

TENDÊNCIAS E ANOMALIAS DA CHUVA NA AMAZÔNIA LEGAL BRASILEIRA DE 1980 A 2020¹

TRENDS AND RAINFALL ANOMALIES IN THE BRAZILIAN LEGAL AMAZON FROM 1980 TO 2020

TENDENCIAS Y ANOMALÍAS DE LAS PRECIPITACIONES EN LA AMAZONIA LEGAL BRASILEÑA DE 1980 A 2020

TENDANCES ET ANOMALIES DES PRÉCIPITATIONS DANS L'AMAZONIE LÉGALE BRÉSILIENNE DE 1980 À 2020

Luiz Augusto Ferreira Monteiro²

João Paulo Assis Gobo³

Dorisvalder Dias Nunes⁴

Michel Watanabe⁵

Adnilson de Almeida Silva⁶

1 Apoio: Projeto Rainfall Projections for the Brazilian Legal Amazon using Recurrent Neural Networks

2 Mestre em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação Mestrado e Doutorado em Geografia da Universidade Federal de Rondônia – PPGG/UNIR. Pesquisador do Grupo de Pesquisas em Bioclimatologia e Mudanças Climáticas na Amazônia - BIOCLAM/UNIR. Porto Velho, Rondônia, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1026-9866>. E-mail: lfmonteiro.88@gmail.com.

3 Docente do Programa de Pós-Graduação Mestrado e Doutorado em Geografia da Universidade Federal de Rondônia – PPGG/UNIR. Líder do Grupo de Pesquisas em Bioclimatologia e Mudanças Climáticas na Amazônia - BIOCLAM/UNIR. Porto Velho, Rondônia, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4461-2570>. E-mail: joao.gobo@unir.br.

4 Docente do Programa de Pós-Graduação Mestrado e Doutorado em Geografia da Universidade Federal de Rondônia – PPGG/UNIR. Líder do Grupo de Estudo em Geografia e Planejamento Ambiental - GEOPLAM. Porto Velho, Rondônia, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4560-5444>. E-mail: dorisval@unir.br.

5 Docente do Programa de Pós-Graduação Mestrado e Doutorado em Geografia da Universidade Federal de Rondônia – PPGG/UNIR. Vice-Líder do Grupo de Estudo em Geografia e Planejamento Ambiental - GEOPLAM. Porto Velho, Rondônia, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0982-8862>. E-mail: michelwatanabe@unir.br.

6 Docente do Departamento e do Programa de Pós-Graduação Mestrado e Doutorado em Geografia – PPGG/UNIR. Líder do Grupo de Pesquisa Geografia, Natureza e Territorialidades Humanas – GENTEH/UNIR. Porto Velho, Rondônia, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2555-0861>. E-mail: adnilson@unir.br.

Agradecimentos: O segundo autor agradece ao CNPq pela concessão de bolsa produtividade, por meio do Projeto Bioclimatologia Amazônica: um estudo dos impactos climáticos, dos saberes e da percepção de povos tradicionais – Chamada PQ/CNPq - processo 306521/2022-9

Introdução

Visto que as mudanças climáticas globais podem afetar o ambiente de diversos modos – como o aumento da emissão de gases de efeito estufa e a alteração da produtividade e mortalidade das árvores –, os estudos referentes às tendências climáticas em diferentes regiões do mundo têm sido importantes, especialmente na Amazônia (Almeida *et al.*, 2017; Perez *et al.*, 2020; Sales *et al.*, 2020; Bolwerk; Ertzogue, 2021; Leite-Filho *et al.*, 2021).

Por isso, entender o regime de chuva da Amazônia Legal Brasileira (ALB) é importante, pois nos ajuda a compreender seus cenários climáticos, de recursos hídricos e as possíveis mudanças no regime de chuva, conforme apontam os estudos de Santos *et al.* (2018), Pereira e Viola (2019), Silva e Prasad (2019), Ferreira *et al.* (2020), Roitman *et al.* (2020) e Costa *et al.* (2023). Além disso, existe a contribuição da ALB na relação de trocas de energia, água e carbono com a atmosfera do planeta (Joetzjer *et al.*, 2018; Araújo *et al.*, 2019; Castro *et al.*, 2022; Rocha, 2016; Rocha *et al.*, 2017).

O desmatamento da floresta amazônica está interligado com uma grande liberação de carbono na atmosfera, causa implicações ambientais significativas (Paixão Alves; Diniz, 2022; Basso *et al.*, 2023). Entre os impactos específicos relacionados à liberação do carbono por parte do desmatamento estão a perda direta de biomassa, que serve como importante armazenamento de carbono, e a alteração do balanço de carbono nas florestas tropicais, que podem passar de sumidouros para fontes de carbono (Assis *et al.*, 2020; Bullock; Woodcock, 2021). Além disso, a degradação reduz a capacidade das florestas remanescentes de absorver CO₂, intensifica o efeito estufa (Silva Junior *et al.*, 2020; Gatti *et al.*, 2021; Kruid *et al.*, 2021).

