

## O sistema estuarino amazônico

O sistema estuarino amazônico é um objeto geográfico complexo, com extrema variabilidade tanto no tempo quanto no espaço.

É estudado pelo IRD e seus parceiros desde o final dos anos 1980, mas somente as mais recentes ferramentas digitais e dados de satélite permitirão a implementação de um sistema de previsão operacional do risco de inundação em todo o estuário.

### Contexto

A Amazônia inferior é o sistema estuarino de todos os superlativos. A maré flui para o interior por mais de 800 km, tornando-o o estuário mais longo do mundo. Além disso, esta região em rápido crescimento, com uma população atual de quatro milhões e que dobra a cada 20 anos, está sujeita às inundações e secas do rio. A história da pesquisa ambiental conduzida pelo IRD neste continente/oceano contínuo, único e fascinante começou no final dos anos 1980. Esta história é antes de tudo multidisciplinaridade, combinando hidrologia, oceanografia, sedimentologia e geoquímica, que o projeto Hybam apresentado no Capítulo I, reuniu.

O programa tomou forma no início dos anos 1990, como parte de um programa conjunto Orstom-INSU (Intertropical Geosphere Environment Programme, PEGI). Naquela época, a Amazônia já era um motor de crescimento econômico no Brasil como um reservatório de biodiversidade e era importante determinar seu potencial hidrelétrico. Também foi importante compreender e antecipar os efeitos do desmatamento na erosão do solo e na contaminação das águas superficiais, e mitigar os impactos das grandes inundações sobre as atividades humanas nas grandes várzeas. Suspeitava-se que o comportamento hidráulico, sedimentar e biogeoquímico das planícies a jusante de Óbidos fosse fortemente influenciado pela maré oceânica, que as atingia duas vezes ao dia. Desde 2004, a fim de melhorar nosso conhecimento da interação entre a maré do oceano e os fluxos de água e matéria que chegam à montante da bacia hidrográfica, e assim quantificar as vazões efetivamente exportadas para o Oceano Atlântico, foi necessário simular esses efeitos da hidrodinâmica do estuário por meio de modelagem digital. Do ponto de vista social, esta modelagem deveria contribuir para melhorar a segurança



Medição do nível da água na Amazônia (programa HyBam), Peru.

da navegação no estuário e compreender melhor as grandes inundações que afetam episodicamente os centros urbanos ribeirinhos.

Já em 1997, os pesquisadores começaram a medir diretamente o fluxo total do rio Amazonas em sua boca oceânica (contribuição do rio Amazonas e de todos os seus afluentes à jusante de Óbidos) usando a tecnologia Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), que era completamente inovadora na época. As primeiras campanhas de medição direta da vazão na foz do rio mostraram vazões altamente variáveis durante o ciclo da maré, com picos de mais de 600.000m<sup>3</sup>/s durante a maré baixa (60% do total da entrada do rio no oceano!), que contrastaram com vazões zero ou mesmo negativas (isto é, subindo à montante do estuário) algumas horas depois durante a maré cheia.

Em 2005, o projeto Amandes (Amazon-Andeans-IRD-CNRS) propôs estudar a conexão hidrológica e geoquímica entre a cadeia andina, o rio Amazonas e o Oceano Atlântico, visando explicitamente o fluxo estuarino como objeto de estudo. Este projeto reuniu várias disciplinas, incluindo geoquímica, hidrografia observacional in situ e modelagem digital de hidrodinâmica (física descrevendo o movimento de líquidos). A dupla especificidade do projeto Amandes consistiu, por um lado, em confiar fortemente nas ferramentas da geoquímica isotópica (a análise do comportamento de um certo número

