

**AMAZON**  
CONSERVATION

MAPEANDO O  
**CAMINHO  
DOS RIOS  
VOADORES**

**COMO O AVANÇO DO DESMATAMENTO NA  
AMAZÔNIA BRASILEIRA AMEAÇA O CICLO  
DAS CHUVAS NO PERU E NA BOLÍVIA**

## **Autores:**

B. Bodin, (Amazon Conservation), M. Finer (Amazon Conservation), J. C. Espinoza (Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), UGA, IRD, CNRS), J. P. Sierra Perez (University of Côte d'Azur, University of Rennes, CNRS), C. Mattos (Universidade Federal de Santa Catarina/Relva Institute), C. Vriesendorp (Conservación Amazónica-ACCA), R. Maranhão (IPAM), Adriana Gasparetti (FAS - Fundação Amazônia Sustentável) D.M. Larrea-Alcázar (Conservación Amazónica-ACEAA)

Os autores agradecem a Wei Weng, Julia Péret, John Beavers, Andrés Santana e Helena Ceneviva pela cuidadosa revisão das versões anteriores e pelas inúmeras sugestões construtivas.

Este trabalho foi possível graças ao generoso apoio da Leo Model Foundation, Jeff e Connie Woodman, da Aristotelian Foundation e de outros generosos apoiadores da Amazon Conservation Association.

---

## **Créditos e agradecimentos**

Amazon Conservation Association

### **Ana Folhadella**

Diretora de Filantropia e Comunicação

### **Priscila Steffen**

Gerente de Comunicação e Relações Públicas

### **Maria Fernanda Paz Soldán**

Especialista em Comunicação e Marketing

### **Design gráfico:**

Flavio Forner | Xibé

### **Traduções:**

Larissa Stoner | Sunny Traduções (Português e espanhol)

### **Como citar:**

Amazon Conservation. (2026). Mapeando o caminho dos rios voadores - Como o avanço do desmatamento na Amazônia brasileira ameaça o ciclo das chuvas no Peru e na Bolívia.

Amazon Conservation. Disponível em [www.amazonconservation.org/publication](http://www.amazonconservation.org/publication)



## Prefácio de Carlos Nobre

A Amazônia - a maior floresta tropical do planeta - é um sistema vivo que regula o clima global e abriga uma biodiversidade sem paralelo. Ela também gera fluxos atmosféricos de umidade por toda a América do Sul, conhecidos como rios voadores. Esses rios invisíveis transportam água pelo continente, sustentando regimes de chuva que mantêm florestas, a agricultura e sociedades muito além dos limites amazônicos.

Nas últimas décadas, as evidências científicas têm mostrado com clareza que esse sistema se aproxima de um ponto crítico. Junto com meu querido colega Tom Lovejoy, que infelizmente faleceu no fim de 2021, venho alertando que o desmatamento contínuo e as mudanças climáticas podem empurrar a Amazônia para um ponto de inflexão, no qual grandes áreas da floresta talvez não consigam mais se manter. O enfraquecimento dos rios voadores é um elemento central desse risco. À medida que a cobertura florestal diminui, a capacidade da floresta de reciclar umidade se reduz, aumentando a probabilidade de secas e acelerando um possível colapso sistêmico.

Este relatório técnico da Amazon Conservation representa uma contribuição importante e oportuna para esse campo de conhecimento. Ao identificar as áreas de floresta mais essenciais para manter o transporte atmosférico de umidade, o estudo oferece um caminho prático que transforma conhecimento científico em ação. Isso nos ir além de apelos genéricos por conservação, adotando uma abordagem mais estratégica que prioriza as áreas essenciais para sustentar os regimes de chuva e reduzir os riscos climáticos em toda a região.

Para governos, financiadores e a comunidade de conservação de forma mais ampla, o modelo de priorização apresentado aqui pode ajudar a alinhar políticas, investimentos e esforços de conservação às realidades desse sistema interconectado. Essas conclusões e recomendações são particularmente relevantes para a Agenda de Cooperação Estratégica da Organização do Tratado de Cooperação Amazônica (OTCA). A responsabilidade pela conservação da Amazônia tem sido amplamente debatida em fóruns globais. Agora, é fundamental que suas dimensões regionais de gestão sejam compreendidas e colocadas em prática com a mesma urgência.

A janela de oportunidade para agir ainda está aberta, mas se estreita rapidamente. Fortalecer a resiliência dos rios voadores por meio de ações de conservação prioritárias e embasadas pela ciência é um passo decisivo na direção certa. Este relatório técnico oferece um guia valioso e aplicável para avançar nesse caminho.

**Carlos A. Nobre**

# Resumo Executivo

Os **rios voadores** são fluxos atmosféricos de umidade que se deslocam do Atlântico tropical através da Bacia Amazônica até as encostas dos Andes, impulsionados pela evapotranspiração das florestas amazônicas. As florestas (árvores e vegetação lenhosa) e os ecossistemas não florestais (savana, campos e outros) do sudoeste da Amazônia - especialmente no Peru e na Bolívia - dependem desse mecanismo para mais de 70% de sua precipitação anual. O desmatamento ao longo dessas rotas interrompe a reciclagem de umidade, reduzindo as chuvas em regiões cujas populações não têm qualquer influência sobre as decisões de uso da terra que determinam seu abastecimento hídrico.

Este relatório técnico traça as rotas sazonais dos rios voadores que abastecem as áreas sensíveis do Peru e da Bolívia, mapeia os riscos de desmatamento que ameaçam esses fluxos, avalia a vulnerabilidade das economias e dos ecossistemas do sudoeste amazônico diante de uma possível ruptura desse sistema e apresenta seis recomendações a formuladores de políticas no Peru, na Bolívia e na comunidade internacional, sobretudo no Brasil.

## I. Rotas sazonais e riscos de desmatamento

O transporte de umidade para o sudoeste da Amazônia ocorre por três rotas sazonais distintas. Com base em dados de reanálise ERA5 e na integração reversa de linhas de corrente, este estudo mapeia cada rota e as sobrepõe a informações sobre risco de desmatamento, categorias fundiárias e infraestrutura planejada, identificando os trechos onde a continuidade do transporte de umidade está mais vulnerável.

A **rota da estação seca** é a mais crítica. Ela já atravessa áreas amplamente desmatadas no sul do Pará, é fragmentada por diversos trechos de florestas públicas não destinadas e cruza diretamente a rodovia federal BR-319, cuja pavimentação iminente pode desencadear até 5 milhões de hectares de desmatamento adicional. Como este é o período em que a reciclagem de umidade pela vegetação é mais determinante, trata-se do corredor de maior risco. A **rota da estação de transição** percorre extensas áreas de florestas públicas não destinadas no oeste da Amazônia que, embora hoje sob menor pressão, carecem de proteção jurídica capaz de evitar sua conversão futura. A **rota da estação chuvosa** atravessa regiões com proteção relativamente robusta e enfrenta riscos mais limitados no curto prazo. No entanto, antes de alcançar Peru e Bolívia, as três rotas convergem no Acre, onde vários projetos rodoviários - incluindo uma possível ligação internacional com Pucallpa, no Peru - podem comprometer o transporte de umidade ao longo de todo o ano.

## II. Exposição do sudoeste da Amazônia à seca

A seca amazônica de 2023–2024 - a mais severa já registrada - ilustra o que uma redução sustentada na funcionalidade dos rios voadores pode representar. Suas causas foram múltiplas, mas ela evidencia a escala de exposição em quatro setores:

- **Agricultura:** a produção de soja em Santa Cruz, na Bolívia, caiu 75%; a colheita de batata em Puno, no Peru, caiu de 998.000 para 596.000 toneladas em um único ano; o cultivo de arroz no Beni e a agricultura familiar em Madre de Dios foram severamente afetados. A forte dependência da agricultura de sequeiro, com acesso limitado à irrigação, torna a região particularmente vulnerável à variabilidade da precipitação.
- **Florestas e meios de vida rurais:** a produção de castanha-do-brasil - base econômica das comunidades florestais em Madre de Dios e Pando, sustentando diretamente cerca de 27.000 pessoas apenas no Peru - é altamente sensível à seca. Onde os meios de vida florestais permanecem viáveis, a pressão por desmatamento tende a diminuir; onde colapsam, essa pressão tende a aumentar.
- **Ecosistemas e espécies:** os Andes Tropicais estão entre as regiões mais biodiversas do planeta, com 25% a 50% de muitos grupos taxonômicos encontrados exclusivamente ali. Mesmo pequenas reduções na disponibilidade de umidade podem desencadear grandes respostas ecológicas: mortalidade generalizada de árvores, mudanças nos padrões de incêndio florestal e liberação de carbono de áreas úmidas andinas que funcionam como importantes sumidouros de carbono.
- **Sistemas fluviais recíprocos:** os rios voadores também alimentam sistemas fluviais que retornam ao Brasil. Cerca de 60% da vazão do rio Madeira se origina de afluentes bolivianos e peruanos. Durante a seca de 2023–2024, o Madeira atingiu seu nível mais baixo em 122 anos, interrompendo a navegação em Porto Velho, reduzindo a geração hidrelétrica e isolando comunidades. As consequências do desmatamento no Brasil, portanto, repercutem de volta no próprio Brasil.

### III. Recomendações

Este documento apresenta seis recomendações a governos, financiadores da conservação e instituições regionais:

- **Exigir avaliações de impacto ambiental e estratégico para projetos rodoviários que considerem o transporte atmosférico transfronteiriço de umidade.** Os processos da BR-319 e da BR-364 estão em andamento. Qualquer desenvolvimento rodoviário deve incluir avaliações de impacto transfronteiriço que considerem efeitos socioecológicos sobre Peru e Bolívia, a criação de áreas protegidas ao longo dos corredores e medidas rigorosas contra a abertura de estradas secundárias - especialmente urgente diante da proposta de flexibilização do licenciamento ambiental no Brasil.
- **Incorporar o transporte atmosférico de umidade como critério explícito para a criação de áreas protegidas e para o financiamento da conservação.** Os atuais marcos de planejamento não capturam serviços hidrológicos transfronteiriços. Um sexto critério, baseado na contribuição para a funcionalidade dos rios voadores - operacionalizado por meio dos "Zonas Críticas de Umidade Atmosférica" - deve orientar a designação de cerca de 50 milhões de hectares de Florestas Públicas Não Destinadas (FPND), onde 26% a 30% do desmatamento amazônico ocorre hoje. Mecanismos como ARPA, Fundo Amazônia e Tropical Forests Forever Fund devem integrar esse critério em suas decisões de alocação.
- **Acelerar a restauração florestal em larga escala no leste da Amazônia brasileira, com foco nos corredores degradados das estações seca e de transição.** O sul do Pará é prioritário. Programas como o Restaura Amazônia e a meta do PLANAVEG de

restaurar 12 milhões de hectares até 2030 representam um passo inicial importante, mas os investimentos precisam ser ampliados, direcionados a corredores hidrológicos essenciais e integrados às políticas climáticas e de uso da terra.

- **Desenvolver marcos de governança regional que reconheçam a responsabilidade assimétrica do Brasil sobre o sistema de umidade atmosférica.** O Brasil controla cerca de 60% da Bacia Amazônica e praticamente todo o fluxo dos rios voadores que abastecem Peru e Bolívia. A Declaração de Belém foi um avanço, mas não estabeleceu metas quantitativas por país nem responsabilidades diferenciadas. O progresso exige acordos bilaterais ou multilaterais vinculantes - inspirados em modelos de gestão de águas transfronteiriças - que definam as obrigações do Brasil de manter a cobertura florestal em áreas críticas para o transporte de umidade.
- **Desenvolver estratégias de adaptação climática baseadas em ecossistemas nas áreas sensíveis do sudoeste da Amazônia.** Soluções de adaptação baseadas em florestas, já testadas em Pando, Bolívia, devem ser ampliadas para o norte do Beni, Santa Cruz, La Paz e departamentos equivalentes no Peru, desenvolvidas em coordenação entre Brasil, Peru e Bolívia, e projetadas para considerar explicitamente o risco de redução do transporte atmosférico de umidade, além de outros estressores climáticos.
- **Investir em uma agenda direcionada de inovação tecnológica e pesquisa para fortalecer a base de evidências para políticas públicas.** Prioridades incluem: modelar como a restauração no sudeste da Amazônia melhoraria o transporte de umidade na estação seca; aprimorar o mapeamento dos corredores de umidade considerando impactos cumulativos do desmatamento; projetar como as mudanças climáticas alterarão as rotas sazonais; expandir redes de monitoramento que conectem precipitação e vazão no sistema Amazônia-Andes; e fortalecer a capacidade de pesquisa nos países amazônicos para sistemas de alerta precoce e planejamento de adaptação.



© FLAVIO FORNER / ARU

# Introdução

O fenômeno natural do transporte e da “reciclagem” de umidade atmosférica - popularizado pela imprensa como “rios voadores” (ou “rios aéreos”) - tornou-se um conceito central para a conservação da Amazônia<sup>1</sup>. Os rios voadores correspondem a rotas preferenciais, de grande escala e longo prazo, pelas quais a umidade atmosférica se desloca através da região. Nesse processo, a umidade evaporada sobre o Atlântico tropical é transportada para oeste, atravessando a Amazônia até alcançar os Andes. Essas massas de ar seguem trajetórias distintas ao longo do ano, formando os chamados corredores sazonais.

