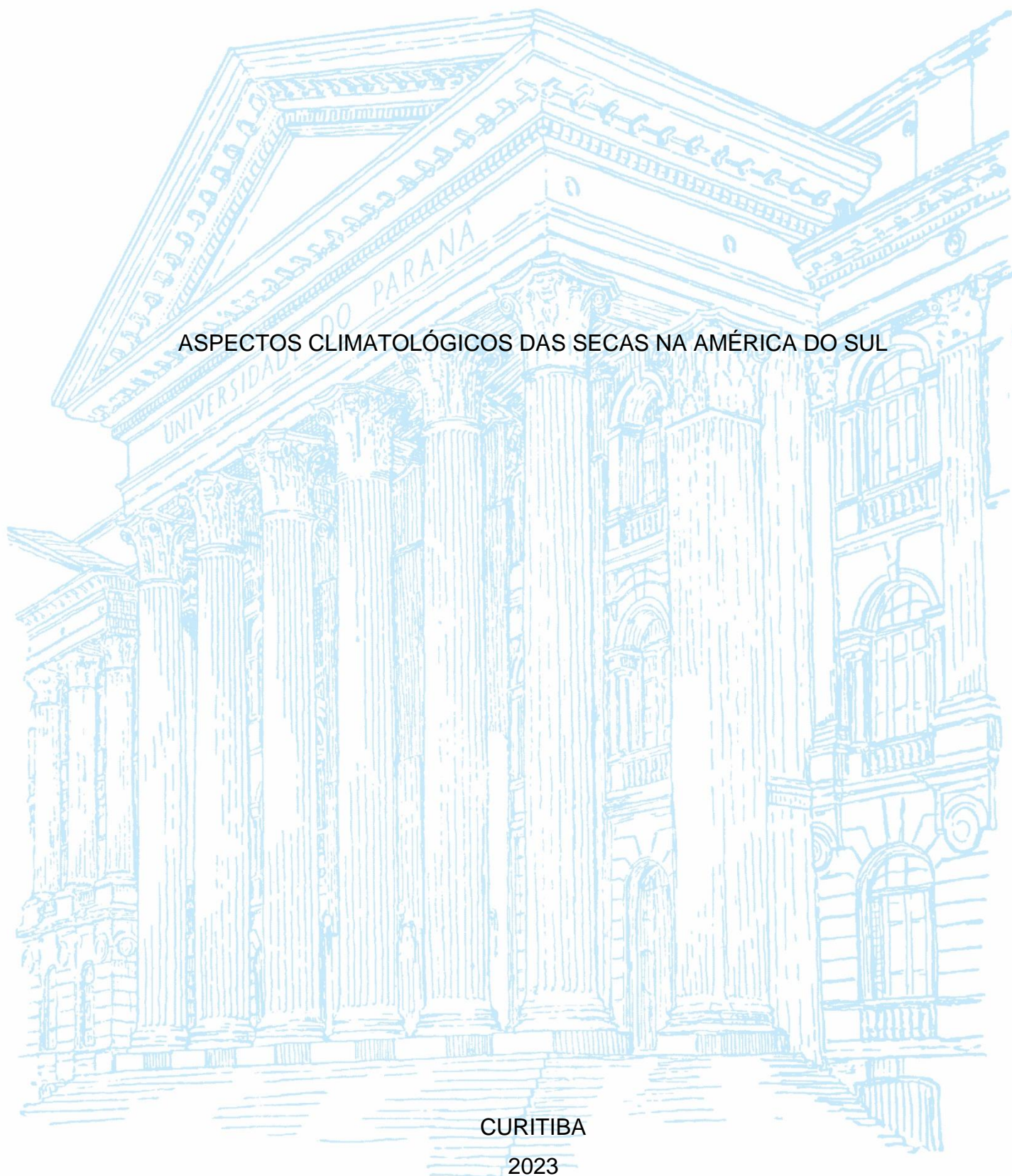


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PAULO VINICIUS ALVES

ASPECTOS CLIMATOLÓGICOS DAS SECAS NA AMÉRICA DO SUL



CURITIBA

2023

PAULO VINICIUS ALVES

ASPECTOS CLIMATOLÓGICOS DAS SECAS NA AMÉRICA DO SUL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Alice Marlene Grimm

CURITIBA

2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

Paulo Vinicius Alves

Aspectos climatológicos das secas na América do Sul

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 9,6, pela seguinte banca examinadora:

Profa. Dra. ALICE MARLENE GRIMM

Orientadora – Departamento de Física, UFPR

Prof(a). Dr. MICHAEL MANNICH

Departamento de Engenharia Ambiental, UFPR

Prof(a). Dr. MARCO AURÉLIO DE MELLO MACHADO

Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, UFPR

Curitiba, 07 de julho de 2023.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Paulo da Silva Alves e Luciane Carvalho Alves, que me deram suporte ao longo de toda a vida para que eu fosse atrás dos meus sonhos. Sem o esforço de vocês, nada disso teria sido possível.

A minha orientadora, Alice Marlene Grimm, que sempre acreditou em mim. Mais do que uma referência, você sempre será a minha inspiração de vida.

Aos meus amigos da graduação, em especial ao Hermes Rocha, Angelo França, Giovana Sabbag e Felipe Baglioli. O apoio emocional e o carinho compartilhado fizeram deste um período mais leve.

A Camila Schneider, que me auxiliou com o script de obtenção dos dados que serviram de base para esta pesquisa.

Aos meus amigos do Laboratório de Meteorologia da UFPR: Luana Scheibe, Nicole Laureanti, Rildo Moura, Lucas Nogueira, Wellington de Almeida, Gabriela Gomes e Dayane Padoan. O conhecimento compartilhado e o auxílio de todos fizeram esse TCC ser possível.

A todos da família Strelow que me auxiliaram durante boa parte da graduação. As conversas e o afeto compartilhado serão sempre lembrados.

Finalmente, agradeço a Universidade Federal do Paraná que dispõe de um agradável ambiente científico. O ensino público de qualidade transformou a minha vida e me permitiu ter uma visão crítica da realidade.

“Oh, busco a parte que falta em mim,
a parte que falta em mim.
Ai-ai-iô, assim eu vou,
em busca da parte que falta em mim”.

Shel Silverstein, “A Parte que Falta”

RESUMO

A América do Sul é afetada por diversos eventos climáticos, que podem prejudicar tanto suas comunidades locais quanto seus ecossistemas. Portanto, é necessário caracterizá-los, para que se possa melhorar sua previsão ou preparar-se para coexistir com eles. Tendo isso em mente, o presente estudo procura determinar as características climatológicas dos episódios de seca no continente, obtendo dados estatísticos e fazendo sua análise quanto à frequência, persistência e distribuição espacial. Os dados de precipitação observados foram tratados, interpolados para grade regular e preenchidos com os dados do *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC) para um resultado mais representativo. Em seguida, calculou-se o Índice de Precipitação Padronizado (SPI) para 3, 6, 12, 24, 48 e 60 meses. Foi feita a Análises de Componentes Principais (ACP) destas séries de SPI, o que gerou modos de variabilidade rotacionados, obtendo-se a distribuição temporal e espacial da variabilidade deste índice. Efetuou-se ainda, a análise estatística de eventos de secas severas e extremas, contando a quantidade de eventos, calculando-se o seu tempo característico, máxima duração e duração média. A fim de encontrar conexões de larga escala, os modos de SPI foram correlacionados com a série de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) (e o reverso também). Finalmente, com base nas fases negativas de três modos do SPI de verão na AS, foram determinadas listas de eventos de seca em diferentes regiões. As condições atmosféricas e oceânicas associadas com estas secas foram determinadas através de composições de anomalias ocorridas durante estes eventos. Os resultados indicam que as secas observadas para o continente são fortemente influenciadas por eventos El Niño - Oscilação Sul (ENOS), além de anomalias no Oceano Atlântico.

Palavras-chave: Índice de Precipitação Padronizada, seca, modos de variabilidades.

ABSTRACT

South America is affected by several weather events, which can harm both its local communities and its ecosystems. Therefore, it is necessary to characterize them, to improve their prediction or prepare to coexist with them. Bearing this in mind, the present study seeks to determine the climatological characteristics of drought episodes in the continent, obtaining statistical data and analyzing them in terms of frequency, persistence and spatial distribution. The observed precipitation data were processed, interpolated to a regular grid and filled with data from the Global Precipitation Climatology Center (GPCC) for a more representative result. Then, the Standardized Precipitation Index (SPI) was calculated for 3, 6, 12, 24, 48 and 60 months. Principal Component Analysis (ACP) of these SPI series was performed, which generated rotated modes of variability, obtaining the temporal and spatial distribution of variability of this index. A statistical analysis of severe and extreme drought events was also carried out, counting the number of events, calculating their characteristic time, maximum duration and average duration. In order to find large-scale connections, the SPI modes were correlated with the Sea Surface Temperature (TSM) series (and the reverse as well). Finally, based on the negative phases of three modes of the summer SPI in AS, lists of drought events in different regions were determined. The atmospheric and oceanic conditions associated with these droughts were determined through compositions of anomalies occurring during these events. The results indicate that the observed droughts for the continent are strongly influenced by El Niño - Southern Oscillation (ENSO) events, in addition to anomalies in the Atlantic Ocean.

Keywords: Standardized Precipitation Index, drought, variability modes.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	UNIDADES DE RESPOSTAS HIDROLÓGICAS (URHS) DA AMÉRICA DO SUL.....	20
FIGURA 2	CICLOS DE PRECIPITAÇÃO ANUAL NA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO 1950-2005.	22
FIGURA 3	ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO NORMALIZADAS MÉDIAS PARA ANOS COM: EL NIÑO/S_GRAD DURANTE (A) DJF E (B) MAM; LA NIÑA/S_GRAD DURANTE (C) DJF E (D) MAM. CONTORNOS CONTÍNUOS (TRACEJADOS) ENCERRAM VALORES POSITIVOS (NEGATIVOS) SIGNIFICATIVOS AO NÍVEL DE 95% DE CONFIANÇA PELO TESTE T DE STUDENT.	24
FIGURA 4	FLUXOGRAMA EXPLICANDO O PASSO A PASSO DA METODOLOGIA. INICIOU-SE OBTENDO OS DADOS E, APÓS O SEU TRATAMENTO, SEGUIU-SE A ORDEM DAS SETAS. PPT SIGNIFICA PRECIPITAÇÃO, TSM DESIGNA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR, MM DENOTA MÉDIA MÓVEL, SPI RETRATA, DO INGÊS, <i>STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX</i> E ACP REPRESENTA ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS. CADA ETAPA SERÁ EXPLICADA NA SEQUÊNCIA COM MAIS DETALHES.....	29
FIGURA 5	QUADRÍCULAS QUE EM ALGUM PERÍODO TEMPORAL RECEBERAM O VALOR DA SUAVIZAÇÃO ENTRE OS DADOS OBSERVADOS E DO GPCC.....	33
FIGURA 6	EXEMPLO DE TRANSFORMAÇÃO DE EQUIPROBABILIDADE DE UMA FUNÇÃO GAMA AJUSTADA PARA UMA DISTRIBUIÇÃO NORMAL PADRONIZADA.....	36
FIGURA 7	SÉRIE SPI3 PARA A QUADRÍCULA DE CURITIBA (1966-2021).....	38
FIGURA 8	CONTAGEM DE EVENTOS EXTREMOS DA SÉRIE TOTAL DO SPI3 (ANO) PARA A REGIÃO DO ESTADO DO PARANÁ.....	39
FIGURA 9	SÉRIE SPI6 PARA A QUADRÍCULA DE CURITIBA (1966-2021).....	40

FIGURA 10	SÉRIE SPI6 PARA A QUADRÍCULA DE CURITIBA (2005-2010).....	40
FIGURA 11	DURAÇÃO MÁXIMA DE EVENTOS EXTREMOS DA SÉRIE TOTAL DO SPI6 PARA A REGIÃO DO ESTADO DO PARANÁ.....	41
FIGURA 12	DURAÇÃO MÁXIMA DE EVENTOS EXTREMOS DA SÉRIE TOTAL DO SPI6 PARA A REGIÃO DO ESTADO DO PARANÁ.....	42
FIGURA 13	EXEMPLO DE CORRELAÇÃO ENTRE O PRIMEIRO MODO ROTACIONADO DE SPI3 E SÉRIE DE TSM MÉDIA MÓVEL 3. A BARRA DE CORES INDICA NÍVEIS DE CONFIANÇA. AS CORES VERMELHAS (AZUIS) INDICAM CORRELAÇÃO POSITIVA (NEGATIVA) COM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.....	44
FIGURA 14	NÚMERO DE EVENTOS DE SECA SEVERA (LIMIAR -1.5), PARA A SÉRIE TEMPORAL COMPLETA, NA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1966-2021.....	59
FIGURA 15	NÚMERO DE EVENTOS DE SECA EXTREMA (LIMIAR -2.0), PARA A SÉRIE TEMPORAL COMPLETA, NA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1966-2021.....	59
FIGURA 16	NÚMERO DE EVENTOS DE SECA SEVERA (LIMIAR -1.5), PARA O VERÃO, NA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1966-2021.....	60
FIGURA 17	NÚMERO DE EVENTOS DE SECA EXTREMA (LIMIAR -2.0), PARA O VERÃO, NA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1966-2021.....	60
FIGURA 18	NÚMERO DE EVENTOS DE SECA SEVERA (LIMIAR -1.5), PARA O OUTONO, NA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1966-2021.....	61
FIGURA 19	NÚMERO DE EVENTOS DE SECA EXTREMA (LIMIAR -2.0), PARA O OUTONO, NA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1966-2021.....	61
FIGURA 20	NÚMERO DE EVENTOS DE SECA SEVERA (LIMIAR -1.5), PARA O INVERNO, NA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1966-2021.....	62
FIGURA 21	NÚMERO DE EVENTOS DE SECA EXTREMA (LIMIAR -2.0), PARA O INVERNO, NA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1966-2021.....	62
FIGURA 22	NÚMERO DE EVENTOS DE SECA SEVERA (LIMIAR -1.5), PARA A PRIMAVERA, NA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1966-2021..	63
FIGURA 23	NÚMERO DE EVENTOS DE SECA EXTREMA (LIMIAR -2.0), PARA A PRIMAVERA, NA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1966-2021..	63
FIGURA 24	DURAÇÃO MÉDIA DE SECAS SEVERAS (LIMIAR -1.5), PARA A PRIMAVERA, NA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1966-2021..	64

FIGURA 25	DURAÇÃO MÉDIA DE SECAS EXTREMAS (LIMIAR -2.0), PARA A PRIMAVERA, NA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1966-2021..	64
FIGURA 26	DURAÇÃO MÁXIMA DE SECAS SEVERAS (LIMIAR -1.5), PARA A PRIMAVERA, NA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1966-2021..	65
FIGURA 27	DURAÇÃO MÁXIMA DE SECAS EXTREMAS (LIMIAR -2.0), PARA A PRIMAVERA, NA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1966-2021..	65
FIGURA 28	TEMPO CARACTERÍSTICO PARA SPI'S DE 3,6 E 12 MESES.....	66
FIGURA 29	TEMPO CARACTERÍSTICO PARA SPI'S DE 3,6 E 12 MESES.....	66
FIGURA 30	PRIMEIRO MODO ROTACIONADO DE SPI3 DE MESES CORRIDOS. O FACTOR LOADINGS (FL) É APRESENTADO À ESQUERDA E O FACTOR SCORES (FS) À DIREITA.....	67
FIGURA 31	TERCEIRO MODO ROTACIONADO DE SPI3 DE VERÃO (FEVEREIRO). O FACTOR LOADINGS (FL) É APRESENTADO À ESQUERDA E O FACTOR SCORES (FS) À DIREITA.....	67
FIGURA 32	PRIMEIRO MODO ROTACIONADO DE SPI3 DE PRIMAVERA. O FACTOR LOADINGS (FL) É APRESENTADO À ESQUERDA E O FACTOR SCORES (FS) À DIREITA.....	68
FIGURA 33	QUINTO MODO ROTACIONADO DE SPI12 DE MESES CORRIDOS. O FACTOR LOADINGS (FL) É APRESENTADO À ESQUERDA E O FACTOR SCORES (FS) À DIREITA.....	68
FIGURA 34	QUARTO (A), QUINTO (B) E QUARTO(C) MODO ROTACIONADO PARA O SPI 12 DE MESES CORRIDOS, PRIMAVERA E VERÃO RESPECTIVAMENTE. OS FACTOR SCORES (FS) SÃO APRESENTADOS ACIMA E OS FACTOR LOADINGS (FL) NA DIVISÃO INFERIOR.....	69
FIGURA 35	PRIMEIRO (A) E SEGUNDO (B) MODO ROTACIONADO DE SPI3 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS O PADRÃO ESPACIAL (FL), A SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO COM A SÉRIE DE TSM GLOBAL COM MÉDIA MÓVEL DE TRÊS MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.....	70
FIGURA 36	TERCEIRO (A) E QUARTO (B) MODO ROTACIONADO DE SPI3 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS O PADRÃO ESPACIAL (FL), A SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO COM A SÉRIE DE	

	TSM GLOBAL COM MÉDIA MÓVEL DE TRÊS MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.....	71
FIGURA 37	QUINTO (A) E SEXTO (B) MODO ROTACIONADO DE SPI3 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS O PADRÃO ESPACIAL (FL), A SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO COM A SÉRIE DE TSM GLOBAL COM MÉDIA MÓVEL DE TRÊS MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.....	72
FIGURA 38	PRIMEIRO (A) E SEGUNDO (B) MODO ROTACIONADO DE SPI6 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS O PADRÃO ESPACIAL (FL), A SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO COM A SÉRIE DE TSM GLOBAL COM MÉDIA MÓVEL DE SEIS MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.....	73
FIGURA 39	TERCEIRO MODO ROTACIONADO DE SPI6 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS O PADRÃO ESPACIAL (FL), A SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO COM A SÉRIE DE TSM GLOBAL COM MÉDIA MÓVEL DE SEIS MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.....	74
FIGURA 40	PRIMEIRO (A) E SEGUNDO (B) MODO ROTACIONADO DE SPI12 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS O PADRÃO ESPACIAL (FL), A SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO COM A SÉRIE DE TSM GLOBAL COM MÉDIA MÓVEL DE DOZE MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.....	75
FIGURA 41	PRIMEIRO (A), SEGUNDO (B) E TERCEIRO (C) MODO ROTACIONADO DE TSM COM MM DE 3, MM DE 6 E 12 MESES PARA MESES CORRIDOS, RESPECTIVAMENTE. SÃO APRESENTADOS O PADRÃO ESPACIAL (FL), A SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO COM A SÉRIE DE TSM GLOBAL COM MÉDIA MÓVEL DE DOZE MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.....	76

