

Aspectos eco-hidrológicos do estado do Amazonas

Ecohydrological aspects of the state Amazon

Aspectos ecohidrológicos del estado Amazonas

Paulo Rodrigo Zanin

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

paulorzgeo@gmail.com**David Pareja-Quispe**

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

davidp157@gmail.com**Irma Ayes-Rivera**

Climate Action from Alliance Bioversity

i.ayes@cgiar.org**Resumo**

Os processos hidrológicos decorrentes da interação clima-vegetação determinam os mecanismos ecológicos mais básicos. Desta forma, este artigo investigou alguns aspectos da Eco-hidrologia do estado do Amazonas no período de 1959 a 2021. Foram analisadas a dinâmica espaço/temporal da precipitação total, evapotranspiração, e a retroalimentação entre estas duas variáveis, denominada reciclagem de precipitação. Foram usados dados do produto de reanálise ERA-5 na escala de tempo mensal, mas considerando os períodos sazonais do Hemisfério Sul. Verificou-se significativa distinção sazonal nos aspectos eco-hidrológicos analisados. A precipitação total (2.662 mm/ano) e a evapotranspiração (1.359 mm/ano) apresentaram uma relação inversa entre os períodos de maiores e menores volumes de chuva, e a reciclagem de precipitação pela floresta (723 mm/ano) possui maior contribuição relativa para as chuvas do setor sudoeste do estado do Amazonas em todas as estações do ano. Isso mostra a importância da manutenção da floresta em pé para a Eco-hidrologia do estado do Amazonas.

Palavras-chave: Precipitação, Evapotranspiração, Reciclagem de precipitação.

Abstract

Hydrological processes resulting from climate-vegetation interactions determine the most basic ecological mechanisms. Thus, this article investigated some aspects of the Ecohydrology of the state of Amazonas from 1959 to 2021. The spatial/temporal dynamics of total precipitation, evapotranspiration, and the feedback between these two variables, called precipitation recycling, were analyzed. Data from the ERA-5 reanalysis product was used on a monthly time scale, considering the seasonal periods of the Southern Hemisphere. A significant seasonal distinction was found in the ecohydrological aspects analyzed. Total precipitation (2,662 mm/year) and evapotranspiration (1,359 mm/year) showed an inverse relationship between the periods of highest and lowest rainfall volumes, and precipitation recycling by the forest (723 mm/year) has a greater relative contribution to rainfall in the southwestern sector of the state of Amazonas in all seasons of

the year. This shows the importance of maintaining the standing forest for the Ecohydrology of the state of Amazonas.

Keywords: Precipitation, Evapotranspiration, Precipitation recycling.

Resumen

Los procesos hidrológicos resultantes de las interacciones clima-vegetación determinan los mecanismos ecológicos más básicos. Por lo tanto, este artículo investigó algunos aspectos de la Ecohidrología del estado de Amazonas de 1959 a 2021. Se analizó la dinámica espacio-temporal de la precipitación total, la evapotranspiración y la retroalimentación entre estas dos variables, denominada reciclaje de la precipitación. Los datos del producto de reanálisis ERA-5 se utilizaron en una escala de tiempo mensual, considerando los períodos estacionales del hemisferio sur. Se encontró una distinción estacional significativa en los aspectos ecohidrológicos analizados. La precipitación total (2.662 mm/año) y la evapotranspiración (1.359 mm/año) mostraron una relación inversa entre los períodos de mayor y menor volumen de lluvia, y el reciclaje de la precipitación por el bosque (723 mm/año) tiene una mayor contribución relativa a la lluvia en el sector suroeste del estado de Amazonas en todas las estaciones del año. Esto manifiesta la importancia de conservar el bosque en pie para la Ecohidrología del estado de Amazonas.

Palabras-clave: Precipitación, Evapotranspiración, Reciclaje de precipitación.

Introdução

A Eco-hidrologia surge como uma disciplina científica interdisciplinar nas últimas décadas. Segundo Rodriguez-Iturbe (2000), a Eco-hidrologia é a união da Hidrologia com a Ecologia, sendo definida como a ciência que busca descrever os mecanismos hidrológicos que fundamentam os padrões e processos ecológicos, tendo a umidade do solo como elo primordial entre as variações climáticas e a dinâmica espaço/temporal dos processos biogeoquímicos e da vegetação. De forma similar, Newman et al. (2006) consideram a Eco-hidrologia como uma disciplina híbrida que estuda como os processos hidrológicos influenciam a distribuição, estrutura, função e dinâmicas das comunidades biológicas, e como a retroalimentação das comunidades biológicas afetam o ciclo da água. Já Falkenmark e Rockström (2004) abordam a Eco-hidrologia em uma perspectiva dos usos da água pela natureza e pela humanidade, fazendo um particionamento das águas precipitadas em *blue water* (água líquida superficial e subterrânea) e *green water* (vapor d'água), envolvendo a reciclagem de precipitação pela evapotranspiração neste último caso. Para Zalewski (2015) a Eco-hidrologia incorpora todo o ciclo hidrológico (incluindo as fases atmosférica, terrestre e aquática) ao ser moderado pelo ciclo biológico na quantidade e qualidade da água. Mais recentemente, Rinaldo et al. (2020) consideram que a Eco-hidrologia incorpora equações de balanço de massa e *momentum* dos fluxos hidrológicos, mas não se limitando a zona crítica (do leito rochoso ao topo das árvores), pois expande a análise da escala local para incorporar a complexidade dos controles da água sobre a dinâmica ecológica na escala da bacia hidrográfica. Neste contexto, Rinaldo e

Rodriguez-Iturbe (2022) definem a “Eco-hidrologia 2.0” como uma intrusão da Hidrologia e Geomorfologia na Ecologia, ou vice-versa, e defendem sua expansão da interação solo-planta-atmosfera para a escala de bacia hidrográfica como volume de controle fundamental.

Dentre todos estes conceitos de Eco-hidrologia, a evapotranspiração aparece como uma variável biofísica fundamental. Ao mesmo tempo, o ciclo hidrológico é considerado a principal via de circulação de água e nutrientes. Assim, o total de água precipitada em um determinado local ou região constitui uma variável estocástica essencial desta nova disciplina científica. Sobre essas duas variáveis, enquanto a evapotranspiração é composta pela transpiração das árvores, evaporação da água interceptada pelo dossel das árvores, e evaporação da água nas camadas superficiais do solo (LIU et al., 2014), a precipitação total pode ser dividida em precipitação devido a advecção de umidade de outras regiões, e precipitação devido a umidade evapotranspirada na mesma região (ROCHA et al., 2015; ZANIN; SATYAMURTY, 2021). Neste último caso ocorre uma relação de via dupla entre duas variáveis que caracteriza um sistema de retroalimentação (RUSCICA et al., 2014). Ou seja, a evapotranspiração e a precipitação total se influenciam mutuamente no mesmo sentido (aumento ou redução), constituindo a reciclagem de precipitação (ELTAHIR; BRAS, 1994; ROCHA et al., 2015; ZEMP et al., 2014). Cabe também mencionar que, apesar de pesquisadores das áreas da Meteorologia e Climatologia tradicionalmente estudarem a reciclagem de precipitação (ver estudos na revisão de ROCHA et al., 2015), Theeuwes et al. (2024) verificaram que a reciclagem de precipitação (ao menos em climas temperados) é mais influenciada pelas variáveis eco-hidrológicas do que por outras variáveis ambientais.

