

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA

ANDRE MEDEIROS ROCHA

**IMPACTO DOS EVENTOS ENOS NA VEGETAÇÃO DA AMÉRICA  
DO SUL**

**SÃO PAULO**  
**20 de outubro de 2023**

ANDRE MEDEIROS ROCHA

IMPACTO DOS EVENTOS ENOS NA VEGETAÇÃO DA AMÉRICA  
DO SUL

Versão Original

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da Universidade de São Paulo, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas (FFLCH/USP)

**Área de Concentração:** Climatologia

**Orientadora:** Profa. Dra. Maria Elisa S. Silva

São Paulo – SP  
2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação na Publicação  
Serviço de Biblioteca e Documentação  
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

Ri            Rocha, Andre Medeiros Rocha  
              IMPACTO DOS EVENTOS ENOS NA VEGETAÇÃO DA AMÉRICA  
              DO SUL / Andre Medeiros Rocha Rocha; orientadora  
              Maria Elisa Siqueira Silva Silva - São Paulo, 2023.  
              121 f.

Tese (Doutorado)- Faculdade de Filosofia, Letras e  
Ciências Humanas da Universidade de São Paulo.  
Departamento de Geografia. Área de concentração:  
Geografia Física.

1. Vegetação. 2. Análise Harmônica. 3. El Niño. 4.  
La Niña. 5. Atmosfera. I. Silva, Maria Elisa Siqueira  
Silva, orient. II. Título.

## **Agradecimentos**

*Agradeço a todas as pessoas que direta e indiretamente me apoiaram durante o período de doutorado;*

*Agradeço a Professora Maria Elisa Siqueira pela paciência, compromisso, suporte e entusiasmo associado a condução da pesquisa;*

*A Universidade de São Paulo pela infinidade de recursos e infraestrutura que propiciaram durante o doutorado, sendo exemplo: I) os 'bandejões' (da Química, Central, Física e Prefeitura), II) as bibliotecas (Florestan Fernandes, IAG, IGc e IO), III) o acesso a VPN USP/Net, IV) os eventos (feiras do livro), V) os cursos gratuitos do Coursera e até mesmo VI) o acesso gratuito ao 8022 e 8012. Todos esses elementos conjuntamente tiveram grandes impacto positivo sobre a condução da pesquisa;*

*Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física (PPGF), a seus funcionários e professores;*

*Aos meus familiares Edinilson (pai), Jaqueline (madrasta), Wilson e Arthur (irmãos) pelo apoio incondicional e incomensurável;*

*Aos colegas do Laboratório de Climatologia e Biogeografia (LCB);*

*Ao amigo Daniel Mendes, particularmente, por compartilhar ótimos momentos de estudo, pesquisa e processamento de dados;*

*Ao apoio financeiro fornecido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) durante todo o período de doutorado.*

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Distribuição da Pressão ao Nível Médio do Mar para Climatologia de janeiro e julho (período 1970-2010), com indicação do Centros de Ação. Dados oriundo da Reanálise NCEP. ....	27
<b>Figura 2.</b> Giro Subtropical e Correntes Oceânicas do Pacífico Sul.....	28
<b>Figura 3.</b> Distribuição da TSM média (°C) de dezembro entre 1970-2010, com destaque para posição aproximada da Piscina Quente, Língua Fria, Corrente Equatorial Sul (CES) e Contracorrente Equatorial (CCE). ....	29
<b>Figura 4:</b> Esquema de representação da ação do <i>feedback de Bjerknnes</i> .....	30
<b>Figura 5.</b> Climatologia dezembro-janeiro-fevereiro – DJF (GPCP) da região Índico-Pacífico (sombreado). As Posição das Zonas de Convergência Intertropical – ZCIT ( <i>Intertropical Convergence Zone – ITCZ</i> ), do Pacífico Sul - ZCPS ( <i>South Pacific Convergence Zone – SPCZ</i> ) e do Índico Sul – ZCIS ( <i>South Indian Convergence Zone – SICZ</i> ) são apresentadas. Setas vermelhas indicam climatologia DJF do vento de superfície oriundo do ERA40. <b>Fonte:</b> Vincent et al., (2011).....	31
<b>Figura 6:</b> Esquematisação das Condições de Circulação Atmosférica e Oceânica durante as Fases Positiva (La Niña) ( <b>a</b> ) e Negativa (El Niño) ( <b>b</b> ) da Oscilação Sul. A TSM apresentada, à título de exemplificação do fenômeno, é referente a dez/1997 (a) e dez/1999 (b), meses representativos de evento EN e LN. As <i>setas sólidas e tracejadas</i> representam respectivamente a circulação de superfície e oceânica, com sua espessura significando intensidade do fluxo, variável conforme o evento (seja EN ou LN). A seta roxa expressa o sentido de movimentação das ZCs .....	33
<b>Figura 7:</b> Padrão de Circulação de Walker durante condições (a) El Niño e (b) La Niña. ....	34
<b>Figura 8:</b> Características Físicas da Área de Estudo .....	37
<b>Figura 9:</b> Série temporal do índice ONI, com indicação dos eventos El Niños e La Niñas....	43
<b>Figura 10:</b> Fases e Pontos de Transição do ciclo fenológico. ....	44
<b>Figura 11.</b> Distribuição da variabilidade explicada ( $R^2$ ) entre classes de frequência (f), compostas por harmônicos (k): <b>f: &gt; 20a</b> (k = [1-2]), <b>f: &gt; 7-20a</b> (k = [3-6]), <b>f: 2-7a</b> (7-21), f: 13-23m (22-42) e f: $\leq 12m$ (43-258) para 18 tipos de índices climáticos. Período de análise de 1979 a 2021, com n = 516 e número máximo de harmônicos ( $k_{max}$ ) = 258. ....	46
<b>Figura 12.</b> Distribuição da variabilidade explicada ( $R^2$ ) entre harmônicos (k) 1 a 24 para 12 tipos de índices climáticos. Período de análise considerado: 1989-2021, n = 516 e $k_{max}$ = 258. ....	48
<b>Figura 13.</b> Distribuição da variabilidade explicada ( $R^2$ ) entre classes de frequência (f) para cinco períodos de tempo entre 1870 a 2022. Para cada período análise considerado, n = 408 e $k_{max}$ = 204. ....	49
<b>Figura 14.</b> Distribuição da variabilidade explicada ( $R^2$ ) entre harmônicos 1 (f = 34 anos) a 24 (f = 1,4 anos) para cinco períodos de tempo entre 1870 a 2022. Para cada período análise considerado, n = 408 e $k_{max}$ = 204. ....	50
<b>Figura 15.</b> Proporção de variabilidade explicada ( $R^2$ em %) acumulada da Precipitação (mm) para harmônicos (k) com frequência de (a, c) 2 a 7 anos ( $4 < k < 18$ ) e (b, d) $\leq 12$ meses ( $k > 17$ ) para GPCP (a-b) e GPCC (c-d).....	54

- Figura 16.** Climatologia (1982-2015) da Precipitação (mm) - GPCC com discriminação de valores: (a) máximo, (b) mínimo, (c) amplitude e (d) total, segundo classes de percentis P10, P20, P40, P60, P80 e P90. .... 56
- Figura 17.** Proporção de variabilidade explicada ( $R^2$  em %) acumulada da Temperatura do Ar (Udel) para harmônicos (k) com frequência de (a) 2 a 7 anos ( $4 < k < 18$ ) e (b)  $\leq 12$  meses ( $k > 17$ ). .... 58
- Figura 18.** Climatologia (1982-2015) da Temperatura do Ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) - Udel com discriminação de valores: (a) máximo, (b) mínimo, (c) amplitude e (d) média. Polígonos em azul (preto) apontam áreas em que o sinal de 2-7a ( $\leq 12\text{m}$ ) possui  $R^2$  acumulado explicativo superiores ao P95. ... 59
- Figura 19.** Proporção de variabilidade explicada ( $R^2$  em %) acumulada do NDVI (GIMMS) para harmônicos (k) com frequência de (a) 2 a 7 anos ( $4 < k < 18$ ) e (b)  $\leq 12$  meses ( $k > 17$ ). Os gráficos em cada quadro representam máximo (vermelho sólido), média (preto sólido) e mínimo (vermelho pontilhado) longitudinal de  $R^2$  para cada latitude. .... 60
- Figura 20.** Climatologia (1982-2015) da NDVI - GIMMS com discriminação de valores: (a) máximo, (b) mínimo, (c) amplitude e (d) média. .... 62
- Figura 21.** Proporção de variabilidade explicada ( $R^2$  em %) para frequência a) f: 2-7a e b)  $f \leq 12\text{m}$  por variável – Globo ..... 63
- Figura 22.** Áreas em que  $R^2$  (sinal de 2-7a) de a) NDVI, b) TAR e c) PR é  $> P80/P90$  e áreas de interseção para d) NDVI ( $R^2 > P90$ ) e TAR e PR ( $R^2 < P80$ ), e) NDVI ( $R^2 > P90$ ) e TAR ( $R^2 > P80$ ) e f) NDVI ( $R^2 > P90$ ) e PR ( $R^2 > P80$ ). Áreas cinzas (a-c) representam setores com  $R^2 \leq P25$ . Valores de percentis de  $R^2$  utilizados são:  $R^2P90$  (NDVI) = 9,61%,  $R^2P80$  (PR) = 6,36% e  $R^2P80$  (TAR) = 1,60 ..... 65
- Figura 23.** Sumário da variabilidade explicada ( $R^2$ ) pela frequência de 2-7 anos na América do Sul, para variáveis Precipitação (a, d), Temperatura do Ar (b, e) e NDVI (c, f). A Média (g, j), Coeficiente de Variação (h, k) e Rank (i, l) foram utilizados para análise da média e variabilidade do sinal, quando considerado as três variáveis. Rank =  $(CV^+ + \text{Media})/2$ , onde  $CV^+ = (-CV)/\text{máx}(CV)$ . Logo altos (baixos) valores de média (CV) representam altos valores de Rank..... 70
- Figura 24.** Sobreposição das áreas com  $R^2 > P95$  para as classes de a) Uso e Cobertura do Solo e b) biomas. Valores máximos de  $R^2$  são apresentados por classes de c) USC e d) Biomas, com indicação das ecorregiões de Olson que abrigam tais áreas. .... 74
- Figura 25.** Distribuição dos a) 25% e b) 5% de áreas da América do Sul (critério de seleção: percentis P75 e P95, respectivamente) com maiores valores de correlação Linear PR-ONI, TAR-ONI e NDVI-ONI (dentre todas as defasagens) para as defasagens de 0 a 12 meses. A defasagem atribuída (lag) se refere a defasagem em que ocorre máxima correlação absoluta 78
- Figura 26.** Correlação temporal, sem defasagem temporal, entre ONI e (a) Precipitação (CHIRPS), (d) Temperatura do Ar (Udel) e (g) NDVI (GIMMS). Correlação máxima dentre as defasagens de 0 a 12 meses para (b) precipitação, (e) temperatura do ar e (h) NDVI. Defasagem temporal em que é observado o máximo valor de correlação linear para (c) precipitação, (f) temperatura do ar e (i) NDVI. Os quadrantes menores interiores a cada quadro, com cores amarela e roxa, representam as áreas com valores de correlação negativa e positiva, respectivamente. As áreas hachuradas nos mapas de correlação linear sem defasagem temporal (a, d, g) indicam os valores significativos ( $p = 0,2$ ). .... 80
- Figura 27.** Correlação temporal, sem defasagem temporal, entre NDVI e (a) Precipitação (CHIRPS), (d) Temperatura do Ar (Udel) e entre Precipitação (CHIRPS) e (g) Temperatura do

Ar (UDel). Correlação máxima dentre as defasagens de 0 a 12 meses para (b) NDVI-precipitação, (e) NDVI-temperatura do ar e (h) precipitação-temperatura do ar. Defasagem temporal em que é observado o máximo valor de correlação linear para (c) precipitação, (f) temperatura do ar e (i) NDVI. Os quadrantes menores interiores a cada quadro, com cores amarela e roxa, representam as áreas com valores de correlação negativa e positiva, respectivamente. As áreas hachuradas nos mapas de correlação linear sem defasagem temporal (a, d, g) indicam os valores significativos ( $p = 0,2$ ). ..... 83

**Figura 28** - Distribuição dos a) 25% e b) 5% de áreas da América do Sul (critério de seleção: percentis P75 e P95, respectivamente) com maiores valores de correlação linear NDVI-PR, NDVI-TAR e TAR-PR (dentre todas as defasagens) para as defasagens de 0 a 12 meses. A defasagem atribuída (lag) se refere a defasagem em que ocorre máxima correlação absoluta 84

**Figura 29.** Anomalias médias de Temperatura do Ar (filtro para frequência > 12 meses) observadas para os trimestres pertencentes ao ciclo de vida de 12 meses (ano do evento [0] a ano posterior [1]), para períodos ENs, LNs e Neutros. A lista de intervalos (anos) ENs, LNs e Neutros encontram-se descritos em metodologia. JJA = junho-julho-agosto, SON = setembro-outubro-novembro, DJA = dezembro-janeiro-fevereiro e MAM = março-abril-maio. As imagens menores ilustram áreas em que o absoluto da anomalia durante ENs ou LNs é superior ao absoluto da anomalia durante Neutro [(|EN| > |N| ou LN > |N|). Cores amarela e roxo representam Evento > Neutro e Neutro > Evento, respectivamente. .... 87

**Figura 30.** Mesmo de 29, mas para Precipitação..... 87

**Figura 31.** Mesmo de 29, mas para NDVI..... 89

**Figura 32.** Mesmo de 31, mas para eventos ENs e LNs fortes e muito fortes. .... 90

**Figura 33.** Síntese das características dos quatro pontos amostrais. Imagens das quatro ecorregiões de Olson obtidas disponíveis em: <https://www.oneearth.org/>. AH = Análise Harmônica, r = correlação linear, CV = coeficiente de variação. .... 92

**Figura 34.** Médias mensais (1982-2015) de NDVI (GIMMS), temperatura do ar (UDel) e precipitação (CHIRPS) e séries NDVI 1982-2015 (filtro > 9m) e Anomalias de NDVI (filtro > 12m). Ondas quadradas representam respectivamente períodos ENs (> 0), LNs (<0) e períodos neutros (=0). .... 93

**Figura 35.** Ciclo fenológico de NDVI para Área 1: Tucano-BA. Médias de todos os anos dos eventos (ENs, (a), LNs (d)), anos dos eventos mais fortes (ENs, (b), LNs (e)) e anos dos ciclos mais correlacionados (ENs, (c), LNs (f)). Linha preta em a-f representa média mensal NDVI (1982-2015). Barras de erro possuem alfa = 0,1 (confiança = 90%). Anomalias de Ciclos fenológicos em relação a média mensal NDVI são dispostos para ENs (g) e LNs (h). Barras vermelha/ azul, linha preta sólida e linha preta tracejada representam eventos totais, mais fortes e mais correlacionados, respectivamente..... 94

**Figura 36.** Mesmo de 35, mas para Área 4 – Argentina..... 96

**Figura 37.** Mesmo de 35, mas para Área 2 – Japurá-AM..... 97

**Figura 38.** Mesmo de 35, mas para Área 3 – Uruguai..... 98

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Distribuição dos harmônicos (k), conforme grupamentos de frequências (f) empregados na análise. ....	41
<b>Tabela 2:</b> Características de frequências referentes aos conjuntos de harmônicos das AHs 1 e 2. ....	42
<b>Tabela 3:</b> Descrição dos eventos El Niños e La Niñas contemplados no período de estudo ..	44
<b>Tabela 4:</b> Distribuição dos harmônicos (k), conforme grupamentos de frequências (f) empregados na análise. ....	44
<b>Tabela 5.</b> Valores de variabilidade explicada ( $R^2$ ) e amplitude máxima (A) para séries temporais dos harmônicos (k) componentes das subfrequências (f) de 2 a 3 anos, 3 a 5 anos e 5 a 7 anos. ....	51
<b>Tabela 6.</b> Máximo de variabilidade explicada ( $R^2$ ) associada ao sinal de 2-7a para distintas classes de a) Biomass (Olson) e b) Uso e Cobertura do Solo (MCD12C1).....	67
<b>Tabela 7.</b> Variabilidade explicada ( $R^2$ ) pela frequência de 2-7a, para variáveis Precipitação, NDVI e Temperatura do Ar dos três setores com máximo $R^2$ (limiar: percentil 95 – P95), considerando análises harmônicas com efeito (AH1, Fig. 23a-c) e sem efeito (AH2, Fig. 23d-f) do ciclo anual.....	71

## RESUMO

ROCHA, A. M. **Impacto dos Eventos ENOS na Vegetação da América do Sul**. 2023. Tese (Doutorado em Geografia Física - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023).

O El Niño-Oscilação Sul (ENOS) constitui o principal modo de variabilidade interanual (2-7-a) sobre o clima tropical, exercendo influência sobre variáveis atmosféricas e de superfície de diversas localidades. Estudos anteriores apontam setores da América do Sul (AS) onde o ENOS apresenta papel contundente em produzir anomalias de precipitação e temperatura, ocasionando impactos indiretos sobre propriedades da vegetação, tal como atividade fotossintetizante e conteúdo de carbono armazenado na vegetação. Apesar de serem conhecidas as áreas em que o sinal ENOS é mais intenso na AS, os estudos que associam ENOS a variáveis atmosféricas e de superfície não apontam de forma integrada e incisiva os tipos de vegetações mais afetados. O estudo presente objetiva explorar tal lacuna, com vista a identificar os tipos de vegetação da América do Sul mais impactados pelos eventos ENOS no período 1982-2015, a partir do uso de três variáveis: precipitação, temperatura do ar e NDVI. Para mensurar possíveis relações entre características da vegetação e o ENOS, empregou-se as técnicas de: I) Análise harmônica, II) Análise de correlação linear e III) Análise de composições trimestrais de anomalias. Os três métodos permitiram computar a proporção da variabilidade explicada pela frequência ENOS, identificar outras possíveis oscilações com sinal similar ao ENOS, mensurar o grau de linearidade e defasagem temporal entre ENOS e as variáveis e apontar a temporalidade (trimestre de ocorrência) das anomalias das variáveis durante ciclos de vida médios de eventos ENOS. Em termos da análise harmônica, os resultados apontaram que poucos índices climáticos (QBO, DMI e PDO) apresentam componente interanual ( $R^2$ ) elevado (30-80%) como os índices associados às regiões niños (> 54%). Identificou-se que a frequência interanual ENOS perpassa por períodos de alta (1960-1993) e baixa (1900-1933) atividade, implicando que o possível efeito ENOS nas variáveis consideradas apresenta ampla variação de intensidade ao longo do tempo. Em escala global, observou-se que frequências intra-aneais ( $\leq 12m$ ) explicam mais de 65% da variabilidade temporal da precipitação, temperatura do ar e NDVI em 90% das áreas. Aliás, as frequências intra-aneais apontaram correlação negativa alta ( $< -0,9$ ) com frequências interaneais para todas as variáveis. Na AS, os resultados revelaram que 14-30%, 8-13% e 22-43% da variabilidade temporal do NDVI, precipitação e temperatura do ar, respectivamente, são explicadas pela frequência de 2-7-a. Para precipitação e temperatura do ar, as áreas com altos valores de frequência interanual apresentaram ampla similaridade espacial com os resultados para correlação linear entre as variáveis e o índice ONI. Os setores com alto valor de  $R^2$  da componente interanual para NDVI apresentaram maiores similaridades espaciais com as correlações entre NDVI e precipitação e/ou NDVI e temperatura do ar. Os resultados indicaram que os biomas terrestres mais associados à frequência de 2-7-a ocorrem estão em função principalmente do tipo de variável, tendo em vista para cada tipo de bioma, diferentes estresses térmicos e hídricos estão associados a maiores/menores efeitos sobre a fisiologia vegetal. Logo, enquanto formações florestais mostraram ampla associação ao ENOS através da temperatura do ar, formações savânicas-herbáceas e arbustivas-herbáceas demarcaram maiores efeitos da precipitação e NDVI, respectivamente.

Palavras-Chaves: Biomas terrestres. El Niño-Oscilação Sul. Análise Harmônica. Correlação Linear. América do Sul.

## ABSTRACT

ROCHA, A. M. **Impact of ENSO Events on South America Vegetation.** 2023. Thesis (Doctorate in Physical Geography – Faculty of Philosophy, Letters and Human Science, University of São Paulo, São Paulo, 2023).

The El Niño-Southern Oscillation (ENSO) constitutes the main mode of interannual variability (2-7-y) on the tropical climate, exerting influence on atmospheric and surface variables in several locations. Previous studies point to sectors in South America (SA) where ENSO plays a decisive role in producing precipitation and temperature anomalies, causing indirect impacts on vegetation properties, such as photosynthetic activity and carbon content stored in vegetation. Although the areas in which the ENSO signal is more intense in AS are known, studies that associate ENSO with atmospheric and surface variables do not indicate in an integrated and incisive way the types of vegetation most affected. The present study aims to explore this gap, with a view to identifying the types of vegetation in South America most impacted by ENSO events in the period 1982-2015, based on the use of three variables: precipitation, air temperature and NDVI. To measure possible relationships between vegetation characteristics and ENSO, the following techniques were used: I) Harmonic analysis, II) Linear correlation analysis and III) Analysis of quarterly compositions of anomalies. The three methods made it possible to compute the proportion of variability explained by the ENSO frequency, identify other possible oscillations with a sign similar to ENSO, measure the degree of linearity and time lag between ENSO and the variables, and point out the temporality (quarter of occurrence) of the anomalies of the variables during average lifecycles of ENSO events. In terms of the harmonic analysis, the results showed that few climate indices (QBO, DMI and PDO) have a high interannual component ( $R^2$ ) (30-80%) as the indices associated with the Niño regions ( $> 54\%$ ). It was identified that the ENSO interannual frequency goes through periods of high (1960-1993) and low (1900-1933) activity, implying that the possible ENSO effect on the variables considered presents a wide variation in intensity over time. On a global scale, it was observed that intra-annual frequencies ( $\leq 12m$ ) explain more than 65% of the temporal variability of precipitation, air temperature and NDVI in 90% of the areas. Incidentally, intra-annual frequencies showed a high negative correlation ( $< -0.9$ ) with inter-annual frequencies for all variables. In SA, the results revealed that 14-30%, 8-13% and 22-43% of the temporal variability of NDVI, precipitation and air temperature, respectively, are explained by the frequency of 2-7-y. For precipitation and air temperature, areas with high values of interannual frequency showed broad spatial similarity with the results for linear correlation between variables and the ONI index. The sectors with a high  $R^2$  value of the interannual component for NDVI showed greater spatial similarities with the correlations between NDVI and precipitation and/or NDVI and air temperature. The results indicated that the major terrestrial biomes associated with the frequency of 2-7-y occurrence are mainly a function of the type of variable, bearing in mind that for each type of biome, different thermal and water stresses are associated with greater/minor effects on the plant physiology. Therefore, while forest formations showed a broad association with ENSO through air temperature, savanna-grasslands and shrublands-grasslands formations demarcated greater effects of precipitation and NDVI, respectively.

Keywords: Terrestrial Biomes. El Niño-Southern Oscillation. Harmonic Analysis. Linear Correlation. South America.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>12</b>
1. INTRODUÇÃO .....	12
1.1. <i>Objetivo Geral</i> .....	16
1.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	17
1.3. <i>Estrutura da Tese</i> .....	17
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>19</b>
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1. EL NIÑO, LA NIÑA E OSCILAÇÃO SUL:.....	19
2.1.1 Origem e conceituação da terminologia.....	19
2.1.2 Condições Normais de Circulação Oceânica e Atmosférica.....	25
2.1.3 Condições de Circulação Oceânica-Atmosférica durante Eventos El Niño e La Niña.....	31
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>36</b>
3. METODOLOGIA .....	36
3.1. <i>Área de Estudo</i> .....	36
3.2. <i>Materiais e Métodos</i> .....	37
3.2.1 Análise Harmônica.....	39
3.2.3 Análise de Correlação Linear (Temporal e Espacial).....	42
3.2.4 Análise de Composições .....	43
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>45</b>
4.1 <i>Perfil de Frequências de Índices de Oscilações Climáticas</i> .....	45
4.2 <i>Sinal ENOS na América do Sul: Análise de Distribuição Harmônica</i> .....	51
4.2.1. Proporção de Sinal ENOS: Padrão de Precipitação Global.....	51
4.2.2. Proporção de Sinal ENOS: Padrão de Temperatura do Ar Global.....	56
4.2.3. Proporção de Sinal ENOS: Padrão de NDVI Global .....	59
4.2.4. Influência de Sinal ENOS por Variável: análise Comparativa.....	62
4.2.5. Influência de Sinal ENOS sobre a Vegetação .....	66
4.2.6. Influência de Sinal ENOS na América do Sul.....	68
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>76</b>
5.1 IMPACTO LINEAR DO EVENTOS ENOS .....	76
5.2 COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS TRIMESTRAIS DURANTE EVENTOS EL NIÑOS, LA NIÑAS E NEUTROS .....	85
5.3 ANOMALIAS DE COMPORTAMENTO FENOLÓGICO DURANTE EVENTOS EL NIÑOS E LA NIÑAS ..	91
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>99</b>
6. DISCUSSÃO .....	99
<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>110</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>112</b>

## CAPÍTULO 1

### 1. INTRODUÇÃO

É seguramente notório que os estudos relativos à interação oceano-atmosfera e teleconexões alcançaram grande desenvolvimento após a década de 1950, tendo-se em conta que as pesquisas realizadas nesse período permitiram a comunidade científica reunir informações com maior profundidade a respeito do principal modo de variabilidade do clima global (GLANTZ, 1991; MCPHADEN, ZEBIAK e GLANTZ, 2006). Como consequência, em tempos atuais, é de amplo conhecimento que o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) possui relevância num rol de tantas outras oscilações climáticas por isoladamente explicar parcela da variabilidade interanual da precipitação global (DAI et al., 1997; DAI e WINGLEY, 2000).

As flutuações do ciclo hidrológico associados ao ENOS são perceptíveis não somente no Pacífico Sul, área core de ocorrência, mas em vários outros setores longitudinais dos trópicos e por extensão nos extratropicos. Por efeito da amplitude espacial das teleconexões ENOS particularmente sobre a precipitação (ROPELEWSKI e HALPERT, 1987), temperatura (HALPERT e ROPELEWSKI, 1992) e vegetação (CANE et al, 1994; LIU et al., 1994; KOGAN, 2000; ZHAO et al., 2018), vários setores econômicos e campos do conhecimento compactuam interesse mútuo sobre informações de causa, processo, teleconexões e impactos (ZEBIAK et al., 2015), motivados principalmente pela ideia de empregar tais informações como mecanismo para mitigar possíveis efeitos negativos ou, contrariamente, agregar benefícios (PODESTÁ et al., 1999). Porém, a utilização de tais informações com finalidade preditiva de possíveis impactos perpassa fundamentalmente pela prévia compreensão do fenômeno (PODESTÁ et al., 1999) e no caso ENOS, é factualmente observável que a produção de conhecimento ocorreu e ainda sucede de forma gradativa, havendo inclusive lacunas não respondidas.

Sobre particularmente a evolução do conhecimento sobre ENOS, Philander (1990) pontua que o reconhecimento a título científico dos fenômenos El Niño e Oscilação Sul ocorreu respectivamente a partir dos trabalhos de Carrillo, em 1891, e Hildebrandsson, em 1897. As pesquisas de Walker e colaboradores impulsionaram igualmente a construção de conhecimentos, promovendo a definição oficial da Oscilação Sul, assim como confirmando prévias análises de Hildebrandsson e Locker e Locker (1902, 1904). Contudo, o autor citado sublinha que até os anos de 1960, o El Niño era interpretado pelos oceanógrafos como fenômeno restrito a costa da América do Sul, não sendo concebido, portanto, como aquecimento anormal com extensão até o Pacífico Central. De forma igual, Philander (1990) destaca que a

fraca difusão das descobertas de Walker no período posterior a suas publicações contribuiu em maior peso para o escasso progresso relativo à compreensão da interação oceano-atmosfera nesse período. A década de 1960, diferentemente, alavanca a construção de conhecimentos associado ao ENOS até então não observado no período antecedente. Com efeito, Bjerknes (1966, 1969) alterna significativamente a forma pela qual o El Niño e Oscilação Sul eram interpretados, ao demonstrar estatisticamente que as variações de temperatura do Pacífico tropical e as flutuações fora de fase de pressão atmosférica do Pacífico estariam associadas entre si, de tal forma que durante eventos quentes, especialmente, alterações no conteúdo de calor do Pacífico tropical provocariam perturbações nas circulações térmica de Hadley e Walker. Dessa forma, Bjerknes constatou que o transporte de momentum angular para os subtropicais ocorreria nesse cenário em taxas anormais, influenciando, portanto, sobre a circulação de oeste em altos níveis dessa faixa.

Tendo-se por conhecido a potencialidade do ENOS em produzir impactos em escala global evidenciados pelas pesquisas de Bjerknes, principalmente, as consequenciais negativas sentidas em várias partes do globo em função dos El Niños de 1972-73, 1982-83 e 1997-98 despertaram atenção significativa da comunidade científica nas implicações globais dos eventos ENOS (GLANTZ, 1991; MCPHADEN, ZEBIAK e GLANTZ, 2006). Os estudos da década de 1980 e 1990 direcionados a ampliar o conhecimento sobre teleconexões ENOS (WALLACE e GUTZLER, 1981; HOREL e WALLACE, 1981; WEBSTER e HOLTON, 1981; MO e WHITE, 1985; ROPELEWSKI e HALPERT, 1987; WEBSTER e CHANG, 1988; HALPERT e HOPELEWSKI, 1992; AMBRIZZI, HOSKINS e HSU, 1995), assim como o desenvolvimento de iniciativas institucionais como o Programa *Tropical Ocean-Global Atmosphere – TOGA* (período 1984-1995) (MCPHADEN et al., 1998) refletem, particularmente a preocupação da esfera científica no que concerne ao potencial risco socioeconômico associada ao fenômeno, e por isso, a necessidade concreta de sua compreensão como mecanismo de prevenção de danos.

Apesar do conhecimento das teleconexões ENOS ganhar notoriedade principalmente após a década de 1980 (GLANTZ, 1991), a relação ENOS-precipitação constitui pauta antiga de investigação, tendo-se em vista que motivou os estudos iniciais de Walker e Bliss nas décadas de 1920-30 (ROPELEWSKI e HALPERT, 1987; PHILANDER, 1990). Nesse período, aliás, apesar da interação oceano-atmosfera não ser conhecida e tampouco a terminologia ENOS estar em uso (PHILANDER, 1990), os eventos de seca e fome que atingiram a Índia no final do século XIX (PHILANDER, 1990; MISHRA et al., 2019) constituíram o principal mecanismo que impulsionou os estudos Walker e colaboradores. Particularmente, tais estudos

preocupados com os fatores responsáveis por promover variabilidades anormais nas monções indianas acabaram por identificar três oscilações climáticas, dentre os quais, a Oscilação Sul (RASMUSSEN, 1991). Logo, observa-se que os efeitos ENOS sobre atividade convectiva datam desde os primeiros estudos.

Assim como no final do século XIX, a relação ENOS-precipitação ainda se mantém no foco das investigações científicas, principalmente pelo fato das anomalias de precipitação observadas em áreas remotas, através das teleconexões, produzirem efeitos sobre o ciclo hidrológico e por isso impactar indiretamente, mas com relativo peso, vários setores da sociedade (ZEBIAK et al., 2015). Em particular, os impactos sobre a Agricultura se fazem notar de forma explícita, sobretudo por esta atividade historicamente ser responsável pela manutenção das cidades. De fato, a produção agrícola excedente fora a principal responsável pelo surgimento das primeiras cidades e por permitir o indivíduo executar atividades não necessariamente rurais (CARLOS, 1992). Em tempos atuais, a predominância de indivíduos residindo principalmente em áreas urbanas, ~55% da população mundial (WORLDBANK, 2018), corrobora para aumentar a importância das atividades agrícolas e sobretudo, atrair atenção para quaisquer fatores que promovam impactos negativos em tal atividade. Nesse contexto, Zebiak et al. (2015) salienta que nos EUA e Austrália, especialmente, a relação ENOS-agricultura apareceu no âmbito de pesquisa como extensão dos estudos climáticos de teleconexões, sendo motivados, em estudos subsequentes pelo ideário de reunir informações sobre o fenômeno e seus impactos para que, com tal suporte, ser capaz o usuário de antecipar possíveis impactos de oscilações climáticas.

Várias pesquisas desenvolvidas nas últimas décadas aparentam fazer uso da perspectiva apontada por Zebiak et al. (2015). No estudo de Brown, Beurs e Vrieling (2010), os referidos autores destacam o fato de variações na produção agrícola derivadas de flutuações anormais da precipitação constituírem a causa principal de insegurança alimentar na África. O fato descrito é similarmente observado em tantas outras áreas como Estados Unidos (HANSEN, HODGES e JONES, 1997; PETERS, JI e WALTER-SHEA, 2003), Brasil (CIRINO et al., 2015), Argentina (SEILER e KOGAN, 2002) e Indonésia (KIRONO e TAPPER, 1999) sob a forma de fracassos produtivos. Nesse ponto, Anderson et al. (2018) revela maior severidade dos efeitos ENOS sobre a agricultura ao observar que a probabilidade de determinado país experimentar fracassos agrícolas não depende somente se sua produção local é imune aos efeitos de teleconexão ENOS, mas também se áreas produtoras a distância a qual o país possui dependência são impactadas. O raciocínio apresentado revela extrema importância, visto que

um dado país como Paquistão a qual constitui uma das dez nações mais populosas do planeta (World Bank, 2018) e não necessariamente apresenta alta sensibilidade aos impactos ENOS (esquema 6, MCPHADEN, 2002) pode vir a apresentar complicações associadas a insegurança alimentar, simplesmente pelo fato de seus parceiros de importação como Indonésia, Estados Unidos ou Brasil (FAO, 2017a) constituírem, contrariamente, áreas sensíveis aos impactos do fenômeno.

As relações ENOS-Agricultura observadas nos estudos anteriores decorrem principalmente do ENOS produzir perturbações em controlares climáticos tais como radiação solar incidente, temperatura e precipitação que influem diretamente sobre processos de respiração e fotossíntese das plantas (TROPMAIR, 1977; FIGUEIRÓ, 2015). Dessa forma, diante de cenários de estresses térmicos e hídricos induzidos por oscilações climáticas, os processos fisiológicos citados são perturbados. Em termos gerais, é amplamente aceito que vários fatores, tais como topográficos, edáficos e climáticos exercem controle sobre os tipos de vegetação e biomas existentes; de tal forma a proposição dos pedobiomas, orozobiomas e zonobiomas de Walter (1986) expressar o fato que para determinados ambientes e tipos de vegetação, fatores pedológicos, topográficos e climáticos podem ser, um deles, o principal controlador do tipo de bioma (FIGUEIRÓ, 2015). Todavia, ao se considerar os grandes domínios de vegetação, os elementos climáticos possuem maior relevância (TROPMAIR, 1977; ARCHIBOLD, 1995). Os esquemas de classificações de Candolle (1894), Holdridge (1947) e Whittaker (1962) exemplificam particularmente a primazia das características de temperatura e precipitação na diferenciação dos principais domínios de vegetação (FIGUEIRÓ, 2015).

Sobre tal fato, a América do Sul situa-se com determinada particularidade nos padrões de teleconexão ENOS, tendo em vista que possui amplas áreas em que a precipitação e temperatura do ar apresentam sensibilidade a eventos quentes e frios do Pacífico. Em Ropelewski e Halpert (1987), através de análises harmônicas e de composições, os autores identificaram 17 áreas globais em que o ENOS possui efeitos mais consistentes com as anomalias de precipitação; sendo o sudeste e noroeste da América do Sul dois setores de efeitos perceptíveis. Para Temperatura, Halpert e Ropelewski (1992), por sua vez, empregando técnicas similares, identificaram 12 áreas globais na qual a relação ENOS-temperatura possui maior consistência, com três destes setores ocorrendo inteiramente na América do Sul, nas faixas Norte, Sudeste e costa oeste (entre Equador e norte do Peru). Além disso, para relação ENOS-Agricultura, a América do Sul se destaca por compreender países que respondem

por parcela significativa dos totais de commodities agrícolas exportados para o mercado internacional, com destaque particular do Brasil (soja, milho, açúcar refinado, café e carne de gado), Argentina (soja e derivados e milho), Equador (bananas) e Chile (uva) (FAO, 2017b).

Expresso tal fato e considerando o papel desempenhado por tais variáveis sobre a variação espacial dos tipos de vegetação, apresenta-se como razoável conjecturar que determinados tipos de vegetação são mais influenciados por eventos do Pacífico Tropical, do que outros propriamente. O estudo de Myneni et al. (1996) apontara através de índice de vegetação que áreas no sudeste e nordeste da América, para o período de 1982-1990, apresentou maiores variações de NDVI durante os dois eventos La Niñas e dois El Niños contemplados. Os autores relativizam tais resultados, tendo em vista que poucos eventos foram considerados para análise; todavia, ao se considerar estudos posteriores (KOGAN, 2000; 2017; ZHAO et al., 2018), observa-se que os setores mencionados novamente são citados como áreas sensíveis aos eventos.

Apesar da intrínseca relação ENOS-América do Sul, é observado que tais informações apresentam dispersas na literatura, sem compor, contudo, estudos integrados que apontem incisivamente os tipos de vegetação ou biomas que são mais afetados por eventos El Niños e/ou La Niñas, assim como quais os principais controladores que intermediam tais relações. Importante relevar que os estudos de Ropelewski e Halpert (1987), Halpert e Ropelewski (1992), Myneni et al. (1996), Kogan (2000), Curtis (2008), Kogan e Guo (2017) e Zhao et al. (2018) são fundamentais por apontar as áreas na qual as teleconexões ENOS possuem relação mais consistente sobre elementos climáticos e/ ou ecossistemas terrestres. No entanto, tais estudos considerados isoladamente dificultam a compreensão de forma integrada da relação ENOS-vegetação. Como observado, esta relação não perfaz eventual conjuntura ou eventos circunstanciais, dado os efeitos sobre ecossistemas terrestres, mas constitui lacuna a ser investigada na presente pesquisa.

### **1.1. Objetivo Geral**

A pesquisa a ser conduzida no âmbito desta tese objetiva investigar os impactos ENOS sobre a vegetação da América do Sul, entre o período de 1981 a 2015, com finalidade de fornecer informações sobre como os principais tipos de biomas terrestres e usos e cobertura do solo são impactados diante de situações variadas de estresse hídrico (precipitação) e térmico (temperatura do ar) associados aos eventos ENOS, informando, nesses termos, as áreas e tipo de vegetação com maior sensibilidade, assim como potenciais controladores, por localidade e grau de defasagem em relação a eventos do Pacífico. Para tal finalidade, a pesquisa empregará

dados de precipitação, temperatura do ar e *Normalized Difference Vegetation Index - NDVI* como parâmetros proxy para identificação dos efeitos ENOS sobre características atmosféricas/da superfície (disponibilidade hídrica e conteúdo de calor do ambiente; conteúdo de clorofila e grau de verdor da vegetação). Para tal finalidade, técnicas de análises harmônica, correlação linear e análise de composições serão aplicadas, sendo que os tipos de vegetações avaliados através de duas bases: biomas terrestres de Olson (OLSON, 2000) e classes de Uso e Cobertura do Solo.

## 1.2. Objetivos Específicos

Para efeito de alcançar o objetivo geral estabelecido, seis objetivos específicos foram definidos como etapas a serem concluídas com vista a levantar respostas que conjuntamente auxiliarão na resolução do problema levantado.

1. Caracterização do perfil espectral dos principais índices climáticos, com intuito de destacar similaridades e diferenças com o perfil espectral ENOS (análise harmônica);
2. Identificação em escala global e América do Sul das áreas em que a frequência de 2-7 anos possui maior parcela explicativa sobre a variabilidade temporal da precipitação, temperatura do ar e NDVI (análise harmônica);
3. Apontamento dos principais tipos de biomas e uso e cobertura do solo sensíveis a variações de precipitação, temperatura do ar e NDVI associadas aos eventos ENOS;
4. Identificação dos setores da América do Sul com maior associação linear entre variáveis consideradas e índice ONI (análise correlações);
5. Apontamento da relação de defasagem entre eventos do Pacífico e o período de anomalias observados na América do Sul (análises de correlação linear e de composições);
6. Identificação do tipo de evento (EN e/ou LN) mais associado a anomalias de precipitação, temperatura do ar e NDVI para áreas de controle (pontos amostrais)

## 1.3. Estrutura da Tese

Para efeito de prévio conhecimento, o estudo adiante está estruturado em 7 capítulos principais. O **Capítulo 1** compreende a Introdução. Nessa parte, será apresentado em qual contexto a pesquisa está inserida, qual é a situação problema levantada e diante disso, o que se objetiva nesse estudo. O Referencial Teórico consiste no **Capítulo 2** e nele serão introduzidos os principais conceitos necessários para amplo entendimento do problema a ser trabalhado. No **Capítulo 3**, será realizado primeiramente o levantamento das principais características

associadas a Área de Estudo, sendo indicada em segunda instância a apresentação das variáveis (operacional / teórica, independente/ dependente) a serem usadas nas análises, dados de entrada, softwares, forma de análise e etapas de processamento, com vista a tornar claro o encaminhamento lógico seguido na pesquisa. Os **Capítulos 4, 5 e 6** constituirão a apresentação dos principais resultados (4-5) e conclusões (6) associados aos três métodos de análises empregados (análises harmônica, de correlação linear e de composições). As Considerações Finais, por fim, serão apresentadas no **Capítulo 7**. Nessa última seção, serão elencadas as principais conclusões alcançadas com a realização da pesquisa, contextualizando-as principalmente em relação à situação problema inicialmente levantada.

## CAPÍTULO 2

### 2. Referencial Teórico

Antes de iniciar propriamente a fundamentação teórica, é necessário destacar que a pesquisa a ser desenvolvida consiste em análise do tipo interferência<sup>1</sup>, cuja atenção está direcionada para a forma pela qual o El Niño-Oscilação Sul promove alterações, mediante mecanismo de teleconexões, sobre a atividade fenológica da América do Sul. Dito isto, fundamentalmente, o ENOS e a atividade fenológica da América do Sul constituem as variáveis independente/ dependente da análise. Dessa forma, como forma de subsidiar o leitor na compreensão dessa interação, o levantamento teórico a seguir objetiva (*1º momento*) apresentar a evolução conceitual dos termos El Niño, La Niña, Oscilação Sul e ENOS. Tal medida é vista como importante, pois permite o leitor observar que as definições relativas a El Niño, La Niña, Oscilação Sul e ENOS são variadas e remontam a períodos históricos distintos, sendo notório, não-raro, confusões em relação ao sentido que um dado termo é empregado (TRENBERTH, 1997; GLANTZ, 2001).

Partindo-se dessa etapa e tendo-se nota sobre qual é o agente de interferência dessa pesquisa (o ENOS), será alvo de análise (*2º momento*) os processos oceânicos-atmosféricos do Pacífico Tropical Sul, os quais aproximadamente definem as condições normais, El Niño e La Niña. De fato, o acoplamento oceano-atmosfera constitui o mecanismo principal do evento ENOS, e dado as mudanças oceânicas e atmosféricas se desenvolverem aproximadamente em fase, o entendimento da ação-resposta oceano-atmosfera e atmosfera-oceano se apresenta como mecanismo de valor para compreensão de sua dinâmica (PHILANDER, 1983). Por fim, a fundamentação teórica encerra direcionando a atenção para (*3º momento*) a variável dependente da análise. De fato, essa última seção contempla demonstrar como o fenômeno ENOS, particularmente, é capaz de promover alterações sobre propriedades atmosféricas/ de superfície da América do Sul. As três seções foram definidas, pois descrevem resumidamente quem é o agente interferente (ENOS), como ele atua (processo) e como produz alterações na variável dependente (efeito), dando subsídio ao leitor nos três aspectos da interação.

#### 2.1. El Niño, La Niña e Oscilação Sul:

##### 2.1.1 Origem e conceituação da terminologia

---

<sup>1</sup> Para mais informações sobre tipos de pesquisa, consultar Volpato (2011)

Um primeiro aspecto a ser observado refere-se a relativa contemporaneidade das noções associadas aos termos *El Niño* e *Oscilação Sul*, tendo-se em conta que seu reconhecimento data de desde final do século XIX. A esse respeito, a primeira menção oficial a ideia de *El Niño* é atribuída a *Luís Carranza*, presidente da Sociedade Geográfica de Lima, na qual em 1891, mediante publicação, descreveu o fato de que uma contracorrente (sentido norte – sul) havia sido observada próxima a costa do Peru (PHILANDER, 1990). No entanto, Glantz (2001) argumenta que fora o capitão da marinha peruana *Camilo Carrillo* que justificara, em 1892, a origem da terminologia *El Niño* no Encontro da Sociedade Geográfica, afirmando que os navegadores peruanos haviam empregado tal termo para designar a corrente de águas quentes intermitente que sazonalmente era observada próxima a costa do Peru e Equador, substituindo a corrente de águas frias característica daquela região. Conforme Carrillo, os navegadores peruanos observavam a descrita corrente de águas quentes em torno do verão austral, com início próximo ao natal, e em função a tal fato, em alusão ao menino Jesus, denominaram-na de *El Niño*, significando *o menino* em espanhol.

Importante destacar que apesar de ser reconhecido a contracorrente de águas quentes na costa do Peru no final do século XIX, o *El Niño* era interpretado nesse período e nos anos seguintes como fenômeno de manifestação e efeitos estritamente locais. Philander (1990) exemplifica, nesse ponto, que em 1895, *Federico Alfonso Pezet* observara que durante a ocorrência do *El Niño*, volumes anormais de chuvas eram verificados em regiões do Peru caracteristicamente desérticas e esse fato, associados a outras alterações concomitantes como declínio da atividade marinha e avícola na costa do Peru constitui prováveis evidências de que a ocorrência do *El Niño* provocava perturbações no sistema climático local como na vida marinha costeira. Contudo, essas manifestações de anomalias oceânicas e atmosféricas associadas ao fenômeno permaneceram como status de fenômeno local por longo tempo, havendo mudança somente a partir dos estudos da década de 1960 (GLANTZ, 2001; PHILANDER, 1990).

Assim como a noção inicial de *El Niño* remete aos anos finais do século XIX, a primeira evidência associada a *Oscilação Sul* fora identificada em 1897 por *Hildebrandsson*, ao notificar que as anomalias de pressão atmosférica de Buenos Aires (Argentina) estavam fora de fase em relação aos valores de pressão de Sidney (Austrália). Partindo-se dessa evidência preliminar, entre 1902 a 1904, *N. Lockyer* e *W. J. S. Lockyer* confirmaram os indícios de flutuações opostas anteriormente destacadas por *Hildebrandsson*, atestando, portanto, haver padrão de oscilação tipo *gangorra* entre os campos de pressão de superfície da região indiana/ circunjunções e a

Argentina; além de observarem que tais padrões de pressão não se restringiam a essas duas áreas, mas tantas outras regiões remotas apresentavam características similares, assinalando extensão global ao fenômeno (PHILANDER, 1990; RASMUSSEN e CARPENTER, 1982)

Apesar do relativo conhecimento em relação à Oscilação Sul, essa terminologia fora somente oficialmente proposta a partir dos estudos de *G. Walker* e *E. W. Bliss* na década de 1920 e 1930. Sobre esse fato, embora a Oscilação Sul e El Niño estejam intimamente associados, tal como se conhece atualmente, Philander (1990) destaca que a pesquisa de Walker e seus antecessores não fora impulsionada originalmente pela relação *EN-OS*. Em Particular, os anos de 1886-1888, 1896-1897 e 1899-1900 constituíram datas na qual a Índia fora intensamente afetada por secas inesperadas, resultando em graves eventos de fome. Dado tais acontecimentos, Walker e colaboradores iniciaram pesquisa direcionada exclusivamente a compreender as variações interanuais das monções, com vista a diretamente ser capaz de prevêê-las. Como resultante, Walker e colaboradores observaram que quando valores anormalmente altos de pressão atmosférica fossem identificados no Pacífico Equatorial leste, baixos valores seriam verificados no Oceano Índico e tal padrão de flutuação irregular seria descrito e oficialmente denominado de *Oscilação Sul*.

Philander (1990) igualmente salienta que as contribuições de Walker e colaboradores revelaram aspectos até então desconhecidos. Em verdade, fora constatado que as flutuações irregulares descritas não se limitavam aos campos de pressão, mas tantas outras variáveis como precipitação e ventos seriam impactadas durante o fenômeno, incluindo inclusive as Monções, que estariam inseridas num mecanismo global de circulação tropical: a Oscilação Sul. Contudo, em função de não se conseguir explicar com fundamentação os processos físicos responsáveis pela natureza irregular da Oscilação Sul, as contribuições de Walker foram fracamente disseminadas no período 1930 a 1960, com conseqüente escassez de progresso.

