazon Floodplain Waters Using EO-1 Hyperion, in: *IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*. Denver, p. 128–133. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2006.38>

Rudorff, C.M., Novo, E.M.L.M., Galvão, L.S., Pereira Filho, W., 2007. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. *Acta Amaz.* 37, 269–280. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672007000200014>

Runde, A., Hallwass, G., Silvano, R.A.M., 2020. Fishers' Knowledge Indicates Extensive Socioecological Impacts Downstream of Proposed Dams in a Tropical River. *One Earth* 2, 255–268. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.012>

Ryu, Y., Baldocchi, D.D., Kobayashi, H., van Ingen, C., Li, J., Black, T.A., Beringer, J., van Gorsel, E., Knohl, A., Law, B.E., Rouspard, O., 2011. Integration of MODIS land and atmosphere products with

a coupled-process model to estimate gross primary productivity and evapotranspiration from 1 km to global scales. *Global Biogeochem. Cycles* 25. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2011GB004053>  
Saad, S.I., Da Rocha, H.R., Silva Dias, M.A.F., Rosolem, R., 2010. Can the deforestation breeze change the rainfall in Amazonia? A case study for the BR-163 highway region. *Earth Interact.* 14. <https://doi.org/10.1175/2010EI351.1>

Saavedra, M., Junquas, C., Espinoza, J.C., Silva, Y., 2020. Impacts of topography and land use changes on the air surface temperature and precipitation over the central Peruvian Andes. *Atmos. Res.* 234, 104711. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104711>

Sahagian, D., Melack, J., 1998. *Global Wetland Distribution and Functional Characterization: Trace Gases and the Hydrologic Cycle*, Royal Swedish Academy of Sciences. Stockholm, Sweden.

Sahoo, A.K., Pan, M., Troy, T.J., Vinukollu, R.K., Sheffield, J., Wood, E.F., 2011. Reconciling the global terrestrial water budget using satellite remote sensing. *Remote Sens. Environ.* 115, 1850–1865. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.03.009>

Salameh, E., Frappart, F., Almar, R., Baptista, P., Heygster, G., Lubac, B., Raucoules, D., Almeida, L.P., Bergsma, E.W.J., Capo, S., De Michele, M.D., Idier, D., Li, Z., Marieu, V., Poupardin, A., Silva, P.A., Turki, I., Laignel, B., 2019. Monitoring Beach Topography and Nearshore Bathymetry Using Spaceborne Remote Sensing: A Review. *Remote Sens.* 11. <https://doi.org/10.3390/rs11192212>

Salati, E., Dall'Olio, A., Matsui, E., Gat, J.R., 1979. Recycling of water in the Amazon Basin: An isotopic study. *Water Resour. Res.* 15.

Salati, E., Nobre, C.A., 1991. Possible climatic impacts of tropical deforestation. *Clim. Change* 19, 177–196. <https://doi.org/10.1007/BF00142225>

Salati, E., Vose, P.B., 1984. Amazon Basin: A system in equilibrium. *Science* (80-. ). 225, 129–138. <https://doi.org/10.1126/science.225.4658.129>

Saleska, S.R., da Rocha, H.R., Huete, A.R., Nobre, A.D., Artaxo, P.E., Shimabukuro, Y.E., 2013. LBA-ECO CD-32 Flux Tower Network Data Compilation, Brazilian Amazon: 1999-2006. Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1174>

Santos, M.J., Medvigy, D., Silva Dias, M.A.F., Freitas, E.D., Kim, H., 2019. Seasonal Flooding Causes Intensification of the River Breeze in the Central Amazon. *J. Geophys. Res. Atmos.* 124, 5178–5197. <https://doi.org/10.1029/2018JD029439>

Satgé, F., Bonnet, M.P., Gosset, M., Molina, J., Hernan Yuque Lima, W., Pillco Zolá, R., Timouk, F., Garnier, J., 2016. Assessment of satellite rainfall products over the Andean plateau. *Atmos. Res.* 167, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.012>

Satgé, F., Xavier, A., Zolá, R.P., Hussain, Y., Timouk, F., Garnier, J., Bonnet, M.P., 2017. Comparative assessments of the latest GPM mission's spatially enhanced satellite rainfall products over the main bolivian watersheds. *Remote Sens.* 9, 1–16. <https://doi.org/10.3390/rs9040369>

Satyamurty, P., da Costa, C.P.W., Manzi, A.O., 2013a. Moisture source for the Amazon Basin: A study of contrasting years. *Theor. Appl. Climatol.* 111, 195–209. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0637-7>

Satyamurty, P., da Costa, C.P.W., Manzi, A.O., Candido, L.A., 2013b. A quick look at the 2012 record

flood in the Amazon Basin. *Geophys. Res. Lett.* 40, 1396–1401. <https://doi.org/10.1002/grl.50245>

Schmitt, R.J.P., Bizzi, S., Castelletti, A., Opperman, J.J., Kondolf, G.M., 2019. Planning dam portfolios for low sediment trapping shows limits for sustainable hydropower in the Mekong. *Sci. Adv.* 5. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw2175>