O transporte dessa umidade por longas distâncias é viabilizado pela combinação dos ventos alísios, que sopram de leste para oeste de forma consistente, e do processo de reciclagem de umidade: a precipitação que cai sobre solos, corpos d’água e florestas amazônicas evapora novamente para a atmosfera, incluindo a evapotranspiração da vegetação, permitindo que a umidade seja carregada ainda mais para o interior do continente.

As florestas e ecossistemas do sudoeste da Amazônia no Peru e na Bolívia (doravante denominados “áreas sensíveis”) dependem de forma particularmente intensa dos rios voadores, que se formam a milhares de quilômetros de distância sobre o Atlântico e atravessam a Amazônia brasileira antes de chegar à região. Essas áreas sensíveis também se caracterizam por níveis excepcionalmente altos de biodiversidade e por comunidades com acesso limitado a sistemas de água potável, o que as torna ainda mais vulneráveis aos impactos do estresse hídrico. No entanto, os rios voadores que sustentam as florestas, a agricultura e os recursos hídricos de Peru e Bolívia estão cada vez mais ameaçados pela expansão das frentes de desmatamento. **Se a cobertura florestal for removida ao longo de seu trajeto na Amazônia brasileira, o transporte de umidade poderá ser substancialmente reduzido**, ou alterações na circulação atmosférica poderão desviar essa umidade para outras regiões, comprometendo a precipitação sobre as áreas sensíveis. Além dos efeitos locais, uma mudança desse tipo pode desencadear impactos em toda a região, aproximando a Amazônia de seu ponto de inflexão ecológico.

A compreensão científica sobre a importância dos rios voadores como serviço hidrológico tem avançado rapidamente. Ainda assim, grande parte da literatura existente enfatiza sobretudo seu papel no regime de precipitação das extensas áreas agrícolas do Centro-Oeste brasileiro e da Bacia do Rio da Prata<sup>2</sup>. As dependências transfronteiriças já foram discutidas, mas geralmente de forma ampla e pouco detalhada<sup>3</sup>.

O objetivo deste relatório técnico é **estabelecer prioridades de conservação e restauração florestal com base no trajeto dos rios voadores sobre áreas sob risco de desmatamento**. Para isso, nós:

- I. mapeamos o percurso dos rios voadores até as áreas sensíveis no Peru e na Bolívia que deles dependem, identificando os trechos ao longo desse trajeto mais ameaçados pelo desmatamento;
- II. avaliamos as vulnerabilidades dessas áreas sensíveis, incluindo a zona de transição Andes–Amazônia, um dos maiores hotspots de biodiversidade do mundo e um importante polo de produção agrícola e florestal para Peru e Bolívia, diante de uma possível perda de funcionalidade dos rios voadores;
- III. apresentamos recomendações para reduzir o risco de interrupção desses fluxos de umidade e fortalecer os marcos de governança, conservação e adaptação necessários para proteger as comunidades e ecossistemas que deles dependem.

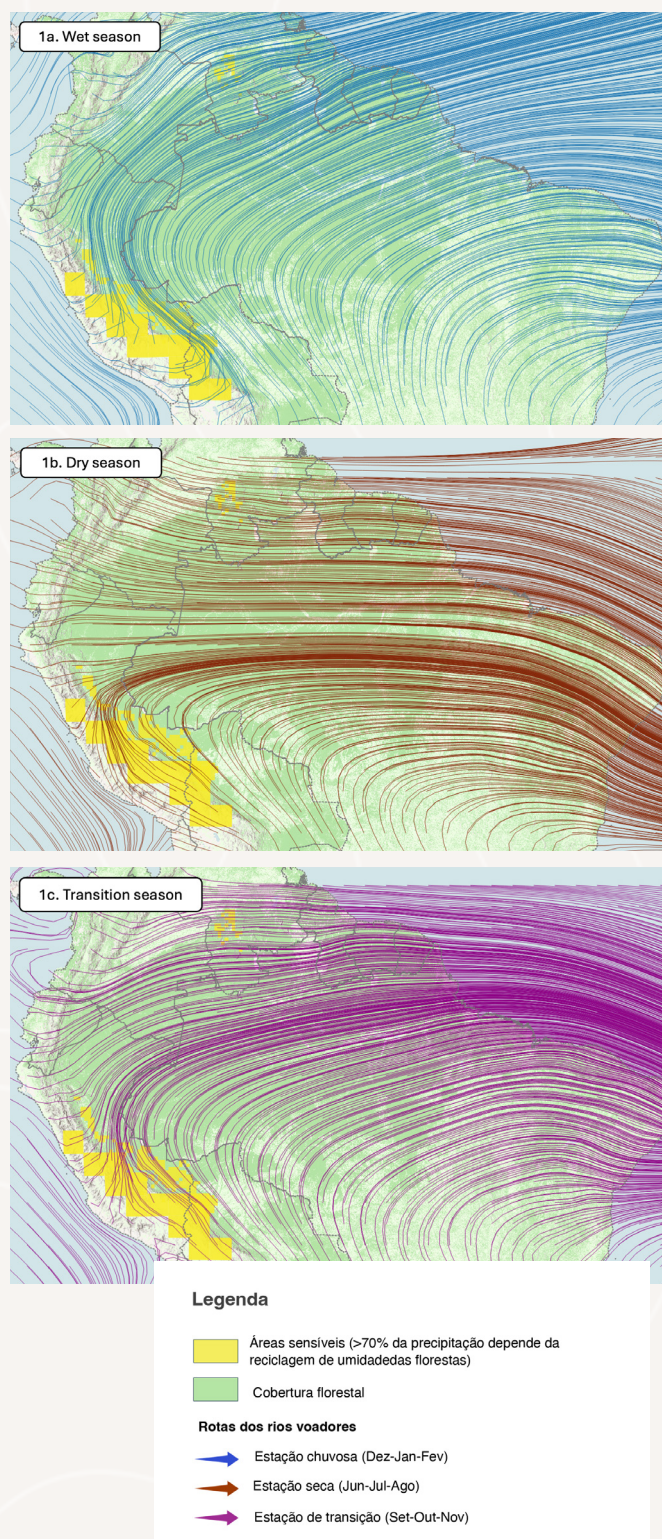
# I. Trajetórias dos rios voadores e riscos de desmatamento

## Como os rios voadores funcionam

O transporte atmosférico de umidade do Atlântico para os Andes, impulsionado pela reciclagem de umidade realizada pela vegetação, ocorre em toda a Amazônia. No entanto, algumas regiões dependem desse processo de forma muito mais intensa. As áreas mais vulneráveis situam-se na zona de transição Andes–Amazônia, incluindo as terras baixas do sudoeste amazônico, que abrangem apenas dois dos nove países da Bacia Amazônica: Peru e Bolívia (ver Anexo I para mais detalhes). O transporte de umidade para essas áreas sensíveis segue padrões sazonais bem definidos, distribuídos em três períodos principais. A trajetória desses rios voadores varia de maneira significativa entre esses períodos, conforme documentado no Relatório MAAP nº 232.

Durante a **estação chuvosa (dezembro–janeiro–fevereiro)**, cerca de 50% de toda a precipitação anual ocorre na região, recarregando os aquíferos amazônicos que sustentam a transpiração das florestas e o fluxo dos rios durante a estação seca<sup>4</sup>. Nesse período, os fluxos de umidade que abastecem as áreas sensíveis se originam ao largo da costa das Guianas e avançam em direção ao sudoeste, descrevendo um arco ao longo das fronteiras do Brasil com Venezuela, Colômbia e Peru (Figura 1).

Figura 1. Padrão anual de transporte de umidade do Atlântico para os Andes



Durante a **estação seca (junho–julho–agosto)**, a reciclagem de umidade impulsionada pela evapotranspiração torna-se especialmente crucial para garantir que a reduzida precipitação alcance o oeste da Amazônia<sup>5</sup>. Nessa época, o fluxo de umidade para as áreas sensíveis entra a partir do Atlântico tropical, ao largo do Nordeste brasileiro, atravessa a bacia por um corredor muito mais estreito e concentrado, que se curva levemente para o norte antes de desviar abruptamente para o sul ao encontrar os Andes (Figura 1b).

Durante a **estação de transição (setembro–outubro–novembro)**, a umidade transpirada pelas árvores desempenha um papel decisivo no início da estação chuvosa<sup>6</sup>. Nesse período, o fluxo de umidade se origina ao longo das áreas costeiras mais ao norte do Brasil, próximas às Guianas, desloca-se para oeste até a tríplice fronteira Peru–Brasil–Colômbia e, então, curva-se para o sul em direção às áreas sensíveis (Figura 1c).

Como também se observa na Figura 1, ao alcançar as áreas sensíveis, o aumento na densidade das setas indica redução da velocidade do fluxo e maior convergência de umidade - condições que favorecem a precipitação e a deposição da umidade originalmente evaporada sobre o Atlântico e posteriormente reciclada pela evapotranspiração ao longo da bacia. Em contraste, setas mais longas representam ventos mais rápidos, capazes de transportar umidade por grandes distâncias.

Para mais detalhes sobre os dados e a metodologia utilizados na elaboração desta figura, consulte o **Anexo I**.



## Como o desmatamento afeta os rios voadores

A evapotranspiração é amplamente reconhecida como um componente central do ciclo hidrológico amazônico e, portanto, do transporte atmosférico de umidade do Atlântico para os Andes. Embora este seja um campo de pesquisa em rápida evolução, e alguns aspectos ainda sejam objeto de debate científico, diversos mecanismos fundamentais já são bem estabelecidos e devem orientar a formulação de políticas públicas:

- A Amazônia é a maior floresta tropical do planeta. Florestas reciclam umidade de forma muito mais eficiente do que áreas convertidas em pastagens ou cultivos após o desmatamento, resultando em maior geração de precipitação<sup>7</sup>.
- Mais de 70% da precipitação no sudoeste amazônico provém de umidade que se origina no Atlântico e é reciclada repetidamente pelas florestas ao longo da bacia, tornando essa região a mais dependente do transporte atmosférico de umidade em toda a Amazônia.
- A importância da reciclagem de umidade aumenta à medida que se avança para o interior do continente. Embora a reciclagem ocorra em larga escala de leste a oeste, grande parte da chuva induzida pela vegetação no sudoeste amazônico é transpirada localmente<sup>8</sup>. As áreas que exercem maior influência direta sobre essa região situam-se imediatamente rio acima, no centro-oeste da Amazônia, onde a integridade florestal é especialmente crítica para manter o fluxo de umidade<sup>9</sup>.

**A remoção em larga escala da vegetação ao longo das trajetórias dos rios voadores, especialmente à medida que esses fluxos se aproximam das áreas sensíveis, tem alta probabilidade de comprometer a reciclagem e o transporte de umidade para essas regiões.**

A perda de vegetação reduz diretamente a evapotranspiração, enquanto extensos blocos de desmatamento podem também alterar padrões essenciais da circulação atmosférica, modificando a direção dos ventos e o transporte horizontal de umidade do Atlântico para o



interior do continente. Esses efeitos incluem, inclusive, mudanças no momento de início da estação chuvosa<sup>10</sup>. Diante da magnitude das potenciais consequências, recomenda-se uma abordagem de precaução, evitando qualquer alteração que possa perturbar o transporte atmosférico de umidade.

Essa conclusão reforça a necessidade de avaliar o risco de desmatamento não apenas na escala da Amazônia como um todo - onde, de forma amplamente reconhecida, uma perda florestal em torno de 20% poderia desencadear um ponto de inflexão<sup>11</sup> - mas também ao longo das trajetórias dos rios voadores, que abastecem regiões altamente dependentes desses fluxos.

# Mapeamento dos riscos de desmatamento ao longo das rotas sazonais

Para avaliar o risco de desmatamento ao longo das rotas sazonais dos rios voadores, filtramos as linhas de fluxo de transporte de umidade apresentadas na Figura 1, retendo apenas aquelas que convergem para as áreas sensíveis do Peru e da Bolívia nas três estações analisadas. Essas rotas foram sobrepostas a camadas de informação relevantes, permitindo distinguir trechos com **maior segurança de cobertura florestal**, como Unidades de Conservação e Terras Indígenas, de zonas com **risco elevado**, incluindo áreas com desmatamento projetado<sup>12</sup>, terras públicas não destinadas<sup>13</sup> e trechos associados à infraestrutura rodoviária existente ou planejada<sup>14</sup>.