Partindo-se dos estudos de Walker e Bliss então mencionados, verifica-se que desde tais publicações até início da década de 1960, reduzida atenção fora observada em relação ao avanço na compreensão da Oscilação Sul (RASMUSSEN e CARPENTER, 1982). Com destaque, é possível observar que no período relativamente anterior as publicações seminais de *Jacob Bjerknes*, algumas iniciativas atentaram na explicação dos mecanismos físicos da Oscilação Sul, estabelecendo, inclusive relações entre as interfaces oceano-atmosfera (MOKI, 1981). A título de exemplo, em 1956, *Irving I. Schell*, revisando as características do fenômeno, concluiu que um de dois mecanismos supostamente seria responsável pela OS, estando ambos vinculados às variações na atividade solar. Embasado nisso, Schell suspeitou que o caráter oscilatório da

Oscilação Sul seria derivado de um processo de feedback circular. Nesse processo, o enfraquecimento ou fortalecimento de sistemas de pressão do Pacífico estariam vinculados a advecção de águas frias ou quentes no Pacífico Equatorial. Nessa mesma perspectiva, em 1963, *T. Ichiye* e *J. P. Peterson* verificaram que a variação de intensidade dos ventos alísios teria efeitos sobre o transporte de águas frias e quentes no Pacífico e, portanto, sobre as variações de temperatura de superfície do mar - TSM (MOKI, 1981).

Para esse mesmo período, estudos de Schell (1965), Troup (1965), Berlage (1966) e Doberitz (1968) se enquadram como obras relevantes no levantamento de evidências e teorias direcionadas a explicação da OS (MOKI, 1981; PHILANDER, 1990). Contudo, fora a partir de Bjerknes (1966, 1969 e 1972) que a difusão e reconhecimento da Oscilação Sul adquiriu status em âmbito global (MCPHADEN, 2002). Em verdade, em 1966, utilizando dados de 1957 e 1958 e baseado nos estudos anteriores, *Bjerknes* propôs teoria de interação oceano-atmosfera, na qual mediante variações da intensidade da circulação zonal do Pacífico Equatorial, a ressurgência oceânica na costa da América do Sul, a intensidade das correntes oceânicas e a temperatura de superfície do mar do Pacífico seriam impactadas num efeito em cadeia, de tal forma que nesse processo, interações mútuas entre processos oceânicos e atmosféricos seriam desencadeados e nitidamente os conteúdos (reservatórios) de calor sensível e latente do Pacífico central e leste passariam por alterações (BJERKNES, 1966; MOCK, 1981). Particularmente, Bjerknes (1966) identificou que resultante dessa sucessão de sistemas impactados, a *Circulação de Hadley* equatorial do mesmo setor do Pacífico seria intensificada sob condições de anomalias positivas de TSM, o que consequentemente amplificaria o transporte de momentum absoluto em altos níveis para latitudes médias, exercendo nesses termos influências sobre os ventos de oeste.

Apoiado nas hipóteses então levantadas, Bjerknes, em 1969, propõe o termo *Circulação de Walker* no intuito de descrever a circulação zonal equatorial de natureza termal como importante mecanismo da *Oscilação Sul* de Walker. Nessa proposição, observara que as variações de temperatura do Pacífico Equatorial teriam conexão com as flutuações fora de fase dos campos de pressão do sudeste do Pacífico e leste do Índico e no âmbito de tal interação oceano-atmosfera, seria observado anomalias convectivas positivas em áreas tipicamente secas do Pacífico (BJERKNES, 1969; MOCK, 1981). No ano de 1972, empregando dados de vento, TSM e altura geopotencial, Bjerknes pôde demonstrar de forma mais clara que os efeitos do aquecimento observado em superfície do Pacífico equatorial se estendiam a toda coluna troposférica tropical e, de outro modo, constatou que sistemas de áreas remotas como Baixa da

Aleutas e da Islândia seriam afetados pelas interações oceano-atmosfera de ocorrência no Pacífico equatorial (BJERKNES, 1972; MOCK, 1981).

Em função estudos desenvolvidos na década de 1960, salienta-se que os mesmos desempenharam papel significativo na evolução dos conceitos de El Niño e Oscilação Sul, dado o fato de terem avançado em relação aos conhecimentos acumulados até década de 1930. Em específico, verificou-se que partindo dos mencionados trabalhos, as variações de temperatura do Pacífico equatorial ganharam notoriedade nos trabalhos científicos, sobretudo por a partir das conjecturas estabelecidas tais gradientes interagirem com a circulação de Hadley e Oscilação Sul. As evidências dos processos derivados do acoplamento oceano-atmosfera equatorial afetarem sistemas de latitudes médias igualmente favoreceram a uma mudança da forma de interpretar os fenômenos em pauta. Como resultante, é observado nas décadas seguintes surgimento de vários novos termos. (ACEITUNO, 1992; TRENBERTH, 1997)

Sobre os fatos expostos, partindo-se dos estudos de Ramage em 1975, já é possível detectar algumas alterações conceituais. Com efeito, o referido autor sublinha que a terminologia *El Niño* descreve alterações na temperatura de superfície do mar da costa da América do Sul, as quais se estendem em direção ao Pacífico Tropical, ressaltando que os efeitos derivados desse evento não se manifestam unicamente no campo oceanográfico, mas mutuamente na interface oceano-atmosfera (RAMAGE, 1975). Relevante perceber que essa mesma linha de pensamento é seguida em vários estudos posteriores. Philander (1983), à exemplo, relata que as anomalias positivas de TSM do Pacífico tropical detectadas em estudos anteriores remetem ao fenômeno El Niño, a qual, em sua acepção original, fazia referência somente aos fluxos de águas quentes que se desenvolviam anormalmente na costa da América do Sul. Em síntese, Philander (1983, 1985) afirma que para os estudos correntes, tal terminologia é reservada aos eventos quentes de TSM da costa da América do Sul e Pacífico Tropical.

O período essencialmente posterior a 1970 é marcado de outro forma pelas primeiras referências aos eventos frios de TSM do Pacífico equatorial. É relevante sublinhar que apesar dos fenômenos *El Niño* e *Oscilação Sul* serem preliminarmente reconhecidos desde final do século XIX, os eventos frios de TSM somente receberam oficialmente a designação *La Niña* em 1985 pelo oceanógrafo George Philander (GLANTZ, 2001; MCPHADEN, 2002). Importante salientar que referências como *abnormally cold water* ou *El Niño inverse* (NAMIAS, 1976), *anti-El Niño* (QUINN et al., 1978), *counter-El Niño* ou *its antithesis* (COVEY e HASTENRATH, 1978) já haviam sido cunhado em estudos anteriores; contudo,

observa-se que as atenções direcionadas a La Niña somente ganharam notoriedade no final da década de 1990 (GLANTZ, 2001).

Sobre o fato apresentado, Glantz (2001) descreve que com exceções principalmente dos estudos de Harry Van Loon, George Kiladis, James O. Brien e Stanley Changnon, poucos trabalhos estavam interessados intrinsecamente nos eventos frios do Pacífico. À propósito, o referido autor argumenta que concorre para a situação descrita o fato de que no período entre as décadas de 1970 a 1990, os eventos quentes de 72-73, 82-83 e 97-98 contribuíram, considerando seus impactos, em aumentar a importância atribuída aos eventos El Niño, acabando por camuflar a figura ainda em ascensão dos eventos frios. Como resultante, tipicamente era observado em vários países a percepção de que condições diferentes de El Niño configuram situação normal no Pacífico, de tal modo que anomalias do Pacífico pudessem se resumir unicamente a condições *El Niño* e condições normais de *Non-El Niño*. Dessa forma, associado a tais razões e naturalmente a forma como os *La Niñas* eram classificados (resultando na ideia alta infreqüência associada), no período citado, prevalecia relativo desprestígio em relação aos eventos frios. Contudo, Glantz (2001) pontua que o rápido decréscimo da TSM do Pacífico verificada em 1998, marcando fim do El Niño, com progressivo decaimento da temperatura altera a forma como os eventos frios eram interpretados. Com destaque, a intensificação de furacões no Atlântico, a difusão de ondas de calor e secas em várias partes do globo corroboraram em atribuir importância aos efeitos advindos dos eventos La Niña.

Além dos termos acima, em 1983, estudos como de Cane (1983), Nicholls (1983), Philander (1983) e Rasmusson e Wallace (1983) destacaram o termo *ENSO* até então pouco difundido. Aceituno (1992) destaca que o referido acrônimo passa a ser empregado especialmente após o estudo de Rasmusson e Carpenter (1982). Em 1983, a título de exemplo, Philander expressa que apesar das alterações oceanográficas (El Niño) e atmosféricas (Oscilação Sul) representarem fenômenos independentes, sua referência conjugada se dá pelo termo *El Niño-Southern Oscillation – ENSO* (El Niño-Oscilação Sul – ENOS). Trenberth (1997), a esse ponto, destaca que tal uso é reservado particularmente nos casos em que as componentes descritas (EN e OS) colaboram mutuamente para o fenômeno.

No entanto, é patente ressaltar que tal como o termo EN, historicamente é possível verificar que o acrônimo ENOS registra variantes de significado na literatura. De fato, Aceituno (1992) pontua que originalmente o termo ENOS fora proposto para diferenciar eventos quentes do Pacífico Tropical daqueles de ocorrência particular à costa da América do Sul; contudo, um exame na literatura revela que não raro o fenômeno EN é empregado para designar

exclusivamente o acrônimo ENOS, sendo que em outros casos, o uso El Niño remete a somente uma das fases da OS.

Contudo, destaca-se a esse ponto, que apesar da evolução histórica dos termos citados vierem acompanhados por mudanças em sua conceituação, no escopo da presente pesquisa, por critério de maior recorrência de uso, o termo ENOS será empreendido como variável teórica parâmetro (variável independente da análise), em função sua conotação descrever mutuamente a interação oceano-atmosfera que se processa de forma ampla no Pacífico Tropical (DESER e WALLACE, 1987). A forma de referência encontrada em Philander (1985) e McPhaden et al. (2006) exemplificam esta última forma de uso, em que as flutuações entre as fases fria e quente de TSM do Pacífico Tropical são complementares entre si e conjuntamente descrevem a terminologia ENOS.

Nessa acepção, os eventos coletivamente referidos como ENOS descrevem, portanto, o ciclo de caráter oscilatório em escala interanual, com flutuações entre fases quente (El Niño), fria (La Niña) e estados neutros. Os eventos EN/ LN e OS constituem, portanto, respectivamente as componentes oceanográficas e atmosférica do fenômeno (MCPHADEN, 2002; TRENBERTH, 1997). Nas seções posteriores, particularmente essa última conotação de ENOS será empregada.

### *2.1.2 Condições Normais de Circulação Oceânica e Atmosférica*

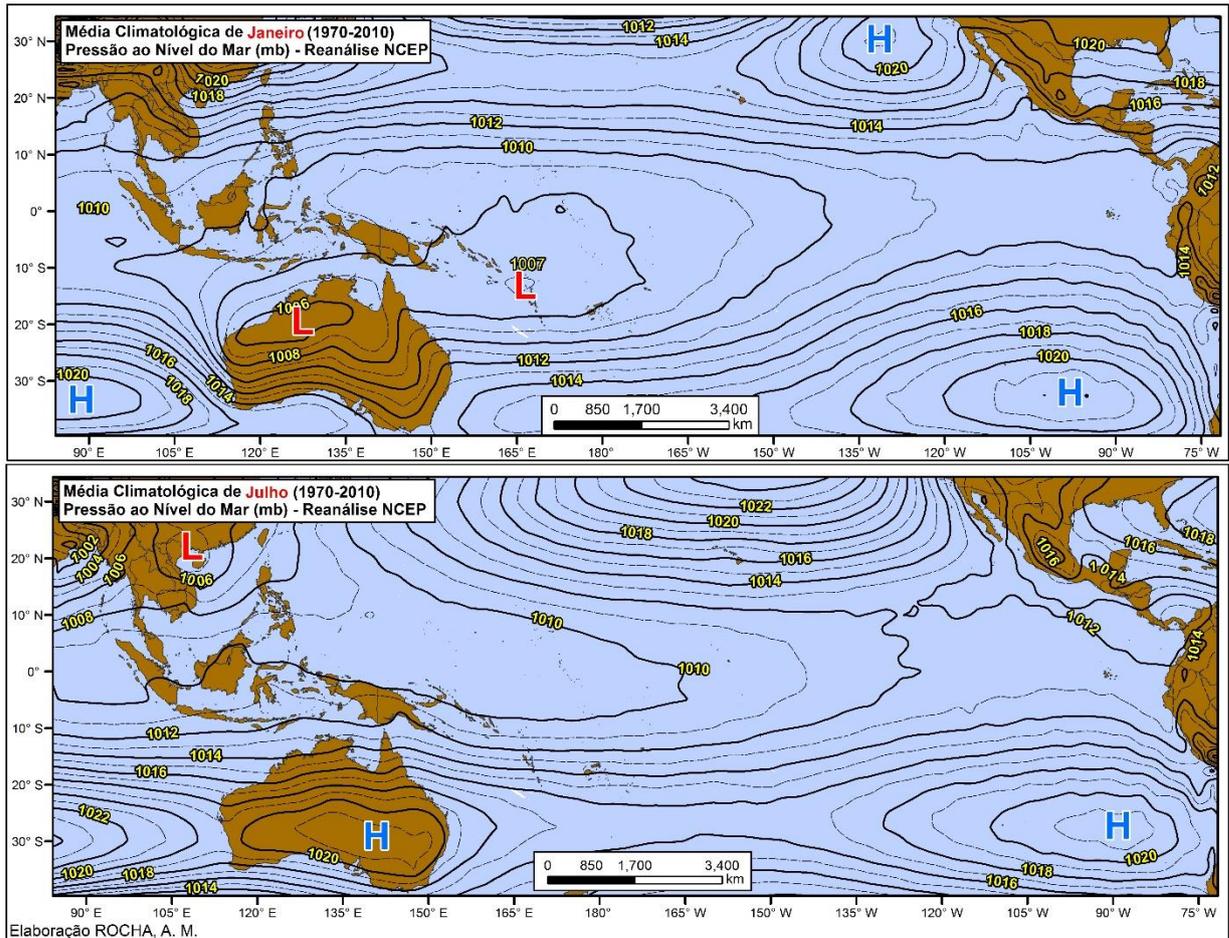
Por se tratar o ENOS um fenômeno que se desenvolve no Pacífico Tropical, observa-se em primeira instância que a faixa tropical se caracteriza, em termos de Balanço de Energia, por possui maior disponibilidade energética da superfície terrestre, com saldo positivo resultante da quantidade de radiação solar incidente nos trópicos superar as perdas por radiação de onda longa, calor latente e calor sensível. Na faixa extratropical, a situação é oposta, registrando perda de onda longa superior ao total de onda curta incidente. Em função disso, as águas oceânicas mais quentes são encontradas na faixa tropical e tal disponibilidade energética da superfície do mar atua como fonte de calor e umidade para as massas de ar que adentram em tal região (TALLEY et al., 2011).

O gradiente latitudinal de temperatura descrito possui importante papel na distribuição dos centros de ação, tendo-se em vista que consiste no fator preponderante na determinação inicial do gradiente de pressão horizontal. De fato, associado a tal fator, o movimento de rotação da Terra (Força de Coriolis) e as diferentes capacidades térmicas entre oceano e continente são responsáveis conjuntamente pela distribuição espacial sazonal dos centros de ação no Pacífico.

Essencialmente, dois centros dominam a região do Pacífico Tropical: (1) a Alta Subtropical do Pacífico Sul (ASPS), situada no sudeste do Pacífico Sul e (2) o Centro de Baixa Pressão no Sudeste asiático-Oeste do Pacífico. Assim como os demais centros subtropicais do Hemisfério Sul (HS), com auxílio da **figura 1**, é possível observar que a ASPS apresenta característica de semi-estacionaridade ao longo do ano, com forte intensidade durante o solstício de verão do HS (janeiro) e enfraquecimento durante o solstício de inverno (julho). Na porção oeste, no entanto, a baixa pressão apresenta característica de migração meridional ao longo das estações, situando-se durante o verão (HS), principalmente sobre a Austrália e durante o inverno, em posição mais ao norte.

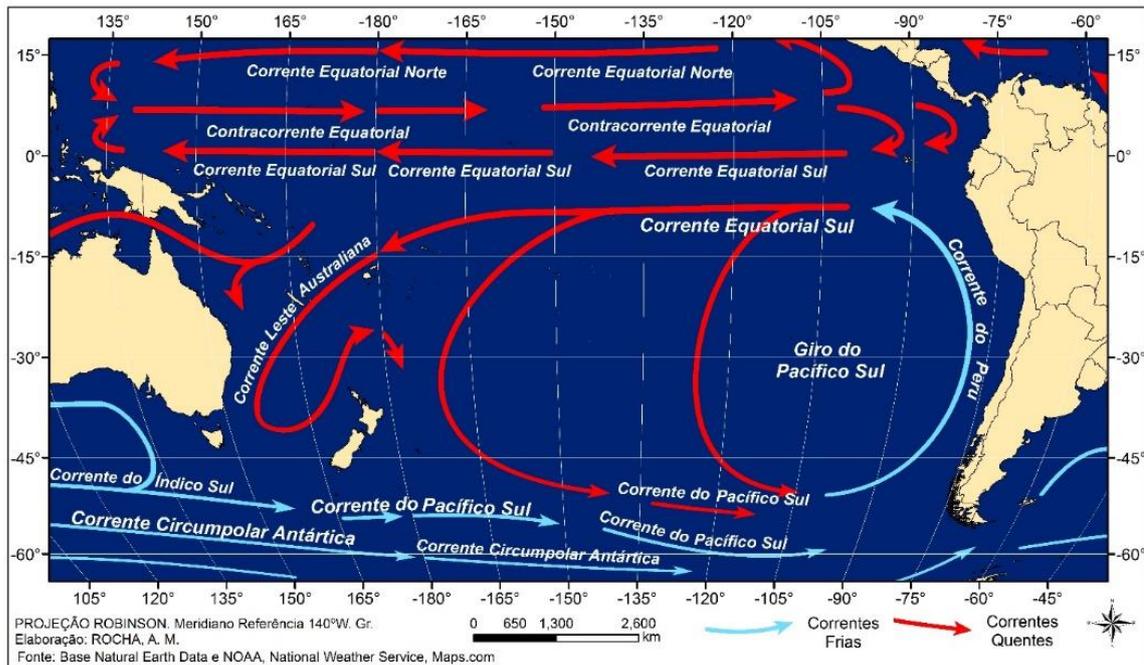
Em vista de tais características, diz-se que em condições normais, a presença da alta semipermanente em superfície à sudeste do Pacífico Sul é responsável pela circulação anticiclônica na região do Pacífico Sul e pelo fluxo superficial em direção ao equador. Dada o efeito de rotação exercido pela Terra, a circulação oriunda da ASPS direcionada ao Equador deflete para esquerda do movimento, formando os ventos de sudeste (Ventos Alísios), dominantes na faixa Tropical (BARRY e CHORLEY, 2009; AHRENS e HENSON, 2018).

Os ventos superficiais desempenham papel relevante, pois interagem com as águas oceânicas superficiais (Camada de Ekman) através do fornecimento de momentum e, por isso, atuam como principal mecanismo responsável circulação oceânica de superfície (processo *wind stress*). No entanto, as águas oceânicas não fluem necessariamente na mesma direção do vento, mas se movem sob efeito da força de Coriolis, curvando-se para esquerda do movimento no hemisfério sul, com ângulos de aproximadamente  $45^\circ$  em relação a direção do vento em superfície. (TALLEY et al., 2011).



**Figura 1.** Distribuição da Pressão ao Nível Médio do Mar para Climatologia de janeiro e julho (período 1970-2010), com indicação do Centros de Ação. Dados oriundo da Reanálise NCEP. Elaboração: ROCHA, A. M.

De forma similar a circulação atmosférica anterior, empregando-se a **figura 2**, verifica-se que a Circulação oceânica do Pacífico Sul é dominada por giro anticiclônico que em ampla escala descreve a circulação oceânica anti-horária superficial, composta principalmente pela Corrente Leste Australiana - CLA (à oeste), Corrente do Pacífico Sul – CPS (à sul), Corrente do Peru-Chile – CPC ou Corrente de Humboldt (à leste) e Corrente Equatorial Sul – CES (à norte) (TALLEY et al., 2011). As correntes mencionadas, dada sua amplitude, são relevantes, pois respondem pelo transporte de calor e umidade em superfície oceânica. Dessa forma, alterações na direção e intensidade dos ventos de superfície determinam mudanças na circulação oceânica superficial e, por extensão, na advecção de propriedades.



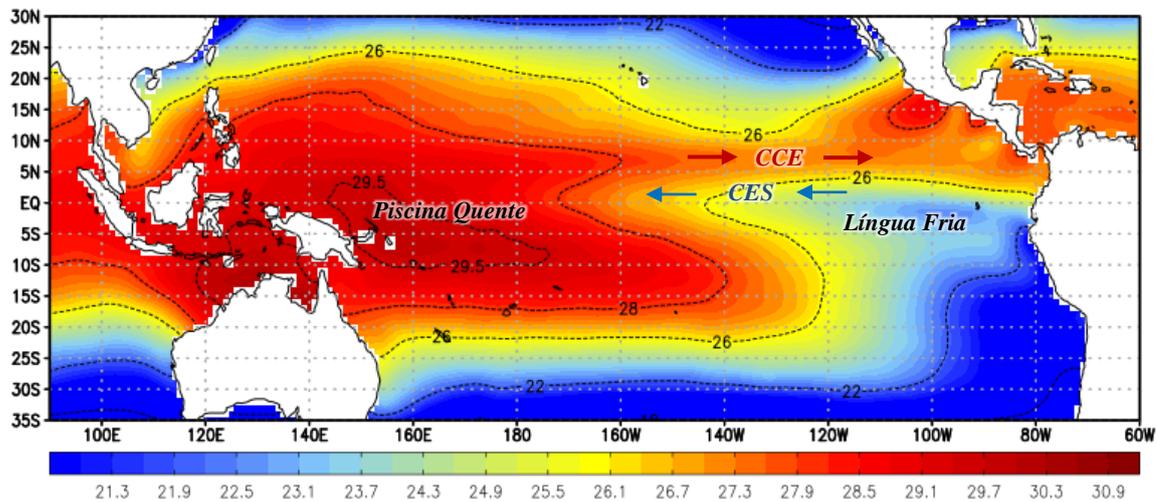
**Figura 2.** Giro Subtropical e Correntes Oceânicas do Pacífico Sul.

**Fonte:** Correntes Oceânicas compiladas de NOAA National Weather Service e US Army (<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=24bfd85e97b042948e6ed4928dc45a8b>).

No Pacífico Leste (PL), em particular, a Corrente do Peru inscrita no Sistema de Correntes do Peru-Chile (SCPC) flui paralelamente a costa oeste da América do Sul transportando águas frias em direção ao Equador e tal característica contribui para a termoclina da região se tornar relativamente rasa. A superficialidade da termoclina descrita tem o efeito de, em associação com os ventos Alísios dominantes, estimular a ressurgência oceânica na região, tornando mais eficiente o resfriamento da superfície (TALLEY et al., 2011) Em função do fato anterior, as águas do Pacífico Leste possuem a característica de serem predominantemente frias, e tal fato associado ao movimento zonal de leste da Corrente Equatorial Sul determina a existência de uma *Língua Fria* (**figura 3**), estendendo-se desde a costa equatorial da Colômbia ao Pacífico Central (GLANTZ, 2001). As águas frias a leste são transportadas pela CES, aquecendo-se pela radiação solar à medida que o fluxo zonal se desenvolve para oeste. De forma oposta, a Contracorrente Equatorial – CCE (figuras 2, 3) situada a poucos graus à norte do Equador é responsável pelo fluxo de retorno de águas quentes em direção à costa da América do Sul. Por influência da circulação de superfície dominante (ventos Alísios), o fluxo de oeste apresenta-se em geral lento.

A circulação de superfície anteriormente descrita (CES) ocasiona o acúmulo de águas quentes no setor oeste da bacia e por tal fato, o Pacífico Oeste (PO), distintamente, se individualiza por abrigar as águas mais quentes do planeta e por extensão do Pacífico. Em função de tal característica, o reservatório térmico descrito é intitulado *Piscina Quente* (**Figura**

3), particularmente por armazenar grande conteúdo de calor (PHILANDER, 1990; GLANTZ, 2001). As águas quentes superficiais nesta região se estendem à superfície abaixo, e por isso a termoclina apresenta maior aprofundamento. De forma oposta a situação observada no Pacífico leste, a ressurgência oceânica na piscina quente é reduzida ou completamente inibida em função do relativo aprofundamento da termoclina. A **figura 3** adiante ilustra a distribuição espacial da climatologia de janeiro (média 1970-2010) para a variável TSM, com demarcações aproximadas dos itens até então apresentados. Em Particular, é possível observar o padrão de TSM elevado no PO, constituindo a Piscina Quente e seu relativo alongamento em relação a região da Contracorrente (CCE). De forma igual, verifica-se que o PL é dominado, em condições normais, pela Língua Fria, sendo conectada a oeste pela CES.

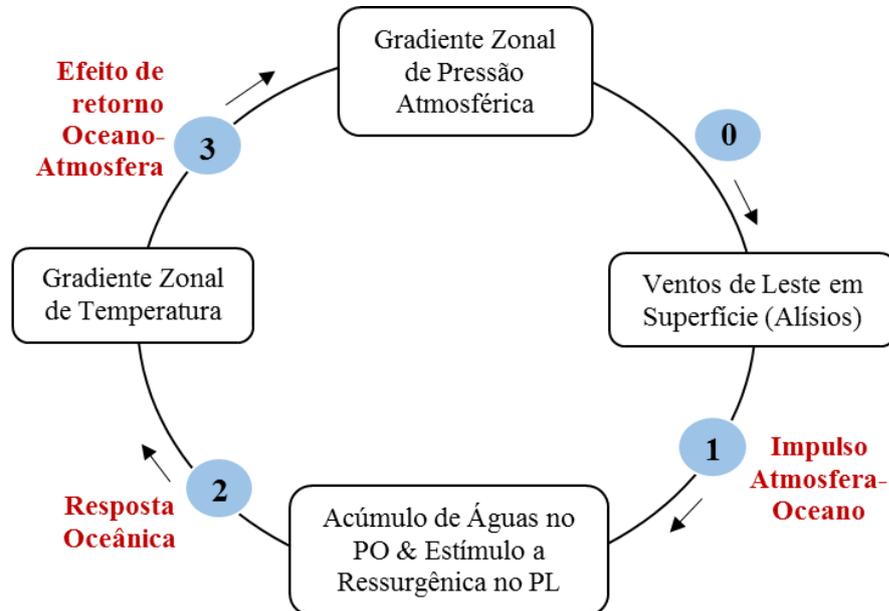


**Figura 3.** Distribuição da TSM média (°C) de dezembro entre 1970-2010, com destaque para posição aproximada da Piscina Quente, Língua Fria, Corrente Equatorial Sul (CES) e Contracorrente Equatorial (CCE).

**Fonte:** Dados COBE SST. Elaboração: ROCHA, A. M.

As informações apresentadas até o momento descrevem particularmente a interação Atmosfera-Oceano e seu efeito retroativo Oceano-Atmosfera resultante, que se desenvolve em condições normais no Pacífico Tropical. A **figura 4** representa o mecanismo citado, assim conhecido como *feedback de Bjerknes* ou *feedback positivo* (MCPHADEN, ZEBIAK e GLANTZ, 2006). Nessa interação, é possível observar que o gradiente de pressão atmosférica inicial é responsável pelos ventos Alísios (*em 0*). A circulação de superfície resultante produz efeito sobre a camada superficial oceânica, ao impulsionar a circulação de grande escala (giro e correntes) e, de forma secundária, ao estimular os movimentos de ressurgência e subsidência (*em 1*). As águas oceânicas distribuem seu conteúdo de calor armazenado por meio das correntes superficiais, o que na direção zonal contribui para estabelecer gradiente de temperatura entre setores opostos do Pacífico (*em 2*). O contraste térmico zonal resultante constitui mecanismo propulsor da Circulação de Walker e, por tal fato, exerce efeito de reforçar

o gradiente de pressão original (3), que, por sua vez, controla a circulação atmosférica de superfície (0).

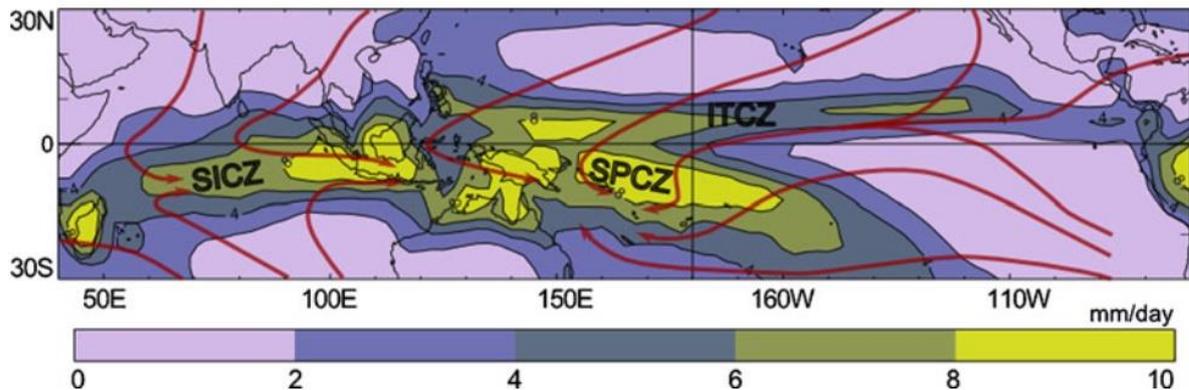


**Figura 4:** Esquema de representação da ação do *feedback de Bjerknes*

O esquema de interpretação acima possui importante papel na localização dos eixos convectivos e zonas secas típicas do Pacífico Tropical, haja vista que sob efeito de tal ciclo, a dominância de águas quentes superficiais na *Piscina Quente* do Pacífico oeste, com alongamento para leste, sobre a região da Contracorrente equatorial (entre 5° a 10°N) define a principal zona de convergência de ventos superficiais no Pacífico tropical, assim chamada Zona de Convergência Intertropical – ZCIT (**figura 5**). Adicionalmente, do sudeste asiático ao Pacífico central, em sentido sudeste, está situada Zona de Convergência do Pacífico Sul – ZCPS. As referidas ZCs se caracterizam como áreas de confluência dos ventos superficiais, os quais somados ao forte aquecimento superficial, promovem movimentos de ascensão do ar convergente em superfície (WELLS, 1997).

O gradiente de temperatura oceano-atmosfera das ZCs estimula a liberação de grande quantidade de calor sensível para a atmosfera, conduzindo a aumento da temperatura do ar. A TSM elevada promove adicionalmente liberação de conteúdo de calor latente. Em função do comportamento térmico de tais áreas, o ar próximo a superfície aquecido e carregado de umidade expande e se torna menos denso, fazendo-o ascender a atmosfera. Sob determinado nível (Nível de Condensação), o processo de condensação iniciado acarreta a formação de nuvens e, conseqüentemente, no desencadeamento da atividade convectiva (WELLS, 1997). A parcela de ar em condição de ascensão gradativamente perpassa por resfriamento adiabático e

a perda de umidade por condensação torna o ar que atinge altos níveis frio e seco. Por efeito da inversão térmica da tropopausa, o ar diverge em altos níveis, direcionando-se para os subtrópicos. Em torno de 30°S, dado o resfriamento observado no sudeste do Pacífico e a posição da ASPS em superfície, o ar em altos níveis subside a superfície e durante tal movimento, a parcela de ar se aquece em função da compressão adiabática (TUBELIS e NASCIMENTO, 1980; WELLS, 1997).



**Figura 5.** Climatologia dezembro-janeiro-fevereiro – DJF (GPCP) da região Índico-Pacífico (sombreado). As Posição das Zonas de Convergência Intertropical – ZCIT (*Intertropical Convergence Zone – ITCZ*), do Pacífico Sul - ZCPS (*South Pacific Convergence Zone – SPCZ*) e do Índico Sul – ZCIS (*South Indian Convergence Zone – SICZ*) são apresentadas. Setas vermelhas indicam climatologia DJF do vento de superfície oriundo do ERA40. **Fonte:** Vincent et al., (2011)

Os movimentos verticais de ascensão e subsidência respectivamente sobre ZCIT/ ZCPS e ASPS determinam a posição dos eixos convectivos e zonas secas que, em média, se observa no Pacífico Sul. O aquecimento superficial associado a disponibilidade de umidade encontrado na ZCIT e ZCPS tornam tais áreas propensas a atividade convectiva intensa (**figura 5**). Por outro lado, a subsidência de ar frio e seco sobre o Sudeste do Pacífico Sul e as condições de baixa TSM sobre a região de Língua Fria Pacífico equatorial central e leste demarcam as áreas com fraca atividade convectiva.

### 2.1.3 Condições de Circulação Oceânica-Atmosférica durante Eventos *El Niño* e *La Niña*

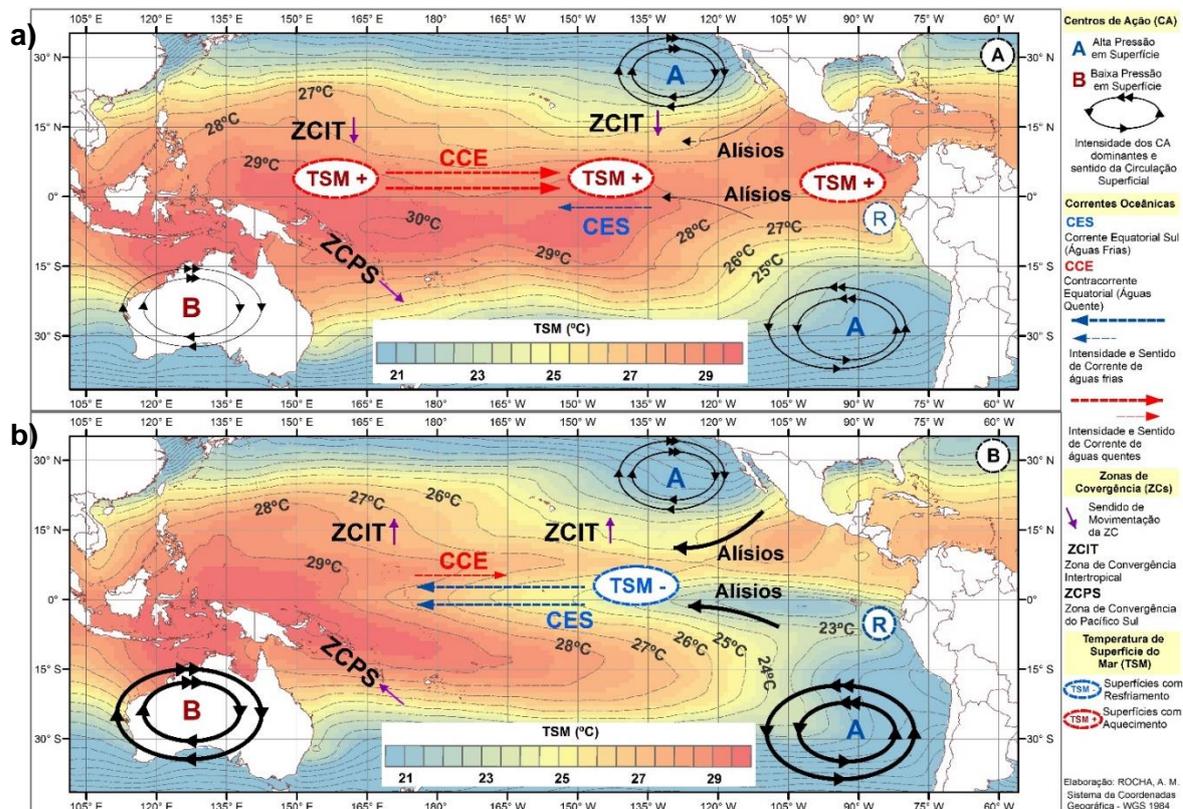
O postulado de Bjerknes (feedback positivo) anteriormente descrito explica o acoplamento que se processa entre a interface oceano-atmosfera, na qual uma forçante atmosférica inicial desencadeia processos oceânicos cujos efeitos culminam em reforçar o sinal inicial sobre atmosfera. No entanto, é necessário observar que a natureza cíclica-retroalimentativa do mecanismo tem o efeito de ocasionar aprisionamento do sistema numa

espécie de loop de feedback positivo. Logo, Wang (2016) salienta que um feedback negativo é essencialmente necessário para reverter o sinal original e permitir que o sistema oscile, nesse caso, de uma fase quente para fria e vice-versa. Sobre tal fato, Kousky, Kagano e Cavalcanti (1984) sublinham que a cada poucos anos, o padrão de pressão atmosférica do Pacífico Sul passa por flutuações, apresentando ora intensificações, ora enfraquecimentos de ambas pressões da ASPS e baixa da Indonésia. Dessa forma, será observado que em função de tal gatilho, o loop inicial será revertido, permitindo oscilação do sistema, e por sua vez, encadeamento dos eventos quentes (El Niño) e frios (LN) extremos.

Para efeito de esquematização dos principais componentes atmosféricos e oceânicos alterados durante o curso dos eventos El Niño e La Niña, a **figura 6** será empregada para representar aproximadamente essa proposta. No entanto, é cabível ressaltar que o esquema apresentado é empreendido com finalidade didática para descrever sintaticamente a situação que em média ocorre, não abrangendo, portanto, a complexidade e dinamicidade do evento.

Exposto o fato anterior, na figura **6a**, é apresentado o esquema de circulação que caracteristicamente representa os eventos El Niños. Nesse esquema, verifica-se que a ASPS e baixa da Indonésia se encontraram ambas enfraquecidas. Em função particularmente da desintensificação do anticiclone do Pacífico Sul, os ventos alísios (*seta preta sólida*) perdem força durante essa fase e por alguns meses é possível verificar o surgimento de vento superficial de oeste (*westerly wind bursts*). Devido a esse novo cenário de circulação atmosférica em superfície, a desintensificação da CES e ressurgência oceânica somado ao fortalecimento da CCE desencadeiam alterações no sentido do transporte de águas na faixa do Pacífico equatorial e conseqüente anomalias na TSM são observadas. Em função do efeito atmosférico sobre a circulação oceânica, as águas quentes superficiais características do Pacífico oeste (Piscina Quente) são transportadas para leste, provocando anomalias positivas na TSM do Pacífico central e leste (expansão zonal da isoterma de 29°C ilustra tal fato). Durante tais meses, aliás, é possível verificar que a Corrente de águas frias do Chile-Peru tipicamente predominante próximo a costa oeste da América do Sul é substituída por fluxo de águas quentes na direção norte-sul (KOUSKY, KAGANO e CAVALCANTI, 1984; AHRENS e HENSON, 2018). Em vista do processo mencionado, o evento intitulado El Niño estará em andamento, designando o aquecimento anormal das águas do Pacífico Central e Leste, cabendo destacar conforme Trenberth (1997) que o curso do evento somente estará em voga quando as anomalias de TSM na região Niño 3.4 (5N-5S, 170W-120W) permanecerem superior a 0,5 graus, por seis meses consecutivos ou mais. Pelas características citadas, o evento EN ocorrerá durante a fase

negativa (quente) da Oscilação Sul (OS -), sendo por isso, em alguns casos referido como *Evento ENOS* (BARRY e CHORLEY, 2009).

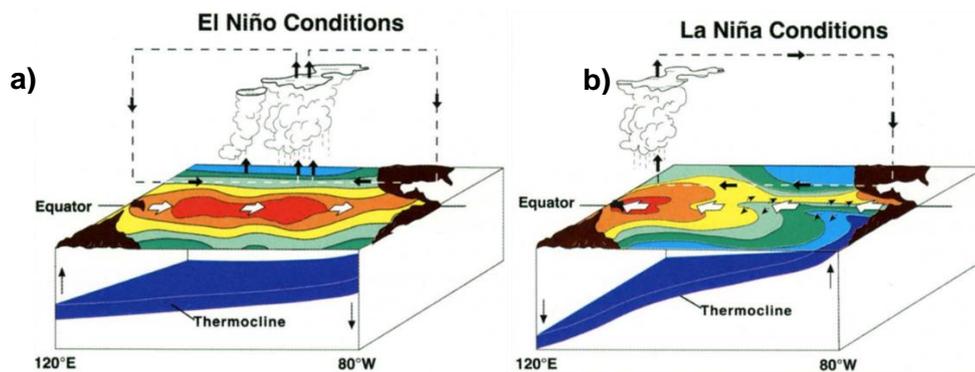


**Figura 6:** Esquematisação das Condições de Circulação Atmosférica e Oceânica durante as Fases Positiva (La Niña) (a) e Negativa (El Niño) (b) da Oscilação Sul. A TSM apresentada, à título de exemplificação do fenômeno, é referente a dez/1997 (a) e dez/1999 (b), meses representativos de evento EN e LN. As *setas sólidas e tracejadas* representam respectivamente a circulação de superfície e oceânica, com sua espessura significando intensidade do fluxo, variável conforme o evento (seja EN ou LN). A seta roxa expressa o sentido de movimentação das ZCs

De forma oposta, a figura 6b expressa os componentes atmosféricos e oceânicos alterados durante os eventos La Niña. Nesse cenário, a ASPS e a baixa da Indonésia se encontram ambas intensificadas, tornando os ventos alísios de SE anormalmente intensos. Em função disso, as correntes CPC, CES e CCE apresentam modificações na sua intensidade. Em especial, a intensificação dos alísios impulsiona o fortalecimento da CPC/ CES e da Ressurgência oceânica, o que consequentemente, provoca extensão zonal das águas frias do PL em direção a porção central do Pacífico. A expansão da isoterma de 26°C e retração da isoterma de 29°C no sentido oeste, em 6b, representa de forma ilustrativa esse caso. Nessa fase, é verificado aliás que a contracorrente equatorial (entre 5° a 10°N) se apresenta mais enfraquecida, podendo perdurar as anomalias negativas de TSM citadas por meses, atingir limiares elevados (KOUSKY, KAGANO e CAVALCANTI, 1984; AHRENS e HENSON, 2018). O evento assim denominado La Niña será empregado, designando o resfriamento anormal das águas do Pacífico Equatorial. Trenberth (1997) assinala, no entanto, que o

fenômeno somente estará em curso quando as anomalias negativas de TSM perdurarem na região Niño 3.4 por mais de seis meses consecutivos, com valores continuamente inferiores a -0.5 graus. O evento La Niña assim denominado apresenta ocorrência durante a fase positiva (fria) da Oscilação Sul (OS +) e por tal fato, comumente é designado *Evento Não-ENOS*, em oposição a fase negativa (BARRY e CHORLEY, 2009).

De forma complementar as alterações observadas na figura 6, em função das flutuações de pressão, a **figura 7** apresenta os padrões de circulação atmosférica característicos do Pacífico equatorial durante os eventos (a) El Niño e (b) La Niña, com enfoque particular na circulação zonal da Walker.



**Figura 7:** Padrão de Circulação de Walker durante condições (a) El Niño e (b) La Niña.  
**Fonte:** McPhaden (2004)

Assim, em **7a**, observa-se inicialmente que o eixo da atividade convectiva é deslocado para leste devido o enfraquecimento dos ventos alísios e fortalecimento subsequente da Contracorrente Equatorial. Com efeito, este último fato ocasiona o transporte de águas quentes para o Pacífico Leste, com promoção do aquecimento anormal das águas do pacífico central e leste. Em função da circulação zonal de Walker ter sua propulsão no gradiente zonal de temperatura, a circulação de Walker estará enfraquecida durante os eventos ENs devido o contraste térmico equatorial reduzir. Logo, em tal fase, será observado deslocamento da ZCIT e ZCPS (figura 6a) para Sul e Sudeste, respectivamente de sua posição normal e relativa (o) elevação (abaixamento) no nível da termocline e nível médio do mar - NMM no PO (PL) (BARRY e CHORLEY, 2009; KOUSKY, KAGANO e CAVALCANTI, 1984).

Por seu turno, a figura **7b** representa as condições de circulação de Walker características durante eventos La Niña (OS +). Nessa fase, de forma oposta, em vista do fortalecimento da ASPS e dos alísios, as águas quentes da Piscina Quente se apresentam anormalmente confinadas no extremo leste, ao passo que a Língua fria se estende pela faixa equatorial. Logo, o gradiente zonal de temperatura é intensificado nessa fase e por isso, a

Circulação Zonal de Walker se apresentará intensificada. No decorrer desse processo, a ZCIT e ZCPS (figura 6b) são deslocadas para norte e noroeste, respectivamente, devido a alta pressão fortalecida a leste do Pacífico. Além disso, os eventos descritos são acompanhados por aumento (abaixamento) da Termoclina e NMM no PL (PO) (BARRY e CHORLEY, 2009; KOUSKY, KAGANO e CAVALCANTI, 1984).

## CAPÍTULO 3

### 3. Metodologia

#### 3.1. Área de Estudo

A área de estudo (AE) da presente pesquisa consiste na América do Sul, a qual está situada entre as coordenadas geográficas de 13°N e 57°S de latitude e 34°O e 82°O de longitude, abrangendo, portanto, 12 países e alguns territórios ultramarinos, com população total de aproximadamente 423,3 milhões de habitantes (World Bank, 2018). As principais características físicas da AS são representadas na Figura 8, através de: tipos de biomas (Olson), uso e cobertura do solo, precipitação (total e amplitude), temperatura do ar (média e amplitude) e NDVI (média e amplitude). A AE está situa-se majoritariamente na faixa tropical (73,9%), com zona temperada contemplando apenas 26,1% da América do Sul. Considerando as variáveis presentes em Figura 8, alguns padrões são observados. Na América do Sul, as formações florestais dominam o setor Norte-Noroeste e costa do Brasil, sendo representado pelas Florestas Sempre-Verdes e Bioma de Florestas Tropicais e Subtropicais Úmidos. Neste setor, sobretudo Norte-Noroeste, são encontradas as áreas com maior volume pluviométrico ( $> 1.900\text{mm}$ ), altas médias de temperatura ( $> 23^\circ\text{C}$ ) e NDVI ( $> 0,8$ ). A diagonal SO-NE da América do Sul compõe o principal setor de formações herbáceas, subarbustivas, arbustivas e arbóreo (com menor porte e maior espaçamento horizontal), sendo encontrado os Biomas de Savanas e Campos Temperados (ao sul da Argentina) e Tropicais e Subtropicais (centro) e Florestas Tropicais e Subtropicais Secas (nordeste do Brasil). No setor SO-NE, é encontrado a maior extensão de áreas com maior amplitude de NDVI. No setor temperado da América do Sul, as vegetações são dominadas por baixa amplitude de precipitação ( $\leq 150\text{ mm}$ ) e amplitude ( $\leq 3^\circ\text{C}$ ) e média ( $\leq 23^\circ\text{C}$ ) de temperatura.

Para a área de estudo, a temperatura do ar apresenta visível controle da latitude, com menores (maiores) médias temperaturas no sul (norte) da América do Sul. As baixas médias de temperatura penetram na faixa tropical principalmente com o efeito da altitude, através das terras altas da Cordilheira dos Andes. Na faixa ocidental dos Andes, é encontrada os desertos de Sechura (Peru) e Atacama (Chile), compondo áreas do Bioma Desertos e Áreas Semiáridas, além de abrigar áreas de Vegetação Mediterrânea (Chile). Este setor, juntamente com o sul da Argentina (Patagônia), compõe áreas baixas médias de temperatura ( $\leq 18^\circ\text{C}$ ), precipitação ( $< 750\text{ mm}$ ) e NDVI ( $< 0,3$ ). Áreas com alto valor de precipitação são concentradas sobretudo no

Trópicos (exceção no sul do Chile), com faixa NO-SE como principal área de ampla variabilidade pluviométrica (150-900 mm).

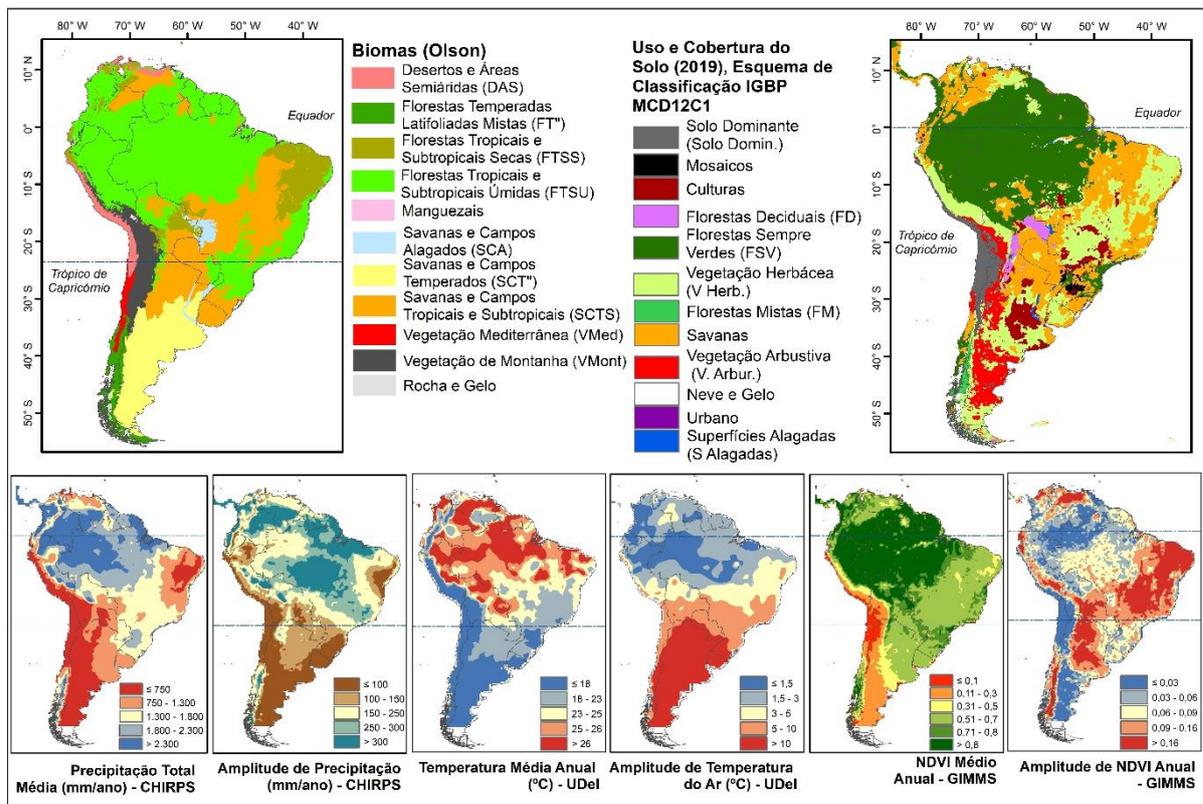


Figura 8: Características Físicas da Área de Estudo

### 3.2. Materiais e Métodos

No presente estudo, para efeito de identificar os tipos de vegetação mais impactados da América do Sul por eventos ENOS, o presente estudo fez uso de três variáveis paramétricas (1 - precipitação, 2 - temperatura do ar e 3 - NDVI), três métodos de análise (1 - análise harmônica, 2 - Correlações lineares e 3 - Análise de composições) e bases referências para identificação dos tipos de vegetação (1 - Biomas terrestres de Olson e 2 - Uso e Cobertura do Solo do Satélite TERRA/ AQUA). Os bancos de dados empregados incluídos nas três análises são apresentados abaixo. A forma com que cada banco de dados fora utilizado é descrito nos tópicos posteriores.