- FIGURA 42 SEGUNDO (A), TERCEIRO (B) E QUARTO (C) MODO ROTACIONADO DE SPI DE 3 MESES PARA FEVEREIRO. SÃO APRESENTADOS, NA LINHA SUPERIOR, O PADRÃO ESPACIAL (FL) E, NA LINHA INFERIOR, A SÉRIE TEMPORAL (FS).....77
- FIGURA 43 COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS DE PPT (A), TSM (B) E SLP (C) PARA AS MÉDIAS ANÔMALAS DOS VERÕES DE 1971, 1984, 1987, 1995 E 2006 DE SPI DE 3 MESES (SEGUNDO MODO) PARA FEVEREIRO EM RELAÇÃO A SÉRIE TOTAL (1965-2021). REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,30.....78
- FIGURA 44 COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS DE VPOT+DIVWIND (A), PSI (B) E PSIZA (C) EM 200 HPA PARA AS MÉDIAS ANÔMALAS DOS VERÕES DE 1971, 1984, 1987, 1995 E 2006 DE SPI DE 3 MESES (SEGUNDO MODO) PARA FEVEREIRO EM RELAÇÃO A SÉRIE TOTAL (1965-2021). REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10 PARA O VPOT+DIVWIND E 0,30 PARA PSI E PSIZA.....79
- FIGURA 45 COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS DE PPT (A), TSM (B) E SLP (C) PARA AS MÉDIAS ANÔMALAS DOS VERÕES DE 1966, 1983, 1993, E 2015 DE SPI DE 3 MESES (TERCEIRO MODO) PARA FEVEREIRO EM RELAÇÃO A SÉRIE TOTAL (1965-2021). REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,30.....80
- FIGURA 46 COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS DE VPOT+DIVWIND (A), PSI (B) E PSIZA (C) EM 200 HPA PARA AS MÉDIAS ANÔMALAS DOS VERÕES DE 1971, 1984, 1987, 1995 E 2006 DE SPI DE 3 MESES (SEGUNDO MODO) PARA FEVEREIRO EM RELAÇÃO A SÉRIE TOTAL (1965-2021). REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10 PARA O VPOT+DIVWIND E 0,30 PARA PSI E PSIZA.....81
- FIGURA 47 COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS DE PPT (A), TSM (B) E SLP (C) PARA AS MÉDIAS ANÔMALAS DOS VERÕES DE 1968, 1978, 1991, 2005, 2006 E 2012 DE SPI DE 3 MESES (QUARTO MODO) PARA FEVEREIRO EM RELAÇÃO A SÉRIE TOTAL (1965-2021). REGIÕES

EM AZUL OU VERMELHO APESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,30.....82

FIGURA 48 COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS DE VPOT+DIVWIND (A), PSI (B) E PSIZA (C) EM 200 HPA PARA AS MÉDIAS ANÔMALAS DOS VERÕES DE 1968, 1978, 1991, 2005, 2006 E 2012 DE SPI DE 3 MESES (QUARTO MODO) PARA FEVEREIRO EM RELAÇÃO A SÉRIE TOTAL (1965-2021). REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10 PARA O VPOT+DIVWIND E 0,30 PARA PSI E PSIZA.....83

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	IMPACTOS DOS EVENTOS DE ENOS CANÔNICO E MODOKI NA PRECIPITAÇÃO DA REGIÃO SUDESTE, POR ESTAÇÃO DO ANO. ENOS TIPO CANÔNICO SÃO AQUELES QUE OCORREM NO PACÍFICO LESTE E MODOKI SÃO CARACTERIZADOS POR ANOMALIAS DE TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR (TSM) FORTES NO PACÍFICO CENTRAL E O OPOSTO NO PACÍFICO LESTE E OESTE	25
TABELA 2	ÍNDICES DE SECA.....	27
TABELA 3	INTERPRETAÇÃO DO ÍNDICE DECIL.....	28
TABELA 4	STATUS DOS VALORES DE CHUVA	30
TABELA 5	CLASSIFICAÇÃO DE SECA SEGUNDO O VALOR DE ACUMULAÇÃO SPI E SEUS RESPECTIVOS IMPACTOS.....	35
TABELA 6	CLASSIFICAÇÃO DE SECA SEGUNDO O VALOR DE SPI E SUA CORRESPONDENTE PROBABILIDADE.....	37
TABELA 7	PERÍODO TEMPORAL DE CADA SÉRIE SPI APÓS O CORTE TEMPORAL.....	46
TABELA 8	ACUMULAÇÃO DO ÍNDICE SPI DE TRÊS MESES E SUA ESTAÇÃO SAZONAL CORRESPONDENTE.....	50
TABELA 9	ACUMULAÇÃO DO ÍNDICE SPI DE TRÊS MESES E SUA ESTAÇÃO SAZONAL CORRESPONDENTE.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ACP	- Análise dos Componentes Principais
ANA	- Agência Nacional de Águas
AS	- América do Sul.
ASAS	- Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul.
DJF	- Dezembro, Janeiro e Fevereiro.
DOI	- Dipolo do Oceano Índico.
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
ENOS	- <i>El Niño</i> Oscilação Sul
EOF	- <i>Empirical Orthogonal Function</i>
GPCP	- <i>Global Precipitation Climatology Centre</i>
HW	- HidroWeb
HN	- Hemisfério Norte.
HS	- Hemisfério Sul.
JBN	- Jatos de Baixos Níveis.
JJA	- Junho, Julho e Agosto.
LABMET	- Laboratório de Meteorologia da UFPR
MAM	- Março, Abril e Maio
MM	- Média móvel
NCAR	- <i>National Centre of Atmospheric Research</i>
NCEP	- <i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NOAA	- <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NEB	- Nordeste do Brasil.
OMA	- Oscilação Multidecenal do Atlântico.
PDSI	- <i>Palmer Drought Severity Index</i> .
PNM	- Pressão no Nível do Mar
PPT	- Precipitação
SP	- São Paulo
SON	- Setembro, Outubro e Novembro.
SPEI	- <i>Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index</i> .
SPI	- <i>Standardized Precipitation Index</i> .
TSM	- Temperatura da Superfície do Mar.
U	- Componente zonal do vento

- V - Componente meridional do vento
- URHs - Unidades de Respostas Hidrológicas.
- ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul.
- ZCIT - Zona de Convergência Intertropical.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 OBJETIVOS.....	21
1.1.1. Objetivos Gerais	21
1.1.2. Objetivos Específicos.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 CLIMATOLOGICA DO BRASIL.....	22
2.1.1. Clima da região Amazônica.....	23
2.1.2. Clima da região Nordeste.....	23
2.1.3. Clima da região Sudeste.....	25
2.1.4. Clima da região Centro-Oeste.....	26
2.1.5. Clima da região Sul.....	26
2.2. COMPARAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE SECA.....	27
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1. Dados.....	29
3.1.1. Dados de precipitação.....	29
3.1.1.1. Dados observados do HW.....	30
3.1.1.1.1. Pré-tratamento para o Analisador.....	31
3.1.1.1.2. Remoção de zeros espúrios: pré-Analisador e Analisador.....	31
3.1.1.1.3. Programa Duvidosos.....	32
3.1.1.2. Conjunto de dados Liebmann e Allured.....	32
3.1.1.3. Conjunto de dados do GPCC.....	32
3.1.2. Dados de TSM, PNM, U e V.....	33
3.2. SPI.....	34
3.2.1. Período de acumulação.....	34
3.2.2. Distribuição gama e normalização.....	35
3.2.3. Interpretação.....	36
3.3. ESTATÍSTICA DE EVENTOS EXTREMOS DE SECA.....	37
3.3.1. Tempo característico.....	37
3.3.2. Contagem de eventos extremos.....	37
3.3.3. Duração máxima.....	39
3.3.4. Duração média.....	41
3.4. Análise de componentes principais.....	42

3.5. CORRELAÇÃO.....	43
3.6. COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS.....	45
4. RESULTADOS.....	46
4.1. ESTATÍSTICA DE EVENTOS DE SECA.....	46
4.1.1. Contagem dos eventos de seca.....	46
4.1.2. Duração média dos episódios de seca.....	48
4.1.3. Duração máxima dos episódios de seca.....	49
4.2. TEMPO CARACTERÍSTICO.....	49
4.3. SPI E SUA VARIABILIDADE.....	50
4.4. CORRELAÇÃO.....	51
4.4.1. Modos de SPI e séries de TSM.....	51
4.4.1.1. SPI de 3 meses.....	51
4.4.1.2. SPI de 6 meses.....	53
4.4.1.3. SPI de 12 meses.....	53
4.4.2. Modos de TSM e séries de SPI.....	54
4.5. COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS.....	54
4.5.1. Segundo modo de SPI de 3 meses para o verão.....	55
4.5.2. Terceiro modo de SPI de 3 meses para o verão.....	56
4.5.3. Quarto modo de SPI de 3 meses para o verão.....	57
5. CONCLUSÃO.....	57
6. ANEXOS.....	58
7. REFERÊNCIAS.....	85

1. INTRODUÇÃO

A América do Sul (AS) encontra-se completamente sobre a Placa Sul-Americana, não sendo, portanto, atravessada por limites entre placas tectônicas. Esta posição privilegia o continente, com exceção de sua fronteira oeste, ao longo da Cordilheira dos Andes, que está próxima a um destes limites, com ocorrências menos frequentes e mais leves de eventos relacionados a terremotos e erupções vulcânicas. Entretanto, a AS é afetada pelos impactos de diversas oscilações climáticas de grande escala, associadas com a variabilidade dos oceanos que a circundam. Portanto, os desastres naturais mais comuns e de maior impacto na população são aqueles vinculados a eventos extremos meteorológicos e/ou climáticos.

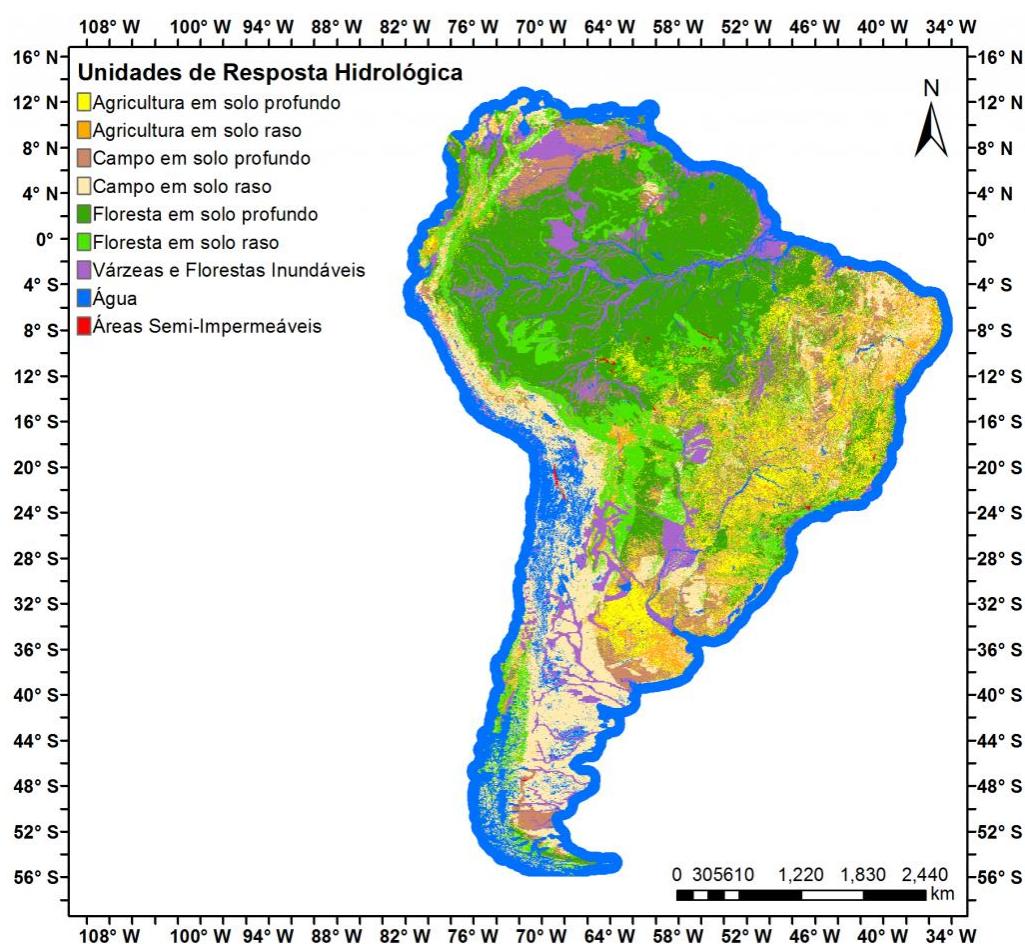
Marengo (2015) alertou que os eventos meteorológicos extremos têm ocorrido com maior frequência nos últimos anos e caracterizar cada um é importante a fim de preparar-se para enfrentá-los. Diferentes escalas temporais são influenciadas por diferentes modos de variabilidade de precipitação do continente sul-americano (LAUREANTI, 2020) e estes podem se inter-relacionar, fortalecendo ou enfraquecendo a influência individual de cada modo. Assim, eventos extremos podem ser fortalecidos e se tornar mais frequentes em certas épocas ou, ao contrário, tornarem-se menos frequentes. Eventos *El Niño*, por exemplo, finalizam seu ciclo em um intervalo pouco menor que quatro anos, em média, enquanto um ciclo mais longo da OMA (Oscilação Multidecenal do Atlântico) tem período de 65 a 85 anos (SCHLESINGER E RAMANKUTTY, 1994).

De acordo com informações obtidas da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), o Brasil e a Argentina figuram como o primeiro e o terceiro país com maior produção de soja no mundo. Por se tratar de grandes extensões de monocultura, estas ficam fortemente sujeitas à variação do clima da região. Logo, a caracterização de eventos extremos e das suas causas se mostra um fator importante para a mitigação em casos de sua ocorrência.

Nas regiões de maior densidade populacional no continente sul-americano em geral chove pouco no inverno austral. Portanto, estudos que enfatizam impactos na população residente em grandes cidades devem focar as estações de transição e o verão (GRIMM, 2003, 2011).

A Figura 1 apresenta o mapa de Unidades de Respostas Hidrológicas (URHs), que são regiões hidrológicamente homogêneas nas bacias hidrográficas. Segundo o autor (FAN *et al.*, 2015), para a sua montagem utilizaram-se técnicas de combinação de mapas de uso do solo, informações geológicas e de topografia. É notável o quanto cada região se diferencia das demais, elucidando a diversidade no uso da terra no continente. Esta diversidade influencia os impactos e respostas de cada região às secas, que podem se traduzir em diferentes graus de prejuízo na produção agrícola, escassez de recursos hídricos, alterações em ecossistemas.

FIGURA 1 – Unidades de Respostas Hidrológicas (URHs) da América do Sul.



Fonte: Fan *et al.*, 2015

Em 2020, uma seca histórica impactou a Região Sul do Brasil resultando em um dos maiores déficits pluviométricos já registrados, segundo GRIMM *et al.* (2020). Este artigo mostra que tal seca intensificou o quadro de desvios pluviométricos negativos que predominavam desde o final dos anos 1990. Logo, tal evento foi consequência de um efeito combinado de oscilações climáticas. Tendo isso em

mente, o presente estudo procura determinar as características climatológicas dos episódios de seca no continente, avaliando oscilações que ocorreram simultaneamente, obtendo valores estatísticos e fazendo sua análise quanto à frequência, persistência e distribuição espacial.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivos gerais

Caracterizar aspectos climatológicos dos episódios de seca na América do Sul, incluindo distribuição espacial, frequência e persistência, assim como sua relação com padrões de variabilidade de temperatura da superfície do mar (TSM) global.

1.1.2. Objetivos específicos

I. Identificação de padrões de distribuição espacial e variabilidade temporal do Índice Padronizado de Precipitação (*Standardized Precipitation Index*, SPI), através da sua Análise de Componentes Principais.

II. Identificação de áreas com maior número de ocorrência de episódios de secas, através da contagem do número de episódios em cada local.

III. Determinação do tempo de persistência das secas, através do cálculo da duração média dos episódios de secas contados em cada local, além do cálculo do tempo característico das séries de SPI com diferentes períodos de acumulação.

IV. Determinação da duração máxima de episódios de seca observada em cada local.

V. Identificação de relações entre as variabilidades oceânica e atmosférica, e os episódios de secas.

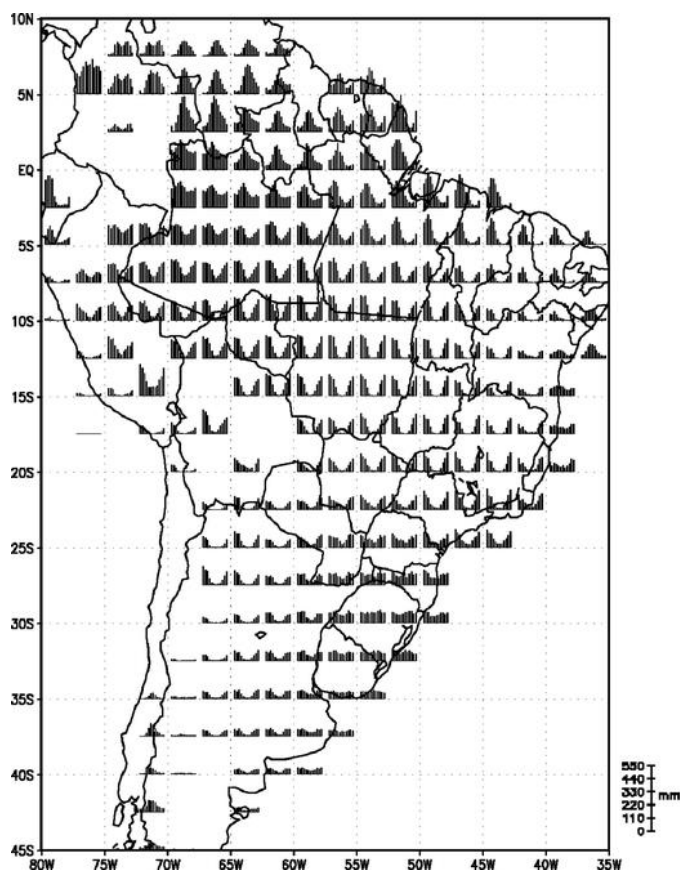
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1. CLIMATOLOGIA DO BRASIL

O Brasil é influenciado pela variabilidade climática nas escalas intrassazonal, interanual, decenal a multidecenal. Cada uma delas afetam as regiões do país de uma forma diferente e sobreposições de oscilações ocorrem continuamente. Logo, uma análise detalhada de cada seção regional ajudará na interpretação dos resultados desta pesquisa.