O regime de chuva da ALB pode sofrer alterações em função dos desmatamentos, causado por mudanças na divisão entre água-energia superficial (Spracklen; Garcia-Carreras, 2015; Amorim *et al.*, 2019; Wongchuig *et al.*, 2022). Em áreas com mudança significativa na cobertura florestal, observa-se um desequilíbrio entre o aumento da evapotranspiração potencial e a diminuição da evapotranspiração real (Vergopolan; Fisher, 2016; Alves *et al.*, 2017; Guimberteau *et al.*, 2017). Esse desequilíbrio, impulsionado pela remoção da cobertura florestal, leva à redução da disponibilidade de umidade na atmosfera, o que, por sua vez, pode contribuir para a diminuição das chuvas (Aragão *et al.*, 2008; Chambers; Artaxo, 2017; Ruiz-Vásquez *et al.*, 2020). Além disso, há a ocorrência de eventos naturais extremos, como as secas severas de 2005 que afetaram principalmente as regiões oeste e sul da Amazônia, a intensa seca de 2015/2016 provocada por um El Niño particularmente forte, e a seca mais recente de 2023 que resultou na drástica redução do volume de vários rios (Espinoza *et al.*, 2012; Van Schaik *et al.*, 2018). A região também enfrentou inundações significativas, como as de 1999 e 2009, que impactaram a área central da Amazônia (Araújo *et al.*, 2013; Brum *et al.*, 2018; Wagner *et al.*, 2024).

O El Niño Oscilação Sul (ENOS) tem um impacto significativo sobre o clima do Brasil, particularmente na região amazônica (Cai *et al.*, 2020). Ele é dividido em dois

eventos, o El Niño que leva a uma diminuição da chuva na ALB; e a La Niña, que traz o aumento das chuvas nessa região (Tedeschi *et al.*, 2013; Pedreira Junior *et al.*, 2020). Ainda, há a interferência de outros modos de anomalia climática que afetam a ALB, como a Oscilação Decenal do Pacífico (OPD) e a Oscilação Multidecenal do Atlântico (OMA) (Silva *et al.*, 2023), bem como proporcionam impactos relacionados à saúde e à economia.

Conduzir estudos de observação na ALB apresenta desafios significativos devido à qualidade dos dados (Michot *et al.*, 2019). As informações pluviométricas provenientes das estações meteorológicas no Brasil enfrentam problemas como dados faltantes e anomalias, inclusive com registros de chuvas superiores a 800mm em um único dia (Oliveira-Junior *et al.*, 2021; Rodrigues *et al.*, 2023). Para preencher essas lacunas, é viável recorrer a técnicas de imputação de dados, assim como feito por diversos pesquisadores para realizar suas análises (Delahaye *et al.*, 2015). São diversas técnicas que podem ser utilizadas, desde as mais simples como a utilização da média, mediana ou moda para a substituição dos dados faltantes na série temporal, até a mais avançada como utilização de bibliotecas de linguagens de programação (R, *Python*), como a biblioteca *Multivariate Imputation by Chained Equations (MICE)* (Nor *et al.*, 2020). Essas bibliotecas perfazem um conjunto de instruções que ajudam a manipular as bases de dados (Chen *et al.*, 2019).

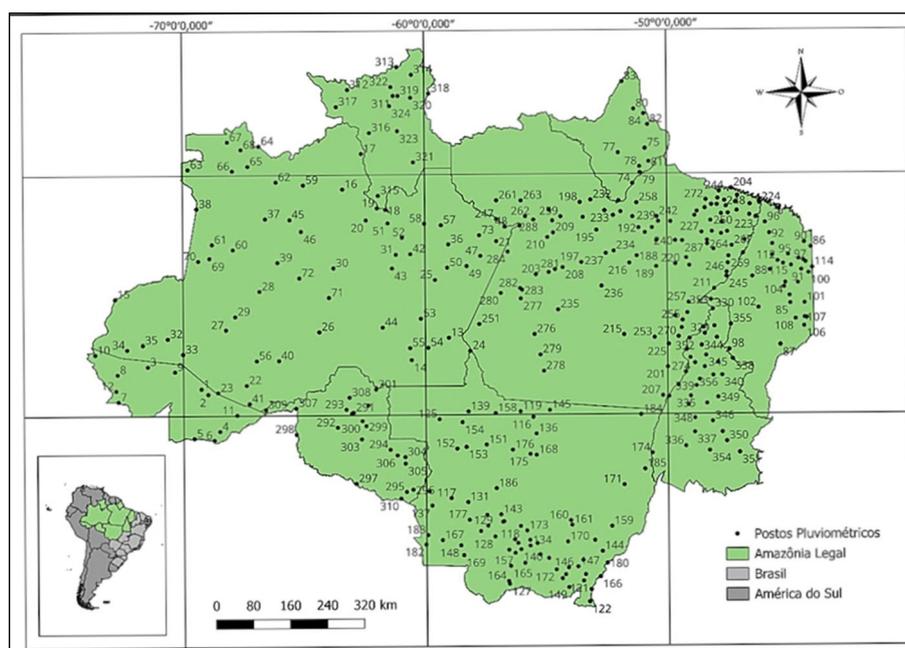
Assim, como objetivo principal, o presente estudo seguiu o mesmo caminho, mas demonstrou que também houve tendências de aumento e diminuição entre os anos da série temporal e em determinados períodos de tempos (Delahaye *et al.*, 2015).

Neste sentido, a proposição consistiu na análise das tendências e anomalias relativas à pluviosidade na Amazônia Legal Brasileira compreendida entre o período de 1980 a 2020. É oportuno situar que este recorte temporal é assinalado por uma série de oscilações de natureza climática — a qual pode contribuir na geração de grandes impactos ambientais, consequentemente com repercussão na economia e no social na Amazônia — e com desdobramentos em várias outras partes do Planeta.

Materiais e Métodos

Área de Estudo

A ALB (Figura 1) tem aproximadamente 5 milhões de km², o que corresponde a 58,93% do território brasileiro, e foi estabelecida pela Lei nº 1.806, de 6 de janeiro de 1953. A região é subdividida em duas partes: Ocidental, representada pelos estados do Amazonas, Acre, Rondônia e Roraima; e Oriental, por Amapá, Maranhão⁷, Mato Grosso, Pará e Tocantins (Cavalcante *et al.*, 2020). Porém, apenas parte do Maranhão é considerada pertencente ao bioma amazônico, sendo essa localizada a oeste do Meridiano 44°.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Figura 1. Estações pluviométricas na Amazônia Legal Brasileira.