- Índices Climáticos (séries temporais entre 1979-2022)
  1. ONI: *Oscillation Niño Index* - Índice de Oscilação Niño)
  2. N12: Índice da Região Niño 1+2
  3. N3: Índice da Região Niño 3
  4. N34: Índice da Região Niño 3.4
  5. N4: Índice da Região Niño 4
  6. MEI: *Multivariate ENSO Index* - Índice ENOS Multivariado

7. SOI: *Southern Oscillation Index* - Índice de Oscilação Sul
  8. PDO: *Pacific Decadal Oscillation* - Oscilação Decadal do Pacífico
  9. AMO: *Atlantic Multidecadal Oscillation* - Oscilação Decadal do Atlântico
  10. AMM: *Atlantic Meridional Mode* - Modo Meridional do Atlântico
  11. QBO: *Quasi-Biennial Oscillation* – Oscilação Quase-Bienal
  12. DMI: *Dipole Mode Index* - Índice do Modo Dipolar (ou Índice do Dipolo Indiano)
  13. TNA: *Tropical Northern Atlantic Index* - Índice do Atlântico Norte Tropical
  14. TSA: *Tropical Southern Atlantic Index* - Índice do Atlântico Sul Tropical
  15. PNA: *Pacific/ North America* - Padrão de Teleconexão Pacífico-América do Norte
  16. NAO: *North Atlantic Oscillation* – Oscilação do Atlântico Norte
  17. AO: *Arctic Oscillation* – Oscilação Ártica (ou Modo Anular Norte)
  18. AAO: *Antarctic Oscillation* – Oscilação Antártica (ou Modo Anual Sul)
- Série Temporal de Temperatura de Superfície do Mar (TSM) – região niño 3.4 (período 1870-2022)
  - Dados de precipitação, temperatura do Ar e NDVI (formato netCDF, dados mensais)
    1. **Precipitação CHIRPS:** *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation* – CHIRPS (Resolução espacial: 0,08°, cobertura latitudinal: 50°S-50°N, dados globais, 1981-presente, FUNK et al., 2015; CHC-UCSB, 2020)
    2. **Precipitação GPCC.** *Global Precipitation Climatology Centre - GPCC* (Resolução espacial: 0,5°, dados globais, 1981-presente, NOAA-PSL, 2020)
    3. **Precipitação GPCP.** *Global Precipitation Climatology Project* – GPCP (Resolução espacial: 2,5°, dados globais, 1981-presente, NOAA-PSL, 2020)
    4. **Temperatura do Ar UDel.** *Delaware University - UDel* (Resolução espacial: 0,5°, dados globais, 1900-2017, NOAA-PSL, 2020)
    5. **NDVI GIMMS.** *Normalized Difference Vegetation Index-3rd generation - NDVI3g - Global Inventory Monitoring and Modeling System* – GIMMS (Resolução espacial: 1/12° (~0,083°), dados globais, 07/1981 a 12/2015, NCAR-CDG, 2020)
  - Bases referenciais para vegetação
    1. **Biomass Terrestres** (Formato: shapefile, abrangência: global, ano: 2017, DINERSTEIN et al., 2017; GISLOUNGE, 2020)
    2. **Uso e Cobertura do Solo:** Esquema de classificação: *International Geosphere-Biosphere Programme* – IGBP. Produto MCD12C1, Combined MODIS, satélite TERRA/ AQUA (Resolução Espacial: 0,05x0,05° (5,6km), formato: HDF, dados globais, ano: 2019, LPDAAC-USGS, 2020)

### 3.2.1 Análise Harmônica

Para investigação das características espectrais, a Análise Harmônica (AH) fora empregada, devido tal técnica possibilitar a contabilização do grau de contribuição de cada frequência (harmônico) em relação ao grau de variabilidade das séries temporais consideradas e produtos espaciais. Para o estudo presente, a AH fora realizada para os quatro cenários, com vista a calcular a proporção de variabilidade explicada ( $R^2$ ) e/ou amplitude para cada harmônico (frequência) componente. Inicialmente, computou-se a AH para 18 principais índices climáticos (1) com vista a levantar o perfil espectral da oscilação ENOS e investigar as diferenças e semelhanças com outras índices climáticos. Posteriormente, a AH fora calculada para série temporal de Temperatura de Superfície do Mar (2) com vista avaliar a evolução temporal das componentes harmônicas. No domínio espacial, a AH fora aplicada em escala global (3) e direcionada a América do Sul (4). Tal estratégia fora utilizada com vista a verificar se padrões globais de distribuição das faixas harmônicas auxiliavam na explicação do sinal na América do Sul. Do ponto de vista operacional, as análises harmônicas foram conduzidas em ambiente RStudio (análises harmônicas 1 e 2) versão 2022.12.0.353 (POSIT TEAM, 2022) e no software OpenGrADS - *Open Grid Analysis and Display System*, versão 2.2.1.oga.1. (análises harmônicas 3 e 4)

- 1) AH da série temporal de TSM (região niño 3.4), período 1979-2021 ( $n = 43$  anos = 516 meses);
- 2) AH das séries temporais de 18 índices climáticos. Nesse caso, dada a série temporal original ter dimensão entre 1870-2022, para avaliação da composição harmônica ao longo do tempo, cinco séries temporais de igual dimensão foram criadas, sendo elas: 1870-1903, 1900-1933, 1930-1963, 1960-1993 e 1989-2022 ( $n = 34$  anos = 408 meses);
- 3) AH (com efeito do ciclo anual) dos dados de Precipitação (GPCC, GPCP), temperatura do ar (UDEL) e NDVI (GIMMS) para escala global, período 1982-2015 ( $n = 34$  anos = 408 meses), resolução espacial: 2,5° (GPCP) e 1,0° (GPCC, UDEL e GIMMS);
- 4) AH dos dados de Precipitação (CHIRPS), temperatura do ar (UDEL) e NDVI (GIMMS) para América do Sul, período 1982-2015 ( $n = 34$  anos = 408 meses), resolução espacial: 0,5° (CHIRPS, UDEL e GIMMS).

Para o caso específico da América do Sul, aplicou-se análise harmônica para dados com efeito do ciclo anual (**AH1**) e sem efeito do ciclo anual (**AH2**). Em escala global, os dados

empregados apresentam efeito do ciclo anual. Essa diferença (AH1 e AH2) fora realizada, pois permite observar a proporção de variabilidade explicada das frequências componentes do sinal com e sem efeito do ciclo anual. Para todos dados empregados em escala global e América do Sul, a tendência linear fora removida pela técnica de regressão múltipla.

A técnica de AH particularmente consiste em representar as variações ou flutuações pertinentes a uma dada série temporal (ST) como adição conjunta de funções senos e cossenos (Wilks, 2011). Conforme Wilks (2011), qualquer ST de dimensão  $n$  (número de unidades de tempo) pode ser representada ou reconstruída perfeitamente pelo conjunto de  $n/2$  número de funções harmônicas. Cada função trigonométrica é chamada de harmônico, devido apresentar frequências múltiplas da frequência fundamental. Estudos de caráter espectral associados a ENOS apresentam amplos exemplos na literatura (Troup, 1965; Trenberth, 1976; Rasmusson e Carpenter, 1982; Torrence e Webster, 1998; Sullivan et al., 2016), sendo notório em muitos casos a aplicação da Transformada de Fourier e/ou Transformada de Ondaletas.

Para condução da Análise harmônica, as cinco equações abaixo foram empregadas. As equações 1-3 foram utilizadas respectivamente para cálculo dos coeficientes de Fourier ( $A_k$  e  $B_k$ , equações 1-2), variáveis para cada harmônico  $k$ , os quais por sua vez foram empregados no cálculo da Amplitude ( $C_k$ , equação 3). De posse, da amplitude ( $C_k$ ), variância amostral ( $s_y^2$ ) e número de observações ( $n$ ), a proporção de variabilidade explicada por cada harmônico ( $R_k^2$ , equação 4) e total ( $R^2$ , equação 5) puderam ser computadas.

$$A_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \cos\left(\frac{2\pi \cdot k}{n} \cdot t\right) \quad (01)$$

$$B_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \text{sen}\left(\frac{2\pi \cdot k}{n} \cdot t\right) \quad (02)$$

$$C_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \quad (03)$$

$$R_k^2 = \frac{\left(\frac{n}{2}\right) C_k^2}{(n-1) s_y^2} \quad (04)$$

$$R^2 = \sum R_k^2 \quad (05)$$

A meta fundamental das AHs conduzidas consistiu em ultimamente calcular a proporção de variabilidade explicada ( $R^2$ ) para cada harmônico ( $k$ ) e a partir dessas informações, contabilizar a proporção de  $R^2$  (%) pertinente a cada grupamento de frequências. Neste trabalho, baseados na frequência característica ENOS, 2-7 anos (Sarachick e Cane, 2010) e em seus modos de variabilidade (Barnett, 1991), os grupamentos de frequências expressos em **tabela 1**

foram empregados para cálculo do  $R^2$ . Com tais grupamentos, fora possível identificar o grau de contribuição das várias frequências que compõem o sinal das STs.

**Tabela 1:** Distribuição dos harmônicos (k), conforme grupamentos de frequências (f) empregados na análise.

AHs 1		AHs 2	
Classes de frequências (f)	harmônicos (k)	Classes de frequências (f)	harmônicos (k)
> 20 anos	1-2	> 7 anos	1-4
7-20 anos	3-6	2-7 anos [ENOS]	5-17
2-7 anos [ENOS]	7-21	13 a 24 meses	18-33
13 a 24 meses	22-42	≤ 12 meses	34-204
≤ 12 meses	43-258		

A **tabela 2** adiante apresenta as características de frequência (ciclo: em meses,  $n/k$ ; e anos,  $(n/k)/12$ , Wilks, 2011) referente a cada harmônico. Como dois tamanhos de conjuntos de dados (n) foram utilizados, as análises harmônicas AHs 1 e 2 são compostos de 258 e 204 harmônicos ( $n/2$ ), respectivamente. Importante observar que em função da resolução temporal dos dados de entrada (STs), as frequências fundamentais (1º harmônico,  $f_f$ ) e as frequências de Nyquist ( $n/2$ º harmônico,  $f_{NQ}$ ) são 1 ciclo/ 43 anos | 1 ciclo/ 34 anos e 1 ciclo/ 2 meses | 1 ciclo/ 2 meses, respectivamente, os quais por sua vez, correspondem às frequências mais baixas e mais altas passíveis de ser capturadas pela AH. Portanto, observa-se que a resolução temporal (n) impõe limitações em relação ao grau de informação obtido com a análise harmônica (Wilks, 2011).

Relevante observar que na técnica de AH, assim como na Transformada Rápida de Fourier, em função do processo de discretização (isto é especificação das frequências possíveis para se obter informação), a AH permite reconstruir o sinal perfeitamente, todavia, as informações obtidas na **tabela 2** são disponíveis apenas para os harmônicos (frequências) alcançados através da discretização. Como resultante, ao se considerar frequência como por exemplo  $f = 20$  anos, na tabela 2 (AHs 1), é observado que não há harmônico que contemple especificamente essa frequência; portanto, fenômeno de vazamento espectral (*spectral leakage*, Downey, 2016) seria observado, fazendo com que a amplitude e variabilidade explicada dessa frequência seja espalhada no entorno do harmônico de frequência igual a 20 anos ( $k = 1, 2$  e  $3$ ). Todavia, embora o vazamento espectral esteja presente em maior ou menor grau, dada a resolução temporal das STs e as frequências discretizadas para cada harmônico, considerou-se a técnica válida, tendo-se em vista que os harmônicos obtidos (tabela 2) contém várias frequências entre 2 à 7 anos (frequência ENOS), comumente descritas na literatura.

**Tabela 2:** Características de frequências referentes aos conjuntos de harmônicos das AHs 1 e 2.

$f_{NQ}$  = frequência de Nyquist e  $f_f$  = frequência fundamental,  $k$  = harmônico e  $n$  = número de observações (meses)

AHs 1			AHs 2		
n: 516 meses			n: 408 meses		
f <sub>NQ</sub> : 1 ciclo/ 2 meses			f <sub>NQ</sub> : 1 ciclo/ 2 meses		
f <sub>f</sub> : 1 ciclo/ 43 anos			f <sub>f</sub> : 1 ciclo/ 34 anos		
Análises Harmônicas 1 (AHs 1)			Análises Harmônicas 2 (AHs 2)		
k	ciclo (meses)	ciclo (anos)	k	ciclo (meses)	ciclo (anos)
1	516.0	43.00	26	19.8	1.65
2	258.0	21.50	27	19.1	1.59
3	172.0	14.33	28	18.4	1.54
4	129.0	10.75	29	17.8	1.48
5	103.2	8.60	30	17.2	1.43
6	86.0	7.17	31	16.6	1.39
7	73.7	6.14	32	16.1	1.34
8	64.5	5.38	33	15.6	1.30
9	57.3	4.78	34	15.2	1.26
10	51.6	4.30	35	14.7	1.23
11	46.9	3.91	36	14.3	1.19
12	43.0	3.58	37	13.9	1.16
13	39.7	3.31	38	13.6	1.13
14	36.9	3.07	39	13.2	1.10
15	34.4	2.87	40	12.9	1.08
16	32.3	2.69	41	12.6	1.05
17	30.4	2.53	42	12.3	1.02
18	28.7	2.39	43	12.0	1.00
19	27.2	2.26	44	11.7	0.98
20	25.8	2.15	45	11.5	0.96
21	24.6	2.05	46	11.2	0.93
22	23.5	1.95	47	11.0	0.91
23	22.4	1.87	(...)	(n/k)	(n/k) / 12
24	21.5	1.79	257	2.0	0.17
25	20.6	1.72	258	2.0	0.17
			18	22.7	1.89
			19	21.5	1.79
			20	20.4	1.70
			21	19.4	1.62
			22	18.5	1.55
			23	17.7	1.48
			24	17.0	1.42
			25	16.3	1.36
			26	15.7	1.31
			27	15.1	1.26
			28	14.6	1.21
			29	14.1	1.17
			30	13.6	1.13
			31	13.2	1.10
			32	12.8	1.06
			33	12.4	1.03
			34	12.0	1.00
			35	11.7	0.97
			36	11.3	0.94
			37	11.0	0.92
			38	10.7	0.89
			39	10.5	0.87
			40	10.2	0.85
			41	10.0	0.83
			42	9.7	0.81
			43	9.5	0.79
			44	9.3	0.77
			45	9.1	0.76
			46	8.9	0.74
			47	8.7	0.72
			(...)	(n/k)	(n/k) / 12
			203	2.0	0.17
			204	2.0	0.17

### 3.2.3 Análise de Correlação Linear (Temporal e Espacial)

A análise de correlação linear fora conduzida para investigação do grau de linearidade e defasagem das anomalias das três variáveis: precipitação (PR), temperatura (TAR) e NDVI e em relação ao índice ONI, para períodos de até 12 defasagens (lags) mensais. Nesta etapa, para cálculo da defasagem, a variável  $x$  fora regredida em  $h$  lags (de acordo com a defasagem), de tal forma que valores passados da variável  $x$  pudessem ser correlacionados com as variáveis  $y$  no tempo presente. Para correlações temporais, foram computadas as combinações 1) ONIxPR, 2) ONIxTAR, 3) ONIxNDVI, 4) PRxNDVI, 5) PRxTAR e 6) TARxNDVI, sendo que o primeiro elemento das correlações constitui aquele que foi defasado para cálculo (nesse caso, o índice ONI, para 1-3; PR para 4-5; e TAR para 6). Ambas as correlações espaciais e temporais foram conduzidas tão somente para América do Sul, período 1982-2015 (34 anos). A escolha dessas datas fora determinada com bases nos anos em que os quatro produtos apresentam compatibilidade temporal (ONI, PR, TAR e NDVI)

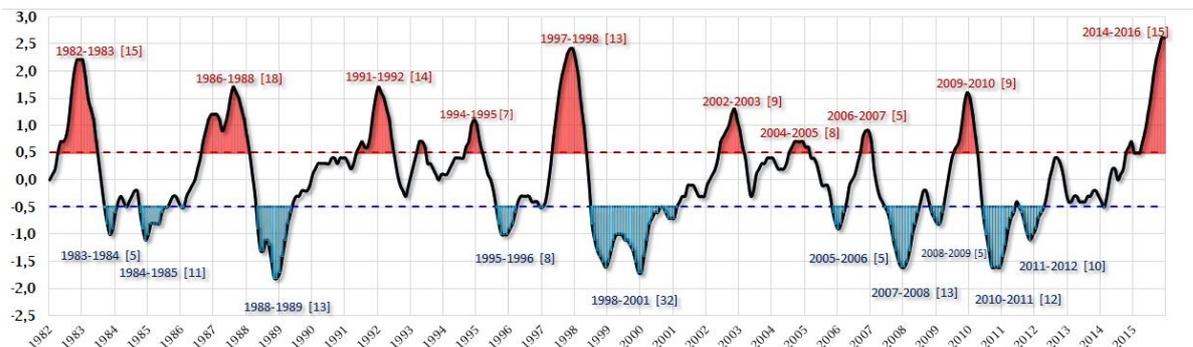
O cálculo do coeficiente de correlação de Pearson e significância estatística são apresentados nas equações 6-7. As correlações no domínio espacial foram empregadas com vista a averiguar se os padrões observados nas seis correlações lineares acima são compatíveis com as análises harmônicas (AH1 e AH2 da América do Sul). Para correlação espacial (correlação no domínio espacial), os valores de x e y constituíram valores das variáveis para cada ponto de grade ou par de coordenadas da área de estudo (i). Para as equações 6-7, n se refere ao número de meses analisados, para correlação temporal ou número de pixels da área de estudo, para correlação temporal, com  $n' = n-h$ . Para correlação espacial  $n' = n$ , já que não há cálculo com defasagem.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i-h} - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)s_x s_y} \quad (06)$$

$$t_{xy} = \frac{r\sqrt{n'-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (07)$$

### 3.2.4 Análise de Composições

A análise de Composições de Anomalias (ACA) fora empregada com vista a identificar o trimestre de defasagem das anomalias de precipitação, temperatura e NDVI durante eventos El Niños, La Niñas e Neutros, assim como identificar as áreas na qual as anomalias durante períodos ENOS (ENs ou LNs) superam àquelas dos períodos neutros. A Figura 9 e tabela 3 apresentam resumidamente a ST do índice ONI e a descrição dos eventos incluídos no período de estudo (1982-2015), respectivamente. A tabela 4, por sua vez, apresenta a indicação dos anos de El Niños, La Niñas e Neutros. Para o presente estudo, considerou-se ciclos de vidas de 24 (30) meses para as variáveis PR/ TAR (NDVI), respectivamente. No presente estudo, considerou-se o período de 24 (30) meses, compreendidos entre março-abril-maio do ano do evento, MAM[0], a dezembro-janeiro-fevereiro (junho-julho-agosto) do segundo ano após o evento, DJF[2] (JJA[2]).



**Figura 9:** Série temporal do índice ONI, com indicação dos eventos El Niños e La Niñas

**Tabela 3:** Descrição dos eventos El Niños e La Niñas contemplados no período de estudo

\* Duração do Evento ultrapassa o período temporal utilizada no estudo

El Niños (9)	1982-1983	1986-1988	1991-1992	1994-1995	1997-1998	2002-2003	2004-2005	2006-2007	2009-2010	2014-2016*
Máximo TSM (°C)	2,2	1,7	1,7	1,1	2,4	1,3	0,7	0,9	1,6	2,6
Duração (m)	15	18	14	7	13	9	8	5	9	15
La Niña (9)	1983-1984	1984-1985	1988-1989	1995-1996	1998-2001	2005-2006	2007-2008	2008-2009	2010-2011	2011-2012
Mínima TSM (°C)	-1,0	-1,1	-1,8	-1,0	-1,7	-0,9	-1,6	-0,8	-1,6	-1,1
Duração (m)	5	11	13	8	32	5	13	5	12	10

**Tabela 4:** Distribuição dos harmônicos (k), conforme grupamentos de frequências (f) empregados na análise.

\* Evento cujo período de via ultrapassa o período temporal utilizada no estudo

Anos El Niños (10)	Anos La Niñas (10)	Anos Neutros (10)
1982, 1986, 1987, 1991, 1994, 1997, 2002, 2004, 2006, 2009, 2014*, 2015*	1983, 1984, 1988, 1995, 1998, 1999, 2000, 2005, 2007, 2008, 2010, 2011	1985, 1989, 1990, 1992, 1993, 1996, 2001, 2003, 2012, 2013

Para além da análise de composições em domínio espacial, baseado nas áreas de maior relacionamento linear para com o ONI e aquelas com alta valo de variância explicada pela frequência ENOS, quatro séries temporais de áreas amostrais foram selecionadas com intuito de testar (1) se eventos EN ou LN apresentam mesma importância durante as anomalias médias das variáveis, (2) o grau de defasagem durante eventos ENs e LNs médios e (3) identificar potenciais efeitos durante fases fenológicas para cada ST considerada. A figura 10 adiante permite identificar esquematicamente as fases do ciclo fenológico: verdejamento (*greenup*), maturidade (*maturity*), senescência (*senescence*) e dormência (*domancy*). Para essa análise, o intuito será observar o período fenológico de máxima ocorrência de anomalias de NDVI, tendo por referência o ciclo médio NDVI característico de cada área.

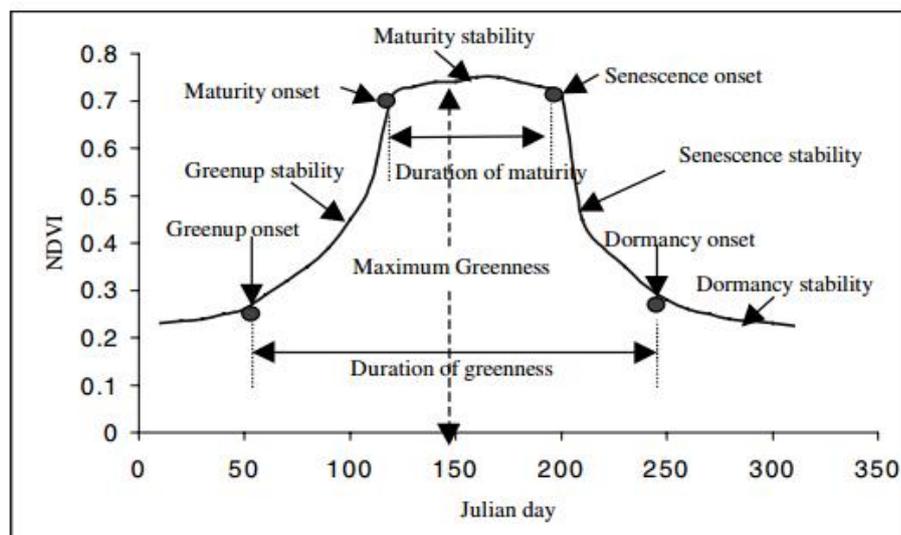


Figura 10: Fases e Pontos de Transição do ciclo fenológico.

Fonte: Zhang et al. (2001)

## CAPÍTULO 4

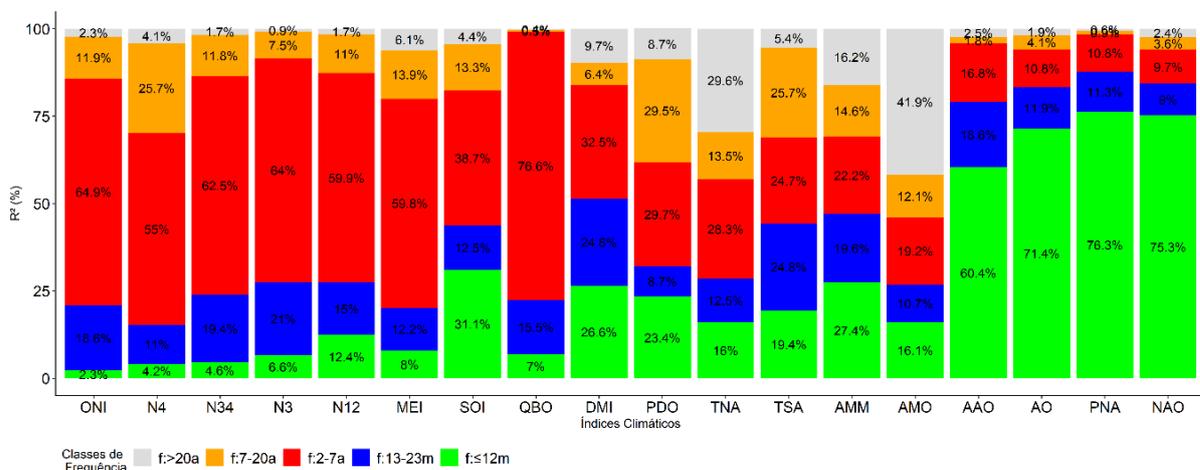
### 4.1 Perfil de Frequências de Índices de Oscilações Climáticas

Inicialmente, para efeito de investigar as características de frequência dos eventos El Niño-Oscilação Sul, realizou-se análise harmônica direcionada aos principais índices empregados na análise dessa oscilação, assim como averiguou-se como outras oscilações são similares ao ENOS, em termos de frequência. Dito isso, a **figura 11** apresenta a distribuição da variabilidade explicada ( $R^2$  (%)) por classes de frequência (f) (f:  $\leq 12m$ , f: 1-2-a, f: 2-7-a e f:  $> 7-a$ ) para cada um dos índices/ oscilações. Para a referida análise, observou-se que no geral os índices atrelados a oscilação ENOS possuem maiores proporções de variabilidade explicada pela frequência de 2 a 7 anos (f: 2-7-a). Com exceção da Oscilação Quase-Bienal (OQB) que atingiu para o período 1979-2021 a maior proporção de  $R^2$  para a referida frequência ( $R^2 = 76,6\%$ ), os índices ONI, MEI e das quatro regiões niños (N12, N3, N34 e N4) apresentaram valores de  $R^2 > 55\%$ , confirmando o potencial de explicabilidade da frequência de 2-7a em representar a variabilidade temporal da oscilação ENOS. Além disso, verificou-se que para os seis índices anteriores, frequências intra-anuais ( $\leq 12$  meses) e superiores a 20 anos registraram baixas contribuições, com  $R^2 < 13\%$  e  $R^2 < 7\%$ , respectivamente. Dentre os índices associados a oscilação ENOS, o Índice de Oscilação Sul mostrou-se com maior disparidade quanto comparado com os demais índices (ONI, MEI, N12, N3, N34 e N4), por apresentar proporções altas de sua variabilidade associada a frequências intra-anuais ( $R^2 = 31,1\%$ ) e por isso, frequências de 2-7-a responderam por menos de 40% de sua variabilidade.

Para essa diferença observada, os índices associados ao ENOS possuem diferença em termos de variáveis que os compõem e extensão espacial da área do cálculo. Os índices ONI, N12, N3, N34 e N4 estão restritos a área equatorial ( $10^{\circ}S$  a  $10^{\circ}N$ ) e envolvem apenas a variável temperatura de superfície do mar - TSM, ao passo que o MEI engloba áreas do Equador até o limite latitudinal de  $30^{\circ}$  (N e S) e inclui em seu cálculo cinco variáveis (vento zonal e meridional, pressão ao nível médio do mar (PNMM), radiação de onda longa (ROL) e TSM). Já o índice SOI é calculado levando-se em conta apenas a PNMM e suas estações de Darwin (Austrália) e Tahiti (Polinésia Francesa) e estão situadas em  $12^{\circ}S$  e  $17^{\circ}S$ , respectivamente. As informações apresentadas são relevantes, pois a distribuição entre classes de frequência (**figura 11**) apontou diferenças entre tais índices. Os índices ONI, N3 e N34 apresentam maiores influências de frequências de 2-7a ( $R^2_{\min} = 62,5\%$ ), enquanto o índice MEI e niños 1+2 e 4 registraram valores levemente abaixo ( $R^2 < 60\%$ ). O Índice de Oscilação Sul, por sua vez,

revelou menor contribuição de frequência de 2-7a ( $R^2 = 38,7\%$ ) e proporções mais expressivas de frequências intra-anuais ( $R^2 = 31,1\%$ ). Dessa forma, conclui-se que embora a oscilação ENOS seja composta por componentes atmosférica e oceânica, os índices associados a tais componentes atmosférica-oceânica mostraram padrões de frequências distintas.

Em termos de regiões niños (índices N12, N3, N34 e N4), constatou-se que regiões centrais apresentaram maiores contribuições de frequência de 2-7a (níños 3.4 e 3,  $\sim 59,9\%$ ), enquanto para regiões de borda, (níños 4 e 1+2,  $\sim 55\%$ ) valores levemente inferiores de frequência de 2-7a foram encontrados. Em específico, observou-se que a região niño situada no extremo oeste (niño 4) apresentou maiores contribuições de baixas frequências, 8-20a (25,7%), enquanto a niño 1+2 mostrou-se com maiores influências de frequências altas,  $\leq 12$  meses (12,4%). Para se comparar, as demais regiões (níños 3 e 3.4) apresentaram valores para estes dois conjuntos de frequências abaixo de 12% e 7%, respectivamente. Logo, concluiu-se que as frequências influentes sobre a TSM do Pacífico equatorial variam em função de sua posição: a oeste, no centro ou a leste; revelando que para uma dada posição, maiores contribuições de frequências altas ou baixas podem ser identificadas sobre a variabilidade da TSM.



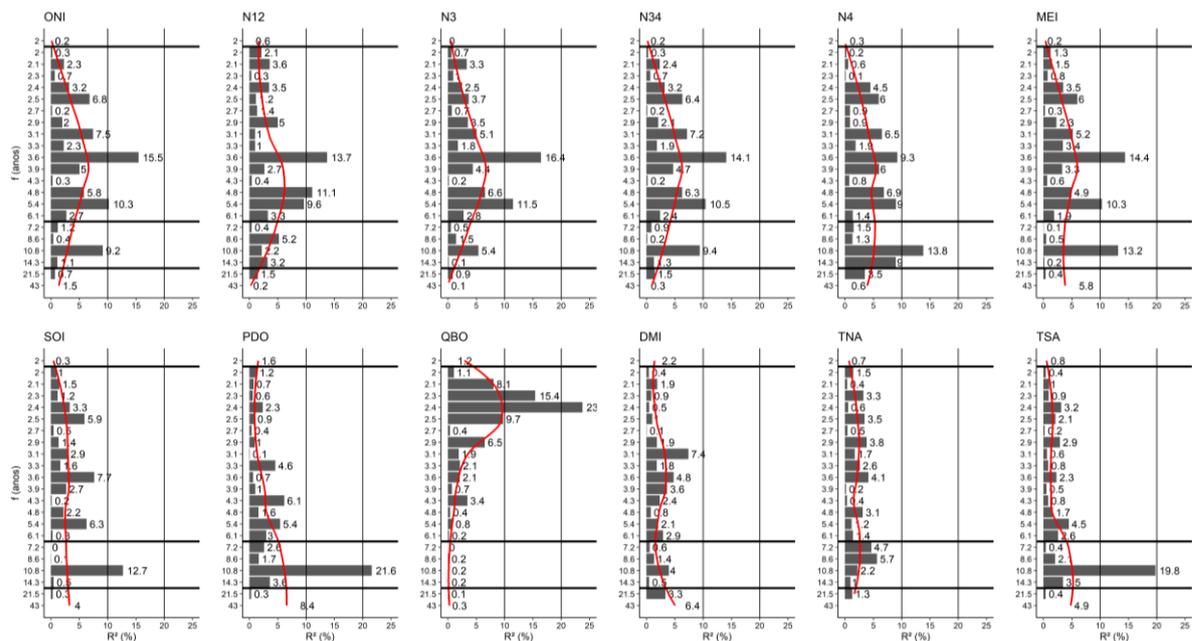
**Figura 11.** Distribuição da variabilidade explicada ( $R^2$ ) entre classes de frequência ( $f$ ), compostas por harmônicos ( $k$ ):  $f: > 20a$  ( $k = [1-2]$ ),  $f: > 7-20a$  ( $k = [3-6]$ ),  $f: 2-7a$  (7-21),  $f: 13-23m$  (22-42) e  $f: \leq 12m$  (43-258) para 18 tipos de índices climáticos. Período de análise de 1979 a 2021, com  $n = 516$  e número máximo de harmônicos ( $k_{max}$ ) = 258.

Comparativamente às demais oscilações observadas em **figura 11**, verificou-se que poucas oscilações possuem de fato alta proporção de variabilidade explicada pelas frequências de 2-7a. A **figura 12** a seguir apresenta os harmônicos de  $k = 1$  ( $f: 43$  anos) a  $k = 21$  ( $f: 2$  anos) para 12 índices climáticos, dos quais sete referem-se ao ENOS e cinco a oscilações em outras áreas. Importante notar que os 12 índices selecionados constituem aqueles dos 18 apontados na **figura 11** os quais apresentam mais de 24% ( $R^2$ ) de sua variabilidade explicada por fenômenos

de f:2-7a. Observou-se que somente uma oscilação, a Oscilação Quase-Bienal (76,6%) apresentou proporção de variabilidade explicada ( $R^2$ ) pela frequência de 2-7a tão elevada quanto a identificada para o índice ONI (64,9%). No entanto, comparando-se essas duas oscilações (**figura 12**), observou-se que as mesmas apresentam pico de frequência diferenciado, quando observado os 15 harmônicos ( $7 \leq k \leq 21$ ) componentes das frequências de 2-7a. Enquanto que o índice ONI possui maior parte de sua variabilidade explicada com picos nos harmônicos de 3,6a (15,5%), 5,4a (10,3%) e arredores, a QBO apresenta 57% de sua variabilidade entre os harmônicos de 2,2 a 2,5a ( $17 \leq k \leq 20$ ), revelando que embora sejam duas oscilações com alta variabilidade explicada por frequências interanuais de 2 a 7a, a QBO caracterizou-se com acentuado comportamento bienal a trienal (64,9%), enquanto o ONI mostrou-se predominantemente com variabilidade trienal a quinquenal (46,6%). As oscilações Dipolo do Oceano Índico (IOD) e Decadal do Pacífico (ODP) (**figura 12**) situaram secundariamente com maiores proporções de variabilidade explicada pela frequência de 2-7a, compondo 32,5% e 29,7%, respectivamente, de sua variabilidade. A IOD apresentou distribuição dos harmônicos de 2-7a mais próxima do índice ONI ( $r = 0,54$ ), com picos nas frequências de 3,1a (7,4%) e 3,6a (4,8%), apesar de ser bem menos influenciada pela frequência de 2-7a, enquanto a ODP registrou picos sobre harmônicos de 2-7a mais elevados, frequências de 4,3a ( $R^2 = 6,1\%$ ) e 5,4a ( $R^2 = 5,4\%$ ).

Para os demais nove índices restantes (**figura 12**), observou-se que o sinal de 2 a 7 anos mostrou-se com efeitos intermediários (quatro índices) a reduzidos (cinco índices). No primeiro caso, os índices dos Oceano Atlântico Tropical e Sul TNA, TSA e AMM revelaram que sua variabilidade é explicada entre 20 a 30% por ciclos interanuais de 2 a 7a. Contudo, apesar de tal influência, as contribuições dos harmônicos de 2-7a não ultrapassaram individualmente  $R^2 = 5\%$ , estando os harmônicos com picos de  $R^2$  acima de 15% na faixa de harmônicos de baixa frequência ( $> 7$  anos), revelando que esta frequência expressa importância na variabilidade de tais índices. Os resultados permitiram ainda observar que os índices que englobam latitudes subtropicais a polares, particularmente Oscilações do Ártico (AO), Antártica (AAO), do Pacífico Norte (NAO), Multidecadal do Atlântico (AMO) e Pacífico/ América do Norte (PNA) apresentam de 10 a 20% de sua variabilidade explicada por sinais interanuais (f:2-7a). Em específico, desse grupo destacado, as oscilações AAO, AO, PNA, NAO se caracterizaram por apresentar mais de 60% de sua variabilidade determinada por oscilações de alta frequência ( $\leq 12m$ ) e reduzidas contribuições de sinais de baixa frequência ( $< 7\%$  de sua variabilidade). Contrariamente, as oscilações AMO, AMM, TSA, TNA e ODP se destacaram como índices

que possuem mais de 1/3 de sua variabilidade explicada por oscilações superiores a 7 anos, sendo detectado picos isolados superiores 15% ( $R^2$ ) sobre os harmônicos de 43a ( $k = 1$ ) e 10,8a ( $k = 4$ ). Dessa forma, a julgar pelos índices e oscilações considerados, concluiu-se que embora oscilações interanuais de 2 a 7 anos expliquem no mínimo 10% de certas oscilações, como AAO e AO, observou-se que o perfil de frequência observado sobre o ENOS é igualmente compartilhado apenas pela QBO e, em segundo plano, sobre as oscilações IOD e ODP (30-33%).

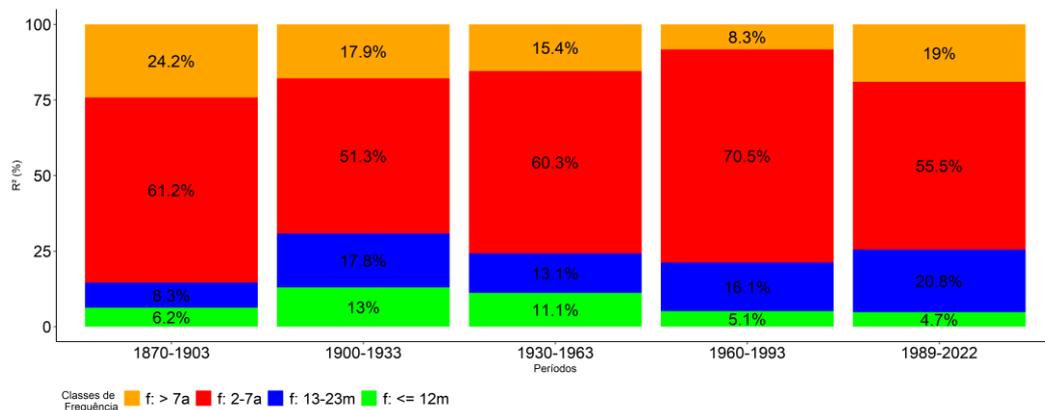


**Figura 12.** Distribuição da variabilidade explicada ( $R^2$ ) entre harmônicos ( $k$ ) 1 a 24 para 12 tipos de índices climáticos. Período de análise considerado: 1989-2021,  $n = 516$  e  $k_{max} = 258$ .

Apesar do perfil de frequência observado em **figura 12**, com picos de frequência entre 3 à 6 anos, principalmente, para índices do Pacífico Tropical, investigou-se se o padrão detectado apresenta variação em função do tempo, pois a confirmação desse fato implicaria que variáveis (precipitação e temperatura do ar) impactadas pela oscilação ENOS igualmente teriam a potencialidade de imprimir essa dinâmica de frequência em sua variabilidade.

Para tanto, a **figura 13** apresenta distribuição da variabilidade explicada ( $R^2$ ) entre grupos de frequências (harmônicos) para anomalias de TSM da região niño 3.4 para cinco períodos distintos, tendo como bases nessa análise o período 1870-2022. Observando a distribuição de  $R^2$ , constatou-se que as anomalias de TSM apresentaram variação da proporção explicada pela frequência de 2 a 7 anos entre 1870 a 2022, revelando que em determinadas períodos tal conjunto de frequências possui maior potencial explicativo sobre a variabilidade da TSM. As maiores proporções de  $R^2$  identificadas ocorreram em 1870-1903 ( $R^2 = 61,2\%$ ) e

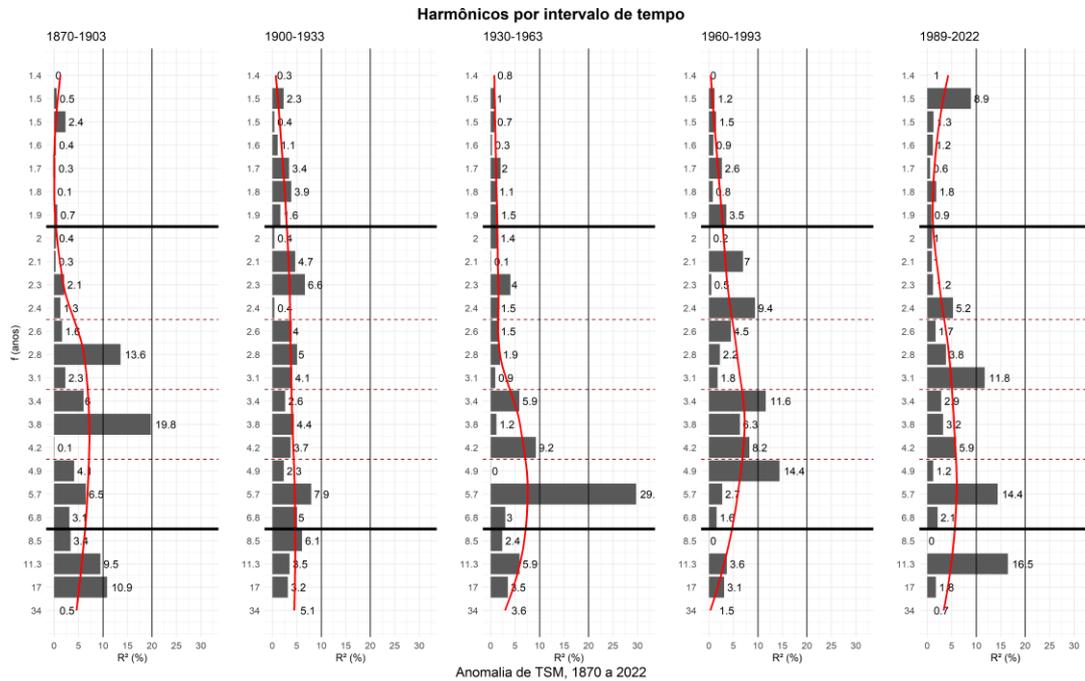
1960-1993 ( $R^2 = 70,6\%$ ), com menores proporções em 1900-1933 ( $R^2 = 51,3\%$ ). Para os períodos 1900-1933 e 1930-1966, verificou-se que sinais de alta frequência ( $f: \leq 12m$ ) apresentaram maiores valores de explicabilidade sobre a variabilidade temporal, atingindo  $R^2 = 13\%$  e  $11,1\%$ , respectivamente. Para os demais três períodos, a variabilidade de alta frequência se apresentou inferior a  $7\%$ . Além disso, as contribuições de baixas frequências ( $f: > 7a$ ) apresentou grandes variações, a se dizer pelos períodos 1870-1903 e 1989-2022 encerrarem as maiores contribuições, com valores acima de  $19\%$ , enquanto para os períodos intermediários (1900-1993), observou-se decréscimo de sua importância sobre a variabilidade temporal.



**Figura 13.** Distribuição da variabilidade explicada ( $R^2$ ) entre classes de frequência ( $f$ ) para cinco períodos de tempo entre 1870 a 2022. Para cada período análise considerado,  $n = 408$  e  $k_{\max} = 204$ .

Adicionalmente, a **figura 14** adiante apresentam a distribuição da variabilidade ( $R^2$ ) explicada entre os harmônicos 5 a 17 (subfrequências) componentes das frequências de 2 a 7 anos para os períodos anteriores. Amparando-se na **figura 14**, constatou-se que subfrequências interanuais variáveis entre 2 a 7 anos dominantes sobre a variabilidade da TSM apresentam distintas contribuições ao longo do tempo. Os resultados apontam movimentação dos picos de  $R^2$  dominante entre harmônicos de frequências intermediárias (3-4 anos) (período 1870-1903), atingindo picos em frequências mais baixas (5-7 anos) (período 1900-1963) e retorno a frequências intermediárias (3-4 anos) (período 1960-2022). É possível verificar igualmente que harmônicos interanuais de frequências mais altas (2-3a) apresentam contribuições mais efetivas sobre a variabilidade da TSM em determinados períodos como 1900-1933 e 1960-1993, nos quais foram detectados picos individuais de  $R^2$  sobre frequências 2,1 a 2,4 anos. Além disso, verificou-se que frequências interanuais mais baixas apresentam maiores efeitos sobre a variabilidade da TSM em intervalos particulares. Para os períodos de 1900-1933 e 1930-1963, verificou-se picos individuais no harmônico de 5,7 anos com valores de  $R^2 = 7,9\%$  e  $29\%$ , respectivamente. O período de 1989-2022 também apresentara importante contribuição desse

harmônico (14,4%), contudo aqui se observara picos em frequência intermediária (3,1 anos) e superior (11,3 anos).



**Figura 14.** Distribuição da variabilidade explicada ( $R^2$ ) entre harmônicos 1 ( $f = 34$  anos) a 24 ( $f = 1,4$  anos) para cinco períodos de tempo entre 1870 a 2022. Para cada período análise considerado,  $n = 408$  e  $k_{\max} = 204$ .

Arelado ao exposto, a **tabela 5** apresenta o  $R^2$  acumulado do sinal de 2-7 anos distribuído entre as classes de frequências (subfrequências): 2-3-a (harmônicos 12-17), 3-5-a (7-11) e 5-7-a (5-7), relativos aos cinco períodos destacados na **figura 14**. No total, os harmônicos de 2 a 7a referentes a cada período de tempo explicam entre 51,3 a 70,5% da variabilidade de cada período (vide **figura 13**). Associado a tal grau de explicação, observou-se com distinção que em função do tempo, diferentes conjuntos de harmônicos interanuais exercem domínio sobre o sinal. Partindo da **tabela 5**, verifica-se que nos períodos de 1870-1903 e 1960-1993, a subfrequência 3-5 anos ( $R^2 = 52,8\%/ 60,1\%$ ) apresentou maiores valores de variabilidade explicada/ amplitude para o período, sendo identificado com segunda importância subfrequência 2-3 anos ( $R^2 = 31,5\%/ 33,8\%$ ). Na **figura 14**, é possível identificar que tais subfrequências mencionadas apresentam amplitudes  $> 0,4$ . Contrariamente, nos períodos 1900-1933 e 1930-1963, verificou-se que a subfrequências mais altas, 2-3 anos ( $R^2 = 41,3\%$ ) e 5-7 anos ( $R^2 = 54,2\%$ ) dominaram, respectivamente, a variabilidade dos períodos citados. O período 1900-1933 se destacou individualmente por apresentar valores mais reduzidos de amplitude. Nos dois períodos citados, percebe-se que a subfrequência de 3-5 anos esteve associada a baixos valores de amplitude ( $A < 0,3$ ). Para o período 1989-2022, a

subfrequência 3-5 anos ( $R^2 = 45,1\%$ ) também ocupara posição dominante, embora aqui com menores amplitudes.

**Tabela 5.** Valores de variabilidade explicada ( $R^2$ ) e amplitude máxima (A) para séries temporais dos harmônicos (k) componentes das subfrequências (f) de 2 a 3 anos, 3 a 5 anos e 5 a 7 anos.

Períodos		1870-1903		1900-1933		1930-1963		1960-1993		1989-2022	
f	k	$R^2$ (%)	A (máx)	$R^2$ (%)	A (máx)	$R^2$ (%)	A (máx)	$R^2$ (%)	A (máx)	$R^2$ (%)	A (máx)
2-3 anos	12-17	31,5%	<b>0,42</b>	<b>41,3%</b>	<b>0,25</b>	17,15%	0,18	33,8%	<b>0,35</b>	25,1%	0,27
3-5 anos	7-11	<b>52,8%</b>	<b>0,50</b>	33,4%	0,20	28,6%	<b>0,27</b>	<b>60,13%</b>	<b>0,43</b>	<b>45,09%</b>	<b>0,40</b>
5-7 anos	5-6	15,7%	0,29	25,3%	<b>0,27</b>	<b>54,2%</b>	<b>0,49</b>	6,09%	0,19	29,8%	<b>0,44</b>
$R^2$ 2-7-a (%)		100,00%	-	100,00%	-	100,00%	-	100,00%	-	100,00%	-
$R^2$ 2-7-a (%)		61,20%	-	51,30%	-	60,30%	-	70,50%	-	55,50%	-

## 4.2 Sinal ENOS na América do Sul: Análise de Distribuição Harmônica

Conforme apresentado anteriormente, o tópico a seguir objetiva realizar a identificação das áreas em que o sinal ENOS (frequência de 2-7 anos) possui maior proporção explicativa sobre a variabilidade temporal observada entre **1982 e 2015** para as variáveis Precipitação, NDVI e Temperatura do Ar, em a) escala global (res.  $2,5^\circ/1^\circ$ ) e b) América do Sul (res.  $0,5^\circ$ ). Para tanto, será empregado análise harmônica (AH) (item metodologia) fazendo uso de dois bancos de dados, banco de dados original com remoção de tendência (escala global e AS) e banco de dados anomalia em relação a climatologia (AS). Essas duas análises harmônicas serão efetuadas, tendo em vista que a primeira expressa a contribuição de toda e qualquer frequência, enquanto a segunda apresenta a mesma, sem efeito do ciclo anual. Baseado nas duas AHs, será possível identificar as áreas em que há maior/ menor relação com oscilações de 2 a 7 anos na América do Sul.

