

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
INSTITUTO DE EDUCAÇÃO AGRICULTURA E AMBIENTE – IEAA
CAMPUS VALE DO RIO MADEIRA – CVRM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAS – PPGCA

**INFLUÊNCIA DO EL NIÑO E LA NIÑA NA COBERTURA
VEGETAL DO SUL DO AMAZONAS**

FABIELLE DO NASCIMENTO BARBA

**Orientador: DRA. JULIANE KAYSE ALBUQUERQUE DA SILVA
QUERINO**

Humaitá, AM
Junho/ 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
INSTITUTO DE EDUCAÇÃO AGRICULTURA E AMBIENTE – IEAA
CAMPUS VALE DO RIO MADEIRA – CVRM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAS - PPGCA

INFLUÊNCIA DO EL NIÑO E LA NIÑA NA COBERTURA VEGETAL DO SUL DO AMAZONAS

FABIELLE DO NASCIMENTO BARBA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre Ciências Ambientais.

**Orientadora: DRA. JULIANE KAYSE ALBUQUERQUE DA SILVA
QUERINO**

Humaitá, AM
Junho/ 2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

B228i Barba, Fabielle Do Nascimento
Influência do El Niño e La Niña na cobertura vegetal do sul do Amazonas / Fabielle Do Nascimento Barba. - 2025.
64 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): J uliane Kayse Albuquerque da Silva Querino.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Humaitá-AM, 2025.

1. Amazônia . 2. Dinâmica climática. 3. Ecossistemas tropicais. 4. Sensoriamento remoto. I. Querino, J uliane Kayse Albuquerque da Silva. II. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. III. Título

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
INSTITUTO DE EDUCAÇÃO AGRICULTURA E AMBIENTE – IEAA
CAMPUS VALE DO RIO MADEIRA – CVRM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAS - PPGCA

FOLHA DE APROVAÇÃO

INFLUÊNCIA DO EL NIÑO E LA NIÑA NA COBERTURA VEGETAL DO SUL DO AMAZONAS (Linha de pesquisa 1: Componentes e dinâmica dos ecossistemas com ênfase no bioma Amazônico)

FABIELLE DO NASCIMENTO BARBA

Dissertação defendida e aprovada em 04 de julho de 2025, pela comissão julgadora:

Documento assinado digitalmente
 JULIANE KAYSE ALBUQUERQUE DA SILVA QUER
Data: 28/08/2025 11:19:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Juliane Kayse Albuquerque da Silva Querino
PPGCA-IEAA/UFAM - Orientador / Membro Titular Interno

Documento assinado digitalmente
 RENATO ABREU LIMA
Data: 27/08/2025 22:06:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Renato Abreu Lima PPGCA-IEAA/UFAM
Examinador Interno

Documento assinado digitalmente
 EDIVANIA DE ARAUJO LIMA
Data: 26/08/2025 13:21:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Edivania de Araujo Lima UFPI
Examinadora Externa

DEDICATORIA

Dedico este trabalho a mim mesma. Aos meus pais, meus irmãos e aos verdadeiros amigos que estiveram ao meu lado e compartilham comigo essa vitória. Dedico também especialmente à minha avó, fonte de inspiração, e à minha sobrinha Louise, que ilumina meu caminho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me fortalecer diariamente e me sustentar nos momentos mais difíceis desta jornada. No segundo ano do mestrado, enfrentei desafios pessoais que quase me fizeram desistir, mas foi pela fé que encontrei forças para continuar e concluir esta etapa.

Sou imensamente grata à minha família. Aos meus pais, Fabiana e Elizan, e aos meus irmãos, Sabrina e Darllan, pelo apoio incondicional e amor constante. À minha avó, por sempre acreditar no meu potencial e me ensinar que nada é impossível. Às minhas primas, que sempre estiveram ao meu lado, incentivando e inspirando. E à minha sobrinha Louise, que chegou durante o mestrado e se tornou mais um motivo para eu seguir em frente.

Aos amigos que fizeram essa caminhada mais leve: minha amiga Kamilla Lira, que me acompanha desde o ensino médio, foi minha parceira em todas as fases do mestrado e da vida pessoal. Sua amizade e apoio foram fundamentais. Ao Hildeberto, presente desde a graduação, e à Ana Cristina, com quem compartilho aprendizados desde os jogos universitários. Vocês foram grandes incentivadores.

À Karoline Rabelo, minha amiga desde a graduação, agradeço por ser uma das minhas maiores incentivadoras. Seu apoio constante e sua presença me deram coragem para seguir, mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço à minha orientadora, Dra. Juliane Kayse Albuquerque da Silva Querino, pela orientação dedicada, paciência e confiança. Seu acompanhamento foi essencial para a realização deste trabalho. Estendo também minha gratidão ao Grupo de Pesquisa em Interação Biosfera-Atmosfera (GPIBA), pelo apoio e pelos aprendizados ao longo da jornada acadêmica.

Sou grata à FAPEAM, pelo incentivo à pesquisa e apoio financeiro, que tornaram este trabalho possível.

Por fim, agradeço a mim mesma. Pela resiliência, pela coragem de continuar e pela determinação em não desistir. Esta conquista é fruto de muitos esforços, e me orgulho por ter chegado até aqui.

Amo profundamente cada um de vocês. Esta vitória também é de vocês.

Muito obrigada!

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	3
2.	JUSTIFICATIVA	4
3.	HIPÓTESES.....	5
4.	OBJETIVO GERAL.....	5
4.1	Objetivos Específicos	6
5.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
5.1	Circulação Geral Da Atmosfera	6
5.2	Clima Da Região Amazônica.....	9
5.3	El Niño E La Niña	10
5.4	Variáveis Climatológicas.....	12
5.5	Cobertura Vegetal.....	13
5.6	Relação Ndvi E Cobertura Vegetal	14
6.	METODOLOGIA	17
6.1	Área de Estudo.....	17
6.2	Coleta de Dados.....	18
6.3.	Processamento de Dados.....	20
6.4	Análise da cobertura vegetal	20
6.5.	Teste de correlação.....	21
7.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
7.1.	PRECIPITAÇÃO.....	21
7.2.	TEMPERATURA DO AR	26
7.3.	UMIDADE RELATIVA DO AR	31
7.4.	NDVI.....	36
7.5.	IMPLICAÇÕES PARA POLÍTICAS PÚBLICAS, MANEJO E ODS.....	42
8.	CONCLUSÃO	43
9.	REFERENCIAS.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema da circulação geral da atmosfera: Célula de Hadley, Célula de Ferrel e Célula Polar.....	8
Figura 2: Localização da mesorregião sul do Amazonas	18
Figura 3: Normal climatológica da precipitação e totais mensais da precipitação para as cidades de Humaitá (A), Apuí (B), Manicoré (C), Lábrea (D) e Boca do Acre (E), localizadas na mesorregião sul do Amazonas, durante o El Niño forte (2015-2016) e fraco (2004-2005).	23
Figura 4: Normal climatológica da precipitação e totais mensais da precipitação para as cidades de Humaitá (A), Apuí (B), Manicoré (C), Lábrea (D) e Boca do Acre (E), localizadas na mesorregião sul do Amazonas, durante o La Niña forte (2010-2011) e fraco (2017-2018).	24
Figura 5: Normal climatológica da temperatura e totais mensais de temperatura para as cidades de Humaitá (A), Apuí (B), Manicoré (C), Lábrea (D) e Boca do Acre (E), localizadas na mesorregião sul do Amazonas, durante o El Niño forte (2015-2016) e fraco (2004-2005).	28
Figura 6: Normal climatológica da temperatura e totais mensais de temperatura para as cidades de Humaitá (A), Apuí (B), Manicoré (C), Lábrea (D) e Boca do Acre (E), localizadas na mesorregião sul do Amazonas, durante o La Niña forte (2010-2011) e fraco (2017-2018).	30
Figura 7: Normal climatológica da umidade relativa do ar e totais mensais de umidade relativa do ar para as cidades de Humaitá (A), Apuí (B), Manicoré (C), Lábrea (D) e Boca do Acre (E), localizadas na mesorregião sul do Amazonas, durante o El Niño forte (2015-2016) e fraco (2004-2005)	33
Figura 8: Normal climatológica da umidade relativa do ar e totais mensais de umidade relativa do ar para as cidades de Humaitá (A), Apuí (B), Manicoré (C), Lábrea (D) e Boca do Acre (E), localizadas na mesorregião sul do Amazonas, durante o El Niño forte (2010-2011) e fraco (2017-2018)	34
Figura 9: Série temporal NDVI e totais mensais de NDVI para as cidades de Humaitá (A), Apuí (B), Manicoré (C), Lábrea (D) e Boca do Acre (E), localizadas na mesorregião sul do Amazonas, durante o El Niño forte (2015-2016) e fraco (2004-2005)	37
Figura 10: Série temporal NDVI e totais mensais de NDVI temperatura para as cidades de Humaitá (A), Apuí (B), Manicoré (C), Lábrea (D) e Boca do Acre (E), localizadas na mesorregião sul do Amazonas, durante o La Niña forte (2010-2011) e fraco (2017-2018) ..	38
Figura 11 : Correlação de Spearman entre NDVI, precipitação, umidade relativa e temperatura do ar nas cidades de Humaitá, Apuí, Manicoré, Lábrea e Boca do Acre, situadas na mesorregião sul do Amazonas, durante os eventos de El Niño forte (2015–2016) e fraco (2004–2005).....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de fenômeno, Intensidade do fenômeno, Anomalia de Temperatura do oceano (°C) e anos dos eventos utilizados nestes estudos.....	19
Tabela 2: Anomalias de precipitação sazonal durante El Niño Forte, Fraco e La Niña Forte e Fraco em 5 municípios da mesorregião sul do Amazonas.	25
Tabela 3: Anomalias de temperatura (°C) sazonal durante El Niño Forte, Fraco e La Niña Forte e Fraco em 5 municípios da mesorregião sul do Amazonas.	30
Tabela 4: Anomalias de umidade (%) sazonal durante El Niño Forte, Fraco e La Niña Forte e Fraco em 5 municípios da mesorregião sul do Amazonas.	35

LISTA DE ABREVIATURAS

CGA - Circulação Geral da Atmosfera

CPC -Climate Prediction Center

ECMWF- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

ENOS - El Niño Oscilação Sul

EVI- Enhanced Vegetation Index (Índice de Vegetação Melhorado)

ENF- El Niño Forte

ENfr- El Niño Fraco

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LNF- La Niña Forte

LNfr- La Niña Fraco

NCEP- National Centers for Environmental Prediction

NDVI- Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)

NCEP - National Centers for Environmental Prediction

NOAA - National Oceanic & Atmospheric Administration

ODS- Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OMM- Organização Meteorológica Mundial

TSM - Temperatura da Superfície do Mar

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

Resumo

BARBA, F. N. **INFLUÊNCIA DO EL NIÑO E LA NIÑA NA COBERTURA VEGETAL DO SUL DO AMAZONAS**. Humaitá, 2025, 63p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente, Universidade Federal do Amazonas – UFAM.

A região sul do Amazonas, ecologicamente vital, sofre impactos da variabilidade climática induzida pelo El Niño-Oscilação Sul (ENOS). Compreender a resposta da cobertura vegetal a esses eventos é crucial para a conservação e manejo. Este estudo analisou a influência de eventos El Niño (2015-16, 2004-05) e La Niña (2010-11, 2017-18) fortes e fracos sobre a precipitação, temperatura, umidade e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) em cinco municípios da mesorregião sul do Amazonas, utilizando dados de sensoriamento remoto, oriundo do satélite Landsat e para os dados climáticos foram coletadas do CPC, NOAA e ECMWF--ERA5. Os resultados mostraram que o El Niño consistentemente reduziu a precipitação (déficits de até -50,92 mm no período chuvoso), elevou a temperatura (anomalias sazonais de até +1,55°C) e causou anomalias negativas no NDVI (redução da atividade vegetal, com picos de até -0.05), indicando estresse hidrotermal. Em contraste, a La Niña, apesar de aumentar a precipitação (anomalias de até +31,19 mm) e reduzir a temperatura (anomalias de até -2,35°C), induziu respostas heterogêneas no NDVI: alguns locais apresentaram aumento (anomalias de até +0.05), enquanto outros como Boca do Acre mostraram redução (anomalias de até -0.04), sugerindo limitação por fatores secundários como excesso de água ou falta de radiação. Conclui-se que a resposta da vegetação no sul da Amazônia ao ENOS é espacialmente variável e complexa, não linearmente dependente da intensidade do evento, com implicações significativas para a vulnerabilidade regional. O monitoramento contínuo e estratégias de manejo adaptativo são essenciais, alinhados aos ODS 13 e 15.

Palavras-chave: Amazônia; Dinâmica climática; Ecossistemas tropicais; Sensoriamento remoto.

Abstract

BARBA, F. N. **Influence of El Niño and La Niña on the Vegetation Cover in Southern Amazonas**. Humaitá, 2025, 63p. Master's Thesis (Environmental Sciences) – Institute of Education, Agriculture, and Environment, Federal University of Amazonas – UFAM.

The ecologically vital southern region of the Amazon is impacted by climate variability induced by the El Niño-Southern Oscillation (ENSO). Understanding vegetation responses to these events is crucial for conservation and management strategies. This study examined the effects of strong and weak El Niño (2015–16, 2004–05) and La Niña (2010–11, 2017–18) events on precipitation, temperature, humidity, and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) across five municipalities in the southern mesoregion of Amazonas, Brazil. Remote sensing data from the Landsat satellite were utilized, along with climatic data collected from CPC, NOAA, and ECMWF–ERA5. Results demonstrated that El Niño consistently reduced precipitation (deficits reaching -50.92 mm in the rainy season), increased temperatures (seasonal anomalies up to +1.55°C), and generated negative NDVI anomalies (vegetation activity reductions peaking at -0.05), indicating hydrothermal stress. In contrast, La Niña events, although enhancing precipitation (anomalies up to +31.19 mm) and decreasing temperatures (anomalies up to -2.35°C), led to heterogeneous NDVI responses. Some locations showed increased vegetation vigor (anomalies up to +0.05), whereas others, like Boca do Acre, experienced reductions (anomalies down to -0.04), suggesting limitations imposed by secondary factors such as waterlogging or insufficient solar radiation. The study concludes that vegetation response to ENSO in southern Amazonas is spatially variable, complex, and non-linearly dependent on event intensity, with significant implications for regional vulnerability. Continuous monitoring and adaptive management strategies are essential, aligning with Sustainable Development Goals (SDGs) 13 and 15.

Keywords: Climate dynamics; Water stress; Tropical ecosystems; Remote sensing; ENOS; Southern Amazon.

1. INTRODUÇÃO

A região amazônica é amplamente reconhecida por sua extraordinária biodiversidade e por seu papel essencial na regulação dos ciclos hidrológicos e climáticos em escala global. Dentro desse vasto bioma, destaca-se a mesorregião sul do estado do Amazonas, uma área extensa que abriga ecossistemas diversos, incluindo a floresta amazônica densa e zonas de transição para o Cerrado (Pavão et al., 2017).

Apesar de sua relevância ecológica e socioeconômica, essa região não está imune aos efeitos dos fenômenos climáticos extremos, como o El Niño e a La Niña, os quais têm potencial para provocar alterações significativas nos padrões meteorológicos locais. Tais eventos podem comprometer a disponibilidade hídrica, afetar a biodiversidade e desequilibrar a dinâmica dos ecossistemas (Aghakouchak et al., 2020; Espinoza et al., 2018).

O El Niño e a La Niña são fenômenos associados às anomalias térmicas das águas do oceano Pacífico Equatorial, que, por meio da interação entre o oceano e a atmosfera, exercem influência direta nos regimes climáticos em diferentes partes do planeta. O El Niño caracteriza-se por um aquecimento anômalo das águas do Pacífico, resultando em alterações nas correntes atmosféricas que, na região amazônica, tendem a causar aumento das temperaturas, redução da umidade relativa do ar e diminuição da precipitação. Em contrapartida, a La Niña provoca o resfriamento dessas águas, favorecendo padrões opostos: temperaturas mais amenas e elevação dos índices pluviométricos (NOAA, 2024; Marengo et al., 2018).

Essas variações climáticas têm implicações diretas sobre a cobertura vegetal, que compreende a distribuição e a presença de plantas, árvores, arbustos e outras formas de vegetação em uma determinada área geográfica. A cobertura vegetal atua como elemento chave na regulação do clima, conservação da biodiversidade, proteção do solo contra a erosão, manutenção da qualidade da água e estabilidade dos ecossistemas (Famiglietti et al., 2024; Liu et al., 2025).

Durante episódios de El Niño, os efeitos mais intensos de seca e calor extremo podem intensificar o risco de incêndios florestais, degradação da vegetação e perda de habitat natural. Já durante eventos de La Niña, as chuvas excessivas tendem a

favorecer inundações e modificações na estrutura e composição das comunidades vegetais (Espinoza et al., 2015; Zhou et al., 2023).

Nesse contexto, devido a influência dos fenômenos El Niño e La Niña nas variáveis climáticas o objetivo deste trabalho visa analisar a influência de ambos os fenômenos na umidade relativa do ar, temperatura do ar, precipitação, bem como associá-las a possíveis alterações na cobertura vegetal na Mesorregião sul do Amazonas.

2. JUSTIFICATIVA

A região amazônica, reconhecida por sua incomparável biodiversidade e por seu papel crucial na regulação dos ciclos hidrológicos e climáticos globais, abriga, em sua porção sul do estado do Amazonas, uma diversidade de ecossistemas que inclui desde florestas tropicais densas até zonas de transição para o Cerrado (Pavão et al., 2017). No entanto, sua integridade ecológica e socioeconômica tem sido progressivamente ameaçada pela combinação entre atividades antrópicas e a intensificação de eventos climáticos extremos, como El Niño e La Niña — fenômenos que alteram a dinâmica atmosférica global e impactam diretamente a cobertura vegetal (Espinoza et al., 2018; IPCC, 2023).

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), em cenários de altas emissões (RCP8.5), os eventos associados ao El Niño podem se tornar até 40% mais frequentes até o final do século, ampliando os riscos de impactos ecológicos severos. Estudos recentes, como o de Li et al. (2020), mostram que o El Niño tem contribuído para o aumento da frequência e intensidade de incêndios florestais na América do Sul, gerando degradação da cobertura vegetal e emissões significativas de gases de efeito estufa. Por outro lado, episódios de La Niña, ao intensificarem os volumes de precipitação, têm sido associados a inundações e deslizamentos de terra que afetam negativamente a integridade do solo e da vegetação (Hoyos et al., 2013; Famiglietti et al., 2024).