A ALB também é marcada por apresentar vários tipos climáticos, em conformidade com a classificação de Köppen (Dubreuil *et al.*, 2019). São eles: o clima de monção (Am), predominante na região; o clima equatorial (Af), sem estação seca e com chuvas mensais não inferiores a 60mm; o clima tropical com inverno seco (Aw), caracterizado por um verão chuvoso e um inverno seco; e o clima tropical com verão seco (As), onde as elevadas temperaturas persistem durante todo o ano e uma época de seca bem definida se faz presente (Alvares *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2023).

Controle e Qualidade dos Dados

Para melhor entender como se comporta o regime de chuva na ALB foram acessadas as 359 estações espalhadas pelo território amazônico, por meio da plataforma de acesso a dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Então, com a intenção de maximizar o tempo das análises e constituir um conjunto de dados único, foi aplicado a clusterização de todas as séries temporais. Assim, retornou-se a nove bases de dados de chuva mensal, cada uma representada por um estado da ALB, para a análise de tendências e anomalias pelo período entre 1980 e 2020, mediante à utilização do teste de Mann-Kendall na linguagem de programação R.

Durante essa análise, foi observada uma alta incidência de dados ausentes. A escolha do melhor método de imputação de dados neste estudo baseou-se na técnica sugerida por Harrell (2001), em que os percentuais de dados faltantes da variável chuva sob análise devem seguir os seguintes parâmetros: se o percentual for menor que 5%, pode-se aplicar

a imputação única ou analisar somente os dados completos. Entre 5% e 15%, a imputação única pode ser usada provavelmente sem problemas, entretanto, o uso da imputação múltipla é mais indicado; e para dados ausentes superiores a 15%, a imputação múltipla é indicada na maioria dos casos.

Baseado na metodologia de Harrell (2001), foi aplicado o processo de imputação múltipla pelo pacote “MICE” da linguagem de programação R. Esse pacote realiza a imputação múltipla baseada na Especificação Condicional Total (ECT). Modelos de imputação internos são fornecidos para dados contínuos (correspondência média preditiva, normal), dados binários (regressão logística), dados categóricos não ordenados (regressão logística politômica) e dados categóricos ordenados (odds proporcionais).

O MICE também pode imputar dados de diversas maneiras, como: Predictive Mean Matching, Bayesian Linear Regression e através do método “norm.predict”. Como este estudo analisa dados contínuos de chuva diária, o método utilizado foi “norm.predict”, conforme é apresentado (Figura 2).

```
1 library(mice)
2
3 imp1 <- mice(dados1, method = "norm.predict", m=3, maxit = 5)
4
5 dslist1 <- complete(imp1, c(3,5), mild = TRUE)
6
7 (P3=data.frame(dslist1$`3`))
8
9 write.xlsx(P3, "TODAS_ESTAÇÕES-AM-01.xlsx", col.names=TRUE)
10
```

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

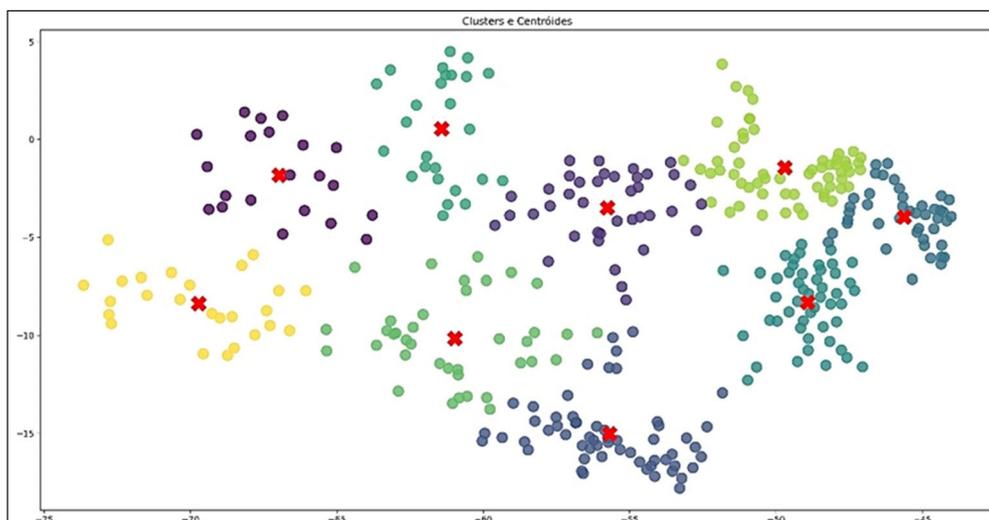
Figura 2. Exemplo de algoritmo com utilização da biblioteca MICE do R.

Na primeira linha, é chamado o pacote MICE⁸. Na terceira linha, foi realizada a imputação de dados escolhida, sendo “dados1” referente à base de dados de chuva diária; “Method” foi o método de imputação utilizado; m é o número de interações para a variável chuva diária; e “maxit” é o número de interações máximas. Seguiu-se para a quinta linha, realizou-se a construção de uma função empírica para a variável chuva diária chamada “dslist1”, em que “P3” representa a tabela de dados imputados. Por último, é realizada a saída de dados com extensão para o Excel, com o uso da função “write.xlsx”.