### 4.2.1. Proporção de Sinal ENOS: Padrão de Precipitação Global

Em âmbito global, os resultados de proporção de variabilidade explicada acumulada ( $R^2$  (%)) para a variável precipitação (GPCP) por classe de frequência apontaram que os sinais intra-anuais ( $f: \leq 12m$ ) controlam predominantemente a variabilidade temporal da precipitação global, apresentando média de 83,4% ( $m_e = 84,8\%$ ), com baixo coeficiente de variação (9,4%). Tais valores associados ao caráter leptocúrtico ( $curtose = 6,2$ ) e assimetria a esquerda ( $assimetria = -1,9$ ) da distribuição revelaram alta concentração no entorno da média, a julgar por 80% (percentil<sub>10</sub>-percentil<sub>90</sub>) do globo possuir contribuição dos sinais intra-anuais sobre a precipitação respondendo por 73,9 a 91,4% da variabilidade. Dessa forma, verificou-se que

poucas áreas globo apresentam de fato baixas contribuições dos sinais intra-anuais. Particularmente, embora se observe mínima de 36,4%, contribuições inferiores a 50% perfazem 0,85% das áreas do globo, estando tais áreas situadas exclusivamente nos oceanos.

A relevância dos sinais intra-anuais é válida de destaque, visto que por constituir a frequência dominante sobre a variabilidade da precipitação e das variáveis que seguem e levando em conta o caráter complementar das classes de frequência em explicar a variabilidade total do sinal, observou-se que o grau de contribuição de oscilações superiores a 12 meses está atrelado a menores contribuições dos ciclos interanuais e dessa forma, o reconhecimento dessas áreas demarca setores em que oscilações de média (interanual) a baixa frequência atuam predominantemente. Nesse sentido, as oscilações de 24 a 96m (f:2-7a) constituem o terceiro grupo<sup>2</sup> de frequências com maior grau de importância sobre a variabilidade da precipitação, com média global de 6,0% ( $m_e = 5,4\%$ ), distribuição altamente leptocúrtica (curtose = 18,3), assimetria a direita (assimetria 3,6) e alto coeficiente de variação (60%). Os valores acima permitem concluir que maior parte do globo apresenta valores concentrados em torno da média, com 80% das áreas com  $R^2$  entre 3,1% a 8,4% (Percentil<sub>10</sub> (P<sub>10</sub>)-Percentil<sub>90</sub> (P<sub>90</sub>)), ao passo que os 5% das áreas do globo com maior proporção desse sinal apresentam valores entre 10,9% (P<sub>95</sub>) a 33,9% (máximo), revelando que embora haja dominância no entorno da média, há setores que possuem até 5,6x do valor da média global, e portanto representam áreas em que tal sinal possui maior caráter explicativo sobre a variabilidade temporal.

Em termos espaciais, a distribuição da proporção da variabilidade explicada acumulada ( $R^2$ ) pela frequência f:2-7a é apresentada na **figura 15**, considerando dados de precipitação de GPCP (a-b) e GPCC (c-d). Empregando-se **figura 15a**, preliminarmente e considerando áreas continentais e oceânicas conjuntamente, os resultados apontaram que seis regiões se caracterizam por apresentar valores de contribuição superiores a 10,9% (percentil<sub>95</sub> – P<sub>95</sub>), sendo elas: 1) Pacífico Tropical (entre 10°N-10°S) [ $R^2_{max} = 33,85\%$ ], 2) sudeste asiático (mar oriental das Filipinas) [ $R^2 = 20,74\%$ ], 3) Noroeste da América do Sul (Equador) [ $R^2 = 12,79\%$ ], 4) Groelândia [ $R^2 = 12\%$ ], 5) leste do oceano Índico [ $R^2 = 11,82\%$ ] e 6) área da Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) [ $R^2 = 11,45\%$ ]. Tendo em vista os limites do percentil<sub>90</sub> (P<sub>90</sub>) ( $R^2 = 8,41\%$ ), outras áreas foram identificadas, como: Antártica [ $R^2 = 9,9\%$ ], Atlântico Tropical Sul [ $R^2 = 9,6\%$ ], oeste do Havaí [ $R^2 = 9,4\%$ ], norte da Rússia [ $R^2 = 9,1\%$ ] e sudeste

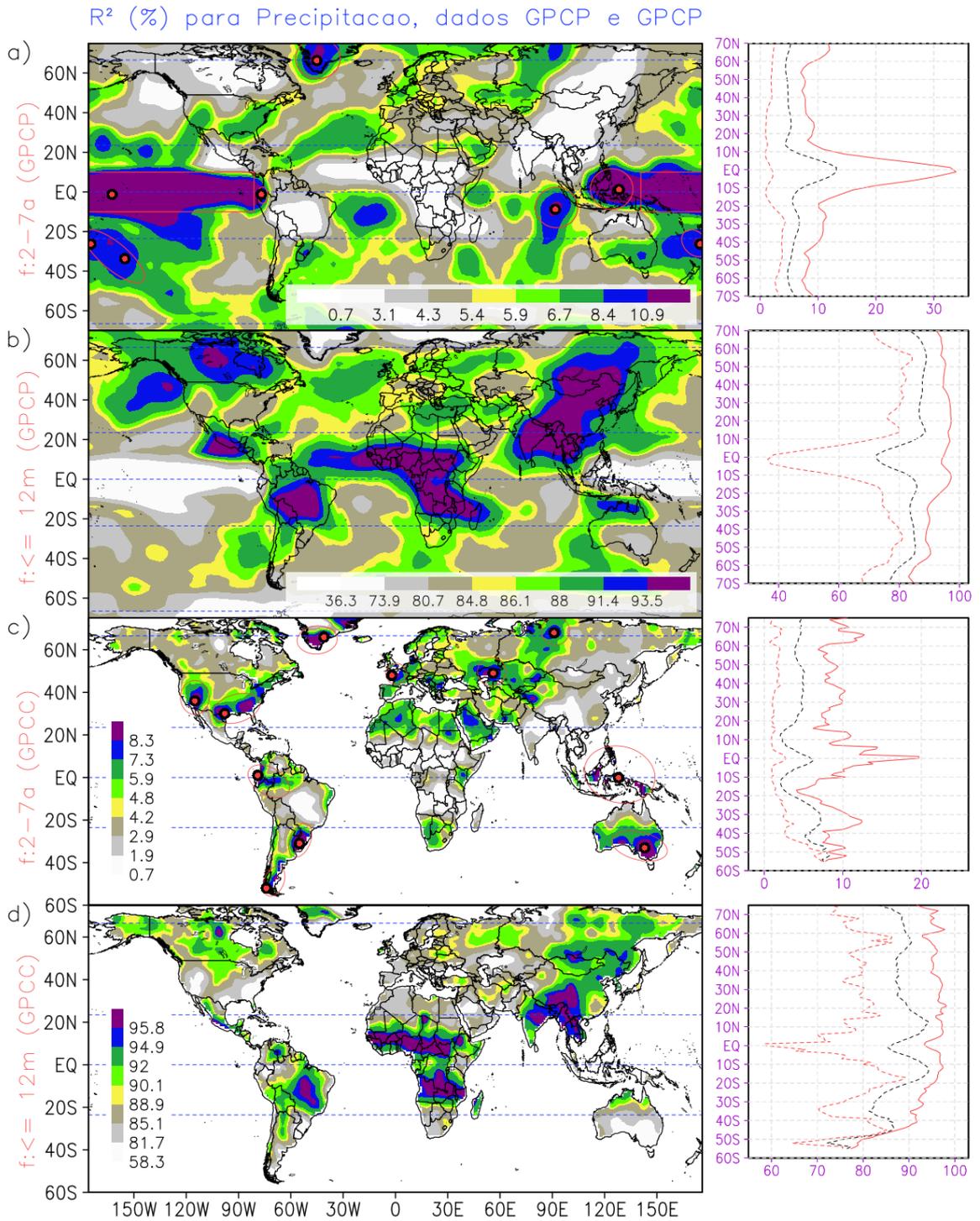
---

<sup>2</sup> As classes de frequência 13-23m e 97-408m (8-34a) explicam em média 6,8% e 3,8%, respectivamente, da variabilidade global e compõem o segundo e quarto grupo de frequências com maior proporção de explicação. As oscilações de baixa frequência, superior a 7 anos, portanto, constituem a classe de menor grau de explicação investigado, embora haja de se observar que em 5% do globo, a referida baixa frequência explica entre 12,8 a 43% da variabilidade em determinadas áreas.

da América do Sul [ $R^2 = 8,6\%$ ]. De modo geral, os pontos identificados sugerem certa variabilidade espacial na distribuição do sinal de 2-7a, no entanto, pôde-se verificar alguns padrões, assim apresentados abaixo.

Inicialmente, observou-se que o sinal de 2-7a possui maiores valores sobre a variabilidade dos oceanos/mares do que em continentes. Naqueles, o sinal apresentou média de 6,5%, com máxima de 33,9%, enquanto nos continentes, tais valores foram de 4,9% e 19%, respectivamente, além de que quatro das seis áreas com valores superiores ao P95 estarem situadas em oceanos. As regiões *niños* responderam pelas maiores médias/ máximos do sinal de 2-7a (13 a 27,8%/ 18 a 33,9%) das áreas oceânicas, com destaque particular para as regiões a oeste do Pacífico (próximo à linha de datas), *niño* 3.4 (27,8%/ 33,9%) e 4 (27,5%/ 33,9%). As demais áreas oceânicas apontaram médias/ máximos inferiores a 8%/ 21%, revelando que o referido sinal apresenta maior explicabilidade sobre a variabilidade de áreas oceânicas tropicais.

Em áreas continentais, empregando dados GPCC (**figura 15c**), **oito** áreas se destacaram por apresentar valores acima do P95 (8,3%), sendo elas: 1) sudeste asiático (Indonésia) [ $R^2 = 19,6\%$ ], 2) Groelândia [ $R^2 = 12,7\%$ ], 3) sul da Austrália [ $R^2 = 12,37\%$ ], 4) sudeste da América do Sul (RS/BRA) [ $R^2 = 10,9\%$ ], 5) Sul da América do Sul [ $R^2 = 10,47\%$ ], 6) noroeste da América do Sul (Brasil) [ $R^2 = 10,41\%$ ], 7) sudoeste dos EUA [ $R^2 = 10,28\%$ ] e 8) oeste europeu (França) [ $R^2 = 9,2\%$ ]. Em termos de zonas climáticas, os resultados globais (**figura 15**) indicaram que maiores graus de explicação do sinal de 2-7a se apresentam restritos às áreas equatoriais do Pacífico (GPCP) e arredores continentais (noroeste da América do Sul, sudeste da Ásia, e leste da Austrália) (GPCC). Por outro lado, observou-se que nos trópicos, há igualmente áreas com contribuição de frequência 2-7a inferiores a 2,9% (P25) (**figuras 5c**) e alta contribuição de frequências intra-anuais ( $> 93,8\%$ ) (**figuras 5d**). Estas áreas podem ser identificadas em 1) centro da América do Sul (área da Zona de Convergência do Atlântico Sul), 2) América Central, 3) África Tropical, 3) sul-leste asiático (Índia, Indochina e sul da China) e 4) norte da Austrália. Nas referidas áreas, é observado que a frequência intra-anual responde por mais de 93,8% da variabilidade temporal, por isso, a contribuição de frequências superiores a um ano respondem por menos de 6,2% da variabilidade.

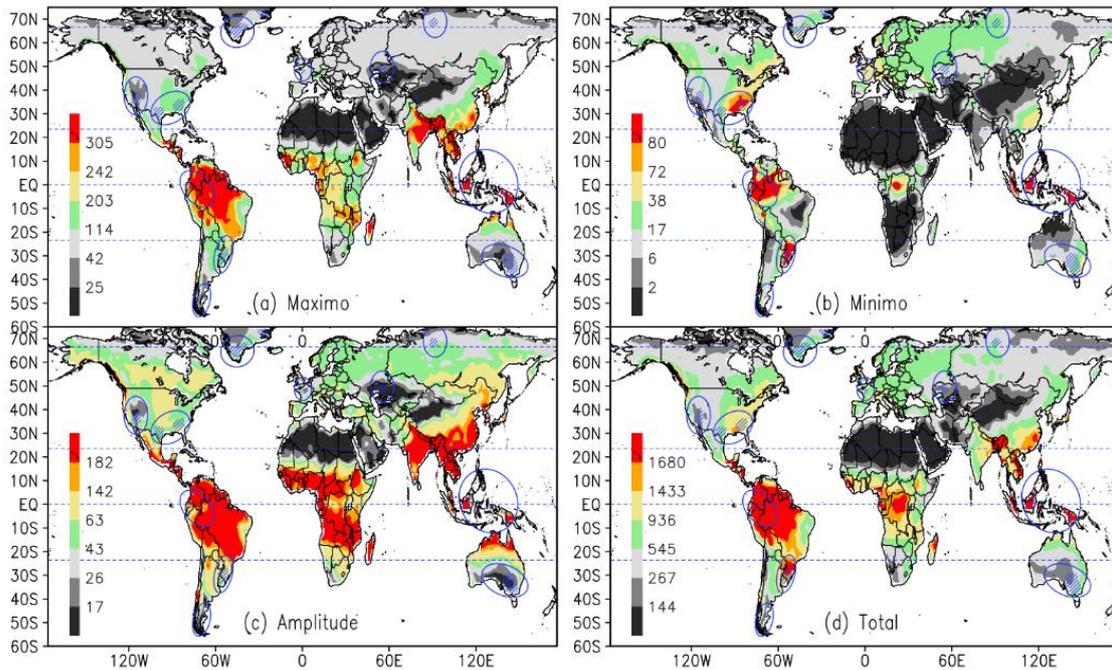


**Figura 15.** Proporção de variabilidade explicada ( $R^2$  em %) acumulada da Precipitação (mm) para harmônicos ( $k$ ) com frequência de (a, c) 2 a 7 anos ( $4 < k < 18$ ) e (b, d)  $\leq 12$  meses ( $k > 17$ ) para GPCP (a-b) e GPCC (c-d)

Zonalmente, os resultados apontaram médias/ máximas para os trópicos de 7,6%/ 33,9%, ao passo que áreas subtropicais, temperadas e polares apresentaram valores de 5,78%/11,5%, 4,9%/12% e 5,9%/11,9%, respectivamente. Os dados servem para atestar que embora a frequência interanual mencionada seja mais forte em áreas tropicais oceânicas e arredores, áreas com altas contribuições ( $R^2 > 10,9\%$ ) foram encontradas acima dos círculos

polares ártico e antártico (casos na Groelândia, norte da Rússia, Antártica e oceanos glaciais), indicando que o impacto de tais frequências não estão limitados a regiões tropicais, mas atinge em grau intermediário em latitudes médias e altas. Os gráficos presentes em **figuras 15a-d** corroboram para essa última informação. Em termos de latitude, é possível verificar que os extremos (picos/ vales) de  $R^2$  para frequências 2-7a e  $\leq 12m$  estão situadas na circunjunção do Equador (Pacífico Tropical), apesar de haver áreas ao extremo norte em que o sinal é quase alto (baixo) quanto na faixa equatorial. Os fatos apresentados atestam que para a latitude apresenta baixo valor de correlação com a distribuição dos sinais para a variável precipitação. Para frequência  $f:2-7a$  e  $f:\leq 12m$  (GPCC), por exemplo, valores significativos ( $p\text{-value} < 0,05$ ) foram encontrados, embora baixos, 0,175 e -0,232, respectivamente.

No que concerne a propriedades da precipitação, empregando dados de GPCC, a **figura 16** apresenta quatro propriedades climatológicas referentes a precipitação para o período 1982-2015, sendo elas máximo, mínimo, amplitude e total. Em tal figura, é possível observar em vetor em azul a indicação de áreas em que o sinal de 2-7a possui  $R^2 > P95$ . Para a mencionada figura, testou-se se padrões espaciais climatológicos explicam a distribuição do sinal de 2-7a. Assim, obteve-se correlações espaciais para com as características acima de -0,32, +0,32, -0,45 e -0,10, respectivamente, apontando que áreas que apresentam alta proporção de variabilidade explicada pela frequência de 2-7a em geral em associadas a uma combinação de características climatológicas, como baixas amplitudes e máximos e altos valores de mínimos. Ao se considerar, no entanto, o valor total anual da precipitação, a correlação apontou mais baixo valor (-0,1), sinalizando que áreas com altos ou baixos valores anuais de precipitação não apresentam maior ou menor relação com fenômenos de frequência de 2 a 7 anos.



**Figura 16.** Climatologia (1982-2015) da Precipitação (mm) - GPCP com discriminação de valores: (a) máximo, (b) mínimo, (c) amplitude e (d) total, segundo classes de percentis P10, P20, P40, P60, P80 e P90.

#### 4.2.2. Proporção de Sinal ENOS: Padrão de Temperatura do Ar Global

Em escala global, a distribuição da variabilidade explicada ( $R^2$ ) para a Temperatura do Ar (UDel) (1982-2015) entre as classes de frequência apontou predominância dos sinais intra- anuais ( $f: \leq 12m$ ), quando comparado às demais classes de sinais. A frequência em destaque apresentou média global de 94,9% ( $m_e = 98,6\%$ ), distribuição leptocúrtica (curtose = 8,2), assimetria a esquerda (assimetria = -2,9) e baixo coeficiente de variação ( $CV = 10,2\%$ ), revelando que 90% das áreas globais possuem a variabilidade da temperatura do ar sendo explicada entre 84,3 a 99,4% por frequências menor ou igual a 12 meses. Adicionalmente, observou-se que somente 0,42% do globo apresenta valores de contribuição da mencionada frequência inferiores a  $R^2 < 50\%$ , ao passo que em 87,3% das áreas, a contribuição intra-anual supera  $R^2 = 90\%$ . Os resultados apresentados evidenciam que ciclos intra- anuais possuem alto potencial explicativo sobre a temperatura do ar, sendo poucas as áreas que a referida frequência apresenta valores inferiores a 50%, o que resulta no fato de que em somente pequenas faixas do globo, oscilações superiores a um ano possuem maior influência sobre a variabilidade da temperatura do ar.

Em termos de frequências superiores a um ano, as oscilações de 24 a 96m ( $f: 2-7a$ ) constituem o segundo maior conjunto de ciclos com maior grau de explicação sobre a temperatura do ar, apresentando média de 1,98% ( $m_e = 0,54\%$ ), distribuição altamente

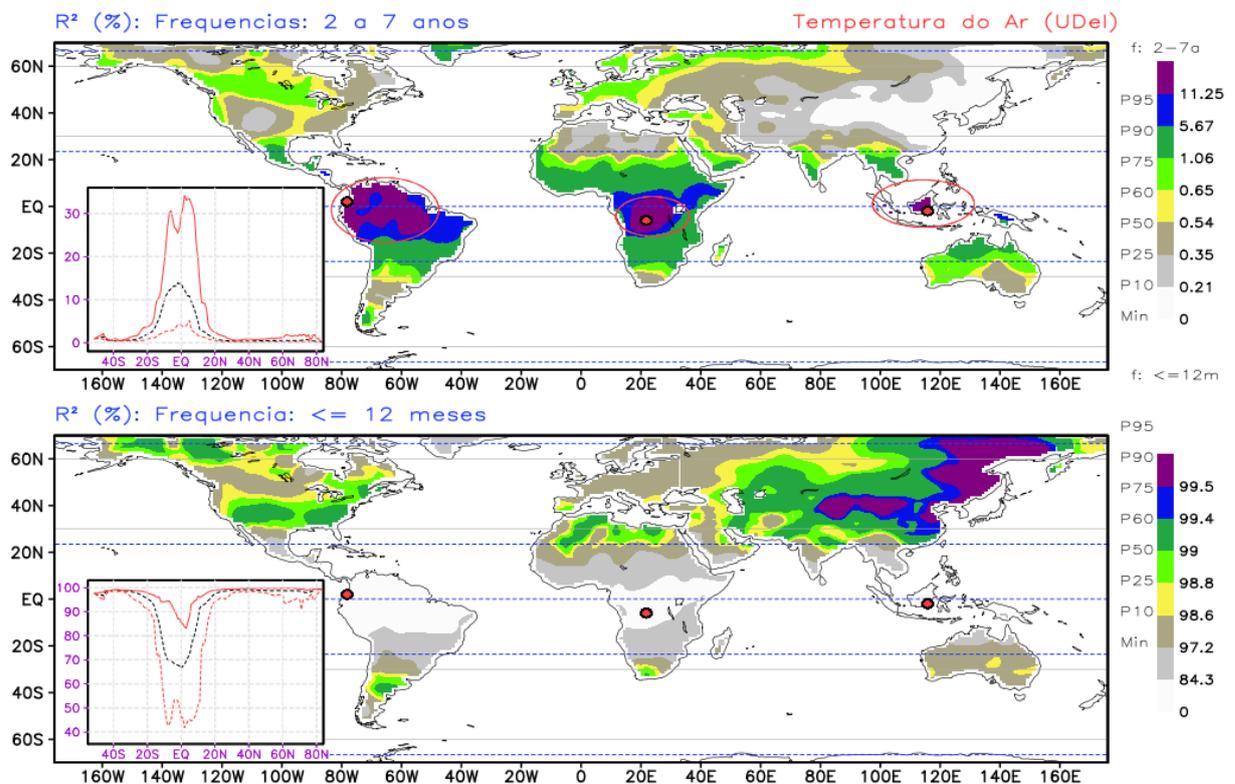
leptocúrtica (curtose = 14,2), assimetria a direita (assimetria = 3,5) e elevado coeficiente de variação (CV = 203,5%), revelando alta variabilidade espacial do grau de contribuição dos ciclos de 2-7a sobre a temperatura do ar. Para se notar, embora 80% das áreas globais apresentem baixos valores  $R^2$ , entre 0,21 a 5,67% (p10 a p90), e por extensão somente 25,8% do globo possua valores superiores a 1%, observou-se que em 5% do globo, as oscilações de 2-7a explicam entre 11,3% a 34,2% da variabilidade da temperatura do ar, revelando que apesar das frequências interanuais citadas explicarem menos de um centésimo da variabilidade na maior parte do globo (74,2%), em determinados setores, esse grau de explicação atingem mais de 1/3 da variabilidade.

Dessa forma, a **figura 17** adiante apresenta a distribuição do grau de variabilidade explicado ( $R^2$ ) pelas frequências f:2-7a (a) e f:  $\leq 12m$  (b), a partir de classes de percentis. Usando o parâmetro do percentil 95 (P95) ( $R^2_{lim} = 11,3\%$ ) (**17a**), **seis áreas** foram identificadas com maiores valores, sendo elas: 1) oeste da Colômbia [ $R^2 = 34,15\%$ ], 2) sudoeste da República Democrática do Congo (África central) [ $R^2 = 30,63\%$ ], 3) sudeste da ilha de Borneo (Indonésia) [ $R^2 = 22,9\%$ ], 4) leste da Venezuela [ $R^2 = 19,85\%$ ], 5) norte do Peru [ $R^2 = 19,72\%$ ] e 6) oeste do estado do Pará (Brasil) [ $R^2 = 18,52\%$ ].

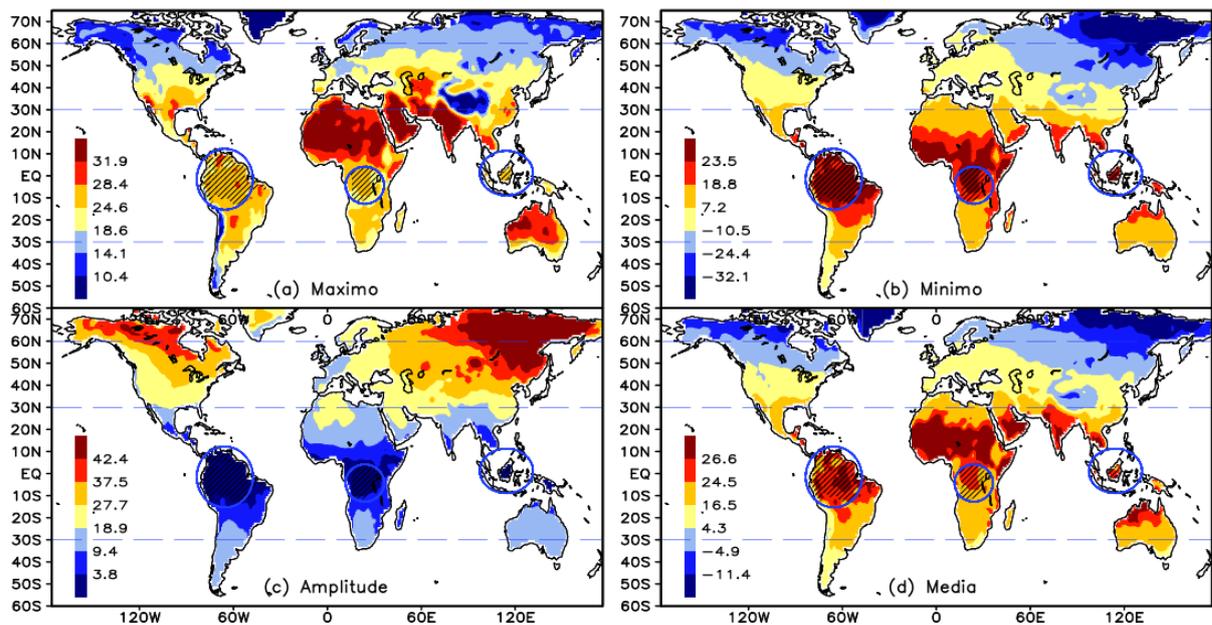
Latitudinalmente, os resultados apontaram que áreas com maior proporção de variabilidade explicada ( $R^2$ ) pela frequência de 2-7a estão situadas estritamente na zona tropical, média de 5,87%, (**figura 17a**), com destaque particular para a faixa equatorial (média = 11%) que circunscreveu todas as áreas com  $R^2 > P95$ . As zonas temperadas (0,48/ 2,69%), subtropicais (0,46/ 2,13%) e polares (0,50/ 1,91%), por sua vez, apresentaram baixos valores de média/ máximo. No geral, a correlação linear espacial para com latitude fora de -0,57, indicando decréscimo do sinal em direção aos polos. Apesar disso, notou-se que os valores de  $R^2$  atingem baixos valores em direção ao subtropicais e apresentam relativo aumento em relação aos polos. Além disso, verificou-se que no leste asiático (Japão, Coreias e leste da China e Rússia), os menores valores de contribuição do sinal de 2-7a são encontrados. Essa dinâmica observada, em síntese, confirma os padrões opostos observados na **figura 17b** e sua respectiva correlação negativa com os sinais intra-anuais ( $r = -0,97$ ). Para frequências menores que 12 meses, correlação positiva ( $r = 0,59$ ) com a latitude apontou que no geral, nos trópicos, os ciclos intra-anuais possuem menor influência (média = 84,8%) sobre a temperatura do ar, sendo verificado maiores efeitos (> 99%) de tais ciclos sobre os subtropicais e leste da Ásia.

Para além do exposto, verificou-se que áreas que possuem maior influência de ciclos inter-anuais possuem características de Temperatura do Ar climatologicamente diferente. A

**figura 18** ilustra características climatológicas de máximo, mínimo, amplitude e média da temperatura do ar, com indicação em vetor das áreas com maior contribuição dos ciclos de 2-7a. Dada a elevada correlação espacial das referidas climatologias para com a latitude de 0,86 (amplitude), -0,76 (máximo), -0,94 (mínimo) e -0,92 (média); constatou-se que, em geral, áreas com forte influência de ciclos de 2-7a se caracterizam por apresentar baixa amplitude térmica anual ( $r = -0,56$ ) e altos valores de média ( $r = 0,40$ ), máximo ( $r = 0,19$ ) e mínimo ( $0,48$ ), sendo os ciclos intra-anuais com papel dominante sobre setores que apresentam elevada amplitude ( $r = 0,59$ ) e baixos valores de temperatura mínima ( $r = -0,51$ ).



**Figura 17.** Proporção de variabilidade explicada ( $R^2$  em %) acumulada da Temperatura do Ar (Udel) para harmônicos ( $k$ ) com frequência de (a) 2 a 7 anos ( $4 < k < 18$ ) e (b)  $\leq 12$  meses ( $k > 17$ ).



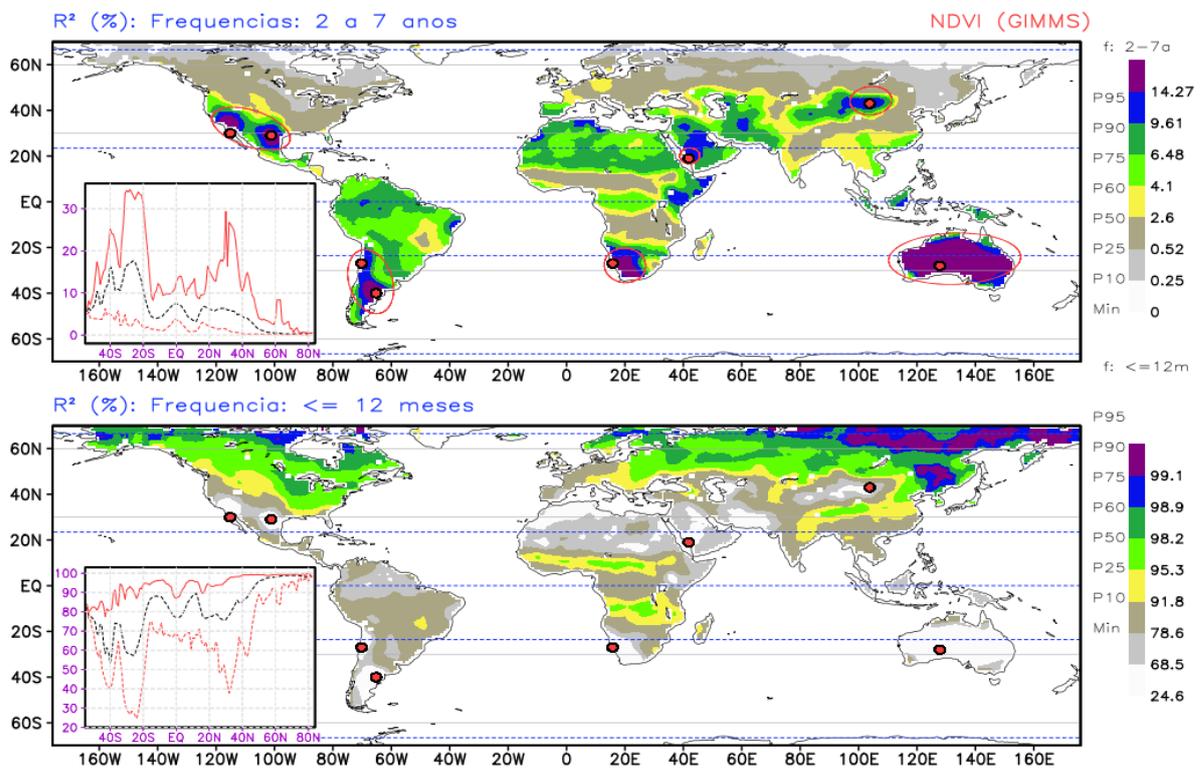
**Figura 18.** Climatologia (1982-2015) da Temperatura do Ar (°C) - Udel com discriminação de valores: (a) máximo, (b) mínimo, (c) amplitude e (d) média. Polígonos em azul (preto) apontam áreas em que o sinal de 2-7a ( $\leq 12m$ ) possui R<sup>2</sup> acumulado explicativo superiores ao P95.

#### 4.2.3. Proporção de Sinal ENOS: Padrão de NDVI Global

Do ponto de vista global, a distribuição da variabilidade temporal para a variável NDVI (GIMMS) (1982-2015) entre as classes de frequência revelou dominância dos sinais intra- anuais ( $f: \leq 12m$ ), quando equiparado às demais classes. Tal sinal apresentou média global de 86,6% ( $m_e = 91,8\%$ ), distribuição levemente platicúrtica (curtose = 2,03), assimetria a esquerda (assimetria = -1,4) e baixo coeficiente de variação ( $CV = 16,2\%$ ), apontando que 90% das áreas globais possui NDVI com contribuição da referida frequência entre 68,5 a 98,9% (entre P10 e P90), sendo apenas 3% do total de áreas com valores inferiores a  $R^2 < 50\%$ . Por outro lado, a frequência de 2 a 7 anos ( $f: 2-7a$ ) figura, nesse contexto, como terceiro conjunto de frequências com maior grau de explicação sobre a variabilidade do NDVI, apresentando média de 4,4% ( $m_e = 2,6\%$ ), distribuição leptocúrtica (curtose = 7,4), assimetria a direita (assimetria = 2,4) e elevado coeficiente de variação ( $CV = 122,2\%$ ), com 80% das áreas globais com  $R^2$  variando entre 0,25 a 9,6% (entre P10 e P90). Os dados acima permitem concluir que a contribuição das frequências de 2-7a possuem alta variação espacial no que se refere ao grau de contribuição sobre a variabilidade do NDVI. Para se notar, os resultados apontaram que 35,9% do globo apresenta contribuição inferior a 1%, ao passo em outros setores, em 5% do globo, o sinal de 2-7a contribui para explicar entre 14,3% (P95) a mais de 1/3 da variabilidade do NDVI ( $R^2_{máx} = 34,56\%$ ). Dessa forma, o alto valor de CV associado ao sinal de 2-7a assinala, conforme será

investigado a frente, que tal frequência apresenta papel diferenciado em relação ao grau de explicação da variabilidade temporal de diferentes tipos de vegetação.

Do ponto de vista espacial, a **figura 19** abaixo ilustra a distribuição do grau de variabilidade explicado ( $R^2$ ) pelas frequências f:2-7a (a) e f:  $\leq 12m$  (b), organizados em classes de percentis. Tendo-se como parâmetro o P95 ( $R^2_{lim} = 14,28\%$ ), oito áreas do globo foram identificadas com maiores valores, sendo elas: 1) sul da Austrália [ $R^2 = 34,56\%$ ], 2) oeste do México [ $R^2 = 29,35\%$ ], 3) sul da Argentina [ $R^2 = 25,21\%$ ], 4) sudoeste da Namíbia (sul da África) [ $R^2 = 19,48\%$ ], 5) nordeste do México [ $R^2 = 18,34\%$ ], 6) sudoeste da Arábia Saudita [ $R^2 = 16,32\%$ ], 7) norte do Chile [ $R^2 = 15,26\%$ ] e 8) sul da Mongólia [ $R^2 = 14,87\%$ ]. A julgar pela disposição espacial de tais áreas, observou-se que o sinal sobre a vegetação possui alguns padrões espaciais associados a latitude e características do NDVI.

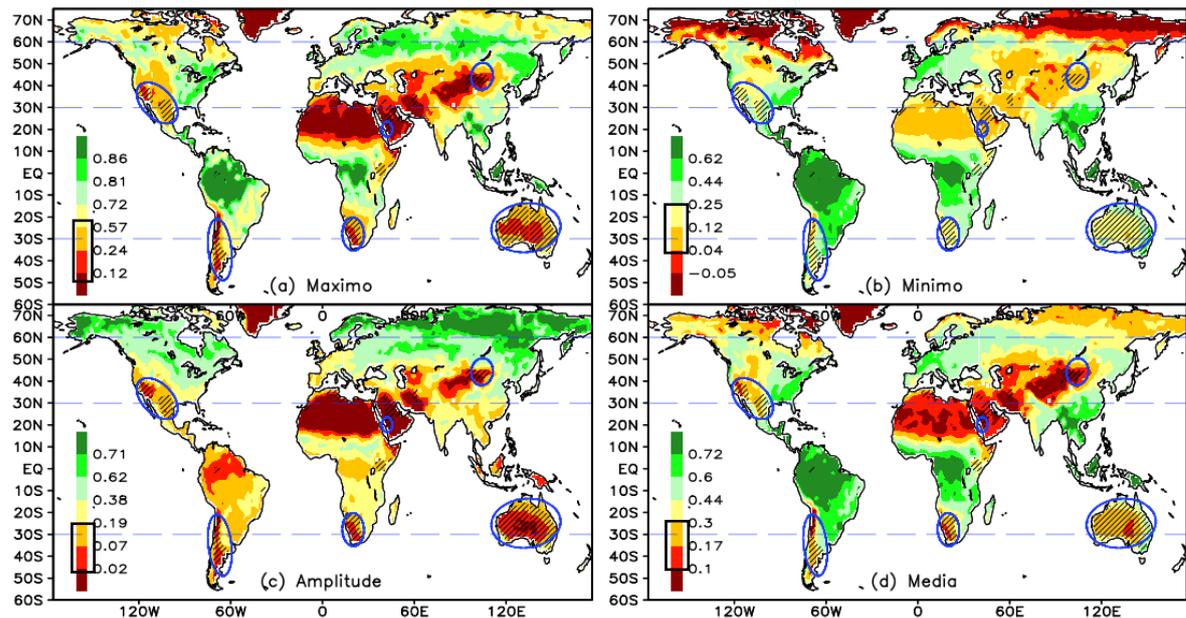


**Figura 19.** Proporção de variabilidade explicada ( $R^2$  em %) acumulada do NDVI (GIMMS) para harmônicos ( $k$ ) com frequência de (a) 2 a 7 anos ( $4 < k < 18$ ) e (b)  $\leq 12$  meses ( $k > 17$ ). Os gráficos em cada quadro representam máximo (vermelho sólido), média (preto sólido) e mínimo (vermelho pontilhado) longitudinal de  $R^2$  para cada latitude.

Preliminarmente, tratando-se da latitude, observou-se que os setores que apresentam maiores valores de  $R^2 > P95$  para frequências de 2-7a estão circunscritas inteiramente nas faixas 18 a 48°S e 19 a 44°N (**figura 19a**), apontando que vegetações situadas nos subtropicais apresentam maiores contribuições das oscilações de 2-7a, enquanto vegetações de latitudes baixas e altas possuem menores influências. Para se comparar, verificou-se que as zonas

tropical, temperadas e polares possuem  $R^2$  máximos de 33,9%, 20,8% e 3,2%, respectivamente, com sinal de 2-7a correlacionando-se negativamente ( $r = -0,483$ ,  $p\text{-value} < 0,05$ ) com latitude, demonstrando redução entre equador para os polos. Precisamente, observou-se que o sinal 2-7a possui média/ máximo de 5,4/ 14% para latitude baixas (17°S-18°N) e 5,5/ 29,4% (13,9/34,6) para latitudes superiores a 44°N (inferiores a 48°S). Nas faixas 18 a 48°S e 19 a 44°N, o sinal 2-7a é máximo sobre NDVI, sendo observado, contudo, maiores valores no hemisfério sul, nos arredores do Trópico de Capricórnio. Comparativamente, a **figura 19b** permite observar que áreas em que o NDVI é dominado por frequências intra-anuais apresentam baixas contribuições do sinal de 2-7a. Nesse caso, observou-se que espacialmente os dois conjuntos de sinais ( $f: \leq 12m$  e  $f: 2-7a$ ) apresentados em **figura 19** estão inversamente correlacionados ( $r = -0,935$ ). Baseado nos gráficos de **figura 19** é possível observar essa relação de distribuição inversa. Latitudinalmente, os ciclos intra-anuais correlacionam-se positivamente com a latitude ( $r = 0,55$ ), indicando aumento de seu papel explicativo sobre a variabilidade do NDVI no sentido de latitudes baixas para altas. Essa relação é sobretudo evidente no hemisfério norte (HN), a qual possui grande proporção continental situada a norte de 50°. Nessa faixa latitudinal, os mínimos de  $R^2$  são superiores a 80%, evidenciando que em tais setores os tipos de vegetação apresentam influência determinante dos ciclos intra-anuais, com baixa contribuições de frequências interanuais.

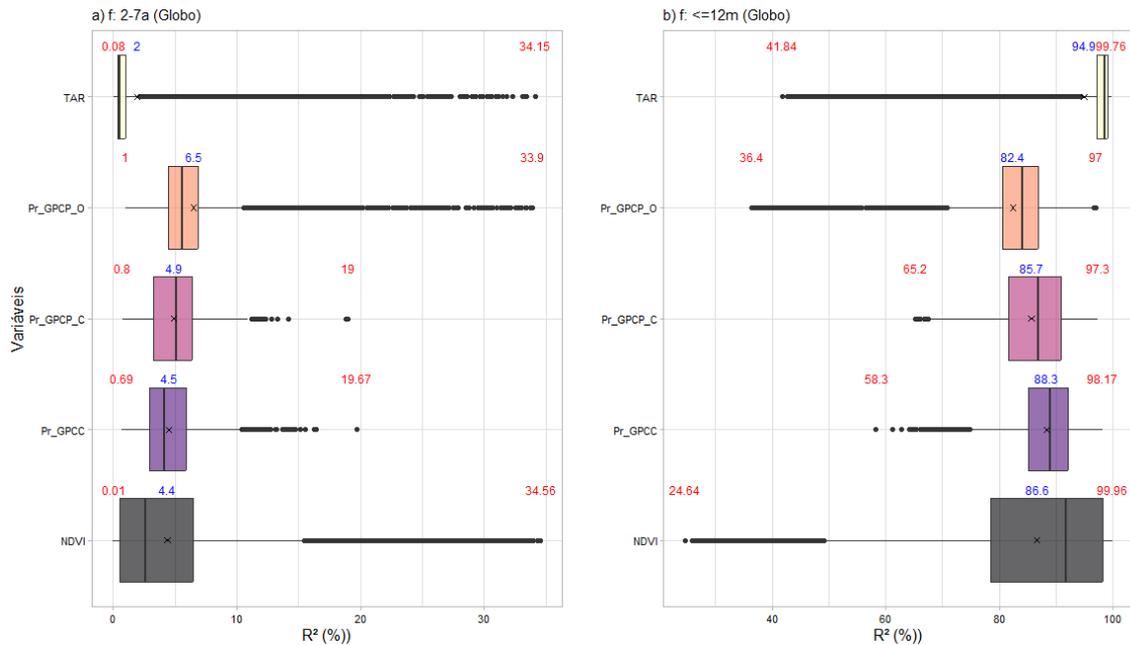
Com relação às características do NDVI, a **figura 20** apresenta quatro características médias para o período 1982-2015, referentes ao NDVI: máximo, mínimo, amplitude e média, com indicação (vetor em azul e hachurado) das áreas com  $R^2 (f:2-7a) > P95$ . Baseado em tais propriedades, a análise de correlação linear espacial revelou correlação espacial significativa ( $p\text{-value} < 0,05$ ) com as mesmas de respectivamente -0,44, -0,13, -0,65 e +0,19, mas com destaque particular para amplitude (-0,65) e máximo (-0,44) de NDVI. Segundo tais características, constatou-se que áreas mais impactadas por oscilações de 2-7a possuem características particulares de NDVI. Assim sendo, tipos de vegetação dos subtropicais com baixas amplitudes (~87% das áreas entre 0,02 a 0,18) e máximos (~90% das áreas entre 0,14 a 0,56) de NDVI possuem maior influência do referido sinal, enquanto que 1) vegetações próximas ao Equador com características de baixas amplitudes, mas altos valores de mínimo ( $> 0,44$ ) e máximo ( $> 0,81$ ) de NDVI, 2) áreas desérticas dos subtropicais, com mínimos e máximos de NDVI próximos a zero e 3) áreas a norte de 50°N, características por altos valores de amplitude ( $> 0,62$ ) apresentam menores efeitos de ciclos de 2-7a sobre sua variabilidade.



**Figura 20.** Climatologia (1982-2015) da NDVI - GIMMS com discriminação de valores: (a) máximo, (b) mínimo, (c) amplitude e (d) média.

#### 4.2.4. Influência de Sinal ENOS por Variável: análise Comparativa

Em função dos resultados anteriores sobre a distribuição da frequência de 2 a 7 anos entre distintas variáveis, a **figura 21** apresenta boxplot para as variáveis Temperatura do Ar, NDVI e Precipitação, em termos de distribuição da variabilidade explicada pelas frequências 2-7anos **(a)** e  $\leq 12$  meses **(b)**. Dessa forma, a análise revelou que a precipitação (GPCC/ GPCP) possui as maiores médias/ medianas (média de  $R^2 = 4,5/ 6,0\%$ ; mediana de  $R^2 = 4,2/ 5,4\%$ ) de variabilidade explicada pela frequência de 2-7a, além de possuir os menores coeficientes de variação ( $CV = 47,5/ 60\%$ ). O percentil 25 (P25) para precipitação fora de 2,9 e 4,3%, respectivamente, para GPCC e GPCP, enquanto NDVI e TAR apresentaram valores de  $R^2 < 1\%$ . Embora os máximos valores de  $R^2$  sejam identificados para NDVI e TAR, observou-se que em termos de distribuição, a precipitação apresentou maiores volumes de áreas com maior proporção de variabilidade explicada pela frequência de 2-7 anos, tal fato identificado pelos menores valores de CV e maiores médias/ medianas/ P25 quando comparado a Temperatura e NDVI. Relevante destacar, contudo que se tratando de Precipitação (GPCC e GPCP), os sinais de 2-7a comportaram diferentemente em áreas continentais e oceânicas. De fato, é possível observar que somente a precipitação de áreas oceânicas (GPCP-O) possui valores de média de  $R^2 > 5\%$ , enquanto a precipitação de áreas continentais é menos influenciada pela frequência de 2-7 anos (média  $R^2 = 4,9\%$  (GPCP\_C)/  $4,5\%$  (GPCC)).



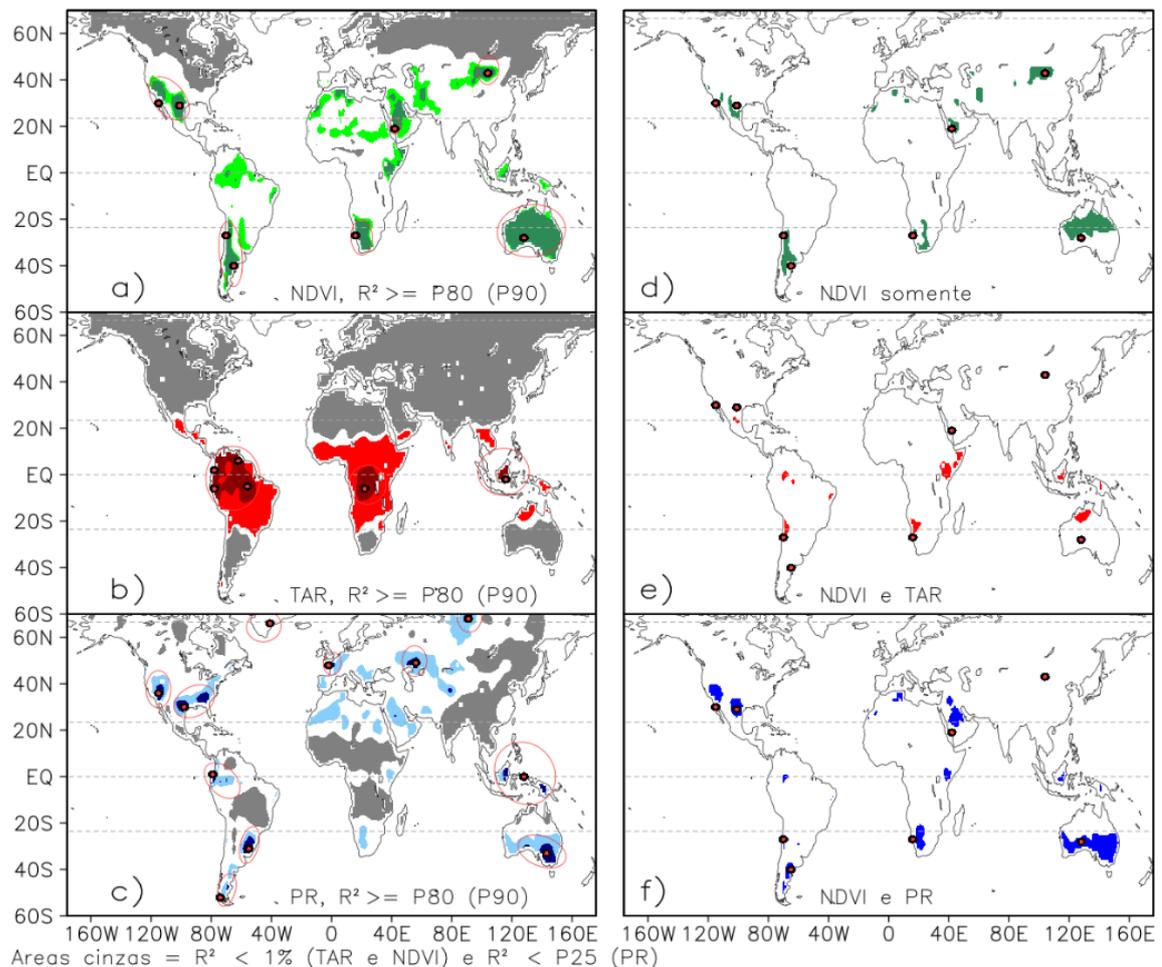
**Figura 21.** Proporção de variabilidade explicada ( $R^2$  em %) para frequência a) f: 2-7a e b) f: <=12m por variável – Globo

Quando considerado apenas áreas continentais, por outro lado, verificou-se que apesar da temperatura e NDVI apresentarem maiores valores de  $R^2$  máximo (34,56% e 34,20%, respectivamente) para frequência de 2-7a, tais variáveis estão associadas a altos valores de coeficiente de variação (203% e 122%), curtose acentuada (14,2 e 7,4) e assimetria positiva (3,5 e 2,4), assim como grande volume de áreas com  $R^2 < 1\%$  (74,05% e 35,9%). Comparativamente, para Precipitação (GPCC), somente 0,3% das áreas globais apresentam  $R^2 < 1\%$ . As informações apresentadas revelam que em escala global, em poucas áreas, a temperatura e o NDVI apresentam significativa variabilidade explicada pela frequência de 2-7a, indicado pela alta variabilidade espacial (alto CV), distribuição situada predominantemente à esquerda, com assimetria positiva e padrão leptocúrtico. Em específico, verificou-se que a Temperatura do Ar fora a variável que se destacou com maior grau de variabilidade comparativamente as demais variáveis, haja vista que o coeficiente de variação fora de 203% e em 75% das áreas globais, a frequência de 2-7a respondeu por  $R^2 \leq 1,06$ . Em termos de valores máximos, o NDVI e Temperatura caracterizaram-se com os maiores valores de P95/ máximo, registrando 14,3/ 34,5% e 11,3/ 34,2%, respectivamente. Essa última informação mostrou-se de importância, pois apesar de espacialmente, a precipitação possuir mais áreas impactadas (maior presença de  $R^2$  elevado) pelo sinal de 2-7a, em determinados setores, observou-se que o NDVI e Temperatura apresentam entre 1/10 à mais de 1/3 de sua variabilidade explicada pelos sinais interanuais, contrastando com o restante de suas áreas cujos valores de  $R^2$  são demasiadamente baixos ( $R^2 < 1\%$ ).