Esses fenômenos alteram a composição dos ecossistemas, subtraem a camada superficial do solo — vital para a ciclagem de nutrientes —, afetam o ciclo de carbono e comprometem a resiliência ecológica frente a distúrbios futuros (Zhou et al., 2023; Liu et al., 2025). A vegetação amazônica, sendo altamente sensível às variações hidrotérmicas, responde com alterações fisiológicas, fenológicas e estruturais, o que

reforça a necessidade de investigações mais robustas e localizadas sobre essas interações.

Além de sua relevância científica e ambiental, o aprofundamento nesse tema possui forte aderência aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU). Destaca-se, neste contexto, a ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), que prevê o aumento da resiliência dos sistemas de produção de alimentos frente a mudanças climáticas e eventos extremos. A manutenção da cobertura vegetal é peça-chave para a conservação do solo e dos recursos hídricos, ambos essenciais à segurança alimentar em comunidades amazônicas. Soma-se a isso a ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), a ODS 15 (Vida Terrestre) e a ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), que enfatizam a necessidade de mitigar os impactos ambientais e garantir o uso sustentável dos ecossistemas terrestres.

Dessa forma, compreender como os fenômenos El Niño e La Niña influenciam as variáveis meteorológicas e, conseqüentemente, a vegetação na mesorregião sul do Amazonas é essencial para subsidiar políticas de adaptação, restauração ecológica e planejamento sustentável. Investir em pesquisas nessa área não apenas permite antever os efeitos das mudanças ambientais, mas também fortalece a capacidade de resposta das comunidades e dos ecossistemas diante dos desafios climáticos contemporâneos e futuros (Nobre et al., 2017; Carilla et al., 2023).

3. HIPÓTESES

As hipóteses formuladas para este estudo sugerem relações entre os fenômenos climáticos El Niño e La Niña e a cobertura vegetal. A primeira hipótese postula que durante os períodos de El Niño, caracterizados por condições climáticas mais secas e mudanças nos padrões de chuva, haverá uma redução na cobertura vegetal. Por outro lado, a segunda hipótese propõe que durante os períodos de La Niña, marcados por condições climáticas mais úmidas e regularidade das chuvas, ocorrerá um aumento na cobertura vegetal.

4. OBJETIVO GERAL

Analisar os possíveis impactos dos fenômenos La Niña e El Niño na cobertura vegetal do sul do Amazonas

4.1 Objetivos Específicos:

- Verificar modificações nas variáveis meteorológicas no sul do Amazonas;
- Analisar alterações na cobertura vegetal na região sul do Amazonas durante os eventos;
- Investigar a relação entre as mudanças na cobertura vegetal e as variáveis meteorológicas (temperatura do ar, umidade relativa do ar e precipitação) durante os eventos de El Niño, La Niña na região estudada.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 Circulação Geral Da Atmosfera

A Circulação Geral da Atmosfera (CGA) é um mecanismo crucial que determina o clima de uma região, influenciando significativamente as variações sazonais e mensais das variáveis meteorológicas (Barro e Chorley, 2010). A CGA resulta da trajetória média do ar, a qual é moldada pelo desequilíbrio de radiação, umidade e massa entre as baixas e altas latitudes (Peixoto e Oort, 1992). Este desequilíbrio gera movimentos atmosféricos complexos que redistribuem calor e umidade ao redor do planeta.

Dessa forma, a energia que impulsiona esses processos atmosféricos provém principalmente dos raios solares, os quais aquecem a superfície terrestre de maneira desigual devido à inclinação do eixo terrestre e à distribuição geográfica (Holton e Hakim, 2013). Assim, a interação entre a radiação solar e os componentes atmosféricos estabelece padrões climáticos distintos em diferentes regiões. As células de circulação como Hadley, Ferrel e Polar exemplificam como esse fluxo contínuo influencia desde climas tropicais até climas polares.

De acordo com Wallace e Hobbs (2006), a Circulação Geral da Atmosfera (CGA) desempenha um papel crucial na distribuição de calor ao redor do globo, caracterizando-se por um cinturão consistente de ventos de leste nas regiões tropicais e ventos predominantes de oeste nas zonas temperadas. Estes padrões de vento são fundamentais para o transporte de calor das áreas

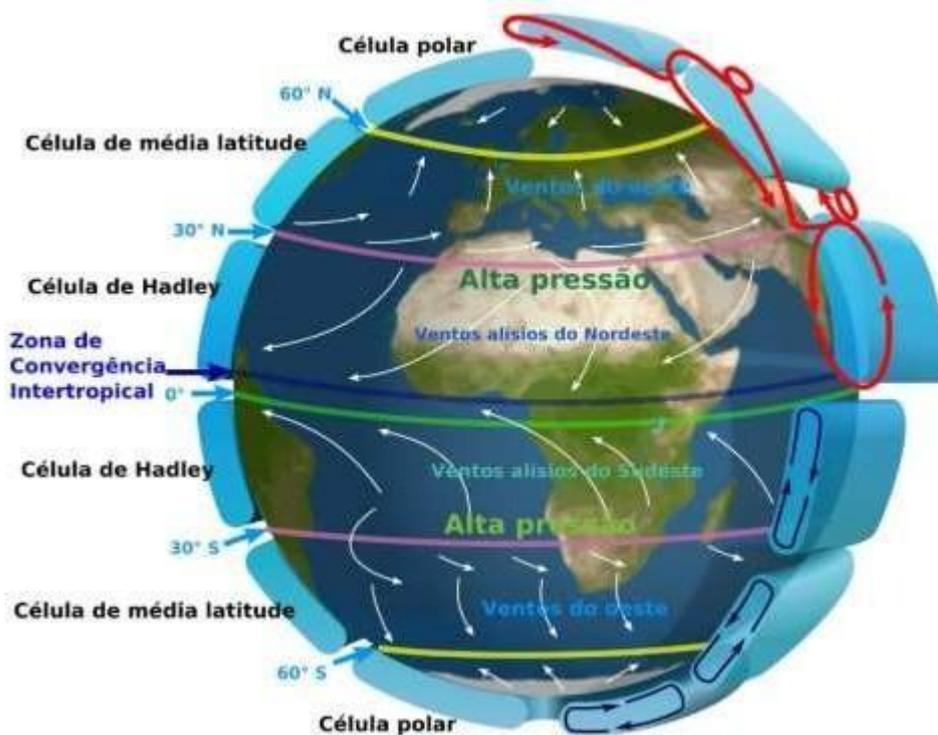
Conforme descrito por Emanuel (1994), as áreas de alta pressão geralmente apresentam condições meteorológicas estáveis, com ventos moderados e poucas nuvens. Em contraste, as áreas de baixa pressão são mais propensas à formação de

nuvens e chuvas, além da ocorrência de ventos fortes. Esses padrões são observados através dos mecanismos dinâmicos que regulam a Circulação Geral da Atmosfera (CGA), onde os ventos alísios convergem na zona intertropical, provocando a ascensão do ar quente e úmido e resultando em tempestades convectivas frequentes nos trópicos.

À medida que esse ar ascendente esfria, ele se desloca para latitudes superiores e desce nas zonas subtropicais como ar seco, formando regiões semiáridas com clima mais estável, devido ao predomínio de altas pressões. Essa movimentação vertical e horizontal do ar desempenha papel fundamental na redistribuição de energia pelo planeta, conectando os trópicos às regiões de médias e altas latitudes. Dessa forma, a CGA não apenas explica os padrões climáticos globais, como também evidencia a complexa interação entre os sistemas atmosféricos que influenciam a variabilidade climática regional.

A dinâmica da circulação atmosférica nas regiões equatoriais e tropicais é especialmente influenciada pelas células de Hadley, sistema descrito por Hartmann (2015), que se estabelece em resposta ao aquecimento diferencial da superfície terrestre. O ar quente que sobe no Equador, ao perder umidade por condensação e precipitação, resfria-se e se desloca horizontalmente em direção aos polos. Ao atingir as latitudes entre 20° e 35° Norte e Sul, esse ar desce, aquece-se adiabaticamente e retorna à superfície, fechando o ciclo. Esse processo dá origem às células de Hadley, essenciais para compreender fenômenos como os ventos alísios e os regimes climáticos predominantes nas zonas tropicais (HARTMANN, 2015).as de baixa pressão equatorial para as regiões de alta pressão extratropicais.

Figura 1:Esquema da circulação geral da atmosfera: Célula de Hadley, Célula de Ferrel e Célula Polar.



Fonte: O tempo (2019)

No Brasil, os efeitos da Circulação Geral da Atmosfera (CGA) são evidentes tanto no verão quanto no inverno, influenciando de forma significativa os padrões climáticos ao longo do ano. Durante o verão, a presença de anticiclones nos oceanos Pacífico e Atlântico, assim como no continente sul-americano, resulta em áreas de baixa pressão devido ao forte aquecimento característico dessa estação (Marengo e Epinoza, 2016). Esse cenário cria um ambiente instável no continente, favorecendo altas taxas de precipitação e configurando a estação chuvosa na maior parte do país (Cavalcante, 2012).

Em contraste, no inverno ocorre uma intensificação do anticiclone do Atlântico Sul, promovendo uma condição climática mais estável que inibe a formação de nuvens e marca a estação seca em grande parte do território brasileiro (Silva e Kousky, 2012). Dessa forma, a CGA exerce uma influência crucial sobre o clima brasileiro durante todo o ano, gerando diferentes padrões meteorológicos conforme as estações mudam (Nobre, Marengo e Tomassela, 2016).

5.2 Clima Da Região Amazônica

Localizada entre 5° N e 10° S, a Amazônia recebe uma quantidade expressiva de energia solar ao longo do ano, com variações sazonais notáveis que influenciam diretamente o clima da região. Os meses de dezembro e janeiro registram os valores máximos de radiação solar, enquanto em Junho e Julho ocorrem os valores mínimos, com médias diárias em torno de $15 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ após considerar a redução pela transmissão atmosférica (INPE,2020).

Além disso, as temperaturas médias na região da Amazônia oscilam tipicamente entre 24 e 31 graus Celsius ao longo do ano, características típicas de um clima equatorial. Esse clima quente, úmido e com pouca variação sazonal é essencial para propiciar condições ideais para a diversidade de espécies vegetais e animais que habitam a região. A combinação desses fatores climáticos específicos atua como um verdadeiro motor para a extraordinária biodiversidade e o funcionamento dos diferentes ecossistemas encontrados na Amazônia (Moreira et al., 2018).

Ao se voltar para umidade, que é elemento essencial e intrínseco ao clima amazônico, compreende-se que essa é mantida por meio da constante evapotranspiração, um processo vital que desempenha um papel fundamental na regulação do ciclo hidrológico da região. Esse processo não só contribui de forma significativa para a formação de chuvas na Amazônia, mas também exerce influência além de suas fronteiras, impactando os padrões climáticos em áreas circunvizinhas. A interação contínua entre a floresta e a atmosfera representa um dos pilares essenciais na regulação do clima global, destacando a importância crítica da Amazônia para o equilíbrio ecológico não apenas regional, mas também a nível planetário (INPE,2020).

Em relação a precipitação na Amazônia, percebe-se que a mesma não segue um padrão uniforme e apresenta variações significativas de uma área para outra. Enquanto algumas regiões são agraciadas com chuvas quase diárias, outras enfrentam períodos mais secos, evidenciando a riqueza e complexidade da diversidade climática presente dentro da própria região amazônica. Essas disparidades climáticas são particularmente evidentes ao comparar o Norte, que possui uma estação seca menos marcante, com o sul da Amazônia, onde a estação seca é mais prolongada e intensa (Chen et al., 2013).

Essas variações climáticas têm impactos diretos sobre a biodiversidade local, afetando a densidade da cobertura florestal e a vida das comunidades que dependem diretamente desses ecossistemas para sua subsistência. O equilíbrio frágil entre as variações sazonais da precipitação, a densidade da vegetação e a interação complexa dos seres vivos com o meio ambiente ressalta a necessidade premente de conservação e manejo sustentável dos recursos naturais da Amazônia para garantir sua preservação a longo prazo (Morais et al., 2021).

O período de intensas chuvas ou forte atividade convectiva na região amazônica abrange os meses de novembro a março, enquanto o período de estiagem, caracterizado pela reduzida atividade convectiva, ocorre entre maio e setembro. Os meses de abril e outubro funcionam como períodos de transição entre esses regimes climáticos distintos. Durante o trimestre compreendido por dezembro, janeiro e fevereiro (DJF), observa-se uma região na parte oeste da Amazônia com altos índices de precipitação, que frequentemente ultrapassam os 900 mm (Moreira et al., 2018)

5.3 El Niño E La Niña

No contexto global, o El Niño e o La Niña são dois eventos oceanos atmosféricos que desempenham um papel significativo nos padrões climáticos. O El Niño é caracterizado pelo aquecimento anormal das águas do Oceano Pacífico Equatorial, enquanto o La Niña é marcado pelo resfriamento dessas mesmas águas. Essas oscilações têm impacto não apenas em regiões específicas, mas têm ramificações em todo o mundo, incluindo o Brasil (NOAA,2023).

Para entender El Niño e La Niña, é importante considerar as interações oceano-atmosfera no Pacífico tropical. Normalmente, os ventos alísios sopram de leste a oeste, empurrando as águas quentes da superfície em direção ao Pacífico ocidental. Como resultado, as águas frias e ricas em nutrientes do oceano mais profundo sobem para a superfície ao longo da costa da América do Sul, criando um processo chamado ressurgência. (Oliveira et al., 2020)

Durante o El Niño, há um enfraquecimento ou reversão dos ventos alísios, levando a uma redução da ressurgência ao longo da costa sul-americana. Isso permite que as águas superficiais quentes se movam para o leste, resultando no aquecimento do Oceano Pacífico tropical central e oriental. O aquecimento dos oceanos altera os

padrões de circulação atmosférica, levando a mudanças nos padrões de precipitação e nas condições climáticas em todo o mundo (Pereira et al., 2017).

Por outro lado, o La Niña é caracterizado por ventos alísios mais fortes do que o normal, que aumentam a ressurgência ao longo da costa sul-americana. As temperaturas mais baixas do que a média da superfície do mar no Pacífico central e oriental durante o La Niña podem ter impactos diferentes nos padrões climáticos globais em comparação com o El Niño. Isso inclui o aumento das chuvas em algumas regiões, como o Pacífico ocidental e partes da América do Sul, e a diminuição das chuvas em outras, como o Pacífico equatorial central e oriental (Kayano et al, 2016).

Conforme Marengo e Oliveira (1998) explicam, o fenômeno geralmente começa a se desenvolver no meio do ano, atinge sua máxima intensidade no final desse ano e dissipa-se no meio do ano seguinte. Em relação às características de tempo e clima, avaliando os eventos de La Niña ocorridos no passado, observa-se que esse fenômeno apresenta maior variabilidade do que os eventos de El Niño, que têm um padrão mais consistente.

No âmbito brasileiro, os efeitos do El Niño e La Niña são variados e podem ser sentidos em várias esferas da sociais. As mudanças climáticas provocadas por essas características podem interferir significativamente na agricultura, influenciando a produtividade de investimentos essenciais para a segurança alimentar do país. Além disso, os impactos econômicos podem ser observados, afetando setores como comércio, turismo e energia.

A saúde pública também pode ser afetada, uma vez que esses eventos climáticos extremos podem desencadear surtos de doenças. Além disso, a disponibilidade de água e a gestão de recursos hídricos são grandemente influenciadas por essas oscilações climáticas (Sette e Ribeiro, 2011). Através da alteração do padrão de circulação atmosférica, algumas regiões do país produzem secas extremas, e em outras, eleva as temperaturas, ao passo em que chuvas torrenciais acometem determinadas regiões. Desse modo, tais aspectos permitem inferir a respeito das problemáticas socioambientais e econômicos resultantes destes fenômenos (Santos et al., 2011).

Considerados fenômenos climáticos que afetam a dinâmica climática amazônica, os Enos ocasionam mudanças significativas no regime de chuvas máximas diárias, o que pode ocasionar o aumento ou a diminuição do volume de

precipitação em períodos de El Niño e La Niña, respectivamente. Tais eventos não se repetem iguais, já que, os impactos nas condições climáticas dependem das intensidades desses fenômenos e em outras configurações atmosféricas que podem ser, por exemplo, a umidade relativa do ar, a nebulosidade, as quais influem sobre os sistemas meteorológicos que definem as condições de tempo localmente.

Já, especificamente durante os eventos de El Niño, também é possível observar um aumento significativo na temperatura do ar na região amazônica, o que afeta a dinâmica dos ecossistemas e a disponibilidade de recursos hídricos (Moreira et al., 2018). Além disso, eventos de El Niño estão associados a uma redução na precipitação, o que pode resultar em secas prolongadas e impactar negativamente a agricultura e o abastecimento de água (Marengo et al., 2015). Em períodos de La Niña, a região tende a experimentar um aumento na quantidade de chuva (Macedo et al., 2015) Isso ocorre devido a uma maior disponibilidade de umidade vinda do Oceano Atlântico, como apontado por Marengo et al. (2015).

Com base em estudos acerca da variabilidade climática na bacia amazônica, durante eventos ENOS, diversos autores demonstraram que a precipitação tende a ser menor que o normal, durante um El Niño moderado, o que se dá de forma contrária em um evento de La Niña moderado, que tem a tendência a ser maior que a normal. (Santos et al., 2012).

Em outros estudos da região amazônica elencaram dados significativos em diversos estados, como o Amapá, onde (Souza et al., 2020; Souza e Cunha 2010), determinaram que o primeiro El Niño documentado ocorreu no final de 1982 até o início de 1983, e durante esse período, foi registrado uma redução de chuvas, por volta de, 400 mm (20%) em relação à média que é de 2300mm/ano, e dessa forma, teve impactos negativos mais fortes, como secas severas, reduções hídricas e incêndios florestais.

5.4 Variáveis Climatológicas

A compreensão das variáveis climáticas é importante para entender as mudanças climáticas globais. Segundo Kumar et al., (2018), a análise das variáveis climáticas, incluindo a temperatura do ar, a precipitação e a umidade relativa do ar, ajuda a prever as tendências climáticas futuras. Essas variáveis estão interconectadas

e suas mudanças podem afetar a saúde humana, a biodiversidade, a agricultura e a disponibilidade de recursos hídricos (Roopa et al., 2015).