O regime de chuva da América do Sul é mostrado na Figura 2 (GRIMM, 2011) e observa-se uma grande diferença ao percorrer as latitudes. No Hemisfério Norte (HN), os maiores volumes de precipitação ocorrem no período JJA (junho, julho e agosto) enquanto o período DJF (dezembro, janeiro e fevereiro) se constata na maior parte do Hemisfério Sul (HS). Isto indica que a maior parte do continente tem um regime de monção de verão.

FIGURA 2 – Ciclos de precipitação anual na América do Sul no período 1950-2005.



Fonte: GRIMM (2011)

2.1.1 Clima da região Amazônica

Durante o verão, a circulação atmosférica em baixos níveis mostra uma baixa persistente sobre a região do Chaco, associada a uma forte nebulosidade na Amazônia Central devido ao aumento da radiação característica da estação. Os ventos alísios transportam umidade proveniente do Atlântico para a região e esse fluxo de umidade é canalizado na direção sul, devido à presença dos Andes a oeste. Estima-se que entre 30% e 50% das chuvas na bacia amazônica ocorram devido à evapotranspiração reciclada pela floresta (MARENGO *et al.*, 2018) e, segundo Nobre (2014), estima-se que a Amazônia já perdeu de 40% a 50% da sua capacidade de bombear e reciclar água.

No inverno do HS, o jato subtropical de altos níveis é mais intenso e fica deslocado para norte, juntamente com a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Os padrões de circulação típicos viabilizam a entrada de sistemas frontais, modificando o estado do tempo na região e produzindo ondas de frio (VIANA e HERDIES, 2018).

Estudos que avaliaram a disponibilidade hídrica da Amazônia classificaram a sua dinâmica espacial e temporal e avaliaram as variações climáticas naturais observadas (MARENGO, 2004; MARENGO e NOBRE, 2009). O resultado sugeriu que a variabilidade das chuvas na Amazônia depende de fatores locais (floresta) e de fatores remotos (temperatura das águas superficiais dos Oceanos Atlântico e Pacífico tropical).

Eventos de *El Niño* Oscilação Sul (ENOS), ou seja, El Niño (La Niña) influenciam o regime de precipitação da região, uma vez que há aumento (diminuição) da convecção sobre o Pacífico equatorial leste e apresenta-se uma subsidência (ascendência) compensatória que inibe (aumenta) a formação de chuva na parte leste e central da Amazônia. Ademais, a variação latitudinal da ZCIT modula o regime de precipitação no norte da região.

2.1.2 Clima da região Nordeste

O Nordeste do Brasil (NEB) inclui os estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Piauí, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Sergipe. Nele se observa três grandes divisões climáticas: clima tropical, clima litorâneo úmido e clima

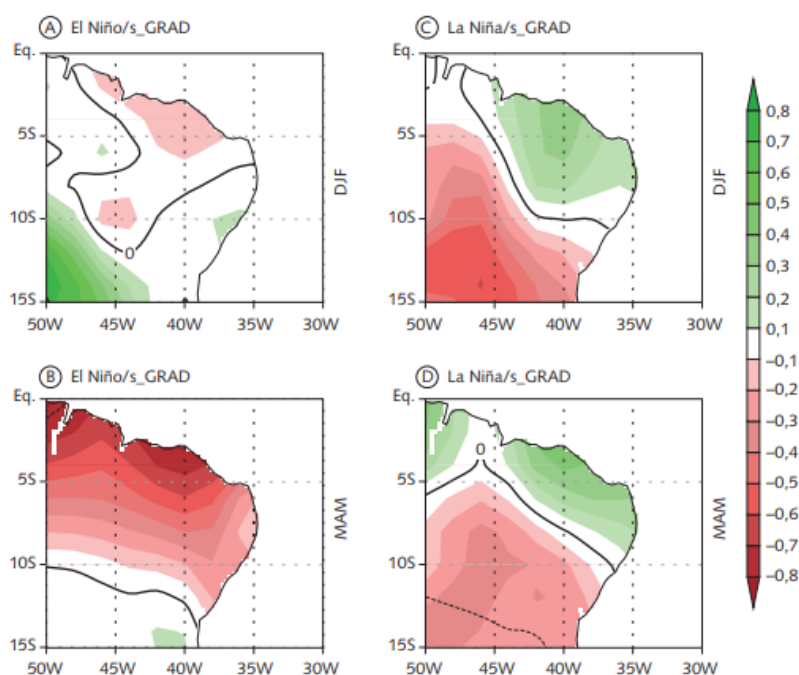
tropical semiárido. A pluralidade climática reflete a atuação dos diversos mecanismos físicos que impactam a região, sendo os mais relevantes a ZCIT e o ENOS.

Segundo Strang (1972), a máxima precipitação ocorre no período março-abril no norte do NEB, devido a influência da ZCIT deslocada mais ao Sul neste período. Já o efeito do ENOS é particularmente mais notável no setor norte do NEB, onde chuvas anormalmente abundantes (escassas) são associadas a episódios de La Niña (El Niño). (ALVES, 2019)

As condições de secas sobre o NEB durante El Niño podem ser parcialmente explicadas por uma circulação de Walker mais a leste, com seu ramo ascendente sobre as águas anormalmente quentes no Pacífico equatorial leste e seu ramo descendente sobre o NEB e o Atlântico.

Um resumo de tudo que foi explicado acima é mostrado na Figura 3 em relação ao ENOS. Nela, são mostradas anomalias de precipitação normalizadas médias em anos em que a anomalia da temperatura da superfície do mar no Atlântico Equatorial é neutra (s_GRAD).

FIGURA 3 – Anomalias de precipitação normalizadas médias para anos com: El Niño/s_GRAD durante (A) DJF e (B) MAM; La Niña/s_GRAD durante (C) DJF e (D) MAM. Contornos contínuos (tracejados) encerram valores positivos (negativos) significativos ao nível de 95% de confiança pelo teste T de Student.



. Fonte: adaptado de Andreoli e Kayano (2006).

2.1.3 Clima da Região Sudeste

Segundo a definição de monção utilizada por Wang e Ding (2006), o Sudeste brasileiro é majoritariamente caracterizado por um regime de monção, uma vez que mais de 50% da precipitação anual ocorre no verão austral. Este fenômeno ocorre, porque a umidade que vem do Oceano Atlântico é desviada para o sul pelos Andes, após ser reciclada e aumentada sobre a Amazônia, sendo seu transporte aumentado em episódios do Jato de Baixos Níveis (JBN). A umidade proveniente do Oceano Atlântico, advinda do setor oeste do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), interage com convecção local, produzindo estação chuvosa entre meados da primavera e início do outono (REBOITA, 2010). Tal padrão, quando há acoplamento com alguma frente fria, pode formar a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que é uma banda de nebulosidade que se estende do sul da Amazônia até o Oceano Atlântico passando pelo Sudeste do Brasil.

A ASAS se localiza mais a oeste, próximo a costa, no inverno. Este padrão dificulta a formação de nuvens e a passagem de frentes frias pois ela pode funcionar como um bloqueio atmosférico. Tal condição favorece noites com a característica de estabilidade atmosférica estável, fazendo com que as camadas de ar superficiais fiquem mais frias devido a radiação de onda longa escapar para o espaço com maior facilidade.

Eventos de ENOS produzem diferentes impactos na região de acordo com a posição das suas anomalias de TSM e a época do ano. A Tabela 1, que foi adaptada de Tedeschi, Cavalcanti e Grimm (2013) enuncia esses aspectos.

Tabela 1 – Impactos dos eventos de ENOS canônico e Modoki na precipitação da Região Sudeste, por estação do ano. ENOS tipo canônico são aqueles que ocorrem no Pacífico Leste e Modoki são caracterizados por anomalias de TSM fortes no Pacífico Central e o oposto no Pacífico Leste e Oeste.

	SON	DJF	MAM	JJA
El Niño Modoki	Seco	Seco	Chuvoso	Pouca influência
El Niño canônico	Pouca influência	Pouca influência	Chuvoso (somente em SP)	Chuvoso (somente em SP)
La Niña Modoki	Chuvoso	Seco	Pouca influência	Pouca influência
La Niña canônica	Seco	Chuvoso	Pouca influência	Pouca influência

Fonte: adaptado de Tedeschi, Cavalcanti e Grimm (2013).

2.1.4 Clima da Região Centro-Oeste

Por estar localizado em uma região subtropical, o Centro-Oeste brasileiro sofre influências de sistemas atmosféricos tanto tropicais quanto extratropicais. O forte aquecimento convectivo no verão desenvolve na região o sistema meteorológico de altos níveis conhecido como Alta da Bolívia. Este sistema se estende mais ao norte no inverno, atingindo a Venezuela e a Colômbia em meados de Junho.

A umidade proveniente da Amazônia advém através do JBN pelo sistema anticiclônico forçado pelos Andes. Este mecanismo promove chuvas volumosas no verão, que alimentam a maior área alagada do mundo, o Pantanal.

Chan, Behera e Yamata (2008) mostraram que uma configuração no Oceano Índico, conhecida como Dipolo do Oceano Índico (DOI) está associado a um dipolo de precipitação na primavera no HS. Nessa fase, o anticiclone sobre o Sul do Atlântico Sul, é intensificado pela propagação de um trem de ondas de Rossby, contribuindo para a divergência de umidade na região central do Brasil (redução de chuvas) e convergência na bacia La Plata (aumento de chuvas). Já segundo Eidt (2018), padrões remotos de TSM no Pacífico não têm a mesma importância no regime do Centro-Oeste como tem para a Região Sul do Brasil. Segundo a publicação, as condições climáticas do Centro-Oeste parecem estar mais sob a influência de anomalias de escoamento e umidade da região.

2.1.5 Clima da Região Sul

Os ventos sobre a superfície no Sul do Brasil são majoritariamente caracterizados pela influência da ASAS, que está presente o ano inteiro, mas mais intensa no inverno, quando penetra pela costa do continente. Decorre desta característica que a maior entrada de umidade, principalmente no Paraná, é de fonte oceânica nos períodos de transição e inverno, mas no verão, o maior fluxo de umidade provém de noroeste. Para o trimestre anual mais quente, Grimm e Zilli (2009) associaram a menor (maior) entrada de umidade proveniente da Amazonia ocorre quando a ZCAS (não) está ativa.

Na Figura 2 nota-se que há distribuição das chuvas no ano todo no Rio Grande do Sul. Isso decorre por conta do jato subtropical de altos níveis estar centralizado

sobre o Sul do Brasil/Nordeste da Argentina, o que influencia os máximos de precipitação na região e a ocorrência de complexos convectivos de mesoescala.

2.2 COMPARAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE SECA

Zargar et al., (2011) definiu índice da seguinte forma: “medida quantitativa que caracteriza o nível de algo com a assimilação de uma ou mais variáveis em um único valor numérico”. Com isso em mente, um índice de seca deve ser uma medida que possibilite promover o monitoramento de eventos e deve ter, preferencialmente, as seguintes características:

- a) Cumulativo: permite analisar secas para diversos períodos de acumulação.
- b) Padronizado: possibilita a comparação entre regiões.
- c) Balanço hídrico: utilizar informações de precipitação e evapotranspiração.

Foram selecionados quatro índices de seca que são listados na Tabela 2. Cada um deles será comentado a seguir.

TABELA 2 – Índices de seca

Índice	Características
a) Decis (GIBBS e MAHAR, 1967)	Cumulativo, padronizado e não usa balanço hídrico
b) Palmer Drought Severity Index (PDSI) (PALMER, 1968)	Não cumulativo, não padronizado, usa balanço hídrico
c) Standardized Precipitation Index (SPI) (MCKEE et al., 1993)	Cumulativo, padronizado e não usa balanço hídrico
d) Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) (VICENTE-SERRANO et al., 2010)	Cumulativo, padronizado e usa balanço hídrico

- a) O Decis, assim como o PDSI e o SPI, utiliza apenas a variável de precipitação. Nele, os dados históricos mensais de precipitação são classificados do menor para o maior e divididos em dez categorias iguais,

ou decis. Assim, a precipitação de um mês pode ser inserida no contexto histórico por decil. Por definição, o quinto decil é a média e a interpretação do índice segue a lógica da Tabela 3.

TABELA 3 – Interpretação do índice Decil.

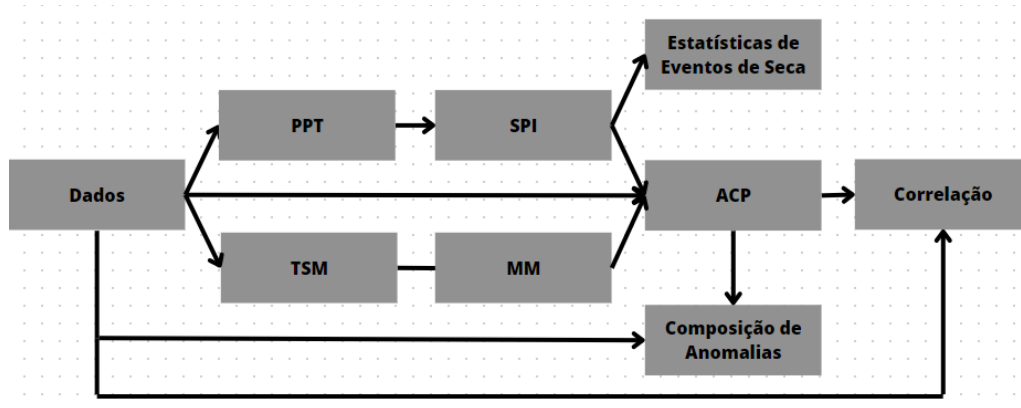
Intervalo do Decil	Interpretação
Decil 1-2	Muito abaixo do normal
Decil 3-4	Abaixo do normal
Decil 5-6	Quase normal
Decil 7-8	Acima do normal
Decil 9-10	Muito acima do normal

- b) O PDSI utiliza como dados de entrada a temperatura e a precipitação. Por ser padronizado, varia de -10 (seco) a +10 (cheia). O comum é observar dados de saída entre o intervalo -4 e +4, mas valores extremos são possíveis. Ele utiliza um modelo físico de balanço hídrico que funciona bem na descrição de secas de longo prazo, mas peca em não possibilitar comparações entre regiões de modo confiável.
- c) O SPI foi reconhecido como o índice padrão que deve ser utilizado na quantificação de secas. Mais sobre este índice será comentado na seção 3.2. deste trabalho. O seu maior ponto positivo é possibilitar a comparação de climas marcadamente diferentes.
- d) Conhecido por ser uma extensão do SPI, o SPEI se assemelha ao cálculo do seu antecessor, com a diferença de que os dados de entrada são tanto de precipitação quanto de evapotranspiração. Portanto, o SPEI captura o impacto da temperatura na água e pesquisas recente demonstram que possui grande utilidade na análise de secas em cenários de mudanças climáticas (NASCIMENTO e GOZZO, 2021)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Um resumo do presente trabalho é apresentado no fluxograma da Figura 4. Nas próximas seções será explicado cada passo em detalhes.

FIGURA 4 – Fluxograma explicando o passo a passo da metodologia. No início, obtiveram-se os dados e, após o seu tratamento, seguiu-se a ordem das setas. PPT significa precipitação, TSM designa temperatura da superfície do mar, MM denota média móvel, SPI retrata, do inglês, *Standardized Precipitation Index* e ACP representa Análise dos Componentes Principais. Cada etapa será explicada na sequência com mais detalhes.



3.1 Dados.

Nesta pesquisa foram utilizados dados de precipitação, TSM, pressão no nível do mar (PNM), componente zonal (U) e meridional (V) do vento. A aquisição, tratamento e preparação de cada um deles será comentada abaixo.

3.1.1 Dados de precipitação.

Foram utilizados dois conjuntos de dados de precipitação: dados observados adquiridos da Agência Nacional de Águas (ANA) pelo portal HidroWeb (HW), o conjunto de dados de precipitação preparado por Liebmann e Allured (2005) e o conjunto da reanálise do GPCC (*do inglês, Global Precipitation Climatology Centre*).

3.1.1.1 Dados observados do HW.

Ao todo, utilizando um script em Python, foram baixados dados de 12190 estações pluviométricas no Brasil ou Bolívia. O conjunto corresponde à totalidade de pontos de medição disponibilizados pelo portal HW.

Cada dado diário possui o seu correspondente status, sendo eles apresentados na tabela 4. Foram utilizados dados acumulados para dados mensais (Status 4) e os demais status foram analisados manualmente. Se procedeu dessa forma pois inúmeros erros foram encontrados na alocação de status e alguns deles são listados a seguir:

- a) Valores marcados com Status 0 deveriam ser considerados faltantes, diferenciando um dia sem chuva de um dia sem dado de chuva. Porém foram encontrados em 2718 estações, dias com status 0 e algum valor de chuva.
- b) Um dos grandes problemas com dados de precipitação são os zeros espúrios: dados faltantes que foram erroneamente colocados como “0,0”, e alguns até foram marcados com status 1.
- c) Status diferente de 0 sem valor de chuva foram considerados indefinidos.

TABELA 4 – Status dos valores de chuva.

Título	Status	Característica
Branco	0	Dado faltante, também chamado de indefinido ou UNDEF.
Real	1	Dado real, valor de chuva confiável, em teoria
Estimado	2	Não é claro o que exatamente significam valores estimados
Duvidoso	3	Dados com valor anormal de chuva
Acumulado	4	Valor referente à soma de mais de um dia

Após a conversão para o formato utilizado no Laboratório, outros programas foram utilizados para encontrar e corrigir erros provenientes de possíveis confusões com os status ou possíveis erros humanos. As seções a seguir demonstram o procedimento utilizado.