No que tange aos efeitos dos sinais intra-anuais, a análise comparativa demonstrou diferenças entre as variáveis observadas. A Temperatura do ar destacou-se como a variável cuja variabilidade é mais influenciada pelos frequências intra-anuais, apresentando média/mediana de 94,8/ 98,6%, com mais 75% das áreas globais com  $R^2 \geq 97,2\%$ . NDVI caracterizou-se em segundo plano com mais áreas influenciadas pelos ciclos intra-anuais (média/ mediana = 86,6/ 91,8%), estando a precipitação, em terceiro lugar (média/ mediana = 88,3/ 88,9%). O coeficiente de variação das três variáveis mostrou-se baixo ( $CV < 17\%$ ), indicando que em grande quantidade de áreas, os ciclos intra-anuais descrevem importante papel (alta explicação) sobre a variabilidade de tais variáveis. Contudo, observou-se que o CV fora levemente mais elevado para NDVI (16,2%) e TAR (10,2%), quando equiparado com Precipitação (6%), assim como os mínimos de  $R^2$  para os ciclos intra-anuais foram mais baixos para NDVI (24,6%) e TAR (41,8%), em relação a Precipitação (58,3%). Essas últimas informações são de interesse, pois indica que embora os ciclos intra-anuais descrevam importante componente da variabilidade das variáveis em análise, verifica-se que os altos (baixos) valores de CV (mínimos) indicam que em determinadas áreas, a influência de frequências superiores a um ano é maior sobre o NDVI e TAR.

Do ponto de vista espacial, observando a distribuição do sinal de 2-7 anos apresentado nas figuras 15c (Precipitação), 17a (Temperatura do Ar) e 19a (NDVI), constatou-se que áreas de alto/baixo  $R^2$  para NDVI estão mais associadas a áreas de alto/baixo  $R^2$  da Precipitação do que da Temperatura do Ar propriamente. Especificamente, observou-se que globalmente o sinal de  $R^2$  de NDVI apresentou correlações positivas ( $p\text{-value} < 0,05$ ) de 0,35 e 0,09 com Precipitação e Temperatura do Ar, respectivamente, apontando que há maior interseção de áreas com altos ou baixos valores  $R^2$  de NDVI-Precipitação, do que áreas de NDVI-TAR, quando considerando o  $R^2$  para frequências de 2 a 7 anos. Essa mesma relação positiva significativa para NDVI-Precipitação fora igualmente detectada isoladamente em áreas continentais: América do Sul ( $r = 0,46$ ), América do Norte ( $r = 0,51$ ), África ( $r = 0,66$ ), Europa ( $r = 0,42$ ), Ásia ( $r = 0,26$ ), Austrália ( $r = 0,14$ ) e Oceania ( $r = 0,61$ ). A América Central fora a única área com correlação negativa. De forma contrária, verificou-se que para Temperatura do Ar, correlações negativas foram dominantes, sendo observado tais valores em América do Sul ( $r = -0,21$ ), África ( $r = -0,27$ ) e Austrália ( $r = -0,30$ ). A relação entre os  $R^2$  de NDVI-TAR somente registrou valores positivos elevados em Oceania ( $r = 0,67$ ), Europa ( $r = 0,18$ ) e América do Norte ( $r = 0,18$ ).

Para efeito de ilustrar espacialmente o fato acima, a **figura 22** adiante apresenta comparativo espacial da proporção de variabilidade explicada ( $R^2$ ) pela frequência de 2-7a, de tal modo que os percentis 80 e 95 (P80 e P95) de cada distribuição foram utilizados para averiguar se áreas com alto ou baixo  $R^2$  para a variável NDVI apresentam alguma relação com aquelas identificadas para precipitação e temperatura do ar. Dessa forma, a **figuras 22a-c** indicam respectivamente áreas em que o  $R^2 > P80$  (P90), para cada uma das variáveis: NDVI, temperatura do ar (TAR) e precipitação (PR), enquanto que as **figuras 22d-e** apontam condicionais de  $R^2$  para as áreas, na qual o sinal (1) NDVI ( $> P90$ ) & TAR/ PR ( $< P80$ ) [ $R^2$  alto apenas para NDVI], (2) NDVI/ TAR ( $> P90$ , P80, respectivamente) & PR ( $< P80$ ) [ $R^2$  alto para NDVI e TAR apenas] e (3) sinal NDVI/ PR ( $> P90$ , P80, respectivamente) & sinal TAR ( $< P80$ ) [ $R^2$  alto para NDVI e PR apenas].



**Figura 22.** Áreas em que  $R^2$  (sinal de 2-7a) de a) NDVI, b) TAR e c) PR é  $> P80/ P90$  e áreas de interseção para d) NDVI ( $R^2 > P90$ ) e TAR e PR ( $R^2 < P80$ ), e) NDVI ( $R^2 > P90$ ) e TAR ( $R^2 > P80$ ) e f) NDVI ( $R^2 > P90$ ) e PR ( $R^2 > P80$ ). Áreas cinzas (a-c) representam setores com  $R^2 \leq P25$ . Valores de percentis de  $R^2$  utilizados são:  $R^2P90$  (NDVI) = 9,61%,  $R^2P80$  (PR) = 6,36% e  $R^2P80$  (TAR) = 1,60

Baseando em tal figura, ao se observar particularmente as interseções apresentadas em figuras **22d-f**, detectou-se que da totalidade de áreas em que o  $R^2$  do sinal de 2-7a é superior ao

P90 ( $R^2 \geq 9,61\%$ ) para NDVI (**fig. 22a**), as áreas de precipitação com  $R^2 > P80$  apresentam interseção de 43,7% (**fig. 22f**), enquanto áreas de Temperatura com  $R^2 > P80$  intersectam em apenas 9,1% (**fig. 22e**). As duas variáveis (Precipitação e Temperatura) intersectam conjuntamente em apenas 4% das áreas, ao passo que em 43,2% das áreas, ambas Precipitação e Temperatura possuem  $R^2 < P80$ . Esses dados servem para indicar que em termos espaciais, áreas de alto valor de  $R^2$  de Precipitação e NDVI apresentam mais áreas em comum. Para se notar, conforme identificado em **fig. 22f**, da totalidade de 8 áreas com maiores valores de  $R^2$  (para f: 2-7a) identificadas para NDVI, em cinco delas, os valores de  $R^2$  para Precipitação são igualmente elevados ( $> P80$ ).

Essa similaridade espacial observada fora anteriormente descrita. Observando atentamente **fig. 22a-c**, é possível identificar que às áreas com elevado  $R^2$  para a frequência de 2-7 anos para a variável NDVI estão inteiramente concentrados nos subtrópicos. Já Temperatura apresenta tais áreas localizadas na área equatorial. Para precipitação (continental), o sinal de 2-7a não revelou restrição latitudinal, estando na faixa equatorial, subtrópicos e altas latitudes. Por essa dinamicidade, a interseção com Precipitação fora maior. Um aspecto relevante, no entanto, é que para temperatura e NDVI, latitudes elevadas do hemisfério norte estão associadas à baixos valores de  $R^2$  para f:2-7a. Tal fato associados a figuras anteriores revelam que em tal faixa latitudinal, ciclos intra-anuais explicam grande proporção da variabilidade temporal de tais variáveis.

#### 4.2.5. *Influência de Sinal ENOS sobre a Vegetação*

Com base nos resultados anteriores, observou-se que a frequência de 2 a 7 anos explica parcela da variabilidade temporal de variáveis de superfície (NDVI e temperatura do ar) e atmosférica (precipitação), sendo que a intensidade do sinal dependerá da variável considerada e da localização. Conseqüentemente, em função dos fatores anteriores, diferentes propriedades associadas aos tipos de vegetação podem ser mais ou menos influenciados pela frequência mencionada.

Diante desse fato, fora investigado os principais tipos de Biomas e Uso e Cobertura do Solo (UCS) que estão associados a áreas com alta influência de fenômenos de 2 a 7 anos. Na **tabela 6** constam máximo<sup>3</sup> de  $R^2$  para f: 2-7a, para as três variáveis, por biomas de Olson (**tab.**

---

<sup>3</sup> Em princípio, havia sido considerado as métricas média, mediana e percentil 95 para identificação dos tipos que comportam mais altos valores de  $R^2$ . Contudo, devido as áreas dos Biomas e UCS apresentarem diferentes dimensões, o tamanho da área influencia os valores das métricas anteriores. Como solução, empregou-se o máximo  $R^2$ , tendo em vista que nesse ponto a meta consiste em identificar tipos que abrigam as áreas de maior  $R^2$ .

**6a)** e uso e cobertura do solo (**tab. 6b**). Os resultados apontaram maiores correlações positivas significativas entre os R<sup>2</sup> máximo de NDVI e precipitação ( $r = 0,40$  (biomas)/  $0,70$  (UCS)) e secundariamente entre NDVI e temperatura ( $r = 0,13$  (biomas)/  $0,04$  (UCS)), enquanto precipitação e temperatura registraram correlações de  $r = 0,16$  (biomas) e  $r = 0,58$  (UCS).

Especificamente, para a variável **NDVI**, verificou-se que o máximo de R<sup>2</sup> fora identificado para os biomas: (1) Desertos e Áreas Semiáridas (34,6%), (2) Vegetação Mediterrânea (25,7%) e (3) Savanas e Campos Temperados (25,2%) (**tabela 6**). Em termos de UCS, áreas de (1) vegetação arbustiva (34,5%), (2) solos dominantes (26,2%) e (3) savanas (25,7%) se destacaram (**tabela 6**). Os resultados permitiram concluir, portanto, que em geral altos valores de R<sup>2</sup> sobre o NDVI estão associados a combinação de fatores latitudinal e fisionômico vegetacional. Notou-se que altos valores estão associados a vegetações com baixos porte e densidade, sendo indicado pela maior presença de vegetações caracteristicamente savânicas a arbustivas-herbácea. Paralelamente, observou-se que formações florestais de alta densidade horizontal e altura (florestas tropicais), tais como observadas na América do Sul, África e Indonésia Equatorial apresentaram valores de R<sup>2</sup> intermediários. Contrariamente, vegetações arbustivas a florestais como encontradas nos biomas Tundra e Taiga, pela posição latitudinal, apresentam baixos valores de R<sup>2</sup>, estando situadas em faixa latitudinal na qual o NDVI apresenta maior influência de oscilações intra-anuais.

<b>a)</b>	NDVI	Precipitação	Temperatura do Ar	<b>b)</b>	NDVI	Precipitação	Temperatura do Ar
<b>FTSU</b>	12.6*	13.2	34.1	<b>FSV</b>	19.8	13.2	34.1
<b>FTSS</b>	11.6*	8.4*	31.1	<b>FD</b>	7.1*	9.6	10.4*
<b>FTSC</b>	17.9*	8.2*	7.8*	<b>FM</b>	7.8*	9.6	11.7*
<b>SCTS</b>	27.0	11.0	30.6	<b>SA</b>	9.5*	8.6*	4.7*
<b>FT"LM</b>	19.4*	10.7	1.7*	<b>Savanas</b>	25.7	12.3	33.4
<b>FT"C</b>	20.3*	9.8	1.1*	<b>VHerb</b>	24.5	12.44	22.8
<b>SCT"</b>	25.2	12.44	1.7*	<b>VArbust</b>	34.6	12.37	6.6*
<b>SCA</b>	10.4*	9.3*	10.4*	<b>Mosaicos</b>	8.8*	9.9	31.1
<b>VMont</b>	14.8*	11.3	31.5	<b>Solo</b>	26.2	9.9	7.2*
<b>VMedit</b>	25.7	12.37	1.4*	<b>Culturas</b>	15.0*	11.3	16.7
<b>DAS</b>	34.6	11.3	20.7				
<b>FB: Taiga</b>	2.5*	9.4*	1.2*				
<b>Tundra</b>	8.3*	11.3	1.9*				

**Tabela 6.** Máximo de variabilidade explicada (R<sup>2</sup>) associada ao sinal de 2-7a para distintas classes de a) Biomas (Olson) e b) Uso e Cobertura do Solo (MCD12C1)

Obs.: \* R<sup>2</sup> máximo < P98 (variável). P98 = 9,6% (Precipitação), = 23,3% (NDVI) e = 16,6% (Temperatura do Ar)

Para **Precipitação**, o espectro vegetacional revelou características similares ao NDVI. Os biomas (1) Florestas Tropicais e Subtropicais Úmidas (13,2%), (2) Savanas e Campos Temperados (12,44%), (3) Vegetação Mediterrânea (12,37%) e (4) Desertos e Áreas Semiáridas

(11,3%) apresentaram os maiores valores. Em termos de UCS, áreas com (1) florestas sempre verdes (13,2%), (2) vegetação herbácea (12,44%), (3) vegetação arbustiva (12,37) e (4) savana (12,3%) se destacaram. Contudo, comparativamente às áreas de NDVI, observou-se mudança em fatores fisionômicos e latitudinal, uma vez que, em proporção, mais áreas com vegetação de alto porte, arbustiva à arbórea apresentam maiores valores de  $R^2$ . Esse fator constitui reflexo da dinamicidade de áreas na qual a precipitação é influenciada, abrangendo desde formação herbácea de altas latitudes (tundra) como arbórea de baixas latitudes (florestas tropicais). Além disso, verificou-se que biomas de altas latitudes como tundra e taiga estão situados em setores em que o  $R^2$  para frequência de 2-7a é intermediário.

Para a variável **Temperatura**, os biomas principalmente influenciados por frequências de 2-7a apresentam controle latitudinal acentuado. Em **tabela 6**, é possível averiguar que formações florestais a savânicas predominaram, sendo destacados: (1) Florestas Tropicais e Subtropicais Úmidas (34,1%), (2) Vegetação de Montanha (31,5%), Florestas Tropicais e Subtropicais Secas (31,1%) e (4) Savanas e Campos subtropicais e Tropicais (30,6%). Por sua vez, os UCSs em destaque foram (1) Florestas Sempre-Verdes (34,1%), (2) Savanas (33,4%), (3) Mosaicos de Vegetação natural-uso antrópico (31,1%) e (4) Vegetação herbácea (22,8%). Dessa forma, biomas situados nos arredores dos subtrópicos a latitudes elevadas caracterizaram-se por apresentam temperaturas menos influenciadas por oscilações de 2 a 7 anos, sendo, portanto, com maiores efeitos de oscilações intra-anuais.

#### 4.2.6. *Influência de Sinal ENOS na América do Sul*

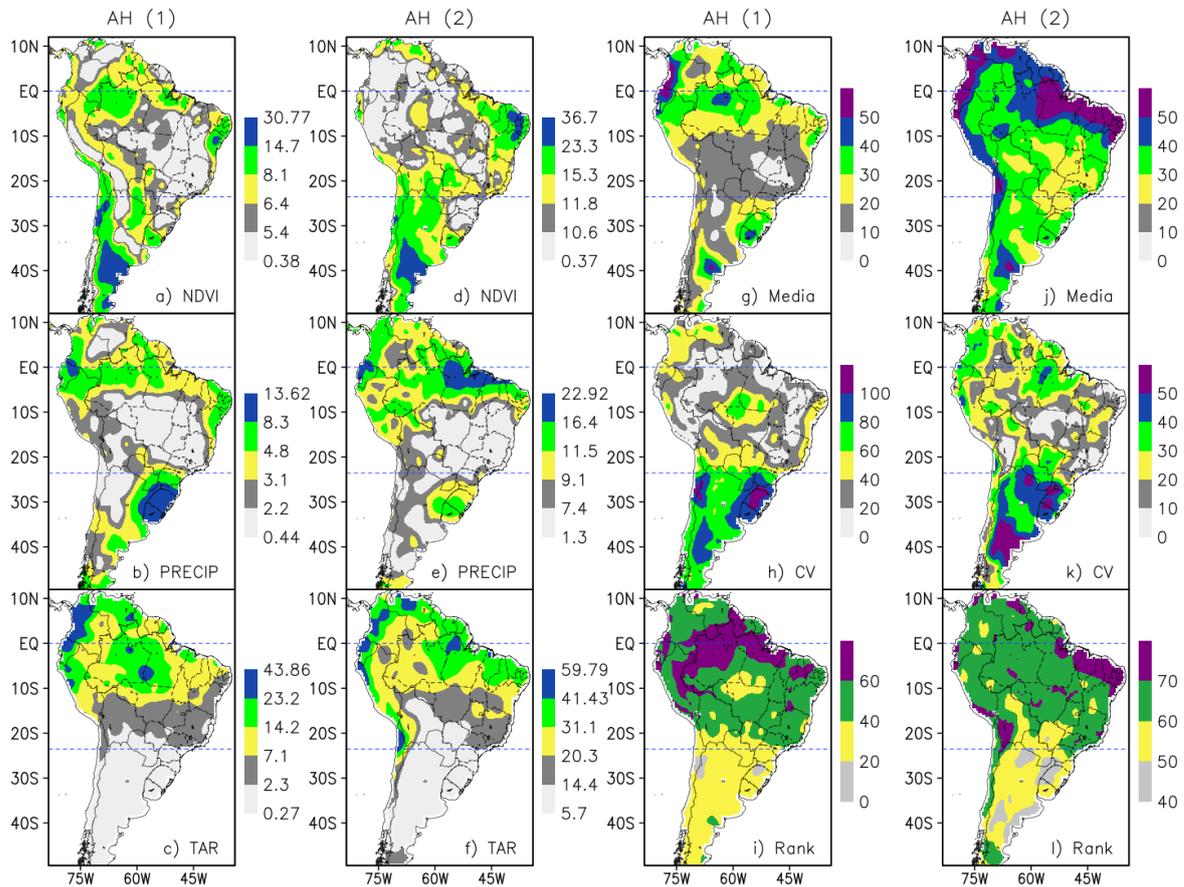
Os tópicos anteriores foram apresentados em escala global, com vista a averiguar como a frequência de 2 a 7 anos se comporta em várias áreas do globo, assim como identificar como as variáveis estão interconectadas entre si e quais tipos de biomas são os principais associados aos efeitos da frequência mencionada em termos de NDVI (fases fenológicas), Precipitação (conteúdo de umidade) e Temperatura do Ar (controle térmico). Dessa forma, amparando-se no contexto global estabelecido, esse tópico sintetizará os principais resultados relativos ao comportamento das três variáveis na América do Sul, assim como os tipos de biomas e UCS mais impactados. Para esse fim, fora utilizada produtos com escala espacial de  $0,5^\circ$ , diferentemente do caso anterior ( $1,0^\circ/2,5^\circ$ ), dada o tamanho da área, assim como fora empregado duas análises harmônicas: AH1: com efeito do ciclo anual e AH2: sem efeito do ciclo anual. Conforme já expresso, essas duas AHs visam averiguar se outras áreas se destacam em termos de variabilidade explicada ao se remover o ciclo anual.

Sendo assim, empregando-se **AH1**, do ponto de vista estatístico, notou-se que a frequência de 2 a 7 anos, na América do Sul, apresenta NDVI (7,2%/ 52% (globo: 4,4/ 122%)) e temperatura (8,8%/ 91% (globo: 1,9%/ 203,5%)) com maiores médias de  $R^2$  e menores CV quando comparados aos valores de áreas globais, enquanto precipitação registrou média relativamente inferior (3,7% (globo: 4,5%)) e maior CV (62,2% (globo: 47,5%)). Os incrementos de média para NDVI e Temperatura para América do Sul foram tidos como justificáveis, haja vista que globalmente, várias áreas de destaque apontadas em **figuras 15, 17 e 19**, com  $R^2 > 20\%$  estão situadas na América do Sul, enquanto para Precipitação, em áreas continentais, outros setores, como Indonésia e Austrália apresentaram maiores valores de  $R^2$ , quando comparado a América do Sul. Adicionalmente, observou-se que para precipitação (GPCP), os oceanos tropicais abrigaram as áreas que possuem maior  $R^2$  relativo a frequência de 2-7 anos. Na contramão de tais fatos, observou-se que comparativamente às áreas globais, os ciclos intra-anuais ( $f: \leq 12m$ ) apresentaram menores médias (e por extensão mediana e P95) para NDVI (79,7%) e Temperatura (82,5%) na América do Sul, enquanto a alta frequência registrou maior média para Precipitação (90,5%). Esses últimos resultados atestam, portanto, que a Precipitação se apresenta, em determinadas áreas da AS, como maior influência de ciclos intra-anuais, sendo seguida pela Temperatura e NDVI, respectivamente.

Do ponto de vista latitudinal, encontrou-se correlações negativa e positiva significativas para latitude-temperatura ( $r = -0,75$ ) e latitude-NDVI ( $r = +0,32$ ), respectivamente, enquanto a Precipitação apontou correlação significativa, mas notoriamente baixa ( $r = 0,08$ ) com a latitude. Essas correlações atreladas ao CV anteriormente expostos contribuíram para a constatação de que a distribuição do sinal de 2-7a possui maior complexidade sobre a variável Precipitação. Para temperatura (NDVI), o sinal em geral aumenta em direção ao equador (subtrópicos). Padrão similar fora constatado em escala global, mas para precipitação, os altos valores de CV e baixa correlação com latitude indicaram, contudo, maior variabilidade espacial, assim como atestou a não restrição a uma dada faixa latitudinal. Mais especificamente, assim como averiguado em escala global, áreas com alto sinal de 2 a 7 anos estão situadas na América do Sul, nas faixas equatorial (TAR) e subtropical (NDVI).

A **figura 23** sintetiza as ideias anteriores. Para tanto, ela apresenta a distribuição espacial dos valores de variabilidade explicada ( $R^2$ ) pela frequência de 2-7a para as variáveis NDVI, Precipitação e Temperatura, assim como média, coeficiente de variância e classificação (rank), para AH1 e AH2. Em ambos os casos, são apontadas as áreas em que o sinal de 2-7a possui maior influência. Comparando-se as análises harmônicas, verificou-se que a correlação

espacial entre a distribuição de  $R^2$  de AH1 (**Fig. 23a-c**) - AH2 (**Fig. 23d-f**) é de 0,499 (precipitação), 0,801 (temperatura do ar), 0,750 (NDVI), revelando que apesar da relativa similaridade entre as duas AHs, ao se remover o ciclo intra-anual, alguns padrões espaciais se revelaram secundariamente, estando estes levemente camuflados pelas frequências altas.



**Figura 23.** Sumário da variabilidade explicada ( $R^2$ ) pela frequência de 2-7 anos na América do Sul, para variáveis Precipitação (a, d), Temperatura do Ar (b, e) e NDVI (c, f). A Média (g, j), Coeficiente de Variação (h, k) e Rank (i, l) foram utilizados para análise da média e variabilidade do sinal, quando considerado as três variáveis. Rank =  $(CV^+ + Média)/2$ , onde  $CV^+ = (-CV)/\text{máx}(CV)$ . Logo altos (baixos) valores de média (CV) representam altos valores de Rank

Observados os valores apresentados em **tabela 7**, relativo aos setores com máximo valor de  $R^2$  identificados em **Fig. 23a-f**, é possível observar mudança das áreas em que há alto valor de variabilidade explicada pela frequência de 2-7anos, sendo notado sobretudo: variação de sudeste para norte da América do Sul (Precipitação) e ampliação do  $R^2$  no nordeste da América do Sul (NDVI). A variável Temperatura fora a que menos apresentara diferenças espaciais entre as duas análises harmônicas ( $r = 0,75$ ), ao passo a Precipitação apresentara maiores diferenças ( $r = 0,49$ ), indicando conforme mencionado existência de áreas em que o sinal de f:2-7a é elevado, mas parcialmente mascarado pelo ciclo anual. Para efeito de comparação desse efeito (diferencial entre AH1 e AH2), para área de **Óbidos-PA** (0,47°S; 55,07°W) (**Fig. 23a,c**), na AH1, 90,2% (5,9%) da variabilidade da precipitação está associada

a frequências  $\leq 12$  meses (2-7 anos). Ao se remover o ciclo anual (subtração da climatologia), o  $R^2$  ficou em 64,95% (21,14%), indicando que somente o ciclo anual respondeu mais 25% da variabilidade. Relevante destacar, contudo, que para f:2-7a, em ambos os casos de AH1 e AH2, os valores de  $R^2$  se encontram acima dos percentis P80 e P95, respectivamente. Para outra área, **norte do Uruguai** (31,47°S; 55,07°W), em AH1 (AH2), as frequências  $\leq 12$  meses e 2-7 anos respondiam por 70,5% e 14,5% (69,6% e 14,9%), respectivamente, apontando que para esse setor, a remoção do ciclo anual tivera efeito brando, já que representou apenas redução de 0,9%. Para essa área, em ambas AHs, a f:2-7a apresentou valores acima dos percentis P95 e P90, respectivamente. Baseado nesse exemplo, conclui-se que a identificação das áreas na qual a variabilidade de 2-7a possui relevante papel perpassa pela consideração das duas AHs anteriores, visto que conjuntamente refletem aspectos importantes da variabilidade de determinada área. Para análises posteriores (resultados 2), ambas as AH serão empregadas.

**Tabela 7.** Variabilidade explicada ( $R^2$ ) pela frequência de 2-7a, para variáveis Precipitação, NDVI e Temperatura do Ar dos três setores com máximo  $R^2$  (limiar: percentil 95 – P95), considerando análises harmônicas com efeito (AH1, Fig. 23a-c) e sem efeito (AH2, Fig. 23d-f) do ciclo anual.

Rank	Precipitação		NDVI		Temperatura do Ar	
	AH1	AH2	AH1	AH2	AH1	AH2
1°	Uruguai (13,6%)	PA - Brasil (22,91%)	Argentina (30,6%)	Argentina (36,6%)	Equador (43,0%)	Equador (59,7%)
2°	Equador (11,9%)	Equador (20,86%)	Chile (19,2%)	PE - Brasil (27,1%)	Colômbia (40,9%)	Chile (52,5%)
3°	AM - Brasil (7,8%)	Colômbia (15,71%)	BA-Brasil (16,47%)	Chile (27,08)	PA - Brasil (31,37%)	Peru (50,1%)
<b>P95</b>	8,27%	16,33%	14,64%	23,26%	23,23%	41,42%

Para além do mencionado, observando as figuras **23g,j**, áreas centrais da América do Sul, indicadas pelos estados de GO, MT, MS e MG (Brasil) e porções do Peru se destacaram por apresentar baixos valores de média de  $R^2$ , quando considerado as três variáveis. Essa área trata-se de uma interseção entre as áreas de baixo  $R^2$  observadas em fig. **23a-f**, na qual baixos valores de  $R^2$  são encontrados na faixa central da AH (para precipitação e NDVI) e, na direção equador-subtrópicos (temperatura do ar). Além disso, verificou-se baseado no CV e Rank que setores da faixa equatorial e subtropical (sudeste da Argentina) apresentam altos valores de média de  $R^2$  para as variáveis, com o diferencial que o coeficiente de variância é elevado nos subtrópicos, já que, conforme visto, a f:2-7a apresenta correlação negativa com o absoluto da latitude, para temperatura. Os resultados apresentados em **23i,j**, através do rank, confirmam com certa coerência ( $r = 0,63$ ) que na América do Sul, ao se considerar as três variáveis acima, setores da faixa equatorial apresentam em geral maior influência conjunta do sinal de 2-7anos (alta média, baixo CV), ao passo que em setores centrais e ao sul, haverá áreas com altas médias/

CV (subtrópicos) ou baixas média/ CV (AS central). Em termos de biomas terrestres impactados, a **figura 23** permitiu constatar que tipos vegetacionais (1) da faixa equatorial tendem a ser influenciados pelas oscilações de 2-7a, com mudanças perceptíveis sobre as três variáveis, (2) do setor central (MT-MS-MG, Brasil) tendem a apresentar baixa proporção  $R^2$  para as três variáveis e (3) das áreas dos subtrópicos (Uruguai, RS-Brasil e Argentina), com ação combinada a isolada da frequência mencionada sobre a precipitação e NDVI.

Ao se considerar os tipos de biomas e UCS mais impactados na América do Sul, alguns similaridades e diferenças foram observados em relação a escala global. Para aprofundar esse aspecto, a **figura 24** abaixo aponta as feições vegetacionais mais influenciadas pela frequência de 2-7 anos. São apresentados os biomas (**fig. 24a**) e uso e cobertura do solo (**fig. 24b**) da América do Sul sobrepostos pelas áreas em que a referida frequência apresentou maiores valores de  $R^2$  para as três variáveis. Além disso, os máximos valores de  $R^2$  associado a frequência são apresentados por classes de Biomas e UCS (**fig. 24c-d**), com indicação das ecorregiões de Olson a qual estão situadas (**fig. 24e**). Logo, ao se confrontar os tipos mais influenciados na América do Sul com aqueles apontados em escala global, maiores similaridades foram identificadas para as classes de uso e cobertura do solo (correlações significativas de  $r = 0,64$  (precipitação),  $0,90$  (NDVI) e  $0,84$  (temperatura do ar) para  $R^2$  máximo dos UCS), ao passo que para biomas terrestres, as correlações foram significantes para temperatura ( $r = 0,90$ ) e NDVI ( $r = 0,24$ ) e não significantes para precipitação ( $r = 0,03$ ).

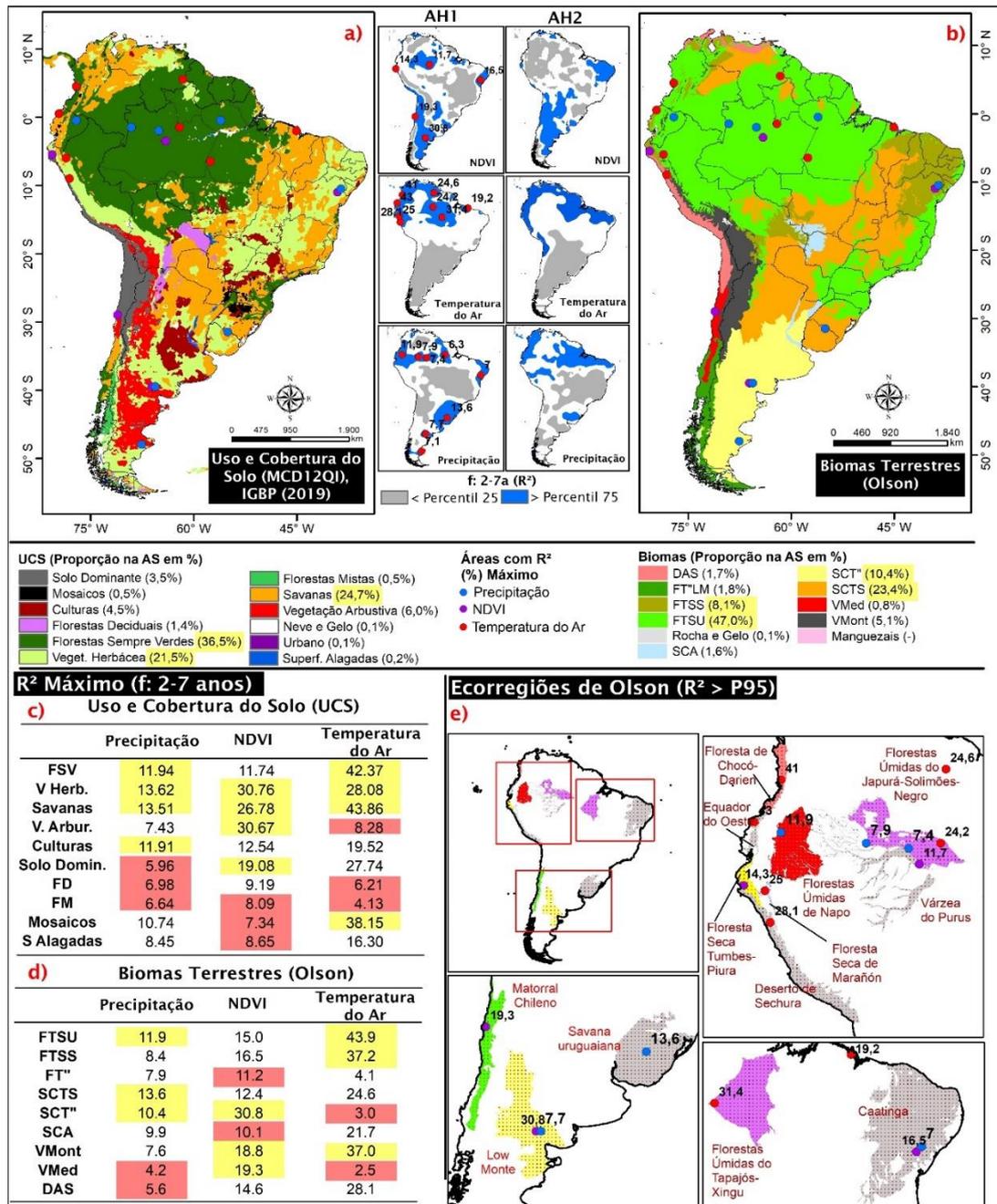
Para temperatura, os três tipos de biomas e UCS mais influenciados pela frequência de 2-7a em escala global igualmente foram identificados na América do Sul. Esse resultado fora a certo ponto esperado, tendo em vista que as áreas em que o sinal é mais alto para temperatura ( $R^2 > P95$ ) estão inteiramente situadas nos trópicos e a América do Sul, juntamente com a África e sudeste asiático possuem extensas terras tropicais. Para AS, Florestas Tropicais e Subtropicais (1) Úmidas e (2) Secas e (3) Vegetações de Montanha (**fig. 24b,d**) concentraram as áreas com máximo valor de  $R^2$ , 43,9%, 37,2% e 37%, respectivamente. Derivado disso, para temperatura, formações florestais associadas a áreas com alta disponibilidade hídrica e temperaturas médias elevadas (tipos climáticos Af e Aw) se destacaram, sendo exemplos de tal fato as florestas úmidas: oeste do Equador ( $R^2_{\text{máx}} = 43,9\%$ ), Chocó-Darien (Colômbia) ( $R^2_{\text{máx}} = 40,9\%$ ) e Tapajós-Xingu (Brasil) ( $R^2_{\text{máx}} = 31,4\%$ ) (**fig. 24e**).

Para precipitação, os biomas (1) Savanas e Campos ( $R^2_{\text{max}} = 13,6\%$ ) e (2) Florestas Úmidas ( $R^2_{\text{max}} = 11,9\%$ ) Tropicais e Subtropicais e (3) Savanas e Campos Temperados ( $R^2_{\text{max}} = 10,4\%$ ) (**fig. 24b,d**) abrangeram as áreas com maiores valores de  $R^2$ . Como reflexo disso,

vegetações herbáceas ( $R^2_{\text{máx}} = 13,6\%$ ), Savanas ( $R^2_{\text{máx}} = 13,6\%$ ) e Florestas Sempre Verdes ( $R^2_{\text{máx}} = 11,9\%$ ) foram os UCSs com maiores influências da frequência de 2-7a (**fig. 24a,c**), sendo característico o efeito desse sinal em: savana uruguaiana (Uruguai) e florestas úmidas de Napo (Equador) e Japurá-Solimões-Negro (Brasil) (**fig. 24e**). Para as áreas mencionadas, observou-se dominância de vegetações savânicas (as quais incluem formações herbáceo-arbustivo-arbórea) a florestais (arbórea dominante). Comparativamente a temperatura, observou-se que as áreas mencionadas, apesar de serem tropicais a temperadas, apresentam fator comum de estarem situadas em áreas na qual a estação seca inexistente (tipos climáticos Af e Cfa). Por outro lado, observou-se que tanto para temperatura e precipitação, de forma intermediária, observou-se que áreas com estação seca mais prolongada (tipos BSk e Aw) e vegetações de menor estrutura ou tipos florestais adaptados a seca apresentam parcela de sua variabilidade explicada pelos sinais de 2-7 anos. Em particular, verificou-se que a vegetação herbácea escassa do deserto de Sechura (costa norte do Peru) e as florestas secas de Marañón (Peru) (**fig. 24e**) possuem  $R^2$  máximo de 28,0% e 25,0% da variabilidade da temperatura influenciada por oscilações de 2-7a. Para Precipitação, por sua vez, a vegetação herbácea-arbustiva da ecorregião de *Low Monte* (Argentina, seção ao norte da Patagônia) (**fig. 24e**), entre os rios Negro (a norte) e Chubut (a sul) se destacou com  $R^2$  máximo de 7,6%.

Para NDVI, as (1) savanas e campos temperados ( $R^2_{\text{máx}} = 30,8\%$ ), vegetação mediterrânea ( $R^2_{\text{máx}} = 19,3\%$ ), vegetação de montanha ( $R^2_{\text{máx}} = 18,3\%$ ) e Florestas Tropicais e Subtropicais Secas ( $R^2_{\text{máx}} = 16,6\%$ ) (**fig. 24b,d**) compuseram os principais tipos cuja variabilidade se mostrou mais impactada pelas oscilações de 2-7a. Para essa variável, os Desertos e Áreas Semiáridas apresentaram menor sinal ( $R^2_{\text{máx}} = 14,6\%$ ) na América do Sul (desertos do Atacama e Sechura). De forma oposta, em escala global (**figura 19**), os maiores sinais de 2-7a para NDVI foram identificados no Grande Deserto Vitória/ Planície de Nullabor (Austrália), Desertos da Namíbia e Kalahari (Namíbia, África do Sul) e desertos de Sonora, Monjave e Chihuahuan (EUA-México). Além disso, observou-se contrariamente que para a precipitação e temperatura, tipos vegetacionais de menor porte, indicado por formações herbáceas, subarbustivas-arbóreas (savânicas) a florestas secas (**fig. 24a,c**) foram mais impactadas pelo sinal de 2-7a. As ecorregiões de Low Monte ( $R^2_{\text{máx}} = 30,8\%$ ), matorral chileno (a sul do Atacama) ( $R^2_{\text{máx}} = 19,3\%$ ), caatinga brasileira (nordeste baiano) ( $R^2_{\text{máx}} = 16,5\%$ ) e florestas secas de Tumbes-Piura (costa norte do Peru) ( $R^2_{\text{máx}} = 14,3\%$ ) abrangeram as áreas com máximos de  $R^2$ . No quadro geral, o NDVI revelou ser mais impactado em regiões predominantemente com regime hídrico experienciando estação seca prolongada (BWh-k, BSk

e Aw). Contudo, para menores valores de  $R^2$ , florestas úmidas da Amazônia central chegaram a apresentar cerca de 11,7% da variabilidade do NDVI associado a oscilações de 2-7a (ecorreção da várzea do rio Purus), apontando não estarem isentas dos efeitos da frequência em pauta.



**Figura 24.** Sobreposição das áreas com  $R^2 > P95$  para as classes de a) Uso e Cobertura do Solo e b) biomas. Valores máximos de  $R^2$  são apresentados por classes de c) USC e d) Biomas, com indicação das ecorregiões de Olson que abrigam tais áreas.

Em síntese, os resultados apresentados até o momento serviram para (1) identificar o perfil espectral dos índices associados ao ENOS, assim como compará-los com índices relativos a outras oscilações climáticas, (2) averiguar a variabilidade temporal de frequência da TSM do

Pacífico Tropical ao longo do tempo, (3) identificar áreas do globo e da América do Sul em que o sinal de 2-7a possui maior grau de explicação sobre as variáveis precipitação, temperatura e NDVI e identificar os tipos de biomas e uso e cobertura do solo que possuem maior variabilidade (através das variáveis) explicada pela frequência de 2-7 anos. Baseado nesses resultados, notou-se que padrões de distribuição expressos em escala global refletem aqueles identificados na América do Sul. Observou-se que tipos de vegetação impactados por essa frequência são variáveis conforme o tipo de variável considerada, e tais tipos apresentam características fisionômicas (indicados pela altura e densidade) e perfis hídricos e térmicos distintos.

Apesar de tais achados, algumas lacunas serão trabalhadas no próximo capítulo. Para se ter nota, os resultados anteriores apontaram que setores no sudeste, noroeste e norte da América do Sul se diferenciam por registrar parcela significativa da variabilidade temporal sendo explicada por frequências de 2-7 anos, para as três variáveis. Contudo, ficara em aberto se nessas respectivas áreas e tipos vegetacionais, a componente ENOS é dominante sobre a variabilidade. Conforme apresentado, os eventos ENSO possuem caracteristicamente frequência de 2-7anos, mas similarmente outras oscilações compartilham dessa faixa de frequência (QBO, IOD, PDO etc.). Logo, mencionar que x% da variabilidade é explicada por oscilações de 2 a 7 anos deixa margem para uma (ENSO), um conjunto de oscilações (ENSO + outras oscilações) ou um conjunto e oscilações + ruído estarem respondendo pelos x% de variabilidade explicada. Dessa forma, os resultados anteriores subsidiaram a identificar preliminarmente as áreas e tipos de vegetação, na qual a frequência típica ENSO possui parcela significativa na explicação da variabilidade. No capítulo seguinte, como forma de aprofundar a investigação sobre a relação ENSO-vegetação, será averiguado:

- se as anomalias de precipitação, NDVI e temperatura do ar mais significantes igualmente ocorrem durante eventos ENOS;
- se eventos distintos (ENs e LNs) produzem igualmente anomalias significantes em uma mesma área ou se as anomalias observadas estão restritas a eventos ENOS específicos (EN ou LN, e não ambas);
- a forma pela qual a vegetação se interrelaciona fisicamente com os eventos do Pacífico Tropical (quais variáveis são intermediárias) e quais fases fenológicas são impactadas durante tais eventos.

## CAPÍTULO 5

### 5.1 Impacto Linear do Eventos ENOS

As análises harmônicas AH1 e AH2 permitiram o apontamento preliminar das áreas na qual a frequência caracteristicamente ENOS (2-7a) possui maior proporção de variabilidade explicada. Como suporte para identificação (seleção) das áreas amostrais para análise da relação ENOS-Vegetação, as análises de (1) correlação linear ( $r$ ) e de (2) composição de anomalias durante períodos ENOS foram conduzidas. A correlação linear serviu para indicar áreas na qual há significante/ forte relacionamento linear entre as variáveis, (2) áreas na qual a associação linear inexistente, (3) indicações do sinal dominante de relacionamento e (4) apontamento do grau de defasagem entre as variáveis envolvidas. A análise composições de anomalias durante períodos ENOS, por sua vez, apontou (1) o sinal de anomalia dominante, (2) o tipo de evento ENOS associado a maior anomalia e (3) o período sazonal de ocorrência em relação ao ciclo de vida ENOS.

Exposto o anterior, estatisticamente, ao se considerar as variáveis por proporção de área significante ( $\alpha = 0,2$ , nível de significância = 98%) para o cenário de até 12 meses de defasagem, os resultados apontaram que na América do Sul, a temperatura do ar se destaca por registrar quase totalidade de áreas (99,7%) com correlação linear significante com o índice ONI, sendo seguido por precipitação (90,3%) e NDVI (82,5%). Todavia, observou-se que para o lag 0 apenas, esses valores caem para 89,3% (-10,5% em relação ao valor anterior), 74,8% (-15,5%) e 44,0% (-38,5%), respectivamente, revelando que ao menos em termos de significância, o NDVI constitui a variável que menos possui áreas significantes (menos da metade da América do Sul), ao passo que as áreas na qual a temperatura do ar é significante superam as áreas de precipitação nos dois cenários, para lag 0 e para até 12 lags.

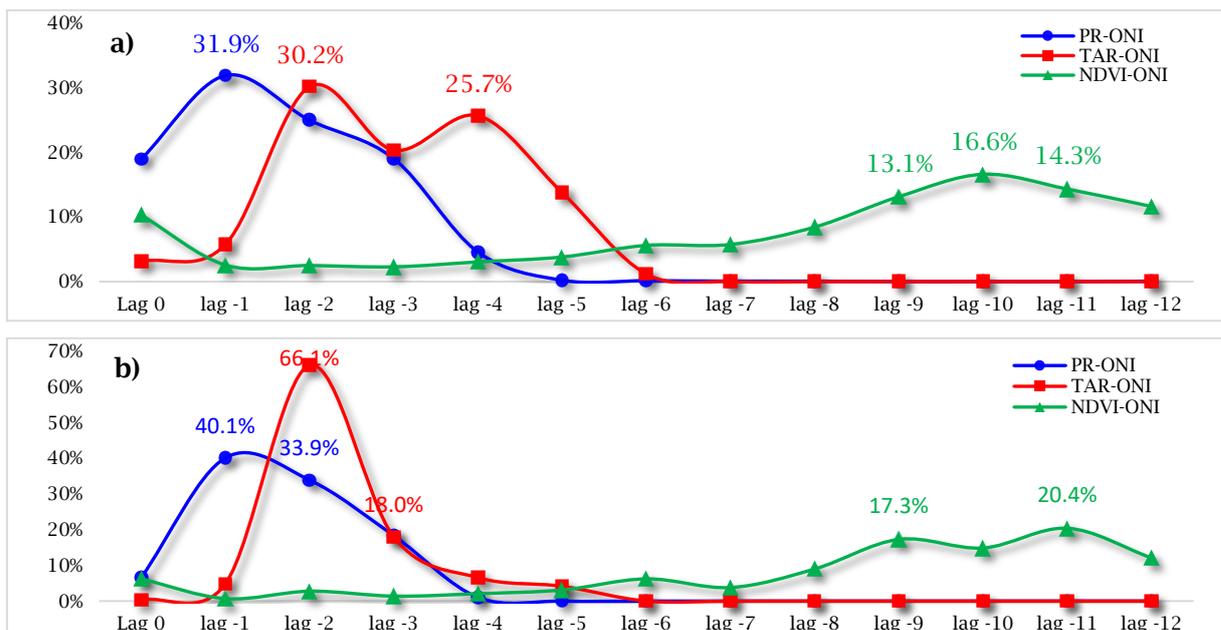
Comparando-se os valores de  $r$  obtidos para cada defasagem, identificou-se que apesar de mais de 40% da América do Sul apresentar correlação significante entre as variáveis e ONI para lag 0, a máxima correlação não ocorre necessariamente nessa faixa de defasagem. Notou-se que da totalidade de áreas significantes para até 12 lags, menos de 25% dessas áreas atingem pico no lag 0 (PR (22,4%), TAR (18,5%) e NDVI (19,6%)). Logo, conclui-se que menos de ¼ das áreas da América do Sul apresentam anomalias que estão em fase com os eventos do Pacífico Tropical (mês exato). Considerando os demais lags, verificou-se que espacialmente, pouco mais de 60% dos picos significantes de correlação para precipitação e temperatura do ar ocorrem com até 3 meses de defasagem (lag = -3). Temperatura do ar possui leve contraste com precipitação por apresentar 36,7% das áreas significantes para lags de 4 a 12 meses, enquanto

o valor para precipitação é de 29,9%. A diferença mais notável, contudo, está para NDVI, na qual apesar de 19,6% das áreas atingirem pico de  $r$  em defasagem 0, 55,5% das áreas registram maior valor de  $r$  para defasagens de 6 a 12 meses.