A temperatura do ar é um dos principais parâmetros meteorológicos analisados e influencia diretamente a sensação de conforto térmico humano, sendo que sua variação pode afetar a saúde humana em condições extremas de frio ou calor (Gagnon et al., 2018). A umidade relativa do ar é descrita pela quantidade de vapor d'água contido na atmosfera, sendo inversamente proporcional à temperatura, o que a torna uma variável de grande importância para a compreensão do clima local e global (Jacobi et al., 2018).

A precipitação é a água proveniente do vapor de água da atmosfera depositada na superfície terrestre sob qualquer forma, sendo influenciada por fatores como temperatura, umidade e circulação atmosférica (Santos et al., 2018). A análise da precipitação é essencial para o planejamento de atividades econômicas que dependem da disponibilidade de água, bem como para a compreensão do clima em determinada região (Marengo et al., 2018).

5.5 Cobertura Vegetal

A cobertura vegetal é um elemento vital dos ecossistemas terrestres, desempenhando papéis multifacetados e de relevância ambiental específica. Além da função estética, a cobertura vegetal exerce influência direta sobre processos ecofisiológicos, hidrológicos e climáticos cruciais para a estabilidade ecológica global (Smith et al., 2018).

A vegetação desempenha um papel preponderante na prevenção da erosão do solo, atuando como uma barreira física contra a ação dos agentes erosivos e estabilizando o solo por meio das raízes. Isso contribui para mitigar os riscos de penetração de terra e inundações (JOHNSON, 2019). Além disso, a cobertura vegetal regula o clima terrestre, pois as plantas realizam fotossíntese, absorvendo dióxido de carbono da atmosfera e liberando oxigênio, o que contribui para a redução do efeito estufa. A transpiração das plantas influencia os padrões de proteção, promovendo a formação de nuvens e a ocorrência de chuvas, mantendo assim o ciclo hidrológico em equilíbrio (Brow e Green, 2017)

A biodiversidade associada à cobertura vegetal é de grande relevância,

abrigando uma ampla variedade de espécies vegetais, animais e microbianas. Essa diversidade biológica é crucial para a resiliência dos ecossistemas diante das mudanças ambientais e para a manutenção da funcionalidade dos serviços ecossistêmicos. Além disso, a cobertura vegetal desempenha um papel econômico e social fornecendo recursos essenciais para a subsistência humana, como alimentos, medicamentos, combustíveis e materiais de construção.

Nesse contexto, as características climáticas El Niño e La Niña exercem uma influência marcante na cobertura vegetal. Essas especificações alteram os padrões climáticos globais, afetando a distribuição e a disponibilidade de chuvas em diferentes regiões. No sul do Amazonas, a variabilidade climática desencadeada pelo El Niño e La Niña pode resultar em secas intensas, enchentes ou variações na quantidade e sazonalidade das chuvas (Araújo, 2012). Essas alterações afetam diretamente a dinâmica da cobertura vegetal, podendo resultar em mudanças na composição de espécies, na produção de biomassa e nos processos ecofisiológicos.

Portanto, compreender a influência dos fenômenos El Niño e La Niña na cobertura vegetal no sul do Amazonas é essencial para elucidar os efeitos desses eventos climáticos na estabilidade ecológica, na biodiversidade e na provisão de serviços ecossistêmicos dessa região. A investigação dessas interações contribui para uma melhor compreensão dos impactos das mudanças climáticas e auxilia no desenvolvimento de estratégias de adaptação e manejo sustentável dos recursos naturais.

5.6 Relação Ndvi E Cobertura Vegetal

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) tem emergido como uma ferramenta indispensável na ciência ambiental, particularmente na extensa e ecologicamente crítica região amazônica. Essa medida espectral, derivada da tecnologia de sensoriamento remoto, quantifica a densidade e a saúde da vegetação capturando a diferença entre o infravermelho próximo, que a vegetação saudável reflete fortemente e a luz vermelha que a vegetação absorve.

Com base na compreensão fundamental do papel do NDVI na captura da dinâmica vegetativa, é crucial aprofundar estudos específicos que fundamentem sua eficácia. Um estudo relevante realizado por Jiang et al. (2006) explorou minuciosamente as complexas relações entre as leituras do NDVI e a cobertura

vegetal fracionada em diferentes escalas espaciais. Os resultados obtidos destacaram a capacidade do NDVI em distinguir diferenças sutis na cobertura vegetativa, o que é de suma importância para um monitoramento ambiental e gerenciamento precisos. A habilidade do NDVI em analisar dependências espaciais não apenas reforça sua confiabilidade, mas também amplia sua aplicabilidade em uma variedade de ambientes ecológicos, desde florestas densas até campos dispersos.

Além disso, pesquisas como a de Kobayashi e Dye (2005) evidenciam a utilidade do NDVI na compreensão das relações entre a saúde da vegetação e condições atmosféricas na Amazônia. Eles revelaram uma forte correlação entre variações temporais no NDVI e cargas de aerossóis de queima de biomassa, destacando como atividades humanas, como o desmatamento, impactam a vegetação regional (Kobayashi e Dye, 2005).

Estudos mais recentes avançaram na aplicação do NDVI, concentrando-se em funções vegetativas específicas e em como respondem às mudanças ambientais. Integrando o NDVI com medidas de índice de área foliar e albedo superficial, eles demonstraram respostas diferenciadas da vegetação a estressores ambientais, oferecendo insights valiosos para estratégias de conservação mais direcionadas (Querino et al., 2016).

A pesquisa de Gutierrez-Cori et al. (2021) expandiu ainda mais nossa compreensão das capacidades do NDVI na caracterização da dinâmica vegetativa na Amazônia, enfocando a definição da Estação Seca da Vegetação a partir de séries temporais NDVI. Esse método permitiu uma análise mais precisa das mudanças sazonais na vegetação, fornecendo dados essenciais para estratégias de monitoramento e manejo ecológico (Gutierrez-cori et al., 2021)

Por fim, estudos como o de Rodrigues et al. (2013) examinaram a eficácia do NDVI no monitoramento da dinâmica vegetativa da Amazônia sob pressões das mudanças climáticas. Desenvolvendo métodos que melhoram a compreensão dos padrões espaciais e mudanças temporais na saúde da vegetação, eles contribuíram para estratégias de conservação mais eficazes em meio a desafios ecológicos contínuos (Rodrigues et al., 2013).

Desta forma, o NDVI continua a ser uma ferramenta inestimável na pesquisa ambiental, capturando variações nuançadas fundamentais para processos de tomada de decisão informados sobre os esforços de conservação em uma das zonas

ecológicas mais vitais do mundo.

5.7. Mudanças Climáticas Futuras e Desafios para a Amazônia

As projeções climáticas indicam um cenário de crescentes desafios para a Amazônia, impulsionados pelo aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos. O Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021) destaca que, embora a variabilidade natural do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) continue a ser um fator dominante, as mudanças climáticas antropogênicas tendem a modular seus impactos e a intensificar seus efeitos sobre os ecossistemas. Embora o IPCC AR6 não apresente um consenso absoluto sobre a alteração na frequência ou amplitude do ENOS em um cenário de aquecimento global, há alta confiança de que a variabilidade da precipitação sobre o Pacífico tropical leste-central aumentará significativamente em cenários de altas emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2021; Marengo et al., 2018). Isso implica que eventos de El Niño podem se tornar mais secos e La Niña mais úmidos em certas regiões, exacerbando os extremos hidrológicos.

Para a Amazônia, isso se traduz em uma ampliação das secas prolongadas e das chuvas excessivas, com consequências severas para a cobertura vegetal. Estudos recentes têm demonstrado que as mudanças climáticas já estão intensificando secas históricas na região, como a de 2023, que teve sua principal origem na atividade humana (World Weather Attribution, 2024). O aumento das temperaturas e a redução das chuvas em algumas áreas da Amazônia, observados nas últimas décadas, contribuem para a intensificação das secas e para a maior frequência de incêndios florestais (Qin et al., 2022). Por outro lado, eventos de La Niña podem trazer chuvas excessivas, levando a inundações que também impactam a saúde da vegetação e a dinâmica dos ecossistemas (Marengo et al., 2018). As projeções para La Niña, embora com incertezas semelhantes às do El Niño em termos de frequência e intensidade, sugerem que os eventos de La Niña podem se tornar mais úmidos em certas regiões, intensificando os eventos de cheias e inundações, o que pode afetar negativamente a vegetação adaptada a regimes hídricos mais estáveis (IPCC, 2021).

Esses impactos futuros exigem a implementação de estratégias adaptativas

robustas para minimizar os danos aos ecossistemas amazônicos. A resiliência da floresta, embora notável, tem limites, e a frequência e intensidade crescentes dos extremos climáticos podem levar a pontos de não retorno, como a savanização de partes da Amazônia. As estratégias devem incluir, fortalecimento do monitoramento através da utilização contínua e aprimorada de tecnologias de sensoriamento remoto, como NDVI e dados de satélites Landsat processados no Google Earth Engine, para acompanhar em tempo real as variações da cobertura vegetal e identificar áreas de maior vulnerabilidade. Manejo florestal sustentável, com Implementação de práticas que promovam a saúde da floresta, como o manejo de incêndios, a recuperação de áreas degradadas e a redução do desmatamento, que comprovadamente intensifica os extremos de seca e chuva (Qin et al., 2022).

Assim como também, desenvolvimento de sistemas de alerta precoce com criação e aprimoramento de sistemas que prevejam eventos extremos com antecedência, permitindo a tomada de decisões e a implementação de medidas preventivas. Pesquisa e inovação, através de investimento em estudos que aprofundem a compreensão dos mecanismos de resposta da vegetação amazônica aos estresses climáticos e que desenvolvam soluções inovadoras para a adaptação. Políticas públicas e cooperação, com formulação e aplicação de políticas públicas eficazes, alinhadas com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 13 (Ação Climática) e o ODS 15 (Vida Terrestre), e promoção da cooperação internacional para a conservação e o uso sustentável da Amazônia.

6. METODOLOGIA

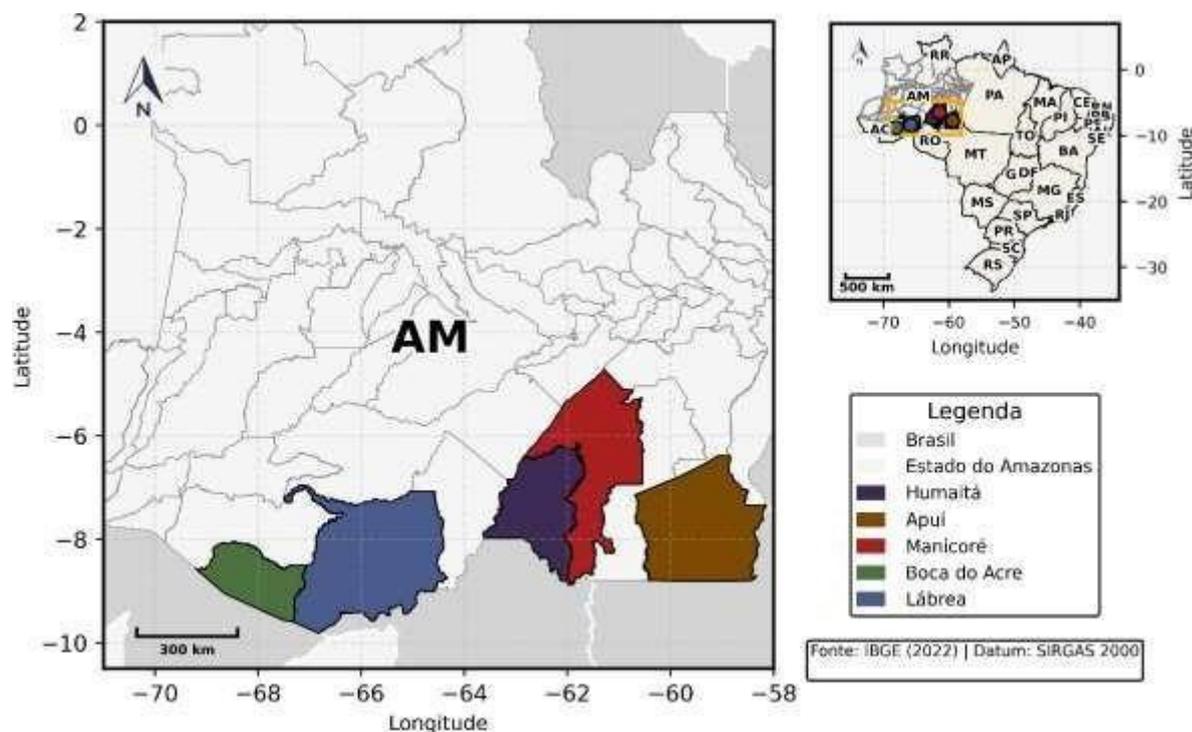
6.1 Área de Estudo

O estudo será realizado com dados coletados em cinco cidades que compõem a Mesorregião Sul do estado do Amazonas (Humaitá, Apuí, Manicoré, Boca do Acre e Lábrea). A cidade de Humaitá tem uma estimativa populacional de 57.195 mil, a de Apuí 22.739 mil, Manicoré 57.405 mil, Boca do Acre 34.958 mil e Lábrea com 47.685 mil habitantes de acordo com IBGE (2021).

As áreas de estudo estão localizadas entre as coordenadas 5° 48' 32" S 61° 18' 0" W e 07°30'22" S 63°01'15" W com altitudes variando entre 32 e 127 m (IBGE, 2017). A Mesorregião apresenta uma classificação climática tropical com clima de monção

(Am), que possui precipitação média anual superior a 1500 mm, e tem seus períodos sazonais bem, onde o período chuvoso ocorre entre outubro e abril e o período seco entre junho e agosto, com os demais meses considerados períodos de transição (Martins et al., 2023).

Figura 2:Localização da mesorregião sul do Amazonas.



Fonte: Autora,2025.

6.2 Coleta de Dados

Foram utilizados dados diários de precipitação e temperatura média do ar provenientes dos conjuntos de dados globais unificados do Climate Prediction Center (CPC): o *CPC Global Unified Gauge-Based Analysis of Precipitation* e o *CPC Global Unified Temperature*, respectivamente. Estes produtos combinam dados de estações de superfície com interpolação para fornecer cobertura global em grade (CPC, 2023). Dados diários de umidade relativa do ar foram obtidos do conjunto de dados de reanálise ERA5-Land, que oferece maior resolução espacial e combina observações com modelagem numérica (ECMWF, 2023). Todos os dados climáticos foram adquiridos para o período de 1991 a 2021 e agregados em médias mensais para cada

município, utilizando os limites municipais oficiais para extração e cálculo da média espacial.

A identificação e classificação dos eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS) baseou-se no *Oceanic Niño Index* (ONI), fornecido pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). O ONI representa a média móvel de três meses das anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) na região Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°W-170°W). Seguindo critérios adaptados da NOAA (OLiveira, 2019), foram selecionados para análise detalhada quatro eventos específicos, representando diferentes fases e intensidades (Tabela 1).

Tabela 1: Tipos de fenômeno, Intensidade do fenômeno, Anomalia de Temperatura do oceano (°C) e anos dos eventos utilizados nestes estudos.

Fenômeno	Intensidade	Anomalia de Temperatura (°C)	Anos
El Niño	Forte	≥ 1.5	2015-2016
	Fraco	0.5 - 1.0	2004-2005
La Niña	Forte	≤ -1.5	2010-2011
	Fraco	(-0.5) - (-1.0)	2017-2018

Fonte: autora, 2025.

Para avaliar a resposta da vegetação, utilizou-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), derivado de imagens de satélite da série Landsat (USGS, 2024). Foram utilizadas as coleções Landsat Collection 2 Level-2 Science Products (reflectância de superfície) para os sensores TM (Landsat 5 - LANDSAT/LT05/C02/T1_L2), ETM+ (Landsat 7 - LANDSAT/LE07/C02/T1_L2) e OLI (Landsat 8/9 - LANDSAT/LC08/C02/T1_L2) cobrindo o período de 1991 a 2021. Para cada município, a respectiva geometria (convertida para formato GEE FeatureCollection) foi usada para filtrar espacialmente as coleções (filterBounds). Aplicou-se um filtro temporal (filterDate) e um filtro de metadados para selecionar imagens com cobertura de nuvens inferior a um limiar pré-definido de < 20%.

O processamento das imagens foi realizado na plataforma Google Earth Engine (GEE). Para cada mês, foi gerada uma imagem composta livre de nuvens utilizando um algoritmo de mascaramento baseado nas bandas de qualidade (QA) de cada sensor e aplicando um redutor de mediana aos pixels válidos disponíveis no mês. O NDVI foi então calculado para cada pixel em cada imagem composta mensal,

utilizando as bandas correspondentes ao infravermelho próximo (NIR) e ao vermelho (Red):

6.3. Processamento de Dados

Foi utilizado a linguagem de Python para o processamento de dados, na versão 3.7, com o auxílio dos seguintes pacotes: Pandas, utilizado para análise e manipulação de dados; Xarray; focado em manipulação de dados n-dimensionais; O pacote Numerical Python (NumPy); Matplotlib, utilizado na confecção dos gráficos.

A normal climatológica foi calculada para o período de 1991 a 2021, o que permite a análise das condições climáticas ao longo de um intervalo de três décadas. Dentro desse período, foram selecionados dois eventos com base na intensidade dos fenômenos climáticos, a saber, El Niño (2015-2016) e (2004-2005), para La Niña (2010-2011) e (2017-2018). Essa escolha é estratégica, pois permite trabalhar dentro do ano hidrológico, garantindo a análise durante a mesma época seca e a mesma época chuvosa. Posteriormente, foi aplicada estatística descritiva básica, utilizada para resumir e compreender os dados.

6.4 Análise da cobertura vegetal

A metodologia utilizada será do Rouse et al. (1973), que é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, também conhecido como NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), o qual é um índice amplamente utilizado para medir a quantidade e a saúde da vegetação em imagens de sensoriamento remoto. Esse índice permite avaliar a quantidade de clorofila nas plantas, o que é um indicativo de saúde e produtividade vegetal.

O cálculo do NDVI é baseado na diferença entre a reflectância na faixa do infravermelho próximo (NIR) e a reflectância na faixa do vermelho (RED) do espectro eletromagnético. A fórmula matemática para o cálculo do NDVI é a seguinte:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (1)$$

Onde :

NDVI: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.

NIR: Valor da banda do infravermelho próximo.