Schöngart, J., Wittmann, F., Resende, A.F. de, Assahira, C., Lobo, G. de S., Neves, J.R.D., Rocha, M., Mori, G.B., Quaresma, A.C., Demarchi, L.O., Albuquerque, B.W., Feitosa, Y.O., Costa, G. da S., Feitoza, G.V., Durgante, F.M., Lopes, A., Trumbore, S.E., Silva, T.S.F., Steege, H. ter, Val, A.L., Steege, H. ter, Junk, W.J., Piedade, M.T.F., 2021. The shadow of the Balbina dam : A synthesis of over 35 years of downstream impacts on floodplain forests in Central Amazonia. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 1–19. <https://doi.org/10.1002/aqc.3526>

Schroeder, R., McDonald, K.C., Chapman, B.D., Jensen, K., Podest, E., Tessler, Z.D., Bohn, T.J., Zimmermann, R., 2015. Development and evaluation of a multi-year fractional surface water data set derived from active/passive microwave remote sensing data. *Remote Sens.* 7, 16688–16732. <https://doi.org/10.3390/rs71215843>

Schumann, G., Bates, P.D., Horritt, M.S., Matgen, P., Pappenberger, F., 2009. Progress in Integration of Remote Sensing-Derived Flood Extent and Stage Data and Hydraulic Models. *Rev. Geophys.* 47, 1–20. <https://doi.org/10.1029/2008rg000274>

Schwatke, C., Dettmering, D., Bosch, W., Seitz, F., 2015. DAHITI - An innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 4345–4364. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4345-2015>

Sena, J.A., de Deus, L.A.B., Freitas, M.A. V., Costa, L., 2012. Extreme Events of Droughts and Floods in Amazonia: 2005 and 2009. *Water Resour. Manag.* 26, 1665–1676. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-9978-3>

Senay, G.B., Bohms, S., Singh, R.K., Gowda, P.H., Velpuri, N.M., Alemu, H., Verdin, J.P., 2013. Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 49, 577–591. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jawr.12057>

Senay, G.B., Kagone, S., Velpuri, N.M., 2020. Operational Global Actual Evapotranspiration: Development, Evaluation, and Dissemination. *Sensors* . <https://doi.org/10.3390/s20071915>

Seyler, F., Calmant, S., Silva, J.S. Da, Moreira, D.M., Mercier, F., Shum, C.K., 2013. From TOPEX/Poseidon to Jason-2/OSTM in the amazon basin. *Adv. Sp. Res.* 51, 1542–1550. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.11.002>

Sheffield, J., Wood, E.F., Pan, M., Beck, H., Coccia, G., Serrat-Capdevila, A., Verbist, K., 2018. Satellite Remote Sensing for Water Resources Management: Potential for Supporting Sustainable Development in Data-Poor Regions. *Water Resour. Res.* <https://doi.org/10.1029/2017WR022437>

Shi, J., Dong, X., Zhao, T., Du, Y., Liu, H., Wang, Z., Zhu, D., Ji, D., Xiong, C., Jiang, L., 2016. The water cycle observation mission (WCOM): Overview, in: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., p. 3430–3433. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7729886>

Shuttleworth, W.J., 2012. Terrestrial Hydrometeorology, Terrestrial Hydrometeorology. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119951933>

Silva, H.J.F.da, Gonçalves, W.A., Bezerra, B.G., 2019. Comparative analyzes and use of evapotranspiration obtained through remote sensing to identify deforested areas in the Amazon. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 78, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.015>

Silva, J.S. Da, Calmant, S., Seyler, F., Moreira, D.M., Oliveira, D., Monteiro, A., 2014. Radar altimetry aids managing gauge networks. *Water Resour. Manag.* 28, 587–603. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0484-z>

Silva, J.S. Da, Calmant, S., Seyler, F., Rotunno Filho, O.C., Cochonneau, G., Mansur, W.J., 2010. Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. *Remote Sens. Environ.* 114, 2160–2181. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.020>

Silva, J.S. Da, Seyler, F., Calmant, S., Filho, O.C.R., Roux, E., Araújo, A.A.M., Guyot, J.L., 2012. Water level dynamics of Amazon wetlands at the watershed scale by satellite altimetry. *Int. J. Remote Sens.* 33, 3323–3353. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.531914>

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 Discuss.* 1–20. <https://doi.org/10.5194/bg-2019-324>

Silva Dias, M.A.F., Silva Dias, P.L., Longo, M., Fitzjarrald, D.R., Denning, A.S., 2004. River breeze circulation in eastern Amazonia: Observations and modelling results. *Theor. Appl. Climatol.* 78, 111–121. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0047-6>

Silva Junior, C.H.L., Almeida, C.T., Santos, J.R.N., Anderson, L.O., Aragão, L.E.O.C., Silva, F.B., 2018. Spatiotemporal rainfall trends in the Brazilian legal Amazon between the years 1998 and 2015. *Water* 10, 1220. <https://doi.org/10.3390/w10091220>

Silva, M.V., Paris, A., Calmant, S., Cândido, L.A., Silva, J.S., 2019. Associação do regime hidrológico do rio xingu com oceanos adjacentes em eventos extremos utilizando dados altimétricos. *Brazilian J. Dev.* 5. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n11-339>

Silva, T.S.F., Costa, M.P.F., Melack, J.M., 2010. Spatial and temporal variability of macrophyte cover and productivity in the eastern Amazon floodplain: A remote sensing approach. *Remote Sens. Environ.* 114, 1998–2010. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.007>

Silva, T.S.F., Melack, J.M., Novo, E.M.L.M.L.M., 2013. Responses of aquatic macrophyte cover and productivity to flooding variability on the Amazon floodplain. *Glob. Chang. Biol.* 19, 3379–3389. <https://doi.org/10.1111/gcb.12308>