3.1.1.1.1. Pré-tratamento para o Analisador.

Seguem alguns erros facilmente identificáveis e corrigidos já na etapa logo após a conversão:

- Valores diários negativos: 115 meses em 41 estações diferentes.
- Valores diários maiores que 700 milímetros: 1716 meses em 568 estações diferentes.
- Valores sem casa decimal: 441 meses em 84 estações.

3.1.1.1.2. Remoção de zeros espúrios: pré-Analisador e Analisador.

Após as alterações realizadas sobre os erros flagrantes, tinha-se a intenção de utilizar o programa Analisador para iniciar uma análise mais aprofundada. Porém, enquanto se preparavam os dados, apareceu outro problema. O programa Analisador faz uma série de cálculos para determinar se um valor zero de uma determinada estação é ou não espúrio. Em alguns destes cálculos, por exemplo, o programa caracteriza a chuva mensal da estação e utiliza dados das vizinhas da estação para determinar se a série de zeros faz sentido em seu contexto (data e local). Contudo, estas métricas poderiam ser enviesadas se a estação analisada ou suas vizinhas também possuísem grandes sequências de zeros espúrios. Em razão disso, foi necessário fazer uma pré-análise de zeros espúrios, removendo sequências flagrantemente incorretas, tornando os cálculos utilizados pelo Analisador mais confiáveis. Para tanto, utilizaram-se dois programas. O primeiro dividiu o Brasil em 4 regiões, delimitadas de modo simplificado (4 retângulos) e separou as estações de chuva entre esses retângulos, utilizando suas coordenadas. Na sequência, foi criado um arquivo para cada região contendo as estações que possuem sequência maior que um determinado limiar de meses zerados, sendo o limiar utilizado de uma sequência de 12 meses seguidos sem chuva. Já o segundo, com base nos arquivos de saída do primeiro, remove as sequências de meses inteiramente zerados acima do limiar, classificando-as como dados faltantes. Nesta análise, foram removidos 5453 meses, alterando-se 120 estações. Após tais alterações manuais, executou-se o Analisador e sua saída foi utilizada como entrada para o programa Duvidosos.

3.1.1.1.3. Programa Duvidosos.

O programa Duvidosos é um conjunto de oito programas que implementam uma série de verificações sobre os dados de chuva. Vale citar que este programa apenas mostra esses possíveis erros, cabendo ao usuário fazer as alterações caso ele julgue necessárias. A título de exemplo, quatro dos oito são citados a seguir:

- a) Verificação de dados negativos: chuva negativa foi considerada indefinida.
- b) Verificação de valores repetidos: caso haja muitos valores repetidos seguidos, pode ser que o registro de dados tenha sido feito erroneamente.
- c) Verificação de diferença de regime dentro da estação: caso haja uma diferença muito grande no regime de chuvas de uma estação durante um certo período de comparação com seu regime normal, é provável que os registros tenham sido feitos de modo incorreto.
- d) Verificação de cópias de períodos em estações diferentes: se existe um par de estações com dados exatamente iguais para certos períodos, uma de duas ocorreu: ou as estações são vizinhas uma da outra e houve preenchimento de dados faltantes com os dados da adjacente, o que é aceitável, ou as estações são distantes entre si e dados foram copiados (o que não é aceitável)

3.1.1.2. Conjunto de dados Liebmann e Allured.

Preparado pelos pesquisadores Liebmann e Allured (2005), este é um conjunto de dados observados interpolados para pontos de grade, que possui dados até o ano 2015. Tal material abrange, não em sua totalidade, os seguintes países: Brasil, Bolívia, Venezuela, Colômbia, Argentina e Guianas.

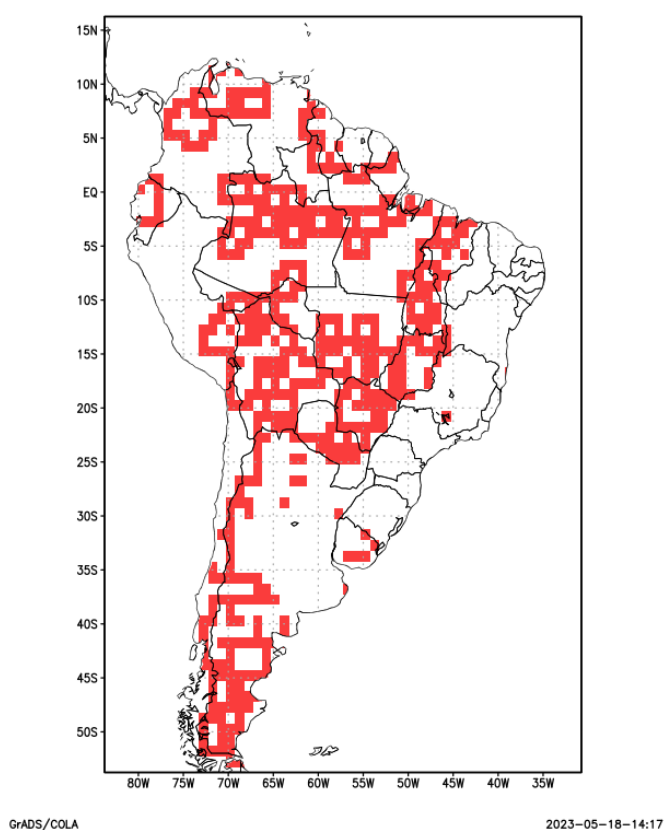
Para o caso em que houvesse dados tanto do HW quanto deste conjunto, priorizou-se os dados da ANA, uma vez que todo o processo de aquisição e tratamento foi feito no Laboratório de Meteorologia da UFPR (LABMET).

3.1.1.3. Conjunto de dados do GPCC.

Foi ainda utilizado o conjunto de dados da interpolação do GPCC (SCHNEIDER et al., 2011), com domínio temporal até dezembro de 2019, para maior preenchimento

das quadrículas sobre a América do Sul. Logo, foi necessário fazer uma transição suave entre o conjunto prévio (HW + Liebmann e Allured) e o do GPCC. Para cada passo temporal do conjunto de dados, se uma quadrícula com dado observado é vizinha de dado do GPCC (em quadrícula onde não havia dado observado), foi feita uma média entre o dado observado e o dado vizinho do GPCC e o valor foi alocado na quadrícula onde estava o dado do GPCC. A Figura 5 mostra, as quadrículas onde, para algum passo temporal, essa suavização foi feita.

FIGURA 4 – Quadrículas que, em algum passo temporal, passaram por suavização entre os dados observados e do GPCC.



O conjunto de dados de precipitação final, acumulados mensalmente, abrange a AS em uma grade de 1.0° para o período temporal de 1965-2021.

3.1.2. Dados de TSM, PNM, U e V.

Os dados de TSM são do conjunto HADISST1 (RAYNER et al., 2003), do *Hadley Centre*, e foram interpolados para uma grade de 1.0° e cortados para o período

de análise (65-21). Já os de PNM, U e V provém da Reanálise do *National Oceanic and Atmospheric Administration – National Centers for Environmental Prediction/National Centre of Atmospheric Research* (NOAA – NCEP/NCAR). Estes estão numa grade de 2.5° e também foram cortados para o período de 1965-2021.

3.2. SPI

O índice de precipitação padronizada (SPI, do nome em inglês, *Standardized Precipitation Index*) foi desenvolvido na Universidade do Estado do Colorado por McKee, Doesken e Kleist em 1993 (MCKEE et al., 1993, 1995; HAYES et al., 1999). Diversos estudos avaliaram a eficiência do SPI (LLOYD-HUGHES E SAUNDERS, 2002; ZARGAR et al., 2011; COSTA, 2016).

Por ser um índice no qual o único parâmetro de entrada é a precipitação, o ideal é que no seu cálculo sejam utilizados ao menos 30 anos de dados.

3.2.1. Período de Acumulação

O SPI mede, para dado local, anomalias de precipitação acumulada em dado período de interesse (por ex., 1, 3, 6, 12, 48 meses), com base na comparação com a série histórica de precipitação para este período. Por exemplo, para o período de três meses outubro-novembro-dezembro de 2022, a comparação é feita com a série histórica das precipitações em outubro-novembro-dezembro. Esta série é ajustada a uma distribuição de probabilidade Gamma, que é depois transformada em uma distribuição normal padronizada, de forma que o valor médio do SPI para aquele local e período seja zero e a variância seja um. Como os valores do SPI estão em unidades de desvio padrão da média de longo prazo, o indicador pode ser usado para comparar anomalias de precipitação para qualquer localização geográfica e para qualquer período de acumulação (escalas de tempo).

Para calcular o SPI deve-se inicialmente acumular a precipitação em um período de acumulação escolhido, sendo o valor atribuído ao último mês deste período. Por exemplo, se for escolhido um período de 3 meses, são calculados os acumulados trimestrais móveis (JFM, FMA, MAM, AMJ, ...) que são atribuídos ao último mês de cada trimestre: JFM é atribuído a março, FMA é atribuído a abril, etc.

A Tabela 5 demonstra que variando os períodos de acumulação, pode-se analisar eventos de seca em escalas de impacto diferentes. Por exemplo, SPI's de 1 a 6 meses normalmente são utilizados para descrever secas meteorológicas e agrícolas (umidade do solo), enquanto SPI's de períodos maiores são úteis para avaliar secas hidrológicas, com impactos em níveis de lagos e reservatórios. (HAYES et al., 1998; WMO, 2012),

TABELA 5 – Classificação de seca segundo o valor de acumulação SPI e seus respectivos impactos.

Escala de tempo (meses)	Denominação da seca	Impacto
1	Meteorológica	Qualidade do ar, saúde humana e stress agrícola
3	Agrícola	Condições de umidade do solo
6	Agrícola (estação seca/chuvosa)	Umidade em aquíferos subterrâneos
12	Hidrológica	Vazão de rios, níveis de corpos de água e reservatórios
24, 48 e 60	Socioeconômica	Disponibilidade e acessibilidade de produtos e serviços.

Fonte: adaptado de (WMO, 2012).

3.2.2. Distribuição gama e normalização

Inicialmente, calcula-se a série de totais acumulados móveis de precipitação em cada quadrícula e sequencialmente se ajusta uma função densidade de probabilidade (neste trabalho foi utilizada a função gama (THOM ,1958)) às séries de SPI de mesmo período de acumulação em cada quadrícula.

A definição da função densidade de probabilidade da distribuição gama é:

$$g(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{\left(\frac{-x}{\beta}\right)}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)}$$

onde $\alpha > 0$ é o parâmetro de forma, $\beta > 0$ é o parâmetro de escala, e $x > 0$ é a quantidade de precipitação.

A função gama é definida como:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} e^{-y} y^{\alpha-1} dy$$

sendo α e β estimados pelo método da máxima verossimilhança:

$$\hat{\alpha} = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}}{4A}$$

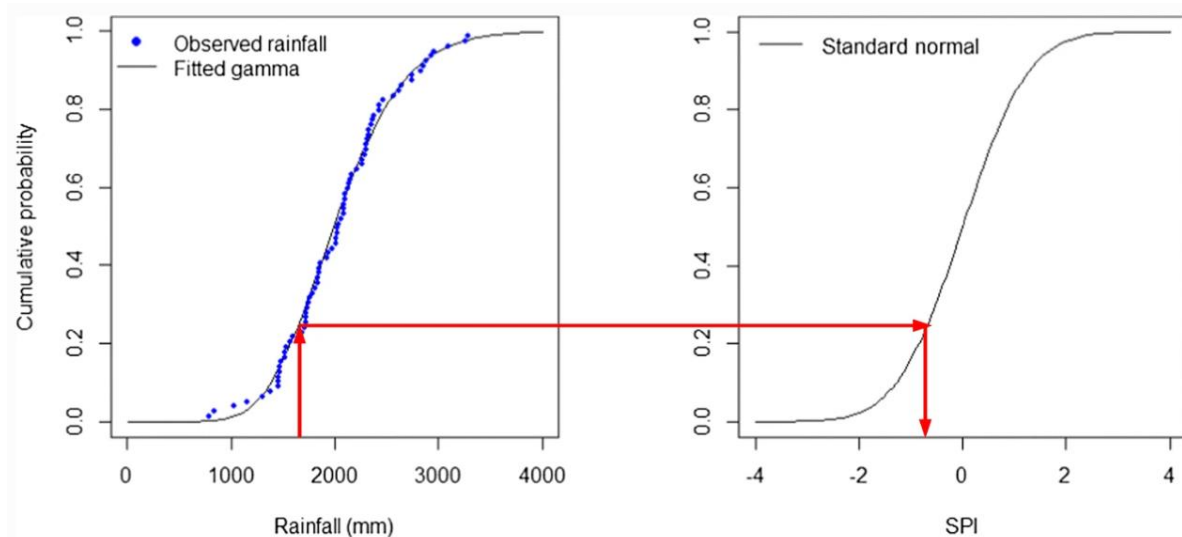
$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}}$$

onde, para n observações:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum \ln(x)$$

Por fim, cada função densidade de probabilidade é então transformada numa distribuição normal padronizada (média zero e desvio padrão 1) para obter o SPI (Figura 6). Desta forma, os valores do SPI são dados em desvios padrões onde o valor de SPI igual a zero é a mediana do volume de chuva do local.

FIGURA 6 – Exemplo de transformação de equiprobabilidade de uma função gama ajustada para uma distribuição normal padronizada.



Fonte: Shiau, 2020.

3.2.3. Interpretação

. A tabela abaixo permite vincular um dado SPI de uma série com a sua respectiva análise

Tabela 6 – Classificação de seca segundo o valor de SPI e sua correspondente probabilidade.

Valor SPI	Categoria	Probabilidade (%)
2.00 ou mais	Cheia Extrema	2.3
1.50 até 1.99	Cheia Severa	4.4
1.00 até 1.49	Cheia Moderada	9.2
0 até 0.99	Levemente Úmido	34.1
0 até -0.99	Levemente Seco	34.1
-1.00 até -1.49	Seca Moderada	9.2
-1.50 até -1.99	Seca Severa	4.4
-2.00 ou menos	Seca Extrema	2.3

Fonte: adaptado de Lloyd-Hughes e Saunders, 2002 e WMO, 2012.

Calculou-se no presente estudo o SPI para 3, 6, 12, 24, 48 e 60 meses.

3.3. ESTATISTICA DE EVENTOS EXTREMOS DE SECA

3.3.1. Tempo característico

O Tempo Característico (T_o) permite avaliar a persistência de eventos de seca, ou cheia acima do normal em um determinado local (TRENBERTH, 1984; MO e SCHEMM, 2008).

A equação abaixo descreve como ele é calculado:

$$T_o = 1 + 2 \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{i}{N}\right) R(i)$$

Onde $R(i)$ é a função de autocorrelação do SPI, cuja defasagem (lag) i varia com $i = 1 - 30$ meses, $N = 30$ e T_o é dado em meses.

3.3.2. Contagem de eventos extremos

Foi realizada a contagem de eventos de seca severa ($SPI < -1.5$) e seca extrema ($SPI < -2.0$), utilizando um programa que analisa toda a série temporal de uma quadricula e conta quantas vezes foi ultrapassado o limiar estabelecido nos dois sentidos, entrando e saindo da categoria analisada (severa ou extrema), resultando um mapa com a contagem de eventos para cada quadrícula. Tal script permite analisar a série temporal tanto sazonalmente quanto completamente.

A fim de exemplificar o funcionamento do programa, a série SPI3 da quadrícula de Curitiba é mostrada na Figura 7. Note que a contagem visual indica que 13 vezes a série ultrapassou o limiar de -2.0 , entrando e saindo da categoria de seca severa. Tal resultado é confirmado na Figura 8.

FIGURA 7 – Série SPI3 para a quadrícula de Curitiba (1966-2021).

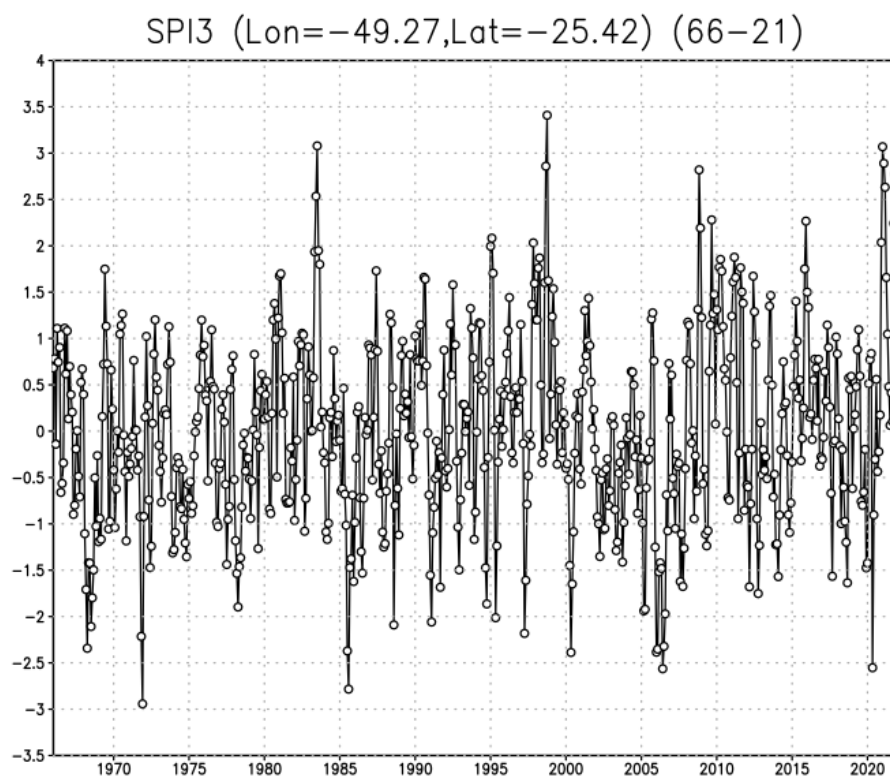
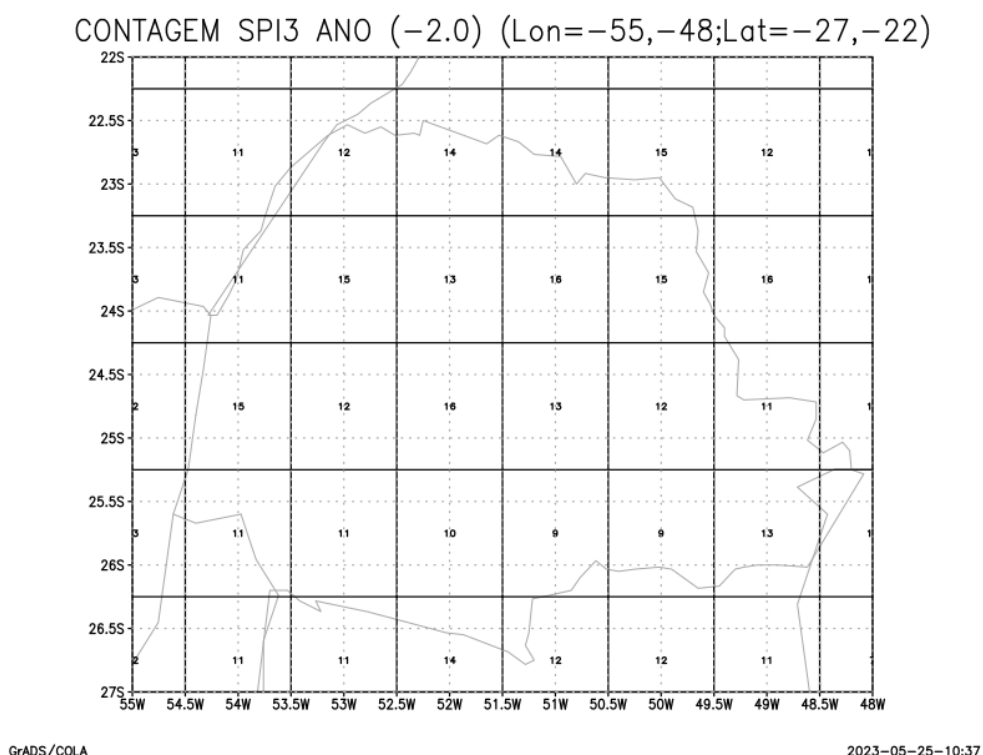


FIGURA 8 – Contagem de eventos extremos da série total do SPI3 (ANO) para a região do estado do Paraná.