RED: Valor da banda do vermelho

O espectrômetro remoto captura a quantidade de radiação refletida pelas plantas nas faixas do vermelho e do infravermelho próximo. O NDVI normaliza essa diferença, variando de -1 a 1. Valores próximos a -1 indicam uma ausência de vegetação, como corpos d'água ou áreas urbanas. Valores próximos a 1 indicam uma vegetação densa e saudável

6.5. Teste de correlação

Para a escolha do teste para avaliar as relações entre as variáveis meteorológicas (precipitação, temperatura do ar, umidade relativa) e o índice de vegetação (NDVI), primeiramente foi feito o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, o qual foi obtido resultados que rejeitaram a hipótese nula de distribuição normal ($p < 0,05$) para a maioria das variáveis em todos os municípios analisados. Desse modo, essa constatação válida a escolha do coeficiente de correlação de Spearman, que é um método não paramétrico adequado para dados que não atendem aos pressupostos de normalidade e linearidade.

Conforme discutido por Yang et al. (2018), a resposta da vegetação a extremos climáticos, como a saturação do NDVI em altos níveis de umidade, frequentemente exibe padrões não lineares. Essa característica justifica ainda mais a escolha do coeficiente de correlação de Spearman, que lida melhor com esse tipo de relação.

O coeficiente de Spearman foi calculado conforme:

$$\rho = \frac{6\sum di^2}{-n(n^2-1)}$$

onde di^2 é a diferença entre os ranks de cada par de observações e n o tamanho da amostra. As correlações foram classificadas como: Fraca ($0,10 \leq |\rho| < 0,30$), Moderada ($0,30 \leq |\rho| < 0,60$), Forte ($|\rho| \geq 0,60$) (Dancey e Reidy, 2006).

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1. PRECIPITAÇÃO

Durante os eventos de El Niño forte (ENF) em Humaitá (A), houve anomalias negativas em comparação com a normal climatológica significativas nos meses de fevereiro (-108,84 mm), dezembro (-83,23 mm) e novembro (-80,80 mm). Já no El

Niño fraco (ENfr), foram mais acentuadas em novembro (-109,10 mm), março (-91,15 mm) e fevereiro (-54,69 mm). Em relação a aos efeitos da La Niña forte (LNF) houve anomalias positivas expressivas em fevereiro (74,9 mm) e março, enquanto a La Niña fraca (LNfr) apresentou pico em dezembro (108,5 mm).

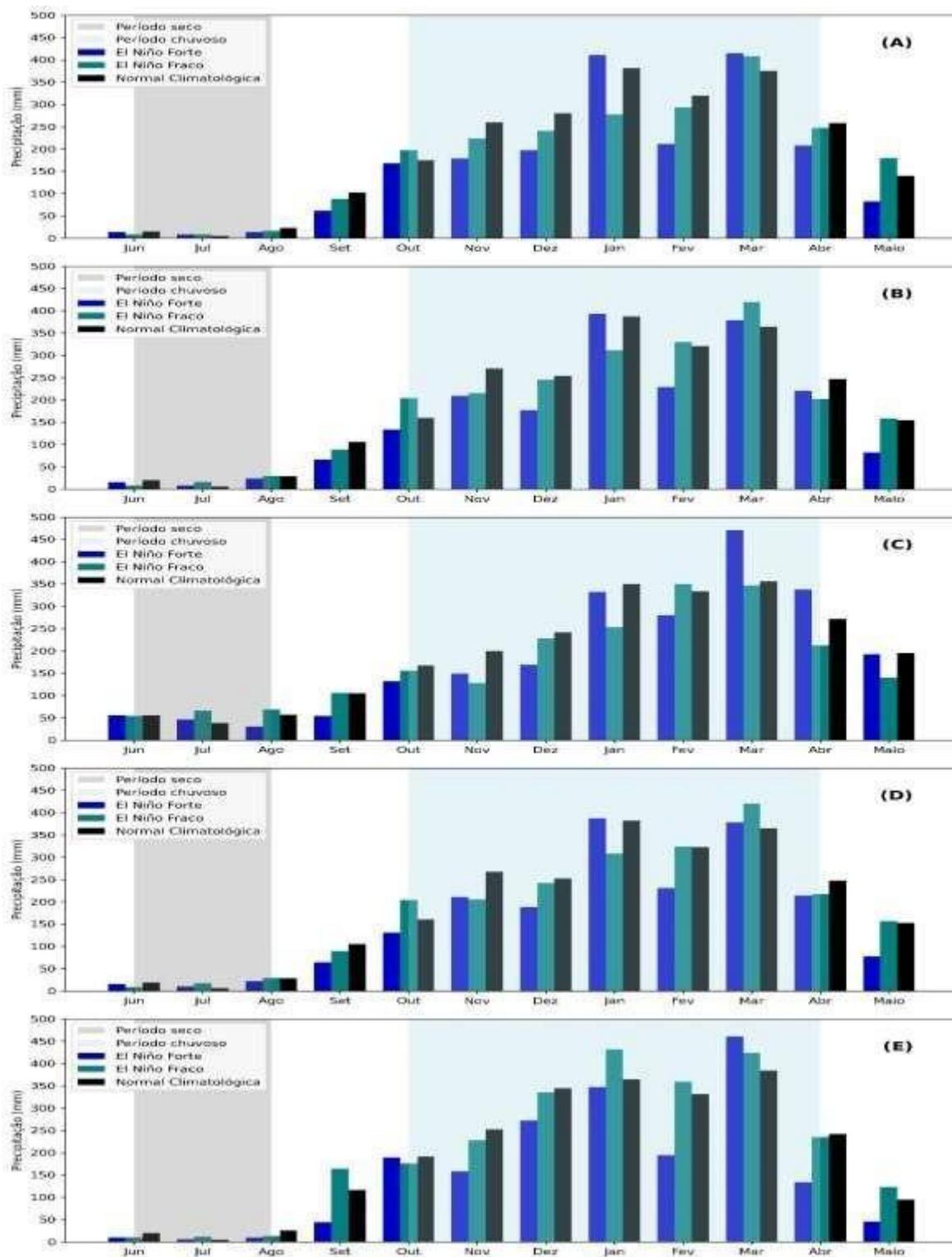
Em Apuí (Figura B), o El Niño fraco (ENfr) apresentou suas maiores anomalias negativas de precipitação nos meses de novembro (-111,54 mm), abril (-65,18 mm) e setembro (-33,92 mm). Durante o El Niño forte (ENF), as anomalias ocorreram em fevereiro (-92,52 mm), dezembro (-76,85 mm) e maio (-73,04 mm). Já no evento de La Niña forte (LNF), as maiores acentuações foram registradas em janeiro (101,2 mm) e fevereiro (66,3 mm), enquanto a La Niña fraca (LNfr) apresentou seus picos em dezembro (93,4 mm) e janeiro (86,7 mm).

Em Manicoré (Figura C), os efeitos do ENF foram notáveis em dezembro (-73,07 mm), fevereiro (-53,45 mm) e novembro (-50,68 mm), enquanto no ENfr as maiores anomalias ocorreram em novembro (-118,04 mm), fevereiro (-83,65 mm) e outubro (-67,69 mm). No período da LNF, houve acentuações janeiro (90,1 mm) e fevereiro (73,8 mm), e na LNfr, destacou-se dezembro (84,5 mm) e janeiro (76,9 mm).

Em Lábrea (Figura D), as anomalias de precipitação durante o ENF alcançaram valores elevados nos meses de fevereiro (-92,22 mm), maio (-74,77 mm) e dezembro (-64,12 mm), enquanto no ENfr se destacaram os meses de novembro (-100,47 mm), março (-71,46 mm) e outubro (-36,87 mm). Já durante a LNF, as maiores anomalias foram observadas em janeiro (116,04 mm) e fevereiro (96,3 mm), ao passo que na LNfr, dezembro foi o mês mais expressivo (104,8 mm).

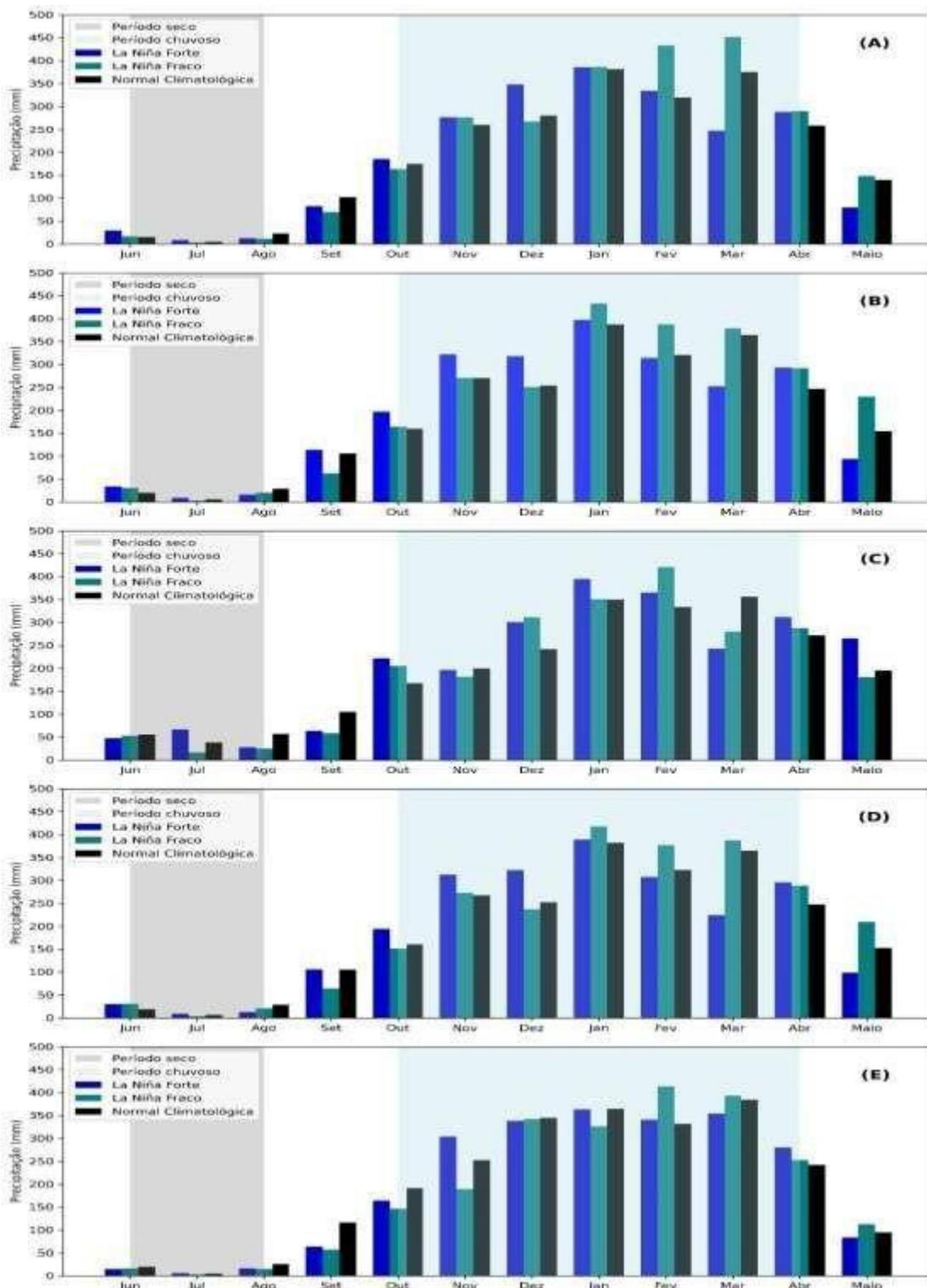
Em Boca do Acre (Figura E), os efeitos do ENF se manifestaram de forma mais intensa em fevereiro (-137,31 mm), abril (-108,78 mm) e novembro (-94,48 mm), enquanto o ENfr teve suas maiores anomalias negativas em abril (-142,08 mm), março (-64,52 mm) e fevereiro (-58,60 mm). Durante a LNF, os meses de janeiro (103,3 mm) e fevereiro (85,7 mm) apresentaram os maiores aumentos de precipitação. Na LNfr, os destaques ocorreram em dezembro (98,6 mm) e janeiro (87,4 mm).

Figura 3: Normal climatológica da precipitação e totais mensais da precipitação para as cidades de Humaitá (A), Apuí (B), Manicoré (C), Lábrea (D) e Boca do Acre (E), localizadas na mesorregião sul do Amazonas, durante o El Niño forte (2015-2016) e fraco (2004-2005).



Fonte: Autora, 2025.

Figura 4: Normal climatológica da precipitação e totais mensais da precipitação para as cidades de Humaitá (A), Apuí (B), Manicoré (C), Lábrea (D) e Boca do Acre (E), localizadas na mesorregião sul do Amazonas, durante o La Niña forte (2010-2011) e fraco (2017-2018).



Fonte: Autora, 2025

Ao analisar os resultados em comparação ao período seco e chuvoso, pode-se notar que o período chuvoso foi o mais afetado em toda a região, tanto durante o El Niño quanto La Niña, com destaque para as cidades de Boca do Acre e Humaitá. O que corrobora com os estudos de Moreira, et al., (2019), o qual diz que as anomalias de precipitação são perceptíveis principalmente na estação chuvosa da Amazônia, onde provocam chuvas abundantes.

Ambas intensidades do El Niño obtiveram anomalias negativas em relação a normal climatológica, mas os maiores déficits hídricos observados durante o El Niño forte de 2015-2016, estão alinhados com a literatura, que aponta esse fenômeno como principal modulador da variabilidade pluviométrica na Amazônia (Marengo et al., 2011). Já em relação a intensidade do La Niña, a fraca foi a que mais impactou.

Tabela 2: Anomalias de precipitação sazonal durante El Niño Forte, Fraco e La Niña Forte e Fraco em 5 municípios da mesorregião sul do Amazonas.

Cidade	EI NIÑO				LA NIÑA			
	Seco (Forte)	Seco (Fraco)	Chuvoso (Forte)	Chuvoso (Fraco)	Seco (Forte)	Seco (Fraco)	Chuvoso (Forte)	Chuvoso (Fraco)
Humaitá	-2,43	7,44	-37,31	-30,52	2,17	-4,34	2,32	31,19
Lábrea	-2,04	8,24	-36,95	-9,39	-0,31	0,66	6,66	19,09
Manicoré	-6,26	9,94	-7,19	-42,49	-3,24	-18,96	16,14	16,50
Apuí	-2,41	11,81	-37,63	-11,11	1,53	-0,28	13,07	24,71
Boca do Acre	-8,25	24,20	-50,92	-4,15	-4,21	-5,43	4,70	-6,89
Média geral	-4,28	12,33	-34,00	-19,53	-0,81	-5,67	8,58	16,92

Fonte: Autora, 2024

Os resultados do estudo corroboram a relevância do evento El Niño de 2015/16, que se destaca como um dos mais intensos desde 1950 (L'heureux et al., 2017). Esse evento abrangeu o período do verão ao outono de 2016, englobando tanto as estações úmidas (2015/16) quanto as secas (2015) na mesorregião. Durante esse período, a anomalia negativa de precipitação foi particularmente evidente de outubro de 2015 a janeiro de 2016 (Panisset et al., 2018). A intensidade desse evento foi tão marcante que a precipitação média diária foi aproximadamente 6 mm menor do que a climatologia normal de setembro a novembro de 2015 na região da Amazônia e nordeste do Brasil (Pereira et al., 2017).

Essa severa estiagem durante o El Niño pode ser atribuída ao aquecimento anômalo das águas superficiais do Oceano Pacífico Equatorial e ao enfraquecimento dos ventos alísios, que desencadeiam alterações climáticas significativas. Isso resulta na acumulação de águas quentes e modificações nos padrões de circulação atmosférica, culminando em uma redução na formação de nuvens e, conseqüentemente, na diminuição das chuvas em várias regiões. Como resultado, surgem períodos prolongados de Walker durante o evento El Niño de 2015/16 (Pereira et al., 2017; Silva, 2000) com conseqüências socioambientais.

Como um sistema de circulação atmosférica de larga escala, a célula de Walker, influencia o transporte de umidade e a formação de nuvens em regiões tropicais, o qual durante o El Niño, a célula de Walker tende a enfraquecer, resultando em um deslocamento para leste das áreas de convecção e precipitação associadas a ela (Camargo et al., 2007). Esse deslocamento pode levar a uma redução na formação de nuvens e, conseqüentemente, a uma diminuição das chuvas em regiões impactadas pelo El Niño, como observado na região da Amazônia e nordeste do Brasil durante esse evento específico (Limberger e Silva, 2016). Essas alterações na circulação atmosférica podem prolongar períodos de estiagem, afetando negativamente a disponibilidade de água e outras atividades dependentes dos recursos hídricos, como a agricultura (Marengo e Espinoza, 2015; Silva, 2000).

Durante eventos de La Niña, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) desloca-se para sul, aumentando a instabilidade atmosférica e a formação de nuvens de chuva persistentes (Foley et al., 2002). Essas condições resultam em chuvas acima da média histórica, com aumentos que podem ultrapassar 160 mm em meses críticos (Gonzalez et al., 2013; Romero et al., 2014). O excesso de precipitação eleva os níveis dos rios, como o Amazonas e seus afluentes, inundando áreas de várzea e modificando ecossistemas aquáticos (Pedreira Junior et al., 2020)

7.2. TEMPERATURA DO AR

Em Humaitá (Figura A), durante o El Niño forte (ENF), as maiores anomalias positivas de temperatura ocorreram em setembro (+1,35°C) e novembro (+1,44°C), indicando um aquecimento expressivo. No El Niño fraco (ENfr), os aumentos mais significativos foram registrados em janeiro (+0,98°C) e novembro (+0,67°C), mostrando também elevação de temperatura, porém em menor intensidade. Durante

a La Niña forte (LNF), não houve grandes variações, o qual as maiores anomalias ocorreram em julho (-0,30°C) e novembro (-0,22°C). Já na La Niña fraca (LNfr), as anomalias foram mais intensas, com destaques em junho (+1,0°C) e fevereiro (-0,52°C).