Silvério, D. V., Brando, P.M., Macedo, M.N., Beck, P.S.A., Bustamante, M., Coe, M.T., 2015. Agricultural expansion dominates climate changes in southeastern Amazonia: The overlooked non-GHG forcing. *Environ. Res. Lett.* 10. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/10/104015>

Sioli, H., 1956. Über natur und mensch im brasilianischen Amazonasgebiet. *Erdkunde* 89–109. <https://doi.org/http://www.jstor.org/stable/23218158>

Sippel, S.J., Hamilton, S.K., Melack, J., 1992. Inundation area and morphometry of lakes on the Amazon

River floodplain, Brazil. *Arch. für Hydrobiol.* 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 Sens. Environ.* 48, 70–76. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90115-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90115-5)

Sippel, S.J., Hamilton, S.K., Melack, J.M., Novo, E.M.M., 1998. Passive microwave observations of inundation area and the area/stage relation in the Amazon River floodplain. *Int. J. Remote Sens.* 19, 3055–3074. <https://doi.org/10.1080/014311698214181>

Siqueira, V.A., Paiva, R.C.D., Fleischmann, A.S., Fan, F.M., Ruhoff, A.L., Pontes, P.R.M., Paris, A., Calmant, S., Collischonn, W., 2018. Toward continental hydrologic-hydrodynamic modeling in South America. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 4815–4842. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>

Sörensson, A.A., Ruscica, R.C., 2018. Intercomparison and Uncertainty Assessment of Nine Evapotranspiration Estimates Over South America. *Water Resour. Res.* 54, 2891–2908. <https://doi.org/10.1002/2017WR021682>

Sorooshian, S., Gao, X., Hsu, K., Maddox, R.A., Hong, Y., Gupta, H. V., Imam, B., 2002. Diurnal variability of tropical rainfall retrieved from combined GOES and TRMM satellite information. *J. Clim.* 15, 983–1001. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<0983:DVOTRR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0983:DVOTRR>2.0.CO;2)

Sorooshian, S., Hsu, K.L., Gao, X., Gupta, H. V., Imam, B., Braithwaite, D., 2000. Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 81, 2035–2046. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<2035:EOPSS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<2035:EOPSS>2.3.CO;2)

Sorribas, M.V., de Paiva, R.C.D., Fleischmann, A.S., Collischonn, W., 2020. Hydrological Tracking Model for Amazon Surface Waters, *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2019WR024721>

Sorribas, M.V., Paiva, R.C.D., Melack, J.M., Bravo, J.M., Jones, C., Carvalho, L., Beighley, E., Forsberg, B., Costa, M.H., 2016. Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. *Clim. Change* 136, 555–570. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1640-2>

Souza, C.M., Kirchoff, F.T., Oliveira, B.C., Ribeiro, J.G., Sales, M.H., 2019. Long-term annual surface water change in the Brazilian Amazon Biome: Potential links with deforestation, infrastructure development and climate change. *Water (Switzerland)* 11, 566. <https://doi.org/10.3390/w11030566>

Spera, S.A., Cohn, A.S., Vanwey, L.K., Mustard, J.F., Rudorff, B.F., Risso, J., Adami, M., 2014. Recent cropping frequency, expansion, and abandonment in Mato Grosso, Brazil had selective land characteristics. *Environ. Res. Lett.* 9. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/6/064010>

Spera, S.A., Galford, G.L., Coe, M.T., Macedo, M.N., Mustard, J.F., 2016. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. *Glob. Chang. Biol.* 22, 3405–3413. <https://doi.org/10.1111/gcb.13298>

Staal, A., Flores, B.M., Aguiar, A.P.D., Bosmans, J.H.C., Fetzer, I., Tuinenburg, O.A., 2020. Feedback between drought and deforestation in the Amazon. *Environ. Res. Lett.* 15. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab738e>

Staal, A., Tuinenburg, O.A., Bosmans, J.H.C., Holmgren, M., Van Nes, E.H., Scheffer, M., Zemp,



D.C., Dekker, S.C., 2018. Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nat. Clim. Chang.* 8, 539–543. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0177-y>

Stammer, D., Cazenave, A., 2017. Satellite altimetry over oceans and land surfaces, *Satellite Altimetry Over Oceans and Land Surfaces*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315151779>

Stickler, C.M., Coe, M.T., Costa, M.H., Nepstad, D.C., McGrath, D.G., Dias, L.C.P., Rodrigues, H.O., Soares-Filho, B.S., 2013. Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 9601–9606. <https://doi.org/10.1073/pnas.1215331110>

Su, Z., Schmugge, T., Kustas, W.P., Massman, W.J., 2001. An evaluation of two models for estimation of the roughness height for heat transfer between the land surface and the atmosphere. *J. Appl. Meteorol.* 40, 1933–1951. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<1933:AEOTMF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<1933:AEOTMF>2.0.CO;2)

Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., Hsu, K., 2018. A Review of Global Precipitation Data Sets: Data Sources, Estimation, and Intercomparisons. *Rev. Geophys.* 56, 79–107. <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>