Dentre os serviços ecossistêmicos, as florestas contribuem com a hidroclimatologia por meio da reciclagem da precipitação (FEARNSIDE, 2003). Desta forma, compreender a dinâmica eco-hidrológica em um determinado território é fundamental nos cenários atuais de mudanças climáticas. Neste contexto, e considerando a diversidade hidroclimática, hidrológica (MARENGO, 2005; ESPINOZA et al., 2009a; ESPINOZA et al., 2009b; ZANIN; SATYAMURTY, 2020a; ZANIN et al., 2024; ZANIN et al., 2025a), e de paisagens/vegetação (SOMBROEK, 2000; QUESADA et al., 2012) da Amazônia, avaliar as relações entre a precipitação e a evapotranspiração no estado do Amazonas torna-se cada vez mais necessário. A escolha do referido estado se deve a esse território constituir a divisão político-administrativa brasileira sob bioma Amazônico com maior extensão de floresta Amazônica preservada, apesar de algumas áreas de desmatamento em virtude de períodos de enfraquecimento político-ambiental sobre a Amazônia Legal (ZANIN et al., 2022).

Portanto, as relações entre precipitação e evapotranspiração, sobretudo na reciclagem da precipitação através das florestas, permanecem essenciais para a compreensão eco-hidrológica do

estado do Amazonas. E isso não se aplica apenas a comunidade científica, que reconheceram o papel que a Floresta Amazônica desempenha na regulação do sistema climático global (LENTON et al., 2008, JIMENEZ et al., 2024) e precipitações sobre a América do Sul (ZEMP et al., 2014; ZANIN; SATYAMURTY, 2021; ZANIN et al., 2025b), mas também às populações que vivem e utilizam os serviços ecossistêmicos da Amazônia no referido estado.

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo melhorar a compreensão de alguns aspectos eco-hidrológicos do estado do Amazonas, mais precisamente na relação entre a precipitação total (considerada tanto como uma variável hidroclimática/hidrológica como uma variável eco-hidrológica) e a evapotranspiração (considerada tanto uma variável biofísica/hidrológica como uma variável eco-hidrológica), em seu mecanismo de retroalimentação denominado reciclagem de precipitação (considerado tanto um processo hidroclimático/hidrológico como um processo eco-hidrológico). Esta análise é feita para as 4 estações do ano durante mais de meio século, usando o produto de reanálise mais avançado disponível atualmente. Assim, os resultados do presente estudo permitirão abordar com maior embasamento científico os desafios enfrentados pelas florestas tropicais no estado do Amazonas.

Materiais e método

Esta subseção está dividida em três tópicos: Área de estudo, Dados, e Método e técnicas.

Área de estudo

O estado do Amazonas está localizado na região equatorial da América do Sul (Figura 1), fazendo parte do bioma Amazônico (IBGE, 2023). É o maior estado do Brasil em extensão territorial e cobertura florestal, sendo predominantemente coberto por Floresta Ombrófila Densa (~94%), com uma pequena parte de seu território (~6%) ocupado principalmente por formações não vegetais (campinaranas, campos naturais, e formações pioneiras), corpos d'água, e atividades agropecuárias em áreas de desmatamento (Figura 1; PRODES/INPE, 2022; ZANIN et al., 2022).

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger (PELL et al., 2007), o clima da porção oeste do estado do Amazonas é do tipo Tropical de floresta pluvial (Af) e a porção leste é do tipo Tropical de monção (Am), havendo algumas pequenas áreas nos extremos sudeste e nordeste com clima do tipo Tropical de savana (Aw).

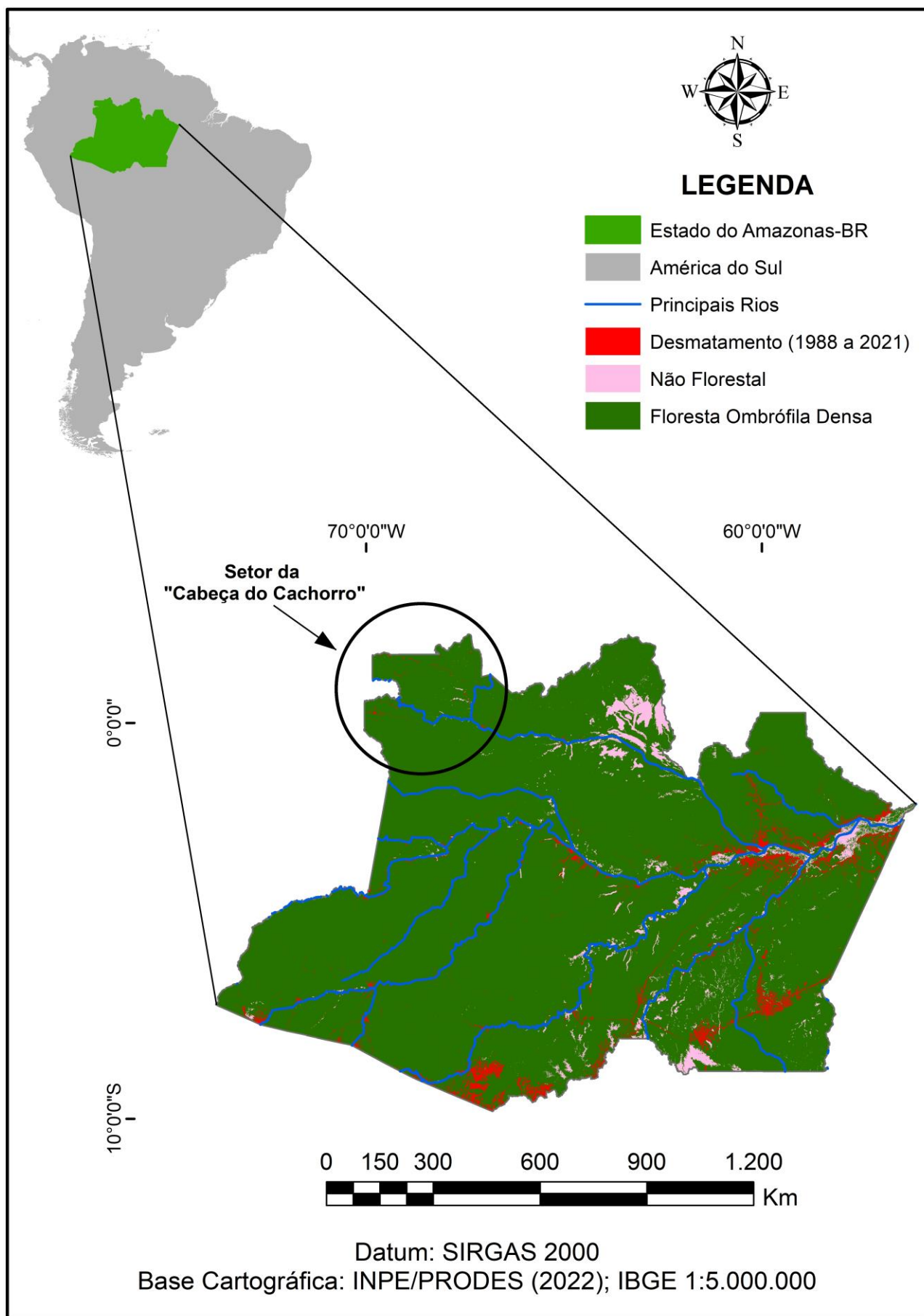


Figura 1 - Mapa de localização e de cobertura da terra do estado do Amazonas-BR. Fonte: Autores.

Dados

Dados em grade de Precipitação total, Evapotranspiração, e Fluxo de Umidade Integrado Verticalmente nas componentes meridional e zonal foram obtidos da reanálise ERA-5 (Hersbach et al. 2020). Estes dados podem ser obtidos em: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=download>. A reanálise ERA-5 é a quinta geração do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), calculada com resolução espacial de 0,25° e disponibilizada em resolução temporal horária. De acordo com o ECMWF (2025), uma reanálise climática consiste na combinação de um modelo numérico (simulação de processos físicos) com um sistema de assimilação de dados observados (estações meteorológicas, satélites, etc.) que fornecem informações espaciais sem lacunas para representar a história recente (informações temporais) da atmosfera terrestre. A reanálise ERA-5 é o estado da arte dos produtos de reanálise e, de acordo com Hersbach et al. (2020), a reanálise ERA-5 fornece uma melhor representação de Prec, ET e outras variáveis do que a versão anterior (reanálise ERA-Interim).