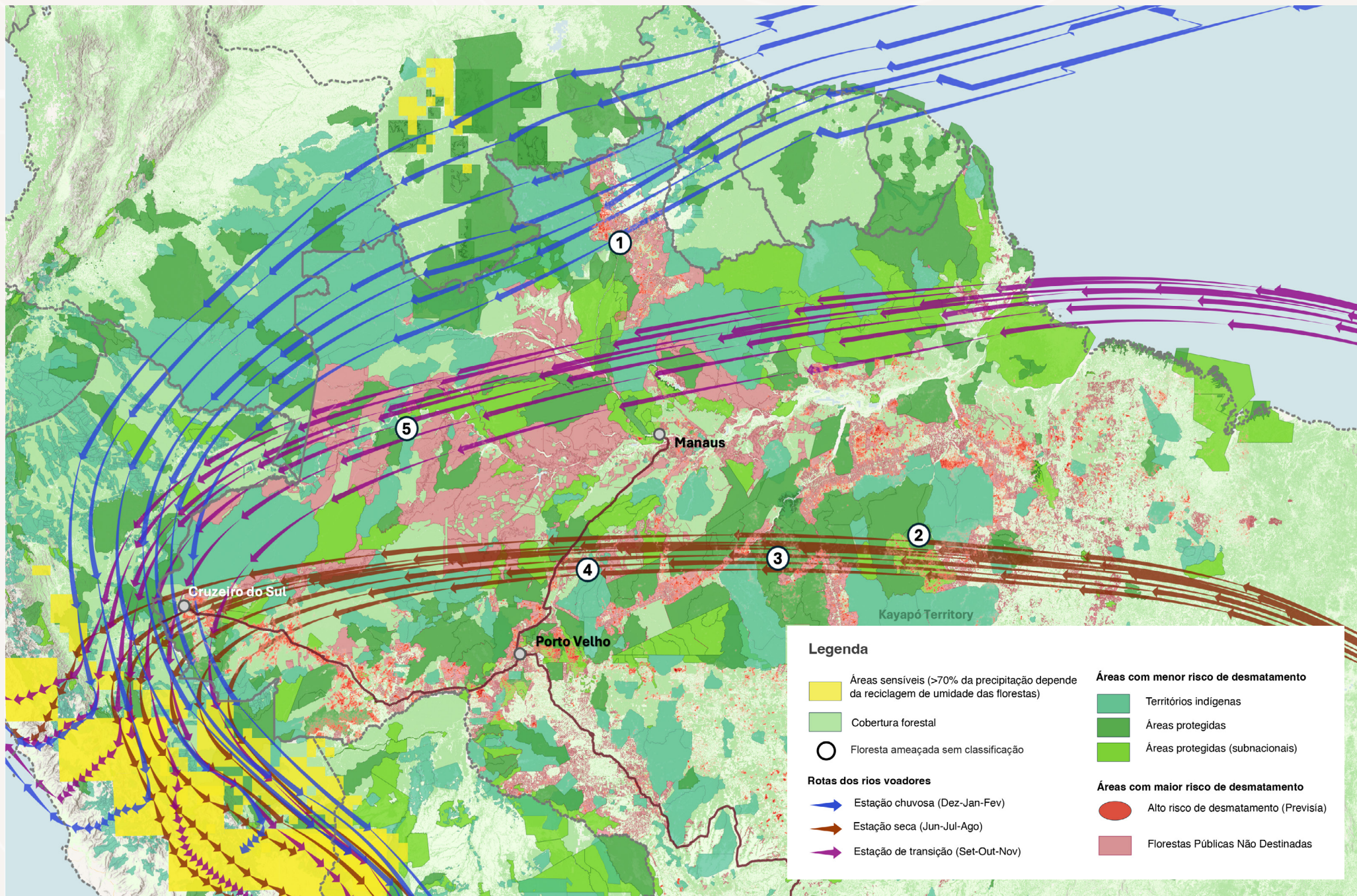
O desmatamento na Amazônia permanece fortemente concentrado nas proximidades de rios e estradas: estudo de 2014 identificou que 95% da perda florestal ocorreu a até 5,5 km de uma estrada ou 1 km de um rio<sup>15</sup>. O conjunto de dados Previsia baseia-se nesses e em outros dados de entrada, como o desmatamento recente, para prever o risco futuro de desmatamento, sendo utilizado aqui para identificar onde a cobertura vegetal corre risco de perda ao longo das rotas sazonais dos rios voadores.

**Durante a estação chuvosa**, a rota dos rios voadores atravessa as Guianas, a Venezuela, a Amazônia colombiana e o departamento de Loreto, no Peru, regiões onde a cobertura florestal permanece relativamente bem protegida por Unidades de Conservação e Terras Indígenas oficialmente reconhecidas. Evidências mostram que todos os tipos de áreas protegidas - de proteção integral, uso sustentável e terras indígenas - têm sido eficazes na redução do desmatamento<sup>16</sup>. A principal interrupção potencial dessa rota ocorre em Roraima, onde o risco de desmatamento é elevado nas proximidades de Boa Vista, avançando sobre Florestas Públicas Não Destinadas estaduais (**Ponto 1, Figura 2**).

**Na estação seca**, a rota entra no continente pelo Nordeste brasileiro e cruza o sul do Pará, onde extensas áreas já foram convertidas para agricultura. É provável que essa perda de vegetação já esteja comprometendo a funcionalidade dos rios voadores nesse período. Parte dessa funcionalidade pode ser recuperada com a restauração da vegetação nativa, seja por regeneração natural, seja por restauração ativa. O restante da rota mantém proteção relativamente robusta por Unidades de Conservação e Terras Indígenas, embora apresente interrupções em trechos estreitos de Florestas Públicas Não Destinadas com risco elevado de desmatamento (**Pontos 2, 3 e 4, Figura 2**).

A rota da estação seca também é interrompida pela rodovia federal BR-319, que conecta Porto Velho a Manaus. O desmatamento nos 13 municípios ao longo da estrada é sistematicamente monitorado e revela avanço contínuo de desmatamento ilegal sobre Unidades de Conservação e Terras Indígenas adjacentes<sup>17</sup>. Organizações focadas em preservação ambiental têm historicamente se posicionado contra a pavimentação da BR-319, citando a recorrente incapacidade de conter o desmatamento associado a outras rodovias amazônicas, apesar de promessas de mitigação. Ainda assim, a aprovação da Lei nº 15.300, em dezembro de 2025, abriu caminho para o avanço da pavimentação da BR-319 e de outras rodovias

Figura 2. Rotas sazonais dos rios voadores e o risco associado de desmatamento



consideradas estratégicas. A lei instituiu o Licenciamento Ambiental Especial, um procedimento acelerado para projetos de infraestrutura, incluindo explicitamente “obras de reconstrução e repavimentação de rodovias existentes cujos trechos representem conexões estratégicas”. A pavimentação do trecho central reabriria o tráfego durante todo o ano, ampliando o risco de desmatamento ao longo do traçado. O risco projetado é particularmente elevado nas Florestas Públicas Não Destinadas Acará e Acarazinho **(Ponto 1, Figura 3)**, diretamente na rota da BR-319 e da trajetória dos rios voadores na estação seca. Cenários futuros indicam perdas florestais extensas, alcançando até 50 km em cada lado da rodovia<sup>18</sup>. A perda de cobertura florestal nessa magnitude, interrompendo diretamente a rota dos rios voadores, representaria um risco substancial à sua funcionalidade.

Durante a **estação de transição**, a rota dos rios voadores atravessa o estado do Amapá e a metade norte do Amazonas, regiões que historicamente apresentam baixas taxas de desmatamento. Ao avançar para oeste, a rota cruza extensas áreas de Florestas Públicas Não Destinadas no oeste do Amazonas **(Ponto 5, Figura 2)**. Embora hoje sob baixa pressão, a ausência de destinação formal torna essas áreas vulneráveis à grilagem e à conversão futura, com perda de cobertura vegetal que comprometeria sua capacidade de reciclar umidade.

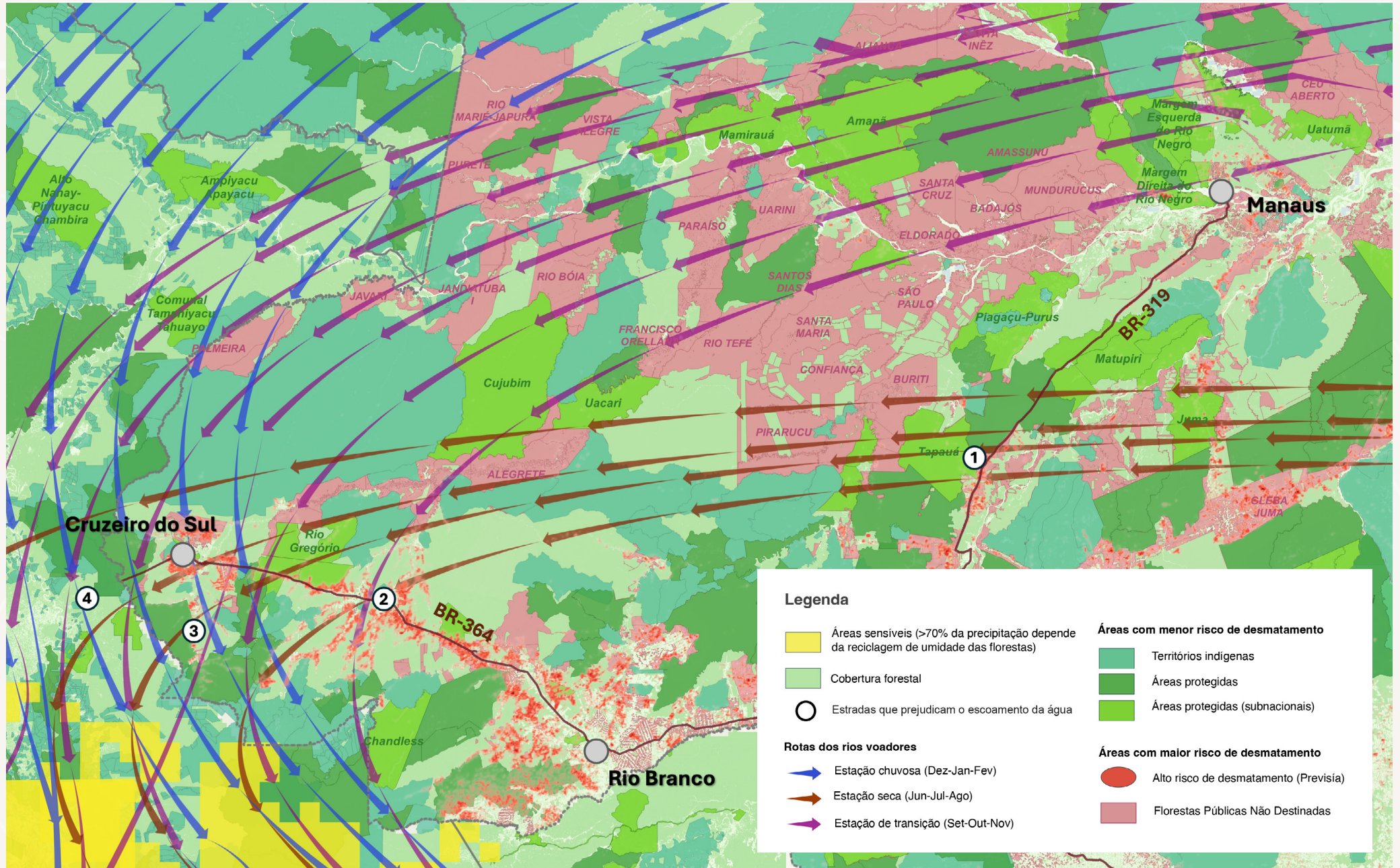
Antes de alcançar as áreas sensíveis no sul do Peru e no norte da Bolívia, **as três rotas sazonais convergem sobre a porção ocidental do Acre** e a BR-364, na chegada a Cruzeiro do Sul<sup>19</sup> (Figura 3). A região concentra projetos relevantes de expansão viária: a repavimentação da ligação entre Rio Branco e Cruzeiro do Sul **(Ponto 2, Figura 3)**; a abertura de novas estradas conectando Cruzeiro do Sul a cidades menores próximas à fronteira com o Peru, hoje acessíveis apenas por via fluvial<sup>20</sup> **(Ponto 3, Figura 3)**; e, de forma mais ambiciosa, a proposta de uma conexão internacional entre Cruzeiro do Sul e Pucallpa, no Peru<sup>21</sup> **(Ponto 4, Figura 3)**. Essa ligação criaria um novo eixo logístico em direção ao porto de Chancay, no Pacífico, reduzindo o trajeto para exportações brasileiras ao mercado chinês<sup>22</sup>. Apesar do forte apoio das autoridades estaduais do Acre, o projeto permanece controverso, tanto por atravessar áreas protegidas em ambos os lados da fronteira<sup>23</sup> quanto pela fragilidade de sua justificativa econômica frente ao volume de investimentos necessários.

Embora alguns investimentos em melhoria de infraestrutura possam ser justificados para ampliar o acesso de comunidades remotas, é fundamental que seus impactos sobre a precipitação nas áreas sensíveis sejam plenamente considerados em avaliações ambientais estratégicas. A redução da cobertura vegetal nessa região teria efeitos particularmente significativos, pois ela intercepta as três rotas sazonais dos rios voadores, o que implica impactos potenciais ao longo de todo o ano.