Sutanudjaja, E.H., van Beek, R., Wanders, N., Wada, Y., Bosmans, J.H.C., Drost, N., van der Ent, R.J., de Graaf, I.E.M., Hoch, J.M., de Jong, K., Karssenber, D., López López, P., Peßenteiner, S., Schmitz, O., Straatsma, M.W., Vannamete, E., Wisser, D., Bierkens, M.F.P., 2018. PCR-GLOBWB 2: a 5arcmin global hydrological and water resources model. *Geosci. Model Dev.* 11, 2429–2453. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2429-2018>

Swann, A.L.S., Koven, C.D., 2017. A Direct Estimate of the Seasonal Cycle of Evapotranspiration over the Amazon Basin. *J. Hydrometeorol.* 18, 2173–2185. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0004.1>

Sylvester, Z., Durkin, P., Covault, J.A., 2019. High curvatures drive river meandering. *Geology* 47, 263–266. <https://doi.org/10.1130/G45608.1>

Talsma, C.J., Good, S.P., Jimenez, C., Martens, B., Fisher, J.B., Miralles, D.G., McCabe, M.F., Purdy, A.J., 2018. Partitioning of evapotranspiration in remote sensing-based models. *Agric. For. Meteorol.* 260–261, 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.010>

Tan, J., Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., 2019. IMERG V06: Changes to the morphing algorithm. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 36, 2471–2482. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0114.1>

Tang, R., Li, Z.L., Jia, Y., Li, C., Chen, K.S., Sun, X., Lou, J., 2013. Evaluating one- and two-source energy balance models in estimating surface evapotranspiration from Landsat-derived surface temperature and field measurements. *Int. J. Remote Sens.* 34, 3299–3313. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.716529>

Tapiador, F.J., Kidd, C., Levizzani, V., Marzano, F.S., 2004. A neural networks-based fusion technique to estimate half-hourly rainfall estimates at 0.1° resolution from satellite passive microwave and infrared data. *J. Appl. Meteorol.* 43, 576–594. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0576:ANNFTT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0576:ANNFTT>2.0.CO;2)

Tapiador, F.J., Navarro, A., Levizzani, V., García-Ortega, E., Huffman, G.J., Kidd, C., Kucera, P.A., Kummerow, C.D., Masunaga, H., Petersen, W.A., Roca, R., Sánchez, J.L., Tao, W.K., Turk, F.J., 2017.

Global precipitation measurements for validating climate models. *Atmos. Res.* 197, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.06.021>

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* (80-. ). 305, 503–505. <https://doi.org/10.1126/science.1099192>

Tapley, B.D., Watkins, M.M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., Sasgen, I., Famiglietti, J.S., Landerer, F.W., Chambers, D.P., Reager, J.T., Gardner, A.S., Save, H., Ivins, E.R., Swenson, S.C., Boening, C., Dahle, C., Wiese, D.N., Dolslaw, H., Tamisiea, M.E., Velicogna, I., 2019. Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nat. Clim. Chang.* <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0456-2>

Tarpanelli, A., Barbetta, S., Brocca, L., Moramarco, T., 2013. River Discharge Estimation by Using Altimetry Data and Simplified Flood Routing Modeling 4145–4162. <https://doi.org/10.3390/rs5094145>

Taylor, C.M., Prigent, C., Dadson, S.J., 2018. Mesoscale rainfall patterns observed around wetlands in sub-Saharan Africa. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 144, 2118–2132. <https://doi.org/10.1002/qj.3311>

Thiemig, V., Rojas, R., Zambrano-Bigiarini, M., De Roo, A., 2013. Hydrological evaluation of satellite-based rainfall estimates over the Volta and Baro-Akobo Basin. *J. Hydrol.* 499, 324–338. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.012>

Thom, G., Xue, A.T., Sawakuchi, A.O., Ribas, C.C., Hickerson, M.J., Aleixo, A., Miyaki, C., 2020. Quaternary climate changes as speciation drivers in the Amazon floodplains. *Sci. Adv.* 6. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax4718>

Thomaz, S.M., Bini, L.M., Bozelli, R.L., 2007. Floods increase similarity among aquatic habitats in river-floodplain systems. *Hydrobiologia* 579, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0285-y>

Topp, S.N., Pavelsky, T.M., Jensen, D., Simard, M., Ross, M.R.V., 2020. Research trends in the use of remote sensing for inland water quality science: Moving towards multidisciplinary applications. *Water (Switzerland)* 12, 1–34. <https://doi.org/10.3390/w12010169>

Toté, C., Patricio, D., Boogaard, H., van der Wijngaart, R., Tarnavsky, E., Funk, C., 2015. Evaluation of satellite rainfall estimates for drought and flood monitoring in Mozambique. *Remote Sens.* 7, 1758–1776. <https://doi.org/10.3390/rs70201758>

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 Resour. Res.* 54, 1–27. <https://doi.org/10.1029/2017WR021674>

Towner, J., Cloke, H.L., Zsoter, E., Flamig, Z., Hoch, J.M., Bazo, J., De Perez, E.C., Stephens, E.M., 2019. Assessing the performance of global hydrological models for capturing peak river flows in the Amazon basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* <https://doi.org/10.5194/hess-23-3057-2019>

Trenberth, K.E., 2011. Changes in precipitation with climate change. *Clim. Res.* 47, 123–138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>

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 Resour. Res.* 48, 1–17. <https://doi.org/10.1029/2011WR015000>

Trigg, M.A., Wilson, M.D., Bates, P.D., Horritt, M.S., Alsdorf, D.E., Forsberg, B.R., Vega, M.C., 2009. Amazon flood wave hydraulics. *J. Hydrol.* 374, 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.004>

Turk, F.J., Rohaly, G.D., Jeff, H., Smith, E.A., Marzano, F.S., Mugnai, A., Levizzani, V., 2000. Meteorological applications of precipitation estimation from combined SSM/I, TRMM and infrared geostationary. *Microw. Radiom. Remote Sens. Earth's Surf. Atmos.* 353.