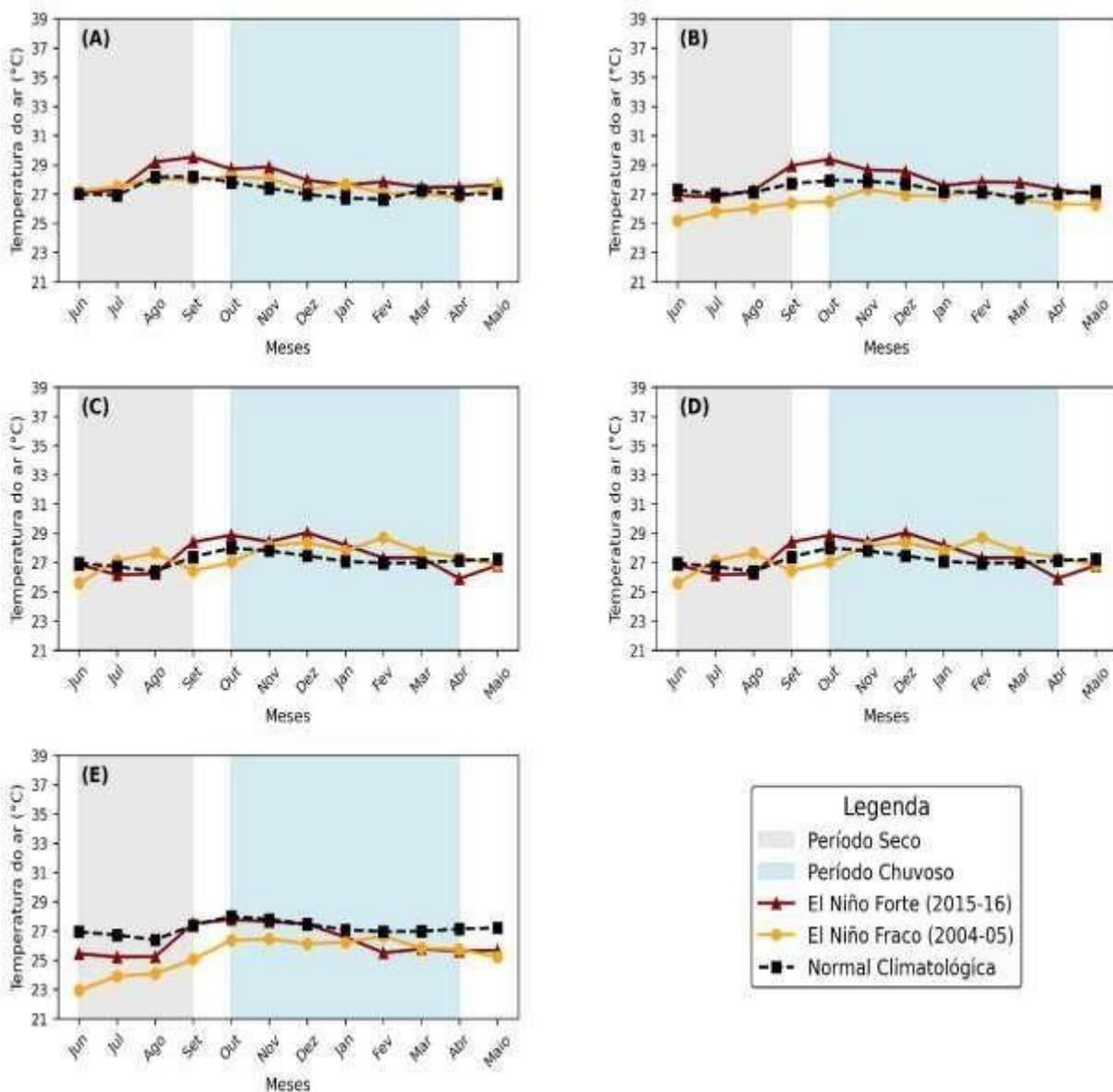
Em Apuí (Figura B), o ENF provocou os maiores aumentos de temperatura nos meses de outubro (+1,46°C) e setembro (+1,24°C), indicando uma elevação mais acentuada do que as cidades anteriores. Durante o ENfr, não foram registradas anomalias positivas, sugerindo baixa influência do fenômeno nesse período. No evento de LNF, apenas agosto apresentou anomalia negativa (-1,02°C). Na LNfr, os maiores resfriamentos ocorreram em maio (-0,37°C) e fevereiro (-0,21°C), apontando leve influência do fenômeno na diminuição da temperatura.

Em Manicoré (Figura C), o ENF gerou anomalias positivas mais acentuadas de temperatura em outubro (+2,48°C) e setembro (+1,69°C). Já o ENfr mostrou aumentos mais discretos em fevereiro (+0,64°C) e março (+0,47°C). Durante a LNF, não houve registro de anomalias negativas, mas na LNfr, sete meses apresentaram resfriamentos, destacando-se novembro (-0,42°C) e abril (-0,40°C).

Em Lábrea (Figura D), foram observados anomalias positivas em dezembro (+1,59°C) e janeiro (+1,12°C). O ENfr também apresentou aquecimento significativo, com anomalias mais altas em fevereiro (+1,73°C) e agosto (+1,27°C). Durante a LNF, apenas fevereiro registrou anomalia negativa (-0,19°C). Por outro lado, a LNfr teve maior incidência de resfriamento, com os maiores valores em janeiro (-1,96°C) e agosto (-3,43°C).

Em Boca do Acre (Figura E), o ENF causou leve aquecimento apenas em setembro (+0,13°C), enquanto no ENfr não houve registro de anomalias positivas. Durante a LNF, foram registradas anomalias negativas em agosto (-1,0°C) e junho (-0,7°C). A LNfr se destacou por apresentar resfriamento em todos os meses, com as maiores anomalias em julho (-2,33°C) e outubro (-1,82°C), caracterizando um padrão consistente de queda nas temperaturas sob este fenômeno.

Figura 5: Normal climatológica da temperatura e totais mensais de temperatura para as cidades de Humaitá (A), Apuí (B), Manicoré (C), Lábrea (D) e Boca do Acre (E), localizadas na mesorregião sul do Amazonas, durante o El Niño forte (2015-2016) e fraco (2004-20) e o período de El Niño forte (2015-2016) e fraco (2004-20).



Fonte: Autora, 2025

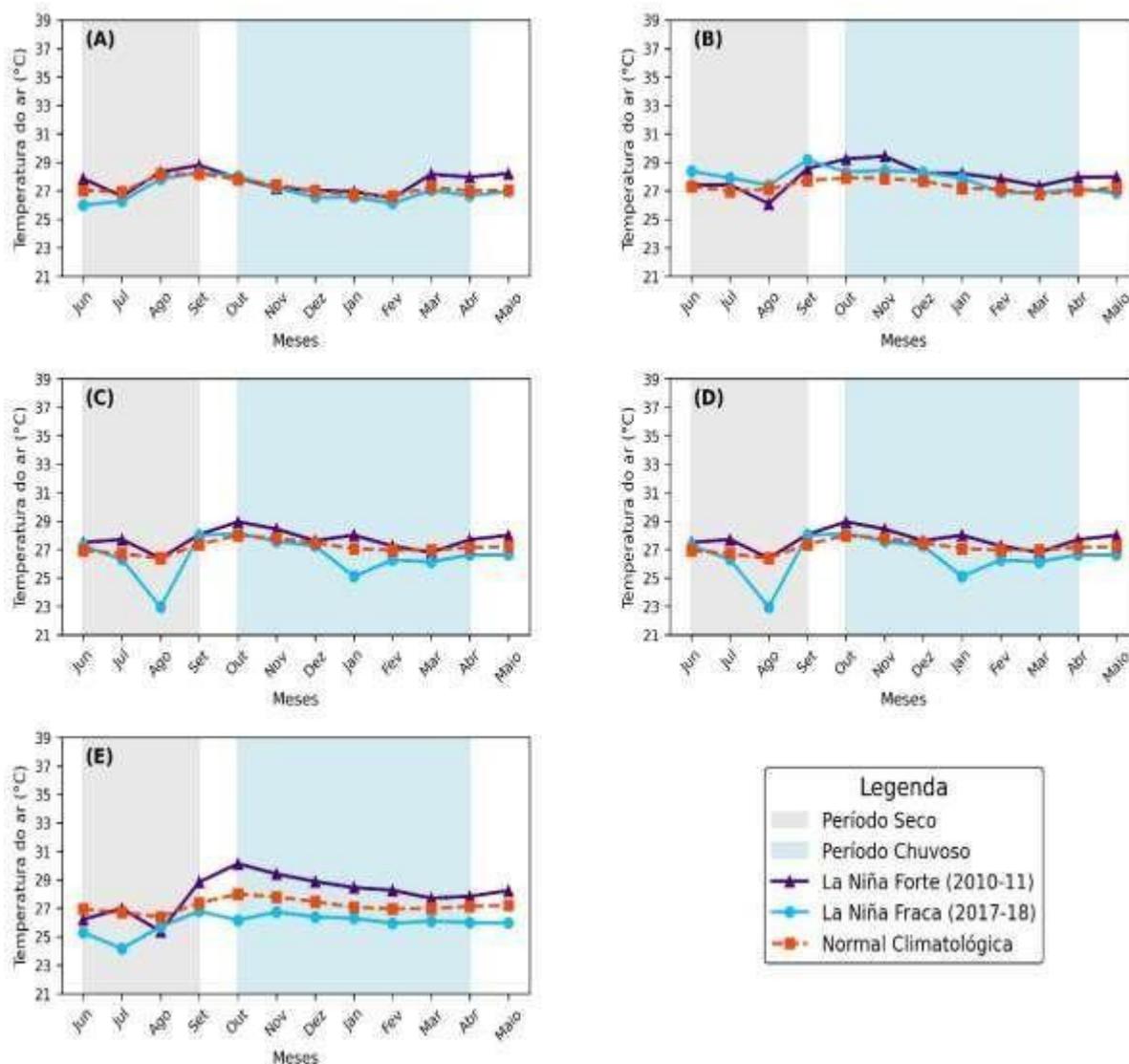
O aquecimento das águas do Pacífico durante o El Niño influencia negativamente na distribuição de chuvas e a formação de nuvens na região amazônica, resultando em condições mais secas. Com menos nuvens e precipitação, a radiação solar atinge a superfície terrestre de forma mais intensa. Isso leva a um aumento da radiação solar absorvida e, por consequência, ao aumento da temperatura do ar na região amazônica (Fonseca, 2021; Marengo et al, 2014).

A análise mostrou que a La Niña fraca (LNfr) provocou resfriamentos mais intensos do que a La Niña forte (LNF) em Lábrea (-3,43°C em agosto) e Boca do Acre (-2,33°C em julho). Segundo Marengo et al. (2018), características como a heterogeneidade dos solos e a variação de altitude (entre 32 e 127 metros) modulam as respostas locais aos eventos ENOS, o que ajuda a explicar as variações observadas.

Já nas diminuições de temperatura, durante um evento de La Niña, ocorrem alterações significativas no padrão atmosférico global. A região central e oriental do Oceano Pacífico esfria, resultando em uma maior diferença de temperatura entre as águas do Pacífico e o ar sobrejacente. Essa diferença de temperatura gera uma modificação no padrão atmosférico, conhecida como célula de Walker, que influencia a circulação atmosférica em várias partes do mundo, incluindo a intensificação dos ventos alísios sobre o Oceano Pacífico Central e Oriental.

Esses ventos alísios se tornam mais fortes e transportam o ar frio e seco do Pacífico para outras regiões. Essa advecção do ar frio e seco pode afetar a temperatura do ar em áreas como a região do Amazonas. O ar frio proveniente do Pacífico substitui o ar quente existente na região, resultando em uma diminuição da temperatura (Nobre, Sampaio, Salazar, 2007).

Figura 6: Normal climatológica da temperatura e totais mensais de temperatura para as cidades de Humaitá (A), Apuí (B), Manicoré (C), Lábrea (D) e Boca do Acre (E), localizadas na mesorregião sul do Amazonas, durante o La Niña forte (2010-2011) e fraco (2017-2018).



Legenda
 ■ Período Seco
 ■ Período Chuvoso
 ▲ La Niña Forte (2010-11)
 ● La Niña Fraca (2017-18)
 ■ Normal Climatológica

Fonte: Autora, 2025

Tabela 3: Anomalias de temperatura (°C) sazonal durante El Niño Forte, Fraco e La Niña Forte e Fraco em 5 municípios da mesorregião sul do Amazonas.

Cidade	EI NIÑO				LA NIÑA			
	(Forte)	Seco (Fraco)	Chuvoso (Forte)	Chuvoso (Fraco)	Seco (Forte)	Seco (Fraco)	Chuvoso (Forte)	Chuvoso (Fraco)
Humaitá	0,49	0,22	0,88	0,33	0,23	-0,67	0,27	-0,24
Lábrea	-0,27	0,11	0,52	0,53	-0,15	-1,83	0,48	-0,61

Manicoré	0,76	-0,51	1,47	0,07				
Apuí	-0,16	-1,48	0,8	-0,53	0,64	0,42	-0,08	0,76
Boca do Acre	-2,33	-1,64	1,55	0,85	-0,78	0,02	0,27	-0,05
Média geral	-0,30	-0,66	1,18	0,25	-0,02	-0,52	0,24	-0,04

Fonte: Autora, 2025.

Em escala regional, durante os episódios de El Niño, particularmente em sua fase forte, observaram-se um aquecimento significativo no período chuvoso em todas as cidades, com a média regional atingindo $+1,18^{\circ}\text{C}$ acima do normal. Manicoré destacou-se como a cidade mais afetada, registrando $+1,47^{\circ}\text{C}$ no mesmo período. Mas no período seco fraco, a região apresentou anomalias negativas com média de $-0,66^{\circ}\text{C}$, com Lábrea mostrando a redução mais acentuada ($-1,83^{\circ}\text{C}$).

Já durante os eventos de La Niña, os impactos térmicos foram menos intensos, porém igualmente relevantes. A fase fraca do fenômeno provocou um resfriamento médio de $-0,52^{\circ}\text{C}$ no período seco, sendo mais pronunciado em Lábrea ($-1,83^{\circ}\text{C}$). No período chuvoso, as anomalias foram menos expressivas, com variações próximas à neutralidade, exceto por alguns locais como Boca do Acre, que registrou $+2,93^{\circ}\text{C}$ durante a La Niña forte, mostrando a variabilidade espacial dos impactos.

7.3. UMIDADE RELATIVA DO AR

Em Humaitá (Figura A), durante o El Niño forte (ENF), as maiores anomalias negativas de umidade foram registradas em agosto ($-9,44\%$), setembro ($-8,28\%$) e outubro ($-6,57\%$), indicando forte redução da umidade relativa do ar, associada ao aquecimento e à diminuição das chuvas. Mesmo no El Niño fraco (ENfr), os meses de agosto ($-9,44\%$) e setembro ($-8,28\%$) apresentaram reduções, confirmando que mesmo eventos mais brandos do fenômeno impactam significativamente o regime de umidade local. Já durante a La Niña forte (LNF), observaram-se aumentos acentuados em julho ($+16,07\%$) e junho ($+14,44\%$), enquanto na La Niña fraca (LNfr) os valores com maiores anomalias foram registrados em junho ($+10,20\%$) e maio ($+9,36\%$), demonstrando tendência de ambiente mais úmido, mesmo em condições menos intensas do fenômeno.

Em Apuí (Figura B), o El Niño resultou em diminuição na umidade relativa, principalmente durante o ENfr, com destaque para junho ($-7,37\%$), julho ($-3,86\%$) e

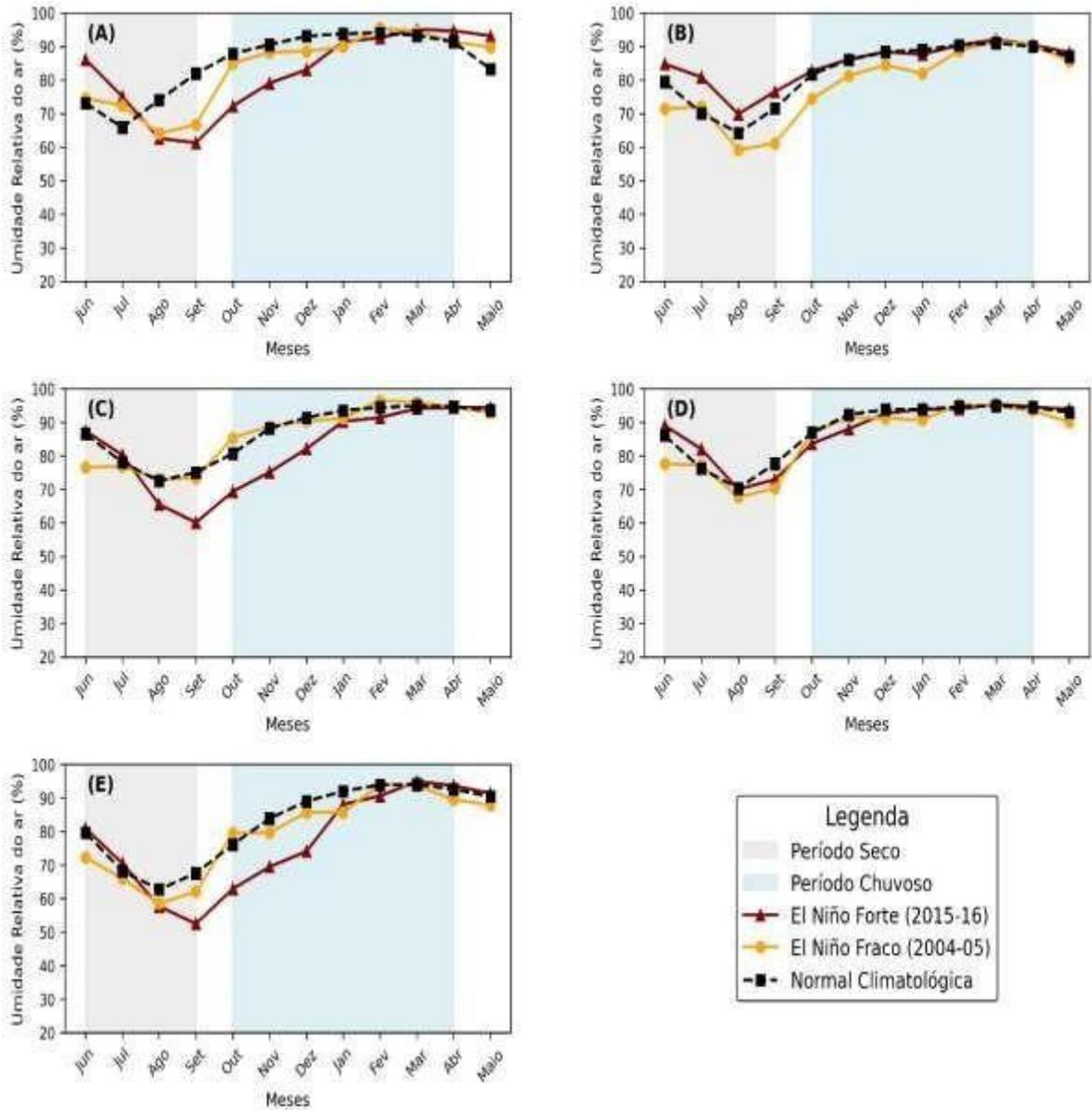
agosto (-3,13%), meses que coincidem com o período seco. Durante a LNF, foram observados aumentos expressivos em junho (+4,16%), julho (+9,44%) e novembro (+7,91%), indicando recuperação da umidade.