Levando-se em consideração a intensidade do absoluto da correlação linear ( $|r|$ ), os resultados apontam que as anomalias de temperatura do ar possuem maior relacionamento linear com os eventos ENOS (através do índice ONI), quando comparado com as demais variáveis. De fato, observou-se que os maiores mínimos, máximos, médias e medianas de  $r$  absoluto (não mostrado) foram registrados para temperatura do ar. Tomando-se por exemplo os percentis 50 (mediana) e 95, temperatura do ar possui metade da América do Sul com valores absolutos de correlação linear superior a 0,45, atingindo em 5% dessas áreas valores acima de 0,74. Para precipitação e NDVI, os valores dos percentis P50/ P95 são de 0,28/ 0,60 e 0,19/ 0,53, respectivamente. É cabível relevar, no entanto, que esse comportamento particular da temperatura do ar possuir mais áreas significantes e maiores valores de  $r$  está atrelado em parte a distribuição espacial das áreas na qual a temperatura do ar possui maior associação linear com o índice ONI. Conforme observado nas análises harmônicas, o sinal de 2-7a para a temperatura do ar caracteriza-se por apresentar alta correlação negativa com o absoluto da latitude. Esse fato possui importância, pois situação similar fora observada para correlação linear. O absoluto do máximo sinal de  $r$  possui correlação de -0,73 para com o absoluto da latitude. Esse valor reflete que as áreas na América do Sul na qual a temperatura possui pico de  $r$  estão situadas em latitudes baixas. A América do Sul apresenta característica oposta a distribuição das faixas continentais do Hemisfério Norte por conter maior proporção de terras na faixa tropical. Para área de estudo (11,0°N a 49,9°S), 73,9% das superfícies continentais da AS está situada nos trópicos, estando 21,3% no subtropical e outros 4,8% na zona temperada. O absoluto do sinal de correlação linear (para com ONI) de precipitação ( $r = -0,33$ ) e NDVI ( $r = -0,20$ ), contrariamente, apresenta menor correlação linear com o absoluto da latitude, uma vez que conforme será observado, há picos de  $r$  situados nos subtropicais a zona temperada e como essa faixa constitui conjuntamente aproximadamente 26,1% da AS, em termos de áreas, os setores com  $r$  significativo serão menores para precipitação e NDVI.

Em termos de distribuição dos valores de correlação linear elevada entre as defasagens, investigou a defasagem das áreas na qual o absoluto de  $r$  é maior ou igual aos percentis 75 ( $|r| \geq P75$ ) e 95 (percentis calculados baseado nos pixels da América do Sul). Essa análise revelou importante característica da relação variáveis-ONI. A **figura 25** ilustra essa distribuição das áreas com maiores valores de  $r$  absoluto entre faixas de lags, seguindo critério dos percentis

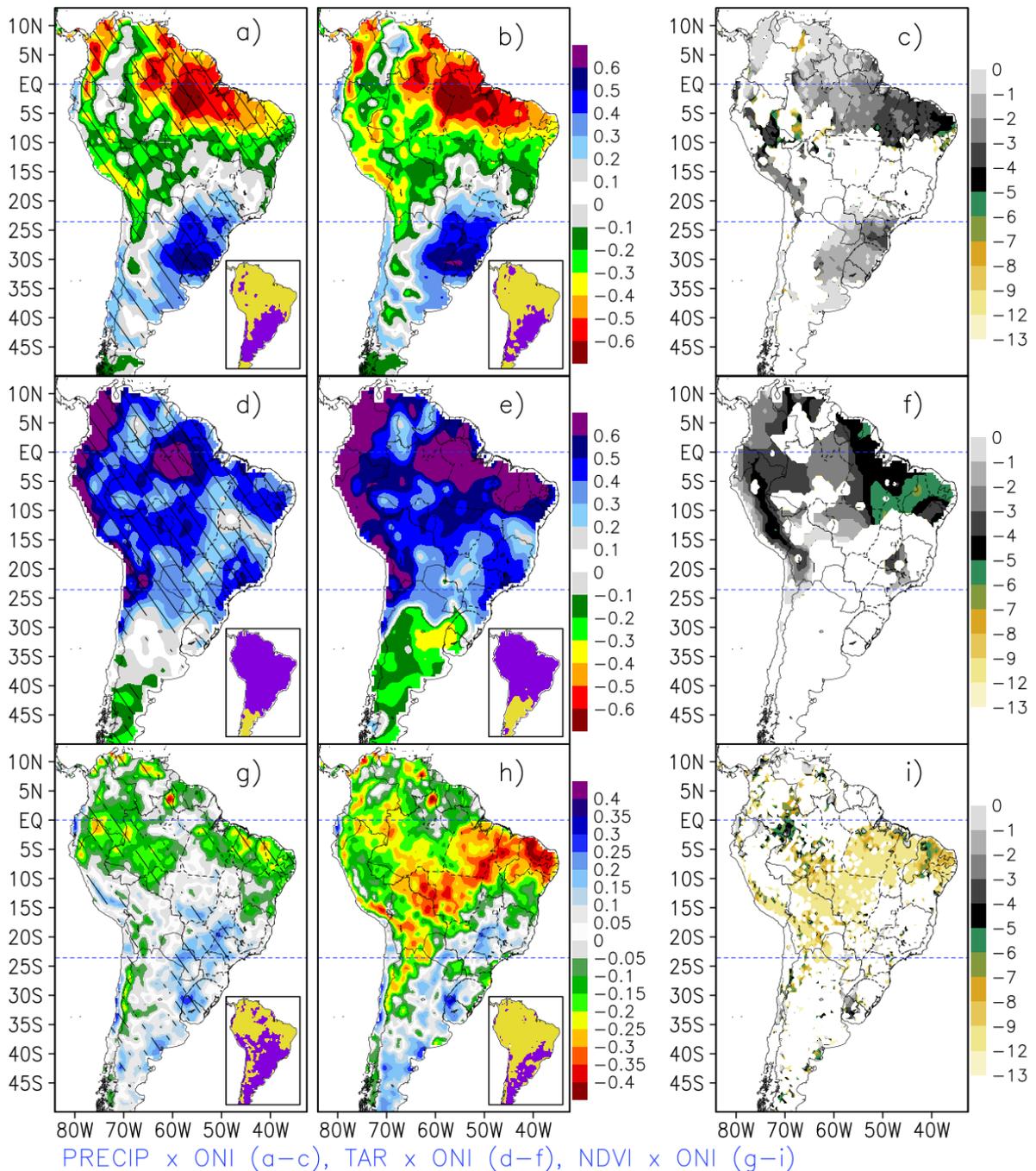
P75 e P95. Empregando **fig. 25a**, observou-se que os 25% de áreas da América do Sul que apresentam maiores valores absolutos de correlação linear entre PR-ONI ocorrem em 94,4% dos casos em período de zero a até três meses de defasagem. A temperatura do ar, por sua vez, apresentou 90,0% das áreas de  $|r| > P75$  situado entre 2 a 5 meses de defasagem, enquanto NDVI revelou as maiores defasagens, 55,7% das áreas situadas entre os lags 9 a 12 meses. Ao se considerar percentil mais elevado, P95 (**fig. 25b**), conclui-se que as correlações lineares mais intensas não ocorrem no lag 0 igualmente, mas nos lags -1 a -2 (precipitação), -2 a -3 (temperatura do ar) e -9 e -11 (NDVI). Esses fatos ressaltam, portanto, que a julgar pelas áreas na qual a correlação linear é mais elevada, tal relacionamento tendo a se expressar nos semestres posteriores ao pico dos eventos ENOS. Esse último resultado será investigado e detalhada a frente. Além disso, os resultados destacaram que tratando-se de precipitação e temperatura, as áreas com relacionamento linear elevado (**fig. 25**) possuem baixa ocorrência (< 1,5% dos casos) para lag superior a seis meses, assim como os efeitos sobre tais variáveis não serem instantâneos (mesmo mês, lag 0), mas se desenvolverem principalmente no trimestre seguinte.



**Figura 25.** Distribuição dos a) 25% e b) 5% de áreas da América do Sul (critério de seleção: percentis P75 e P95, respectivamente) com maiores valores de correlação Linear PR-ONI, TAR-ONI e NDVI-ONI (dentre todas as defasagens) para as defasagens de 0 a 12 meses. A defasagem atribuída (lag) se refere a defasagem em que ocorre máxima correlação absoluta

Do ponto de vista espacial, a **figura 26** apresenta as correlações lineares de Pearson ( $r$ ): precipitação-ONI, temperatura do ar-ONI e NDVI-ONI, para casos de  $r$  em lag 0 e máximo  $r$  entre lags 0 a 12 meses. Adicionalmente, é apresentado o lag na qual o máximo valor de  $r$  ocorre.

O primeiro item a se observar é que considerando as correlações em lag 0 e máximo r (lags 0-12), as correlações espaciais entre esses dois produtos foram de 0,95 (PR), 0,88 (TAR) e 0,63 (NDVI), indicando que as correlações espaciais com defasagem apresentam em geral padrão espacial similar. Apesar disso, os menores valores de r para TAR e NDVI sugerem padrões espaciais não capturados pelo lag 0. Em termos de sinal e intensidade de correlação, ao se considerar apenas as áreas significantes (90,3% para PR, 89,3% para TAR e 82,5% para NDVI), observou-se que as correlações negativas são dominantes para PR-ONI (69,6% ( $r < 0$ ), 30,4% ( $r > 0$ )) e NDVI-ONI (75,3% ( $r < 0$ ), 24,7% ( $r > 0$ )), indicando que independente da intensidade de r na AS, espacialmente anomalias positivas (negativas) de precipitação e NDVI estão associados a anomalias negativas (positivas) de TSM. Para precipitação, essa relação é tanto mais frequentes no norte do Pará-Brasil ( $r = -0,73$ ), noroeste da Colômbia ( $r = -0,722$ ) e norte do Amazonas-Brasil ( $r = -0,678$ ). Para os 30,4% (PR) e 24,7% (NDVI) da América do Sul, as correlações positivas são dominantes, sugerindo que nesses setores, anomalias positivas (negativas) de PR/ NDVI estão associadas a eventos quentes (frios) do Pacífico. Para precipitação, esse fato é tanto notório no norte do Uruguai ( $r = 0,64$ ), oeste do Equador ( $r = 0,504$ ), centro-norte da Venezuela ( $r = 0,374$ ) e centro-oeste da Argentina ( $r = 0,46$ ). De forma oposta, as correlações positivas se mostraram dominantes para temperatura do ar (83,3% ( $r < 0$ )), sendo poucas as áreas na qual as correlações negativas ocorrem (16,7%,  $r > 0$ ). Para o primeiro caso, as máximas correlações positivas foram atingidas no noroeste da Colômbia ( $r = 0,883$ ), oeste do Equador ( $r = 0,83$ ) e noroeste do Chile ( $r = 0,789$ ), enquanto a máxima negativa é observada em núcleo único no sul do Uruguai ( $r = -0,384$ ). Importante destacar que as dominâncias de correlações negativas (positivas) para precipitação e NDVI (temperatura do ar) não ocorrem somente em termos de sinal, mas igualmente em intensidade. Para se comparar, os máximos/mínimos r para a precipitação e NDVI são: 0,64/-0,73 e 0,43/ -0,53, enquanto para temperatura do ar, 0,88/ -0,38.



**Figura 26.** Correlação temporal, sem defasagem temporal, entre ONI e (a) Precipitação (CHIRPS), (d) Temperatura do Ar (UDEL) e (g) NDVI (GIMMS). Correlação máxima dentre as defasagens de 0 a 12 meses para (b) precipitação, (e) temperatura do ar e (h) NDVI. Defasagem temporal em que é observado o máximo valor de correlação linear para (c) precipitação, (f) temperatura do ar e (i) NDVI. Os quadrantes menores interiores a cada quadro, com cores amarela e roxa, representam as áreas com valores de correlação negativa e positiva, respectivamente. As áreas hachuradas nos mapas de correlação linear sem defasagem temporal (a, d, g) indicam os valores significativos ( $p = 0,2$ ).

Comparativamente as análises harmônicas AH1 e AH2 (**figura 23**), as correlações espaciais entre as AHs e correlações PR-ONI e TAR-ONI apontaram valores positivos elevados ( $r = 0,45/ 0,64$  e  $r = 0,71/ 0,80$ , respectivamente), ao passo que os padrões observados para NDVI-ONI registraram valores baixos ( $r = -0,08/ +0,05$ ). Esses resultados denotam relevante

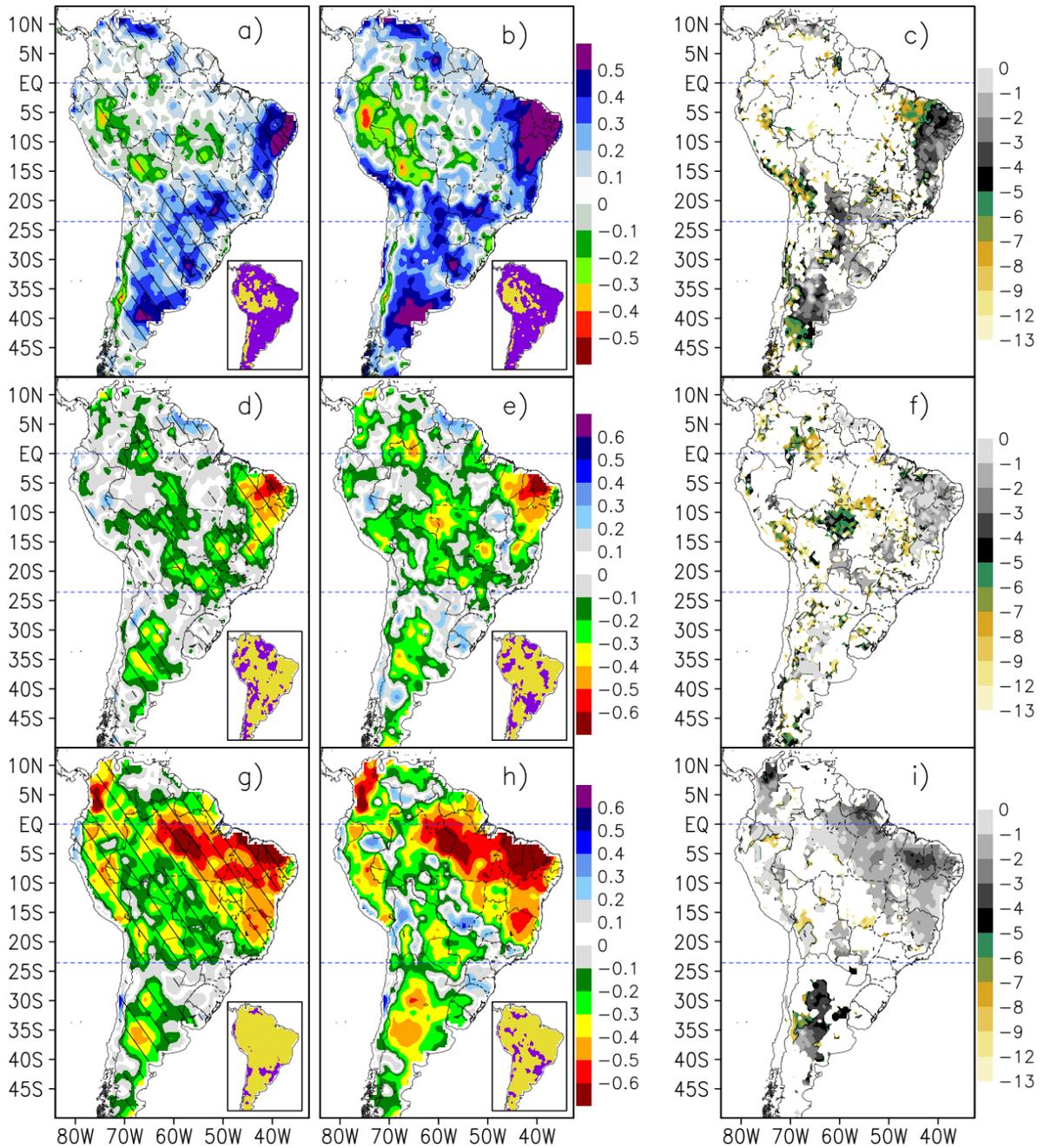
aspecto da relação variáveis-ENOS, pois o coeficiente de correlação de Pearson é utilizado para capturar relações lineares (funções afim e linear típicas). Para relacionamentos não-lineares, tais como quadrático, cúbico, exponencial, logarítmico ou trigonométrico os valores de Pearson já apresentam quedas já que esse coeficiente não é destinado a esse tipo de relacionamento. Além disso, a premissa de linearidade entre variável-ONI determina critério intransigente na qual máximas correlações positivas ( $r = +1$ ) e negativas ( $r = -1$ ) somente ocorrerão na hipótese das anomalias positivas (negativas) da variável ocorrer proporcionalmente e totalmente durante eventos quentes (frios) ou vice-versa, respectivamente. Apesar desse critério ser difícil de atingir, dada a complexidade da relação variável-ONI não ser completamente linear, os padrões espaciais PR-ONI e TAR-ONI apontaram boa concordância com as AHs ( $r > 0,6$ ), o qual contribui para apontar que a componente linear desempenha importante fator em determinadas áreas da América do Sul. Para se comparar, é possível observar que as áreas de máxima correlação positiva/ negativa em **figura 26** conferem com aquelas observadas em **figura 23b-c,e-f**. Além disso, conclui-se que as correlações lineares apresentaram maiores concordâncias com a análise harmônica 2 (AH2). Tal fato, contudo, era esperado já que as anomalias das variáveis empregadas nas correlações foram filtradas para  $f \geq 12$  meses e a AH2 diferencia-se de AH1, por aquela conter remoção do ciclo anual.

Derivado desses últimos resultados, pôde-se observar que as áreas na qual o sinal de 2-7a possui maior proporção de variabilidade explicada sobre o NDVI (**figura 23a,d**) não foram satisfatoriamente expressos pela correlação linear NDVI-ONI no critério espacial, tendo em vistas que as correlações espaciais entre esta e AHs foram inferiores a 0,1 ( $|r| < 0,1$ ), assim como os padrões espaciais observados diferentes. Esse resultado apontou que a simples correlação linear é insuficiente para capturar as relações entre relações entre NDVI-ENSO. Na **figura 27**, é espacializado as correlações NDVI-PR, NDVI-TAR e TAR-PR para período de até 12 meses de NDVI (TAR) em relação a TAR e PR (PR). Tais correlações foram calculadas com vista a identificar potenciais fatores que estão por trás da existência do sinal de 2-7a sobre NDVI observado em **figura 23a,d**. Conforme observado, a correlação espacial NDVI-ONI (**fig. 26**) possui baixa associação espacial ( $r = 0,05$ ) com a AH2 de NDVI, por isso a relação ONI-NDVI se mostrou indicador inadequado da relação NDVI-ENOS. Por outro lado, através das correlações observadas na **figura 27** adiante é possível identificar que os padrões espaciais expostos são similares aqueles encontrados em AH2 (NDVI). De fato, as correlações espaciais entre  $AH2_{NDVI-TAR}$  e  $AH2_{NDVI-PR}$  foram de 0,24 e 0,56 respectivamente, revelando que setores em a relação de NDVI para com TAR e PR é elevada conferem majoritariamente

com as áreas na qual o  $R^2$  associado a frequência de 2-7a é alto sobre NDVI. Logo, as similares especiais conduzem para a ideia de que a relação NDVI-TAR e NDVI-PR constituem indicadores, variáveis intermediárias, pela qual a relação NDVI-ENOS se desenvolve, cabendo apontar, contudo, qual possui maior importância, em função da área.

Tratando-se das relações entre NDVI-PR (**fig. 27a-c**), NDVI-TAR (**fig. 27d-f**) e PRECIP-TAR (**fig. 27g-i**) na América do Sul, a **figura 27** expressa essas três correlações lineares anteriores, para defasagem 0 e máximo valor de  $r$  entre defasagens, além de indicar a defasagem de máxima correlação. A partir de tais correlações, pôde-se observar que as relações entre NDVI e variáveis TAR e PRECIP possuem padrões espaciais similares aqueles observados para análises harmônicas AH1 e AH2 (NDVI). Abaixo, algumas conclusões são expressas.

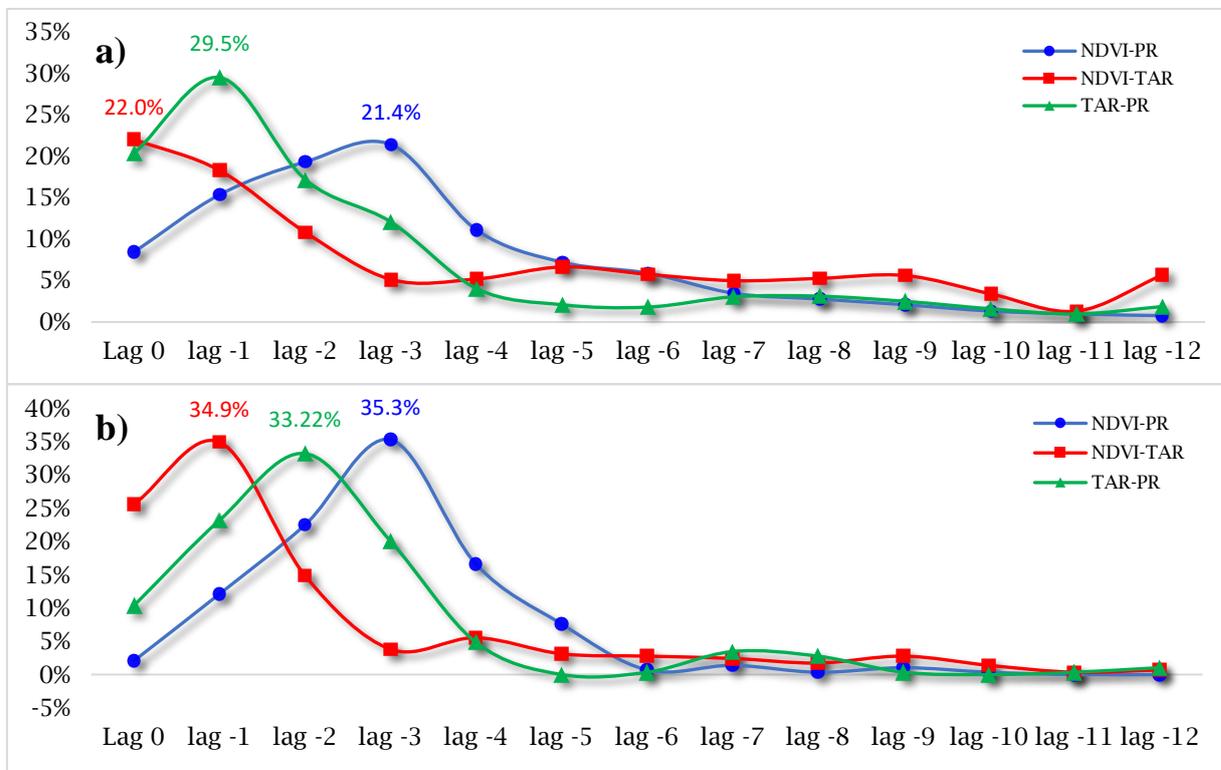
Para a **correlação NDVI-PR (fig. 27a-c)**, 74% das correlações significativas são predominantemente positivas, atingindo máxima correlação no nordeste da BA-Brasil ( $r = 0,771$ ) e centro-sul da Argentina ( $r = +0,756$ ). As áreas na qual as correlações são negativas perfazem apenas 26% e o núcleo mais expressivo se encontra no norte do Peru ( $r = -0,56$ ). **Para temperatura do ar (NDVI-TAR) (fig. 27d-f)**, as correlações negativas foram majoritárias (69,8%), com destaque para núcleos no norte do Ceará-Brasil ( $r = -0,715$ ) e centro-leste da Argentina ( $r = -0,51$ ), enquanto correlações positivas estiveram restritas a 30,2% das áreas, com núcleos dispersos e pequenos. De forma similar, a relação PRECIP-TAR (**fig. 27g-i**) demonstrou em 82,9% dos casos correlações negativas, com áreas expressivas situadas nas áreas noroeste e nordeste da América do Sul. Para tanto NDVI-PR e NDVI-TAR, a diagonal SO-NE revelou sinal mais intenso das relações. Em termos de biomas, esse setor corresponde aos biomas de (1) Savanas e Campos Temperados, (2) Savanas e Campos Tropicais e Subtropicais e (3) Florestas Tropicais e Subtropicais Secas, os quais compartilham da característica de serem dominados por formações savânica a estépica, com estratos arbóreo espaçado e/ou subarbustivo e/ou herbáceo. Logo, essa diagonal exclui principalmente áreas de formação florestal, como Floresta Amazônica e Mata Atlântica. Espacialmente, o absoluto dessas duas correlações exibe correlação espacial de 0,33, revelando, portanto, similaridade potencial no tipo de vegetação, através do qual as variações de NDVI mais estão atreladas a variações de temperatura do ar e precipitação.



**Figura 27.** Correlação temporal, sem defasagem temporal, entre NDVI e (a) Precipitação (CHIRPS), (d) Temperatura do Ar (UDel) e entre Precipitação (CHIRPS) e (g) Temperatura do Ar (UDel). Correlação máxima dentre as defasagens de 0 a 12 meses para (b) NDVI-precipitação, (e) NDVI-temperatura do ar e (h) precipitação-temperatura do ar. Defasagem temporal em que é observado o máximo valor de correlação linear para (c) precipitação, (f) temperatura do ar e (i) NDVI. Os quadrantes menores interiores a cada quadro, com cores amarela e roxa, representam as áreas com valores de correlação negativa e positiva, respectivamente. As áreas hachuradas nos mapas de correlação linear sem defasagem temporal (a, d, g) indicam os valores significativos ( $p = 0,2$ ).

Em termos de defasagem, a **Figura 28** expressa a distribuição dos 25% e 5% de áreas da América do Sul com maiores valores de correlação temporal entre NDVI-PR (**Figura 27b**), NDVI-TAR (**Figura 27e**) e PR-TAR (**Figura 27h**). Tal análise fora realizada similarmente na **Figura 25**, mas para correlações PR-ONI, TAR-ONI e NDVI-ONI e é útil para identificação

do lag dominante para correlações mais altas (isto é,  $|r| > P75$ ). Dessa forma, baseado na **Figura 28a**, conclui-se que as anomalias de NDVI ocorrem em 66,1% dos casos entre 1 e 4 meses de defasagens (pico em lag = -3) após as anomalias de precipitação. Em relação às anomalias de temperatura do ar, 51,1% dos picos de anomalia de NDVI ocorreram entre 0 a 2 meses depois (pico em lag = 0). Ao considerar apenas os 5% de áreas com maior valor absoluto de  $r$  (**Figura 27b**), os resultados convergem para a resultante de que as anomalias de NDVI sucedem principalmente 3 meses e 1 mês após os picos de precipitação e temperatura do ar, respectivamente. Logo, depreende-se que áreas em que a relação NDVI-TAR e NDVI-PR é linearmente mais elevada, o NDVI reage mais rapidamente a anomalias de temperatura do ar e posteriormente a anomalias de precipitação.



**Figura 28** - Distribuição dos a) 25% e b) 5% de áreas da América do Sul (critério de seleção: percentis P75 e P95, respectivamente) com maiores valores de correlação linear NDVI-PR, NDVI-TAR e TAR-PR (dentre todas as defasagens) para as defasagens de 0 a 12 meses. A defasagem atribuída (lag) se refere a defasagem em que ocorre máxima correlação absoluta

Ao sintetizar os resultados de defasagens derivados das **Figuras 25 e 28** para os 25% de áreas da América do Sul com maiores valores de correlação ( $|r| > P75$ ), as figuras permitiram compreender a dinâmica de defasagem para as correlações  $ONI(x) \rightarrow PR(y)$ ,  $ONI(x) \rightarrow TAR(y)$ ,  $ONI(x) \rightarrow NDVI(y)$ ,  $PR(x) \rightarrow NDVI(y)$  e  $TAR(x) \rightarrow NDVI(y)$ . Os resultados da **Figura 25** apontaram que as correlações mais intensas entre ONI-NDVI estão concentradas sobretudo no segundo semestre após as anomalias de ONI. Esse fato se mostrou razoável tendo em vista que

os resultados da **Figura 25** indicaram que anomalias de precipitação/ temperatura ocorrem principalmente no primeiro semestre após anomalias do índice ONI, com anomalias de NDVI (**Figura 28**) acontecendo principalmente entre 0 a 2 meses (1 a 3 meses) depois das anomalias de temperatura do ar (precipitação).

## 5.2 Composição de anomalias trimestrais durante eventos El Niños, La Niñas e Neutros

Com vista de investigar mais profundamente os relacionamentos entre e as variáveis TAR e PR (NDVI) para com o ENOS, as médias das anomalias das referidas variáveis foram computadas por trimestres e expressas em termos de ciclo de vida de 24 (30) meses de eventos El Niños, La Niñas e Neutros. Tal análise fora conduzida para confirmar as defasagens observadas anteriormente em relação aos extremos de anomalia ENOS. Além disso, tendo em vista que os resultados anteriores apontam características de linearidades da relação entre as variáveis, observou-se atentamente se as anomalias observadas durante determinado evento (seja EN e LN) são opostas uma em relação a outra. Os períodos referentes aos ciclos de vida de 24 (30) meses encontram-se descritos em metodologia.

As **figuras 29-32** expressam, portanto, composição de anomalias trimestrais observadas entre ano do evento (MAM[0]) até o ano posterior (DJF[2]), para médias de ciclos de vida ENs, LNs e Neutros. Antes propriamente de analisar os resultados adiante, identificou-se alguns padrões relevantes dos eventos ENOS. Para a análise, 20 eventos totais foram considerados, divididos entre 10 ENs e 10 LNs. Dessa totalidade, 80% deles começaram entre JJA[0] a SON[0], com apenas 20% iniciando em MAM [0] (3 ENs e 1 LN). Além disso, apenas três eventos ultrapassaram o ano seguinte do evento ([1]). Os ENs de 1986-1988 e 2014-2016 prolongaram até DJF[2] e MAM[2] do ano 2, enquanto a LN de 1998-2002 fora até DJF[3] do ano 3. Sendo assim, para os ciclos de vida considerados nessa análise (MAM[0] até DJF[2]), somente 15% dos eventos (3) ultrapassam esse tempo de vida considerado. Outra característica sobressaliente consiste no fato de que 70% dos extremos de ENs e LNs ocorreram no trimestre DJF[1], com o restante dos eventos atingindo extremo em período anterior, SON[0]. A título excepcional, apenas o EN prolongado de 1986-1988 atingira extremo durante o inverno, JJA[1]. Nenhum dos demais, no entanto, fugira ao padrão expresso.

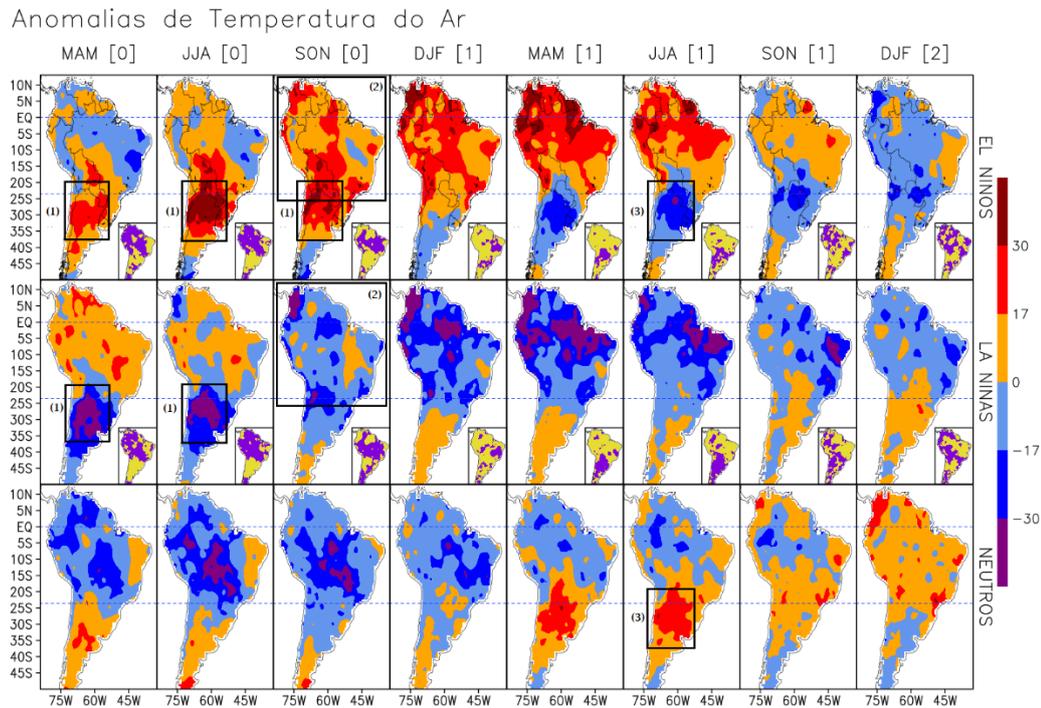
Para temperatura do ar (**Figura 29**), os resultados de anomalias apresentaram consistência com aqueles obtidos nas análises de correlação linear ( $r_{TAR-ONI}$ ) e análise harmônica (AH2). Observou-se que os absolutos de anomalias trimestrais tiveram máxima correlação espacial com os produtos anteriores (correlação linear e AH) principalmente nos

trimestres DJF[1] a JJA[2]. Para precipitação (Figura 30), intervalo similar fora encontrado, sendo – contudo – em período anterior, SON[0] a MAM[1]. Em termos de linearidade das respostas EN vs. LN, atentando-se as distribuição espacial durante ENs e LNs nas **Figuras 29-30**, identificou-se que as anomalias dos eventos ENs atingem máxima correlação espacial negativa ( $r < -0,7$ ) com as anomalias durante LNs entre SON[0] a MAM[1] (para precipitação) e DJF[1] a JJA[2] (para temperatura do ar). Esses dois achados particulares confirmam duas resultantes anteriores: (1) em vista da ocorrência de eventos ENOS, a precipitação experiencia extremos de anomalias primeiramente do que a temperatura e (2) apesar dos eventos não serem necessariamente lineares no sentido estrito do termo, os resultados de correlação linear e anomalias confirmaram que espacialmente, as anomalias observadas durante ENs e LNs são predominantemente opostas entre si em termos de sinal para determinados trimestres.

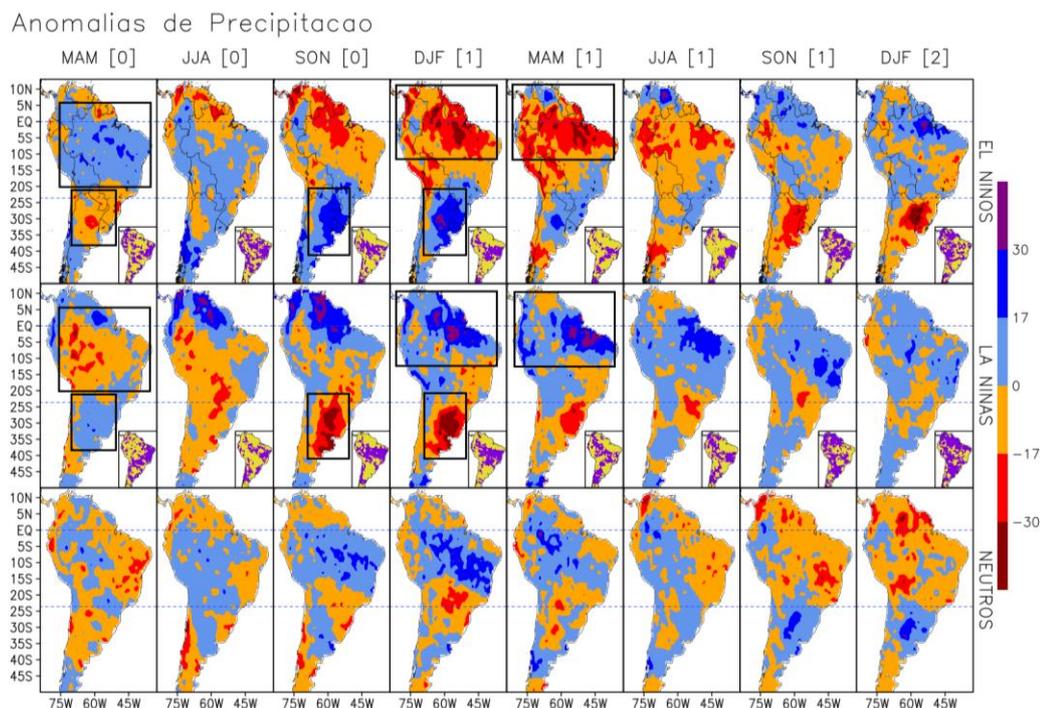
Para além de tais fatos, os retângulos destacados nas **figuras 29-30** ressaltam que apesar dos picos de anomalias de temperatura e precipitação sucederem sobretudo entre SON[0] a MAM[1], padrões anteriores ao início propriamente dos eventos foram detectados. Para temperatura do ar, identificou-se anomalias positivas (negativas) durante eventos ENs (LNs) no período de outono a inverno (MAM[0] a JJA[0]) para região entre norte da Argentina e Paraguai (**número (1)**), revelando que anteriormente a ocorrência do evento, algumas características de aquecimento e resfriamento são detectadas. Além disso, pode-se detectar (**número (2)**) que mesmo a partir de SON[0], antes dos extremos de eventos ENs e LNs (no geral), já se observa ‘ondas’ de anomalias positivas (negativas) de temperatura dominando as áreas tropicais da América do Sul. E para casos particulares ENs, observou-se que no inverno austral do ano seguinte ao ano do evento [1], as anomalias observadas em Argentina-Paraguai (1) apresentam inversão de sinal em (3).

Em termos de intensidade das anomalias observadas durante ENs e LNs, testou-se se os absolutos das anomalias eram superiores àqueles observados durante os mesmos trimestres para eventos Neutros. As imagens menores internas a cada evento-trimestre (Figura 29-30) destacam esse aspecto. Amplamente, os resultados apontaram que as anomalias de temperatura do ar e precipitação dos trimestres de SON[0] a MAM[1] e DJF[1] a JJA[1], respectivamente, registraram maiores proporções de áreas (entre 58 a 70% da AS) na qual os absolutos das anomalias durante ENs ou LNs são superiores àquelas observadas durante períodos Neutros. De forma oposta, verificou-se que em pouco mais de 30% da América Sul, os absolutos das anomalias observados durante eventos ENs e LNs médios não superam, independente do

trimestre, às anomalias de períodos neutros, revelando que para essas áreas, a ocorrência de eventos ENOS não implica valores de anomalias expressivos.



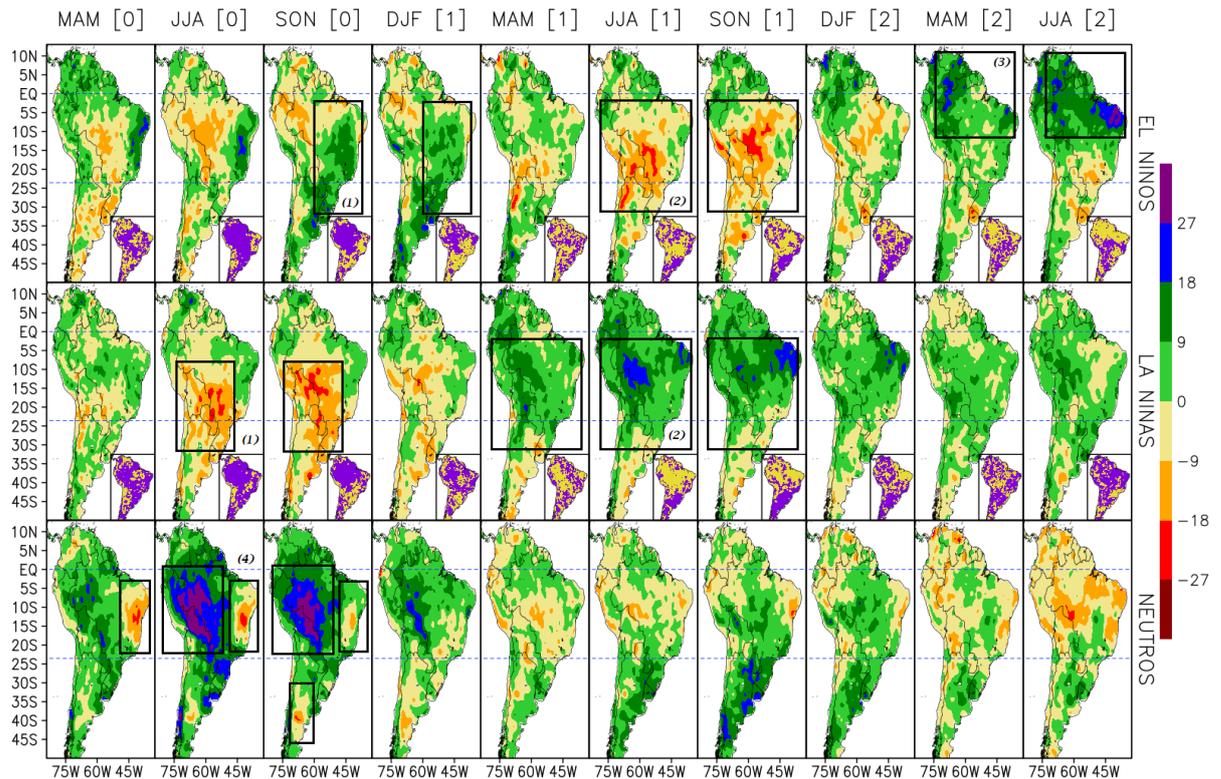
**Figura 29.** Anomalias médias de Temperatura do Ar (filtro para frequência > 12 meses) observadas para os trimestres pertencentes ao ciclo de vida de 12 meses (ano do evento [0] a ano posterior [1]), para períodos ENS, LNs e Neutros. A lista de intervalos (anos) ENS, LNs e Neutros encontram-se descritos em metodologia. JJA = junho-julho-agosto, SON = setembro-outubro-novembro, DJA = dezembro-janeiro-fevereiro e MAM = março-abril-maio. As imagens menores ilustram áreas em que o absoluto da anomalia durante ENS ou LNs é superior ao absoluto da anomalia durante Neutro [ $|EN| > |N|$  ou  $LN > |N|$ ]. Cores amarela e roxo representam Evento > Neutro e Neutro > Evento, respectivamente.



**Figura 30.** Mesmo de 29, mas para Precipitação.

A espacialização das anomalias de NDVI por trimestres seguem expressas nas **figuras 20-21**, para média de eventos (ENs, LNs) e neutros e eventos fortes-muito fortes e neutros, respectivamente. Importante destacar que diferentemente das **figuras 18-19** (temperatura e precipitação), os padrões observados para NDVI apresentam maiores complexidades em termos de relação NDVI-ENOS. Para contextualizar, as análises harmônicas 1 e 2 apontaram áreas (1) no centro da Argentina, (2) em seções do Chile (a norte do Atacama), (3) no nordeste do Brasil (4) no noroeste do Amazonas e (5) norte do Pará (**fig. 13**) que se caracterizaram por apresentar alta proporção da variabilidade do NDVI sendo explicada por frequência de 2-7 anos, sendo que áreas no sudeste do Brasil e em setores na planície do Orinoco (Colômbia-Venezuela) tem destaque sobremaneira pela alto  $R^2$  associado a sinais intra-anuais (**figs. 12 e 13a,d**). Os resultados de correlação linear NDVI-ONI (**fig. 16**) não capturam fortes associações lineares no centro da Argentina, apontando maior linearidade da relação na seção SO-NE, entre Peru a nordeste do Brasil. Por outro lado, as correlações NDVI-PR (**fig. 17a-c**) e NDVI-TAR (**fig. 17d-f**) expuseram que aqueles setores apontados pela AH1/2 se caracterizam por alto relacionamento linear entre NDVI e Precipitação/ Temperatura do Ar. Em termos de defasagem, os resultados de correlação apontaram com destaque que correlações elevadas ( $|r| > P75$ ) entre NDVI-ONI apresentam pico de defasagem entre 10-11 meses em relação ao ENOS (ONI), assim como revelaram que o NDVI reage entre 0-2 meses (1-3 meses) depois dos extremos de temperatura do ar (precipitação). Até o momento, já se observara que os extremos dos evento ENOS ocorrem preferencialmente no trimestre DJF[1]. Dessa forma, baseado nessa última informação do NDVI reagir até 11 meses após o extremo do evento, seria esperado em hipótese que anomalias de NDVI ocorram no final do ano seguinte do evento, isto é, após o evento já ter cessado. Para os eventos ENOS entre 1982-2015, por exemplo, 85% dos 20 eventos cessaram e deram espaço a neutro quente ou frio ou La Niña até o trimestre de JJA[1] do ano seguinte. Para os casos de Temperatura do Ar e Precipitação (**fig. 18-19**) de forma oposta, os resultados bem apontaram que as anomalias observadas ocorrem entre extremo do evento (SON[0]) a período de cessar do mesmo (JJA[1]).

## Anomalias de NDVI



**Figura 31.** Mesmo de 29, mas para NDVI

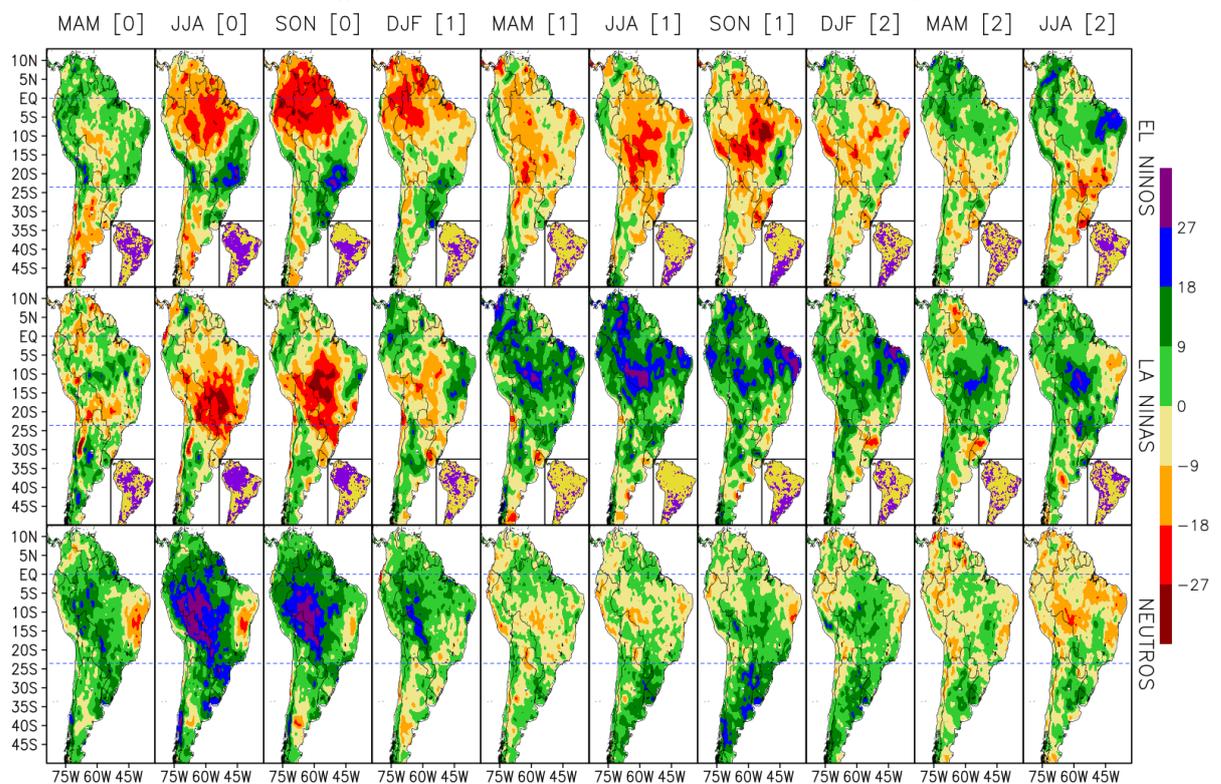
Para as **figuras 31-32**, expandiu-se o ciclo de vida para até 30m (até JJA[2]), uma vez que a reação do NDVI em relação as variáveis e índice apresentam maior defasagem. Amparado nas figuras 20-21, observou-se que os períodos anterior e posterior a DJF[1] exibem padrões de anomalias diferenciado entre eventos ENs e LNs. Em específico, identificou-se tendências significantes de escurecimento (queda de NDVI) e esverdeamento (aumento do NDVI) da vegetação durante eventos ENs e LNs principalmente entre JJA[1] a SON[1], para a faixa entre norte do Peru e nordeste brasileiro (**número 2**). Essa tendência particular aparente ter respaldo, haja vista que ao se considerar esses trimestres, as áreas da América do Sul na qual os absolutos de anomalias durante ENs ou LNs são superiores aos neutros ( $|ENs| > |N|$  ou  $|LNs| > |N|$ ) ultrapassam 50% de área da América do Sul.

Para o período anterior ao evento, entre JJA[0]-SON[0] e SON[0]-DJF[1], há indicações de escurecimento (esverdeamento) anteriores para eventos LNs e ENs (**número 1**). O nordeste brasileiro, para defasagens mais elevadas, MAM[2]-JJA[2] apresentou tendência esverdeamento da vegetação no ano 2 após o evento (**número 3**), contudo, sinal oposto não fora observado durante LNs para o mesmo trimestre.