Agrupamento de dados e análise de tendência

O agrupamento de dados (Figura 3) (clustering) foi feito por meio do algoritmo K-Means, utilizou-se a biblioteca *scikit-learn* da linguagem de programação *Python*. O processo divide-se em: acesso à base de dados com todas as coordenadas das estações pluviométricas, permitiu a manipulação dos dados para que o algoritmo pudesse fazer a análise; aplicação do K-Means, assim como Kobylín e Lyashenko (2020) demonstram em

seu estudo, utilizou-se diversas funções fornecidas por esse algoritmo para determinar a quantidade correta de clusters a serem empregados (no caso, nove, os quais representam os estados da ALB); e, finalmente, o treinamento do modelo para definir bem os clusters e também ter acesso aos centroides desses clusters (pontos médios de cada cluster) (Punhani *et al.*, 2022). Porém, esse cálculo não retorna necessariamente uma coordenada exata de uma estação pluviométrica estudada. Desse modo, foi escolhida a coordenada que estava mais próxima aos resultados obtidos dos centroides.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Figura 3. Grupos de clusters e seus respectivos centroides. Representação dos clusters por meio de cores e dos centroides com a marcação 'x'.

A aplicação de clusters e a definição de ponto médio para cada um deles tornaram-se necessárias para que a análise das séries temporais fosse realizada na representação de cada estado, a saber: Manoel Urbano (AC), Japurá (AM), Mazagão (AP), Bela Vista do Maranhão (MA), Chapada dos Guimarães (MT), Juruti (PA), Mirante da Serra (RO), Caracaraí (RR) e Colinas do Tocantins (TO).

Assim, foi aplicado o teste de Mann-Kendall para cada uma das estações no período de 1980 a 2020. Além disso, essa análise foi realizada para identificar tendências em períodos mais curtos, como intervalos de 5 ou 10 anos, por exemplo, de 1980 a 1990. Dessa maneira, foi possível obter uma visão abrangente do comportamento do regime de chuvas ao longo de toda a série temporal e em segmentos específicos.

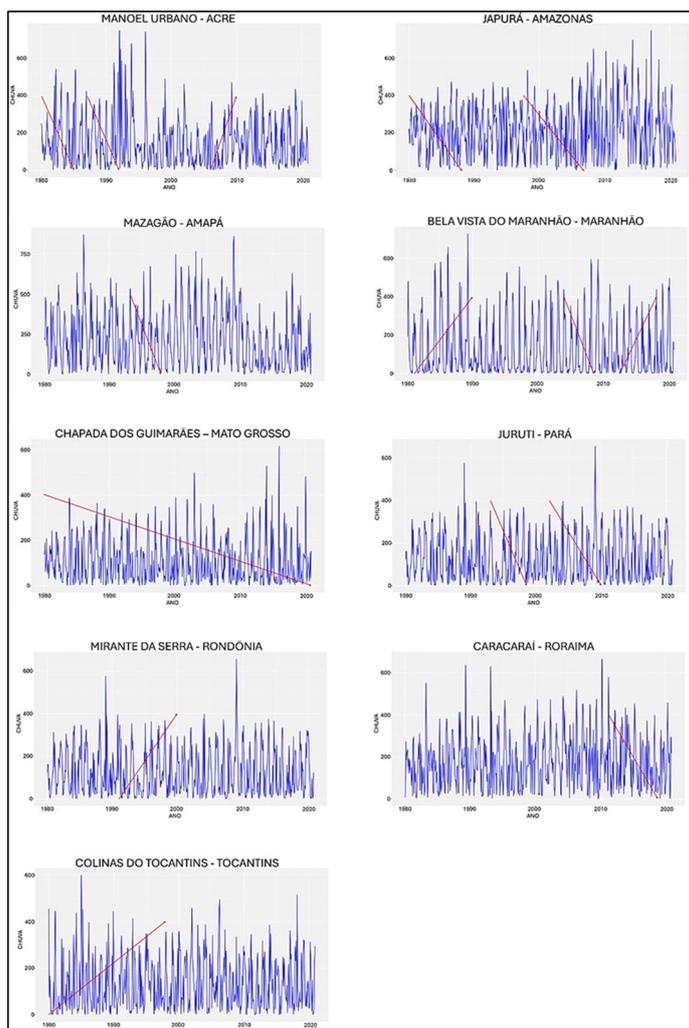
Resultados

A análise realizada nas nove estações pluviométricas selecionadas revelou que, em geral, não há uma tendência de diminuição ou aumento significativo em toda a série temporal (1980 – 2020), com exceção da estação localizada na Chapada dos Guimarães (Mato

Grosso), que mostrou uma tendência de diminuição das chuvas, apesar de ter registrado vários meses com precipitações mensais acima de 400mm desde o início dos anos 2010.

O maior registro mensal de chuva foi observado em Mazagão (Amapá), onde se registrou uma precipitação mensal de 874mm. Nos outros estados, os valores máximos de precipitação mensal variaram menos, situados entre aproximadamente 600mm (Colinas do Tocantins – Tocantins) e os 874mm registrados em Mazagão. Em relação aos meses com o menor registro de chuva, não houve muita variação entre os estados, onde todos registram meses sem precipitação durante um mês inteiro, principalmente entre junho e agosto, que são considerados os meses da estação seca.

Além disso, as análises indicaram diversas tendências de aumento e diminuição das chuvas ao longo das séries temporais. Conforme ilustrado (Figura 4), várias estações demonstraram que, entre os anos de 1980 e 2020, houve períodos de diminuição ou aumento das chuvas. Por exemplo, em Manoel Urbano, as chuvas diminuíram progressivamente de 1980 a 1985. Do mesmo modo ocorreu entre 2006 e 2010, porém durante esse período sentiu-se um aumento.