Método e técnicas

A análise climatológica foi realizada durante 62 anos (de 12/1959 a 11/2021). Este recorte temporal é muito superior ao número mínimo de anos necessários para análises climáticas (WMO, 2017), e também incorpora diferentes fases das variabilidades climáticas, tanto de alta como de baixa frequência, que afetam a área de estudo (ZANIN; SATYAMURTY, 2020b). Os cálculos foram feitos na escala de tempo mensal, considerando os períodos sazonais do hemisfério Sul (Verão: Dezembro, Janeiro, e Fevereiro; Outono: Março, Abril, e Maio; Inverno: Junho, Julho, e Agosto; e Primavera: Setembro, Outubro, e Novembro). Os dados horários do ERA-5 foram acumulados na escala de tempo mensal com o software *Climate Data Operators* (CDO), que serviram de base para o método de cálculo da reciclagem de precipitação descrito a seguir, e também foram agrupados sazonalmente (média mensal sazonal) com o CDO para geração de figuras no software *Grid Analysis and Display System* (GrADS).

A reciclagem de precipitação foi estimada utilizando o método de Eltahir e Bras (1994), o qual calcula o tipo de reciclagem denominada de “direta” (ZANIN; SATYAMURTY, 2020a), por considerar somente um ciclo de evapotranspiração e precipitação (ZEMP et al., 2014). Esta abordagem desenvolvida por Eltahir e Bras (1994) consiste em um modelo numérico bidimensional baseado na hipótese da “umidade bem misturada na atmosfera”, onde a região estudada é coberta por uma grade horizontal que divide toda a área em pequenas células, aplicando-se um procedimento iterativo a cada célula para satisfazer sua fórmula para todas as células da grade (BURDE; ZANGVIL, 2001). O cálculo da reciclagem de precipitação seguindo os procedimentos

deste método foi implementado em Python para o domínio 84,87°W – 45,12°W e 24,87°S – 9,63°N, sendo posteriormente aplicado o mascaramento correspondente ao estado do Amazonas.

Resultados e discussão

A precipitação média anual no estado do Amazonas foi de 2.662 mm/ano. De forma geral, as maiores alturas de precipitação total ocorrem nas estações do outono e verão, e as menores nas estações do inverno e primavera (Figura 2). Este padrão sazonal está de acordo com os resultados do estudo de Marengo (2005) para a porção norte da Bacia Amazônica. No entanto, considerando a distribuição espacial das chuvas dentro do estado do Amazonas, é possível observar na Figura 2 que as maiores alturas de precipitação do outono ocorrem na metade norte do estado, enquanto no verão ocorrem na metade sul, principalmente no setor sudoeste. Em relação ao inverno, é possível observar que a maior redução das chuvas ocorre nos extremos sudeste e sul do estado. Além disso, é também curioso observar o regime pluviométrico do extremo noroeste do estado do Amazonas (setor conhecido como “Cabeça do Cachorro” – Figura 1), que possui maiores precipitações nas estações de outono e inverno, e as menores precipitações nas estações do verão e primavera.

A Bacia Amazônica é conhecida por possuir altas taxas de precipitação (ESPINOZA et al., 2009a; MARENGO et al., 2018), sendo caracterizada por alta variabilidade espacial e temporal em diversas escalas de tempo (ZANIN; SATYAMURTY, 2020a, 2020b). Também possui diferentes sazonalidades relacionadas a mudanças nos padrões atmosféricos de larga escala, como a presença dos Sistemas de Monções Americanos (VERA et al., 2006). Neste contexto, o ciclo espaço-temporal da precipitação no estado do Amazonas pode ser explicado pelo Sistema Americano de Monção (VERA et al., 2006). Entre o final da primavera, durante todo o verão, e a metade do outono ocorre a Monção da América do Sul (SILVA; CARVALHO, 2007), resultando nos maiores volumes de precipitação observados no verão e outono. Já no inverno a Monção da América do Norte se torna ativa, e aumenta as precipitações no setor noroeste da América do Sul (VERA et al., 2006), explicando o padrão da precipitação no setor da “Cabeça do Cachorro”, e as reduzidas precipitações no resto do estado. Em relação a primavera, seu padrão pluviométrico pode ser considerado uma transição entre os padrões do inverno e verão/outono.

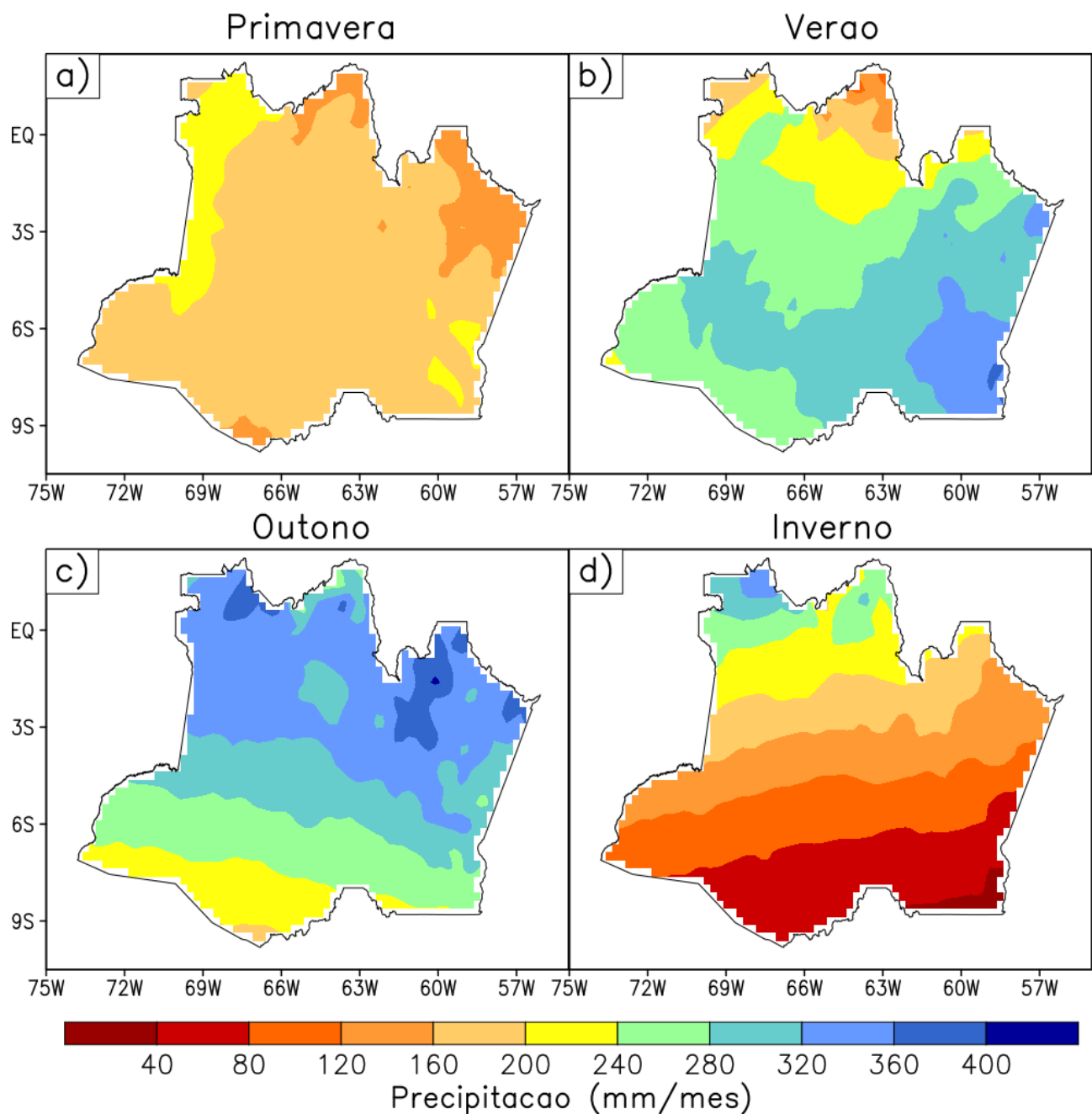


Figura 2 - Sazonalidade da precipitação total no estado do Amazonas. Fonte: Autores.