Em Manicoré (Figura C), o ENF apresentou uma diminuição menos acentuadas com quedas em junho (-0,56%), julho (-5,28%) e agosto (-2,69%). Já na LNF, a elevação da umidade foi marcada nos meses de junho (+4,05%), julho (+8,30%) e novembro (+5,02%), justamente durante o trimestre mais seco.

Em Lábrea (Figura D), o ENF mostrou forte influência na queda da umidade relativa, com destaque para julho (-9,34%). Junho (-0,47%) e setembro (-0,44%) também apresentou reduções. Durante a LNF, foi observado aumento em julho (+7,49%), junho (+3,34%) e novembro (+2,06%).

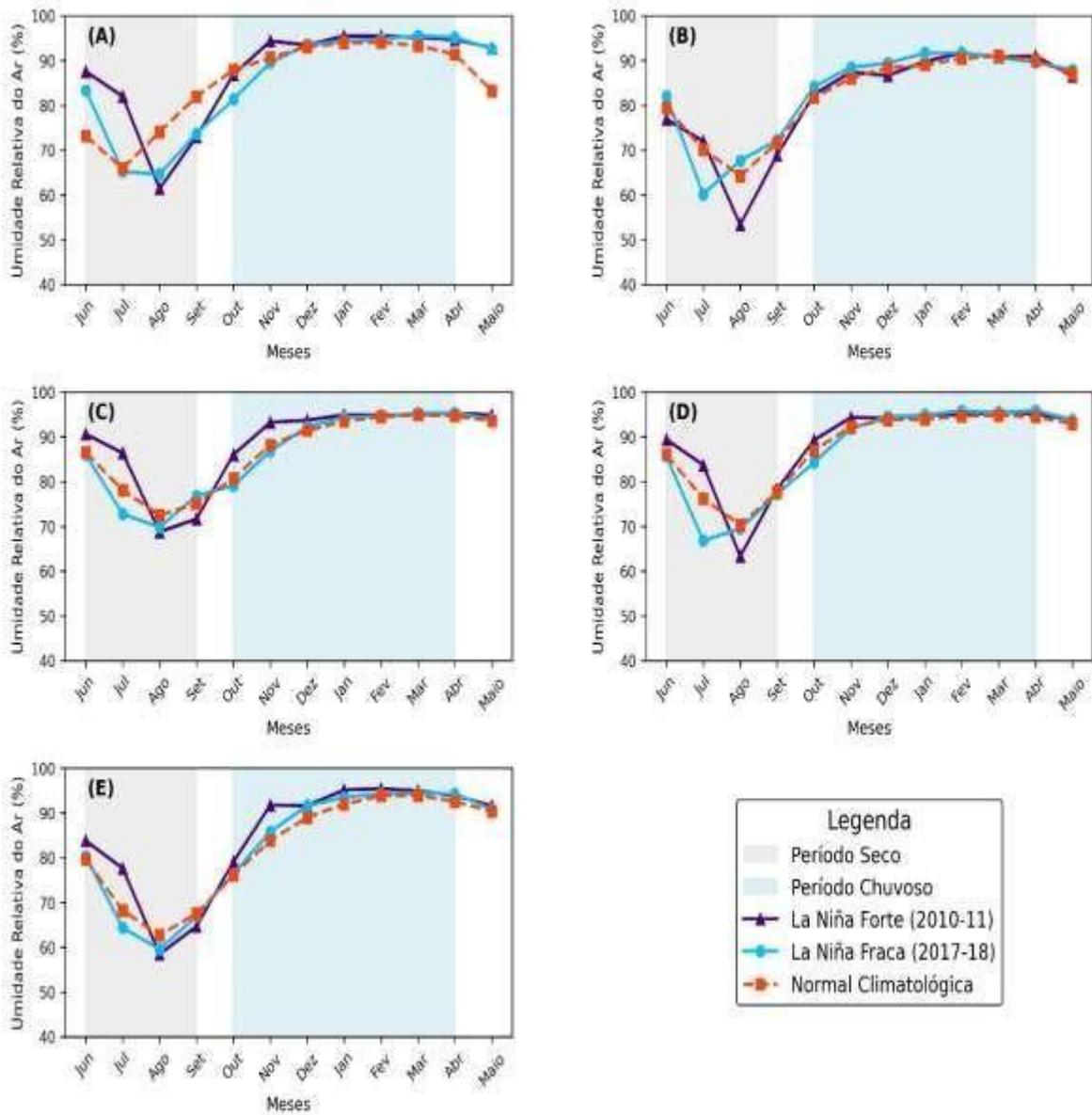
Em Boca do Acre (Figura E), o impacto do ENF se destacou, com anomalias negativas expressivas em setembro (-10,47%), julho (-9,95%) e junho (-8,09%). Na LNF, o município registrou a maior anomalia positiva entre todos os locais analisados, com aumento de umidade relativa do ar em agosto (+10,92%). Também se destacaram os meses de julho (+1,85%) e novembro (+1,32%).

Figura 7: Normal climatológica da umidade relativa do ar e totais mensais de umidade relativa do ar para as cidades de Humaitá (A), Apuí (B), Manicoré (C), Lábrea (D) e Boca do Acre (E), localizadas na mesorregião sul do Amazonas, durante o El Niño forte (2015-2016) e fraco (2004-2005).



Fonte: Autora, 2025

Figura 8: Normal climatológica da umidade relativa do ar e totais mensais de umidade relativa do ar para as cidades de Humaitá (A), Apuí (B), Manicoré (C), Lábrea (D) e Boca do Acre (E), localizadas na mesorregião sul do Amazonas, durante o El Niño forte (2010-2011) e fraco (2017-2018).



Fonte: Autora, 2025

Tabela 4: Anomalias de umidade (%) sazonal durante El Niño Forte, Fraco e La Niña Forte e Fraco em 5 municípios da mesorregião sul do Amazonas.

Cidade	EL NIÑO				LA NIÑA			
	Seco (Forte)	Seco (Fraco)	Chuvoso (Forte)	Chuvoso (Fraco)	Seco (Forte)	Seco (Fraco)	Chuvoso (Forte)	Chuvoso (Fraco)
Humaitá	3,60	0,02	-5,14	-1,55	5,95	0,02	1,60	-0,01
Lábrea	2,83	-3,55	-1,24	-1,02	1,28	-3,55	1,08	0,24
Manicoré	-1,33	-2,85	-5,86	0,72	2,87	-2,85	2,16	-0,01
Apuí	7,26	-1,33	0,20	-3,39	-3,89	-1,33	0,44	1,30
Boca do Acre	-0,50	-2,10	-6,81	-1,95	3,11	-2,10	2,93	1,29
Média geral	2,37	-1,96	-3,77	-1,44	1,86	-1,96	1,64	0,56

Fonte: Autora, 2025

O El Niño forte provocou uma queda acentuada da umidade no período chuvoso, com a média regional atingindo -3,77%, sendo mais crítica em Boca do Acre (-6,81%). Paradoxalmente, no período seco forte houve um aumento médio de +2,37% na umidade, com Apuí registrando o maior incremento (+7,26%).

Em contraste, a La Niña trouxe condições geralmente mais úmidas para a região. Durante sua fase fraca, observou-se um aumento médio de +1,64% no período chuvoso, com Boca do Acre apresentando a maior elevação (+2,93%). No período seco forte, o incremento médio foi de +1,86%, sendo Humaitá a cidade com a anomalia mais expressiva (+5,95%). Esses padrões reforçam o caráter oposto dos dois fenômenos em relação à umidade atmosférica na região.

Segundo Marengo et al. (2014), o El Niño pode causar uma redução significativa na umidade do ar durante os meses de agosto a outubro em áreas da Amazônia central e leste. Esta afirmação corrobora com os resultados aqui obtidos, no qual destaca-se o mês de setembro com maior anomalia negativa. Além disso, de acordo com o estudo de Cox et al. (2004), eventos de El Niño podem aumentar a incidência de incêndios florestais na Amazônia brasileira.

De acordo com Marengo e Borba (2013), a ocorrência de eventos de La Niña favorece o aumento da umidade relativa na Amazônia devido ao fortalecimento dos ventos alísios e à intensificação da Zona de Convergência do Atlântico Sul, que

aumentam o volume de chuvas na região. Esse padrão foi confirmado neste estudo, no qual se observou aumento expressivo da umidade relativa durante a La Niña forte e fraca em todos os municípios analisados, o qual destaca-se que a os meses mais afetados estão dentro do período seco da região, refletindo a reversão das condições observadas secas no período de El Niño. Conforme destacado por Santos et al. (2021), a maior disponibilidade de água no solo e o aumento da evapotranspiração da floresta durante a La Niña contribuem para a elevação dos índices de umidade, favorecendo a recuperação da vegetação e o restabelecimento do equilíbrio ecológico na Amazônia.

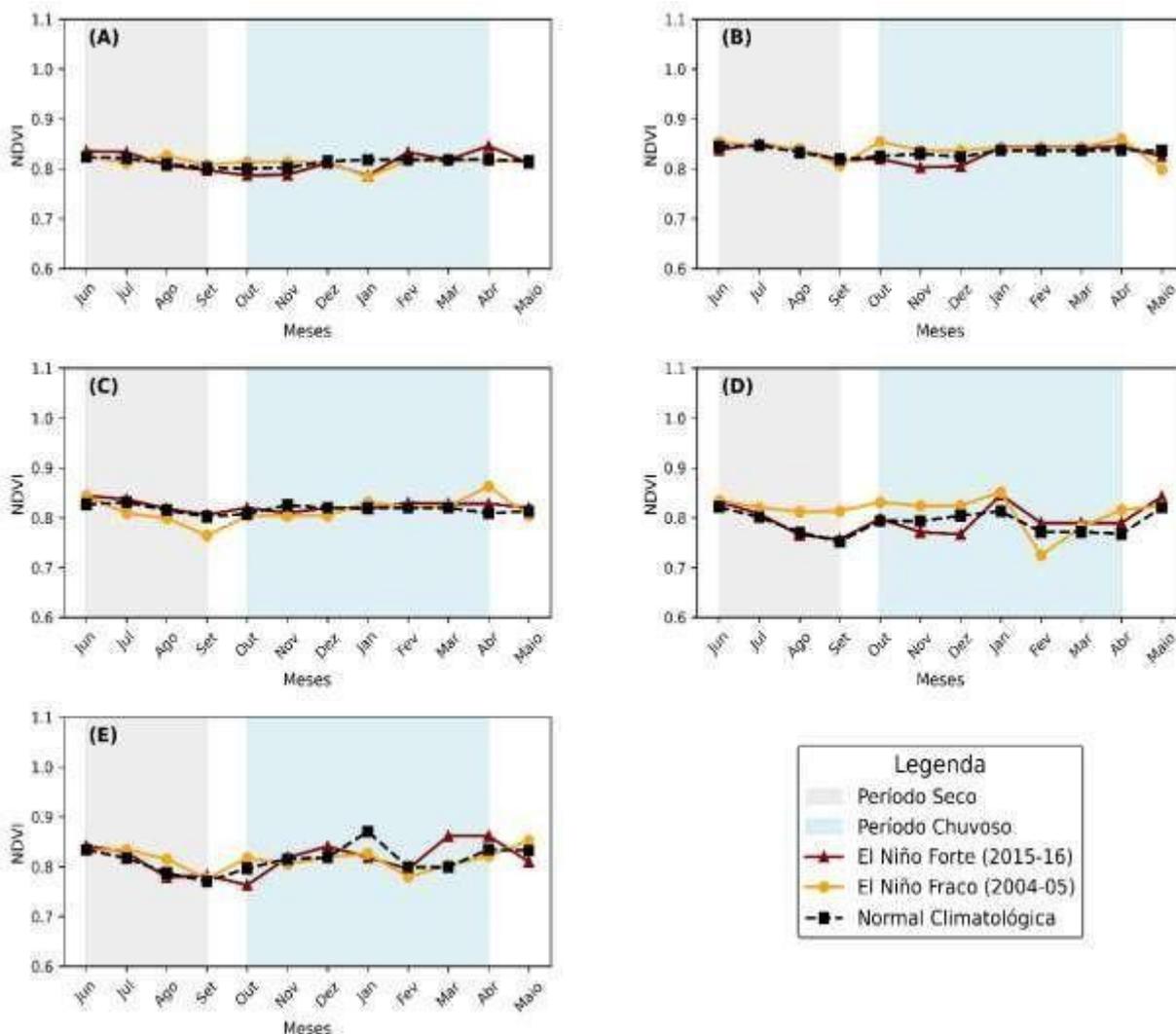
7.4. NDVI

Durante os eventos El Niño classificados como fortes, observou-se uma tendência geral de anomalias negativas de NDVI em relação a série temporal. Em Humaitá (A), a anomalia negativa (-0,05) concentrou-se em janeiro. De forma similar, Apuí (B) registrou anomalias negativas na estação seca/transição (setembro -0,03; novembro -0,05), assim como Manicoré (C) (novembro -0,04) e Lábrea (D) (novembro -0,03; dezembro -0,06). Boca do Acre (E) também seguiu este padrão (outubro -0,03; janeiro -0,05). A magnitude dessas anomalias negativas variou entre -0,03 e -0,06. As correlações predominantes neste período frequentemente apontaram para uma relação negativa entre NDVI e temperatura (ρ Apuí=-0.41; ρ Manicoré=-0.49; ρ Boca do Acre=-0.40; ρ Lábrea=-0.36), sugerindo o estresse térmico como um fator chave. Contudo, Boca do Acre (D) apresentou uma notável exceção, exibindo uma anomalia positiva inesperada em março (+0,08) durante o ENF.

Os eventos El Niño fracos também induziram predominantemente anomalias negativas, mas com padrões temporais e espaciais distintos e, em alguns casos, respostas mistas. Humaitá (A) manteve a consistência, com anomalia negativa em janeiro (-0,05), similar ao ENF, e forte correlação negativa com temperatura (ρ =-0.41). Boca do Acre (E) também mostrou anomalias negativas (janeiro -0,05; fevereiro -0,03), correlacionadas negativamente com temperatura (ρ =-0.31). Em contraste, Apuí (B) apresentou a anomalia negativa em relação a série temporal (maio -0,08) e com correlações gerais fracas. Manicoré (C) e Lábrea (D) exibiram respostas mistas durante o ENFr: Manicoré teve anomalias negativas (setembro -0,08; Junho -0,03)

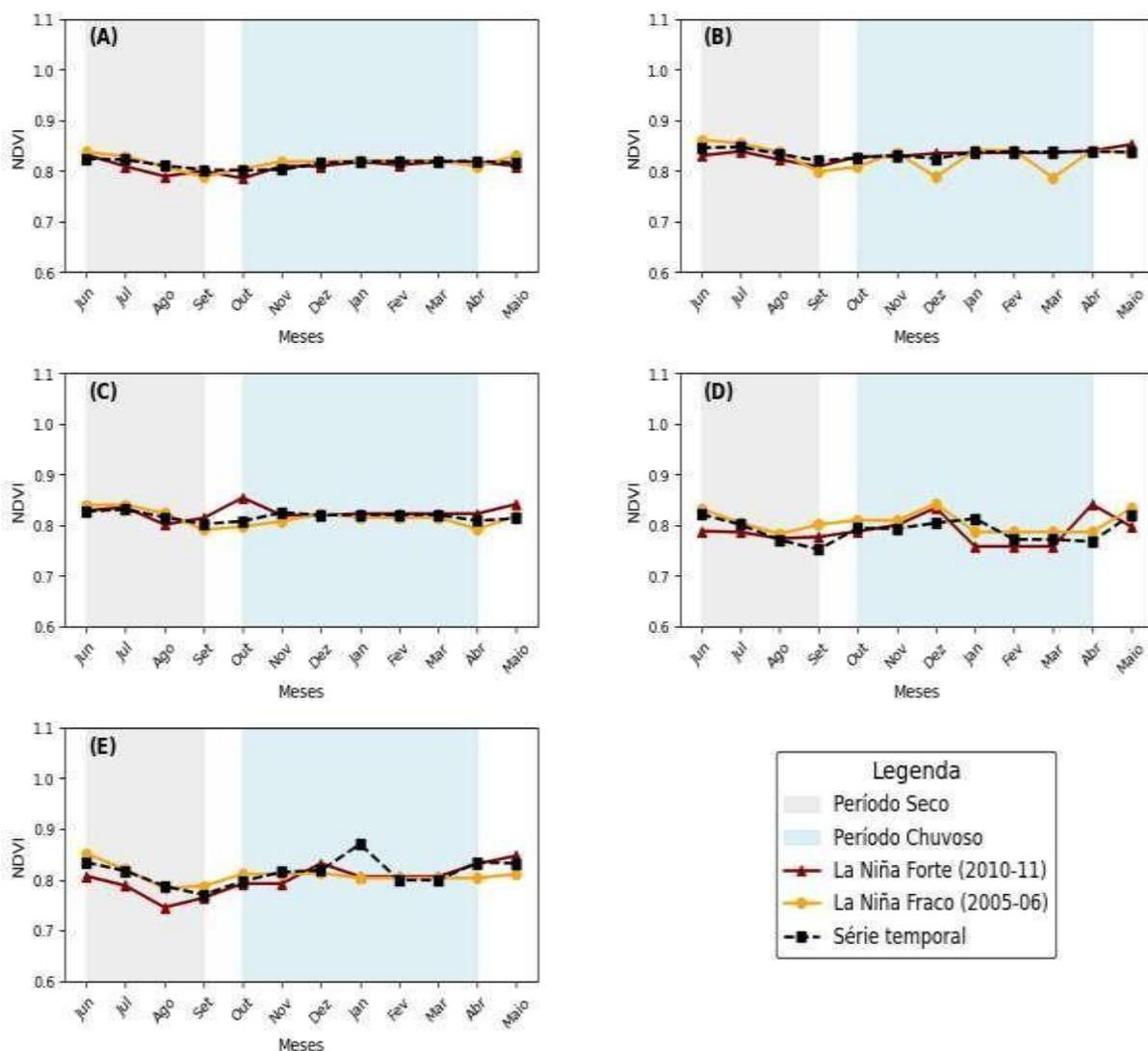
mas também uma positiva (abril +0,02), com correlação positiva com temperatura ($\rho=0.34$); Lábrea teve uma anomalia negativa (fevereiro -0,08) mas também duas positivas significativas (setembro +0,08; março +0,05), associadas a uma forte correlação negativa com temperatura ($\rho=-0.48$).