Fonte: Elaborado por Luiz Augusto Ferreira Monteiro (2024).

Figura 4. Tendências de aumento e diminuição das chuvas.

As tendências demonstradas na série temporal do município de Manoel Urbano (Acre) ocorreram em períodos que antecedem e sucedem o fenômeno El Niño, como a diminuição registrada entre 1980 e 1985. As outras duas tendências observadas seguiram a mesma lógica. Os outros municípios analisados exibem um padrão similar de tendências, com algumas exceções, ao apresentado por Manoel Urbano, ou seja, alinhados às tendências estabelecidas durante as ocorrências do ENOS.

Por exemplo, a estação localizada no município de Bela Vista do Maranhão (Maranhão) mostra uma tendência de aumento das chuvas que dura toda a década de 1980, contraria os efeitos do ENSO sentidos em outras localidades. O mesmo ocorre em Colinas do Tocantins (Tocantins), onde o efeito se prolonga até 1997, com uma maior incidência de meses que registraram mais de 400mm de precipitação. Outra estação pluviométrica que registra uma década de aumento das chuvas é a localizada no município de Mirante da Serra (Rondônia), durante os anos de 1990.

Discussão

A análise de tendências para as nove estações pluviométricas espalhadas pela ALB, mostrou diferentes resultados, dentre eles se destaca a Chapada dos Guimarães (Michot *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2019; Nor *et al.*, 2020). Essa mesma análise foi realizada pelo estudo de Almeida *et al.* (2017), onde mostrou, dentre outros resultados, tendências de diminuição e aumento das chuvas para 47 estações na ALB, nas estações chuvosa e seca. Essa análise foi utilizada o teste não paramétrico de Mann-Kendall, assim como foi empregado para este estudo, para verificar a significância estatística das tendências nas séries anuais e sazonais de precipitação e temperatura do ar. Este método não assume uma distribuição estatística específica para os dados e é menos sensível a outliers e distorções nos dados do que as estatísticas paramétricas.

De acordo com Relatório do IPCC (2022), as emissões de gases de efeito estufa (GEE) têm causado várias consequências em relação às mudanças climáticas, inclusive o aumento de chuvas intensas – e resultou em inundações (Figura 5). O Relatório encontrou evidências suficientes para confirmar alterações nos padrões de chuva, assim como mostra os resultados obtidos neste estudo. Essas mudanças podem ser observadas ao longo dos anos analisados das séries temporais, que mostram diversos pontos de diminuição das chuvas após a virada do século, como, por exemplo, em Bela Vista do Maranhão (Maranhão), que houve uma diminuição começada a partir de 2004 e terminada no fim da década.

Mudança no indicador	Avaliação das mudanças observadas	Avaliação da contribuição humana
Atmosfera e ciclo da água	Aquecimento da temperatura média global do ar de superfície desde 1850-1900	a faixa provável de contribuição humana ([0,8-1,3°C]) abrange a faixa muito provável de aquecimento observado ([0,9-1,2°C])
	Aquecimento da troposfera desde 1979	Agente causador principal
	Resfriamento da estratosfera inferior desde meados do século XX	Agente causador de 1979 - meados dos anos 90
	Mudanças na precipitação em grande escala e na umidade da troposfera superior desde 1979	
	Expansão da média zonal da Circulação de Hadley desde a década de 80	Hemisfério Sul
Oceano	O aumento do conteúdo de calor oceânico desde a década de 70	Agente causador principal
	A mudança de salinidade desde meados do século XX	
	Elevação do nível médio global do mar desde a década 70	Agente causador principal
Criosfera	Perda de gelo marinho no Ártico desde 1979	Agente causador principal
	Redução na cobertura de neve durante a primavera do Hemisfério Norte a década de 50	
	Perda de massa de calota de gelo da Groenlândia desde a década de 90	
	Perda de massa de calota de gelo do Ártico desde a década de 90	Evidência limitada e acordo médio
	Recuo das geleiras	Agente causador principal
Ciclo do carbono	Aumento da amplitude do ciclo sazonal do CO ₂ atmosférico desde o início de 1960	Agente causador principal
	Acidificação da superfície do oceano global	Agente causador principal
Clima da terra	Temperatura média da superfície do ar sobre a terra (cerca de 40% maior que o aquecimento médio global)	Agente causador principal
Síntese	Aquecimento do sistema climático global desde a época pré-industrial	

Legenda

confiança média	provável / alta confiança	muito provável	extremamente provável	virtualmente certo	fato	

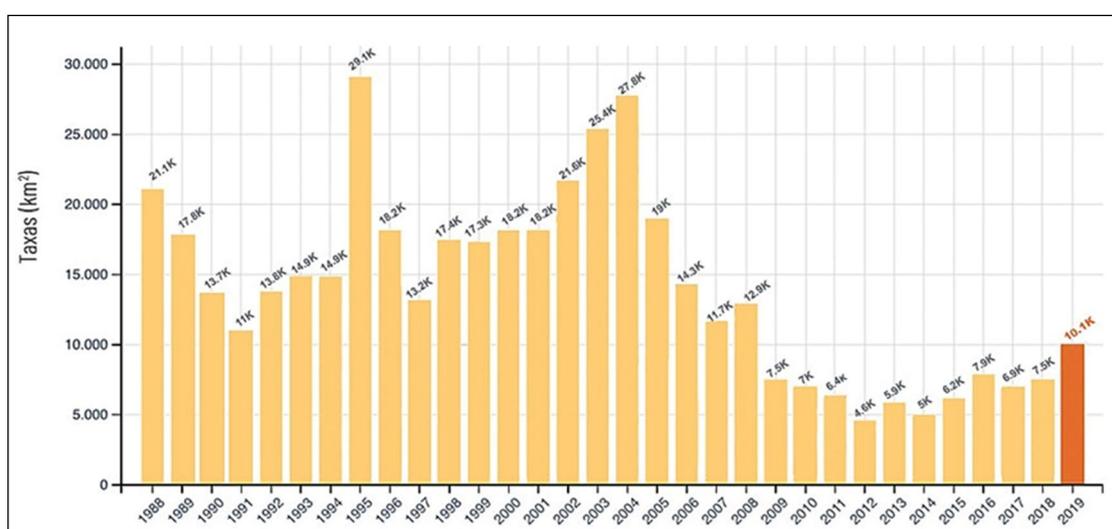
Fonte: Adaptado do IPCC (2022).