Em relação a evapotranspiração, ela apresenta uma média anual de 1.359 mm/ano no estado do Amazonas. De forma geral, a maior quantidade de água evapotranspirada ocorre na primavera, seguida pelo verão (mas com valores bem menores), enquanto a menor quantidade de água evapotranspirada ocorre no outono, seguido do inverno (Figura 3). Na primavera os valores são elevados em praticamente todo o estado, enquanto no verão a evapotranspiração possui os maiores valores no setor centro-norte, com valores reduzidos na porção leste e setor sudoeste, mas principalmente no setor nordeste e em pequenas áreas do extremo norte. Já os menores valores ocorrem no setor nordeste no outono, e setor sudoeste, extremos sul e noroeste durante o inverno. O

estudo de Marengo (2005) mostra fraca sazonalidade na evapotranspiração na porção norte da Bacia Amazônica, com os maiores valores ocorrendo no verão e começo do outono, seguido da primavera, e os menores valores entre o final do outono e inverno.

Analisando medições de torres de fluxo do programa LBA, Rocha et al. (2009) verificaram que a evapotranspiração é maior na estação seca do que na estação chuvosa sobre a floresta tropical úmida (predominante no estado do Amazonas) e floresta tropical semidecídua. No entanto, sobre a floresta de transição e a região do Cerrado, a evapotranspiração é maior na estação chuvosa do que na estação seca. Rocha et al. (2009) explicam que a evapotranspiração na floresta de transição e na região do Cerrado é controlada pela umidade do solo, enquanto na floresta tropical úmida e floresta tropical semidecídua é impulsionada pela radiação líquida e pelo déficit de pressão de vapor. Neste último caso, Vendrame et al. (2000 e referências embutidas) e von Randow et al. (2004) explicam que a maior evapotranspiração na estação seca em comparação à estação chuvosa se deve ao aumento nas aberturas estomáticas, forçadas pelo aumento da radiação solar incidente e pela diminuição da umidade relativa do ar, o que se deve à menor convergência de umidade e à redução da cobertura de nuvens. A disponibilidade de água no solo e a capacidade das raízes mais profundas de extrair água sustentam a transpiração nesse período.

Isso explica a relação predominantemente inversa entre a evapotranspiração e a precipitação total no estado do Amazonas, sobretudo na primavera e outono (Figuras 2 e 3). No entanto, cabe mencionar que na estação relativamente seca (principalmente no inverno e primavera) as árvores necessitam captar água em camadas profundas do solo para sustentar a evapotranspiração, o que é possibilitado pelas raízes profundas das árvores e a memória hidrológica da água no solo (NEPSTAD et al., 1994; JIPP et al., 1998; HODNETT et al., 1996; OLIVEIRA et al., 2005; FAN; MIGUEZ-MACHO, 2010; BRUNO et al., 2006; ZANIN, 2021; ZANIN et al., 2024; ZANIN et al., 2025b). Neste caso, é importante mencionar que o produto de reanálise utilizada no presente estudo considera somente os primeiros metros do perfil do solo (até 2,89 m), constituindo uma limitação para a estimativa da evapotranspiração nas estações de reduzidas precipitações.

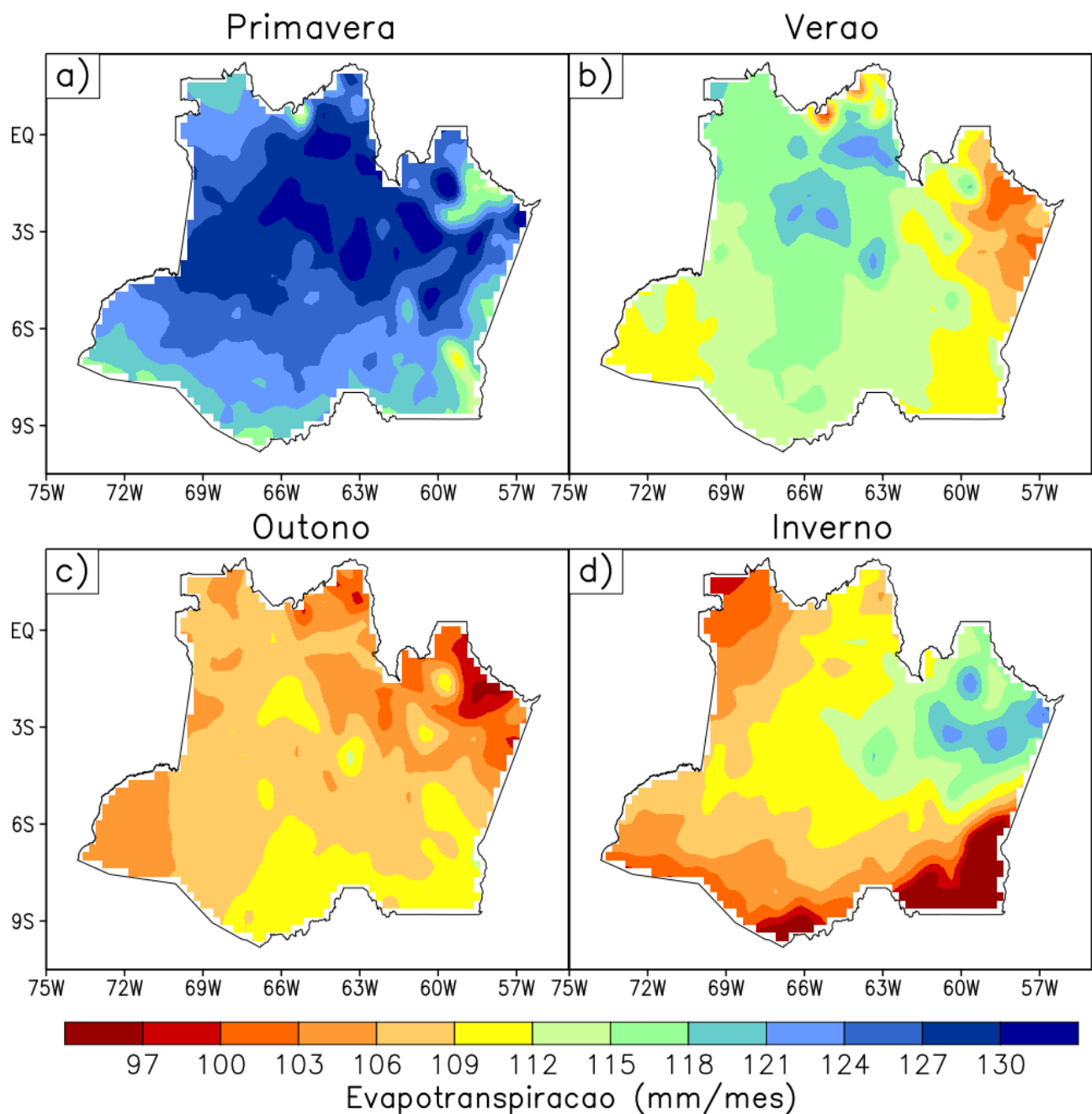


Figura 3 - Sazonalidade da evapotranspiração no estado do Amazonas. Fonte: Autores.