**Essa análise espacial evidencia a necessidade de estabelecer prioridades de conservação espacialmente explícitas, que considerem o risco de perda de cobertura florestal para a continuidade dos rios voadores, sobretudo nos trechos em que a reciclagem de umidade sustenta de forma mais direta a precipitação no Peru e na Bolívia.**

Na Seção III, apresentamos recomendações para mitigar o risco de perturbações às rotas dos rios voadores. Antes disso, conduzimos uma avaliação de risco sobre o possível colapso desse sistema para as áreas sensíveis do sudoeste amazônico.

Figura 3. Rotas dos rios voadores nas três estações, sobrepostas às destinações de uso da terra e aos principais projetos de expansão rodoviária



## II. Exposição do sudoeste amazônico à interrupção dos rios voadores

Em avaliações de risco para adaptação climática e redução de desastres, o risco é geralmente entendido como a combinação entre perigo (eventos com potencial de causar danos), exposição (a presença de pessoas, ecossistemas ou ativos suscetíveis) e vulnerabilidade (características que aumentam a sensibilidade aos impactos)<sup>24</sup>. A forte dependência do sudoeste amazônico da reciclagem de umidade gerada pelas florestas amazônicas torna a região **particularmente vulnerável** a uma eventual interrupção dos rios voadores. No Altiplano peruano e boliviano, já se observa um atraso consistente no início da estação chuvosa, associado às mudanças nos padrões atmosféricos de grande escala, evidência de que o clima em transformação já afeta a dinâmica regional<sup>25</sup>. **A continuidade do desmatamento na Amazônia brasileira, somada às alterações climáticas que vêm modificando regimes de precipitação globalmente, configura um perigo significativo.** A seção a seguir analisa a exposição das economias, dos meios de vida e dos ecossistemas do sudoeste amazônico à redução das chuvas, com foco em quatro setores centrais: agricultura; florestas e meios de vida rurais; ecossistemas e biodiversidade; e recursos hídricos.

A **Amazônia enfrentou uma seca severa em 2023–2024**, com impactos particularmente intensos no sudoeste da região<sup>26</sup>. Diversos fatores climáticos foram associados a esse evento excepcional, incluindo um El Niño de forte magnitude e um aquecimento anômalo do Atlântico Norte<sup>27</sup>. A seca teve início com um déficit acentuado de precipitação no Altiplano peruano-boliviano, resultado de uma redução nos fluxos de umidade atmosférica provenientes da Amazônia<sup>28</sup>. **Embora não seja possível determinar a contribuição específica do desmatamento na Amazônia brasileira para esse fenômeno, seus impactos oferecem evidências valiosas sobre a exposição das áreas sensíveis à seca**, desde a agricultura e a gestão de recursos hídricos, passando pelo sustento de comunidades que dependem dos recursos florestais, até o estado de conservação de ecossistemas endêmicos e a hidrologia das bacias rio abaixo.

### Setor agrícola

As regiões agrícolas do Peru e da Bolívia, especialmente aquelas voltadas à produção de grãos para consumo interno e exportação, dependem de padrões sazonais de precipitação que estão cada vez mais sujeitos a interrupções decorrentes do desmatamento ao longo das rotas dos rios voadores. Em 2024, a seca provocou uma queda de 75% na produção de soja na região boliviana de Santa Cruz, evidenciando a forte dependência da agricultura mecanizada de sequeiro<sup>29</sup>. A soja, cultivada em planícies altamente dependentes de precipitação e escoamento superficial, representa 15% das exportações do país<sup>30</sup>, o que significa que eventos de seca têm potencial para afetar diretamente a balança comercial em um contexto econômico já instável.

Embora a pecuária seja predominante, a produção de arroz nas planícies do Beni constitui um sistema agrícola relevante e particularmente vulnerável. Seus ciclos de cultivo dependem de padrões previsíveis de inundação e vazante, sustentados por precipitação consistente nas bacias rio acima. A alteração desses padrões decorrente de mudanças no transporte atmosférico de umidade pode resultar em quebras de safra, redução de produtividade e impactos econômicos significativos para as comunidades agrícolas. O arroz também desempenha um papel central na segurança alimentar boliviana, sobretudo em áreas rurais, onde contribui diretamente para o consumo doméstico. Em 2019, o cultivo de arroz representava quase 5% da área agrícola nacional, figurando entre as principais culturas alimentares ao lado de milho, trigo e batata<sup>31</sup>.

Apesar de sua importância estratégica, a produtividade do arroz tem apresentado variabilidade e até tendência de queda, refletindo desafios estruturais e climáticos. Uma análise do sistema agroalimentar boliviano (2005–2015) identificou o arroz entre os cereais com tendência decrescente de produção, levantando preocupações sobre a estabilidade do abastecimento interno<sup>32</sup>. Esse declínio contrasta com a crescente demanda de domicílios urbanos e rurais, reforçando tanto o papel central do arroz para a segurança alimentar nacional quanto a vulnerabilidade do sistema a choques ambientais.

As regiões agrícolas de alta altitude nos Andes, como Puno e Cuzco, também apresentam vulnerabilidade excepcional à seca, devido à forte dependência da agricultura de sequeiro e aos impactos crescentes das mudanças climáticas. Em Puno, essa vulnerabilidade ficou evidente na queda acentuada da produção de batata, que passou de 998 mil toneladas em



2022 para 596 mil toneladas em 2023, em meio a secas prolongadas<sup>33</sup>. A situação é agravada pelo fato de que cerca de 64% da produção de batata no Peru ocorre sob condições de sequeiro, sem acesso a sistemas modernos de irrigação<sup>34</sup>.

A vulnerabilidade do setor agrícola também se estende à região amazônica de Madre de Dios que, apesar de seu contexto climático distinto, enfrenta desafios crescentes decorrentes da intensificação da variabilidade climática. A região vem registrando estações secas e chuvosas mais marcadas, resultando em maior frequência de enchentes e secas que afetam diretamente o sustento agrícola. Pequenos produtores têm enfrentado impactos cada vez mais severos desses eventos extremos, frequentemente com apoio limitado das políticas nacionais de adaptação climática<sup>36</sup>.

Em escala mais ampla, as populações dos Andes peruanos apresentam elevada vulnerabilidade a um futuro marcado por extremos de precipitação e secas, enfrentando riscos simultâneos de escassez hídrica e inundações<sup>37</sup>. Essa situação é agravada pelo acesso limitado de muitas comunidades rurais a sistemas de água potável, o que as torna ainda mais suscetíveis aos efeitos do estresse hídrico sobre suas atividades agrícolas e sobre a vida cotidiana<sup>38</sup>.

## Economias florestais e sustento rural

Os setores florestais do Peru e da Bolívia são altamente sensíveis a pequenas variações nas condições climáticas anuais. Pesquisas com comunidades florestais em Pando, na Bolívia, mostram que os efeitos das mudanças climáticas que mais comprometem seus meios de vida são o aumento das temperaturas e a intensificação das secas, com impactos diretos tanto sobre a saúde quanto sobre os recursos florestais dos quais dependem<sup>39</sup>.



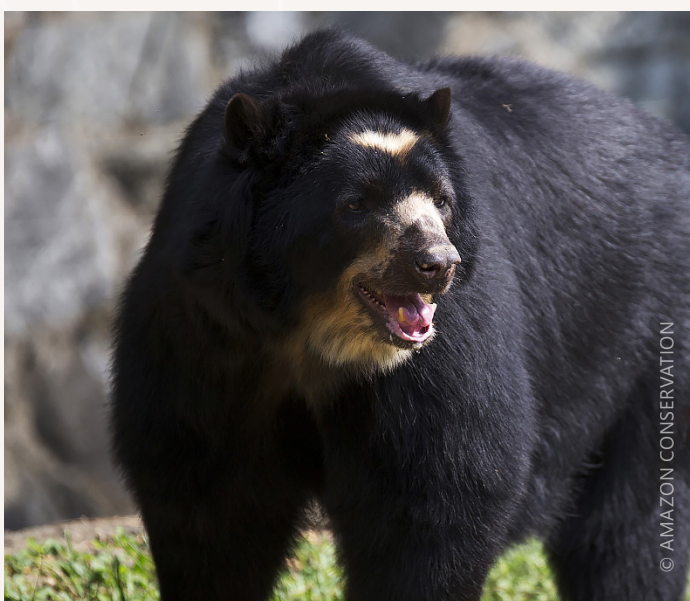
A produção de castanha-do-Brasil, uma das principais atividades econômicas de base florestal para comunidades rurais em ambos os países, depende de condições climáticas específicas. As castanheiras (*Bertholletia excelsa*) requerem padrões consistentes de precipitação e níveis adequados de umidade, e os últimos anos evidenciaram a forte sensibilidade da produtividade às secas<sup>40</sup>, com reduções expressivas nos volumes de produção no ano subsequente<sup>41</sup>. Na região de Madre de Dios, no Peru, cerca de 27 mil pessoas, ou 38% da população, dependem direta ou indiretamente da cadeia da castanha para seu sustento<sup>42</sup>. Embora represente uma estratégia parcial

de renda para muitos, para alguns concessionários ela constitui a única fonte de ingresso, ampliando sua exposição a quedas de produtividade<sup>43</sup>.

Essas economias florestais também exercem um papel territorial estratégico: quando os meios de vida dependentes da floresta permanecem economicamente viáveis, a pressão por desmatamento tende a diminuir, contribuindo indiretamente para a manutenção de funções ecossistêmicas essenciais, como a reciclagem de umidade atmosférica.

## Ecossistemas e espécies

As áreas sensíveis do sul do Peru e do norte da Bolívia abrigam hotspots de biodiversidade excepcionais, moldados por condições climáticas específicas sustentadas pelos padrões regionais de transporte de umidade. Os Andes Tropicais são reconhecidos globalmente como um dos principais centros de endemismo do planeta: entre 25% e 50% das espécies de diversos grupos taxonômicos, incluindo plantas vasculares, musgos, peixes e aves, são restritas a essa região<sup>44</sup>. Uma análise abrangente conduzida por pesquisadores da NatureServe identificou 782 espécies endêmicas de aves, mamíferos, anfíbios e plantas nos Yungas do Peru e da Bolívia, muitas delas confinadas a faixas altitudinais estreitas<sup>45</sup>.



Alterações relativamente pequenas na disponibilidade de umidade podem desencadear respostas ecológicas desproporcionalmente grandes, como mortalidade generalizada de árvores, mudanças nos regimes de fogo e transformações profundas na composição de espécies<sup>46</sup>. As implicações para a biodiversidade são particularmente severas devido aos altos níveis de endemismo característicos dessas zonas de transição entre a Bacia Amazônica e os contrafortes andinos, conferindo-lhes relevância global para metas de conservação.

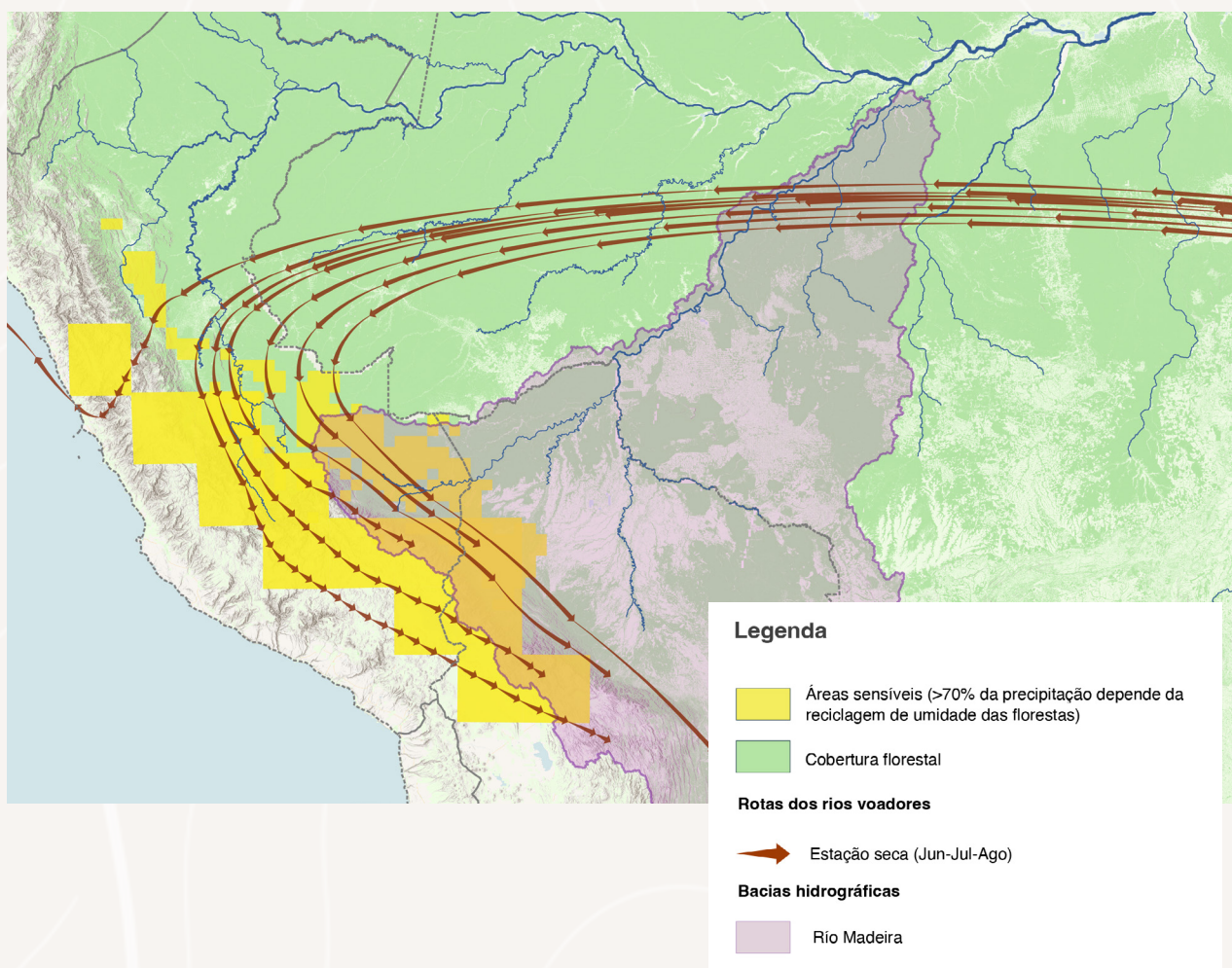
Os ecossistemas de alta montanha - incluindo áreas úmidas andinas, florestas, pastagens e outros habitats - possuem elevada capacidade de armazenamento de carbono devido às baixas taxas de decomposição, resultantes de solos encharcados, baixas temperaturas e pH reduzido. Esses ecossistemas, também presentes nas áreas sensíveis destacadas, contribuem para a acumulação e o sequestro de carbono e desempenham um papel crítico na mitigação das mudanças climáticas<sup>47</sup>. Esse papel pode ser comprometido caso os padrões de precipitação mantidos pelas rotas atmosféricas sejam alterados, levando a um ciclo de retroalimentação entre emissões de carbono e redução do sequestro pela biomassa.