Figura 5. Análise das transformações nos indicadores climáticos globais e a influência antropogênica no sistema climático.

Essas tendências também mostraram estar parcialmente conectadas ao ENOS, embora a duração de um episódio de El Niño ou La Niña seja geralmente mais curta do que as tendências observadas. Foi notada uma diminuição das chuvas por períodos de pelo menos 5 anos, como no caso de Manoel Urbano (Acre), que apresentou uma tendência de diminuição de 1980 a 1985 (Araújo *et al.*, 2013; Brum *et al.*, 2018; Pedreira Junior *et al.*, 2020). Durante esse período, houve um episódio de El Niño entre 1982 e 1983 e um episódio de La Niña entre o final de 1983 e o final de 1984. Apesar do curto período de El Niño, os anos anteriores e posteriores marcam o início e o fim da diminuição das chuvas, indicam os efeitos do fenômeno. No entanto, os efeitos de La Niña não foram suficientes para alterar essa tendência, que continuou até 1985 (Tedeschi *et al.*, 2013; Cai *et al.*, 2020).

Dos 15 pontos de tendência encontrados nas séries temporais, somente cinco foram tendências de aumento e, a maior parte deles, ocorreu antes dos anos 2000, com destaque para a estação localizada em Colinas do Tocantins (Tocantins) que registrou um aumento

desde o começo da década de 1980 até final dos anos 1990 (Haghtalab *et al.*, 2020). Durante esse período, as taxas de desmatamento foram elevadas, chegaram a mais de 21,1 mil km² de área desmatada em 1995. Embora esse valor não represente a maior taxa registrada, ele se destaca em comparação com a menor taxa de desmatamento da década de 1980 e 1990, conforme a Figura 6 (Chambers; Artaxo, 2017; De Sales *et al.*, 2020). A partir de meados dos anos 1990, foram registradas mais cinco tendências de diminuição das chuvas, em Caracaraí (Roraima), Japurá (Amazonas), Juruti (Pará), Bela Vista do Maranhão (Maranhão), e Chapada dos Guimarães (Mato Grosso), sendo que esta última se destaca por apresentar uma diminuição contínua desde 1980 (Ruiz-Vásquez *et al.*, 2020; Leite-Filho *et al.*, 2021).



Fonte: Escobar (2020)⁹.

Figura 6. Acumulado anual de desmatamento na Amazônia de 1988 a 2019.

Nos outros casos, as tendências de diminuição não são tão acentuadas, e as variações entre as séries temporais são significativas, e pode haver apenas uma tendência, como em Caracaraí (Roraima), ou até três, como observado em Manoel Urbano (Acre) (Silva Junior *et al.*, 2018). Em Caracaraí, diversos fatores contribuíram para a tendência de diminuição observada entre 2010 e 2018, inclusive o aumento dos índices de desmatamento e a presença do El Niño (2014-2016) (Aragão *et al.*, 2008; Spracklen; Garcia-Carreras, 2015; Costa *et al.*, 2023). Além disso, outros modos de anomalia climática, como a Oscilação Multidecenal do Atlântico (OMA) e a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP), também podem influenciar a redução das chuvas (Jones; Carvalho, 2018; Silva *et al.*, 2023). Esses modos seguem a mesma lógica do ENSO, alternam os padrões de chuva na ALB durante suas fases quente e fria, respectivamente. Nesse caso específico, a OMA estava em sua fase quente, iniciada no final da década de 1990, enquanto a ODP estava em sua fase fria, que começou em um período semelhante ao da OMA (Silva Lindemann *et al.*, 2019).

Considerações Finais

Este estudo demonstrou como a imputação de dados pode ser uma ferramenta valiosa para melhorar a usabilidade de bases de dados com uma quantidade significativa de dados faltantes, especialmente quando se trata de dados confiáveis, como os coletados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

A análise revelou diversas tendências, tanto de diminuição quanto de aumento das chuvas. Ao longo das séries temporais estudadas, predominaram tendências de diminuição progressiva das chuvas ao longo de períodos curtos, como de 5 ou 10 anos. Por exemplo, na série temporal de Manoel Urbano (Acre), observou-se uma diminuição das chuvas a partir de 1980, atingiu seu ponto mais baixo em 1985. Essas diminuições podem estar relacionadas a diversos fatores, como modos de anomalias climáticas, Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA), que ocorriam simultaneamente ou ao desmatamento significativo durante o período. Outro resultado surpreendente foi observado na estação pluviométrica da Chapada dos Guimarães (Mato Grosso), que apresentou uma tendência de diminuição progressiva das chuvas desde 1980.

Para obter um panorama mais abrangente do que ocorreu e ocorre nessas áreas, é necessário analisar todas as estações pluviométricas da Amazônia Legal Brasileira (ALB). Isso proporcionará uma compreensão real dos regimes de chuva nesse bioma. Entretanto, o presente estudo enfrentou desafios devido à complexidade de analisar todas as estações pluviométricas, o que demandaria um estudo mais aprofundado, detalhado, além de consumo de tempo maior. Além disso, foram acessadas 693 estações pluviométricas da ALB (1980 a 2020), das quais apenas 359 se mostraram representativas em relação ao período estipulado e à quantidade de dados faltantes, e permitiram a imputação de dados.