O presente estudo verificou que 27% da precipitação média anual do estado do Amazonas se deve a reciclagem de precipitação pela evapotranspiração da Floresta Amazônica. O padrão espacial desta reciclagem apresenta um gradiente predominante de nordeste para sudoeste no estado do Amazonas em todas as estações do ano (Figura 4). Isto está de acordo com o padrão espacial que ocorre em toda a bacia Amazônica (ELTAHIR; BRAS, 1994; ROCHA et al., 2017; ZANIN et al., 2024). De forma geral, as maiores razões de reciclagem ocorrem durante a primavera e inverno, principalmente no setor sudoeste do estado, e as menores razões ocorrem durante o verão e outono, principalmente no setor nordeste do Amazonas.

Em relação a proporção de precipitação reciclada na Bacia Amazônica, estudos anteriores quantificaram a reciclagem direta de umidade utilizando diferentes fontes de dados e metodologias. De acordo com o estudo de revisão de Rocha et al. (2015), estudos iniciais baseados em dados de precipitação, escoamento superficial e radiossonda obtiveram um valor médio anual em torno de 50% para a reciclagem da precipitação. Já os estudos a partir da última década do século XX, utilizando dados de modelos numéricos e reanálise, obtiveram valores médios anuais entre 20 e 35% para a precipitação reciclada na Bacia Amazônica. Segundo o estudo de Staal et al. (2018), 20% da precipitação total anual sobre a Bacia Amazônica é proveniente da transpiração das árvores e 12% da interceptação da copa das árvores e evaporação das superfícies do solo/água, totalizando uma reciclagem anual de precipitação de 32% sobre a bacia. No entanto, a contribuição da transpiração das árvores para a precipitação total anual varia de menos de 10% na região leste a mais de 45% nas regiões oeste e sudoeste da Bacia Amazônica (STAAL et al., 2018). Durante o inverno e a primavera, esse comportamento é semelhante na contribuição total da evapotranspiração para a precipitação total, chegando a mais de 60% nas encostas dos Andes (ZEMP et al., 2017; STAAL et al., 2018).

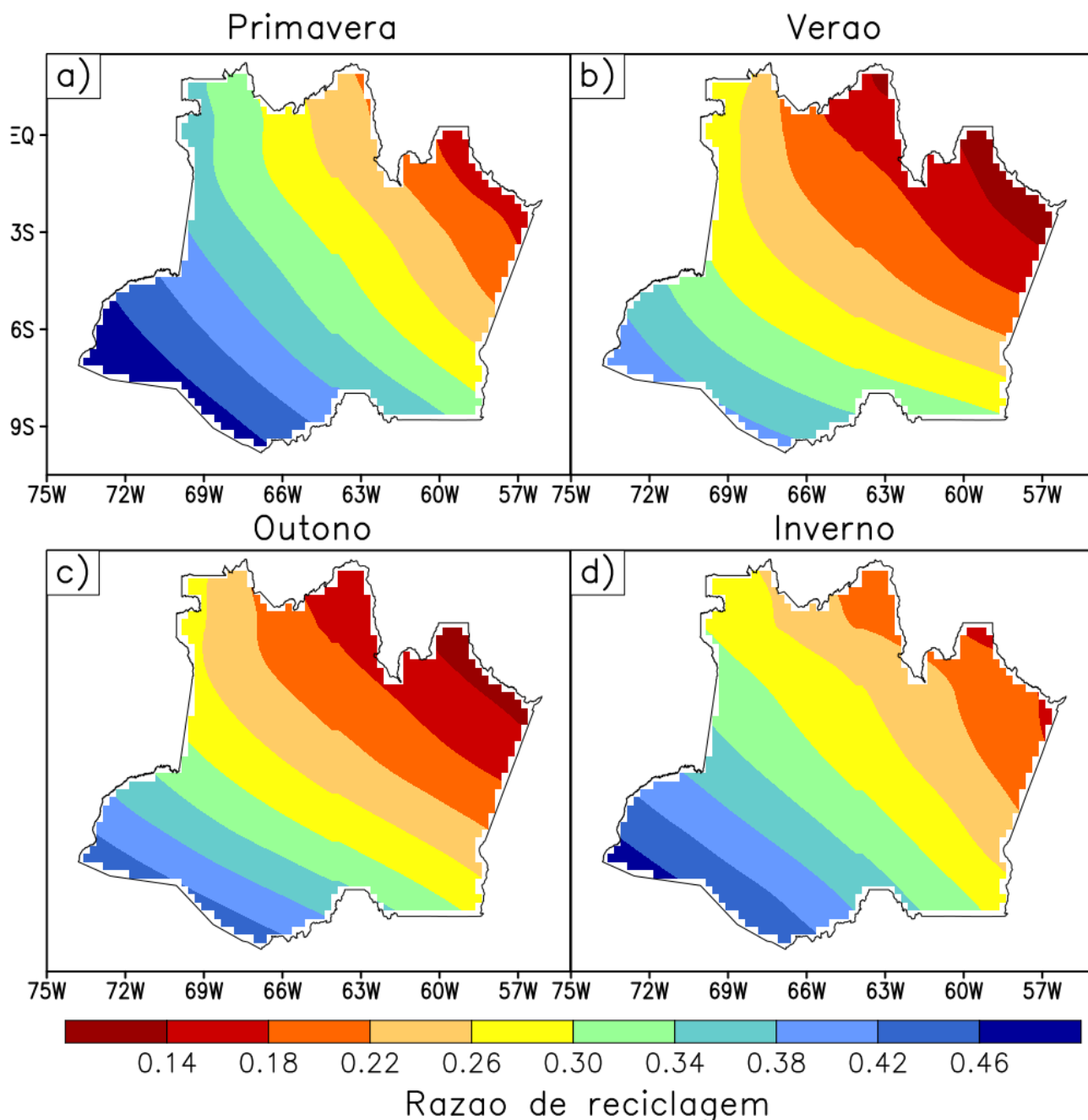


Figura 4 - Razão de reciclagem de precipitação no estado do Amazonas. Fonte: Autores.

Em relação aos valores de reciclagem de precipitação em altura d'água (Figura 5), ela apresenta uma média anual de 723 mm/ano no estado do Amazonas. Os maiores valores ocorrem na metade sul do estado do Amazonas durante o verão, e na metade oeste durante o outono. Na primavera e inverno os maiores valores ocorrem nos setores sudoeste e extremo noroeste, respectivamente. No inverno ocorrem os menores valores, com destaque para as porções sul e oeste do estado. Nas demais estações os menores valores tendem a se localizar no setor nordeste e norte/nordeste. De forma geral, a orientação espacial das faixas de maiores e menores valores da altura de reciclagem de precipitação estão em concordância com o que ocorre na Bacia Amazônica

(ZANIN et al., 2024). É interessante também notar que a orientação do gradiente de altura de precipitação reciclada (Figura 5), e a orientação do gradiente da razão de precipitação reciclada (Figura 4), apresentam similaridade na primavera, verão e outono, mas diferem no inverno. Isso pode ser explicado pela precipitação total de inverno (Figura 2) ser extremamente baixa na maior parte do estado do Amazonas (principalmente na metade sul), enquanto no setor da “Cabeça do Cachorro”, que compreende o município de São Gabriel da Cachoeira, a pluviometria total possui valores considerados médios. Isso ocorre porque o fluxo de umidade integrado na vertical sobre a referida área é mais alto no inverno do que nas outras estações (ver Figura 2 de Zanin et al., 2024), fazendo com que a altura d’água reciclada regionalmente pelo método de Eltahir e Bras (1994) seja maior nesse setor, com um gradiente negativo em direção ao sudeste do estado, similar ao gradiente da precipitação total (Figura 2), e diferente do que ocorre com a razão de reciclagem nessa estação (Figura 4).