Ushio, T., Sasashige, K., Kubota, T., Shige, S., Okamoto, K., Aonashi, K., Inoue, T., Takahashi, N., Iguchi, T., Kachi, M., Oki, R., Morimoto, T., Kawasaki, Z.I., 2009. A kalman filter approach to the global satellite mapping of precipitation (GSMaP) from combined passive microwave and infrared radiometric data. *J. Meteorol. Soc. Japan* 87 A, 137–151. <https://doi.org/10.2151/jmsj.87A.137>

Valerio, A. de M., Kampel, M., Vantrepotte, V., Ward, N.D., Sawakuchi, H.O., Less, D.F.D.S., Neu, V., Cunha, A., Richey, J., 2018. Using CDOM optical properties for estimating DOC concentrations and pCO<sub>2</sub> in the Lower Amazon River. *Opt. Express* 26, A657. <https://doi.org/10.1364/oe.26.00a657>

Van Der Ent, R.J., Savenije, H.H.G., Schaefli, B., Steele-Dunne, S.C., 2010. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resour. Res.* 46, 1–12. <https://doi.org/10.1029/2010WR009127>

Van Dijk, A.I.J.M., Renzullo, L.J., 2011. Water resource monitoring systems and the role of satellite observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 39–55. <https://doi.org/10.5194/hess-15-39-2011>

van het Schip, T.I., Overeem, A., Leijnse, H., Uijlenhoet, R., Meirink, J.F., van Delden, A.J., 2017. Rainfall measurement using cell phone links: classification of wet and dry periods using geostationary satellites. *Hydrol. Sci. J.* 62, 1343–1353. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1329588>

Van Huijgevoort, M.H.J., Hazenberg, P., Van Lanen, H.A.J., Teuling, A.J., Clark, D.B., Folwell, S., Gosling, S.N., Hanasaki, N., Heinke, J., Koiraal, S., Stacke, T., Voss, F., Sheffield, J., Uijlenhoet, R., 2013. Global multimodel analysis of drought in runoff for the second half of the twentieth century. *J. Hydrometeorol.* 14, 1535–1552. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0186.1>

Venticinque, E., Forsberg, B., Barthem, R., Petry, P., Hess, L., Mercado, A., Cañas, C., Montoya, M., Durigan, C., Goulding, M., 2016. An explicit GIS-based river basin framework for aquatic ecosystem conservation in the Amazon. *Earth Syst. Sci. Data* 8, 651–661. <https://doi.org/10.5194/essd-8-651-2016>

Vera, C.S., Alvarez, M.S., Gonzalez, P.L.M., Liebmann, B., Kiladis, G.N., 2018. Seasonal cycle of precipitation variability in South America on intraseasonal timescales. *Clim. Dyn.* 51, 1991–2001. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3994-1>

Viale, M., Bianchi, E., Cara, L., Ruiz, L.E., Villalba, R., Pitte, P., Masiokas, M., Rivera, J., Zalazar, L., 2019. Contrasting climates at both sides of the Andes in Argentina and Chile. *Front. Environ. Sci.* 7, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00069>

Vicente, G.A., Scofield, R.A., Menzel, W.P., 1998. The Operational GOES Infrared Rainfall Estimation Technique. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 79, 1883–1893. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<1883:togire>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<1883:togire>2.0.co;2)

Villar, R.E., Martinez, J.M., Armijos, E., Espinoza, J.C., Filizola, N., Dos Santos, A., Willems, B., Fraizy,

P., Santini, W., Vauchel, P., 2018. Spatio-temporal monitoring of suspended sediments in the Solimões River (2000–2014). *Comptes Rendus - Geosci.* 350, 4–12. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2017.05.001>

Villar, R.E., Martinez, J.M., Le Texier, M., Guyot, J.L., Fraizy, P., Meneses, P.R., Oliveira, E. de, 2013. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. *J. South Am. Earth Sci.* 44, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.11.006>

Virji, H., 1981. A Preliminary Study of Summertime Tropospheric Circulation Patterns over South America Estimated from Cloud Winds. *Mon. Weather Rev.* 109, 599–610. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0599:APSOST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0599:APSOST>2.0.CO;2)

von Randow, C., Manzi, A.O., Kruijt, B., de Oliveira, P.J., Zanchi, F.B., Silva, R.L., Hodnett, M.G., Gash, J.H.C., Elbers, J.A., Waterloo, M.J., Cardoso, F.L., Kabat, P., 2004. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. *Theor. Appl. Climatol.* 78, 5–26. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0041-z>

von Randow, R. de C.S., Tomasella, J., von Randow, C., de Araújo, A.C., Manzi, A.O., Hutjes, R., Kruijt, B., 2020. Evapotranspiration and gross primary productivity of secondary vegetation in Amazonia inferred by eddy covariance. *Agric. For. Meteorol.* 294. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108141>

Vörösmarty, C.J., Green, P., Salisbury, J., Lammers, R.B., 2000. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science (80-. )*. 289, 284–288. <https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284>