### PARCEIROS

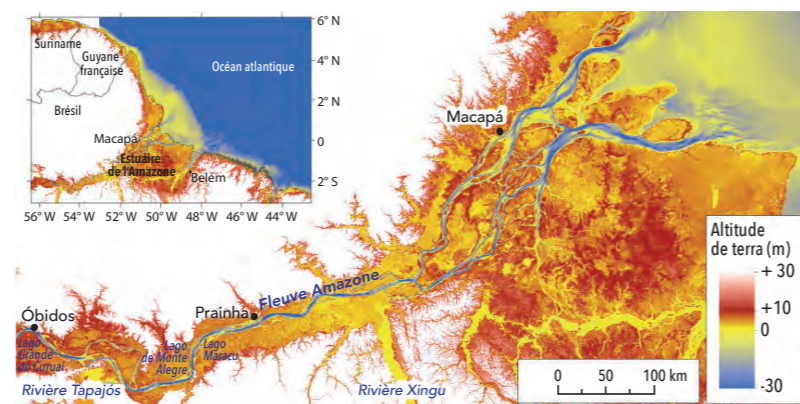
Universidade de Brasília (UnB), Brasil

Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM)

de elementos presentes em quantidades vestigiais, como as terras raras - neodímio e rádio, por exemplo - permite compreender o funcionamento hidro-sedimentar do estuário) e, por outro lado, utilizar uma abordagem acoplada entre a hidrodinâmica estuarina e a geoquímica marinha baseada na modelagem hidrodinâmica original do estuário.

Assim, com base em uma rede de estações maregráficas que se estendem ao longo de toda a extensão do estuário e são implantadas durante um ciclo anual entre 1998 e 1999, a equipe de cientistas elaborou uma tipologia inicial da maré na foz do rio Amazonas e sua propagação até o limite a montante do estuário, cerca de 800 km no continente. A primeira observação é que a maré na boca do rio Amazonas é larga - com uma diferença entre os pontos mais altos e mais baixos do mar durante uma maré - atingindo 5 m durante as marés do equinócio. Tais amplitudes, embora comuns ao longo das costas da Europa Ocidental, são bastante únicas na escala dos oceanos tropicais. Com esta energia acumulada no oceano, as ondas da maré correm sem dificuldade para o estuário amazônico, propagando-se ao longo de várias centenas de quilômetros contra a corrente da poderosa descarga do rio. Ao comparar os dados adquiridos durante as diferentes estações, os pesquisadores envolvidos no projeto Hybam chegaram à conclusão de que a capacidade da maré de subir a montante no estuário é altamente dependente da estação do ano. Em períodos de águas baixas, o efeito da maré é perceptível até Óbidos, 900 km rio acima, enquanto em períodos de águas altas, o efeito é menos perceptível, ele pode ser visto até a Prainha, que fica a 600 km de distância apenas. Estas diferenças sazonais no efeito da maré e, portanto, na extensão do estuário resultam da competição entre a energia da água do rio e a maré.

Nos anos 2000, várias iniciativas de modelagem numérica hidrodinâmica do estuário amazônico foram realizadas pelos parceiros do IRD no projeto Hybam, em particular pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e pelo



Mapa topo-batimétrico do estuário do Amazonas.

As áreas em amarelo e azul estão abaixo do nível médio do mar, as áreas em laranja e vermelho estão acima. O curso principal do rio e o delta do terminal é visível em azul. Este trabalho, que combinava dados espaciais, trabalho de campo e digitalização de cartas náuticas é o primeiro passo para a modelagem hidrodinâmica do estuário.

Fonte: Fassoni-Andrade A. C. et al (2021).

CNRS. Estes modelos, embora relativamente grosseiros na resolução de suas grades de cálculo, permitiram estabelecer um mapa inicial da propagação da maré do Oceano Atlântico ao longo do estuário amazônico, e sua interação com a descarga de água doce do rio.

No decorrer do projeto Amandes e da década que se seguiu, a geoquímica surgiu como uma disciplina muito complementar à hidrodinâmica clássica para uma compreensão integrada do funcionamento hidro-sedimentar do estuário amazônico. As trocas entre os estados dissolvidos e particulados de certos elementos traços, como o rádio e o neodímio, ocorrem em velocidades diferentes, e estas podem ser usadas como cronômetros para caracterizar o tempo de residência das águas do rio Amazonas no estuário antes de alcançarem o oceano. Sabemos agora que as águas do estuário são exportadas para o mar aberto em apenas duas a três semanas, independentemente da magnitude da descarga do rio.