3.3.3. Duração máxima

A fim de analisar a intensidade e persistência de eventos em cada quadrícula, calculou-se a duração máxima de eventos de seca extrema ($SPI \leq -2$) e severa ($SPI \leq -1.5$), selecionando o período de maior duração no qual o SPI se manteve abaixo do limiar escolhido.

A Figura 9 apresenta a série SPI6 para o período temporal total (1966-2021) e a Figura 10 mostra a fatia temporal 2005-2015 da mesma série, onde se situa a duração máxima de seca extrema na quadrícula de Curitiba. Observa-se que entre 2006 e 2007 a série SPI6 manteve-se continuamente abaixo do limiar -2 por 7 meses. Este mesmo valor foi encontrado pelo programa de duração máxima (Figura 11).

FIGURA 9 – Série SPI6 para a quadrícula de Curitiba (1966-2021).

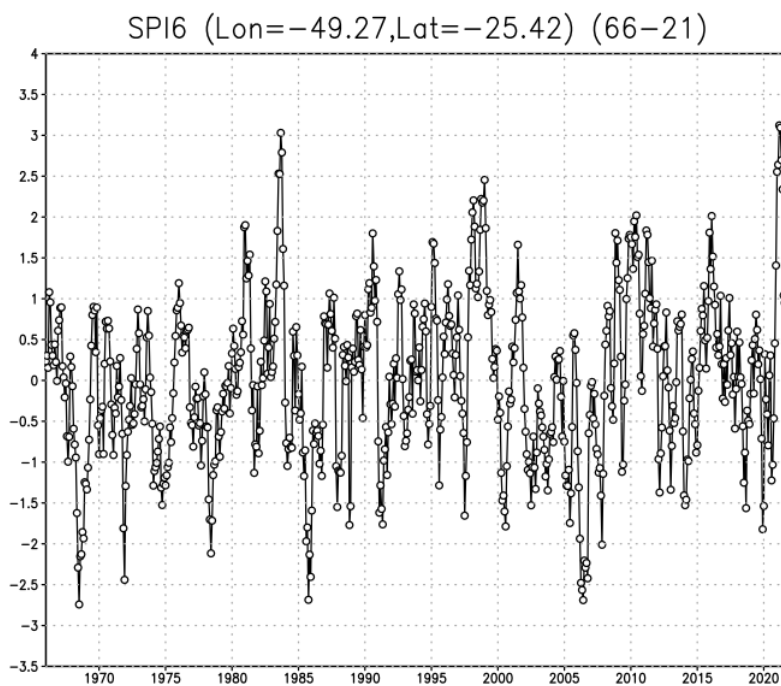


FIGURA 10 – Série SPI6 para a quadrícula de Curitiba (2005-2010).

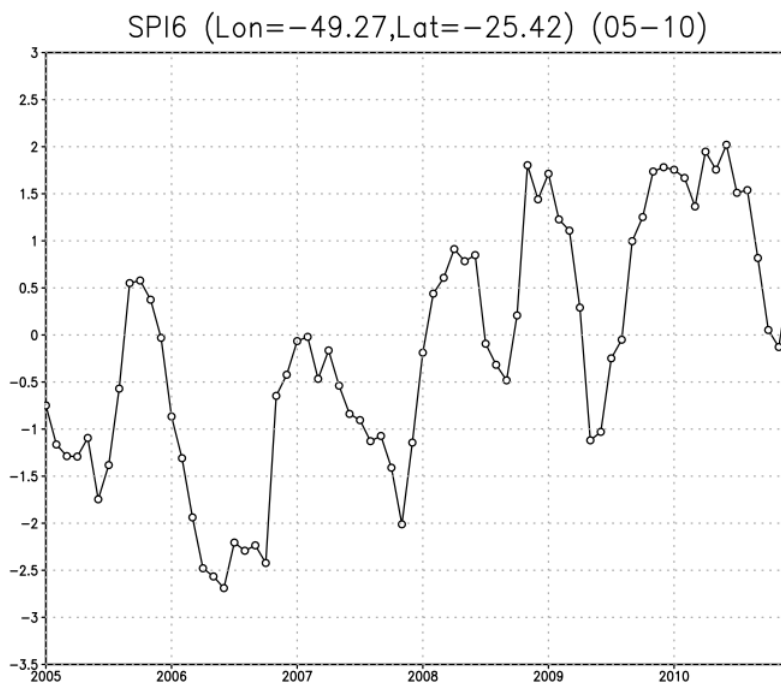
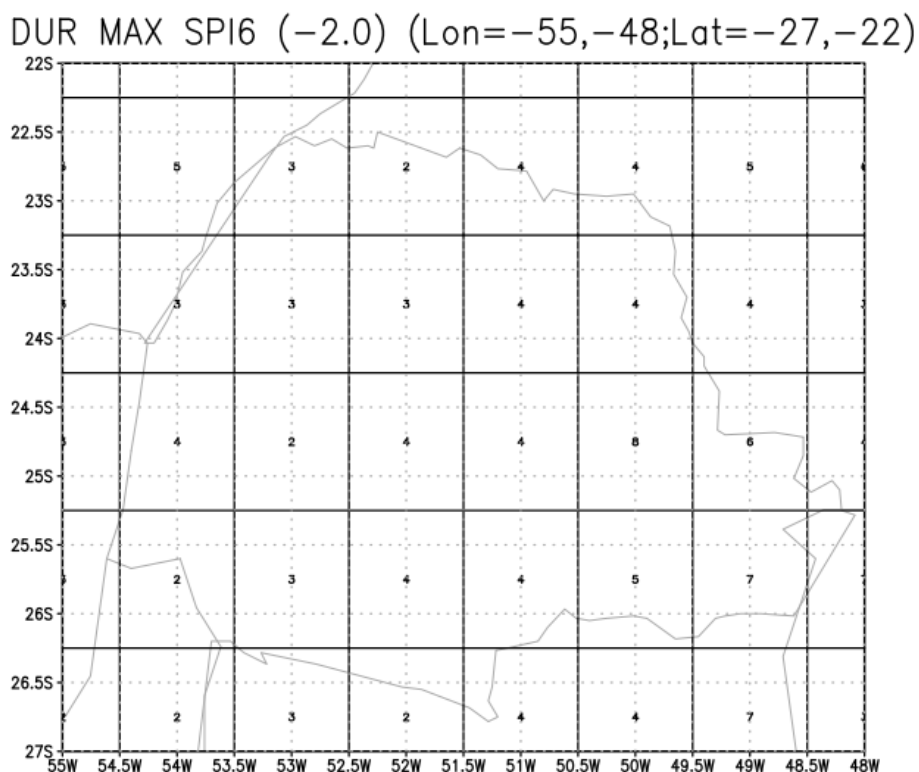


FIGURA 11 – Duração máxima de eventos extremos da série total do SPI6 para o Estado do Paraná.



3.3.4. Duração média

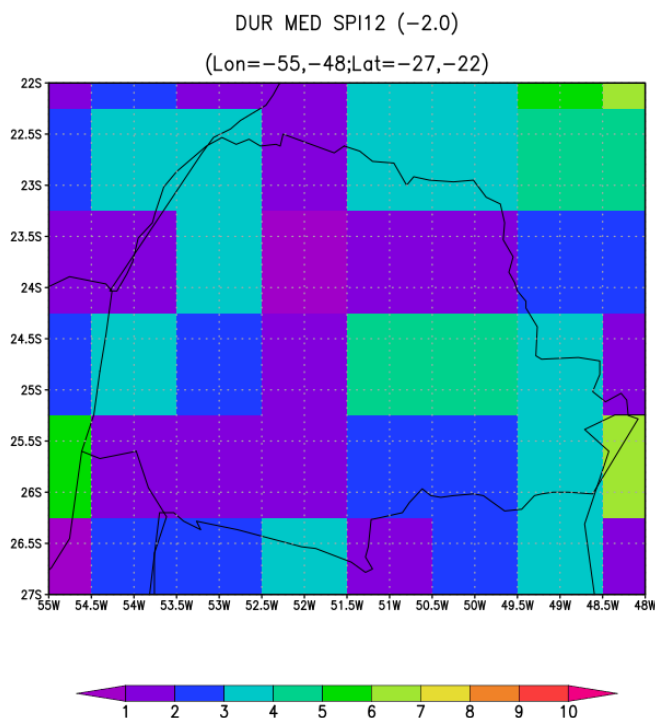
A duração média foi calculada com o propósito de identificar a persistência dos eventos de seca extrema ($SPI \leq -2$) e severa ($SPI \leq -1.5$). Para tanto, utilizou-se do cálculo que se segue:

$$Duração\ Média = \frac{(Número\ total\ de\ meses\ em\ dada\ categoria\ de\ seca)}{(Número\ de\ eventos\ em\ dada\ categoria\ de\ seca)}$$

O denominador da equação já foi calculado pelo programa Contagem de Eventos (seção 3.4.2). Já o numerador é obtido pela enumeração da quantidade de vezes que o SPI esteve abaixo do limiar. Tomou-se o cuidado para que seja somado um evento na quantidade de eventos no caso em que o último dado da série esteja abaixo do limiar.

A duração máxima do SPI12 para a região do Paraná utilizando o limiar de seca extrema ($SPI \leq -2.0$) é exibido na Figura 12.

Figura 12 – Duração máxima de eventos extremos da série total do SPI12 para a região do estado do Paraná.



3.4. Análise de componentes principais

Também conhecida como Função Empírica Ortogonal (EOF, do inglês *Empirical Orthogonal Function*), a Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica de análise estatística multivariada que foi idealizada por Karl Pearson em 1901. Seu cálculo consiste na utilização de métodos estatísticos de álgebra linear para resumir um grande conjunto de dados (WILKS, 2006) e devido à sua abrangência, é comumente usada como ferramenta exploratória de dados.

A ACP transforma uma série de dados com muitas variáveis em uma série com menor número de variáveis, que são combinações lineares dos dados da série original. A ACP consegue representar 100% da variação total do conjunto. Elegeu-se a modalidade que utiliza a matriz de correlação ao invés da matriz de covariância, uma vez que a primeira produz resultados em função do desvio padrão. Na ACP é possível rotacionar os autovetores, isolando assim os padrões de mesma origem física que podem aparecer misturados nos modos sem rotação. Isso facilita a interpretação física dos modos (RICHMAN, 1986). A rotação utilizada neste trabalho foi a Varimax ortogonal.

Os *Factor Loadings* (FL) e os *Factor Scores* (FS), que respectivamente representam a distribuição espacial e temporal dos modos de variabilidade obtidos da ACP, devem ser interpretados em conjunto para cada um dos modos gerados. Na análise da evolução temporal, considera-se um período de fase positiva de um modo aquele no qual o componente principal (ou FS), é igual ou supera +0,7 desvio padrão, enquanto os períodos de fase negativa têm FS igual ou abaixo de -0,7 desvio padrão. A fase neutra ocorre para valores no intervalo entre estes dois valores.

Considerando a ACP da precipitação, se um modo possui forte FL em certa região, ele representa bem a variabilidade daquela região. Se o FL em certa região for positivo conjuntamente com o FS em certo passo de tempo, neste passo de tempo a chuva está acima da média naquela região, enquanto passo de tempo com FS negativo é considerado seco naquela região. Por outro lado, se o FL for negativo numa região e o FS for positivo num dado passo de tempo, a chuva estaria abaixo da média (ou seca), enquanto se o FS for negativo a chuva estaria acima da média naquela região e naquele passo de tempo.

3.5. CORRELAÇÃO

As séries temporais da ACP de SPI (FS) foram correlacionadas com as séries de medias móveis de TSM sobre seu correspondente tempo de acumulação, para conectar a variabilidade deste índice com a variabilidade oceânica. O oposto, para realizar uma verificação cruzada, também foi executado, ou seja, foram correlacionadas as séries de SPI com os componentes principais dos modos de TSM média sobre o mesmo período de acumulação do SPI.

Para descrever uma relação linear entre os conjuntos x e y, utilizou-se o Coeficiente de Correlação de Pearson:

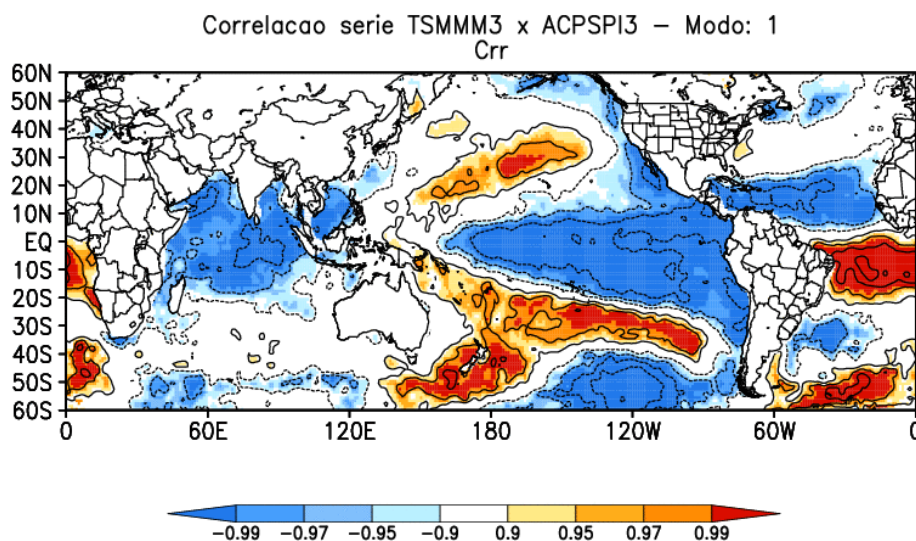
$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2)} \sqrt{(\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2)}}$$

O coeficiente adimensional r varia entre os valores de -1,0 e 1,0, sendo que valores próximos a 1,0 indicam que as séries variam conjuntamente, enquanto valores

próximos a -1,0 indicam que as duas séries variam inversamente. Valores de r próximos a zero não necessariamente significam que não existe relação entre as duas séries, pois pode existir uma relação não linear.

A Figura 13 abaixo exemplifica um campo de correlação entre séries de TSM em todo o globo e o primeiro modo rotacionado de SPI3.

FIGURA 13 – Exemplo de correlação entre o primeiro modo rotacionado de SPI3 e série de TSM média móvel 3. A barra de cores indica níveis de confiança. As cores vermelhas (azuis) indicam correlação positiva (negativa) com significância melhor que 0,10.



3.6. COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS

Foram realizadas composições de anomalias a fim de caracterizar alterações de campos atmosféricos e oceânicos associados com secas persistentes. Para tanto, foram utilizadas as variáveis atmosféricas potencial de velocidade, associada ao vento divergente (VPOT) e função corrente (PSI), além da TSM, PNM e Precipitação (PPT).

O procedimento do método é semelhante ao que foi executado por Saboia e Grimm (2010), partindo de um estudo de seca através dos modos de SPI e realizando as composições de anomalias para um período caracterizado como secade uma das variáveis. O teste de significância utilizado é o t de Student, no qual a estatística z é dada pela seguinte equação:

$$z = \frac{(\bar{x} - \bar{y})}{\sqrt{\frac{s_x^2}{n_x} + \frac{s_y^2}{n_y}}}$$

Onde \bar{x} e \bar{y} são as medias, s_x e s_y os desvios padrões e n_x e n_y o número de termos das séries.

O número de graus de liberdade v é dado por:

$$v = \frac{\left\{ \frac{s_x^2}{n_x} + \frac{s_y^2}{n_y} \right\}}{\frac{\left(\frac{s_x^2}{n_x} \right)^2}{n_x - 1} + \frac{\left(\frac{s_y^2}{n_y} \right)^2}{n_y - 1}}$$

4. RESULTADOS

Os SPI's foram calculados para os tempos de acumulação 3, 6, 12, 24, 48 e 60. Como a acumulação dos dados em n meses causa a criação de dados indefinidos em n-1 meses, as séries de SPI de diferentes tempos de acumulação tem comprimento diferente. Por exemplo: para o SPI3, o mês de janeiro, fevereiro e março foram acumulados no terceiro mês, fazendo com que os dois primeiros se tornassem indefinidos. A Tabela 7 mostra o novo período temporal utilizado após o recorte.

TABELA 7: Período temporal de cada série SPI após o corte temporal.

Período de acumulação	Novo intervalo temporal
SPI 3, 6 e 12	1966-2021
SPI 24	1967-2021
SPI 48	1969-2021
SPI 60	1970-2021

Em todas as análises que se sucederão foram usadas as séries de SPI em algum ponto.