Vörösmarty, C.J., Moore, B., Grace, A.L., Gildea, M.P., Melillo, J.M., Peterson, B.J., Rastetter, E.B., Steudler, P.A., 1989. Continental scale models of water balance and fluvial transport: An application to South America. *Global Biogeochem. Cycles* 3, 241–265. <https://doi.org/10.1029/GB003i003p00241>

Walcker, R., Corenblit, D., Julien, F., Martinez, J.M., Steiger, J., 2021. Contribution of meandering rivers to natural carbon fluxes: Evidence from the Ucayali River, Peruvian Amazonia. *Sci. Total Environ.* 776. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146056>

Wanders, N., Bierkens, M.F.P., de Jong, S.M., de Roo, A., Karssenbergh, D., 2014. The benefits of using remotely sensed soil moisture in parameter identification of large-scale hydrological models. *Water Resour. Res.* 50, 6874–6891. <https://doi.org/10.1002/2013WR014639>

Wang, C., Li, Z., Zhu, J., Yi, H., Xie, Q., 2011. Flooded forest water level changes in Amazon measured with ALOS PALSAR polarimetric interferometric SAR data. *J. Comput. Inf. Syst.* 7, 2922–2930.

Wang, G., Cao, X., Cai, X., Sun, J., Li, X., Wang, H., 2018. A new data assimilation method for high-dimensional models. *PLoS One* 13, 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191714>

Wang, X.Y., Li, X., Zhu, J., Tanajura, C.A.S., 2018. The strengthening of Amazonian precipitation during the wet season driven by tropical sea surface temperature forcing. *Environ. Res. Lett.* 13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aadbb9>

Ward, J. V., Tockner, K., Arcott, D.B., Claret, C., 2002. Riverine landscape diversity. *Freshw. Biol.* 47, 517–539. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00893.x>

Werdell, P.J., Behrenfeld, M.J., Bontempi, P.S., Boss, E., Cairns, B., Davis, G.T., Franz, B.A., Gliese, U.B.,

- Gorman, E.T., Hasekamp, O., Knobelspiesse, K.D., Mannino, A., Martins, J.V., McClain, C., Meister, G., Remer, L.A., 2019. The plankton, aerosol, cloud, ocean ecosystem mission status, science, advances. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 100, 1775–1794. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0056.1>
- Werdell, P.J., McKinna, L.I.W., Boss, E., Ackleson, S.G., Craig, S.E., Gregg, W.W., Lee, Z.-P., Maritorena, S., Roesler, C.S., Rousseaux, C.S., Stramski, D., Sullivan, J.M., Twardowski, M.S., Tzortziou, M., Zhang, X., 2018. An overview of approaches and challenges for retrieving marine inherent optical properties from ocean color remote sensing. *Prog. Oceanogr.* 160, 186–212. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.01.001>
- 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. *Geophys. Res. Lett.* 34, 4–9. <https://doi.org/10.1029/2007GL030156>
- Wilson, M.D., Durand, M., Jung, H.C., Alsdorf, D., 2015. Swath-altimetry measurements of the main stem Amazon River : 1943–1959. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1943-2015>
- Winemiller, K.O., McIntyre, P.B., Castello, L., Fluet-Chouinard, E., Giarrizzo, T., Nam, S., Baird, I.G., Darwall, W., Lujan, N.K., Harrison, I., Stiassny, M.L.J., Silvano, R.A.M., Fitzgerald, D.B., Pelicice, F.M., Agostinho, A.A., Gomes, L.C., Albert, J.S., Baran, E., Petrere, M., Zarfl, C., Mulligan, M., Sullivan, J.P., Arantes, C.C., Sousa, L.M., Koning, A.A., Hoeninghaus, D.J., Sabaj, M., Lundberg, J.G., Armbruster, J., Thieme, M.L., Petry, P., Zuanon, J., Vilara, G.T., Snoeks, J., Ou, C., Rainboth, W., Pavanelli, C.S., Akama, A., Soesbergen, A. van, Sáenz, L., 2016. Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. *Science* (80-. ). 351, 128–129. <https://doi.org/10.1126/science.aac7082>
- Wittmann, F., Anhof, D., Funk, W.J., 2002. Tree species distribution and community structure of central Amazonian várzea forests by remote-sensing techniques. *J. Trop. Ecol.* 18, 805–820. <https://doi.org/10.1017/S0266467402002523>
- Wongchuig, S.C., de Paiva, R.C.D., Siqueira, V., Collischonn, W., 2019. Hydrological reanalysis across the 20th century: A case study of the Amazon Basin. *J. Hydrol.* 570, 755–773. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.025>
- Wongchuig, S.C., Paiva, R.C.D. de, Biancamaria, S., Collischonn, W., 2020. Assimilation of future SWOT-based river elevations, surface extent observations and discharge estimations into uncertain global hydrological models. *J. Hydrol.* 590. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125473>
- Wood, E.F., Roundy, J.K., Troy, T.J., Van Beek, L.P.H., Bierkens, M.F.P., Blyth, E., De Roo, A., Doll, P., Ek, M., Famiglietti, J., Gochis, D., Van De Giesen, N., Houser, P., Jaffe, P.R., Kollet, S., Lehner, B., Lettenmaier, D.P., Peters-Lidard, C., Sivapalan, M., Sheffield, J., Wade, A., Whitehead, P., 2011. Hyperresolution global land surface modeling: meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water. *Water Resour. Res.* 47, 1–10. <https://doi.org/10.1029/2010WR010090>
- 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. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 114, 8481–8486. <https://doi.org/10.1073/pnas.1621516114>
- Wu, J., Lakshmi, V., Wang, D., Lin, P., Pan, M., Cai, X., Wood, E.F., Zeng, Z., 2020. The reliability of global remote sensing evapotranspiration products over Amazon. *Remote Sens.* 12. <https://doi.org/10.3390/rs12142211>