A utilização do método de imputação de dados por meio do pacote MICE da linguagem R mostrou-se bastante útil para melhorar a qualidade dos dados, permitiu realizar análises mais precisas. Este estudo representa um avanço importante no conhecimento dos regimes de chuva da ALB, suas tendências e correlações com modos de anomalia climática e ações antrópicas.

Notas

7 No caso maranhense existe outras áreas pertencentes a outros biomas, como a zona de transição denominada Zona dos Cocais, os Manguezais do Norte localizados na região noroeste do estado, e parte do território apresenta cerrado (Nobre *et al.*, 2009; Ab'Saber, 2019).

8 Maiores detalhes podem ser verificados no *link*: <<https://cran.rproject.org/web/packages/mice/mice.pdf>>.

9 Disponível em: <<https://jornal.usp.br/ciencias/desmatamento-da-amazonia-dispara-de-novo-em-2020/>>.

Referências

- AB'SABER, Azis Nacib. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2012.
- ALMEIDA, Catherine Torres de; et al. Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973–2013. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 4, p. 2013-2026, 2017.
- ALVARES, Clayton Alcarde; et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVES, Lincoln Muniz; et al. Sensitivity of Amazon regional climate to deforestation. **American Journal of Climate Change**, v. 6, n. 1, p. 75-98, 2017.
- AMORIM, Tamiris Xavier; SENNA, Mônica Carneiro Alves; CATALDI, Marcio. Impactos do desmatamento progressivo da Amazônia na precipitação do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 2019.
- ARAGÃO, Luiz Eduardo O.C.; et al. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1498, p. 1779-1785, 2008.
- ARAÚJO, Mayara Lucyanne Santos; et al. Caracterização espaço-temporal dos componentes do balanço de radiação e calor na região de transição Amazônia-Cerrado. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 2019.
- ARAÚJO, Rosimeire Gonzalez; et al. A influência do evento El Niño-Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul. **Acta Amazonica**, v. 43, p. 469-480, 2013.
- ASSIS, Talita Oliveira; et al. CO₂ emissions from forest degradation in Brazilian Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 10, p. 104035, 2020.
- BASSO, Luana S.; et al. Atmospheric CO₂ inversion reveals the Amazon as a minor carbon source caused by fire emissions, with forest uptake offsetting about half of these emissions. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 23, n. 17, p. 9685-9723, 2023.
- BOLWERK, Diógenes Alencar; ERTZOGUE, Marina Haizenreder. Mudanças climáticas e/ou mudanças socioculturais na Amazônia Legal. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 1, p. 202-213, 2021.
- BRUM, Mauro; et al. ENSO effects on the transpiration of eastern Amazon trees. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 373, n. 1760, p. 20180085, 2018.
- BULLOCK, Eric L.; WOODCOCK, Curtis E. Carbon loss and removal due to forest disturbance and regeneration in the Amazon. **Science of The Total Environment**, v. 764, p. 142839, 2021.
- CAI, Wenju; et al. Climate impacts of the El Niño–southern oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 4, p. 215-231, 2020.

- CASTRO, Aline Anderson de; et al. Evaluating carbon and water fluxes and stocks in Brazil under changing climate and refined regional scenarios for changes in land use. **Frontiers in Climate**, v. 4, p. 941900, 2022.
- CAVALCANTE, Rosane Barbosa Lopes; et al. Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. **Atmospheric Research**, v. 238, p. 104879, 2020.
- CHAMBERS, Jeffrey Q.; ARTAXO, Paulo. Deforestation size influences rainfall. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 3, p. 175-176, 2017.
- CHEN, Lei; et al. Comparison of the multiple imputation approaches for imputing rainfall data series and their applications to watershed models. **Journal of Hydrology**, v. 572, p. 449-460, 2019.
- COSTA, Giovanna Klautau Leite; et al. Impacto das mudanças climáticas nas vazões mínimas de referência de pequenas bacias hidrográficas na Amazônia Legal e dentro do arco do desflorestamento. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 20, n. 2023, 2023.
- DELAHAYE, Florian; et al. A consistent gauge database for daily rainfall analysis over the Legal Brazilian Amazon. **Journal of hydrology**, v. 527, p. 292-304, 2015.
- DUBREUIL, Vincent; et al. Climate change evidence in Brazil from Köppen's climate annual types frequency. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 3, p. 1446-1456, 2019.
- FERREIRA, Susane Cristini Gomes; DE LIMA, Aline Maria Meiguins; CORRÊA, José Augusto Martins. Indicators of hydrological sustainability, governance and water resource regulation in the Moju river basin (PA)–Eastern Amazonia. **Journal of Environmental Management**, v. 263, p. 110354, 2020.
- GATTI, Luciana V.; et al. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, v. 595, n. 7867, p. 388-393, 2021.
- GUIMBERTEAU, Matthieu; et al. Impacts of future deforestation and climate change on the hydrology of the Amazon Basin: a multi-model analysis with a new set of land-cover change scenarios. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 3, p. 1455-1475, 2017.
- HAGHTALAB, Nafiseh; et al. Evaluating spatial patterns in precipitation trends across the Amazon basin driven by land cover and global scale forcings. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 140, n. 1, p. 411-427, 2020.
- HARRELL, Frank E.; et al. Regression modeling strategies: with applications to linear models, logistic regression, and survival analysis. **New York: Springer**, 2001.
- JOETZJER, Emilie; et al. The importance of tree demography and root water uptake for modelling the carbon and water cycles of Amazonia. **Biogeosciences Discussions**, v. 2018, p. 1-33, 2018.
- JONES, Charles; CARVALHO, Leila M.V. The influence of the Atlantic multidecadal oscillation on the eastern Andes low-level jet and precipitation in South America. **NPJ Climate and Atmospheric Science**, v. 1, n. 1, p. 40, 2018.
- KRUID, Sanne. et al. Beyond deforestation: carbon emissions from land grabbing and

forest degradation in the Brazilian Amazon. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 4, p. 645282, 2021.