### Pesquisa atual e questões locais

Devido a sua complexidade, o sistema do estuário amazônico ainda é pouco conhecido. É uma área sujeita a riscos frequentes, enquanto um terço da população que vive ao longo de suas margens vive sob a ameaça direta de inundações recorrentes nas margens do estuário. Em 2021, as inundações históricas mostraram que este risco é significativo para os três principais centros urbanos do estuário, Belém, Macapá e Porto de Santana, durante a época das cheias ou da seca. A urgência de compreender este risco de inundações para o período atual, e de prever sua evolução a curto/médio prazo, é parte essencial da agenda de pesquisa do IRD, em um contexto onde as transformações a montante da bacia hidrográfica estão aumentando, e onde o nível médio do Oceano Atlântico está crescendo inexoravelmente sob o efeito da mudança climática. Esta necessidade de produzir conhecimento sobre o funcionamento do sistema estuarino durante eventos extremos e sobre seu impacto na dinâmica socioespacial está logicamente de acordo com as Metas de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas. As pesquisas atuais sobre a hidrodinâmica do sistema estuarino do rio Amazonas fazem parte desta dinâmica. No início dos anos 2020, os pesquisadores envolvidos neste projeto de pesquisa estão se beneficiando do legado das últimas três décadas, em particular das bases de observações históricas. No entanto, o desafio atual vai além do uso apenas dessas bases de dados, pois elas ainda são fragmentadas, dado o tamanho do estuário e sua grande variabilidade. Devemos, portanto, aceitar o desafio de fazer observações nas melhores escalas espaciais e temporais, que são a única forma de caracterizar a exposição das populações ribeirinhas ao risco de inundação. Isto requer o estabelecimento do estado da arte em modelagem hidrodinâmica numérica no continuum estuarino no baixo Amazonas, e a exploração da nova constelação de imagens espaciais fornecidas pela família de satélites Sentinel da Agência Espacial Europeia. Estes novos dados, colocados à disposição da comunidade científica internacional através da Nuvem Europeia de Ciência Aberta, destinam-se a alimentar um futuro sistema operacional de previsão de inundações para todo o estuário amazônico, conforme solicitado pela sociedade civil da região. A comunidade científica - no coração da qual está o IRD e sua rede de parceiros no Brasil e na Europa - deve criá-la durante a década atual.

Em um contexto onde as populações ribeirinhas dependem do rio como meio de transporte e subsistência, tal sistema operacional é essencial para orientar efetivamente as políticas públicas no âmbito local, com a questão necessária da adaptação em um contexto onde a mudança climática, que em grande parte modificou o sistema estuarino, é passível de acelerar.

### Questões globais

Os fluxos de água doce e sedimentos através do sistema estuarino até sua saída para o Oceano Atlântico equatorial influenciam a circulação oceânica e o sistema climático. Em primeiro lugar, no âmbito regional, a pluma - as águas doces e turvas provenientes do rio Amazonas, que se distinguem da água do oceano em uma distância muito longa – do rio Amazonas, pela quantidade colossal de água doce que traz à superfície do oceano, é capaz de alterar significativamente as trocas de calor entre o Oceano Atlântico e a atmosfera tropical, e assim modificar o clima de toda a bacia do Atlântico Ocidental e dos continentes adjacentes. Ela contribui para a variabilidade do nível do mar ao longo das costas das Guianas e até as Índias Ocidentais, territórios massivamente expostos ao perigo ciclônico e para os quais cada centímetro adicional de nível do mar conta. A própria pluma, em sua extensão de vários milhares de quilômetros da foz até o centro da bacia atlântica, parece contribuir para a intensificação dos ciclones tropicais que se formam ao largo, quando cruzam seu curso. Finalmente, na escala de tempo decadal a centenário, a água doce transportada através do estuário amazônico e redistribuída em toda a bacia do Atlântico Norte pela circulação oceânica geral tem um papel comprovado no clima das regiões temperadas da Europa Ocidental e América do Norte.