- Xavier, L., Becker, M., Cazenave, A., Longuevergne, L., Llovel, W., Filho, O.C.R., 2010. Interannual variability in water storage over 2003–2008 in the Amazon Basin from GRACE space gravimetry, in situ river level and precipitation data. *Remote Sens. Environ.* 114, 1629–1637. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.02.005>
- Xie, P., Adler, R.F., Huffman, G.J., Bolvin, D., 2011. Global Precipitation Climatology Project (GPCP) - Pentad, Version 2.2. NOAA Natl. Clim. Data Cent.
- Xie, P., Janowiak, J.E., Arkin, P.A., Adler, R., Gruber, A., Ferraro, R., Huffman, G.J., Curtis, S., 2003. GPCP pentad precipitation analyses: An experimental dataset based on gauge observations and satellite estimates. *J. Clim.* 16, 2197–2214. <https://doi.org/10.1175/2769.1>
- Xie, P., Joyce, R., Wu, S., Yoo, S.H., Yarosh, Y., Sun, F., Lin, R., 2017. Reprocessed, bias-corrected CMORPH global high-resolution precipitation estimates from 1998. *J. Hydrometeorol.* 18, 1617–1641. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0168.1>
- Xu, X., Jia, G., Zhang, X., Riley, W.J., Xue, Y., 2020. Climate regime shift and forest loss amplify fire in Amazonian forests. *Glob. Chang. Biol.* 26, 5874–5885. <https://doi.org/10.1111/gcb.15279>
- Yamazaki, D., Baugh, C.A., Bates, P.D., Kanae, S., Alsdorf, D.E., Oki, T., 2012a. Adjustment of a spaceborne DEM for use in floodplain hydrodynamic modeling. *J. Hydrol.* 436–437, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.045>
- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Sosa, J., Bates, P.D., Allen, G.H., Pavelsky, T.M., 2019. MERIT Hydro: A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset. *Water Resour. Res.* 55, 5053–5073. <https://doi.org/10.1029/2019WR024873>
- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O’Loughlin, F., Neal, J.C., Sampson, C.C., Kanae, S., Bates, P.D., 2017. A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophys. Res. Lett.* 44, 5844–5853. <https://doi.org/10.1002/2017GL072874>
- Yamazaki, D., Kanae, S., Kim, H., Oki, T., 2011. A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model. *Water Resour. Res.* 47. <https://doi.org/10.1029/2010WR009726>
- Yamazaki, D., Lee, H., Alsdorf, D.E., Dutra, E., Kim, H., Kanae, S., Oki, T., 2012b. Analysis of the water level dynamics simulated by a global river model: A case study in the Amazon River. *Water Resour. Res.* 48, 1–15. <https://doi.org/10.1029/2012WR011869>
- Yamazaki, D., O’Loughlin, F., Trigg, M.A., Miller, Z.F., Pavelsky, T.M., Bates, P.D., 2014. Development of the Global Width Database for Large Rivers. *Water Resour. Res.* 50, 3467–3480. <https://doi.org/10.1002/2013WR014664>
- Yamazaki, D., Trigg, M.A., Ikeshima, D., 2015. Development of a global ~90m water body map using multi-temporal Landsat images. *Remote Sens. Environ.* 171, 337–351. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.014>
- Yang, Z., Dominguez, F., 2019. Investigating land surface effects on the moisture transport over South America with a moisture tagging model. *J. Clim.* 32, 6627–6644. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0700.1>

Yepez, S., Laraque, A., Martinez, J.M., Sa, J. De, Manuel, J., Castellanos, B., Gally, M., Lopez, J.L., De Sa, J., Carrera, J.M., Castellanos, B., Gally, M., Lopez, J.L., Sa, J. De, Manuel, J., Castellanos, B., Gally, M., Lopez, J.L., De Sa, J., Carrera, J.M., Castellanos, B., Gally, M., Lopez, J.L., 2018. Retrieval of suspended sediment concentrations using Landsat-8 OLI satellite images in the Orinoco River (Venezuela). *Comptes Rendus - Geosci.* 350, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2017.08.004>

Yilmaz, K.K., Hogue, T.S., Hsu, K.L., Sorooshian, S., Gupta, H. V., Wagener, T., 2005. Intercomparison of rain gauge, radar, and satellite-based precipitation estimates with emphasis on hydrologic forecasting. *J. Hydrometeorol.* 6, 497–517. <https://doi.org/10.1175/JHM431.1>

Yuan, T., Lee, H., Jung, H.C., 2015. Toward Estimating Wetland Water Level Changes Based on Hydrological Sensitivity Analysis of PALSAR Backscattering Coefficients over Different Vegetation Fields. *Remote Sens.* . <https://doi.org/10.3390/rs70303153>

Yuan, T., Lee, H., Jung, H.C., Aierken, A., Beighley, E., Alsdorf, D.E., Tshimanga, R.M., Kim, D., 2017. Absolute water storages in the Congo River floodplains from integration of InSAR and satellite radar altimetry. *Remote Sens. Environ.* 201, 57–72. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.003>