Figura 9: Série temporal NDVI e totais mensais de NDVI para as cidades de Humaitá (A), Apuí (B), Manicoré (C), Lábrea (D) e Boca do Acre (E), localizadas na mesorregião sul do Amazonas, durante o El Niño forte (2015-2016) e fraco (2004-2005).



Fonte: Autora, 2025

Figura 10: Série temporal NDVI e totais mensais de NDVI temperatura para as cidades de Humaitá (A), Apuí (B), Manicoré (C), Lábrea (D) e Boca do Acre (E), localizadas na mesorregião sul do Amazonas, durante o La Niña forte (2010-2011) e fraco (2017-2018).



Fonte: Autora, 2025

Os eventos La Niña fortes revelaram a maior heterogeneidade nas respostas intermunicipais. As maiores anomalias positivas esperadas em relação a série temporal foram observadas em Manicoré (C), com anomalias positivas em outubro (+0,07) e maio (+0,05), associadas a fortes correlações positivas com umidade ($\rho=0.60$) e precipitação ($\rho=0.42$). Apuí (B) também mostrou a resposta com anomalias positivas (Maio +0,03), correlacionada com umidade ($\rho=0.35$). Lábrea (D) apresentou um padrão misto, com anomalias positivas (Março +0,09; Dezembro +0,04) mas também anomalias negativas (Janeiro -0,08; Junho -0,04), e correlações gerais fracas. Em contraste, Humaitá (A) não mostrou nenhuma anomalia positiva significativa, e

Boca do Acre (E) exibiu um padrão de anomalias negativas (Janeiro -0,08; Junho -0,04; Julho -0,04), apesar das correlações positivas com as variáveis climáticas, destacando a umidade com ($\rho=0.39$).

A LNFr 2017-2018 também mostrou essa divergência: Boca do Acre teve as maiores anomalias positivas (+0,07), mas Apuí e Lábrea registraram anomalias predominantemente negativas (até -0,09). Em Lábrea, essa resposta negativa durante LNFr ocorreu apesar de correlações negativas fracas com precipitação/umidade, mas positiva com temperatura, o que indica uma dinâmica complexa.

A resposta predominante de anomalias negativas de NDVI durante ambos os eventos El Niño (Forte e Fraco) pode estar associado a vulnerabilidade da vegetação regional ao estresse hídrico e/ou térmico associado a este fenômeno, alinhando-se a estudos pan-amazônicos (Nepstad et al., 2007; Lewis et al., 2011). A consistência da resposta negativa em municípios como Humaitá e a concentração das anomalias em períodos sazonalmente críticos (fim da seca/início da chuva) reforça essa interpretação. A correlação negativa frequente com a temperatura sugere que o estresse térmico, possivelmente acoplado ao déficit hídrico, desempenha um papel crucial.

No entanto, a comparação entre ENF e ENFr não indica uma resposta linear simples à intensidade; respostas similares em Humaitá e padrões mais complexos ou mistos (com anomalias positivas) em Manicoré e Lábrea durante ENFr sugerem que a intensidade do evento, por si só, não determina a magnitude da resposta local. Fatores como a trajetória específica das anomalias climáticas locais e a resiliência intrínseca da vegetação em cada município (potencialmente ligada a solos ou composição florística) podem modular o impacto. A anomalia positiva em Boca do Acre durante ENF é uma exceção que merece investigação adicional, podendo estar ligada a um aumento transitório da radiação (Saleska et al., 2007) ou a características específicas da vegetação local.

Os eventos La Niña expuseram uma heterogeneidade espacial mais pronunciada. Enquanto Manicoré (LNF), Apuí (LNF) e Boca do Acre, ambos mostraram, em graus variados, o esperado anomalias positivas em relação a série temporal associado à maior disponibilidade hídrica, a ausência de resposta em Humaitá e as respostas de anomalias negativas em Lábrea (ambos) e Apuí (LNFr)

desafiam a generalização de que La Niña é universalmente benéfica para a vegetação amazônica.

Desse modo, este padrão divergente sugere fortemente que fatores limitantes secundários. Estudos do Hilker et al, (2014) e Morton et al, (2014) apontaram que durante períodos de La Niña com alta nebulosidade e chuvas intensas, a disponibilidade de luz solar pode se tornar o principal fator limitante para a fotossíntese, mesmo com ampla disponibilidade hídrica. Esse efeito é mais pronunciado em florestas densas.

Outro estudo como Parolin (2009), diz que chuvas excessivas podem levar ao encharcamento do solo, especialmente em áreas de várzea ou com drenagem deficiente. Isso causa estresse por falta de oxigênio nas raízes (hipoxia/anoxia) e reduz a atividade metabólica e fotossintética (Parolin, 2009).

Além disso, diferenças na composição de espécies, estrutura da floresta, tipo de solo, topografia e histórico de uso da terra entre os municípios podem modular significativamente a resposta da vegetação aos mesmos sinais climáticos (Asner et al., 2004). E por fim, o índice NDVI tende a saturar em áreas de alta biomassa, como florestas tropicais densas, e torna-se menos sensível a aumentos adicionais na atividade vegetal (Haute et al., 2002).

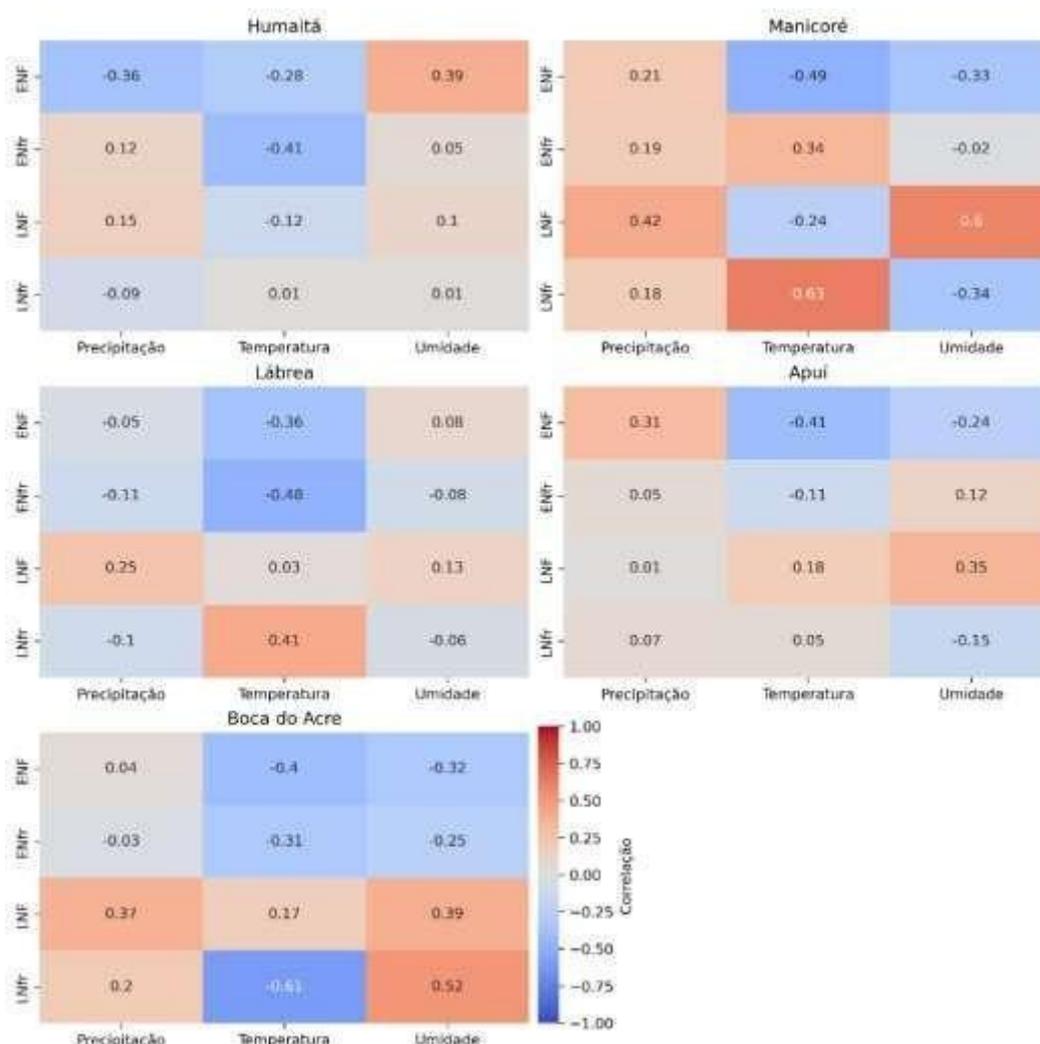
É crucial reconhecer que as variações no NDVI, que refletem a saúde e a produtividade da vegetação, possuem consequências socioecológicas significativas. Uma queda acentuada e prolongada do NDVI, como a observada durante eventos El Niño intensos, sinaliza um ecossistema sob estresse. Isso pode se traduzir em maior risco de incêndios florestais, degradação da cobertura vegetal, perda de habitat e redução da disponibilidade de recursos para a fauna. Consequentemente, pode haver perda de biodiversidade e impactos negativos nas cadeias alimentares (Aragão et al., 2018; Davidson et al., 2012).

Para as comunidades locais, como ribeirinhos e indígenas, cuja subsistência e cultura estão intrinsecamente ligadas à floresta, a redução da produtividade vegetal pode significar escassez de alimentos (caça, pesca, coleta), materiais de construção e plantas medicinais, afetando sua segurança alimentar e bem-estar, como alertam Almeida et al. (2020), comunidades tradicionais amazônicas enfrentam crescente vulnerabilidade nutricional devido à diminuição da disponibilidade de recursos

florestais, com 73% das famílias pesquisadas reportando escassez de alimentos silvestres nos últimos 10 anos.

Por outro lado, respostas heterogêneas ou mesmo aumentos de NDVI durante La Niña, embora possam indicar maior biomassa em alguns locais, não eliminam problemáticas. As chuvas intensas associadas podem causar inundações, afetando áreas de várzea, agricultura de subsistência e a mobilidade dessas populações, além de potencialmente levar à perda de terras produtivas por erosão (Nascimento, 2017)

Figura 11 : Correlação de Spearman entre anomalias NDVI, precipitação, umidade relativa e temperatura do ar nas cidades de Humaitá, Apuí, Manicoré, Lábrea e Boca do Acre, situadas na mesorregião sul do Amazonas, durante os eventos de El Niño forte (2015–2016) e fraco (2004–2005).



Fonte: Autora, 2025.

7.5. IMPLICAÇÕES PARA POLÍTICAS PÚBLICAS, MANEJO E ODS

A heterogeneidade das respostas da vegetação aos eventos de ENOS no sul do Amazonas tem implicações práticas significativas para o desenvolvimento de políticas públicas e estratégias de manejo. A compreensão dessas respostas diferenciadas é fundamental para o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes. Áreas mais vulneráveis ao estresse hídrico durante o El Niño podem necessitar de programas de conservação de água e prevenção de incêndios florestais mais intensivos. Por outro lado, regiões que sofrem com o excesso de umidade durante a La Niña podem demandar estratégias de manejo de recursos hídricos e prevenção de inundações. O planejamento territorial deve considerar essas variações regionais para otimizar o uso da terra e minimizar os riscos ambientais.

Para o manejo florestal sustentável e a agricultura, é crucial adaptar as práticas às condições climáticas esperadas. Durante o El Niño, a implementação de sistemas de irrigação eficientes, a seleção de espécies mais resistentes à seca e a adoção de técnicas de conservação do solo são essenciais. Em anos de La Niña, o manejo deve focar na prevenção de alagamentos, na escolha de culturas tolerantes ao excesso de água e na melhoria da drenagem do solo. A diversificação de culturas e a promoção de sistemas agroflorestais podem aumentar a resiliência dos sistemas produtivos.

Em escala global, o ENOS é reconhecido como um dos principais moduladores da variabilidade climática interanual, com profundos efeitos sobre a economia e a sociedade. Estudos internacionais, como o de Dufrénot, Ginn e Pourroy (2024), demonstram que as fases do ENOS, tanto El Niño quanto La Niña, podem influenciar as condições econômicas globais, impactando a inflação de alimentos e a incerteza da política econômica.

Este estudo contribui diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e ODS 15 (Vida Terrestre). Ao fornecer uma análise detalhada dos impactos do ENOS na vegetação amazônica, o trabalho subsidia a formulação de estratégias de adaptação e mitigação às mudanças climáticas (ODS 13). A compreensão da resposta da vegetação a esses eventos extremos é vital para a conservação da biodiversidade e a gestão sustentável das florestas (ODS 15), auxiliando na proteção dos ecossistemas terrestres e na prevenção da degradação do solo. A integração desses achados em políticas públicas

e práticas de manejo é fundamental para alcançar as metas desses ODS na região amazônica.

A demonstração da variabilidade espacial e da complexidade da resposta da vegetação aos eventos ENOS, mesmo em uma região aparentemente homogênea como a Amazônia, desafia modelos simplistas e reforça a necessidade de abordagens mais localizadas para a gestão de riscos climáticos. Estudos futuros podem aprofundar a compreensão desses padrões utilizando índices de vegetação alternativos (como o EVI), integrando dados de campo sobre solos e estrutura florestal, e investigando os mecanismos fisiológicos subjacentes às respostas contraintuitivas observadas durante a La Niña. O monitoramento contínuo via sensoriamento remoto, informado por estas análises, permanece uma ferramenta essencial para a gestão sustentável do sul do Amazonas frente às mudanças climáticas.

8. CONCLUSÃO

Confirmou-se que ENOS induz anomalias climáticas regionais significativas, com El Niño associado a condições mais quentes/secas e La Niña a condições mais úmidas, embora com variações locais. A análise da resposta da vegetação, avaliada por anomalias de NDVI em relação à série histórica, revelou uma dinâmica complexa e espacialmente heterogênea. Durante El Niño, observou-se uma tendência de redução na atividade fotossintética (anomalias negativas), sendo o impacto particularmente notável no município de Lábrea durante a estação seca e de transição. Em contraste, a resposta à La Niña foi mais variável: enquanto alguns municípios exibiram o esperado aumento na atividade vegetal, outros, como Boca do Acre, apresentaram respostas negativas, mesmo na estação chuvosa, sugerindo a influência de outros fatores limitantes locais que podem superar os benefícios da maior umidade.

Desse modo, os resultados corroboraram parcialmente a hipótese de redução da atividade vegetal (anomalias negativas de NDVI) durante El Niño, associada ao estresse térmico/hídrico, mas com modulação local e respostas não uniformes, o que revela um mosaico complexo, dependente não apenas da intensidade do evento climático, mas crucialmente de fatores ambientais, podendo ser locais que modulam a vulnerabilidade e a resiliência.

Sendo assim, estudos futuros podem ser incorporados por outros índices de vegetação alternativos menos propensos à saturação como o EVI. Incluir análise em escalas espaciais mais finas para identificar focos de maior impacto, integração com dados de campo sobre solos e estrutura florestal, e pela investigação mais aprofundada dos mecanismos fisiológicos subjacentes aos padrões observados, especialmente as respostas negativas à La Niña.

As implicações destes achados são relevantes para o manejo e conservação da região. A identificação de áreas e períodos de maior vulnerabilidade ao estresse induzido pelo El Niño, e a compreensão das respostas complexas à La Niña, são fundamentais para o desenvolvimento de sistemas de alerta precoce, estratégias de manejo adaptativo do fogo e planejamento do uso da terra que considere a resiliência diferenciada das paisagens. Este conhecimento contribui diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 13 (Ação Climática) e 15 (Vida Terrestre).

9. REFERENCIAS

AGHAKOUCHAK, A.; CHENG, L.; MAZDIYASNI, O.; FARAHMAND, A. Aquecimento global e mudanças no risco de extremos climáticos simultâneos: seca de 2014 na Califórnia. *Cartas de Pesquisa Geofísica*, v. 47, n. 4, e2019GL086281, 2020.

ALMEIDA, M. W. B. et al. Vulnerabilidade de populações tradicionais face à mudança ambiental global na Amazônia brasileira. *Ambiente & Sociedade*, v. 23, e01231, 2020. DOI: 10.1590/1809-4422asoc20180123vu2020L3AO.

ARAGÃO, L. E. O. C. et al. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nature Communications*, v. 9, n. 1, p. 536, 2018. DOI: 10.1038/s41467-018-03084-2.

ASNER, G. P. et al. Remote sensing of selective logging in Amazonia: Assessing limitations based on detailed field observations. *Remote Sensing of Environment*, v. 90, n. 4, p. 493-506, 2004. DOI: 10.1016/j.rse.2004.01.015.

BARRY, Roger Graham; CHORLEY, Richard John. *Atmosphere, Weather and Climate*. Routledge, 2010.

BROWN, A.; GREEN, B. O papel da vegetação na regulação do clima. *Ciência Ambiental*, v. 25, n. 5, p. 1-15, 2017.

CAVALCANTI, Iracema Fonseca de Albuquerque. *Influences of ENSO and South Atlantic Ocean on Climate*. Springer, 2012.

CAI, W. et al. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, v. 4, n. 2, p. 111-116, 2014. DOI: 10.1038/nclimate2100.

CARILLA, J. et al. ENSO and climate variability impacts on Andean vegetation using satellite-based indices. *Frontiers in Plant Science*, v. 13, art. 1067096, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.1067096/full>. Acesso em: 23 jul. 2025

CHENG, H. et al. Padrões de mudanças climáticas na Amazônia e biodiversidade. *Comunicações da Natureza*, v. 4, n. 1, 1411, 2013.

CLIMATE PREDICTION CENTER (CPC). Who We Are. CPC - NOAA. Disponível em: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/information/who_we_are/index.shtml. Acesso em: 7 mai. 2024.

DANCEY, C.; REIDY, J. *Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows*. Porto Alegre: Artmed, 2006.

EMANUEL, Kerry A. *Atmospheric Convection*. Oxford University Press, 1994.

DAVIDSON, E. A. et al. The Amazon basin in transition. *Nature*, v. 481, n. 7381, p. 321-328, 2012. DOI: 10.1038/nature10717.