Sem a pluma de água doce do rio Amazonas, o Atlântico Norte veria depressões significativamente menos baixas - levando a um aquecimento significativo de todo o sul da Europa e do norte da África - e um resfriamento do clima dos EUA. Da mesma forma, o impacto a longo prazo da entrada de nutrientes amazônicos nos ciclos biogeoquímicos do Oceano Atlântico, e em particular na bomba biológica de carbono, permanece muito mal compreendido.

Os recentes surtos e eventos extremos no fluxo do rio Amazonas, portanto, exigem monitoramento e compreensão desta variabilidade a longo prazo até as regiões temperadas nos confins da bacia do Atlântico, a fim de incluí-la em modelos de previsão climática.



Lama andina transportada pela Amazônia (nasa.gov).

A imagem em cor natural destaca o delta e o estuário da Amazônia, conforme observado pelo Satélite Modis Terra (imagem de espectrorradiômetro de Resolução Média) da Nasa, em 29 de julho de 2020.

### Para mais informações

FASSONI-ANDRADE A. C. *et al.*, 2021 – 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>

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

KOSUTH P. *et al.*, 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>

LÉON M. *et al.*, 2022 – Use of <sup>223</sup>Ra and <sup>224</sup>Ra as chronometers to estimate the residence time of Amazon waters on the Brazilian continental shelf. *Limnol. Oceanogr.*, <https://doi.org/10.1002/lno.12010>

### Participaram das pesquisas

Fabien Durand (IRD), Alice César Fassoni Andrade (UnB), Patrick Seyler (IRD), Daniel Moreira (CPRM), Pieter van Beek (université de Toulouse), Pascal Kosuth (détachement IRD), Jacques Callède (IRD), Alain Laraque (IRD), Florent Lyard (CNRS), Yoann Le Bars (estudante de doutorado).

---

## Lista de autores

---

### PARTE 1 **Monitorar as dinâmicas, entender os processos**

#### **1 O Observatório HyBAm em grandes rios da Amazônia**

William Santini, engenheiro hidrológico, UMR GET  
Naziano Filizola, geólogo,  
Universidade Federal do Amazonas, Brasil  
Jean-Michel Martinez, hidrólogo, UMR GET  
Jean-Loup Guyot, hidrólogo, UMR GET

#### **2 Mensurar a diversidade florestal**

Raphael Pélissier, ecólogo, UMR Amap  
Eduardo Falconi, biólogo, IRD Representação Brasil  
Frédérique Seyler, pedóloga, sensoriamento remoto,  
UMR Espace-DEV

#### **3 Monitorar o desmatamento e a degradação florestal**

Laurent Polidori, sensoriamento remoto, geodésia,  
Universidade Federal do Pará, UMR Cesbio, Brasil  
Claudio Almeida, sensoriamento remoto,  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil

#### **4 Os solos : da dinâmica das lateritas à degradação da terra e da biodiversidade**

Thierry Desjardins, pedólogo, UMR IEES  
Paulo Martins, agrônomo, Universidade Federal do Pará, Brasil  
Frédérique Seyler, pedóloga, sensoriamento remoto,  
UMR Espace-DEV

#### **5 O papel essencial das várzeas no funcionamento do hidrossistema amazônico**

Patrick Seyler, geoquímico, UMR HSM, emérito  
Geraldo Boaventura, geoquímico,  
Universidade de Brasília, Brasil

## 6 Ictiologia Amazônica

Marc Pouilly, ictiólogo, UMR Borea  
Carlos Freitas, Universidade Federal do Amazonas, Brasil

## 7 Recursos hídricos e dados espaciais

Rodrigo Paiva, hidrólogo larga escala,  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil  
Fabrice Papa, hidrólogo, climatólogo, UMR Legos

## PARTE 2 Interações global-local

### 8 O sistema estuarino amazônico

Fabien Durand, oceanógrafo, UMR Legos  
Alice César Fassoni Andrade, hidróloga, pós-doutorando  
Patrick Seyler, geoquímico, UMR HSM, emérito  
Daniel Moreira, engenheiro cartográfico, hidrólogo,  
geodésia, Serviço geológico do Brasil  
Pieter van Beek, geoquímico, UMR Legos