As figuras dos resultados estão nos Anexos (seção 6), para facilitar sua organização.

4.1. ESTATÍSTICA DE EVENTOS DE SECA

No cálculo do número de eventos, duração média e duração máxima, foram utilizadas as séries de SPI com período de acumulação de até 12 meses. Já na análise do tempo característico, optou-se por utilizar todas as séries SPI criadas.

4.1.1. Contagem dos Eventos de Seca

Foi feita a contagem de eventos de seca severa (limiar -1.5) e seca extrema (limiar -2.0) para a série temporal toda (ANO) e para cada uma das estações. Nos títulos das imagens, VER significa Verão, PRI denota Primavera, OUT corresponde a Outono e INV é sigla para inverno. Para facilitar a comparação, foi mantido para todos os resultados, exceto para a contagem total de secas severas, o mesmo intervalo de

cores e, eles são apresentados de acordo com o domínio temporal, ou seja, os resultados para secas extremas e severas para o verão são apresentados sequencialmente, por exemplo.

As Figuras 14 e 15 mostram que para maior tempo de acumulação há menor quantidade de eventos de seca severa e extrema, sendo que para SPI3 o número é bem maior que para o SPI6 e SPI12. Para tempo de acumulação menor, há maior quantidade de eventos, mas de curta duração. O aumento do tempo de acumulação acaba integrando vários eventos deste tipo num evento só, diminuindo o número de eventos. Contudo, o número de meses que ultrapassam o limiar de cada categoria de seca não muda basicamente com o tempo de acumulação do SPI (ver TABELA 6).

As Figuras 14 e 15 mostram um grande número de eventos de seca severa e extrema em todo continente segundo o SPI3. O número diminui notavelmente para SPI6 e ainda mais para SPI12. Como característica comum, observa-se que menos eventos de seca severa e extrema ocorrem na Amazônia, principalmente na sua parte oeste, o que pode ser devido à característica de filtração da floresta (MARENGO *et al.*, 2018). Analisando a Figura 14, vê-se que SPI6 mostra grande número de secas severas numa área limitada do Centro-Leste do Brasil, enquanto na Fig. 15 mostra um número bem menor de eventos extremos, mas espalhados mais uniformemente por área bem maior. Isto sugere que, embora eventos extremos sejam menos numerosos, eles têm escala espacial maior, dependem de fatores de maior escala. Neste contexto, enquanto no norte do Nordeste o SPI6 indica número menor de secas severas que no Centro-Leste do Brasil, o número de secas extremas é semelhante. Isto sugere que uma fração maior das secas no Nordeste evoluem para secas extremas, característica que influenciou a construção da transposição do Rio Francisco. Analisando SPI12, estas diferenças entre distribuição espacial de número de secas severas e extremas não são tão notáveis, desde o Nordeste até o Sul do Brasil, provavelmente devido ao maior tempo de acumulação.

A contagem de eventos de seca por estação do ano (FIGURAS 16 a 22) só permite alguma interpretação se for usado SPI3 e SPI6, tendo em vista que para SPI12 é considerada a acumulação para um ano inteiro e todas as suas estações. Maiores diferenças aparecem para SPI6.

O número de eventos de seca tem relação com a variabilidade climática. Mesmo assim, não é possível uma interpretação para cada estação. Portanto, serão feitos comentários mais gerais. Comparando as Figuras 16-17 com 22-23, pode-se

ver que no Centro-Leste do Brasil, região com estação chuvosa no verão austral, há maior número de eventos severos e extremos de seca na primavera (e estação anterior, inverno) do que no verão (e estação anterior). Este aspecto pode estar ligado à descoberta de Grimm et al. (2007), confirmada em Grimm e Zilli (2009), de que há tendência à inversão de sinais de anomalias de precipitação nesta região da primavera para o verão e que esta tendência é mais forte quando há seca na primavera. É maior também nessa região o número de eventos de seca no inverno (FIGURAS 20-21) do que no outono (FIGURAS 18-19), indicando um comportamento mais similar entre inverno e primavera e entre verão e outono.

4.1.2. Duração Média dos Episódios de Seca

As Figuras 24 e 25 representam a duração média de eventos de seca severa e extrema, respectivamente. A análise do SPI3, em ambos os casos, indica que episódios que afetam apenas a umidade do solo, não costumam perdurar por grande tempo. Eventos de maior duração média ocorrem na Região Amazônica e noroeste do continente. Quanto maior é o período de acumulação do SPI, maior é a duração do evento indicado por ele, pois o aumento do tempo de acumulação acaba integrando vários eventos de mais curta duração indicados por SPI de menor período de acumulação.

Altamiro e Sansigolo (2010) reportam que secas severas têm duração média maior nos estados de Goiás, norte de São Paulo e o sul de Minas Gerais. Tais padrões são vistos parcialmente nos resultados aqui apresentados, indicando que os dados utilizados pelos pesquisadores, que são da reanálise, não dão resultados iguais aos de dados observados.

Apointa-se também que eventos extremos e severos afetam a Região Sul do Brasil por pequeno intervalo médio de tempo. Logo, esta região é relativamente pouco afetada por eventos duradouros de secas hidrológicas, favorecendo as atividades agrícolas.

4.1.3. Duração Máxima dos Episódios de Seca

A Figura 26 apresenta a duração máxima de eventos de seca com limiar -1.5 e a Figura 27, com limiar -2.0. Coerentemente com os resultados sobre duração média, os maiores valores de duração máxima se concentram mais na Região Amazônica e noroeste do continente. No entanto, o SPI12 indica também casos extremos com duração acima de 20 meses no Nordeste do Brasil, numa faixa passando pelo norte de São Paulo e sul de Minas Gerais e pelo norte de Mato Grosso do Sul e sul de Goiás (abrangendo o limite sul da ZCAS), além do Centro-Norte da Argentina. O 1°, 2° e 4° modos de variabilidade interdecadal da chuva de verão possuem fortes componentes nestas regiões, onde verão é a estação chuvosa ou parte dela (GRIMM E SABOIA, 2015).

As regiões com mais altas durações máximas dos eventos de seca são, em sua maioria, as mesmas regiões com maiores durações médias (FIGURA 24 e 25). O mesmo padrão foi observado por Lloyd-Hughes (2002) para a Europa, sugerindo que as durações médias de secas podem ser dominadas por poucos eventos especialmente longos.

4.2. TEMPO CARACTERÍSTICO

O Tempo Característico do SPI 3, 6 e 12 é mostrado na Figura 28 enquanto os resultados para os SPI's 24, 48 e 60 são exibidos na Figura 29. Este índice indica a persistência de eventos, sejam eles de cheia ou de seca, logo, a análise destes resultados em conjunto com os demais resultados apresentados na seção 4.1. é frutífera.

Os períodos de acumulação de até dois anos indicam maior persistência na Região Amazônica e noroeste da América do Sul. Estas mesmas regiões se destacaram por terem menor número de eventos de seca (FIGURAS 14 e 15) e maior duração média e máxima (FIGURAS 24 a 27), confirmando que regiões com menor quantidade de casos de secas apresentam maior duração ou persistência.

O tempo característico aumenta, de maneira geral, com o tempo de acumulação. Nota-se que os maiores tempos característicos estão na parte oeste do continente, com menores valores predominando na parte leste, o que é mais notável para SPI3, 6, 12. SPI 24 já indica valores maiores também no Centro-Leste do Brasil.

Para os SPI's de 48 e 60 meses, o tempo característico se torna mais homogêneo em todo o continente, com valores superiores ao limiar superior da escala. O sudeste da América do Sul, especialmente o Sul do Brasil, desponta como uma região com valores menores, indicando mais baixa persistência de eventos que resultam em impactos socioeconômicos.

A análise final indica, como encontrado por Costa (2016), que a persistência de eventos é maior no oeste do continente (principalmente no Peru e Colômbia) do que do lado leste do continente.

4.3. SPI E SUA VARIABILIDADE

Na sequência, serão apresentados alguns modos de variabilidade das séries de SPI's criadas (Tabela 7) na variabilidade total para meses corridos, verão, primavera, outono e inverno. Não serão apresentados todos os resultados obtidos, pois a análise ficaria demasiadamente extensa. Foi dada preferência a modos de variabilidade com maior importância para o Brasil.

O primeiro modo rotacionado da ACP do SPI3 para meses corridos do ano inteiro (FIGURA 30; 5,48% da variância) mostra um forte componente de variabilidade sobre o Nordeste do Brasil, indicando chuva acima da média em sua fase positiva. Também se observa uma fraca variabilidade em sentido oposto no noroeste do continente.

Como o SPI3 acumula dados de 3 meses, para representar apenas cada estação do ano deve-se utilizar apenas o SPI3 do último mês de cada estação, A Tabela 8 lista os meses do SPI3 que retratam cada estação do ano.

TABELA 8: Mês do índice SPI3 e sua estação correspondente.

Mês do SPI3	Estação correspondente
Fevereiro	Verão
Junho	Outono
Agosto	Inverno
Novembro	Primavera

O terceiro modo do verão é apresentado na Figura 31 (5,04% da variância) e o primeiro modo da primavera é exibido na Figura 32 (variância 9,64%). Ambos correspondem ao apresentado na Figura 30 para meses corridos.

Foi selecionado o quinto modo rotacionado de SPI12 de meses corridos (FIGURA 33) para fazer uma análise conjunta deste modo com um evento de ENOS. Ocorrências de *La Niña* geralmente estão associados com secas no Sul do Brasil (TEDESCHI, CAVALCANTI E GRIMM, 2013) e em 2012 um forte evento resultou em uma estiagem que afetou, inclusive, a capital paulista.

A Figura 34, dividida em 3 modos, mostra os FS e FL do SPI de acumulação de (a) 12 meses para meses corridos, (b) SPI12 para primavera e (c) SPI12 para verão. Este modo é conhecido como o dipolo da AS, e optou-se por apresentá-lo para execução da análise do maior ou menor impacto de alguma estação do ano na modulação do FS de meses corridos. Em (c), nota-se que no ano 2017 houve um verão seco na região de Minas Gerais e em estados vizinhos. Tal impacto pode ser facilmente observado na divisão de meses corridos (a), mas não na primavera (b). Logo, uma análise sazonal permite interpretar qual foi a estação do ano de maior contribuição a uma seca de escala anual.

4.4. CORRELAÇÃO

4.4.1. Modos de SPI e séries de TSM

A presente seção destina-se a apresentar correlações entre os modos de SPI's 3, 6 e 12 meses para meses corridos e as séries de TSM global com média móvel de 3, 6 e 12 meses, respectivamente. Tais correlações podem indicar fontes da variabilidade observada do SPI, a partir das anomalias de TSM associadas com essa variabilidade, uma vez que variabilidades oceânicas e atmosféricas estão ligadas.

4.4.1.1. SPI de 3 meses

O primeiro modo rotacionado de SPI3 para meses corridos (5,48% da variância, FIGURA 35a), já apresentado anteriormente, possui forte componente positivo sobre o Nordeste brasileiro. A correlação deste modo com a série de TSM apresenta significativos valores negativos sobre o Pacífico equatorial central-leste o que se

assemelha a padrão de anomalias de eventos *La Niña*, e significativos valores positivos (negativos) no Atlântico Sul (Norte) equatorial. Este resultado é coerente com o que se esperava, pois sabe-se que anomalias positivas de precipitação na Região Nordeste do Brasil estão diretamente relacionadas a eventos de ZCIT (e de TSM mais quente) deslocada para o sul e de eventos negativos de ENOS.

O segundo modo rotacionado de SPI3 para meses corridos (5,35% da variância, FIGURA 35b) possui fortes componentes sobre o Centro-Leste do Brasil e forma um dipolo com o sudeste da América do Sul. Lembra o primeiro modo interdecadal de primavera e de verão de Grimm e Saboia (2015). Sua correlação com a série de TSM com média móvel de 3 meses é forte e negativa sobre o Atlântico Sul subtropical e negativa sobre o Atlântico Norte extratropical. Destacam-se também valores positivos sobre a região extratropical do Pacífico Sul e Atlântico Sul, além de negativos no Pacífico Norte.

O terceiro modo rotacionado de SPI3 para meses corridos (4,08% da variância, FIGURA 36a) apresenta forte componente positivo no norte do continente, abrangendo a Colômbia, Venezuela e as Guianas. Além destes, quatro estados do Brasil são atingidos, sendo eles: Amazonas, Roraima, Pará e Amapá. Uma forte correlação negativa com o Pacífico Equatorial é indicada, apontando que eventos ENOS negativos canônicos impactam diretamente com chuvas nestes territórios.

O quarto modo rotacionado de SPI3 para meses corridos (3,32% da variância, FIGURA 36 (b)) não representa nenhum modo físico conhecido. Tal constatação é comprovada ao observar a sua correlação com TSM, onde nenhum padrão consistente é formado. Isso ocorreu devido ao uso de dados interpolados do GPCC para a região destacada, que pecam em qualidade frente aos dados observados.

O quinto modo rotacionado de SPI3 para meses corridos (3,09% da variância, FIGURA 37 (a)) apresenta forte componente positivo no Sudeste brasileiro. A correlação com a série de TSM revela valores significativos positivos no Oceano Pacífico equatorial leste e negativos no Atlântico tropical Norte. Para este modo e o seguinte, como a variância é baixa, as correlações se tornam menos significativas.

O sexto modo rotacionado de SPI3 para meses corridos (2,60% de variância, FIGURA 37 (b)) exhibe forte, e concentrada, componente sob o Paraguai, Paraná, Mato Grosso do Sul e Santa Catarina. Fortes correlações significativas positivas são observadas no Pacífico equatorial leste (padrão El Niño) e junto a costa brasileira.

Dos seis modos aqui apresentados, quatro estão diretamente relacionados com eventos ENOS. Entretanto, esta variabilidade oceânica, além de variar bastante em relação a sua extensão espacial, quando combinada com outras oscilações, causa diferentes tipos de impactos na América do Sul. Resultado similar foi apresentado por Costa (2016) e Alves (2019).

4.4.1.2. SPI de 6 meses

No primeiro modo rotacionado de SPI6 para meses corridos (5,99% da variância, FIGURA 38(a)) destacam-se fortes componentes positivas no Nordeste brasileiro, com fracas componentes negativa no noroeste do continente, semelhante ao primeiro modo rotacionado de SPI3 (FIGURA 35a). O resultado do cálculo da correlação com a série de dados de TSM é também semelhante ao resultado da Figura 35a, apenas levemente mais fraco, o que é explicado pelas médias temporais mais longas, que suavizam relações que são mais fortes em menores intervalos de tempo.

O segundo modo rotacionado de SPI 6 para meses corridos (5,66% da variância, FIGURA 38(b)) é também semelhante ao segundo modo rotacionado de SPI3 (FIGURA 35b), assim como sua correlação com TSM.

O terceiro modo rotacionado de SPI6 para meses corridos (4,69% da variância, FIGURA 39) é semelhante ao quarto modo rotacionado do SPI3 (FIGURA 36b) e ambos não representam um modo de variabilidade física.

4.4.1.3. SPI de 12 meses.

Assim como na seção anterior, devido ao ruído incluído nos modos, apenas os dois primeiros modos de SPI12 rotacionados serão apresentados.

O primeiro modo rotacionado de SPI 12 para meses corridos (7,90% da variância, FIGURA 40 (a)) corresponde ao primeiro modo de SPI 3 e de SPI 6. Sua correlação com a série de TSM apresenta os mesmos padrões apresentados na correlação entre esses modos e a TSM, apenas mais fracos.

O segundo modo rotacionado de SPI 12 para meses corridos (6,30% da variância, FIGURA 40 (b)) é semelhante ao modo 4 de SPI 3 e ao modo 3 de SPI 6 e não representa um modo de variabilidade física.

4.4.2. Modos de TSM e séries de SPI

Esta seção, que é uma abordagem complementar da seção anterior, apresenta-se os resultados das correlações entre os modos de meses corridos de série de TSM global que foram filtradas por médias móveis de 3, 6 e 12 meses e as séries de SPI 3, 6 e 12, respectivamente. Isso foi feito a fim de se realizar uma correlação cruzada e destina-se a indicar relações na América do Sul, nas quais o SPI pode ter variabilidade produzida por modos de variabilidade oceânica, pois é sabido que variabilidades oceânica e atmosférica são associadas.

Apesar das médias móveis diferentes, as três séries de TSM apresentam modos muito parecidos, mas devido à mistura de dados, as correlações não ficaram com grandes regiões significativas e, portanto, será apresentado apenas o resultado correspondente ao modo ENOS de TSM.

Na Figura 41, são apresentados o primeiro modo da média móvel de 3 meses da TSM global (FIGURA 41a, 10,63% da variância), o segundo modo da média móvel de 6 meses (FIGURA 41b, 11,53% da variância) e o segundo modo da média móvel de 12 meses (FIGURA 41c, 12,72% da variância). Este modo, em sua fase positiva, corresponde ao *El Niño* e, a negativa, ao *La Niña*. A forte correlação positiva com SPI na Região Sul do Brasil, que monta um dipolo com o NEB, é um padrão característico da Oscilação ENOS e aparece na terceira linha da Fig. 41,

4.5. COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS

Para descrever os padrões anômalos da circulação atmosférica, de TSM e PNM em eventos de seca relevantes no verão, montaram-se composições de anomalias relativas às fases negativas de três modos relevantes de SPI3 de fevereiro, que representa o verão. Foram escolhidos para a composição, no mínimo, quatro eventos de secas bem representadas por um dos modos de ACP selecionados. Esta seleção foi feita a partir da região de mais fortes FL de cada modo e a Tabela 9 lista os modos selecionados, as suas respectivas figuras, junto com os limiares utilizados. Os anos que ultrapassam esses limiares foram utilizados para fazer a composição de anomalias.

TABELA 9: Modos selecionados do ACP SPI3 de fevereiro com os seus respectivos anos que ultrapassaram o limiar escolhido.

Modo	Limiar	Anos
Modo 2 (Figura 42a)	-1.45	1971, 1984, 1987, 1995, 2006
Modo 3 (Figura 42b)	-1,45	1966, 1983, 1993, 2015
Modo 4 (Figura 42c)	-1.5	1968, 1978, 1991, 2005, 2006, 2012

A partir dos meses da Tabela 9, calculou-se a média dos verões anômalos, gerando um dado com três meses, para cada modo, que representa a média das anomalias de verão para os anos a partir do limiar escolhido. Estas novas séries, em conjunto com a série total de SPI3 e da série de ACP SPI3 de fevereiro, foram utilizadas para esta investigação.