## Impactos recíprocos: a bacia do rio Madeira

Embora a principal direção da dependência ambiental se dê do Brasil para o Peru e a Bolívia por meio do transporte atmosférico de umidade, os impactos também se estendem aos sistemas hidrológicos que, por sua vez, afetam territórios brasileiros. Os rios voadores que transportam umidade para oeste através da Bacia Amazônica contribuem para os padrões de precipitação que alimentam sistemas fluviais que fluem de volta para leste, em direção ao Brasil.

O sistema do rio Madeira exemplifica essas dependências recíprocas. Aproximadamente 60% da descarga do rio Madeira, no ponto em que encontra o Amazonas, tem origem na parte superior de sua bacia, formada pelos tributários bolivianos (rios Beni e Mamoré) e pelo rio Madre de Dios, no Peru<sup>48</sup>. Isso torna o transporte fluvial, a geração hidrelétrica e os sistemas de controle de cheias dependentes dos padrões de precipitação nos territórios peruano e boliviano (ver Figura 4). Se o transporte atmosférico de umidade para os contrafortes andinos do sudoeste amazônico for comprometido pelo desmatamento no Brasil, a consequente redução na vazão da bacia do Madeira poderá gerar impactos rio abaixo que afetam diretamente a infraestrutura e as atividades econômicas brasileiras.

**Figura 4. Rota sazonal para as áreas sensíveis durante a estação seca, mostrando a sobreposição com a bacia do rio Madeira e seus afluentes**



A seca severa na bacia do rio Madeira em 2023 e 2024 desencadeou consequências econômicas e sociais profundas, paralisando setores-chave da economia brasileira. O rio, um dos principais afluentes do Amazonas, atingiu o nível histórico de apenas 25 centímetros em Porto Velho, interrompendo operações portuárias e afetando o transporte de exportações de grãos<sup>49</sup><sup>50</sup>. A interrupção da navegação interior isolou diversas comunidades, cortando seu acesso a bens essenciais como alimentos, combustíveis, medicamentos e água potável<sup>51</sup>. A crise também impactou fortemente o setor energético, já que a seca reduziu drasticamente a geração de duas das maiores hidrelétricas do país, ambas dependentes do Madeira, exigindo uma transição emergencial - e mais cara - para a geração termelétrica<sup>52</sup>. As consequências ambientais foram igualmente graves: os níveis excepcionalmente baixos de água resultaram na morte em massa de fauna aquática, incluindo mais de 100 botos, uma espécie já ameaçada<sup>53</sup>.

Esta revisão rápida, apoiada pelos dados da seca excepcionalmente severa de 2023–2024, evidencia a exposição e a vulnerabilidade dos povos, meios de vida e ecossistemas do sudoeste amazônico às variações na precipitação anual. Os melhores modelos disponíveis de transporte atmosférico de vapor d'água sobre a Amazônia indicam a dependência dessa região da reciclagem de umidade proveniente de florestas densas e maduras, desde o Atlântico até os contrafortes andinos<sup>54</sup>.

Diante dos efeitos combinados do desmatamento existente e das mudanças climáticas, eventos de seca dessa magnitude tendem a ocorrer com maior frequência no futuro. Estratégias robustas de adaptação climática serão essenciais para mitigar seus impactos sobre as comunidades, economias e ecossistemas vulneráveis do sudoeste amazônico. Paralelamente, todas as medidas disponíveis devem ser adotadas para evitar a perda adicional da funcionalidade dos rios voadores.

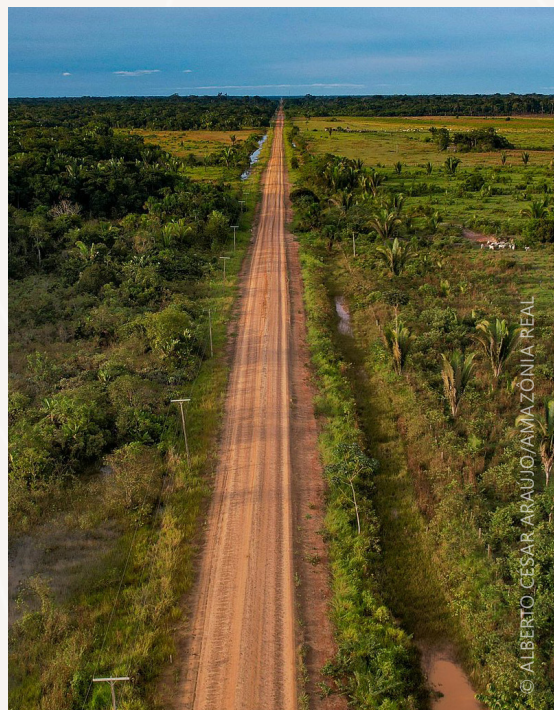


© FLAVIO FORNER / ARU

## III. Recomendações

### A. Avaliações de impacto ambiental e estratégico que considerem efeitos sobre o transporte atmosférico de umidade

Como descrito na Seção II, dois empreendimentos de infraestrutura planejados se encontram na rota dos rios voadores que abastecem o sudoeste amazônico: a BR-319 e a BR-364. **Os potenciais impactos em escala regional sobre esses fluxos atmosféricos devem ser incorporados aos estudos de impacto ambiental desses projetos, destacando todo o conjunto de possíveis consequências decorrentes de sua implementação, inclusive sobre a hidrologia da bacia.** As Avaliações Ambientais Estratégicas exigidas para o licenciamento de rodovias também devem integrar a dimensão dos impactos transfronteiriços potenciais para a Bolívia e o Peru, bem como o risco de desestabilização econômica e social na região. Comunidades vulneráveis e aquelas mais dependentes dos recursos florestais para seus meios de vida devem receber atenção especial.



Estudos de impacto ambiental indicam que a conclusão da BR-319 pode resultar em até 5 milhões de hectares de desmatamento adicional, criando uma barreira significativa ao transporte atmosférico de umidade. No mínimo, qualquer desenvolvimento rodoviário deve ser acompanhado pela designação de extensas áreas protegidas ao longo do traçado, por medidas rigorosas para impedir a abertura de ramais que ampliem os impactos do desmatamento e por programas de desenvolvimento sustentável que ofereçam alternativas econômicas à derrubada da floresta. As Florestas Públicas Não Destinadas ao longo desses corredores representam oportunidades imediatas para criação de áreas protegidas que reduzam o risco de grilagem e salvaguadem explicitamente as rotas de umidade atmosférica como um serviço ecossistêmico transfronteiriço.

Além da perda direta de cobertura florestal, o asfaltamento de rodovias historicamente desencadeia pressões territoriais mais amplas - como ocupação especulativa, grilagem, extração ilegal de madeira e rápido crescimento demográfico em municípios de fronteira - que intensificam os riscos cumulativos às rotas dos rios voadores. Essa recomendação torna-se ainda mais urgente diante da proposta de flexibilização do licenciamento ambiental no Brasil, que pode reduzir o escopo das avaliações de impactos cumulativos e transfronteiriços justamente nas regiões onde a expansão da infraestrutura ameaça funções hidrológicas em escala continental.

## **B. Incluir a contribuição ao transporte atmosférico de umidade como critério para a destinação de novas áreas de conservação florestal e para a alocação de recursos a áreas existentes**

O planejamento sistemático da conservação na Amazônia tradicionalmente se baseia em um conjunto de critérios para identificar e priorizar áreas para proteção. Os critérios mais comuns incluem<sup>55 56</sup> :

- Valor de biodiversidade, com foco em áreas de alta riqueza de espécies e endemismo.
- Nível de ameaça, priorizando regiões sob forte pressão de expansão agropecuária, exploração madeireira e outras atividades humanas.
- Conectividade florestal, visando manter ou fortalecer a ligação entre fragmentos de floresta.
- Refúgios climáticos, identificando áreas capazes de abrigar biodiversidade e populações humanas sob cenários futuros de mudança climática.
- Fatores socioeconômicos, como a localização de assentamentos, o acesso por estradas e rios e o potencial econômico dos recursos florestais.

**Argumentamos que a contribuição para o transporte atmosférico de umidade deve ser incorporada a esse arcabouço como um sexto critério explícito.** Como demonstrado nas Seções I e II, a posição da cobertura florestal em relação às rotas dos rios voadores é determinante para a geração de chuvas nas áreas sensíveis do Peru e da Bolívia - um serviço ecossistêmico transfronteiriço que os critérios atuais não capturam. Destinar e financiar áreas protegidas sem considerar sua localização dentro dos corredores de transporte de umidade cria o risco de deixar desprotegidas justamente as florestas mais críticas do ponto de vista hidrológico.

Uma forma prática de operacionalizar esse critério é o mapeamento das Zonas Críticas de Umidade Atmosférica: áreas onde relevância atmosférica, risco de desmatamento e vulnerabilidade social se sobrepõem. Esses territórios, definidos espacialmente, poderiam orientar a priorização integrada da designação de áreas de conservação, do financiamento para restauração e dos investimentos em desenvolvimento sustentável, garantindo que a continuidade do transporte de umidade do Atlântico aos Andes seja tratada como objetivo central e não como benefício colateral.

A aplicação mais urgente desse critério é a destinação das Florestas Públicas Não Destinadas (FPND). Esses aproximadamente 50 milhões de hectares da Amazônia brasileira permanecem sob domínio federal ou estadual, mas sem qualquer classificação legal formal - não são áreas protegidas, nem concessões, nem terras tituladas<sup>57</sup>. Como mostrado na Seção I, as FPND correspondem a alguns dos trechos mais vulneráveis nas rotas dos rios voadores, especialmente ao longo do percurso da estação seca pelo centro da Amazônia. Seu status regulatório indefinido as expõe intensamente à extração ilegal de madeira, invasões e grilagem - estima-se que entre 26% e 30% do desmatamento anual na Amazônia brasileira ocorra nessas áreas, em grande parte por meio do uso irregular do Cadastro Ambiental Rural (CAR) para reivindicar posse<sup>58</sup>. Uma análise publicada em 2023 na Nature Communications<sup>59</sup>, baseada em 33 anos de dados, demonstrou

que qualquer regime formal de designação fundiária - inclusive propriedade privada - reduz o desmatamento de forma mais eficaz do que manter terras sem designação. A designação formal como áreas protegidas, especialmente quando coincide com as Zonas Críticas de Umidade Atmosférica, constitui o mecanismo mais eficaz tanto para conter a grilagem quanto para assegurar a continuidade hidrológica das rotas dos rios voadores.

A designação, porém, não é suficiente por si só. Em muitas partes da Amazônia brasileira, a permanência da floresta depende menos do status legal e mais de as comunidades terem um interesse econômico concreto em mantê-la em pé. A proteção legal precisa ser acompanhada de arranjos de governança que assegurem presença territorial e fortaleçam meios de vida baseados na floresta - por meio de reservas de desenvolvimento sustentável, concessões florestais comunitárias, cadeias de produtos florestais não madeireiros, sistemas agroflorestais e outros

mecanismos que reduzam a pressão por conversão de terras enquanto geram renda local.