Além disso, fora observado com distinção que o oeste do Brasil e Peru (nordeste do Brasil, centro da Argentina) apresentam tendência a esverdeamento (escurecimento) nos

trimestres de inverno a primavera austral de anos Neutros (**número (4)**). Esse padrão é espacialmente destacável. A expressão zonal das anomalias de sinais opostas inclusive pode hipoteticamente estar atrelado ao fato de eventos Neutros serem posteriores a ENs e LNs, então esse dipolo zonal poderia estar associado a uma reação retardada de ENs ou LNs anteriores. Contudo, esses padrões precisam ser avaliados com maior rigor, tendo que vista que as anomalias NDVI sugerem menor linearidade da relação ENOS-Vegetação. Para se ter em conta, os resultados apontaram que entre os trimestres DJF[1] e MAM[1], os sinais de anomalia NDVI tendem a ser expressivamente opostos ( $r = -0,56$ ) ao se confrontar ENs e LNs. Todavia, para defasagens mais elevadas, essa correlação espacial entre anomalias ENs e LNs para um mesmo trimestre caem para  $-0,4$ . Para os padrões observado em figura 20, na figura 21 posterior, apenas eventos El Niños e La Niñas fortes foram considerados para cálculo da média dos trimestres. Os padrões observados em números 1-4 se apresentam relativamente mais intensos. Todavia, ao se fazer o mesmo (não apresentado) para eventos isolados, uma grande variabilidade entre os eventos, em função da área e trimestre, fora identificada, revelando que a depender da área/trimestre, diferentes ENs não configuram o mesmo padrão necessariamente.

Anomalias de NDVI (para eventos Fortes e Muito Fortes)



**Figura 32.** Mesmo de 31, mas para eventos ENs e LNs fortes e muito fortes.

Com vista a integrar os resultados alcançados até o momento, de análises harmônica, correlação e composição de anomalias trimestrais, no último tópico a frente, será escolhida áreas

particulares para se testar com maior rigor a relação ENOS-NDVI e confirmar os padrões espaciais anteriores.

### 5.3 Anomalias de Comportamento Fenológico durante eventos El Niños e La Niñas

Para efeito de testar com maior rigor as relações ENOS-Vegetação, quatro pontos amostrais foram escolhidos (Japurá-AM, Tucano-BA, Argentina e Uruguai), com vista a testar (1) eventos EN ou LN de maior importância, (2) variáveis intermediárias da relação ENOS-Vegetação e (3) potenciais efeitos durante fases fenológicas (**Figura 10**) para determinado evento ENOS. Tal análise visa empregar conjuntamente as informações de análise harmônica, correlação e anomalias para compreender a relação ENOS-Vegetação. As **Figuras 33 e 34** adiante apresentam as principais características dos quatro pontos e médias mensais de NDVI, precipitação e temperatura do ar, respectivamente.

Baseado em Figura 33, verifica-se imediatamente quem sob o critério de análises harmônicas, as áreas de Tucano-BA e Argentina representam áreas na qual maior componente de 2-7 anos ( $R^2$ ) é encontrado na variabilidade das séries NDVI ( $R^2 > 10\%$ ), assim como há menor contribuição dos ciclos intra-anuais ( $R^2 < 70\%$ ). Essas mesmas áreas se caracterizam por comporem setores que abrigam tipos de biomas cujas vegetações (Savana-Estépica Arbórea (IBGE) ou Florestas Tropicais e Subtropicais Secas (Olson) e Savanas e Campos Temperados, respectivamente) apresentam certo nível de adaptação a seca (precipitação total  $< 600$  mm, com período de seca de 8 meses). As áreas de Japurá-AM e Uruguai se destacam sobretudo pelo tipo de vegetação e precipitação. A primeira é dominada por Florestas Ombrófilas Densas (IBGE) ou Florestas Tropicais e Subtropicais Úmidas (Olson), ao passo que a segunda consiste em áreas de Savanas e Campos Tropicais e Subtropicais (Olson). Ambas as áreas não apresentam um período seco definido ( $P > 2T$ ), sendo diferenciadas pela temperatura, na qual na segunda área possui alta variabilidade mensal. Para se comparar, nas áreas de Tucano-BA e Japurá-AM, a temperatura possui menor contribuição dos ciclos intra-anuais ( $R^2 < 95\%$ ), sendo - portanto - dotadas de menor variabilidade sazonal. Nessas duas áreas, as temperaturas são sempre altas (média mensal  $> 24^\circ\text{C}$ ). Pelo critério de formas de vida dominante, o estrato superior arbóreo é abundante em Japurá-AM (formação densa e alta), sendo encontrado em menor altura e espaçamento horizontal na amostra Uruguai. Nesta área, o estrato arbóreo espaçado (ecorregião savana uruguaiana) compartilha áreas com vegetação arbustiva e estrato herbáceo de forma intercalada, de tal forma que nesse caso se tornam expostas diretamente a radiação solar. A área de Tucano-BA possui seções arbóreas decíduas de menor altura, sendo dominante formações

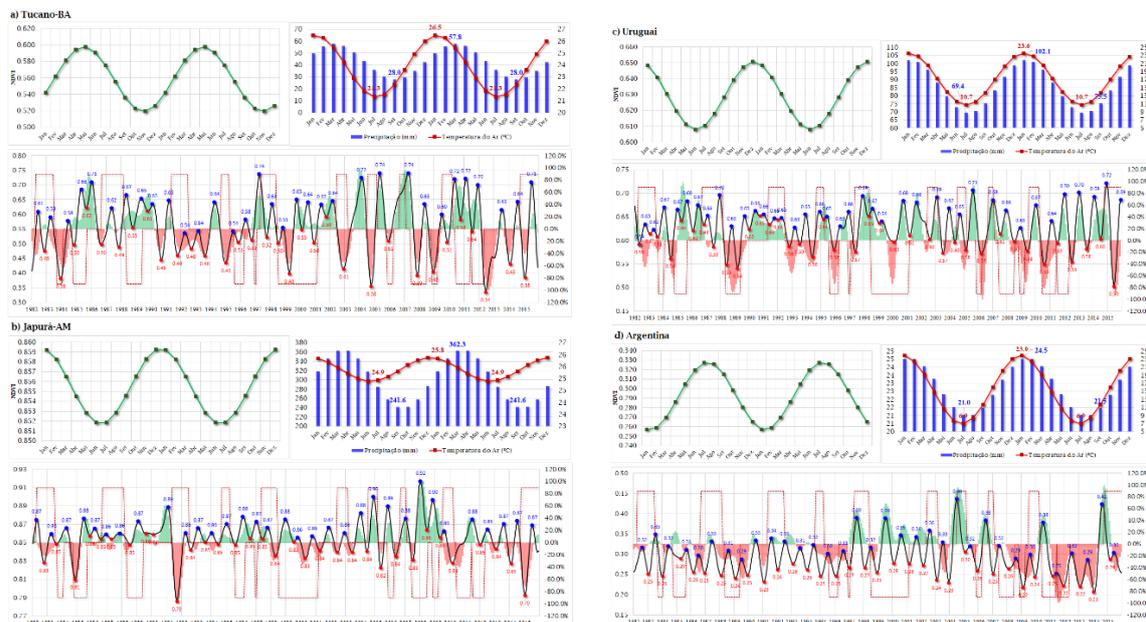
subarbustivas e herbáceas adaptadas a seca. A área da Argentina, situado ao norte do deserto da Patagônia é dominada por vegetação subarbusativa e herbácea (ecorregião de Low Monte). Em termos de efeitos das frequências de 2 a 7 anos, nas áreas de Japurá e Tucano, o efeito da frequência sobre a temperatura é maior, enquanto Japurá e Uruguai reservam os maiores efeitos sobre de tal frequência sobre a precipitação. Comparativamente, nas três áreas a relação NDVI-precipitação é linearmente dominante em relação a NDVI-temperatura. Logo, para tais áreas, é assumido que a precipitação seja variável intermediária de maior importância na relação ENOS-Vegetação.

	Métricas	ÁREA 1	ÁREA 2	ÁREA 3	ÁREA 4	Área 1
Localização	Localidade	Tucano-BA	Japurá-AM	Uruguai	Argentina	
	Lat	10.9° S	0.9° S	31.9° S	39.4° S	
	Lon	39.0° W	68.5° W	56.5° W	66.0° W	
Vegetação	Bioma Olson	FTSS	FTSU	SCTS	SCT*	
	UCS	Veg. Herb.	FSV	Veg. Herb.	Veg. Herb.	
	Ecorregião Olson	Caatinga	Florestas Úmidas do Japurá-Negro-Solimões	Savana Uruguaiana	Low Monte	
Características	PR Total	515.7	3623.8	1028.3	273.5	
	PR Min	28.0	241.6	69.4	21.0	
	PR Max	57.8	362.3	101.4	24.7	
	ΔP	29.8	120.7	32.0	3.7	
	CV P	25.8%	15.3%	14.1%	6.0%	
	Meses secos	8	0	0	8	
	Meses úmidos	4	12	12	4	
	T max	26.5	25.9	23.6	23.9	
	T min	21.3	24.9	10.7	6.9	
	ΔT	5.1	1.0	13.0	17.0	
	T média	23.9	25.4	17.1	15.4	
	CV T	8.0%	1.4%	27.9%	40.8%	
	NDVI médio	0.56	0.86	0.63	0.29	
	NDVI min	0.52	0.85	0.61	0.26	
	NDVI max	0.60	0.86	0.65	0.33	
	ΔNDVI	0.08	0.01	0.04	0.07	
	CV NDVI	5.2%	0.3%	2.5%	9.0%	
R² (%) - Análises Harmônicas	Clima Köppen	BSh	Af	Cfa	BSk	
	AH1 (f: 2-7a) - NDVI	16.48	10.91	9.61	30.76	
	AH2 (f: 2-7a) - NDVI	24.44	11.65	15.65	36.67	
	AH1 (≤ 12m) - NDVI	64.7	71.7	76.7	40.9	
	AH1 (f: 2-7a) - PR	6.72	7.38	12.55	7.51	
	AH2 (f: 2-7a) - PR	8.97	11.97	13.45	9.60	
	AH1 (≤ 12m) - PR	84.9	81.7	74.6	81.6	
Correlações Máximas (Até 12 lags)	AH1 (f: 2-7a) - TAR	2.94	12.59	0.53	0.30	
	AH2 (f: 2-7a) - TAR	29.25	20.91	8.24	10.16	
	AH1 (≤ 12m) - TAR	94.2	74.3	98.7	99.3	
	r NDVIxONI	-0.18	-0.30	0.23	0.13	
	r TARxONI	0.57	0.45	-0.36	-0.22	
	r PRxONI	-0.35	-0.26	0.48	0.18	
	r TARxNDVI	-0.32	0.14	0.15	-0.28	
r PRxNDVI	0.65	-0.32	0.48	0.67		
r TARxPR	-0.57	-0.39	-0.30	-0.36		

**Figura 33.** Síntese das características dos quatro pontos amostrais. Imagens das quatro ecorregiões de Olson obtidas disponíveis em: <https://www.oneearth.org/>. AH = Análise Harmônica, r = correlação linear, CV = coeficiente de variação.

Em termos de comportamento dos ciclos médios, na **figura 34** é apresentado o comportamento médio para as três variáveis. Verifica-se que somente no Uruguai, as três variáveis estão em fase, com maiores (menores) temperatura, precipitação e NDVI ocorrendo em DJF (JJA). Para Japurá, NDVI e Temperatura compartilham mesma fase com máximos

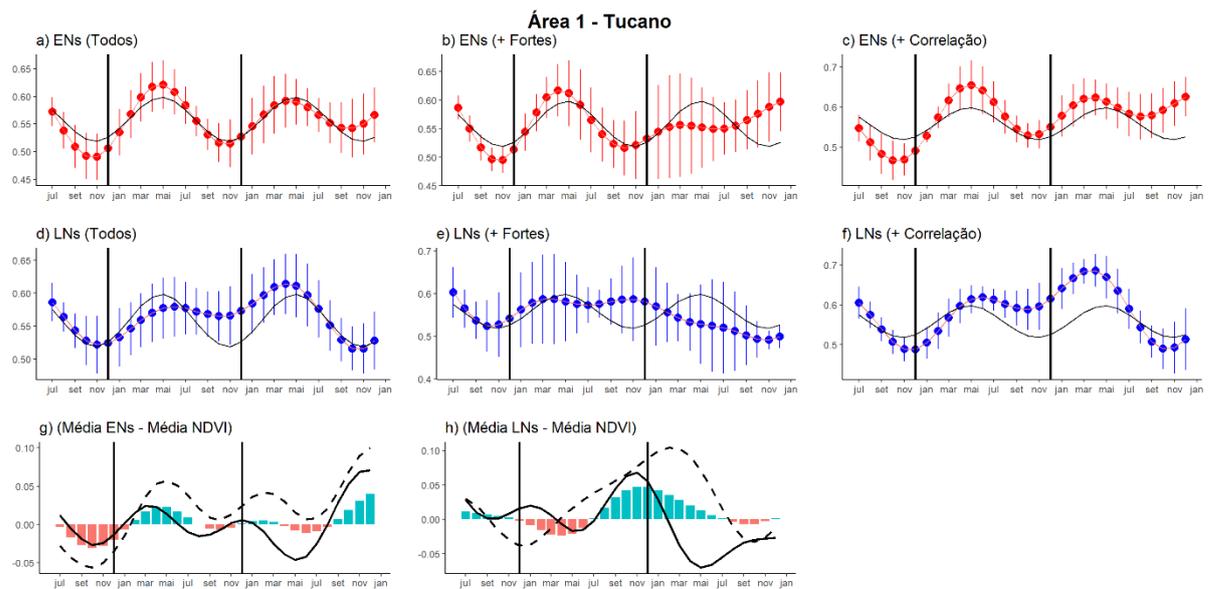
(mínimos) em DJF (JJA). A precipitação nessa área tem pico em MAM, com mínima em SON. Na Argentina, precipitação e temperatura estão em fase, com máximos (mínimos) em DJF (JJA). O NDVI nesta área possui defasagem de seis meses, com extremos de maturidade e dormiência em JJA e DJF, respectivamente. A área de Tucano-BA constitui a única na qual as máximas e mínimos ocorrem com lag variável. O período chuvoso (seco) ocorre em março (setembro). As máximas e mínimas temperaturas (NDVI) são registradas dois meses antes (depois), indicando picos de temperatura sendo sucedidos por picos de precipitação e posteriormente por picos de NDVI.



**Figura 34.** Médias mensais (1982-2015) de NDVI (GIMMS), temperatura do ar (UDeI) e precipitação (CHIRPS) e séries NDVI 1982-2015 (filtro > 9m) e Anomalias de NDVI (filtro > 12m). Ondas quadradas representam respectivamente períodos ENs (> 0), LN (<0) e períodos neutros (=0).

Em termos de fases fenológicas, **para Área 1 (Tucano-BA)**, baseado na figura 35, observou-se que as anomalias de NDVI El Niños vs. La Niñas apresentam baixo caráter linear, sendo negativamente correlacionadas ( $r = -0,24$ ) ao se considerar todos os eventos. Tendo por base a média dos cinco eventos mais intensos (1) e ciclos NDVIs mais correlacionados (2) para anos ENs e LNs, verifica-se que a correlação temporal entre as anomalias é positiva ( $r = 0,57$  (eventos mais fortes),  $r = 0,50$  (eventos mais correlacionados)). Portanto, o grau de intensidade do evento não constitui fato diferenciador em termos de sinal de anomalias. Considerando todos os eventos, conclui-se que as anomalias apresentam diferença cronológica (**fig. 35g-h**). Para ENs (**fig. 35a-c,g**), observa-se tendências de escurecimento (queda do NDVI) da vegetação centrado em SON[0], intensificando o período de dormiência da vegetação e leve aumento durante período de esverdeamento até maturidade, para MAM[1]. Como exemplo, embora a

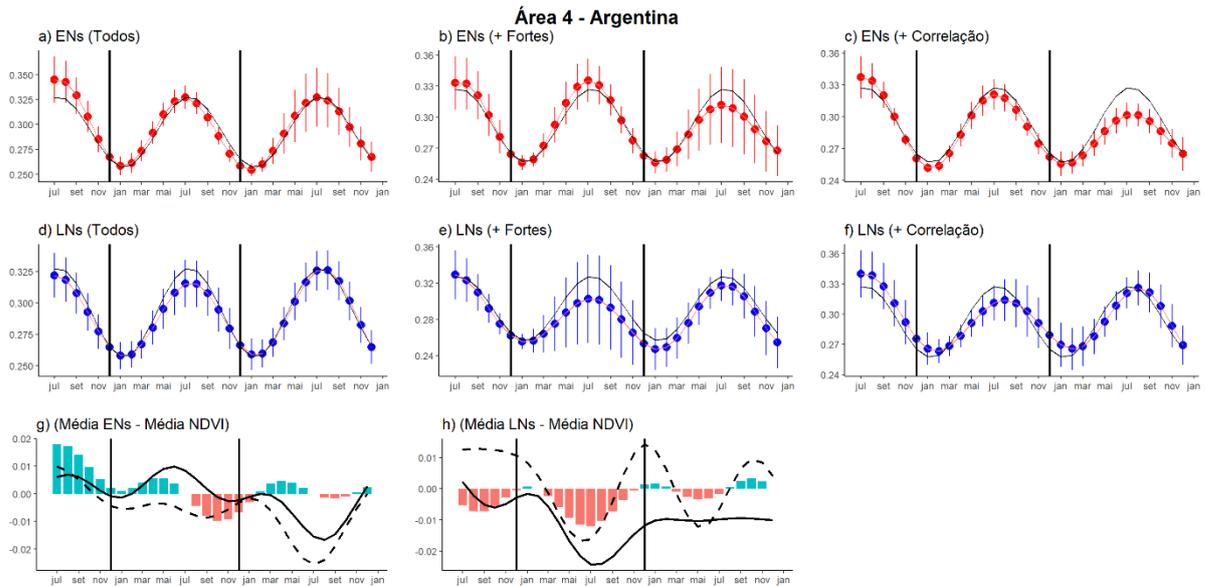
média mensal NDVI aponte mínimo de NDVI = 0,52 (dormência), valores abaixo de NDVI = 0,42 foram atingidos entre SON[0] a DJF[1] durante os ENs de 1994-1995, 2002-2003, 2004-2005 e 2015-2016, implicando que no decorrer desses ENs, o período de dormência da vegetação atingiu valores abaixo do normal. Para LNs, observando as curvas **24d-f**, conclui-se que as anomalias entre SON[1] a MAM[2] possuem tendência de esverdeamento da vegetação entre o período de mínimo NDVI (dormência) a maturidade, situadas no final do ano [1] do evento. Relevante verificar que baseado em tais gráficos, observa-se igualmente que anomalias de NDVI são mais intensas no verão austral do ano [1] de LNs do que aquelas verificadas durante períodos ENs. Para se notar, empregando **Figura 35f**, as anomalias durante séries NDVIs de LNs mais correlacionadas apresentam curva fenológica acima da média NDVI climatológica, com barras de erro não intersectando a média NDVI. Os picos de NDVI superiores a 0,70 em 1985-1986, 1995-1996 e 2011-2012 ocorreram posteriores aos eventos LNs de 1984-1985, 1995-1996 e 2010-2011.



**Figura 35.** Ciclo fenológico de NDVI para Área 1: Tucano-BA. Médias de todos os anos dos eventos (ENs, (a), LNs (d)), anos dos eventos mais fortes (ENs, (b), LNs (e)) e anos dos ciclos mais correlacionados (ENs, (c), LNs (f)). Linha preta em a-f representa média mensal NDVI (1982-2015). Barras de erro possuem alfa = 0,1 (confiança = 90%). Anomalias de Ciclos fenológicos em relação a média mensal NDVI são dispostos para ENs (g) e LNs (h). Barras vermelha/ azul, linha preta sólida e linha preta tracejada representam eventos totais, mais fortes e mais correlacionados, respectivamente.

A **Área 4 (Argentina)** (**figura 36**) revelou que as anomalias de NDVI apresentam baixo caráter de linearidade entre eventos ENs e LNs, assim como na área anterior. Nessa área, considerando (1) todos os eventos e (2) apenas os mais fortes, as correlações de anomalias EN vs. LN ficaram em -0,25 e -0,18, respectivamente. Comparando as curvas de fig. 36a-c, observa-se tendência de esverdeamento da vegetação entre JJA[0] a SON[1] para eventos ENs.

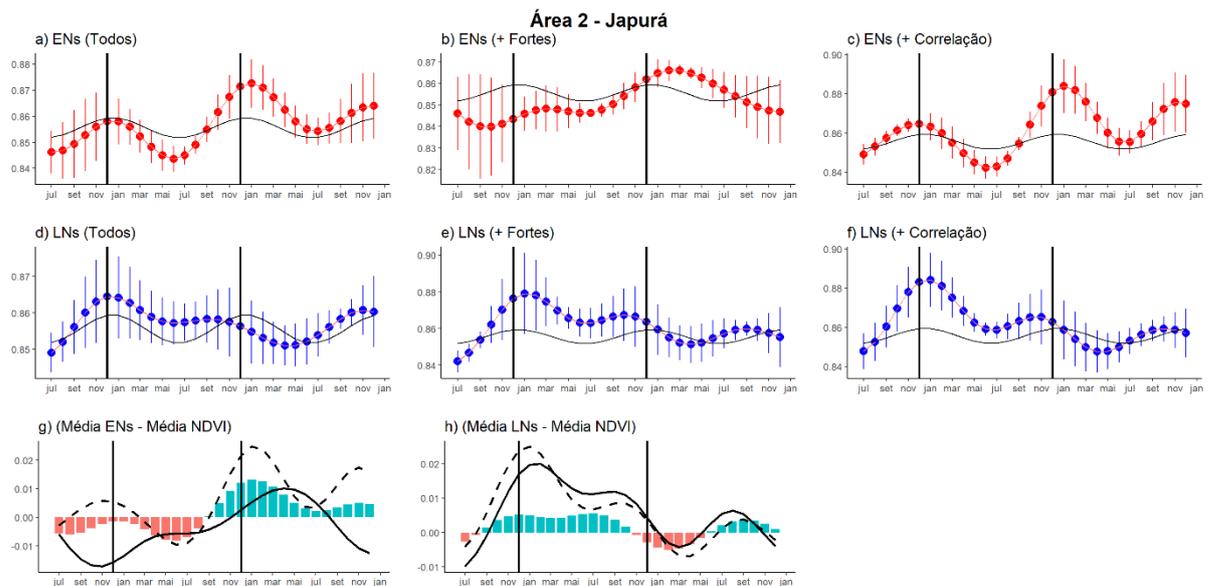
Esse período representa o intervalo entre os extremos de maturidade (máximo NDVI) e dormência (mínimo NDVI). Nos anos de 2004 e 2014, referentes aos ENs 2004-05 e 2014-16, os valores de NDVI para JJA[0] atingiram valores de aproximadamente 0,43-44, considerando NDVI médio máximo de 0,33 para área. Contudo, os resultados apontam pico de NDVI anterior ao pico do evento El Niño propriamente. Para essa área, assim como na área semiárida de Tucano-BA, a relação NDVI-Precipitação é alta ( $r = +0,67$ ). Apesar da baixa variabilidade da chuva entre os meses ( $CV = 6\%$ ), os extremos climatológicos de precipitação ocorrem em janeiro, (24,7 mm) e julho (21 mm), com máximo e mínimo de NDVI em julho e janeiro, respectivamente. A **figura 30** aponta que durante eventos ENs médios, anomalias positivas já são observadas durante JJA[0] do ano do evento. Logo, verifica-se que o período de maturidade da vegetação (julho) dessa área seria antecedido por um período chuvoso mais intenso, subsidiando valores de NDVI mais altos. Anterior ao evento EN de 2004-2005, por exemplo, esta área recebeu 75,4 mm de precipitação em fev/2004 (climatologia = 24,5 mm), com período posterior de maturidade (julho) e dormência (janeiro) da vegetação ocorrendo em valores acima da média NDVI. Para eventos LNs, as anomalias apontam que maiores diferenças em relação a climatologia são observadas durante o inverno do ano [1] do evento, apontando defasagem diferente daquela observada durante ENs. Para as LNs de 2010-2011 e 2011-2012, os valores de NDVI atingiram durante os anos 2011, 2012 e 2013 período de dormência (janeiro) com valores NDVI de aproximadamente 0,20-21 e valores referente ao período de maturidade igualmente abaixo da média NDVI. Para essas duas, áreas, Tucano-BA e Argentina, apesar das análises harmônica indicarem alta contribuição de frequências de 2-7 anos, com oscilações interanuais respondendo por menos 70% da variabilidade, os resultados anteriores demonstram que, diante de eventos ENs e LNs, tanto o período de defasagem quanto a intensidade das anomalias de NDVI são diferentes. Em **fig. 36g** (ENs), por exemplo, as maiores anomalias ocorrem em JJA[0], enquanto em **fig. 36h** (LNs), as maiores anomalias sucedem em JJA[1]. Tais resultados apontam potenciais razões da relação NDVI-ONI serem baixas nessa área.



**Figura 36.** Mesmo de 35, mas para Área 4 – Argentina

A **Área 2 (Japurá)** (**figura 37**), por outro lado, revelou alta linearidade e sincronidade quando comparado as anomalias durante eventos ENs e LNs ( $r = -0,78$  (todos),  $r = -0,51$  (eventos fortes) e  $r = -0,37$  (ciclos mais correlacionados)). Observando a **figura 37**, verifica-se que durante eventos ENs (LNs), perdura entre SON[0] a JJA[1] anomalias negativas (positivas). Para o período DJF[1] a MMA[2], esse sinal inverteria entre os eventos. Tais resultados apontam, portanto, que apesar do tipo florestal dessa área apresentar NDVI relativamente altos e baixa variabilidade anual ( $CV = 1,4\%$ ), é esperado tendências de escurecimento (esverdeamento) da vegetação floresta durante eventos ENs (LNs). Como exemplos, associado aos ENS de 1991-92 e 2014-2016, em set/1991 e jan/2015, os valores de NDVI atingiram 0,78-079, para um período caracteristicamente de NDVI alto (0,86). Por outro lado, associado a LN de 2007-2008, os valores de NDVI atingiram cifras superiores a 0,92 (média máxima = 0,86), estando a vegetação com alto pico de maturidade no verão de 2007-2008. Para essa área particularmente, embora a precipitação apresente variabilidade mensal maior que as áreas anteriores ( $CV = 15,3\%$ ), em todos os meses, a precipitação mínima média se apresentou acima de 240 mm. Para temperatura, a média mensal mínima se apresentou acima de 24°C, com baixa variabilidade anual ( $CV = 1,4\%$ ). Dessa forma, para as quatro áreas destacadas, a associação linear entre NDVI e variáveis temperatura e precipitação possui menor valor para essa área, indicando que variações das referidas variáveis possuem menor capacidade linear de produzir variações no NDVI. Apesar disso, na análise harmônica 1, mais da 10% da variabilidade do NDVI dessa área está associada à frequências de 2 a 7 anos. Para se ter nota, para o baixo valor de NDVI de 1991, associado a evento EN 1991-1992, o mínimo de NDVI registrado constitui

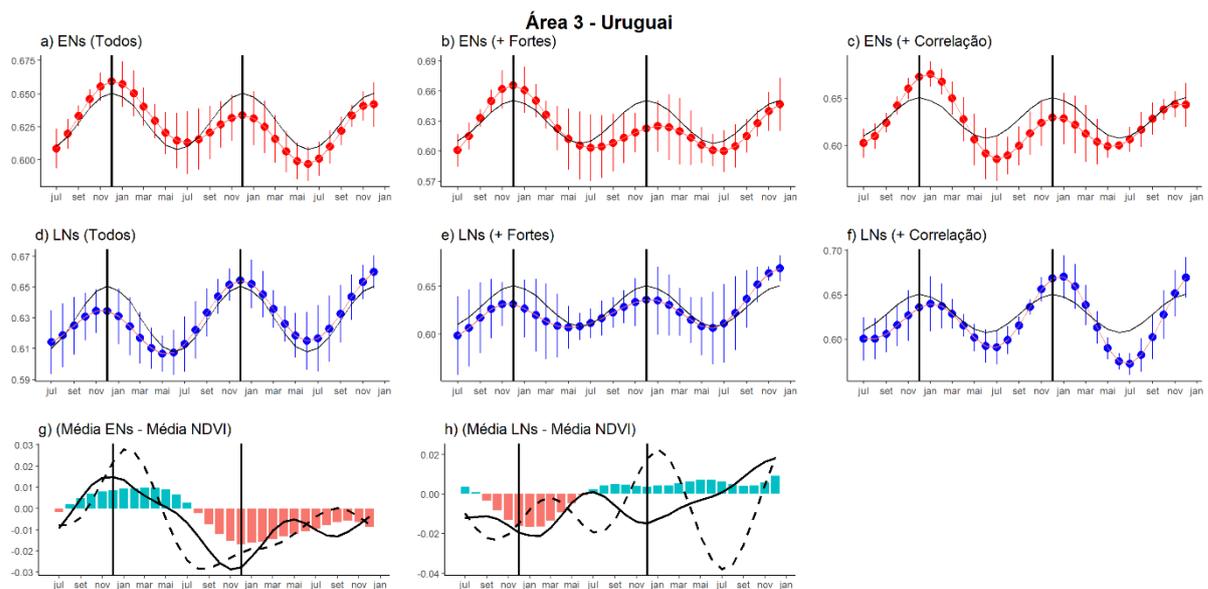
o mínimo da série (1982-2015), contudo, para aquele período, o mínimo de precipitação atingido constitui apenas aproximadamente 62% do menor valor registrado na série. Para a LN 2007-2008, o NDVI da série atingiu seu máximo em fev/2008, apesar de no período anterior ter chovido apenas 15% do máximo de precipitação da série. As anomalias de temperatura para esses períodos atingiram igualmente baixas proporções em relação às máximas e mínimas verificadas na série, assinalando que quando os valores máximos/ mínimos de NDVI ocorreram, os máximos e mínimos de temperatura e precipitação não necessariamente aconteceram.



**Figura 37.** Mesmo de 35, mas para Área 2 – Japurá-AM

A **Área 4 (Uruguai)** é expressa através da **figura 38**. Em termos de linearidade entre eventos ENs e LNs, as anomalias confrontando tais eventos mostraram-se estatisticamente opostos ( $r = -0,83$  (todos),  $r = -0,33$  (eventos fortes) e  $r = -0,20$  (eventos mais correlacionados)). Apesar dessa área não apresentar períodos secos propriamente como a área anterior, já que a média mensal do mês mais seco chove 69 mm, a relação NDVI-Precipitação nessa área demonstrou linearidade perceptível ( $r = 0,48$ ). Os padrões observados em **figura 38** revelaram comportamento opostos àqueles verificados em Japurá-AM. Na área 4, observou-se tendência a esverdeamento (escurecimento) da vegetação durante eventos ENs (LNs) entre SON[0] a MMA[1], com esse padrão invertendo entre os eventos, para JJA[1] a MAM[2]. Ao se observar atentamente os gráficos de anomalias, verifica-se que comparativamente para o período verão austral (DJF[0]), as anomalias negativas de NDVI atreladas a LNs revelaram ser mais intensas do que as anomalias positivas de NDVI associadas a ENs. Para o período centrado em DJF[1], esse fato se mostrou-se inverso, sendo as anomalias negativas associadas a ENs mais intensas. Esse fato denota que em função do período, as anomalias de NDVI registradas serão mais

intensas, a depender do tipo de evento. Para ilustrar esse fato, para essa área, tendo em vista que os períodos de máximo (maturidade) e mínimo (dormência) NDVI ocorrem em dezembro e junho, respectivamente, observou-se que as anomalias positivas durante ENs médios ocorrem centrado no período de maturidade. Os ENs de 1987-1988, 2002-2003 e 2014-2015 contém exemplos de verões na qual os valores de NDVI estiveram entre 0,60 a 0,72 (média máxima = 0,65), apontando que o NDVI atingira valores acima do normal nessas áreas. Por outro lado, para o período centrado em JJA[1], em jun/2015 (EN 2014-15) e jun/1988 (pós EN 1988-89), verificou-se que mínimos de 0,5 e 0,54, respectivamente foram atingidas para esse período (média mínima = 0,61). As LNs de 1988-1989, 1995-1996 e 1999-2000 representam, por sua vez, verões-outono na qual o NDVI atingiu valores de 0,54 a 0,59, destacando quedas na atividade vegetativa em um período estatisticamente de alta atividade. Para os exemplos listados, em geral, observou-se que as anomalias positivas ou negativas de NDVI estão em fase ou são em geral antecedidas por anomalias de precipitação. Esse é um padrão em geral encontrado para as áreas Tucano (1), Uruguai (3) e Argentina (4).



**Figura 38.** Mesmo de 35, mas para Área 3 – Uruguai

No que concerne a similaridade entre eventos ENs ou LNs, observando as **figuras 35-38**, verifica-se que na maioria dos casos, as barras de erros (superior e inferior) para cada mês majoritariamente tocam (intersectam) a curva de NDVI mensal médio. Esse resultado demonstrou que ao se considerar ciclos NDVI para todos os anos ENS, média dos cinco ciclos de eventos mais fortes ou média dos cinco ciclos mais correlacionados (para ENs e LNs), haverá ao menos um que será muito similar ao comportamento médio (ou igual), não sendo, portanto, diferente. Tal fato se apresenta como importante, pois embora tenha sido identificado seções de

ciclos NDVI acima ou abaixo da média mensal NDVI, pelos valores de erro padrão (e desvio padrão), nem todos os eventos se diferenciam dos valores médios observados. No que concerne aos eventos mais influentes por área, os resultados apontaram que essa resposta depende do período considerado (trimestre [ano do evento, ano do evento 1 ou ano do evento 2]). Ao julgar pelos valores de anomalias (figuras 35-37g-h), os seguintes trimestres/ eventos se destacam: Japurá (anomalias + em DJF[1] para ENs), Tucano (anomalias - em SON[0] (ENs) e anomalias + em DJF[2] (LNs)), Uruguai (anomalias - em DJF[2] (ENs) e anomalias - em DJF[1] (LNs)), e Argentina (anomalias + em JJA [0] (ENs) e anomalias - em JJA[1] (LNs)). Outros trimestres podem ser identificados, contudo, nestes as anomalias se destacam.

Além disso, observa-se como útil em estudos futuros a utilização de outras técnicas para identificar e confirmar os padrões observados nos gráficos de anomalias, tendo em vista que tratando-se dos eventos ENOS, com ciclos entre JJA[0] a JJA[2], a análise da relação ENOS-variável pode ser acometida por impasses, pois se uma variável é impactada em JJA[x], esse mesmo JJA conceitualmente pode configurar o trimestre JJA do ano 1 do evento y ou o trimestre JJA do ano 0 do evento z. Logo, caberia identificar se a variável cronologicamente está sendo impactada no período posterior ao evento [1] ou se ocorre no período anterior [0]. Esse é particularmente o caso dos eventos entre 1982-1985, 1986-1989, 1997-2001 e 2004 a 2012. Em tais anos, não há verão austral neutro, são propriamente verões austrais EN e LN intercalados, com períodos neutros entre eles durando poucos meses ou constituindo apenas a inversão do sinal. Sendo assim, o ano [1] de um EN se torna o ano [0] de uma LN posterior, ou vice-versa entre eventos. Nesse cenário, variáveis como NDVI que exibem anomalias potencialmente anterior ou posterior ao pico do evento acabam por se enquadrar nessa situação, onde determinar a quem estão associadas, evento posterior ou anterior, acaba por se tornar uma pergunta a se responder.

## CAPÍTULO 6

### 6. Discussão

Tratando-se da variabilidade temporal do sistema climático, o perfil de frequência ENOS constitui o segundo conjunto de frequências de maior importância, estando atrás apenas do ciclo anual (Kestin et al., 1999). As características espectrais ENOS foram discutidas em diversos trabalhos anteriores, os quais relatam diferenças conforme o método de análise (análise de Fourier, análise de ondaletas; *spectral power, cross spectrum and coherence*), componente

considerada (atmosférica: PNMM e/ou oceânica: TSM) e/ou região Niño (niños: 1+2, 3, 4 e/ou 3.4). Além disso, para caracterização espectral da oscilação ENOS, a literatura aponta intervalos espectrais, modos de variabilidades ou mesmo picos espectrais. Para se ter nota, em estudos que remontam a origem do termo ENOS, Rasmusson e Carpenter (1982) descrevem que com relação às anomalias de pressão atmosférica entre Sidney e Buenos Aires, Lockyer e Lockyer (1902) confirmaram que tal gangorra de pressão teria periodicidade de aproximadamente 3,8-a. Troup (1965), por sua vez, emprega a terminologia OS sem relacionar a mesma uma denotação de periodicidade propriamente. Rasmusson e Carpenter (1982), por outro lado, empregando-se análise espectral em dados de TSM (região próxima à AS) e dois índices de OS, verificaram que os três conjuntos de dados registraram para o período 1953-1974 (22 anos) picos espectrais destacáveis entre 36,6 a 42,7 m (3,1-3,6 a). Os achados de Rossi et al. (2011) destacam o fato anterior ao apontarem o índice de OS com banda energética relevante entre 2-4-a, sendo secundariamente impactada por faixas de 3-6-a (antes de 1910 e depois de 1970), 5-8-a (depois de 1970) e 8-16-a (depois de 1960).

Em termos de bandas espectrais, a literatura expressa certa variabilidade igualmente. A variância conjugada do fenômeno ENOS é expressa com periodicidade de 2 a 10 a, com destaque principal para 3-6-a nos trabalhos de Trenberth (1976, 1984), Philander (1983), e Gill e Rasmusson (1983). Todavia, Trenberth (1976, 1984) descreve que a característica de aperiodicidade da Oscilação Sul é justificada em parte pelo fenômeno não estar limitado a faixa tropical e subtropical, mas ser influenciado por sistemas de latitudes médias, ondas planetárias e sistemas meteorológicos transientes, a qual resultam em espectro da OS incluindo ruídos que estendem a faixa espectral para período de 2-10-a. Em outros estudos, bandas espectrais de 3-8 a (Deser et al., 2010), 3-5 a (Wang et al., 2017), 2-8-a (Torrence e Webster, 1998) e 2-7-a (Sarachick e Cane, 2010) são identificadas como típicas do fenômeno ENOS, sendo que esse último intervalo (2-7-a) é o mais difundido (Sarachick e Cane, 2010).

A literatura aponta o ENOS como decomposto segundo modos de variabilidade igualmente. Em estudos conduzidos por Barnett (1991) e Kestin et al. (1999), é observado que apesar da banda de 2-8-a perfazer amplo pico espectral na variabilidade ENOS, esse intervalo pode ser decomposto em modos fundamentais: quase-bienal - QB (2-3-a) e de baixa frequência - BF (3-8-a), sendo a faixa de BF a mais energética. Wang e Ren (2020) expressam ideia similar, descrevendo que embora a frequência de 2-7-a constitua amplo intervalo característico da oscilação ENOS, estudos anteriores (Ren et al., 2013; Capotondi, 2020) apontam que a periodicidade ENOS pode ser individualizada numa banda principal de 3-7-a (BF) e banda

secundária de 2-3-a (QB), os quais refletem os diferentes padrões espaciais de eventos ENOS. Wang e Ren (2020) constaram que as bandas de frequência QB e BF estão associadas aos eventos ENOS do Pacífico Central (PC) e Pacífico Leste (PL), respectivamente, indicando que eventos (sobretudo ENs) com centro de anomalia de TSM situados a oeste possuem componente QB dominante, com amplitudes de BF mais baixas. Por outro lado, eventos com picos a leste apresentam componente BF dominante e amplitudes altas para os dois modos (QB e BF). Wang e Ren (2020) observaram igualmente que os padrões espaciais (PC ou PL) apresentam relação com a intensidade dos eventos (amplitude do sinal). Os El Niños mais fortes ocorridos em 1972-73, 1982-83, 1997-98 e 2015-16 constituem eventos canônicos, com centro de aquecimento no Pacífico Leste e forte componente de BF. Dessa forma, a literatura permite inferir que as regiões Niños (a julgar pelo centro de anomalia) expressam diferentes características espectrais e de amplitude do sinal, sendo os modos QB e BF possuem diferentes contribuições para o sinal.

Apesar da banda 2-7-a ser a predominante no espectro ENOS, Kestin et al. (1999) e Wang e Wang (1996) descrevem que as interações entre os modos de variabilidade ENOS e a relação desses com o CA constituem importante fator explicativo sobre a variabilidade ENOS. A importância do CA é notória sobretudo ao se considerar que nas ciências atmosféricas e climáticas, o termo “ciclo” geralmente é empregado como sinônimo de ciclo anual ou ciclo sazonal (Wu et al., 2008). A relação ENOS-CA se torna efetivamente mais visível nas considerações de Zhang et al. (2015), ao expressarem que os eventos ENOS tendem com muita regularidade iniciar na primavera (MAM) ou verão boreal (JJA), atingir seu pico em SON ou DJF e finalizar na primavera boreal do ano seguinte. Essa sincronia sazonal ENOS-CA é indicativa de interação entre escalas e revela característica de aprisionamento de fase dos eventos ENOS em relação ao CA. Stuecker et al. (2013) descreve que teorias como *Recharge Oscillator Paradigm* não conseguem capturar a relação entre escalas interanual e sazonal e tal interação de caráter não-linear é chamada de Modo de Combinação (*c-mode*) do Pacífico Tropical e possui papel importante na explicação da irregularidade ENOS. Torrence e Webster (1998) complementam esse raciocínio ao observarem que a persistência de decaimento ENOS na primavera boreal sucede principalmente devido à baixa relação sinal-sinal-ruído (SNR) derivada do aprisionamento de fase de ENOS no ciclo anual.

Os resultados alcançados através da análise harmônica permitiram atestar as características espectrais anteriormente destacadas na literatura, no sentido de quantificar a variabilidade explicada pela frequência ENOS. Dessa forma, a AH apontou que dentre os

índices climáticos, os índices associados ao Pacífico Tropical apresentam as maiores proporção de variabilidade interanual de 2-7-a, perfazendo mais de 50 % da variabilidade temporal dos índices MEI, ONI e Niños. Com exceção da QBO e SOI, todos os demais índices registraram componente interanual inferior a 33 %. Além disso, a característica de influências de fenômenos de alta frequência observada em Trenberth (1976, 1984) puderam ser verificadas em termos espectrais. Observou-se que a componente atmosférica da oscilação ENOS possui alto efeito de oscilações intra-anuais. Comparativamente às regiões niños (componente oceânica), a OS registrou entre 2 a 7x (dependendo da região niño) mais influência de oscilações intra-anuais ( $\leq 12$ -m) do que as componentes oceânicas. O ciclo anual particularmente possui relevante papel na variabilidade ENOS (Wang e Wang, 1996; Zhang et al., 2015) e os resultados alcançados sugerem que os efeitos intra-anuais se expressem na oscilação ENOS principalmente através de sua componente atmosférica. Todavia, importante ressaltar que apesar da TSM das regiões niños registrar entre 4,2 a 12,4% de sua variabilidade associada a frequências intra-anuais (ONI,  $\sim 2,3\%$ ), os índices das regiões niños e ONI consideram em seu cálculo etapas de remoção de sazonalidade (cálculo de anomalia) e filtros de média móvel; logo, contabiliza-se que os efeitos de frequências intra-anuais sobre a TSM são maiores do que os valores obtidos, tendo em vista que os dois procedimentos listados possuem o efeito de aumentar a razão sinal-ruído e reduzir o efeito de alta frequência do plano de fundo do sinal (Kestin et al., 1999; Shumway e Stoffer, 2000).

Similar ao observado por Wang e Ren (2020), a AH revelou evidências de que as regiões niños possuem diferentes modos de variabilidade, os quais podem armazenar informações importantes relativos a intensidade e duração dos eventos. De fato, as regiões niños apresentam em comum mais de 55 % da variabilidade explicada por frequência de 2-7-a. Contudo, a região niño 1+2 registrou maiores efeitos de frequências intra-anuais ( $R^2 \approx 12\%$ ), a frequência 2-7-a possui maiores valores nas regiões centrais (N3 e N34,  $R^2 > 62\%$ ), a região N4 possui menor componente de alta frequência (intra-anual e de 1-2-a) e maior componente de 7-20-a. Comparativamente aos modos de Wang e Ren (2020), verificou-se que subharmônicos de 3-5-a (BF) apresentaram picos individuais  $> 10\%$  nas regiões N3, N34 e N12 (Pacífico leste), enquanto que picos individuais para subharmônicos de 2-3-a (QB)  $> 5\%$  (principalmente  $k = 2,4$ -a e  $2,5$ -a) foram identificados apenas nas regiões N34 e N4 (Pacífico oeste). Dessa forma, hipotetiza-se que essa variabilidade do espectro no Pacífico Tropical possa estar atrelada a intensidade dos eventos ENOS.

A frequência 2-7-a e as subfrequências QB e BF constituem importantes componentes da frequência ENOS (Wang e Ren, 2020), todavia, estudos apontam que o perfil espectral de índices climáticos possui variabilidade em escala temporal, sendo observado que para determinado período, determinadas frequências ou conjuntos de frequências ganham maior relevância na explicação da variabilidade dos sinais de natureza climática. Como resultante, no Pacífico Tropical, observa-se que o fato anterior é responsável por induzir mudanças na duração, frequência e amplitude dos eventos ENs e LNs, alterar a força de acoplamento oceano-atmosfera no Pacífico Tropical e grau de relação entre oscilações climáticas. Nesse contexto, Troup (1965) observou que a Oscilação Sul apresentou sinal mais consistente entre 1880-1920 do que o período seguinte, 1920-1950, notando inclusive que a correlação entre pressões de Darwin e Honolulu para esses dois períodos decresceu de -0,66 para -0,12 (Gu e Philander, 1995). Em relato similar, Torrence e Webster (1999) verificaram que a variabilidade da TSM-Niño 3 e índice SOI foram pronunciadas nos períodos de 1875-1920 e 1960-1990, sendo mais fraca entre 1935-1960. Os autores também identificaram que a amplitude do ciclo anual está negativamente correlacionada com a variabilidade interanual de 2-7-a, já que sinais anuais (interanuais) com maior (menor) proeminência foram observados entre 1935-1960. Em escala de subfrequências, An e Wang (2000) observaram mudanças do espectro dominante de QB para BF na segunda metade do século XX, com picos de frequências dominantes oscilando de 20-30-m, em 1962-1967, para 40-60-m, entre 1980-1990. Os autores notaram que tais mudanças refletem potencial relação com a mudança interdecadal ocorrida no Pacífico Norte.

Em termos de acoplamento oceano-atmosfera no Pacífico Tropical, os resultados de Huang et al. (2022) indicaram que variáveis atmosféricas se apresentaram com maior grau de acoplamento com a TSM durante eventos El Niños canônicos (PL), do que eventos Modoki (PC). Dessa forma, o aumento do número de eventos CP desde 1990 está associado com a redução da força de acoplamento oceano-atmosfera no Pacífico Tropical. Além disso, Ham et al. (2017) e Cai et al. (2019) ressaltam que o aumento de eventos EN-CP possui relação com o enfraquecimento da relação Pacífico (ENSO)-Índico (IOD). Estudos anteriores (Ren et al., 2013) já expressaram que determinadas padrões espaciais (PC ou PL) estão associados a modos de variabilidade. Sendo assim, conclui-se que a variabilidade temporal dos perfis de frequência ENOS exercem efeito sobre a força de acoplamento oceano-atmosfera, assim como sobre a relação entre bacias oceânicas.

Os resultados de AH para série de TSM (1870-2022) estabeleceram importantes relações com os achados de variação temporal das frequências do Pacífico Tropical

apresentadas em estudos de Troup (1965), Gu e Philander (1995), An e Wang (2000) e Kestin et al. (2015). A AH revelou que os períodos de 1870-1903 e 1960-93 registraram as maiores proporções de variabilidade interanual 2-7-a, 61,2% e 70,6%, respectivamente, sendo o período 1900-33 com menor valor (51,3%). Observou-se igualmente que as frequências intra-anuais alcançaram maiores proporções nos períodos de 1900-33 (13%) e 1930-63 (11%). Ao se considerar modos de variabilidade, detectou-se que do total de variabilidade explicada pelo espectro de 2-7-a (entre 51,3 e 70,5%), o modo de 3-5-a (BF) registrou maiores contribuições no final do século XIX e segunda metade do século XX, ao passo que a frequência de 2-3-a (QB) atingiu maiores valores entre 1900-1933. Para períodos 1870-1903, 1960-93 e 1989-2022, picos individuais ( $R^2$ ) superiores a 10% foram obtidos para harmônicos de 3-5-a: sendo 13,6% ( $k = 2,8$ -a) e 19,8% ( $k = 3,8$ -a) para 1870-1903; 11,6% ( $k = 3,4$ -a) para 1960-1993 e 11,8% ( $k = 3,1$ -a) para 1989-2022. Nos períodos intermediários, os picos individuais não ultrapassaram 10%. Logo, hipotetiza-se que a amplitude/ $R^2$  de tais subfrequências (harmônicos) possuem relação com a intensidade dos eventos ENOS. As maiores proporções de frequências interanuais (2-7-a) e subfrequência de 3-5-a aparentam estar associados a ocorrência de eventos do Pacífico Tropical mais intensos. Os eventos El Niños (1877-78, 1982-83, 1997-98 e 2015-2016, Huang et al., 2020) e La Niñas (1889-90, 1973-74 e 1988-89, Voskresenskaya e Marchukova, 2015) mais fortes exemplificam o fato anterior, pois sucederam exatamente nos períodos de domínio interanual e do modo 3-5-a. Logo, esses dois elementos podem constituir importante relação.

A similaridade de frequências constatada entre ENOS e outras índices climáticos são indícios de potenciais interações existentes entre oscilações climáticas. Essa relação levantada não constitui novo item de discussão no campo científico. Conforme observado por Alexander et al. (2002), ainda que a relação oceano-atmosfera característica do ENOS ocorra no Pacífico Tropical, as alterações verificadas na convecção equatorial determinam efeitos sobre a circulação atmosférica global. Consequentemente, as mudanças do Pacífico Tropical não ficam limitadas aos trópicos, mas utilizam a atmosfera como uma ponte na expansão dos efeitos sobre o Pacífico Norte e Sul e oceanos Atlântico e Índico. Alexander et al. (2002) destaca que a ponte atmosférica destacada é responsável por produzir interconexões através de mudanças na circulação de Hadley, Walker, ondas de Rossby, fluxos quase-estacionários e *storm tracks*.