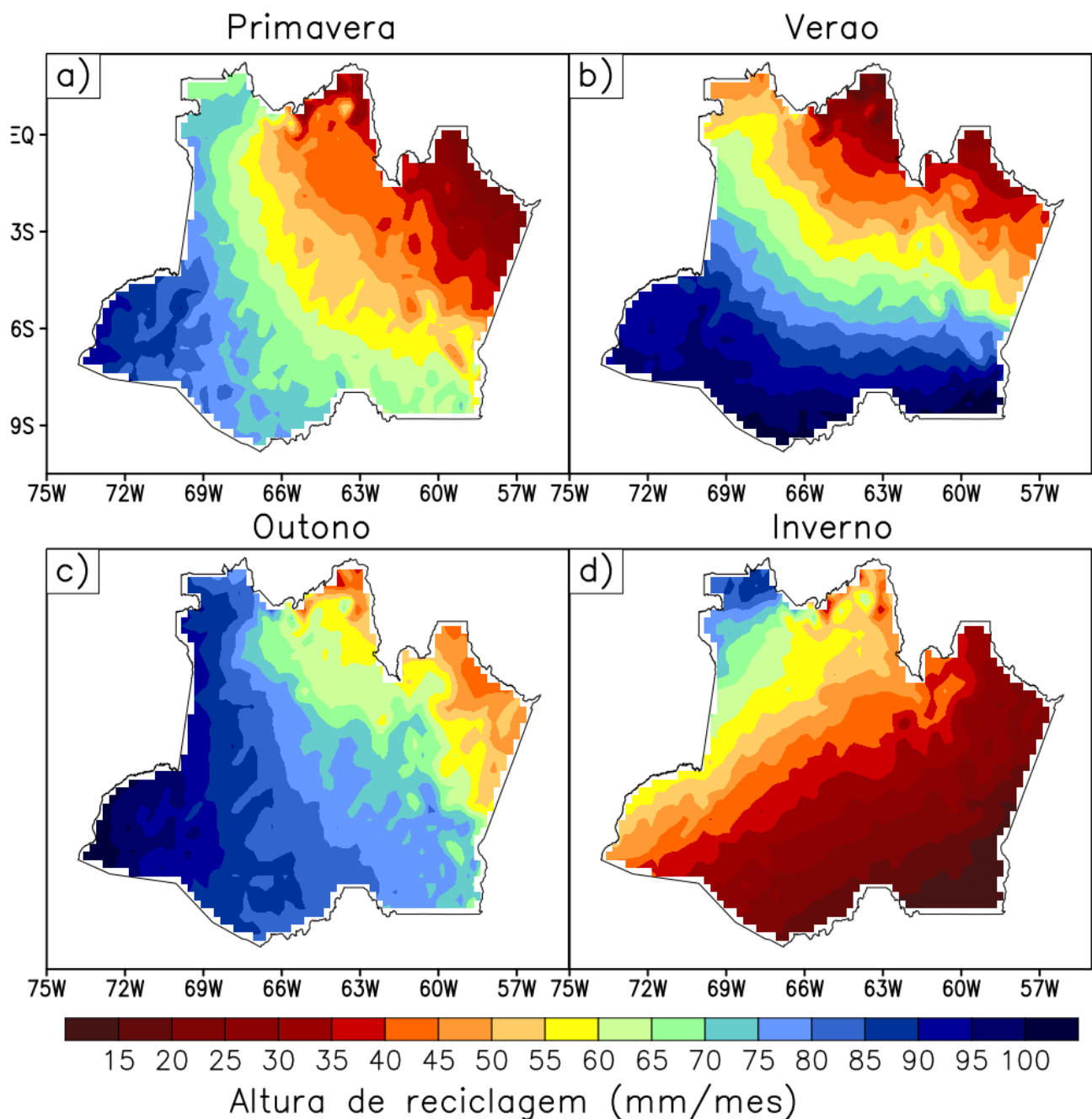


Figura 5 - Altura de reciclagem de precipitação no estado do Amazonas. Fonte: Autores.

Cabe também mencionar que, apesar de não analisado neste estudo, o desmatamento no estado do Amazonas, que hoje é pouco expressivo (Figura 1), pode impactar significativamente a reciclagem de precipitação se continuar aumentando. Estudos prévios realizados na Amazônia verificaram que com o desmatamento ocorre uma redução na reciclagem de precipitação (ZEMP et al., 2014; STAAL et al., 2018). Por outro lado, cabe também mencionar que o desmatamento gera um contraste entre as superfícies homogêneas de floresta na Bacia Amazônica, ocasionando alteração na característica dos turbilhões de ar, que se tornam mais intensos sobre áreas desmatadas, e geram circulações locais com convergência de ar sobre estas áreas, aumentando a formação de

nuvens (SILVA DIAS, 2006). Apesar de as evidências observacionais ainda não serem conclusivas, para desmatamentos fragmentados decorre um aumento inicial da precipitação, que se modificaria com o aumento da retirada da floresta, chegando a 30% de redução do volume precipitado em áreas de desmatamento total (NOBRE et al., 1991; AVISSAR et al., 2002). Além disso, devido a reciclagem de precipitação em cascata, que considera mais de um ciclo de reciclagem (diferente da reciclagem direta analisada neste estudo), a intensificação do desmatamento na borda leste da Floresta Amazônica (parte do “Arco do Desmatamento”) pode impactar as chuvas em toda a Amazônia (ZEMP et al., 2017), incluindo o estado do Amazonas.

Considerações finais

Os aspectos eco-hidrológicos analisados no estado do Amazonas, mais precisamente a precipitação total, a evapotranspiração, e a retroalimentação entre estas variáveis (denominada de reciclagem de precipitação), mostrou significativa distinção sazonal. A precipitação total e a evapotranspiração apresentaram uma relação inversa entre os períodos de maiores e menores volumes de chuva, assim como ocorre entre a razão de reciclagem de precipitação e a precipitação total (considerando o estado como um todo), enquanto a razão de reciclagem possui certa similaridade sazonal (períodos de maiores e menores valores) com a evapotranspiração. Isso se deve principalmente ao comportamento das circulações e chuvas de monção na América do Sul (ZANIN et al., 2024). No entanto, a reciclagem de precipitação pela floresta possui maior contribuição proporcional para as chuvas do setor sudoeste do estado do Amazonas em todas as estações do ano, enquanto em termos de altura d’água reciclada, o setor sudoeste do estado é o mais beneficiado durante a primavera, verão e outono, e o setor da “Cabeça do Cachorro” (noroeste do estado) é o mais beneficiado durante o inverno.

Como a evapotranspiração envolve produção de biomassa (FALKENMARK; ROCKSTRÖM, 2004), e a vegetação, água e nutrientes estão diretamente acoplados (NEWMAN et al. 2006), os resultados deste estudo mostram que a reciclagem de precipitação é de extrema importância para os ecossistemas do estado do Amazonas, principalmente nos períodos menos chuvosos, e sobretudo no setor sudoeste do estado. Dessa forma, o presente estudo ressalta a importância da manutenção da floresta em pé para a Eco-hidrologia do estado do Amazonas.