TROND LARSEN/AMAZON CONSERVATION

O contexto de políticas globais reforça o mandato para agir. A Meta 3 (30×30) do Marco Global de Kunming-Montreal busca proteger 30% das áreas terrestres e de águas interiores até 2030, e a Estratégia e Plano de Ação Nacionais para a Biodiversidade do Brasil estabelece a meta de ter 80% da Amazônia sob algum nível de proteção, o que implica uma expansão significativa das áreas destinadas. Esse impulso cria uma janela de oportunidade: se a continuidade dos corredores de transporte de umidade for incorporada aos critérios de seleção dessas novas áreas, a agenda 30×30 poderá gerar simultaneamente resultados

de biodiversidade e segurança hidrológica. Caso contrário, vastas áreas poderão ser destinadas de forma que não proteja as rotas atmosféricas das quais Peru e Bolívia dependem. Por isso, os processos de designação e de alocação de recursos devem considerar explicitamente o papel de cada área na manutenção da funcionalidade dos rios voadores, utilizando o arcabouço das Zonas Críticas de Umidade Atmosférica como referência espacial.

Os instrumentos financeiros para sustentar essa agenda já estão em mobilização. O programa Áreas Protegidas da Amazônia (ARPA) destinou até agora 128 milhões de acres (51,8 milhões de hectares), com uma meta adicional de 22 milhões de acres (8,9 milhões de hectares)<sup>60</sup>. Com a reativação do Fundo Amazônia em 2023, o BNDES mobilizou mais R\$ 3,4 bilhões para conservação e restauração florestal<sup>61</sup>. O recém-criado Tropical Forests Forever Fund (TFFF) também se prepara para oferecer um fluxo estável de financiamento de longo prazo às unidades de conservação. Integrar o critério de transporte atmosférico de umidade às decisões de alocação desses programas permitiria direcionar recursos para as áreas onde a proteção florestal gera o maior benefício hidrológico - tanto para o Brasil quanto para seus vizinhos andinos.

## C. Acelerar a restauração ao longo das rotas dos rios voadores

Embora este relatório se concentre no risco de desmatamento na porção ocidental da Amazônia brasileira, as rotas dos rios voadores durante as estações seca e de transição também atravessam extensas áreas da Amazônia oriental que já foram profundamente desmatadas.

A região sudeste da Amazônia, especialmente as áreas severamente degradadas do sul do Pará, constitui um alvo prioritário para a restauração florestal em larga escala, necessária para recuperar a funcionalidade dos corredores atmosféricos de umidade. Iniciativas recentes, como o programa Restaura Amazônia do BNDES, alinhado à meta do PLANAVEG de restaurar 12 milhões de hectares até 2030, representam um avanço inicial importante. No entanto, dada a relevância crítica dessa região para sustentar o transporte de umidade, **os investimentos precisam ser significativamente ampliados, estrategicamente direcionados aos principais corredores hidrológicos e integrados às políticas climáticas e de uso da terra, de modo a restabelecer o ciclo regional de umidade e estabilizar as chuvas rio abaixo.**

As estratégias de restauração devem priorizar áreas degradadas onde a recuperação ecológica possa ser combinada com sistemas produtivos de base florestal, como agroflorestas e economias comunitárias de restauração, aumentando tanto a permanência quanto a viabilidade social.

Nas zonas de transição entre floresta e áreas agrícolas, sistemas agroecológicos também podem atuar como estratégias de adaptação, ao melhorar a retenção de umidade no solo, diversificar a produção, reduzir a dependência de monoculturas e manter parte das funções de evapotranspiração em paisagens produtivas.

## D. Construir uma governança regional que reflita as responsabilidades ampliadas do Brasil

A ausência de mecanismos eficazes de governança regional sobre a cobertura florestal na Amazônia constitui uma vulnerabilidade crítica para Peru e Bolívia. O Brasil controla cerca de 60% da Bacia Amazônica e ocupa a posição estratégica entre o Atlântico e a base dos Andes, o que significa que, ao remover ou proteger sua cobertura florestal, exerce controle quase total sobre o destino dos rios voadores que abastecem de umidade os países andinos. Apesar dessa assimetria, os atuais arranjos de governança para lidar com dependências ambientais transfronteiriças na Amazônia estão muito aquém do necessário. A estrutura decisória por consenso da Organização do Tratado de Cooperação Amazônica (OTCA), por exemplo, cria obstáculos sistemáticos à ação efetiva ao conceder poder de veto a qualquer Estado-membro.

A Declaração de Belém, adotada na Cúpula de Chefes de Estado da OTCA em 2023, representou um avanço ao comprometer os países membros a evitar o ponto de não retorno da Amazônia. Ainda assim, ficou aquém em dois pontos essenciais: não estabeleceu responsabilidades diferenciadas

que reflitam a influência desproporcional do Brasil sobre o transporte atmosférico de umidade, e não definiu metas quantitativas de desmatamento por país, inviabilizando a avaliação de progresso e a responsabilização dos governos. **Fortalecer a governança regional exigirá ir além desse marco inicial, avançando para estruturas que reconheçam dependências assimétricas, definam objetivos de conservação espacialmente explícitos e incorporem mecanismos robustos de monitoramento e cumprimento.**

Na prática, isso implica avançar em duas frentes complementares:

- Desenvolver, no âmbito da OTCA, marcos de responsabilidade diferenciada que reconheçam formalmente as dependências ambientais assimétricas dentro da Bacia Amazônica. Dado o papel desproporcional do Brasil, isso inclui a aceitação de obrigações reforçadas para manter os corredores de transporte atmosférico de umidade que sustentam florestas e economias nos países vizinhos.
- Formalizar essas responsabilidades por meio de acordos bilaterais ou multilaterais vinculantes - inspirados em modelos consolidados de gestão transfronteiriça de recursos hídricos e bacias compartilhadas - que estabeleçam obrigações específicas para o Brasil manter a cobertura florestal em áreas críticas para o transporte de umidade rumo ao Peru e à Bolívia, seja pela proteção de corredores definidos de transporte de umidade, seja pela conservação de percentuais mínimos de cobertura florestal dentro de “bacias de precipitação” identificadas.

## E. Desenvolver estratégias de adaptação climática para áreas sensíveis

Medidas de adaptação baseadas em ecossistemas já foram recomendadas para o departamento de Pando, na Bolívia, incluindo a diversificação de atividades econômicas baseadas em frutos amazônicos, sistemas agroflorestais, manejo de recursos hídricos e restauração florestal<sup>62</sup>. A vulnerabilidade da região a uma possível interrupção no transporte dos rios voadores reforça a necessidade de estender esse tipo de avaliação a outros departamentos - como Norte de Beni, Santa Cruz e La Paz - que também podem enfrentar secas mais frequentes e intensas. Dado o caráter transfronteiriço do sistema de rios voadores, **essas estratégias** devem ser desenvolvidas em coordenação com Brasil e Peru, **incorporando explicitamente o risco de redução no transporte atmosférico de umidade, juntamente com outros fatores de estresse climático.**



## F. Avançar a agenda de pesquisa

As recomendações acima se apoiam em uma base científica em rápida evolução. As prioridades de pesquisa a seguir fortaleceriam o fundamento empírico para ação política e reduziriam incertezas críticas:

- Modelar os efeitos da restauração em larga escala no sudeste da Amazônia sobre a funcionalidade das rotas de umidade na estação seca, considerando diferentes cenários de mudança climática. Isso permitiria quantificar como distintos níveis de restauração podem melhorar a capacidade de transporte de umidade e reduzir a vulnerabilidade à seca no Peru e na Bolívia sob múltiplas projeções climáticas.
- Aprimorar o mapeamento dos corredores de transporte atmosférico de umidade por meio de técnicas avançadas de modelagem que incorporem variações sazonais, influências topográficas na circulação e impactos cumulativos de múltiplos focos de desmatamento. A modelagem da perda localizada de cobertura florestal deve gerar estimativas quantitativas da possível redução de precipitação nas áreas sensíveis.
- Modelar os efeitos projetados da mudança climática sobre as próprias rotas sazonais, identificando áreas onde os caminhos de umidade tendem a se deslocar no futuro e que, por isso, devem ser priorizadas para proteção, mesmo que hoje não sejam críticas para as rotas existentes.
- Expandir redes de monitoramento e esforços de modelagem para bacias de drenagem e bacias de precipitação, ampliando estações de monitoramento de vazão e precipitação em toda a Bacia Amazônica e aprimorando modelos atmosféricos e hidrológicos para quantificar as relações entre a umidade transportada pelos rios voadores e o fluxo superficial em grandes rios como o Madeira. Modelos mais bem calibrados permitiriam avaliações mais robustas de risco de seca - desde reduções de precipitação até quedas no nível dos rios - fortalecendo o planejamento de adaptação climática em comunidades vulneráveis.
- Reduzir as principais incertezas na relação entre o desmatamento amazônico e o sistema climático regional, incluindo efeitos sobre o ciclo hidrológico e a conectividade Atlântico–Amazônia–Andes<sup>63</sup>. Embora a perda de floresta já esteja associada à redução da evapotranspiração, alterações na circulação e atraso no início da estação chuvosa<sup>64 65</sup>, essas dinâmicas interagem com mudanças climáticas globais<sup>66 67</sup>, de formas ainda pouco compreendidas<sup>68</sup>. Fortalecer a capacidade de pesquisa nos países amazônicos - com sistemas de monitoramento aprimorados, modelagem biofísica-atmosférica mais avançada e sistemas de alerta precoce - é essencial para reduzir essas incertezas e consolidar a base de evidências para políticas públicas.<sup>69 70 71 72</sup>

# Conclusão

As florestas são o motor do ciclo hidrológico amazônico. Por meio da evapotranspiração, elas recarregam continuamente a atmosfera com umidade, alimentando os rios voadores - vastos fluxos atmosféricos que transportam água do Atlântico tropical por milhares de quilômetros de floresta até o sopé dos Andes. As florestas e comunidades do sudoeste amazônico, no Peru e na Bolívia, dependem desse processo para mais de 70% de sua precipitação anual.

Este relatório técnico mapeou, pela primeira vez com resolução sazonal, os caminhos pelos quais esse serviço é gerado - e os pontos em que ele está mais vulnerável à interrupção. A rota da estação seca, simultaneamente a mais crítica para a reciclagem de umidade e a mais dependente de floresta intacta, já atravessa áreas severamente degradadas no sul do Pará e está diretamente ameaçada pela iminente pavimentação da BR-319, que pode desencadear até 5 milhões de hectares adicionais de desmatamento. A rota da estação de transição cruza extensas áreas de florestas públicas não destinadas, que carecem da proteção legal necessária para evitar sua conversão. A rota da estação chuvosa, embora hoje beneficiada por proteção relativamente robusta, converge - assim como as demais - sobre o Acre antes de alcançar Peru e Bolívia, onde múltiplos projetos de expansão rodoviária podem comprometer o transporte de umidade ao longo de todo o ano.

As avaliações de exposição apresentadas na Seção II deixam claro o que está em jogo. A seca amazônica de 2023–2024 - a mais severa já registrada - mostrou, de forma concreta, como essa ruptura se manifesta, com consequências drásticas para economias locais e ecossistemas. Embora o evento não possa ser atribuído exclusivamente ao desmatamento, ele evidencia a magnitude dos danos que uma interrupção sustentada poderia causar. As decisões de política pública no Brasil, ao influenciarem o ritmo do desmatamento, afetam diretamente os rios voadores dos quais países vizinhos dependem, mas os atuais arranjos de governança não oferecem mecanismos para refletir essa responsabilidade.

Isso exige conservação espacialmente direcionada, governança regional robusta e o reconhecimento de uma nova dimensão no debate sobre desmatamento: mesmo perdas localizadas de cobertura vegetal podem gerar impactos potenciais sobre comunidades e ecossistemas além das fronteiras nacionais.

# Anexo I

## Abordagem Metodológica

Para visualizar os caminhos de transporte de umidade nas três estações, utilizamos dados da reanálise ERA5 para o período 2001–2020. Esse intervalo é adequado por capturar (i) a intensificação de eventos climáticos extremos já associada às mudanças climáticas e (ii) os possíveis efeitos do desmatamento recente.

As variáveis ERA5 empregadas foram *viwve* (fluxo de vapor d'água integrado verticalmente na direção leste), *viwvn* (fluxo integrado na direção norte) e *ivt* (magnitude do fluxo vetorial). Para converter esses campos de fluxo em linhas de corrente (streamlines), construímos funções de interpolação a partir da grade regular latitude–longitude e definimos um campo de velocidade transformando os valores de fluxo em velocidades angulares (graus por segundo), levando em conta o raio da Terra e a variação latitudinal do espaçamento da grade. A integração reversa das linhas de corrente foi realizada com o método Runge–Kutta 45 (RK45), iniciando em 680 pontos-semente distribuídos em uma grade de  $1,5^\circ \times 1,5^\circ$  sobre a Bacia Amazônica e rastreando cada trajetória para trás no tempo para identificar a origem da umidade. Essa abordagem segue o método utilizado em Santiago et al. (2025).