Devido à mistura dos conjuntos de precipitação utilizados, que geraram as séries SPI's, foi necessário diminuir o nível de significância de cada modo e eles são apresentados no título de cada figura. A apresentação dos resultados será feita separando-se os modos.

4.5.1 Segundo modo de SPI3 de fevereiro (para o verão)

A composição de anomalias de precipitação na AS (Figura 43a) apresenta anomalias negativas fortes no Centro-Leste do Brasil (grande parte do Sul do NEB, Minas Gerais e Tocantins), indicando chuva abaixo da média nestas regiões nos anos selecionados. Estas regiões apresentam os mais fortes FL do segundo modo da Figura 42a. Na Colômbia, uma forte anomalia positiva significativa indica excesso de chuva. quando há seca nestas regiões.

Na Figura 43b, uma anomalia negativa de TSM é observada no Atlântico Equatorial. Outras duas são constatadas no Pacífico Central e Oceano Índico. Na Figura 43c são mostradas as anomalias correspondentes de PNM.

A influência remota de anomalias de TSM não parece clara. A convergência em altos níveis e consequente subsidência aparece no potencial de velocidade e vento divergente em altos níveis (FIGURA 44a).

Além da anomalia positiva de PNM sobre o Sudeste (FIGURA 43c), aparece uma anomalia ciclônica em altos níveis (FIGURA 44b, c), que provavelmente estão associadas a uma anomalia anticiclônica em baixos níveis, que carrega umidade para o sul, produzindo seca no Centro-Leste.

4.5.2 Terceiro modo de SPI 3 de fevereiro (para o verão)

A Figura 45a apresenta fortes anomalias negativas de precipitação no Nordeste da América do Sul, representando seca na região que corresponde aos mais fortes FL do terceiro modo da Figura 42b, assim como fortes anomalias positivas na Colômbia, Equador e Sul do Brasil. Vinculado a isso, nota-se uma forte anomalia positiva de TSM no Pacífico Central-Leste (FIGURA 45b), caracterizando um evento de *El Niño*, e uma anomalia negativa de TSM no Atlântico Sul equatorial.

Anomalias positivas de TSM correspondem, em geral, a anomalias negativas de PNM, o que pode ser visto na composição de anomalias de pressão no nível do mar na Figura 45c. Sobre o NEB e Atlântico Equatorial predominam anomalias positivas de PNM, que desfavorecem chuva, e sobre todo o Pacífico Central-Leste se observam anomalias fortemente negativas.

Vinculada à fase positiva de ENOS, esta distribuição de anomalias de pressão gera convergência de ar em altos níveis sobre o nordeste da América do Sul (FIGURA 46a) e divergência em baixos níveis, gerando seca. Por outro lado, gera convergência em baixos níveis (e divergência em altos níveis, como mostrado na Figura 46a), favorecendo a formação de nuvens e chuva no sudeste do continente. Já na análise do Atlântico Equatorial e do NEB, anomalias negativas de TSM no Atlântico Sul equatorial e anomalia de PNM positiva dificultam formações de nuvens devido à subsidência do ar e sua convergência em altos níveis (FIGURA 46a). A Função Corrente (PSI e PSZA), em altos níveis (200 hPa, FIGURA 46b, c)), indica circulação ciclônica no Atlântico Equatorial em torno do equador, confirmando o movimento descendente do ar na região.

4.5.3 Quarto modo de SPI3 de fevereiro (para o verão)

As composições de anomalias para episódios de secas no Sul do Brasil, onde estão os mais fortes FL do quarto modo da Figura 42c, são apresentadas na Figura

47, para PPT, TSM e PNM. A forte seca observada no Sul do Brasil (FIGURA 47a) é ligada a eventos *La Niña* (FIGURA 47b), com anomalias positivas de PNM (FIGURA 47c) no Pacífico Central-Leste e no sudeste da América do Sul (FIGURA 47c) e convergência em altos níveis nestas regiões (FIGURA 48a). A forte subsidência no Pacífico é confirmada por um par de ciclones em altos níveis no Pacífico Central-Leste em torno do equador e no sudeste da América do Sul por um ciclone na costa brasileira a leste da região (FIGURA 48b, c).

5. CONCLUSÃO

Eventos extremos de seca causam diversos tipos de impacto, dependendo da região atingida. Isto é verdadeiro para a AS, por ser ela ocupada por diversos tipos de biomas. A análise climatológica feita na revisão bibliográfica deste estudo teve importância para a interpretação dos resultados.

Na seção 4.1., observou-se que a Região Sul é privilegiada quanto a contagem, duração média e duração máxima dos eventos de secas extremas e severas, possibilitando uma melhor manutenção do sistema hidrelétrico que é predominante no país. Menos eventos de seca severa e extrema ocorrem na Amazônia, principalmente na sua parte oeste, enquanto mais ocorrem no Centro-Leste. No Sul, a contagem fica em valores intermediários. Enquanto no norte do Nordeste há número menor de secas severas que no Centro-Leste do Brasil, o número de secas extremas é semelhante. Isto sugere que uma fração maior das secas no Nordeste evoluem para secas extremas.

Por outro lado, eventos de maior duração média ocorrem na Região Amazônica e noroeste do continente. Em geral, regiões com menor quantidade de casos de secas apresentam maior duração ou persistência.

As regiões com mais altas durações máximas dos eventos de seca são, em sua maioria, as mesmas regiões com maiores durações médias, sugerindo que as durações médias de secas podem ser dominadas por poucos eventos especialmente longos.

A duração média dos episódios de seca tem seus resultados consistentes com os obtidos através do tempo característico. Os maiores tempos característicos estão na parte oeste do continente, com menores valores predominando na parte leste, o

que é mais notável para SPI3, 6, 12. Já SPI 24 indica valores maiores também no Centro-Leste do Brasil.

Alguns modos de ACP rotacionada de séries de SPI com diversos tempos de acumulação foram determinados e foi observada a forte relação entre eventos ENOS e a variação de SPI em várias regiões da AS, especialmente o norte e o sudeste do continente, incluindo a Região Sul do Brasil. Também se avaliou a separação dos modos sazonais de SPI3 em relação aos meses corridos, reafirmando que episódios de seca no verão são, em geral, os que mais causam impactos no continente sul-americano.

As correlações dos modos de SPI e as séries de TSM apresentam uma forte influência do modo ENOS, sendo ele em sua fase positiva ou negativa. Notou-se que este modo é o principal, impactando a AS em todos os principais modos de SPI. A correlação cruzada confirmou estes resultados. Contudo, para alguns modos também a TSM no Atlântico exerce influência significativa. As principais anomalias de TSM que aparecem para modos com fortes FL no nordeste da AS são relacionadas com ENOS e variações de TSM no Atlântico equatorial norte e sul, sendo estas últimas mais fortes. Para FL mais fortes no noroeste do continente, predominam as anomalias associadas com ENOS. Para modos com FL mais fortes no Sul e Sudeste do Brasil, aparecem anomalias de padrão ENOS, com as anomalias no Atlântico diferentes.

Com base nas fases negativas dos modos 2, 3 e 4 do SPI de verão na AS, foram determinados conjuntos de eventos de seca em diferentes regiões. As condições atmosféricas e oceânicas associadas com estas secas foram determinadas através de composições de anomalias ocorridas durante estes eventos

A utilização dos dados do GPCC mesclados com dados de precipitação observada foi boa para o preenchimento espacial, entretanto, por pecar em qualidade, alguns modos dos componentes principais foram afetados, e os resultados ficaram menos representativos estatisticamente. Recomenda-se refazer este presente estudo utilizando apenas o conjunto de dados observados, a fim de conseguir representar os modos de variabilidade com maior precisão. Também se recomenda a execução de estudos de cheias para a confirmação dos resultados de tempo característicos aqui obtidos.

6 ANEXOS

FIGURA 14 – Número de eventos de seca severa (limiar -1.5), para a série temporal completa, na América do Sul no período de 1966-2021.

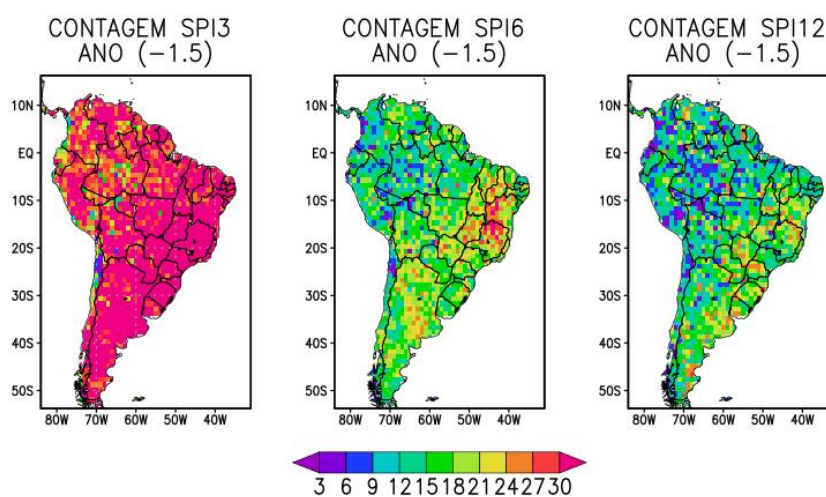


FIGURA 15 – Número de eventos de seca extrema (limiar -2.0), para a série temporal completa, na América do Sul no período de 1966-2021.

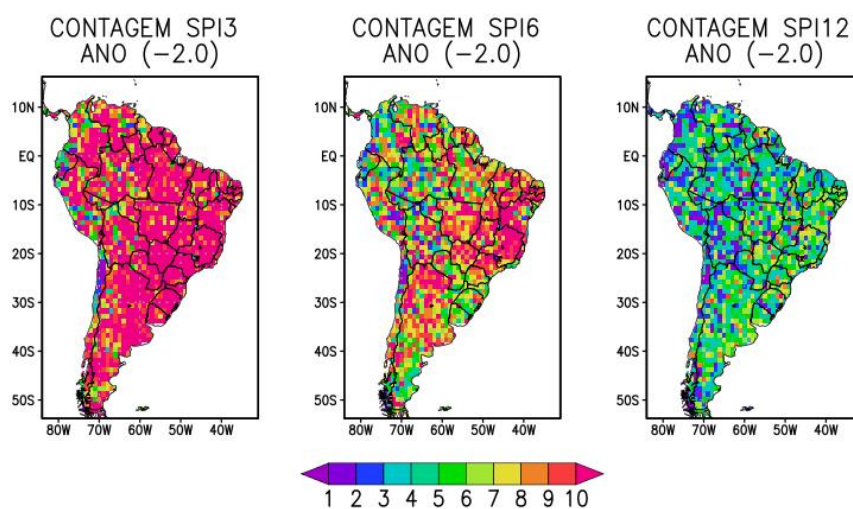


FIGURA 16 – Número de eventos de seca severa (limiar -1.5), para o verão, na América do Sul no período de 1966-2021.

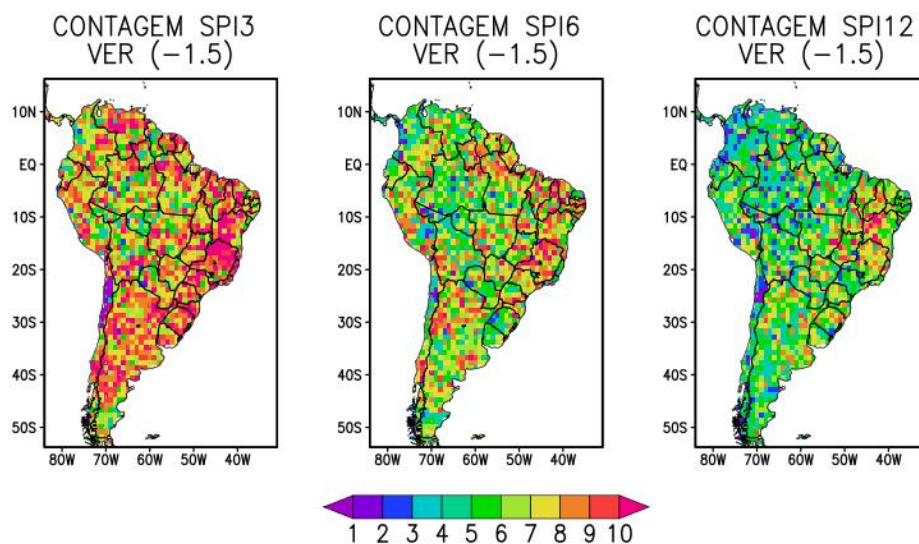


FIGURA 17 – Número de eventos de seca extrema (limiar -2.0), para o verão, na América do Sul no período de 1966-2021.

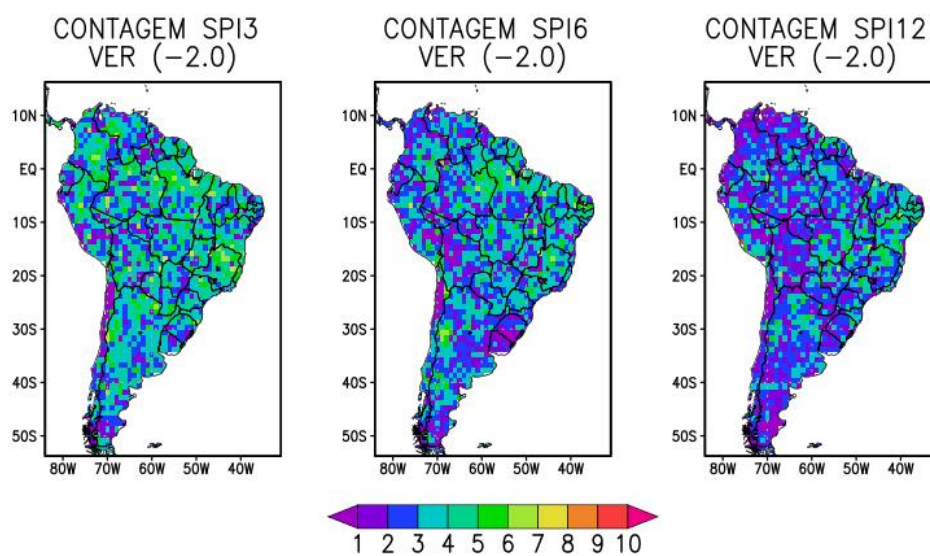


FIGURA 18 – Número de eventos de seca severa (limiar -1.5), para o outono, na América do Sul no período de 1966-2021.

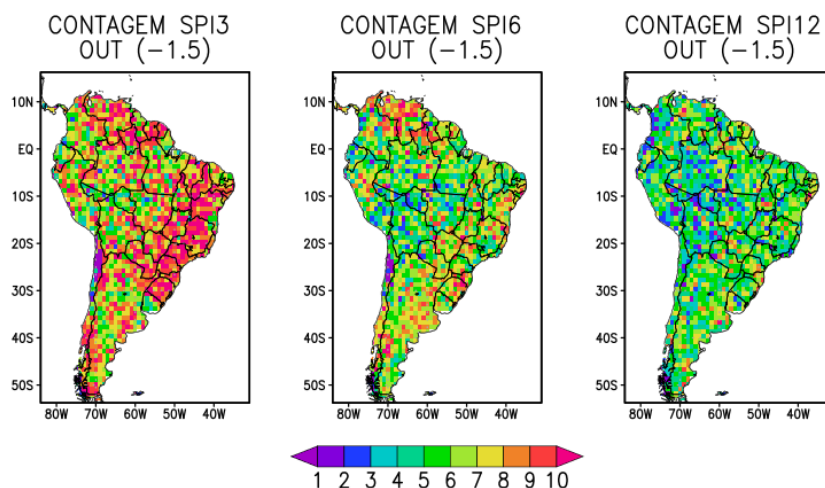


FIGURA 19 – Número de eventos de seca extrema (limiar -2.0), para o outono, na América do Sul no período de 1966-2021.

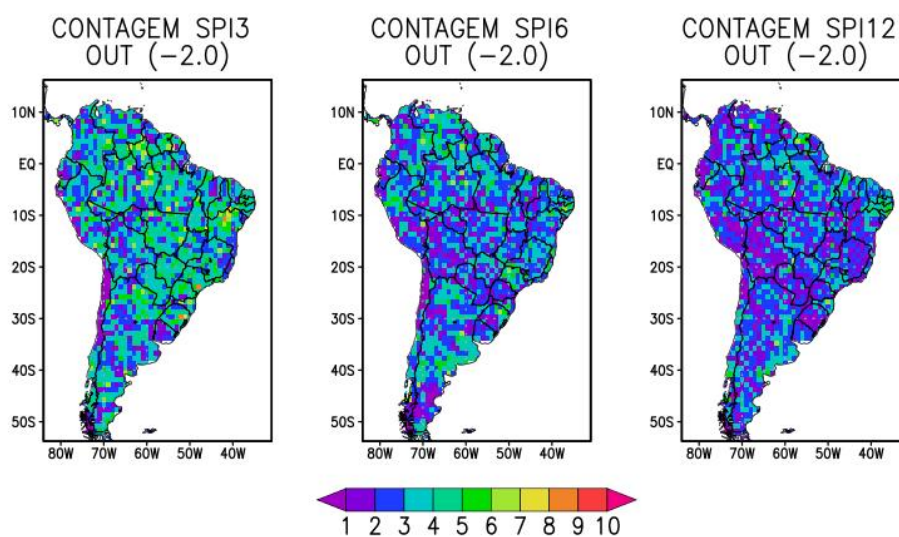


FIGURA 20 – Número de eventos de seca severa (limiar -1.5), para o inverno, na América do Sul no período de 1966-2021.