Yuan, T., Lee, H., Yu, H., Jung, H.C., Madson, A., Sheng, Y., Beighley, E., 2019. Mapping forested floodplain topography using insar and radar altimetry. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 12, 5189–5198. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2956400>

Zakharova, E.A., Kouraev, A. V., Cazenave, A., Seyler, F., 2006. Amazon River discharge estimated from TOPEX/Poseidon altimetry. *Comptes Rendus - Geosci.* 338, 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.10.003>

Zemp, D.C., Schleussner, C.F., Barbosa, H.M.J., Hirota, M., Montade, V., Sampaio, G., Staal, A., Wang-Erlandsson, L., Rammig, A., 2017. Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. *Nat. Commun.* 8. <https://doi.org/10.1038/ncomms14681>

Zemp, D.C., Schleussner, C.F., Barbosa, H.M.J., Van Der Ent, R.J., Donges, J.F., Heinke, J., Sampaio, G., Rammig, A., 2014. On the importance of cascading moisture recycling in South America. *Atmos. Chem. Phys.* 14, 13337–13359. <https://doi.org/10.5194/acp-14-13337-2014>

Zeng, N., Yoon, J.H., Marengo, J.A., Subramaniam, A., Nobre, C.A., Mariotti, A., Neelin, J.D., 2008. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. *Environ. Res. Lett.* 3, 014002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/3/1/014002>

Zhang, K., Kimball, J.S., Running, S.W., 2016. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *Wiley Interdiscip. Rev. Water.* <https://doi.org/10.1002/wat2.1168>

Zhang, K., Zhu, G., Ma, J., Yang, Y., Shang, S., Gu, C., 2019. Parameter Analysis and Estimates for the MODIS Evapotranspiration Algorithm and Multiscale Verification. *Water Resour. Res.* 55, 2211–2231. <https://doi.org/10.1029/2018WR023485>

Zhang, M., Lee, H., SHUM, C.K., Alsdorf, D., Schwartz, F., Tseng, K.-H., Yi, Y., Kuo, C.-Y., Tseng, H.-Z., Braun, A., Calmant, S., Filizola, N., Seyler, F., 2010. Application of retracked satellite altimetry for inland hydrologic studies. *Int. J. Remote Sens.* 31, 3913–3929. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.483495>

Zhang, Y., Pan, M., Sheffield, J., Siemann, A.L., Fisher, C.K., Liang, M., Beck, H.E., Wanders, N.,

- MacCracken, R.F., Houser, P.R., Zhou, T., Lettenmaier, D.P., Pinker, R.T., Bytheway, J., Kummerow, C.D., Wood, E.F., 2018. A Climate Data Record (CDR) for the global terrestrial water budget: 1984–2010. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 241–263. <https://doi.org/10.5194/hess-22-241-2018>
- Zheng, G., DiGiacomo, P.M., 2017. Remote sensing of chlorophyll-a in coastal waters based on the light absorption coefficient of phytoplankton. *Remote Sens. Environ.* 201, 331–341. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.008>
- Zhou, J., Lau, K.M., 1998. Does a monsoon climate exist over South America? *J. Clim.* 11, 1020–1040. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<1020:DAMCEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<1020:DAMCEO>2.0.CO;2)
- Zhou, L., Divakarla, M., Liu, X., 2016. An overview of the joint polar satellite system (JPSS) science data product calibration and validation. *Remote Sens.* 8. <https://doi.org/10.3390/rs8020139>
- Zubieta, R., Getirana, A., Espinoza, J.C., Lavado-Casimiro, W., Aragon, L., 2017. Hydrological modeling of the Peruvian-Ecuadorian Amazon Basin using GPM-IMERG satellite-based precipitation dataset. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 3543–3555. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3543-2017>
- Zubieta, R., Getirana, A., Espinoza, J.C., Lavado, W., 2015. Impacts of satellite-based precipitation datasets on rainfall-runoff modeling of the Western Amazon basin of Peru and Ecuador. *J. Hydrol.* 528, 599–612. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.064>
- Zubieta, R., Saavedra, M., Espinoza, J.C., Ronchail, J., Sulca, J., Drapeau, G., Martin-Vide, J., 2019. Assessing precipitation concentration in the Amazon basin from different satellite-based data sets. *Int. J. Climatol.* 39, 3171–3187. <https://doi.org/10.1002/joc.6009>
- Zulkafli, Z., Buytaert, W., Manz, B., Rosas, C.V., Willems, P., Lavado-Casimiro, W., Guyot, J.L., Santini, W., 2016. Projected increases in the annual flood pulse of the Western Amazon. *Environ. Res. Lett.* 11. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/1/014013>
- Zulkafli, Z., Buytaert, W., Onof, C., Lavado, W., Guyot, J.L., 2013. A critical assessment of the JULES land surface model hydrology for humid tropical environments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 1113–1132. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1113-2013>
- Zulkafli, Z., Buytaert, W., Onof, C., Manz, B., Tarnavsky, E., Lavado, W., Guyot, J.L., 2014. A comparative performance analysis of TRMM 3B42 (TMPA) versions 6 and 7 for hydrological applications over Andean-Amazon river basins. *J. Hydrometeorol.* 15, 581–592. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-094.1>



~~~~~