ESQUIVEL-MUELBERT, A. et al. Resposta composicional das florestas amazônicas às mudanças climáticas. *Biologia das Mudanças Globais*, v. 25, n. 1, p. 39-56, 2019.

FAMIGLIETTI, J. S. et al. Extreme climate variability reduces vegetation productivity and alters ecosystem functioning. *Applied Vegetation Science*, v. 27, n. 1, 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/avsc.12624>. Acesso em: 23 jul. 2025.

Ferreira, L. V., Parolin, P., & Cunha, C. N. D. Adaptive strategies to tolerate prolonged flooding in Amazonian trees. *Aquatic Botany*, v. 90, n. 3, p. 236-241, 2009. DOI: 10.1016/j.aquabot.2008.10.004.

FISHER, J. B. et al. Environmental control of canopy conductance in an Amazon forest. *Hydrological Processes*, v. 32, n. 2, p. 144-158, 2018. DOI: 10.1002/hyp.11412.

FISHER, J. T. et al. Degradação da vegetação na Amazônia durante eventos El Niño. ScienceDirect, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352938521000677>

GAGNON, P. et al. Effects of climate on incidence of non-communicable diseases in elderly people. *BMJ Open*, v. 8, n. 7, e018171, 2018. DOI: 10.1136/bmjopen-2017-018171.

GLANTZ, M. H. Currents of Change: Impacts of El Niño and La Niña on Climate and Society. Cambridge University Press, 2001.

GUTIERREZ-CORI. et al. Sobre a relação hidroclima-vegetação no sudoeste da Amazônia durante o período 2000-2019. *Fronteiras na Água*, v. 3, 648499, 2021.

HARTMANN, Dennis L. *Global Physical Climatology*. Elsevier, 2015.

HAUKE, J.; KOSSOWSKI, T. Comparison of Values of Pearson's and Spearman's Correlation Coefficients. *Quaestiones Geographicae*, v. 30, n. 2, p. 87-93, 2011.

HILKER, T. et al. Vegetation dynamics and rainfall sensitivity of the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, Washington, DC, v. 111, n. 45, p. 16041–16046, 11 nov. 2014. DOI: 10.1073/pnas.1404870111. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1404870111>. Acesso em: 26 maio 2025.

HOYOS, N.; ESCOBAR, J.; RESTREPO, J. C.; ARANGO, A. M.; ORTIZ, J. C. Impact of the 2010–2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: the human toll of an extreme weather event. *Applied Geography*, v. 39, p. 16-25, 2013.

HOLTON, James R.; HAKIM, Gregory J. An Introduction to Dynamic Meteorology. Academic Press, 2013.

HUETE, A. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.

HUETE, A. et al. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters*, 33(6), 2006. DOI: 10.1029/2005GL025583

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em IBGE: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/am/humaita/panorama>. Acesso em 05 de mai. de 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Aspectos que caracterizam e determinam o clima da região Amazônica. Disponível em: <<https://www.ecodebate.com.br/2020/10/06/aspectos-que-caracterizam-e-determinam-o-clima-da-regiao-amazonica/>>. Acesso em: 18 abr. 2024.

IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 2021.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C. et al. Record-breaking warming in the Amazon during El Niño 2015-2016. *Scientific Reports*, v. 6, 33130, 2016. DOI: 10.1038/srep33130.

JACÓBSEN, L. O. et al. (2004). Efeitos associados a El Niño e La Niña na vegetação do Estado do Rio Grande do Sul observados através do NDVI/NOAA. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 19(2), 129–140.

JOHNSON, M. S., LEHMANN, C. E., RIHA, S. J., & KERNS, K. (2019). Variabilidade intra-anual de processos ecossistêmicos em uma planície de inundação Neotropical. *Hidrologia e Ciências do Sistema Terrestre*, 23(1), 513-530.

JOHN, R. et al. (2013). Vegetation response to extreme climate events on the Mongolian Plateau from 2000 to 2010. *Environmental Research Letters*, 8(3), 035033.

u

JACOBI, P. R. et al. Climate change, urbanization, and public health: Brazilian perspectives. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 34, n. 3, 2018.

JIANG, Z. et al. Análise do NDVI e das coletas do índice de vegetação por diferença de escala da fração vegetacional. *Sensoriamento remoto do ambiente*, 101(3), 366-378. 2006.

JONES, CD. A vegetação como medida natural de controle da erosão. *Diário de Erosão do Solo*, 10(2), 45-60, 2015

KAYANO, M. T. et al. El Niño e La Niña dos últimos 30 anos: diferentes tipos. Revista Climanalise. Edição Comemorativa de 30 anos, 2016. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/30anos/Kayanoetal.pdf>. Acesso em 31 de set. de 2023.

KUMAR, D. et al. Assessment of climate change impact on reference crop evapotranspiration using multiple climate models and scenarios. Hydrology and Earth System Sciences, v. 22, n. 5, p. 2795-2812, 2018.

KOGAN, F. N.. Satellite-observed sensitivity of world land ecosystems to El Niño/La Niña. Remote Sensing of Environment, 74(3), 445-462, 2000.

KOBAYASHI, H., & Corante, D. G. Condições atmosféricas para o monitoramento da dinâmica da vegetação de longa duração na Amazônia utilizando índice de vegetação por diferença normalizada. Sensoriamento Remoto do Meio Ambiente, 97(4), 519-525.2005.

Lewis, S. L., Brando, P. M., Phillips, O. L., van der Heijden, G. M., & Nepstad, D. (2011). The 2010 Amazon drought. Science, 331(6017), 554-554. DOI: 10.1126/science.1200807

LI, X. et al. Monitoramento da resposta da floresta amazônica a eventos El Niño e La Niña com base nos índices de precipitação GPM e vegetação MODIS. Sensoriamento Remoto, 12(4), 572.2020.

LIU, Y. et al. Permafrost thaw and vegetation dynamics in northern high latitudes under climate change. Remote Sensing, v. 17, n. 1, p. 104, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/17/1/104>. Acesso em: 23 jul. 2025.

HOLTON, James R.; HAKIM, Gregory J. An Introduction to Dynamic Meteorology. Academic Press, 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/am/humaita/panorama>. Acesso em: 5 mai. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Aspectos que caracterizam e determinam o clima da região Amazônica. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2020/10/06/aspectos-que-caracterizam-e-determinam-o-clima-da-regiao-amazonica/>. Acesso em: 18 abr. 2024.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 01 jun. 2025.

JOHNSON, M. S.; LEHMANN, C. E.; RIHA, S. J.; KERNS, K. Variabilidade intra-anual de processos ecossistêmicos em uma planície de inundação Neotropical. *Hidrologia e Ciências do Sistema Terrestre*, v. 23, n. 1, p. 513-530, 2019.

JACOBI, P. R. et al. Climate change, urbanization, and public health: Brazilian perspectives. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 34, n. 3, 2018.

JIANG, Z. et al. Análise do NDVI e das coletas do índice de vegetação por diferença de escala da fração vegetacional. *Sensoriamento Remoto do Ambiente*, v. 101, n. 3, p. 366-378, 2006.

JONES, C. D. A vegetação como medida natural de controle da erosão. *Diário de Erosão do Solo*, v. 10, n. 2, p. 45-60, 2015.

KAYANO, et al. El Niño e La Niña dos últimos 30 anos: diferentes tipos. *Revista Climanalise*. Edição Comemorativa de 30 anos, 2016. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/30anos/Kayanoetal.pdf>. Acesso em: 31 set. 2023.

KUMAR, D. et al. Assessment of climate change impact on reference crop evapotranspiration using multiple climate models and scenarios. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 22, n. 5, p. 2795-2812, 2018.

KOGAN, F. N. Satellite-observed sensitivity of world land ecosystems to El Niño/La Niña. *Remote Sensing of Environment*, v. 74, n. 3, p. 445-462, 2000.

KOBAYASHI, H.; CORANTE, D. G. Condições atmosféricas para o monitoramento da dinâmica da vegetação de longa duração na Amazônia utilizando índice de vegetação por diferença normalizada. *Sensoriamento Remoto do Meio Ambiente*, v. 97, n. 4, p. 519-525, 2005.

LETRAS AMBIENTAIS (2023). Amazônia tem redução histórica das chuvas desde o mês de junho. Laboratório Lapis. Disponível em: <https://www.letrasambientais.org.br/>

LI, X. et al. Monitoramento da resposta da floresta amazônica a eventos El Niño e La Niña com base nos índices de precipitação GPM e vegetação MODIS. *Sensoriamento Remoto*, v. 12, n. 4, p. 572, 2020.

MALHI, Y. et al. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science*, 319(5860), 169-172. DOI: 10.1126/science.1146961, 2008.

MARENGO, J. A.; SOUZA JR, C. Mudanças Climáticas: impactos e cenários para a Amazônia. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2018.

MARENGO, J. A. et al. Sistema sul-americano de monções: lacunas de pesquisa e direções futuras. *Revisões da Ciência da Terra*, v. 84, n. 1, p. 1-20, 2018.

MARENGO, José A.; ESPINOZA, Jhan CARLO. Extreme seasonal climate variations in the Amazon basin: causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, v. 36, n. 3, p. 1033-1050, 2016.

MARENGO, J. A. et al. Mudanças futuras de temperatura e extremos de precipitação na América do Sul derivadas do sistema de modelagem climática regional PRECIS. *Revista Internacional de Climatologia*, v. 38, n. 1, p. 618-631, 2018.

MARENGO, J. A. et al. Climate change in Central and South America. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 32, p. 153-164, 2018. DOI: 10.1016/j.cosust.2018.04.015.

MARTINS, Paulo André da Silva; QUERINO, Juliane Kayse Albuquerque da Silva; MOURA, Marcos Antônio Lima; NUNES, Dorisvalder Dias; QUERINO, Carlos Alexandre dos Santos; MACHADO, Nadja Gomes; BIUDES, Marcelo Sarcadi. Atualização do sistema de classificação climática de Köppen e Thornthwaite e Mather (1955) para o sul do Amazonas. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 43, p. e191137–e191137, 5 maio 2023. DOI: 10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2023.191137.

METCALFE, D. B. et al. Shifts in plant respiration and carbon use efficiency at a large-scale drought experiment in the eastern Amazon. *New Phytologist*, v. 187, n. 3, p. 608-621, 2010.

MUDELSEE, M. *Climate Time Series Analysis: Classical Statistical and Bootstrap Methods*. Springer, 2014.

MOHAMMAD, A. G.; ADAM, M. A. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses. *Catena*, v. 81, n. 2, p. 97-103, 2010.

MOURA, M. M.; DOS SANTOS, A. R.; PEZZOPANE, J. E. M.; ALEXANDRE, R. S.; DA SILVA, S. F.; PIMENTEL, S. M.; ... DE CARVALHO, J. R. Relação dos fenômenos El Niño e La Niña com precipitação, evapotranspiração e temperatura na bacia amazônica. *Ciência do Meio Ambiente Total*, v. 651, p. 1639-1651, 2019.

MOREIRA, S. de F. et al. A influência dos fenômenos El Niño e La Niña sobre a dinâmica climática da região Amazônica. *Multidisciplinary Reviews*, v. 1, e2018014, 2018. DOI: 10.29327/multi.2018014.

MORAES, R. M. et al. *Ecosistemas amazônicos e suas funções ecológicas. Relatório de avaliação da Amazônia 2021*, 1, 2021.

MOREIRA, Samya; CONCEIÇÃO, Cleiciane; CRUZ, Milla; JUNIOR, Antonio. A Influência dos fenômenos El Niño e La Niña sobre a dinâmica climática da região Amazônica. *Multidisciplinary Reviews*, v. 1, p. 1-7, 2018. DOI: 10.29327/multi.2018014.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). Disponível em: <https://www.noaa.gov/>. Acesso em: 15 maio 2024.

NASCIMENTO, A. C. L. do. Resiliência e adaptabilidade dos sistemas socioecológicos ribeirinhos frente a eventos climáticos extremos na Amazônia Central. 2017. 154 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

Nemani, R. R., Keeling, C. D., Hashimoto, H., Jolly, W. M., Piper, S. C., Tucker, C. J., ... & Running, S. W. (2003). Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300(5625), 1560-1563. DOI: 10.1126/science.1082750

NEPSTAD, D. C. et al. Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an Amazon forest. *Ecology*, 88(9), 2259-2269, 2007. DOI: 10.1890/06-1046.1

NOBRE, Carlos A.; MARENGO, José A.; TOMASELLA, Javier. The Amazonian Climate. In: *Interhemispheric Climate Linkages*. Academic Press, 2016. p. 1-29.

NOBRE, Carlos A.; SAMPAIO, GILVAN; SALAZAR, LUIS. Mudanças climáticas e Amazônia. *Ciência e Cultura*, v. 59, n. 3, p. 22-27, 2007.

NOBRE, C. A. et al. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 113, n. 39, p. 10759-10768, 2016.

OLIVEIRA, R. N. A variabilidade da chuva na Amazônia Central: El Niño e La Niña. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

OLIVEIRA, A. P.; SATYAMURTY, P. El Niño: Fenômeno Climático de Grande Impacto Mundial. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 13, n. 1, p. 89-100, 1998.

OLIVEIRA, Fábio J.; SANTOSO, Agus; CAI, Wenju. [Série de Monografias Geofísicas] El Niño Oscilação Sul em um Clima em Mudança || ENOS Teleconexões Atmosféricas. , 10.1002/9781119548164(), 309–335. DOI: 10.1002/9781119548164.ch14, 2020.

OLIVEIRA, C. P. C. A Zona de Convergência Intertropical e sua influência na dinâmica atmosférica tropical e na circulação geral da atmosfera. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015. p. 351-357.

PAVÃO, V. M. et al. Impacto da Conversão da Cobertura Natural em Pastagem e Área Urbana sobre Variáveis Biofísicas no Sul do Amazonas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.32, n.3, p.343-351, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863230002>.

PAROLIN, P. et al. Central Amazonian floodplain forests: tree adaptations in a pulsing system. *The Botanical Review*, 70, 357-380. 2004.

PEIXOTO, José P.; OORT, Abraham H. *Physics of Climate*. American Institute of Physics, 1992.

PONNAMPERUMA, F. N. Effects of flooding on soils. In: KOZLOWSKI, T. T. (Ed.). *Flooding and plant growth*. Orlando: Academic Press, 1984. p. 9-45.

QUESADA, C. A. et al. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. *Biogeosciences*, v. 7, n. 5, p. 1515-1541, 2010.

QUERINO, C. A. S. et al. NDVI espaço-temporal, IAF, albedo e dinâmica da temperatura superficial no sudoeste da floresta amazônica brasileira. *Revista de Sensoriamento Remoto Aplicado*, v. 10, n. 2, p. 026007-026007, 2016.

QIN, Yuanwei; XIAO, Xiangming; WIGNERON, Jean-Pierre; et al. Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature Climate Change*, v. 11, p. 442–448, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01026-5>.

RODRIGUES, A. et al. Produção de mapas de cobertura da terra para a Amazônia brasileira utilizando séries temporais de NDVI SPOT VEGETATION. *Revista Canadense de Sensoriamento Remoto*, v. 39, n. 4, p. 277-289, 2013.

ROOPA, K. R. et al. Climate change and biodiversity conservation in India: a review of the science, policy and mitigation mechanisms. *Environmental Science & Policy*, v. 54, p. 1-10, 2015.

Rouse Jr., J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*. NASA SP-351, 1973. p. 309-317.

SANTOS, M. C. et al. Precipitation trends and their implications for water resources management in the Northeast of Brazil. *Water Resources Management*, v. 32, n. 7, p. 2295-2308, 2018.

SANTOS, S. R. Q. et al. Regime térmico e hídrico do solo para área de floresta tropical em anos de El Niño e La Niña, Caxiuanã –PA: estudo de caso. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 26, p. 367-374, 2011.

SANTOS, C. A. C.; SATYAMURTY, P.; SANTOS, E. M. Tendências de índices de extremos climáticos para a região de Manaus-AM. *Acta Amazonica*, v. 42, p. 329-336, 2012.

SANTOS, V. A.; SOUZA, L. C. A.; RODRIGUES, A. R. Desmatamento e Clima: Interações e Implicações na Amazônia. 202

SALESKA, S. R. et al. Carbon in Amazon forests: unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. *Science*, v. 302, n. 5650, p. 1554-1557, 2003.

Saleska, S. R. et al. Amazon forests green-up during 2005 drought. *Science*, 318(5850), 612-612. DOI: 10.1126/science.1146663, 2007.

STARK, S. C. et al. Reframing tropical savannization: Linking changes in canopy structure to energy balance alterations that impact climate. *Ecosphere*, v. 11, n. 9, e03231, 2020.

SETTE, J. JR.; RIBEIRO, H. Interações entre o clima, o tempo e a saúde humana. *Revista de Saúde Pública*, v. 45, n. 3, p. 667-675, 2011.

SILVA, Viviane Bezerra da; KOUSKY, Vernon Edgar. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall. *Journal of Climate*, v. 25, n. 7, p. 2328-2340, 2012.

SMITH, J. et al. Importância da vegetação para a estabilidade ecológica global. *Revisões Ecológicas*, v. 50, n. 3, p. 201-215, 2018.

SOUZA, E. B. D. et al. Sobre as influências do El Niño, La Niña e Dipolo Atlântico Paterni sobre as chuvas amazônicas durante 1960-1998. *Acta Amazônica*, v. 30, n. 2, p. 305-318, 2000.

United States Geological Survey - USGS. Landsat Missions. Disponível em: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-missions>. Acesso em: 10 maio 2024.

WALLACE, John Michael; HOBBS, Peter Victor. *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Academic Press, 2006.

WU, J. et al. Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems. *Global Change Biology*, v. 23, n. 3, p. 990–1007, 2017.

WORLD WEATHER ATTRIBUTION. Mudanças climáticas foram a principal causa da grave seca na Amazônia em 2023. Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.worldweatherattribution.org/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

YANG, J. et al. Post-drought decline of the Amazon carbon sink. *Nature Communications*, v. 9, 3172, 2018

ZHOU, B.; WEI, T.; WU, X.; LI, Y. Monitoramento de mudanças na vegetação induzidas pela seca na floresta amazônica de 2000 a 2020 usando dados de sensoriamento remoto. *Sensoriamento Remoto*, v. 13, n. 1, p. 66, 2021.

ZHOU, W. et al. Climate extremes and vegetation legacy effects: a global synthesis. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 31, p. 2321–2337, 2023.
Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11368-023-03583-y>. Acesso em: 23 jul. 2025