### 9 O sistema costeiro da Amazônia

Jean-François Faure, geógrafo, UMR Espace-DEV  
Maria Teresa Prost, geomorfóloga,  
Museu Paraense Emílio Goeldi, Brasil

### 10 Processos físicos na foz do Amazonas

Ariane Koch Larouy, oceanógrafa, UMR Legos  
Flavia Lucena Fredou, ecóloga,  
Universidade Federal Rural do Pernambuco, Brasil  
Moacyr Araujo, oceanógrafo, climatólogo,  
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil  
Arnaud Bertrand, ecólogo, UMR Marbec

### 11 Climas do passado

Renato Campelo Cordeiro, geoquímico,  
Universidade Federal Fluminense, Brasil  
Abdel Sifeddine, climatólogo, UMR Locean

## 12 Climas atuais

Josyane Ronchail, geógrafa, UMR LOCEAN  
Jhan Carlo Espinoza, agrônomo, UMR IGE

## PARTE 3 Povos indígenas, populações locais e o ecossistema

### 13 Um observatório socioambiental na Amazônia, o INCT Odisseia

Marie-Paule Bonnet, hidróloga modeladora,  
UMR Espace-DEV

### 14 Reconfigurações dos padrões de vida e dinâmicas territoriais

Stéphanie Nasuti, antropóloga,  
Universidade de Brasília, Brasil

### 15 Plantas cultivadas: produção e conservação da diversidade

Mauro Almeida, sócio-antropólogo, Professor colaborador,  
Universidade Estadual de Campinas, Brasil  
Laure Emperaire, etnobotânica, UMR PALOC, emérita

### 16 O sistema alimentar

Esther Katz, antropóloga, UMR Paloc  
Lucia Van Velthem, antropóloga,  
Museu Paraense Emílio Goeldi, Brasil

### 17 Biodiversidade espontânea nos agrossistemas: plantas silvestres úteis e plantas invasoras

Izildinha Miranda, ecóloga,  
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil  
Danielle Mitja, botânica, UMR Espace-DEV

**18 Desmatamento, garimpo e mercúrio**

Jérémie Garnier, geoquímico,  
Universidade de Brasília, Brasil

Patrick Seyler, geoquímico, UMR HSM, emérito

**19 Meio ambiente e saúde na Amazônia,  
uma abordagem de saúde única**

Emmanuel Roux, matemático, UMR Espace-DEV

Helen Gurgel, geógrafa,  
Universidade de Brasília, Brasil

# TRAJETÓRIAS DE PESQUISA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

O IRD \_\_\_\_\_  
e seus parceiros

---

IRD Éditions

INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT

Marseille, 2022

#### Coordenação editorial

Frédérique Seyler

#### Preparação editorial

Sabrina Milani

#### Design do modelo

Charlotte Devanz

#### Layout

Aline Lugand – Gris Souris

Maíra Zannon – Ilha Design

A menos que de outra forma indicado, todas as fotos deste livro são oriundas da base fotográfica do IRD Multimedia (<https://multimedia.ird.fr/>).

#### Foto de capa

*Pupunha*, fruta da palmeira *Bactris gasipaes*, Amazônia brasileira

© IRD/Laure Empeaire



Esta publicação de livre acesso é colocada à disposição do público nos termos da Creative Commons CC BY-NCND 4.0 licença, disponível em: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>. Autoriza qualquer distribuição do trabalho original (compartilhar, copiar, reproduzir, distribuir, comunicar), desde que os autores e editores sejam mencionados e um link para a licença CC By-NC-ND 4.0 está incluído. Nenhuma modificação é permitida e o trabalho deve ser distribuído em sua totalidade. Nenhuma utilização comercial é permitida.

© IRD, 2022

ISBN papel: 978-2-7099-2968-4

ISBN PDF: 978-2-7099-2968-1

ISBN epub: 978-2-7099-2970-7

#### COMITÊ CIENTÍFICO

Frédérique Seyler

Marie-Pierre Ledru

Laure Empeaire

Assistente de Redação

Eduardo Falconi



Apoio à esta publicação: Embaixada da França no Brasil