Por fim, é também importante mencionar que este estudo apresenta como principal limitação o fato de os dados de reanálise climática possuírem poucas fontes de dados observados antes dos anos de 1990 para serem assimilados nas simulações numéricas. Além disso, a resolução espacial da reanálise utilizada (~ 27 km próximo da linha do Equador) limita o detalhamento das características

superficiais da área de estudo, como pequenas áreas desmatadas, cursos d'água e rodovias. Desta forma, recomenda-se que este estudo seja refeito quando reanálises com resolução espacial mais detalhada forem desenvolvidas. Também é recomendado que estudos futuros avaliem os efeitos do desmatamento voltado para atividades agropecuárias na reciclagem de precipitação no estado do Amazonas, e que considerem os impactos da rodovia BR-319 que corta a Floresta Amazônica entre o extremo sul/sudoeste e a capital do estado do Amazonas.

Referências

- AVISSAR, R.; SILVA DIAS, P.L.; SILVA DIAS, M.A.F.; NOBRE, C.A. The Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA): Insights and future research needs. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, pp. 54.1-54.6, 2002.
- BURDE, G.I.; ZANGVIL, A. The estimation of regional precipitation recycling. Part I: review of recycling models. **Journal of Climate**, v. 14, pp. 2497–2508, 2001.
- BRUNO, R.D.; ROCHA, H.R.; FREITAS, H.C.; GOULDEN, M.L.; MILLER, S.D. Soil moisture dynamics in an eastern Amazonian tropical forest. **Hydrological Processes**, v. 20, pp. 2477-2489, 2006.
- ECMWF. 2025. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Reanálise Climática. Disponível em: <https://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis> . Acessado em 13/08/2025
- ELTAHIR, E.A.B.; BRAS, R.L. Precipitation recycling in the Amazon basin. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 120, pp. 861–880, 1994.
- ESPINOZA, J.C.; RONCHAIL, J.; GUYOT, J.L.; COCHONNEAU, G.; FILIZOLA, N.; LAVADO, W.; DE OLIVEIRA, E.; POMBOZA, R.; VAUCHEL, P. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). **International Journal of Climatology**, v. 29, pp.1574–1594, 2009a.
- ESPINOZA, J.C.; GUYOT, J.L.; RONCHAIL, J.; COCHONNEAU, G.; FILIZOLA, N.; FRAIZY, P.; LABAT, D.; DE OLIVEIRA, E.; ORDOÑEZ, J.J.; VAUCHEL, P. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon Basin (1974–2004). **Journal of Hydrology**, v. 375, pp. 297–311, 2009b.
- FALKENMARK, M.; ROCKSTRÖM, J. **Balancing Water for Humans and Nature: The New Approach in Ecohydrology**. 1º ed. Abingdon-UK: Routledge, 2004, 247 p.
- FAN, Y.; MIGUEZ-MACHO, G. Potential groundwater contribution to Amazon dry-season evapotranspiration. **Hydrology and Earth System Science**, v. 14, pp. 2039–2056, 2010.
- FEARNSIDE, P.M. **A Floresta Amazônica nas Mudanças Globais**. Manaus-AM: INPA, 2003, 134p.
- HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S.; HORÁNYI, A.; MUÑOZ-SABATER, J.; NICOLAS, J.; PEUBEY, C.; RADU, R.; SCHEPERS, D.; SIMMONS, A.; et al.

- The ERA-5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, pp. 1999–2049, 2020.
- HODNETT, M.G.; OYAMA, M.D.; TOMASELLA, J.; MARQUES FILHO, A.O. Comparisons of long-term soil water storage behavior under pasture and forest in three areas of Amazonia. In: GASH, J.H.C.; NOBRE, C.A.; ROBERTS, J.M.; VICTORIA, R.L. (Eds.) **Amazonian Deforestation and Climate**. West Sussex: John Wiley and Sons, pp. 57–77, 1996.
- IBGE. (2023). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Biomas e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil - 1:250.000. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15842-biomas.html> .Acessado em: 01/05/2023.
- INPE/PRODES. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Programa de Monitoramento do Desmatamento da Amazônia Brasileira por Satélite. 2022. Disponível em: http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/rates . Último acesso em 11/10/2022.
- JIMENEZ, J.C.; MIRANDA, V.; TRIGO, I.; LIBONATI, R.; ALBUQUERQUE, R.; PERES, L.F.; ESPINOZA, J.C.; MARENGO, J.A. Vegetation warming and greenness decline across Amazonia during the Extreme Drought of 2023. **Remote Sensing**, v. 16(14), 2519, 2024.
- JIPP, P.H.; NEPSTAD, D.C.; CASSEL, D.K.; REIS DE CARVALHO, C. Deep soil moisture storage and transpiration in forests and pastures of seasonally dry Amazonia. **Climatic Change**, v. 39, pp. 395–412, 1998.
- LENTON, T.M.; HELD, H.; KRIEGER, E.; SCHLLNHUBER, H.J. Tipping elements in the Earth's climate system. **PNAS**, v. 105 (6), pp. 1786-1793, 2008.
- LIU, X.; Y. LI, X.; CHEN, ZHOU, G.; CHENG, J.; ZHANG, D.; MENG, Z.; ZHANG, Q. Partitioning Evapotranspiration in an Intact Forested Watershed in Southern China. **Ecohydrology**, v. 8, pp. 1037–1047, 2014.
- MARENGO, J.A. Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin Water Budget. *Climate Dynamics*, v. 24, pp. 11–22, 2005.
- MARENGO, J.A.; SOUZA JR, C.M.; THONICKE, K.; BURTON, C.; HALLADAY, K.; BETTS, R.A.; ALVES, L.M.; SOARES, W.R. Changes in climate and land use over the amazon region: current and future variability and trends. **Frontiers in Earth Science** (Lausanne) 6, v. 228, 2018.
- NEPSTAD, D.C.; CARVALHO, C.R.; DAVIDSON, E.A.; JIPP, P.H.; LEFEBVRE, P.A.; NEGREIROS, G.H.; SILVA, E.D.; STONE, T.A.; TRUMBORE, S.E.; VIEIRA, S. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. **Nature**, v. 372, pp. 666–669, 1994.
- NEWMAN, B.D.; WILCOX, B.P.; ARCHER, S.R.; BRESHEARS, D.D.; DAHM, C.N.; DUFFY, C.J.; MCDOWELL, N.G.; PHILLIPS, F.M.; SCANLON, B.R.; VIVONI, E.R. Ecohydrology of water-limited environments: A scientific vision. **Water Resources Research**, v. 42, W06302, 2006.
- NOBRE, C.A.S.; SELLERS, P.J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**. v. 4, pp. 957-988, 1991.
- OLIVEIRA, R.S.; DAWSON, T.E.; BURGESS, S.S.; NEPSTAD, D.C. Hydraulic redistribution in three Amazonian Trees. **Oecologia**, v. 145, pp. 354-363, 2005.

PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L.; McMAHON, T.A. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, 1633-1644, 2007.

QUESADA, C.A.; PHILLIPS, O.L.; SCHWARZ, M.; CZIMCZIK, C.I.; BAKER, T.R.; PATIÑO, S.; FYLLAS, N.M.; HODNETT, M.G.; HERRERA, R.; ALMEIDA, S.; ALVAREZ DÁVILA, E.; ARNETH, A.; ARROYO, L.; CHAO, K.J.; DEZZEO, N.; ERWIN, T.; DI FIORE, A.; HIGUCHI, N.; HONORIO CORONADO, E.; JIMENEZ, E.M.; KILLEEN, T.; LEZAMA, A.T.; LLOYD, G.; LÓPEZ-GONZÁLEZ, G.; LUIZÃO, F.J.; MALHI, Y.; MONTEAGUDO, A.; NEILL, D.A.; NÚÑEZ VARGAS, P.; PAIVA, R.; PEACOCK, J.; PEÑUELA, M.C.; PEÑA CRUZ, A.; PITMAN, N.; PRIANTE FILHO, N.; PRIETO, A.; RAMÍREZ, H.; RUDAS, A.; SALOMÃO, R.; SANTOS, A.J.B.; SCHMERLER, J.; SILVA, N.; SILVEIRA, M.; VÁSQUEZ, R.; VIEIRA, I.; TERBORGH, J.; LLOYD, J. Basin-wide variations in Amazon forest structure and function are mediated by both soils and climate, **Biogeosciences**, 9, 2203–2246, 2012.