Para identificar as áreas mais vulneráveis a interrupções na reciclagem de umidade baseada em transpiração, combinamos os resultados espacialmente explícitos de dois estudos<sup>73</sup>. Weng et al. (2018) cobre as estações seca e chuvosa e define “áreas sensíveis” como aquelas em que mais de 50% da precipitação se origina da evapotranspiração amazônica - correspondendo ao 98º percentil de sensibilidade à mudança no uso da terra. Staal et al. (2018) concentra-se na estação seca e estima o efeito da transpiração das árvores amazônicas sobre a resiliência florestal; selecionamos áreas com fração de perda de resiliência igual ou superior a 0,8, representando a proporção de resiliência que seria perdida na ausência de transpiração arbórea. A integração desses dois conjuntos de dados permitiu identificar, ao longo das estações, as áreas cuja precipitação é mais dependente da manutenção da cobertura florestal amazônica.

- 1** - Arraut, J.M., Nobre, C., Barbosa, H.M.J., Obregon, G., & Marengo, J. (2012). Aerial rivers and lakes: looking at large-scale moisture transport and its relation to Amazonia and to subtropical rainfall in South America. *Journal of Climate*, 25(2), 543–556. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4189.1>
- 2** - Serrapilheira Institute. Rainfall from Amazonian indigenous territories accounts for 57% of Brazil's agricultural income. <https://serrapilheira.org/en/rainfall-from-amazonian-indigenous-territories-accounts-for-57-of-brazils-agricultural-income/>; Arraut, J.M., Nobre, C., Barbosa, H.M.J., Obregon, G., & Marengo, J. (2012). Aerial rivers and lakes: looking at large-scale moisture transport and its relation to Amazonia and to subtropical rainfall in South America. *Journal of Climate*, 25(2), 543–556. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4189.1>; Ruiz-Vasquez, M., Arias, P.A., Martinez, J.A., & Espinoza, J.C. (2020). Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America. *Climate Dynamics*, 54, 4169–4185. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05223-4>; Marengo, J.A., et al. (2018). Changes in climate and land use over the Amazon region: current and future variability and trends. *Frontiers in Earth Science*, 6, 228. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>
- 3** - Amazon Cooperation Treaty Organization (ACTO)/ORA. (n.d.). Policy brief: Flying rivers and Amazon cooperation. Amazon Network for the Environment and Sustainable Development. [https://ora-otca.cdn.prismic.io/ora-otca/aWmWhAlvOtkhBoZe\\_3-ORA\\_PolicyBriefs\\_RiosVoadores\\_EN.pdf](https://ora-otca.cdn.prismic.io/ora-otca/aWmWhAlvOtkhBoZe_3-ORA_PolicyBriefs_RiosVoadores_EN.pdf)
- 4** - Miguez-Macho, G., & Fan, Y. (2012). The role of groundwater in the Amazon water cycle: 1. Influence on seasonal streamflow, flooding and wetlands. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117, D15113. <https://doi.org/10.1029/2012JD017539>
- 5** - Beveridge, C.F., Espinoza, J.C., Athayde, S., et al. (2024). The Andes–Amazon–Atlantic pathway: A foundational hydroclimate system for social–ecological system sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(22), e2306229121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2306229121>
- 6** - Keys, P.W., et al. (2024). Atmospheric water recycling: an essential feature of critical natural asset stewardship. *Global Sustainability*, 7, e2. <https://doi.org/10.1017/sus.2023.24>
- 7** - Keys, P.W., et al. (2024). Atmospheric water recycling: an essential feature of critical natural asset stewardship. *Global Sustainability*, 7, e2. <https://doi.org/10.1017/sus.2023.24>
- 8** - Staal, A., Tuinenburg, O.A., Bosmans, J.H.C., et al. (2018). Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nature Climate Change*, 8, 539–543. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0177-y>
- 9** - Weng, W., Luedeke, M.K.B., Zemp, D.C., Lakes, T., & Kropp, J.P. (2018). Aerial and surface rivers: downwind impacts on water availability from land use changes in Amazonia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), 911–927. <https://doi.org/10.5194/hess-22-911-2018>; Wongchuig, S., Espinoza, J.C., Condom, T., Junquas, C., Sierra, J.P., Fita, L., Sörensson, A., & Polcher, J. (2023). Changes in the surface and atmospheric water budget due to projected Amazon deforestation: Lessons from a fully coupled model simulation. *Journal of Hydrology*, 625, 130082. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130082>
- 10** - Sierra, J.P., Junquas, C., Espinoza, J.C., et al. (2021). Recent changes in the atmospheric circulation patterns during the dry-to-wet transition season in South Tropical South America (1979–2020): impacts on precipitation and fire season. *Journal of Climate*, 34(22), 9025–9042. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0303.1>; Sierra, J.P., Espinoza, J.C., Junquas, C., et al. (2023). Impacts of land-surface heterogeneities and Amazonian deforestation on the wet season onset in southern Amazon. *Climate Dynamics*, 61, 4387–4408. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06835-2>; Ruiz-Vasquez, M., Arias, P.A., Martinez, J.A., & Espinoza, J.C. (2020). Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America. *Climate Dynamics*, 54, 4169–4185. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05223-4>; Comar, L.F.S., Abrahão, G.M., & Costa, M.H. (2022). A possible deforestation-induced synoptic-scale circulation that delays the rainy season onset in Am
- 11** - Lovejoy, T.E., & Nobre, C. (2019). Amazon tipping point: Last chance for action. *Science Advances*, 5(12), eaba2949. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba2949>
- 12** - Imazon, Microsoft, & Fundo Vale. (2021). PrevisIA: Artificial intelligence platform for deforestation risk prediction in the Brazilian Amazon. <https://previsia.org.br/>; <https://previsia.org.br/a-metodologia/>
- 13** - Serviço Florestal Brasileiro. (2024). Cadastro Nacional de Florestas Públicas (CNPf). Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, Brasil. <https://www.gov.br/florestal/pt-br/assuntos/cadastro-nacional-de-florestas-publicas>
- 14** - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). (2024). Trechos Rodoviários. Catálogo de Metadados do SNIRH, Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional, Brasil. <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/ff37f924-e88d-4ee4-82e7-14a3e5efe0fd>
- 15** - Barber, C.P., Cochrane, M.A., Souza, C.M., & Laurance, W.F. (2014). Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas in the Amazon. *Biological Conservation*, 177, 203–209. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.07.004>
- 16** - Nolte, C., Agrawal, A., Silvius, K.M., & Soares-Filho, B.S. (2013). Governance regime and location influence avoided deforestation success of protected areas in the Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(13), 4956–4961. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214786110>

- 17** - Observatório BR-319. (2024). Monitoramentos. <https://observatoriobr319.org.br/monitoramentos/>
- 18** - Concerção Amazônia. (2024). Briefing on deforestation scenarios along the BR-319. [https://concertacaoamazonia.com.br/?jet\\_download=d99777a0965303bb8cda6a7d3e291320757fb150](https://concertacaoamazonia.com.br/?jet_download=d99777a0965303bb8cda6a7d3e291320757fb150)  
[https://www.researchgate.net/publication/373976874\\_Amazon\\_deforestation\\_simulated\\_impact\\_of\\_Brazil's\\_proposed\\_BR-319\\_highway\\_project](https://www.researchgate.net/publication/373976874_Amazon_deforestation_simulated_impact_of_Brazil's_proposed_BR-319_highway_project)
- 19** - G1/Globo. (2025, August 27). Do isolamento à integração: com mais de R\$800 milhões do governo federal, AC vive expectativa de reconstrução histórica da BR-364. <https://g1.globo.com/ac/acre/noticia/2025/08/27/do-isolamento-a-integracao-com-mais-de-r-800-milhoes-do-governo-federal-ac-vive-expectativa-de-reconstrucao-historica-da-br-364.ghtml>
- 20** - Agência do Acre. (2025). Em Marechal Thaumaturgo, Deracre avança na obra da passarela sobre o Rio Amônia. <https://agencia.ac.gov.br/em-marechal-thaumaturgo-deracre-avanca-na-obra-da-passarela-sobre-o-rio-amonia-com-inicio-do-terceiro-pilar/>
- 21** - Finer, M., Mamani, N., & Novoa, S. (2022). Impactos da rodovia proposta Cruzeiro do Sul–Pucallpa na Amazônia sul-ocidental. MAAP/Amazon Conservation. <https://www.researchgate.net/publication/361459109>
- 22** - DAR (Derecho, Ambiente y Recursos Naturales). (2026). Chancay: Infraestructura e implicaciones para la Amazonia. <https://repositorio.dar.org.pe/items/38da0606-1db2-480b-a675-d0d1322bfc36>
- 23** - See note 21: Finer, M., Mamani, N., & Novoa, S. (2022). Impactos da rodovia proposta Cruzeiro do Sul–Pucallpa na Amazônia sul-ocidental. MAAP/Amazon Conservation. <https://www.researchgate.net/publication/361459109>
- 24** - UN-SPIDER (United Nations Platform for Space-based Information for Disaster Management and Emergency Response). Disaster risk management.
- 25** - Milla, P., Espinoza, J.C., Gutierrez, R., Molina-Carpio, J., Ronchail, J., Espinoza-Romero, D., & Junquas, C. (2025). Recent changes in the dry-to-wet transition season in the Andean Altiplano and related atmospheric circulation patterns (1981–2022). *Climate Dynamics*, 63, 87. <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07578-4>
- 26** - De la Cruz, G., Collado-Tello, R., Chávarri-Velarde, E., Lavado-Casimiro, W., & Espinoza, J.C. (2025). Long-term basin trends confirm a record 2022–2024 hydrological drought and water-storage losses in western Amazonia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 62, 102951. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102951>
- 27** - Lafuente, I., & Larrea-Alcázar, D. (2022). Adaptación basada en Ecosistemas (AbE) en el bosque amazónico de Pando. *Conservación Amazónica – ACEAA*. [https://www.researchgate.net/publication/399078412\\_Adaptacion\\_basada\\_en\\_Ecosistemas\\_AbE\\_en\\_el\\_bosque\\_amazonico\\_de\\_Pando](https://www.researchgate.net/publication/399078412_Adaptacion_basada_en_Ecosistemas_AbE_en_el_bosque_amazonico_de_Pando)
- 28** - See note 28: Espinoza, J.C., Jimenez, J.C., Marengo, J.A., et al. (2024). The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. *Scientific Reports*, 14, 8107. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5>
- 29** - Gutierrez, R.A., Espinoza, J.C., Lavado, W., Junquas, C., Molina-Carpio, J., Condom, T., & Marengo, J.A. (2024). The 2022–23 drought in the South American Altiplano: ENSO effects on moisture flux in the western Amazon during the pre-wet season. *Weather and Climate Extremes*, 45, 100710. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2024.100710>
- 30** - Espinoza, J.C., Jimenez, J.C., Marengo, J.A., Schongart, J., Ronchail, J., Lavado-Casimiro, W., et al. (2024). The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. *Scientific Reports*, 14, 8107. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5>
- 31** - ANAPO/Unitel. (2024). ANAPO: Se dejarán de producir 15 millones de toneladas de granos por sequía – casi un 75% menos que en la campaña de invierno anterior. <https://unitel.bo/canal-rural/anapo-se-dejaran-de-producir-15-millones-de-toneladas-de-granos-por-sequia-casi-un-75-menos-que-en-la-campana-de-invierno-anterior-MG12508756>
- 32** - Trase. (2024). Deforestation and climate change threaten Bolivia’s soy sector. <https://trase.earth/insights/deforestation-and-climate-change-threaten-bolivia-s-soy-sector>
- 33** - FAO, Unión Europea y CIRAD. (2022). Perfil de sistemas alimentarios: Estado Plurinacional de Bolivia. Catalizar la transformación sostenible e inclusiva de nuestros sistemas alimentarios. Roma, Bruselas y Montpellier. <https://doi.org/10.4060/cb9535es>
- 34** - Böhr, J.P. (2017). El sistema agroalimentario en Bolivia y su impacto en la alimentación y nutrición: Análisis de la situación 2005–2015. La Paz. [https://www.biodiversidadla.org/Documentos/El\\_sistema\\_agroalimentario\\_en\\_Bolivia\\_y\\_su\\_impacto\\_en\\_la\\_alimentacion\\_y\\_nutricion\\_Analisis\\_de\\_situacion\\_2005-2015](https://www.biodiversidadla.org/Documentos/El_sistema_agroalimentario_en_Bolivia_y_su_impacto_en_la_alimentacion_y_nutricion_Analisis_de_situacion_2005-2015)
- 35** - Condori-Apaza, V., Mamani-Luque, O.R., Alfaro-Alejo, R., Laqui, W., & Condori, W.F. (2021). Analysis and impact of meteorological droughts in the agriculture of Puno region, Peru. *E3S Web of Conferences*, 304, 03002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130403002>
- 36** - Ayala, R.Y., Meléndez Mori, J.B., Haro, N., & Oliva, M. (2025). Perception of climate change among smallholder potato producers in northern Peru. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, 119(1), 1–22. <https://doi.org/10.1080/27658511.2025.2521945>
- 37** - Climate Chance. (2022). Madre de Dios: From pathways planning to implementation. [https://www.climate-chance.org/wp-content/uploads/2022/04/bt2022\\_cas-detude\\_perou\\_madre-de-dios\\_eng.pdf](https://www.climate-chance.org/wp-content/uploads/2022/04/bt2022_cas-detude_perou_madre-de-dios_eng.pdf)