LEITE-FILHO, Argemiro Teixeira; et al. Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 2591, 2021.

MICHOT, Véronique; et al. Validation and reconstruction of rain gauge-based daily time series for the entire Amazon basin. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 138, p. 759-775, 2019.

NOBRE, Carlos A.; et al. Características do clima amazônico: Aspectos principais. **Amaz. Glob. Chang.** p. 149-162, 2009.

NOR, Siti Mariana Che Mat; et al. A comparative study of different imputation methods for daily rainfall data in east-coast Peninsular Malaysia. **Bulletin of Electrical Engineering and Informatics**, v. 9, n. 2, p. 635-643, 2020.

PAIXÃO ALVES, Vanessa; DINIZ, Marcelo Bentes. Redução de emissões de carbono por desmatamento evitado na Amazônia brasileira: uma abordagem baseada no cenário Business-as-Usual (BAU). **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 11, n. 1, p. e19817-e19817, 2022.

PEDREIRA JUNIOR, Altemar Lopes et al. Influence of El Niño and La Niña phenomena on seasonality of the relative frequency of rainfall in southern Amazonas mesoregion. **RBRH**, v. 25, p. e24, 2020.

PEREIRA, Joana Castro; VIOLA, Eduardo. Catastrophic climate risk and Brazilian Amazonian politics and policies: a new research agenda. **Global Environmental Politics**, v. 19, n. 2, p. 93-103, 2019.

PEREZ, Letícia Palazzi; et al. Climate change and disasters: analysis of the Brazilian regional inequality. **Sustainability in Debate**, v. 11, n. 3, p. 260-296, 2020.

PUNHANI, Akash; et al. Binning-based silhouette approach to find the optimal cluster using K-means. **IEEE Access**, v. 10, p. 115025-115032, 2022.

ROCHA, Vinícius Machado. Avaliação dos impactos das mudanças climáticas na reciclagem de precipitação da Amazônia: Um estudo de modelagem numérica. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 19, 2016.

ROCHA, Vinícius Machado; et al. Reciclagem de Precipitação na Bacia Amazônica: O Papel do Transporte de Umidade e da Evapotranspiração da Superfície. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 387-398, 2017.

ROITMAN, Iris; et al. Dinâmica da cobertura da terra e carbono em 55 assentamentos na Amazônia Legal entre 2008 e 2016: implicações para políticas de mudanças climáticas. **Confins. Revue Franco-Brésilienne de Géographie/Revista Franco-Brasileira de Geografia**, n. 46, 2020.

RUIZ-VÁSQUEZ, Melissa; et al. Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America. **Climate Dynamics**, v. 54, p. 4169-4189, 2020.

- SALES, Fernando; et al. Impacts of protected area deforestation on dry-season regional climate in the Brazilian Amazon. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 125, n. 16, p. e2020JD033048, 2020.
- SANTOS, Vanessa Conceição dos; BLANCO, Claudio; OLIVEIRA, José Francisco de. Distribution of rainfall probability in the Tapajos River basin, Amazonia, Brazil. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 3, p. e2284, 2019.
- SANTOS, Vanessa; et al. Hydrologic response to land use change in a large basin in eastern Amazon. **Water**, v. 10, n. 4, p. 429, 2018.
- SILVA JUNIOR, Celso H.L.; et al. Persistent collapse of biomass in Amazonian forest edges following deforestation leads to unaccounted carbon losses. **Science Advances**, v. 6, n. 40, p. eaaz8360, 2020.
- SILVA LINDEMANN, Douglas; et al. Oscilações decadais da temperatura do ar na América do Sul durante o período de verão austral e suas relações com o Oceano Atlântico Norte. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 06, p. 2163-2176, 2019.
- SILVA, José Maria Cardoso; PRASAD, Shivangi. Green and socioeconomic infrastructures in the Brazilian Amazon: implications for a changing climate. **Climate and development**, v. 11, n. 2, p. 153-166, 2019.
- SILVA, Lucas Augusto; et al. Projection of climate change impacts on net primary productivity of the legal Amazon–Brazil. **Caderno de Geografia**, v. 33, n. 72, 2023.
- SILVA, Maria Elisa Siqueira; et al. The combined influences of Amazon deforestation and Pacific Decadal Oscillation on the South America climate variability. **International Journal of Climatology**, v. 43, n. 5, p. 2127-2149, 2023.
- SPRACKLEN, Dominick V.; GARCIA-CARRERAS, Luís. The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall. **Geophysical Research Letters**, v. 42, n. 21, p. 9546-9552, 2015.
- TEDESCHI, Renata G.; CAVALCANTI, Iracema FA; GRIMM, Alice M. Influences of two types of ENSO on South American precipitation. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 6, p. 1382-1400, 2013.
- VERGOPOLAN, Noemi; FISHER, Joshua B. The impact of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia as observed from remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 22, p. 5412-5430, 2016.
- WONGCHUIG, Sly; et al. A regional view of the linkages between hydro-climatic changes and deforestation in the Southern Amazon. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 7, p. 3757-3775, 2022.