Kim e Yu (2022) fornecem exemplos da relação anterior, ao expor que embora a evolução temporal dos eventos ENOS estejam fundadas no Pacífico Tropical, ela está relacionada com feedbacks climáticos dos oceanos vizinhos, Índico e Atlântico, através de

interações inter-bacias oceânicas. Sendo assim, Kim e Yu (2022) expressam que anomalias de TSM do Índico e Atlântico influenciadas por eventos ENs possuem a potencialidade de acelerar a dissipação (feedback negativo) do evento El Niño, contribuindo para encurtar o evento e ocorrência da transição. Por outro lado, interações entre regiões tropical e extratropical da bacia do Pacífico (relação intra-bacia) podem ter o efeito oposto sobre duração dos eventos ENOS. Durante evento EN, por exemplo, anomalias positivas de TSM podem ser induzidas no nordeste do Pacífico Norte, dada a conexão com os extratropicais. Esse aquecimento subtropical, por sua vez, pode ser espelhado para o Pacífico equatorial através feedback *Wind-Evaporation-SST* (WES, Karnauskas, 2022) e/ou mecanismo de *Trade-Wind Charging* (TWC, Anderson e Perez, 2015), a qual por sua vez produzirá feedback positivo, induzindo a um novo El Niño (Kim e Yu, 2022).

A ideia principal consiste que embora o ENOS constitui o primeiro fenômeno climática concebido como resultante da interação oceano-atmosfera (Cai et al., 2019; Wang et al., 2019) e apesar de haver várias lacunas à respeito dos mecanismo de interação entre bacias oceânicas (Cai et al., 2019), a literatura corrente fornece evidências de que não somente o ENOS impacta variáveis meteorológicas/oceanográficas de outras bacias oceânicas, mas igualmente é impactada por feedbacks positivos ou negativos, derivados da interação com outras oscilações. As interações entre as oscilações climáticas ENOS-PDO (Newman et al., 2003; Verdon e Francks, 2006), ENOS-AMO (Timmermann et al., 2007; Levine et al., 2017; Geng et al., 2020), ENOS-IOD (Kug e Kang, 2006; Jo et al., 2022), ENOS-QBO (Serva et al., 2020) testemunham esse apontamento, permitindo inferir que características de assimetria de amplitude, duração e frequência ENOS são parcialmente explicadas por interações pantropicais (Cai et al., 2019; Wang et al., 2019).

A AH revelou potenciais relações entre as oscilações climáticas e interações pantropicais. Em termos de variabilidade interanual, os índices climáticos atrelados a oscilação ENOS e ao oceano Pacífico (ONI, Niños, MEI, QBO, SOI e PDO) revelaram serem mais impactados por frequências de 2-7-a ( $R^2$  entre 38 à 76%). Secundariamente, os índices tropicais dos oceanos Índico (DMI) e Atlântico (AMM, TNA e TSA) ( $R^2$  entre 22,2% à 32,5%) se destacaram de forma intermediária pela proporção de  $R^2$  explicado. Dos índices que incorporam latitudes médias a altas, o índice PDO fora o único com destaque particular da frequência de 2 a 7 anos ( $R^2 = 29,7\%$ ). Os índices do Atlântico (NAO, PNA e AMO) e aqueles que incluem áreas polares (AO e AAO) apontaram menores influências de oscilações de frequências interanuais ( $R^2$  entre 9 e 20%). Ao se considerar subharmônicos de 2-7-a, somente as oscilações

AMO, PDO e DMI registraram picos em harmônicos individuais  $> 5\%$ , sendo eles 3,6-a (5,5%), 4,3-a (6,1%)/ 5,4-a (5,4%) e 3,1-a (6,1%), respectivamente. Importante observar que os resultados atingidos não visaram apontar índices que estatisticamente não possuem correlação espectral com a oscilação ENOS. Para tal finalidade, ter-se-ia de utilizar outras técnicas tais como *coherence squared and phase* (Ramusson e Carpenter, 1982; Shumway e Stoffer, 2016), *wavelet coherence – WTC e cross-wavelet transform – CWT* (Gristed et al., 2004, Fu et al., 2012) ou *partial wavelets coherence – PWC* (Cai e Sakemoto, 2022)) que escapam ao escopo dessa pesquisa. Não obstante, os resultados apontaram que a frequência interanual possui papel importante na variabilidade de oscilações de outras bacias oceânicas e tais apontamentos podem constituir evidências de interações pantropicais. Caberá a futuros estudos, no entanto, a confirmação estatística dessas relações.

Em termos de tipos de vegetação impactado pelo ENOS, os resultados referentes a análises harmônicas, análises de correlação espacial e análise de composições permitiram identificar áreas com forte influência do sinal interanual (frequência 2-7-a) e áreas com alta correlação linear entre as variáveis consideradas e o índice ONI (ENOS). No quadro geral, os resultados apontaram que o tipo de vegetação afetado pelas teleconexões ENOS depende principalmente do tipo de variável considerada. Abaixo, é apresentada as conclusões.

Com relação a precipitação, os resultados de análise harmônica (AH2) e correlação linear (ONI-PR) apresentaram ampla correspondência (correlação espacial = 0,64) com relação ao tipo de vegetação mais impactado pelo ENOS. Ambos os resultados (Figuras 1 e 6) demonstraram dois núcleos principais de maior impacto: um situado na faixa meridional Equador-estado do Pará (Brasil) e outro situado no sudeste da América do Sul (Região do Sul do Brasil, Uruguai e Nordeste da Argentina). No geral, as ecorregiões de I) florestas úmidas de Tapajós-Xingu, Madeira-Tapajós e Uatumã-Trombetas e II) Savana uruguaiana, Espinhal argentino, Chaco úmido e Savana mesopotâmica do cone sul representam os núcleos de altos valores de correlação negativa ( $r < -0,7$ ) e positiva ( $r \geq 0,6$ ), respectivamente. As ecorregiões citadas se referem respectivamente às I) Florestas Tropicais e Subtropicais Úmidas (FTSU) e II) Savanas e Campos Tropicais e Subtropicais (SCTS) e Temperados (SCT’’) e compõem-se sobretudo de formações arbóreas (núcleo norte) e savânica-herbácea (núcleo sul).

Para a Temperatura, maior semelhança espacial (correlação espacial = 0,80) fora observada entre análise harmônica (AH2) e correlação linear (ONI-TAR). Todavia, para ambos os produtos, a componente latitudinal se mostrou com forte impacto sobre a AH2 (correlação espacial = -0,71) e correlação linear (correlação espacial = -0,73). Para precipitação, a

correlação espacial com o absoluto da latitude foi mais baixa ( $r = -0,48$ , AH2;  $r = -0,33$ , correlação temporal). Os resultados de correlação linear apontaram núcleos de forte correlação positiva ( $r > +0,75$ ) no Norte da América do Sul (entre estados Amazonas e Pará) e Noroeste da América do Sul (seção Equador a Colômbia) e negativa ( $r \approx -0,33$ ), no sudoeste da América do Sul. Para os três núcleos principais, a AH (Figura 1d-e) apontou os núcleos de correlação positiva com maiores impactos de oscilação interanuais ( $R^2 > 37\%$ ). O núcleo de correlação negativa apresentou baixo  $R^2$  ( $<2,3\%$ , AH1;  $<14,4\%$ , AH2). As principais ecorregiões de maior correlação linear ONI-TAR são três núcleos: I) florestas úmidas a vegetações herbáceas (em áreas elevadas) situadas nos arredores das cordilheiras Ocidental, Oriental e Central, entre Equador e Colômbia, II) florestas úmidas de Tocantins-Pindaré (Pará e Maranhão, Brasil) e Uatumã-Trombetas (Pará e Amazonas, Brasil) e III) savana uruguaiana, Pampas úmido e Espinhal argentino. Observou-se que para as correlações positivas (núcleo norte), formações florestais foram as mais impactadas, ao passo que no setor sul, vegetações savânicas a herbáceas foram àquelas com maior correlação negativa, embora menos intensa que as correlações positivas.

Para o NDVI, a análise harmônica (AH2) apresentou baixa correlação espacial ( $r < 0,09$ ) com a análise de correlação linear (ONI-NDVI). Para correlação linear ONI-NDVI, as ecorregiões com maior sensibilidade ao ONI constituem núcleos esparsados, cobrindo áreas semiáridas a seções de florestas úmidas: I) Florestas úmidas do Xingu-Tocantins e do Oeste do Equador, II) Matorral Chileno, Florestas Secas de Chiquitano e Caatinga a III) Llanos (Venezuela e Colômbia) e Savana uruguaiana. Para essa correlação, contudo, vegetações semiáridas a úmidas da faixa tropical da América do Sul se apresentam com maiores alterações do NDVI. Os padrões espaciais das correlações lineares PR-NDVI e TAR-NDVI apresentaram valores mais elevados,  $r = 0,56$  e  $r = 0,26$ , respectivamente. Esse resultado demonstrou que áreas que apresentam maior proporção de variabilidade explicada pela frequência de 2-7-a igualmente possui relacionamento linear positivo ou negativo entre NDVI e as variáveis precipitação e temperatura do ar. Os resultados de correlação linear apontaram que biomas compostos por vegetações de menor estrutura (altura e espaçamento horizontal), adaptados a seca e algumas seções de florestas úmidas possuem maior correlação linear entre Precipitação e NDVI, sendo representadas por núcleos espalhados, embora situados na diagonal seca SO-NE, de I) Caatinga, Deserto do Atacama (Chile) e Sechura (Chile), Low Monte (Argentina), Florestas secas de Tumbes-Piura (Equador) e II) Várzea de Iquitos e Florestas temperadas de Valdivianas (sul do Chile). Para Temperatura do Ar e NDVI, a diagonal seca SO-NE e alguns

trechos de florestas úmidas também se destacaram com altos valores de correlação ( $|r| > 0,5$ ), sendo observados núcleos em I) ecorregiões de High Monte, Caatinga, Cerrado, Matorral Chileno, Chaco Seco e II) Florestas úmidas do oeste do Equador e da Guiana.

Os resultados de precipitação e temperatura referentes as análises harmônicas apontaram ampla similaridade com os trabalhos de Ropelewski e Halpert (1987, Figuras 15, 21), Grimm e Ambrizzi (2009, Figura 7.4) e Cai et al. (2020, Figura 2c-d), referente a relação ENOS-Precipitação, e Cai et al. (2020, Figura 2a-d) e Halpert e Ropelewski (1992), para a relação ENOS-Precipitação. É possível observar que os dois núcleos da América do Sul (dentre os 17 núcleos globais) com maior relação entre ENOS e Precipitação apontados por Ropelewski e Halpert (1987) com sinal sobre precipitação mais consistente, sendo eles o nordeste e sudeste da América do Sul, foram apontado pelas análises harmônicas por registrar entre 4,8-13,6% (considerando ciclo anual) e 16,4-22,9% (sem efeito do ciclo anual) da variabilidade explicada por frequências de 2-7-a. As correlações entre precipitação e NDVI apontaram igualmente esses setores. Na evolução típica de eventos El Niños apresentadas por Cai et al. (2020), os dois setores acima são apontados como áreas na qual anomalias significativas de precipitação são observadas. Em estudo de Grimm e Ambrizzi (2009), os setores sudestes e norte-nordeste da América do Sul refletem áreas na qual o principal modo de variabilidade da Precipitação da América do Sul possui sensível relação com o ENOS. Os dois setores citados (Figuras 3b,e) constituem áreas na qual a atividade convectiva é sensível aos eventos ENOS, devido sobre alterações nas circulações de Walker e Hadley (Setor norte) e alterações na propagação das ondas de Rossby e, por sua vez, na intensidade/ enfraquecimento dos jatos subtropicais (Kousky et al. 1984; Grimm e Ambrizzi, 2009).

Ao se considerar apenas a **precipitação**, os setores norte-nordeste e sudeste apresentam similaridade por, apesar de terem diferenças nos volumes pluviométricos (Figura 1), ambos estão associados a estação seca inexistente ou curta (tipos climáticos Af e Am de Köppen-Geiger, KOTTEK et al., 2006) ou precipitação bem distribuída (tipo climático Cfa, KOTTEK et al., 2006). Dessa forma, as formações florestais (ao norte) e savânicas-herbáceas temperadas (ao sul) originalmente adaptadas a ambientes sem restrição hídrica seriam impactadas por eventos ENOS que desencadeassem cenários de secas através das teleconexões. Para se ter nota, Wigneron et al. (2020) pontuaram que o evento El Niño de 2015-2016 produziu em regiões tropicais cenários de seca e extremas temperaturas, contribuindo para que fosse observado quedas expressivas na produtividade primária e conseqüentemente no armazenamento de carbono por parte da vegetação. O fato descrito resulta principalmente de as florestas tropicais

constituírem grandes fontes de biomassa vegetal e produtividade primária, devido estarem situadas em ambientes com disponibilidade de radiação solar, temperaturas elevadas e precipitação abundante (ARCHIBOLD, 1995).

Em termos de **temperatura**, áreas do norte e costa oeste da América do Sul com anomalias de temperatura principalmente associadas aos eventos ENOS (Cai et al., 2020) e setores com relação temperatura-ENSO consistente (Halpert e Ropelewski, 1992) foram apontadas na análise harmônica por registrarem entre 14-43% (com efeito do ciclo anual) a 31-59% (sem efeito do ciclo anual) da variância explicada por frequências de 2-7-a (Figuras 3c,f). Estes mesmos setores foram apontados com elevadas correlações lineares entre ONI e temperatura do ar ( $r > 0,6$ ), indicando que tipos florestais (megatérmicos) da faixa tropical associados a temperaturas elevadas ( $> 20^{\circ}\text{C}$ , tipo climático A de Köppen-Geiger, KOTTEK et al., 2006) apresentam variabilidade da temperatura associados com eventos ENOS. Diante disso, os extremos de temperatura associados ao evento El Niño de 2015-2016 (WIGNERON et al., 2020) são de importante destaque, tendo em vista que apesar das vegetações megatérmicas residirem em ambiente de altas temperaturas e tal característica induzir a atividade fotossintetizante líquida máxima, em temperaturas demasiadamente elevadas, a fotossíntese apresenta queda devido gastos com a respiração (BERGAMASCHI e BERGONCI, 2017).

Para **NDVI**, as análises harmônicas apontaram que setores a nordeste e sul-sudeste da América do Sul e costa norte do Chile apresentam entre 8-30% (com efeito do ciclo anual) a 31-59% (Sem efeito do ciclo anual) da variância explicada pela frequência de 2-7-a. Em tais áreas, as correlações NDVI-precipitação e NDVI-temperatura do ar mostraram igualmente correlações elevadas ( $|r| > 0,4$ ). Tais resultados apresentam consistência com estudos anteriores de Myneni et al. (1996), Kogan (2000, 2017) e Zhao et al. (2018). Myneni et al. (1996) apontaram que áreas do nordeste e sudeste da América do Sul apresentaram anomalias de NDVI relacionadas com os eventos El Niños e La Niñas entre 1982 e 1990, com destaque particular para área a nordeste que se apresentara consistentemente mais seca (úmida) durante os eventos El Niños (La Niñas) de 1982-83/ 1987-88 (1985-86/ 1988-89). No geral, os autores observaram que as anomalias de NDVI atreladas ao ENO ocorreram principalmente em áreas áridas a semiáridas. Os setores sudeste e nordeste foram destacados com correlação significativa entre TSM e Índice de Temperatura e Vegetação (VT) conduzido por Kogan (2000), apontando correlações positivas e negativas, respectivamente. Os resultados de correlações entre precipitação-NDVI e temperatura do ar-NDVI, em síntese, sugerem que os efeitos do ENOS

sobre a vegetação de áreas no I) sul-sudeste e II) norte-nordeste da América do Sul estão relacionados a variabilidade da precipitação e temperatura nos setores I/II e II, respectivamente. Os resultados alcançados, contudo, convergem para a ideia de que os tipos de vegetação impactados pelo ENOS dependem dos perfis de precipitação, temperatura do ar e radiação solar que os vários tipos de vegetação e ecossistemas da América do Sul estão adaptados. Sendo assim, vegetações florestais tropicais são afetadas através de secas e temperaturas extremamente elevadas, enquanto vegetações semiáridas a áridas do corredor sudoeste-nordeste da América do Sul são impactadas por situações de secas e por temperaturas elevadas, neste caso, na faixa tropical. O NDVI, por sua vez, como variável proxy para conteúdo de biomassa e conteúdo de clorofila apontaria variações perceptíveis em cenários de seca (GITELSON e KAUFMAN, 1998) e temperatura elevada (ZHAO et al., 2018), não sendo indicador adequado, todavia, para diferenciar respostas da vegetação a precipitação abundante (alto conteúdo de clorofila), já que nesse caso ocorreria saturação do índice (GITELSON e KAUFMAN, 1998).

## **Conclusões**

Este estudo desenvolvido explorou as similaridades e diferenças entre vários índices climáticos e a oscilação ENOS, assim como as mudanças espectrais a qual a TSM da região niño 3.4 perpassou desde 1870, considerando como parâmetro cinco períodos de análise. Além disso, investigou através de técnicas de análises harmônicas, correlações lineares e análise de composições as principais áreas da América do Sul na qual a precipitação, temperatura do ar e NDVI apresentam maiores proporções de variabilidade explicada por frequência ENOS (2-7-a), assim como apontou os setores na qual o índice ONI possui maior relacionamento linear com as variáveis consideradas.

Na etapa inicial, a pesquisa possui singularidade por incluir de forma integrada a análise de índices climáticos que cobrem todas as bacias oceânicas, em variadas faixas latitudinais. A partir das classes de frequência estabelecidas, a análise harmônica revelou que os índices niños (sobretudo N34 e N3), MEI e QBO foram os únicos índices com proporção de variabilidade interanual (2-7-a) compondo mais de 50% da variabilidade total. Além disso, os resultados apontaram diferenças de composição espectral entre as regiões niños (N12, N3, N34 e N4) e a SOI, além de indicarem que as regiões niños de borda (N4 e N12) possuem diferenças em relação às niños 3 e 3.4 quanto a composição de variabilidade intra-anual e de baixa frequência. O estudo fora capaz de indicar que a QBO, IOD (DMI), SOI e PDO foram os únicos que

apresentaram componente interanual entre 30 e 40%. No oceano Atlântico (AMM, TNA, TSA, NAO e PNA), a variabilidade interanual se apresentou mais fraca ( $R^2$  entre 9 e 20%), tornando evidente diferenças de composição quando comparado com o Pacífico e Índico. Quatro índices (NAO, PNA, AO e AAO) apresentaram distintamente alta componente intra-anual ( $> 70\%$ ).

No campo temporal, os achados apontaram que a TSM da região niño 3.4 perpassa por períodos de alta e baixa variabilidade para cada grupo de frequências, sendo hipotetizado que períodos de alta/baixa variabilidade de 2-7-a possam estar atrelados com a intensidade dos eventos ENOS. Os fortes eventos El Niños (1877-78, 1982-83 e 1997-98) e La Niñas (1889-90, 1973-74 e 1988-89) sucederam em períodos de alta variabilidade de 2-7-a e do modo de 3-5-a (1870-1903 e 1960-2022). Os resultados da análise harmônica alcançados podem ser úteis para compreender parcela das características de assimetria e irregularidade dos eventos ENOS, tendo em vista que algumas destas características (assimetria de amplitude, duração) estão associados a interrelação entre bacias oceânicas (Pacífico-Índico e Pacífico-Atlântico) e a padrões espaciais de eventos ENOS (Pacífico Central e Pacífico Leste).

Comparativamente a estudos anteriores, a pesquisa realizada contribuiu para apontamento incisivo da proporção de variância explicada pelo El Niño-Oscilação Sul. Amparado em tais resultados, fora possível identificar os principais biomas e uso e cobertura impactados pelos eventos ENOS. Os principais setores caracterizados por altos valores de  $R^2$  e correlação linear confirmaram resultados obtidos em estudos anteriores. Para as três variáveis consideradas, a análise de correlação linear adicionalmente apontou o grau de defasagem em geral observado para as anomalias de precipitação, temperatura do ar e NDVI, pontuando diferentes períodos na qual dada variável/ localidade é impactada após eventos no Pacífico.

Em especial, a pesquisa apontou que na América do Sul, há áreas na qual a frequência de 2-7 anos explica entre 14-30%, 8-13% e 22-43% da variabilidade temporal do NDVI, precipitação e temperatura do ar, respectivamente. Os resultados de correlação linear ONI-precipitação-ONI e ONI-temperatura do ar apontaram padrões espaciais similares com aqueles obtidos com a análise harmônica, revelando existência de características lineares significantes em certas áreas da América do Sul e os eventos ENOS. Em termos de tipos de vegetação impactado, os resultados indicaram que o tipo de bioma afetado por anomalias de temperatura do Pacífico Tropical depende principalmente da variável considerada, faixa latitudinal e tipo de formação vegetal (arbóreo, arbustivo ou herbáceo), tendo em vista que para diferentes combinações pode ter limiares térmicos e hídricos diferentes. Logo, altas temperaturas ou cenários de secas podem impactar diferentemente áreas florestais, savânicas ou de vegetação

herbácea. As correlações ONI-precipitação-ONI e ONI-temperatura do ar revelaram tais características. Para precipitação, I) vegetações semiáridas a áridas (nordeste e sul-sudeste da América do sul), com características de savanas temperadas, florestas decíduais e formações herbáceas e II) florestais (faixa tropical) registraram ampla sensibilidade da precipitação a efeitos do ENOS. A temperatura expressou efeitos principalmente sobre vegetações tropicais, com efeitos reduzidos em direção a latitudes extratropicais.

O NDVI demonstrou ser impactado sobretudo em setores tropicais, abrangendo desde áreas semiáridas a florestas úmidas. Os resultados sugerem que tal padrão espacial seja explicado parcialmente pelas relações entre NDVI-precipitação e NDVI-temperatura do ar. Ao se considerar particularmente essas duas correlações, NDVI-PR e NDVI-TAR, as correlações apontaram padrões espaciais similares às análises harmônicas, assinalando os efeitos ENOS sobre a precipitação sobretudo em vegetações de áreas semiáridas à áridas. A temperatura apontou respostas similares. Em síntese, os resultados mostraram que as variáveis temperatura e precipitação precisam ser consideradas conjuntamente ao se colocar em pauta como a vegetação é afetada por oscilações climáticas. Tais variáveis através de estresses hídricos e térmicos (secas e altas temperaturas) impactam a vegetação ao interferir diretamente na fotossíntese e conteúdo de carbono armazenado.

### Referências Bibliográficas

- ACEITUNO, P. El Niño, the Southern Oscillation, and ENSO: Confusing names for a complex ocean–atmosphere interaction. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 73, n. 4, p. 483-485, 1992.
- ALEXANDER, M. A. et al. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air–sea interaction over the global oceans. **Journal of climate**, v. 15, n. 16, p. 2205-2231, 2002.
- AN, Soon-II; WANG, Bin. Interdecadal change of the structure of the ENSO mode and its impact on the ENSO frequency. **Journal of Climate**, v. 13, n. 12, p. 2044-2055, 2000.
- ANDERSON, B. T.; PEREZ, R. C. ENSO and non-ENSO induced charging and discharging of the equatorial Pacific. **Climate Dynamics**, v. 45, p. 2309-2327, 2015.
- ARCHIBOLD, O. W. **Ecology of world vegetation**. Springer Science & Business Media, 1995.
- AHRENS, C. D.; HENSON, R. **Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment**. 12. ed. Boston (MA): Cengage Learning, 2018.
- AMBRIZZI, T.; HOSKINS, B. J.; HSU, Huang-Hsiung. Rossby wave propagation and teleconnection patterns in the austral winter. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, n. 21, p. 3661-3672, 1995.

- ANDERSON, W.; SEAGER, R.; BAETHGEN, W.; CANE, M. Trans-Pacific ENSO teleconnections pose a correlated risk to agriculture. *Agricultural and forest meteorology*, v. 262, p. 298-309, 2018.
- BARNETT, T. P. The interaction of multiple time scales in the tropical climate system. **Journal of Climate**, v. 4, n. 3, p. 269-285, 1991
- BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, Tempo e Clima**. 8.ed. Routledge, 2009.
- BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. As plantas e o clima: princípios e aplicações. **Guaíba: Agrolivros**, 2017.
- BERLAGE, H. P. The Southern Oscillation and world weather. **Verhandelingen**, v. 88, p. 152, 1966.
- BJERKNES, J. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. **Tellus**, v. 18, n. 4, p. 820-829, 1966.
- BJERKNES, J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. **Monthly weather review**, v. 97, n. 3, p. 163-172, 1969.
- BJERKNES, J. Large-scale atmospheric response to the 1964–65 Pacific Equatorial warming. **Journal of Physical Oceanography**, v. 2, n. 3, p. 212-217, 1972.
- BROWN, M. E.; DE BEURS, K.; VRIELING, A. The response of African land surface phenology to large scale climate oscillations. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 10, p. 2286-2296, 2010.
- CAI, W. et al. Climate impacts of the El Niño–southern oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 4, p. 215-231, 2020.
- CAI, X.; SAKEMOTO, R. El Niño and commodity prices: New findings from partial wavelet coherence analysis. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, p. 893879, 2022.
- CAI, W.; WU, L.; LENGAI, M.; Li, T.; McGregor, S.; Kug, J. S.; ... & Chang, P. Pantropical climate interactions. **Science**, v. 363, n. 6430, p. eaav4236, 2019.
- CANE, M. A. Oceanographic events during El Niño. **Science**, v. 222, n. 4629, p. 1189-1195, 1983.
- CANE, M. A.; ESHEL, G.; BUCKLAND, R. W. Forecasting Zimbabwean maize yield using eastern equatorial Pacific Sea surface temperature. **Nature**, v. 370, n. 6486, p. 204-205, 1994.
- CAPOTONDI, A., WITTENBERG, A. T., KUG, J. S., TAKAHASHI, K., & MCPHADEN, M. J. ENSO diversity. **El Niño Southern Oscillation in a changing climate**, p. 65-86, 2020.
- CARLOS, A. F. A. **A Cidade**. 8. ed. Editora contexto: São Paulo, 1992.
- CHEN, Mingcheng; LI, Tim. ENSO evolution asymmetry: EP versus CP El Niño. **Climate Dynamics**, v. 56, n. 11-12, p. 3569-3579, 2021.
- CIRINO, P. H.; FÉRES, J. G.; BRAGA, M. J.; REIS, E. Assessing the impacts of ENSO-related weather effects on the Brazilian agriculture. **Procedia Economics and Finance**, v. 24, p. 146-155, 2015.
- Climate Hazards Center/ University of California - Santa Barbara (UCSB) CHC/UCSB. Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations. 2020. Disponível em: <[https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global\\_monthly/netcdf/](https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_monthly/netcdf/)>.
- COVEY, D. L.; HASTENRATH, S. The Pacific El Niño phenomenon and the Atlantic Circulation. **Monthly Weather Review**, v. 106, n. 9, p. 1280-1287, 1978.

- DAI, A.; FUNG, I. Y.; DEL GENIO, A. D. Surface observed global land precipitation variations during 1900–88. **Journal of climate**, v. 10, n. 11, p. 2943-2962, 1997.
- DAI, A.; WIGLEY, T. M. L. Global patterns of ENSO-induced precipitation. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 9, p. 1283-1286, 2000.
- DESER, C.; WALLACE, J. M. El Niño Events and Their Relation to the Southern Oscillation: 1925-1986. **Journal of Geophysics Research**, v. 92, no. c13, p.14189-14196, 1987.
- DESER, C. et al. Sea surface temperature variability: Patterns and mechanisms. **Annual review of marine science**, v. 2, p. 115-143, 2010.
- DIDAN, K.; MUNOZ; A. B.; SOLANO, R.; Huete, A. MODIS vegetation index user's guide (MOD13 series). **University of Arizona: Vegetation Index and Phenology Lab**, 2015.
- DINERSTEIN, E. et al. An ecoregion-based approach to protecting half the terrestrial realm. **BioScience**, v. 67, n. 6, p. 534-545, 2017.
- DOBERITZ, R. Cross-spectrum analysis of rainfall and sea temperature at the equatorial Pacific Ocean. **Bonn. Met. Abh.**, v. 8, p. 1-61, 1968.
- FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Countries by Commodity. **Major Import Partners**. 2017a. Disponível em: <[http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/major\\_partners\\_imports](http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/major_partners_imports)>. Acesso em fevereiro de 2020.
- FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Countries by Commodity. **Major Commodities Exporters**. 2017b. Disponível em: <[http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/major\\_commodities\\_exports](http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/major_commodities_exports)>. Acesso em fevereiro de 2020.
- FANG, Xianghui; XIE, Ruihuang. A brief review of ENSO theories and prediction. **Science China Earth Sciences**, v. 63, p. 476-491, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9539-0>.
- FIGUEIRÓ, A. **Biogeografia: dinâmicas e transformações da natureza**. Oficina de Textos, 2015.
- FU, C.; JAMES, A. L.; WACHOWIAK, M. P. Analyzing the combined influence of solar activity and El Niño on streamflow across southern Canada. **Water Resources Research**, v. 48, n. 5, 2012.
- FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; ... & MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific data**, v. 2, n. 1, p. 1-21, 2015.
- FUNK, C. BUDDE, M. E. Phenologically-tuned MODIS NDVI-based production anomaly estimates for Zimbabwe. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 1, p. 115-125, 2009.
- GENG, X., ZHANG, W., JIN, F. F., STUECKER, M. F., LEVINE, A. F. Modulation of the relationship between ENSO and its combination mode by the Atlantic multidecadal oscillation. **Journal of Climate**, v. 33, n. 11, p. 4679-4695, 2020.
- GRINSTED, A.; MOORE, J. C.; JEVREJEVA, S.. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. **Nonlinear processes in geophysics**, v. 11, n. 5/6, p. 561-566, 2004.

GLANTZ, M. H. Introduction. *In*: GLANTZ, M. H.; KATZ, R. W.; NICHOLLS, N. **Teleconnections linking worldwide climate anomalies: scientific basis and societal impact**. Cambridge University Press, 1991. p. 1-11.

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

GU, D.; PHILANDER, S. G. H. Secular changes of annual and interannual variability in the tropics during the past century. **Journal of Climate**, v. 8, n. 4, p. 864-876, 1995.

GILL, A. E.; RASMUSSEN, E. M. The 1982–83 climate anomaly in the equatorial Pacific. **Nature**, v. 306, n. 5940, p. 229-234, 1983.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J. MODIS NDVI optimization to fit the AVHRR data series—Spectral considerations. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, n. 3, p. 343-350, 1998.

GISLOUNGE database. Terrestrial Ecoregions GIS data. Formato: shapefile. Ano de aquisição: 2020. Disponível em: < <https://www.gislounge.com/terrestrial-ecoregions-gis-data/>>.

GLANTZ, M. H. Introduction. *In*: GLANTZ, M. H.; KATZ, R. W.; NICHOLLS, N. **Teleconnections linking worldwide climate anomalies: scientific basis and societal impact**. Cambridge University Press, 1991. p. 1-11.

GRIMM, A. M.; AMBRIZZI, T. Teleconnections into South America from the tropics and extratropics on interannual and intraseasonal timescales. *In*: VIMEUX, F.; SYLVESTRE, F.; KHODRI, M. **Past climate variability in South America and surrounding regions: from the last glacial maximum to the holocene**, p. 159-191, 2009.

HALPERT, M. S.; ROPELEWSKI, C. F. Surface temperature patterns associated with the Southern Oscillation. **Journal of Climate**, v. 5, n. 6, p. 577-593, 1992.

HANSEN, J. W.; HODGES, A. W.; JONES, J. W. ENSO influences on agriculture in the southeastern United States. **Journal of Climate**, v. 11, n. 3, p. 404-411, 1998.

HALPERT, M. S.; ROPELEWSKI, C. F. Surface temperature patterns associated with the Southern Oscillation. **Journal of Climate**, v. 5, n. 6, p. 577-593, 1992.

HAM, Yoo-Geun; CHOI, Jun-Young; KUG, Jong-Seong. The weakening of the ENSO–Indian Ocean Dipole (IOD) coupling strength in recent decades. **Climate Dynamics**, v. 49, p. 249-261, 2017.

HE, S., YU, J. Y., Yang, S., & Fang, S. W. Why does the CP El Niño less frequently evolve into La Niña than the EP El Niño?. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 15, p. e2020GL087876, 2020.

HUANG, B. et al. How significant was the 1877/78 El Niño?. **Journal of Climate**, v. 33, n. 11, p. 4853-4869, 2020.

HUANG, Y., YUAN, N., SHI, M., Lu, Z., & Fu, Z. On the Air-Sea Couplings Over Tropical Pacific: An Instantaneous Coupling Index Using Dynamical Systems Metrics. **Geophysical Research Letters**, v. 49, n. 2, p. e2021GL097049, 2022.

HOREL, J. D.; WALLACE, J. M. Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 109, n. 4, p. 813-829, 1981.

IIZUMI, T. et al. Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. **Nature communications**, v. 5, n. 1, p. 1-7, 2014.

- JO, H. S. et al. Southern Indian Ocean Dipole as a trigger for Central Pacific El Niño since the 2000s. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, p. 6965, 2022.
- KARNAUSKAS, K. B. A Simple Coupled Model of the Wind–Evaporation–SST Feedback with a Role for Stability. **Journal of Climate**, v. 35, n. 7, p. 2149-2160, 2022.
- KESSLER, William S. Is ENSO a cycle or a series of events?. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 23, p. 40-1-40-4, 2002.
- KESTIN, T. S. et al. Time–frequency variability of ENSO and stochastic simulations. **Journal of Climate**, v. 11, n. 9, p. 2258-2272, 1998.
- KIRONO, D.G. C; TAPPER, N. J. ENSO rainfall variability and impacts on crop production in Indonesia. **Physical Geography**, v. 20, n. 6, p. 508-519, 1999.
- 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.
- KOGAN, F.; GUO, W. Strong 2015–2016 El Niño and implication to global ecosystems from space data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 1, p. 161-178, 2017.
- KOTTEK, M., GRIESER, J., BECK, C., RUDOLF, B., RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**. 15 (3), 259–263. 2006. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.
- KOUSKY, V. E.; KAGANO, M. T.; CAVALCANTI, I. F. A. A review of the Southern Oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies. **Tellus A**, v. 36, n. 5, p. 490-504, 1984.
- KUG, J. S.; KANG, I. S. Interactive feedback between ENSO and the Indian Ocean. **Journal of climate**, v. 19, n. 9, p. 1784-1801, 2006.
- KIM, Ji-Won; YU, Jin-Yi. Single-and multi-year ENSO events controlled by pantropical climate interactions. **npj Climate and Atmospheric Science**, v. 5, n. 1, p. 88, 2022.
- JUSTICE, C. O. et al. The MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 244-262, 2002.
- LATIF, Mojib; BARNETT, Timothy P. Interactions of the tropical oceans. **Journal of Climate**, v. 8, n. 4, p. 952-964, 1995.
- LEVINE, A. F. Z; MCPHADEN, M. J.; FRIERSON, Dargan MW. The impact of the AMO on multidecadal ENSO variability. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 8, p. 3877-3886, 2017.
- LIU, W. T.H; MASSAMBANI, O.; NOBRE, C. A. Satellite recorded vegetation response to drought in Brazil. **International Journal of climatology**, v. 14, n. 3, p. 343-354, 1994.
- LOCKYER, J. N.; LOCKYER, W. J. S. On some phenomena which suggest a short period of solar and meteorological changes. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 70, n. 459-466, p. 500-504, 1902.
- MCPHADEN, M. J. El Niño and La Niña: Causes and global consequences. **Encyclopedia of Global Environmental Change**, v. 1, p. 1-17, 2002.
- MCPHADEN, M. J. et al. The Tropical Ocean-Global Atmosphere observing system: A decade of progress. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 103, n. C7, p. 14169-14240, 1998.
- MCPHADEN, M. J. ZEBIAK, S. E.; GLANTZ, M. H. ENSO as an integrating concept in earth science. **Science**, v. 314, n. 5806, p. 1740-1745, 2006.

- MYNENI, R. B.; LOS, S. O.; TUCKER, C. J. Satellite-based identification of linked vegetation index and sea surface temperature Anomaly areas from 1982–1990 for Africa, Australia, and South America. **Geophysical Research Letters**, v. 23, n. 7, p. 729-732, 1996.
- MISHRA, V.; Tiwari, A. D.; Aadhar, S.; Shah, R.; Xiao, M.; PAI, D. S.; LETTENMAIER, D. Drought and famine in India, 1870–2016. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 4, p. 2075-2083, 2019.
- MO, K. C.; WHITE, G. H. Teleconnections in the southern hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 113, n. 1, p. 22-37, 1985.
- MOCK, D. R. The Southern Oscillation: Historical Origins. **Unpublished term paper, Univ. of Washington, Seattle, WA**, 1981. Disponível em:<<https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/misc/hxsoi.html>>.
- NAMIAS, J. Some statistical and synoptic characteristics associated with El Niño. **Journal of Physical Oceanography**, v. 6, n. 2, p. 130-138, 1976.
- National Center for Atmospheric Research Staff (Eds) - The Climate Data Guide – NCAR/CDG. NDVI: Normalized Difference Vegetation Index-3rd generation: NASA/GFSC GIMMS. 2020. Disponível em:<<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/ndvi-normalized-difference-vegetation-index-3rd-generation-nasagfsc-gimms>>.
- National Oceanic and Atmospheric Administration/ Climate Prediction Center- NOAA/CPC. Série temporal *Oscillation Niño Index* – ONI, período 1982-2015. 2020. Disponível em:<[https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)>.
- National Oceanic and Atmospheric Administration/ Physical Science Laboratory - NOAA/PSL. Terrestrial Air Temperature: 1900-2017 Gridded Monthly Time Series data NOAA PSL, Boulder, Colorado, USA. 2020. Disponível em:<[https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.UDel\\_AirT\\_Precip.html](https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.UDel_AirT_Precip.html)>.
- NEWMAN, M.; COMPO, G. P.; ALEXANDER, M. A. ENSO-forced variability of the Pacific decadal oscillation. **Journal of Climate**, v. 16, n. 23, p. 3853-3857, 2003.
- NICHOLLS, N. Predicting Indian Monsoon Rainfall from sea-surface temperature in the Indonesia–north Australia area. **Nature**, v. 306, n. 5943, p. 576-577, 1983.
- NOAA - National Weather Service, Maps.com. **Major Ocean Currents**. Disponível em:<<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=24bfd85e97b042948e6ed4928dc45a8b>>. Acesso em fevereiro de 2020.
- NULL, JAN. **El Niño and La Niña Years and Intensities**. Based on Oceanic Niño Index (ONI). Disponível em:< <https://ggweather.com/enso/oni.htm>>. Acessos Em fevereiro de 2020.
- OKUMURA, Yuko M. ENSO diversity from an atmospheric perspective. **Current Climate Change Reports**, v. 5, p. 245-257, 2019.
- OLSON, D. M.; DINERSTEIN, E.; WIKRAMANAYAKE, E. D.; BURGESS, N. D.; POWELL, G. V., UNDERWOOD, E. C.; ... & KASSEM, K. R. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth: A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. **BioScience**, v. 51, n. 11, p. 933-938, 2001.
- PETERS, A. J.; JI, L.; WALTER-SHEA, E.. Southeastern US vegetation response to ENSO events (1989–1999). In: Issues in the Impacts of Climate Variability and Change on Agriculture. **Springer**, Dordrecht, 2003. p. 175-188.

- PHILANDER, S. G. H. El Niño Southern Oscillation phenomena. **Nature**, v. 302, n. 5906, p. 295, 1983.
- PHILANDER, S. G. H. El Niño and La Niña. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 42, n. 23, p. 2652-2662, 1985.
- PHILANDER, S. G. H. **El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation**. San Diego, Academic Press. 1990.
- PHILANDER, S. G. H. El Nino southern oscillation phenomena. **Nature**, v. 302, n. 5906, p. 295-301, 1983.
- PODESTÁ, G.P.; MESSINA, C. D.; GRONDONA, M. O.; MAGRIN, G. O. Associations between grain crop yields in central-eastern Argentina and El Niño–Southern Oscillation. **Journal of applied meteorology**, v. 38, n. 10, p. 1488-1498, 1999.
- POLONSKY, Alexander; TORBINSKY, Anton. The IOD–ENSO interaction: the role of the Indian Ocean current’s system. **Atmosphere**, v. 12, n. 12, p. 1662, 2021.
- POSIT TEAM (2022). RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software, PBC, Boston, MA. URL <http://www.posit.co/>.
- QUINN, W. H.; ZOPF, D. O.; SHORT, K. S.; YANG KUO, R. T. W. Historical trends and statistics of the Southern Oscillation, El Niño and Indonesian droughts. **Fish. Bull.**, v. 76, p. 663-678, 1978.
- RAMAGE, C. S. Preliminary discussion of the Meteorology of the 1972–73 El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 56, n. 2, p. 234-242, 1975.
- RASMUSSEN, E. M. Observational aspects of ENSO cycle teleconnections. *In*: GLANTZ, M. H.; KATZ, R. W.; NICHOLLS, N. **Teleconnections linking worldwide climate anomalies: scientific basis and societal impact**. Cambridge University Press, 1991. p. 309-343.
- RASMUSSEN, E. M.; CARPENTER, T. H. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. **Monthly Weather Review**, v. 110, n. 5, p. 354-384, 1982.
- RASMUSSEN, E. M; WALLACE, J. M. Meteorological Aspects of the El Nino/Southern Oscillation. **Science**, v. 222, n. 4629, p. 1195-1202, 1983.
- REED, B. C.; BROWN, J. F.; VANDERZEE, D.; LOVELAND, T. R.; MERCHANT, J. W.; OHLEN, D. O. Measuring phenological variability from satellite imagery. **Journal of vegetation science**, v. 5, n. 5, p. 703-714, 1994.
- REN, H. L., Jin, F. F., Stuecker, M. F., & Xie, R. ENSO regime change since the late 1970s as manifested by two types of ENSO. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, v. 91, n. 6, p. 835-842, 2013.
- ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. **Monthly weather review**, v. 115, n. 8, p. 1606-1626, 1987.
- ROSSI, A.; MASSEI, Nicolas; LAIGNEL, B. A synthesis of the time-scale variability of commonly used climate indices using continuous wavelet transform. **Global and Planetary Change**, v. 78, n. 1-2, p. 1-13, 2011.
- SARACHIK, Edward S.; CANE, Mark A. **The El Nino-southern oscillation phenomenon**. Cambridge University Press, 2010.

- SCHELL, I. I. On the Nature and Origin of the Southern Oscillation. **Journal of Meteorology**, v. 13, n. 6, p. 592-598, 1956.
- SEILER, R. A.; KOGAN, F. Monitoring ENSO cycles and their impacts on crops in Argentina from NOAA-AVHRR satellite data. **Advances in Space Research**, v. 30, n. 11, p. 2489-2493, 2002.
- SERVA, F. et al. The influence of ENSO events on the stratospheric QBO in a multi-model ensemble. **Climate Dynamics**, v. 54, p. 2561-2575, 2020.
- SHUMWAY, R. H.; STOFFER, D. S. **Time series analysis and its applications**. New York: springer, 2000.
- SINGH, D., Seager, R., Cook, B. I., Cane, M., Ting, M., Cook, E., & Davis, M. Climate and the Global Famine of 1876–78. **Journal of Climate**, v. 31, n. 23, p. 9445-9467, 2018.
- SULLIVAN, A.; LUO, J. J.; HIRST, A. C.; BI, D.; CAI, W.; HE, J. Robust contribution of decadal anomalies to the frequency of central-Pacific El Niño. **Scientific reports**, v. 6, n. 1, p. 38540, 2016.
- STUECKER, M. F. et al. A combination mode of the annual cycle and the El Niño/Southern Oscillation. **Nature Geoscience**, v. 6, n. 7, p. 540-544, 2013.
- SULLA-MENASHE, D.; FRIEDL, M. A. User guide to collection 6 MODIS land cover (MCD12Q1 and MCD12C1) product. **USGS**: Reston, VA, USA, p. 1-18, 2018.
- TALLEY, L. D.; PICKARD, G. L.; EMERY, W. J.; SWIFT, J. H. **Descriptive Physical Oceanography: an introduction**. 6. Ed. Academic Presse, 2011.
- TIMMERMANN, Axel et al. El Niño–southern oscillation complexity. **Nature**, v. 559, n. 7715, p. 535-545, 2018.
- TIMMERMANN, Axel et al. The influence of a weakening of the Atlantic meridional overturning circulation on ENSO. **Journal of climate**, v. 20, n. 19, p. 4899-4919, 2007.
- TORRENCE, Christopher; WEBSTER, Peter J. The annual cycle of persistence in the El Niño/Southern Oscillation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 124, n. 550, p. 1985-2004, 1998.
- TRENBERTH, K. E. The definition of El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 12, p. 2771-2778, 1997.
- TRENBERTH, K. E. Spatial and temporal variations of the Southern Oscillation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 102, n. 433, p. 639-653, 1976.
- TRENBERTH, K. E. Signal versus noise in the Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 112, n. 2, p. 326-332, 1984.
- TROPPEMAYER, H.. **Biogeografia e meio ambiente**. Divisa: Rio Claro, 2004.
- TROUP, A. J. The ‘Southern Oscillation’. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 91, n. 390, p. 490-506, 1965.
- TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. do. **Meteorologia descritiva**. São Paulo: Nobel, 1980.
- VERDON, Danielle C.; FRANKS, Stewart W. Long-term behaviour of ENSO: Interactions with the PDO over the past 400 years inferred from paleoclimate records. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 6, 2006.
- VOLPATO, G. **Método Lógicos para Redação Científica**. Botucatu, best writing, 2011.

- VOSKRESENSKAYA, E. N.; MARCHUKOVA, O. V. Qualitative classification of the La Niña events. **Physical Oceanography**, n. 3, p. 14-24, 2015.
- WALLACE, J. M.; GUTZLER, D. S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. **Monthly Weather Review**, v. 109, n. 4, p. 784-812, 1981.
- WANG, C. Three-ocean interactions and climate variability: a review and perspective. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 7-8, p. 5119-5136, 2019.
- WANG, C., DESER, C., Yu, J. Y., DiNezio, P., & Clement, A. El Niño and southern oscillation (ENSO): a review. **Coral reefs of the eastern tropical Pacific: Persistence and loss in a dynamic environment**, p. 85-106, 2017.
- WANG, R.; REN, H. Understanding key roles of two ENSO modes in spatiotemporal diversity of ENSO. **Journal of Climate**, v. 33, n. 15, p. 6453-6469, 2020.
- WANG, B.; WANG, Y. Temporal structure of the Southern Oscillation as revealed by waveform and wavelet analysis. **Journal of Climate**, v. 9, n. 7, p. 1586-1598, 1996.
- WEBSTER, P. J.; CHANG, Hai-Ru. Equatorial energy accumulation and emanation regions: Impacts of a zonally varying basic state. **Journal of the atmospheric sciences**, v. 45, n. 5, p. 803-829, 1988.
- WEBSTER, P. J.; HOLTON, J. R. Cross-equatorial response to middle-latitude forcing in a zonally varying basic state. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 39, n. 4, p. 722-733, 1982.
- WELLS, N. **The Atmosphere and the Ocean: a physical introduction**. 2. Ed. London: Taylor & Francis Ltd., 1997.
- WIGNERON, Jean-Pierre et al. Tropical forests did not recover from the strong 2015–2016 El Niño event. **Science advances**, v. 6, n. 6, p. eaay4603, 2020.
- WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Academic press, 2011.
- WHITE, M. A.; THORNTON, P. E.; RUNNING, S. W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. **Global biogeochemical cycles**, v. 11, n. 2, p. 217-234, 1997.
- World Bank. Indicators: **“Population, Total”**, 2017. Disponível em: <<https://data.worldbank.org/indicator?tab=all>>. Acesso em fevereiro de 2020.
- WU, Xian; OKUMURA, Yuko M.; DINEZIO, Pedro N. What controls the duration of El Niño and La Niña events?. **Journal of Climate**, v. 32, n. 18, p. 5941-5965, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0681.1>.
- YU, Jin-Yi; FANG, Shih-Wei. The distinct contributions of the seasonal footprinting and charged-discharged mechanisms to ENSO complexity. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 13, p. 6611-6618, 2018.
- ZEBIAK, Stephen E. et al. Investigating El Niño-Southern Oscillation and society relationships. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 6, n. 1, p. 17-34, 2015.
- ZHANG, X. et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote sensing of environment**, v. 84, n. 3, p. 471-475, 2003.
- ZHANG, X. et al. Global vegetation phenology from AVHRR and MODIS data. In: IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. **IEEE 2001 International**

**Geoscience and Remote Sensing Symposium** (Cat. No. 01CH37217). IEEE, 2001. p. 2262-2264.

ZHAO, L.; DAI, A.; DONG, B. Changes in global vegetation activity and its driving factors during 1982–2013. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 249, p. 198-209, 2018.

ZHANG, X. et al. Monitoring the response of vegetation phenology to precipitation in Africa by coupling MODIS and TRMM instruments. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 110, n. D12, 2005.

ZHANG, W. et al. The annual-cycle modulation of meridional asymmetry in ENSO's atmospheric response and its dependence on ENSO zonal structure. **Journal of Climate**, v. 28, n. 14, p. 5795-5812, 2015.