- 36** - Lletget, L.P., & de la Vega-Leinert, A.C. (2020). The effects of climate change variability on rural livelihoods in Madre de Dios, Peru. *Regional Environmental Change*, 20(2), 53. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01649-y>
- 37** - Potter, E.R., Seimon, A., & Corrales, E. (2023). A future of extreme precipitation and droughts in the Peruvian Andes. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6, 89. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00409-z>
- 38** - Andean Mountain Initiative (AMI). (2023). Vulnerability and adaptation to climate change in high mountain areas of the Andean Region: Regional synthesis. <https://iam-andes.org/wp-content/uploads/2023/12/AMI-2023-Vulnerability-and-ACC-Regional-synthesis.pdf>
- 39** - Lafuente, I., & Larrea-Alcázar, D. (2022). Adaptación basada en Ecosistemas (AbE) en el bosque amazónico de Pando. *Conservación Amazónica – ACEAA*. [https://www.researchgate.net/publication/399078412\\_Adaptacion\\_basada\\_en\\_Ecosistemas\\_AbE\\_en\\_el\\_bosque\\_amazonico\\_de\\_Pando](https://www.researchgate.net/publication/399078412_Adaptacion_basada_en_Ecosistemas_AbE_en_el_bosque_amazonico_de_Pando)
- 40** - Pastana, D.N.B., Modena, É.S., Wadt, L.H.O., Neves, E.S., Martorano, L.G., Lira-Guedes, A.C., Souza, R.L.F., Costa, F.F., Batista, A.P.B., & Guedes, M.C. (2021). Strong El Niño reduces fruit production of Brazil-nut trees in the eastern Amazon. *Acta Amazonica*, 51(3), 270–279. <https://doi.org/10.1590/1809-4392202002661>
- 41** - Marca, N.R., & Pareja, A., et al. (2024). ¿La temperatura y precipitación condiciona la productividad de castaña (*Bertholletia excelsa*)? Un análisis a partir de la comercialización en Bolivia. V Congreso Boliviano de Ecología. <https://www.researchgate.net/publication/392073602>
- 42** - Ashley, C., & Mdoe, N. (2002). Social impact of ethical and conventional brazil nut trading on forest-dependent people in Madre de Dios, Peru. Natural Resources Institute, University of Greenwich (DFID Forestry Research Programme project R7285). [https://www.researchgate.net/publication/228389382\\_Social\\_Impact\\_of\\_Ethical\\_and\\_Conventional\\_Brazil\\_Nut\\_Trading\\_on\\_Forest-Dependent\\_People\\_in\\_Peru](https://www.researchgate.net/publication/228389382_Social_Impact_of_Ethical_and_Conventional_Brazil_Nut_Trading_on_Forest-Dependent_People_in_Peru)
- 43** - Guariguata, M.R., Cronkleton, P., Shanley, P., & Taylor, P.L. (2008). The compatibility of timber and non-timber forest product extraction and management in the community and smallholder sector of tropical America. *Forest Ecology and Management*, 256(7), 1481–1490. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.11.013> [FLAG: authors to verify this is the correct source for the CIFOR-ICRAF link provided, which may point to a different Guariguata publication.]
- 44** - Herzog, S., Jørgensen, P.M., Martinez, R., & Martius, C. (2010). Efectos del cambio climático en la biodiversidad de los Andes tropicales: el estado del conocimiento científico. Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI), São José dos Campos, Brasil. <https://www.researchgate.net/publication/230758651>
- 45** - Swenson, J.W., Young, B.E., Beck, S., Comer, P., Cordova, J., Embert, D., Encarnación, F., Ferreira, W., Franke, I., Grossman, D., et al. (2012). Plant and animal endemism in the eastern Andean slope: challenges to conservation. *BMC Ecology*, 12, 1. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-12-1>
- 46** - Brando, P.M., Balch, J.K., Nepstad, D.C., Morton, D.C., Putz, F.E., Coe, M.T., Silvério, D., Macedo, M.N., Davidson, E.A., Nóbrega, C.C., Alencar, A., & Soares-Filho, B.S. (2014). Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought–fire interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(17), 6347–6352. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305499111>
- 47** - Cruz, M., Pradel, W., Juarez, H., Hualla, V., & Suarez, V. (2023). Deforestation dynamics in Peru: A comprehensive review of land use, food systems, and socio-economic drivers. International Potato Center (CIP). <https://doi.org/10.4160/cip.2023.12.007> [FLAG: authors to verify this is the intended source for the claim about Andean wetland carbon storage; the URL provided points to this CIP deforestation review, not a peatlands carbon study. For the peatlands claim, a more appropriate reference may be: Hribljan, J., et al. (2015). Carbon storage and long-term rate of accumulation in high-altitude Andean peatlands of Bolivia. *Mires and Peat*, 15(12), 1–14. [https://www.fs.usda.gov/nrs/pubs/jrnl/2015/nrs\\_2015\\_hribljan\\_001.pdf](https://www.fs.usda.gov/nrs/pubs/jrnl/2015/nrs_2015_hribljan_001.pdf)
- 48** - 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. *Hydrological Sciences Journal*, 62(6), 911–927. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1267861>
- 49** - Climate Policy Initiative. (2025, October 10). When the river runs dry: How Amazon deforestation threatens the Brazilian economy. <https://www.climatepolicyinitiative.org/publication/when-the-river-runs-dry-how-amazon-deforestation-threatens-the-brazilian-economy/>
- 50** - Reuters. (2024, October 4). Brazil drought drops Amazon port river level to 122-year low. <https://www.reuters.com/world/americas/river-level-amazon-rainforest-port-hits-122-year-low-amid-drought-2024-10-04/>
- 51** - Santos de Lima, L., et al. (2024). Severe droughts reduce river navigability and isolate communities in the Brazilian Amazon. *Communications Earth & Environment*, 5, 355. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01530-4>
- 52** - Reuters. (2024, August 8). Northern Brazil cuts hydro power use with prolonged drought. <https://www.reuters.com/business/environment/northern-brazil-cuts-hydro-power-use-with-prolonged-drought-2024-08-08/>
- 53** - iSciences. (2024, November 11). Escalating drought risk in the Amazon River Basin. <https://www.isciences.com/blog/2024/11/11/escalating-drought-risk-in-the-amazon-river-basin>
- 54** - Finer, M., Ariñez, A., Sierra, J.P., Espinoza, J.C., Weng, W., Vriesendorp, C., Bodin, B., & Beavers, J. (2025). The Amazon tipping point – importance of flying rivers connecting the Amazon. MAAP: 232. Amazon Conservation Association. <https://www.maaprogram.org/amazon-flying-rivers/>
- 55** - Veríssimo, A., Cochrane, M.A., Souza Jr., C., & Salomão, R. (2002). Priority areas for establishing national forests

- in the Brazilian Amazon. *Conservation Ecology*, 6(1), 4. [https://www.researchgate.net/publication/287639494\\_Priority\\_Areas\\_for\\_Establishing\\_National\\_Forests\\_in\\_the\\_Brazilian\\_Amazon](https://www.researchgate.net/publication/287639494_Priority_Areas_for_Establishing_National_Forests_in_the_Brazilian_Amazon)
- 56** - Cavalcante, R.B.L., et al. (2022). Multicriteria approach to prioritize forest restoration areas for biodiversity conservation in the eastern Amazon. *Journal of Environmental Management*, 318, 115590. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115590>
- 57** - Moutinho, P., & Azevedo-Ramos, C. (2023). Untitled public forestlands threaten Amazon conservation. *Nature Communications*, 14, 1152. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36427-x> [see also note 59]
- 58** - Moutinho, P., & Azevedo-Ramos, C. (2023). Untitled public forestlands threaten Amazon conservation. *Nature Communications*, 14, 1152. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36427-x>; Silvestrini, R., Alencar, A., Castro, I., Guyot, C., Gomes, J., Savian, G., & Batista, A.M. (2025). O raio-X da redução do desmatamento na Amazônia. Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM). [https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2025/09/NT\\_RaioX\\_Reducacao\\_Desmatamento\\_AMZ\\_v03-1-2.pdf](https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2025/09/NT_RaioX_Reducacao_Desmatamento_AMZ_v03-1-2.pdf)
- 59** - See note 57: Moutinho, P., & Azevedo-Ramos, C. (2023). Untitled public forestlands threaten Amazon conservation. *Nature Communications*, 14, 1152. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36427-x>
- 60** - World Bank. (n.d.). Protecting the Amazon rain forest: Amazon Region Protected Areas Project (ARPA). <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/537771468020663006>
- 61** - COP30 Brazil. (2023). BNDES records historic high in forest investments after reactivation of Amazon Fund. <https://cop30.br/en/news-about-cop30/bndes-records-historic-high-in-forest-investments-after-reactivation-of-amazon-fund>
- 62** - See note 39: Lafuente, I., & Larrea-Alcázar, D. (2022). Adaptación basada en Ecosistemas (AbE) en el bosque amazónico de Pando. *Conservación Amazónica – ACEAA*. [https://www.researchgate.net/publication/399078412\\_Adaptacion\\_basada\\_en\\_Ecosistemas\\_AbE\\_en\\_el\\_bosque\\_amazonico\\_de\\_Pando](https://www.researchgate.net/publication/399078412_Adaptacion_basada_en_Ecosistemas_AbE_en_el_bosque_amazonico_de_Pando)
- 63** - Beveridge, C.F., Espinoza, J.C., Athayde, S., et al. (2024). The Andes–Amazon–Atlantic pathway: A foundational hydroclimate system for social–ecological system sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(22), e2306229121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2306229121>
- 64** - Sierra, J.P., Junquas, C., Espinoza, J.C., Segura, H., Condom, T., Andrade, M., Molina-Carpio, J., Ticona, L., Mardoñez, V., Blacutt, L., Polcher, J., Rabatel, A., & Sicart, J.E. (2022). Deforestation impacts on Amazon–Andes hydroclimatic connectivity. *Climate Dynamics*, 58, 3609–3635. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-06025-y>
- 65** - Ruiz Vasquez, M., Arias, P.A., Martinez, A., & Espinoza, J.C. (2020). Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America. *Climate Dynamics*, 54, 4169–4185. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05223-4>
- 66** - 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. *Journal of Hydrology*, 369(1–2), 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.043>
- 67** - Sierra, J.P., Espinoza, J.C., Junquas, C., et al. (2023). Impacts of land-surface heterogeneities and Amazonian deforestation on the wet season onset in southern Amazon. *Climate Dynamics*, 61, 4387–4408. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06835-2>
- 68** - Marengo, J.A., Espinoza, J.C., Fu, R., Jimenez Muñoz, J.C., Muniz Alves, L., Ribeiro da Rocha, H., & Schöngart, J. (2024). Long-term variability, extremes and changes in temperature and hydrometeorology in the Amazon region: A review. *Acta Amazonica*, 54(3). <https://doi.org/10.1590/1809-4392202200980>
- 69** - Espinoza, J.C., Arias, P.A., Moron, V., Junquas, C., Segura, H., Sierra-Pérez, J.P., Wongchuig, S., & Condom, T. (2021). Recent changes in the atmospheric circulation patterns during the dry-to-wet transition season in South Tropical South America (1979–2020): impacts on precipitation and fire season. *Journal of Climate*, 34(22), 9025–9042. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0303.1>
- 70** - Espinoza, J.C., Ronchail, J., Marengo, J.A., & Segura, H. (2019). Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). *Climate Dynamics*, 52, 5413–5430. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>
- 71** - Marengo, J.A., Costa, M.C., Cunha, A.P., Espinoza, J.C., Jimenez, J.C., Libonati, R., Geirinhas, J.L., Miranda, V., Trigo, I.F., Sierra, J.P., Maia, T.O., Medeiros, O., et al. (2026). Characterisation of the exceptional heatwave conditions observed in Brazil during the record-hot years of 2024 and 2025. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.70219>
- 72** - Miranda, V., Albuquerque, R., Geirinhas, J.L., Peres, L., Libonati, R., Jimenez, J.C., & Trigo, I.F. (2026). Satellite-based land surface temperature and soil moisture observed during the 2023–2024 drought–heatwave events in the Amazon Basin. *Environmental Research: Climate*. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ae2d89>
- 73** - Weng, W., Luedeke, M.K.B., Zemp, D.C., Lakes, T., & Kropp, J.P. (2018). Aerial and surface rivers: downwind impacts on water availability from land use changes in Amazonia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), 911–927. <https://doi.org/10.5194/hess-22-911-2018>; Staal, A., Tuinenburg, O.A., Bosmans, J.H.C., et al. (2018). Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nature Climate Change*, 8, 539–543. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0177-y>

# AMAZON CONSERVATION

[www.amazonconservation.org](http://www.amazonconservation.org)

1025 Connecticut Ave NW · Suite 415 · Washington DC 20036 · USA

**Contato para a imprensa e informações de contato:**

[communications@amazonconservation.org](mailto:communications@amazonconservation.org)