ROCHA, H.R.; MANZI, A.O.; SHUTTLEWORTH, J. Evapotranspiration (Eds.). In: Keller, M.; Bustamante, M.; Gash, J.; Silva Dias, P. (Eds.), **Amazon and Global Change**. American Geophysical Union, Washington, D.C, 2009.

ROCHA, V.M.; CORREIA, F.W.S.; FONSECA, P.A.M. Reciclagem de precipitação na Amazônia: um estudo de revisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, pp. 59–70, 2015.

ROCHA, V.M.; CORREIA, F.W.S.; SILVA, P.R.T.; GOMES, W.B.; VERGASTA, L.A.; MOURA, R.G.; TRINDADE, M.S.P.; PEDROSA, A.L.; SILVA, J.J.S. Reciclagem de Precipitação na Bacia Amazônica: o Papel do Transporte de Umidade e da Evapotranspiração da Superfície. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, pp. 387–398, 2017.

RODRIGUEZ-ITURBE, I. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. **Water Resources Research**, v. 36, pp. 3-9, 2000.

RINALDO, A.; GATTO, M.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. **River networks as ecological corridors: Species, populations, pathogens**. Cambridge University Press, New York, 2020, 454 p.

RINALDO, A.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. Ecohydrology 2.0. **Rendiconti Lincei - Scienze Fisiche e Naturali**, V. 33, PP. 245–270, 2022.

RUSCICA, R.C.; SORENSSON, A.A.; MENENDEZ, C.G. Hydrological links in Southeastern South America: soil moisture memory and coupling within a hot spot. **International Journal of Climatology**, v. 34, 3641–3653, 2014.

SILVA, A.E.; CARVALHO, L.M.V. Large-scale index for South America Monsoon (LISAM). **Atmospheric Science Letters**, v. 8, pp. 51–57, 2007.

SILVA DIAS, M.A.F. Meteorologia, Desmatamento e Queimadas na Amazônia: Uma síntese de Resultados do LBA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, pp. 190-199, 2006.

SOMBROEK, W. Amazon landforms and soils in relation to biological diversity. **Acta Amazonica**, v. 30, pp. 81-100, 2000.

SPRACKLEN, D.V.; BAKER, J.C.A.; GARCIA-CARRERAS, L.; MARSHAM, J.H. The effect of tropical vegetation on rainfall. **Annual Reviews of Environment and Resources**, v. 43, pp. 193-218, 2018.

STAAL, A.; TUINENBURG, O.A.; BOSMANS, J.H.C.; HOLMGREN, M.; VAN NES, E.H.; SHEFFER, M.; ZEMP, D.C.; DEKKER, S.C. Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. **Nature Climate Change**, v. 8, pp. 539–543, 2018.

STAAL, A.; FETZER, I.; WANG-ERLANDSSON, L.; BOSMANS, J.H.C.; DEKKER, S.C.; VAN NES, E.H.; ROCKSTRÖM, J.; TUINENBURG, O.A. Hysteresis of tropical forests in the 21st century. **Nature communications**, v. 11, 4978, 2020.

THEEUWEN, J.J.E.; DEKKER, S.C.; HAMELERS, B.V.M.; STAAL, A. Ecohydrological variables underlie local moisture recycling in Mediterranean-type climates. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 129, e2024JG008286, 2024.

VENDRAME, I.; ALBUQUERQUE, V.F.; FISCH, G. Influência da Condutância Estomática no Cálculo da Evapotranspiração em Rondônia. **Revista Brasileira Recursos Hídricos**, v. 5, pp. 59–70, 2000.

VERA, C.S.; HIGGINS, J.; AMBRIZZI, T.; GARREAUD, R.; GOCHIS, D.; GUTZLER, D.; LETTENMAIER, D.; MARENGO, J.; MECHOSO, C.R.; NOGUES-PAEGLE, J.; SILVA DIAS, P.L.; ZHANG, C. Toward a unified view of the American monsoon systems. **Journal of Climate**, v. 19, pp. 4977–5000, 2006.

VON RANDOW, C.; MANZI, A.O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P.J.; ZANCHI, F.B.; SILVA, R.L.; HODNETT, M.G.; GASH, J.H.C.; ELBERS, J.A.; WATERLOO, M.J.; CARDOSO, F.L.; KABAT, P. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, pp. 5–26, 2004.

WMO. World Meteorological Organization. **WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals**. Edição 2017 (WMO-No. 1203). Suíça: WMO, 2017, 29p.

ZALEWSKI, M. Ecohydrology and Hydrologic Engineering: Regulation of Hydrology-Biota Interactions for Sustainability. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 20, A4014012, 2015.

ZANIN, P.R. Soil water uptake by amazonian trees and simulation of impacts on energy fluxes and soil moisture dynamics at the LBA flux towers. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, pp. 441–454, 2021. <https://doi.org/10.1590/0102-77863630029>.

ZANIN, P.R.; SATYAMURTY, P. Hydrological processes interconnecting the two largest watersheds of South America from seasonal to intra-monthly time scales: a critical review. **International Journal of Climatology**, v. 40, pp. 3971–4005, 2020a. <https://doi.org/10.1002/joc.6443>.

ZANIN, P.R.; SATYAMURTY, P. Hydrological processes interconnecting the two largest watersheds of South America from multi-decadal to inter-annual time scales: a critical review. **International Journal of Climatology**. V. 40, pp. 4006–4038, 2020b. <https://doi.org/10.1002/joc.6442>.

ZANIN, P.R.; SATYAMURTY, P. Inter-seasonal and inter-basins hydrological coupling in South America. **Journal of Hydrometeorology**, v. 22, pp. 1609–1625, 2021. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0080.1>

ZANIN, P. R.; PAREJA-QUISPE, D.; ESPINOZA, J.C. Evapotranspiration in the Amazon basin: Couplings, hydrological memory and water feedback. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 352, 110040, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110040>

ZANIN, P.R.; CAVALCANTI, R.B.L.; MARINHO, R.R.; PONTES, P.R. Streamflow dynamics of Amazonian rivers according to their hydrogeochemical heterogeneity. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 59, 102316, 2025a. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102316>

ZANIN, P. R.; CHOU, S.C.; LYRA, A.A.; SUEIRO, G.; SATYAMURTY, P. Partitioning the Amazonian evapotranspiration in their contribution to precipitation over the La Plata Basin: A numerical modeling study. **International Journal of Climatology**, e70022, 2025b. <https://doi.org/10.1002/joc.70022>

ZANIN, P.R.; MARINHO, R.R.; NEVES, J.R.D.; NOGUEIRA, A.R. Periodização do desmatamento na Amazônia Legal: Da metade do século XX ao começo do século XXI. **Revista Geonorte**, v. 13, pP. 112-147, 2022. <https://doi.org/10.21170/geonorte.2022.V.13.N.42.112.147>

ZEMP, D.C.; SCHLEUSSNER, C.F.; BARBOSA, H.M.J.; VAN-DER ENT, R.J.; DONGES, J.F.; HEINKE, J.; SAMPAIO, G.; RAMMIG, A. On the importance of cascading moisture recycling in South America. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, pp. 13337–13359, 2014.

ZEMP, D.C.; SCHLEUSSNER, C.F.; BARBOSA, H.M.J.; HIROTA, M.; MONTADE, V.; SAMPAIO, G.; STAAL, A.; WANG-ERLANDSSON, L.; RAMMIG, A. Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. **Nature Communications**, v. 8, 14681, 2017.