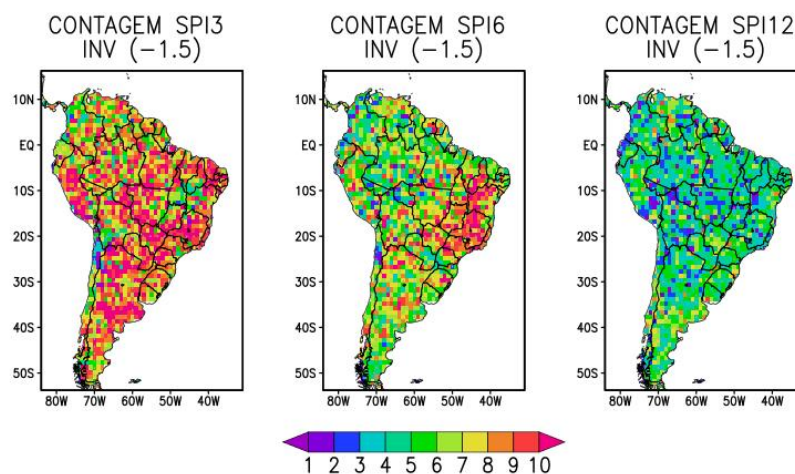


FIGURA 21 – Número de eventos de seca extrema (limiar -2.0), para o inverno, na América do Sul no período de 1966-2021.

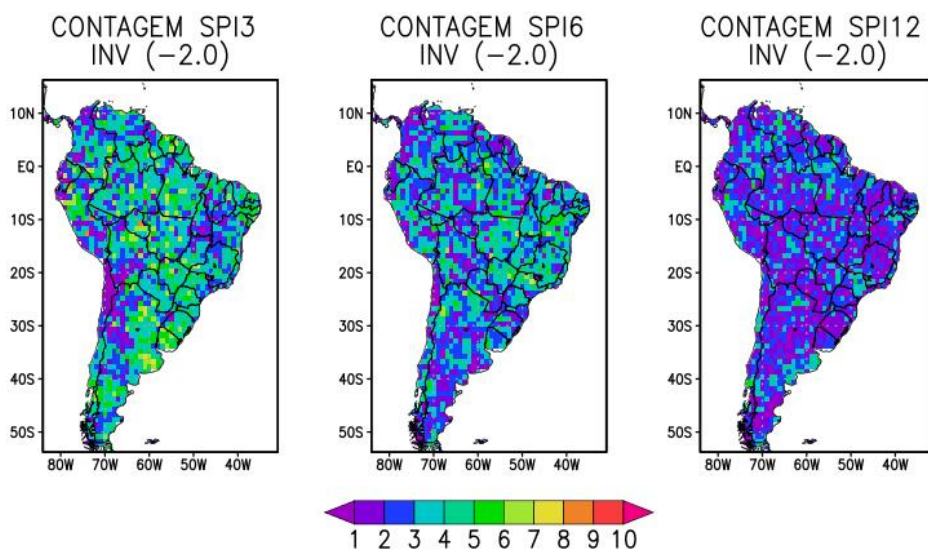


FIGURA 22 – Número de eventos de seca severa (limiar -1.5), para a primavera, na América do Sul no período de 1966-2021.

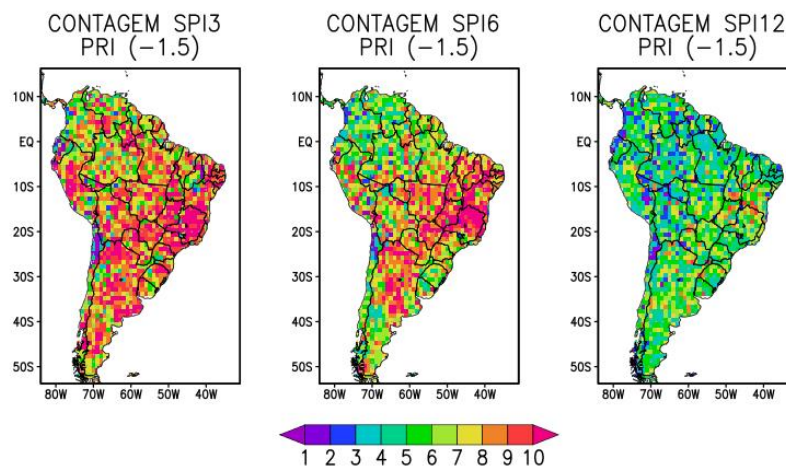


FIGURA 23 – Número de eventos de seca extrema (limiar -2.0), para a primavera, na América do Sul no período de 1966-2021.

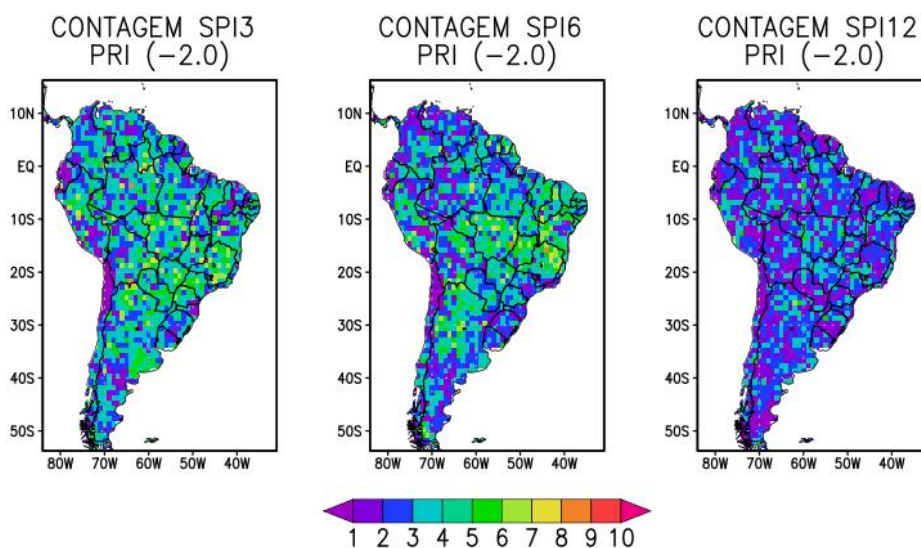


FIGURA 24 – Duração média de secas severas (limiar -1.5) na América do Sul no período de 1966-2021.

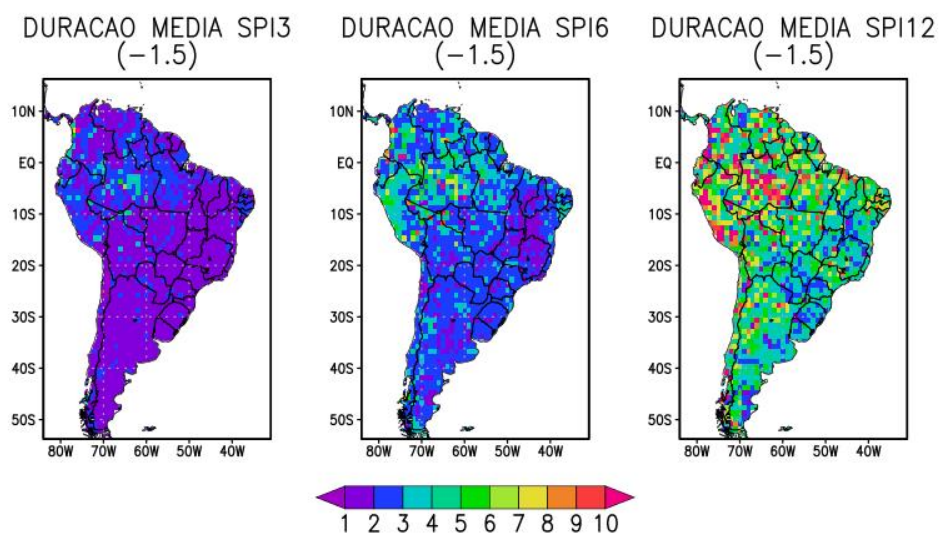


FIGURA 25 – Duração média de secas extremas (limiar -2.0) na América do Sul no período de 1966-2021.

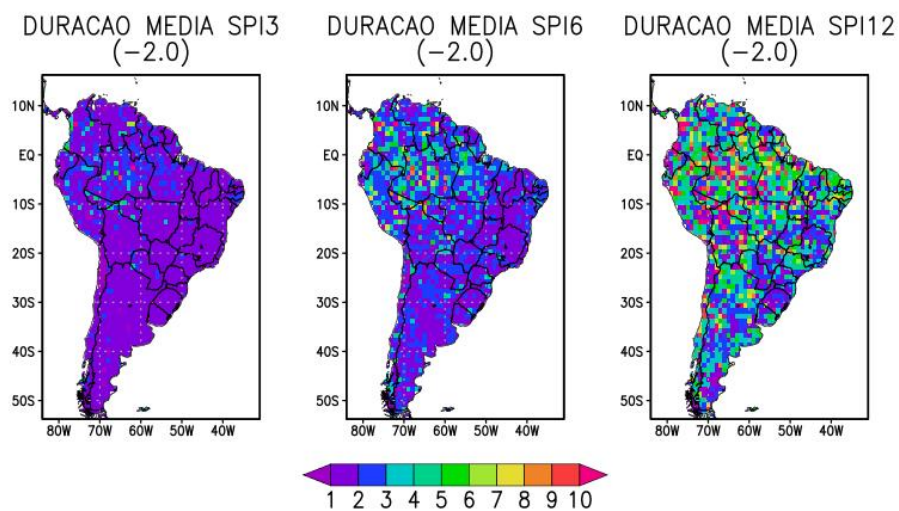


FIGURA 26 – Duração máxima de secas severas (limiar -1.5) na América do Sul no período de 1966-2021.

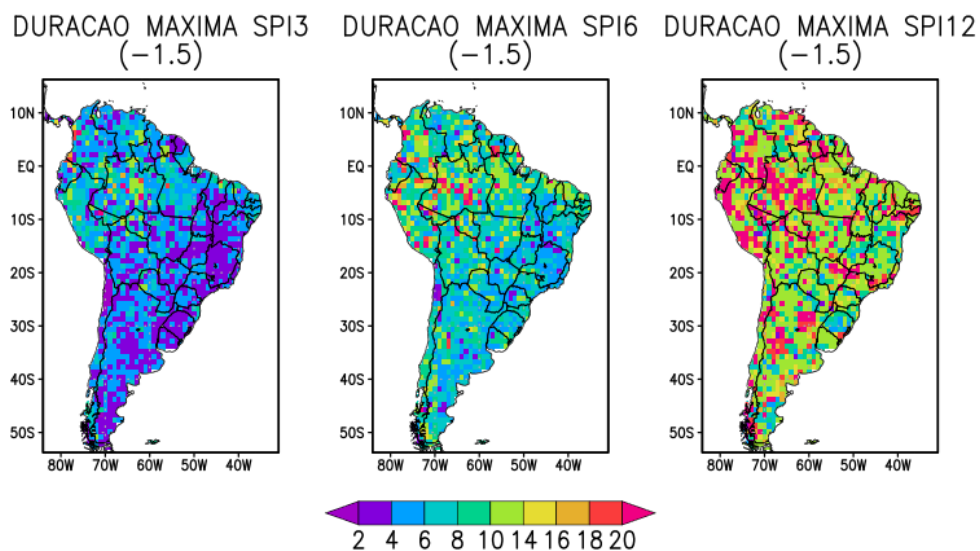


FIGURA 27 – Duração máxima de secas extremas (limiar -2.0), na América do Sul no período de 1966-2021.

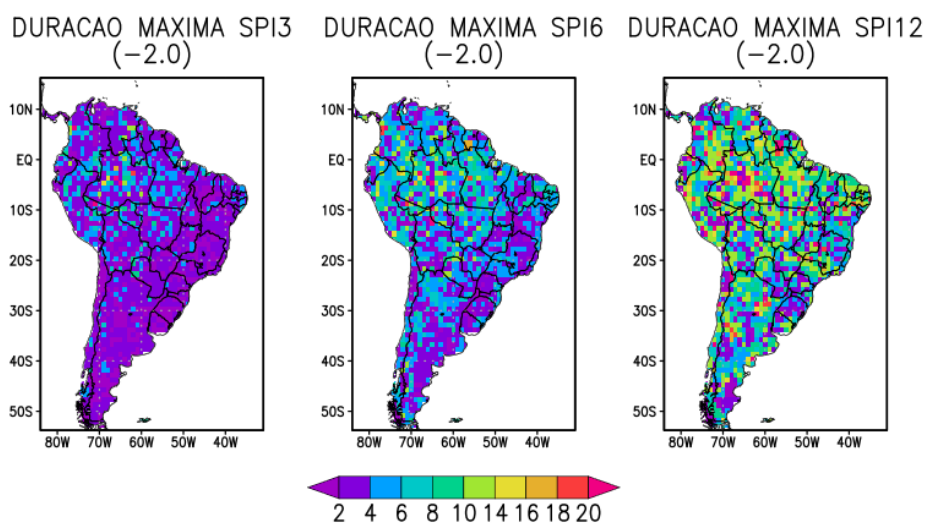


FIGURA 28 – Tempo Característico para SPI's de 3, 6 e 12 meses.

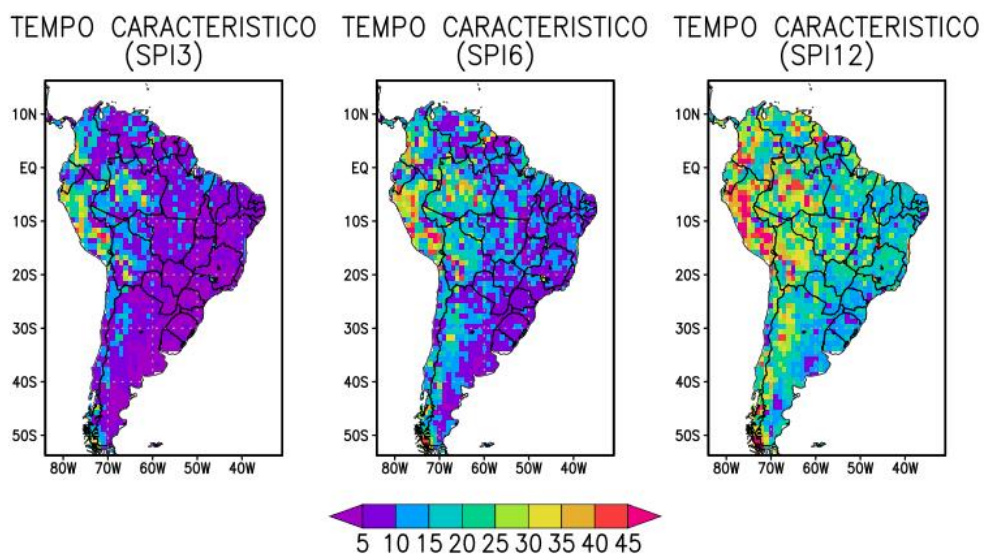


FIGURA 29 – Tempo Característico para SPI's de 24, 48 e 60 meses.

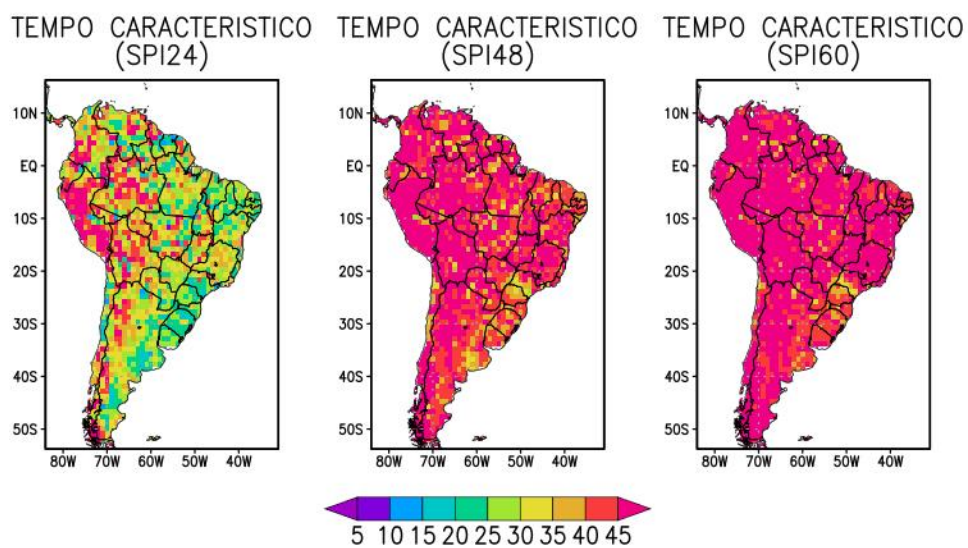


FIGURA 30 – Primeiro modo rotacionado de SPI3 de meses corridos. *Factor Loadings* (FL) são apresentados à esquerda e *Factor Scores* (FS) à direita.

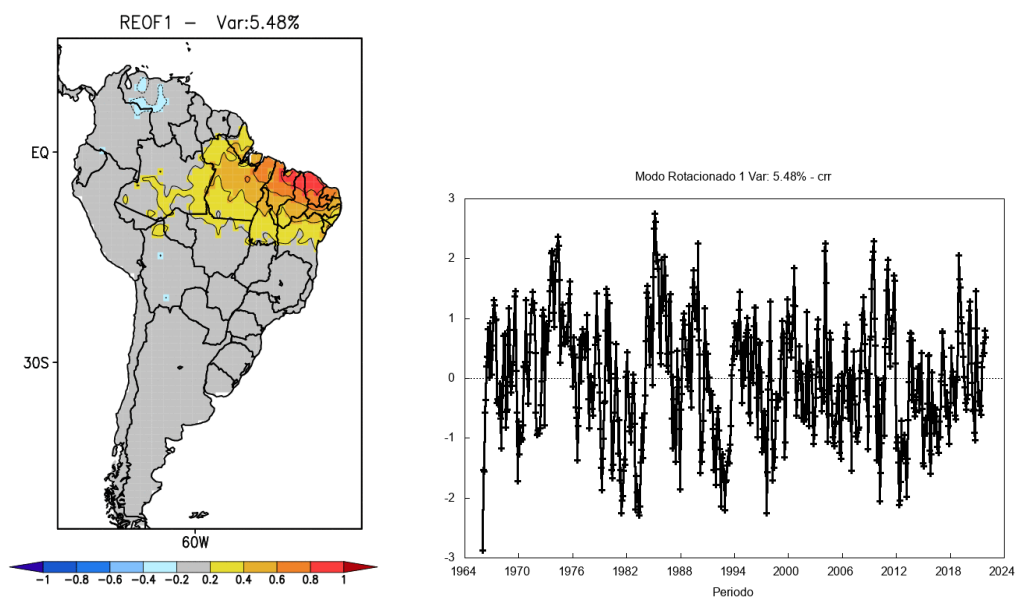


FIGURA 31 – Terceiro modo rotacionado de SPI3 de verão (fevereiro). *Factor Loadings* (FL) são apresentados à esquerda e *Factor Scores* (FS) à direita.

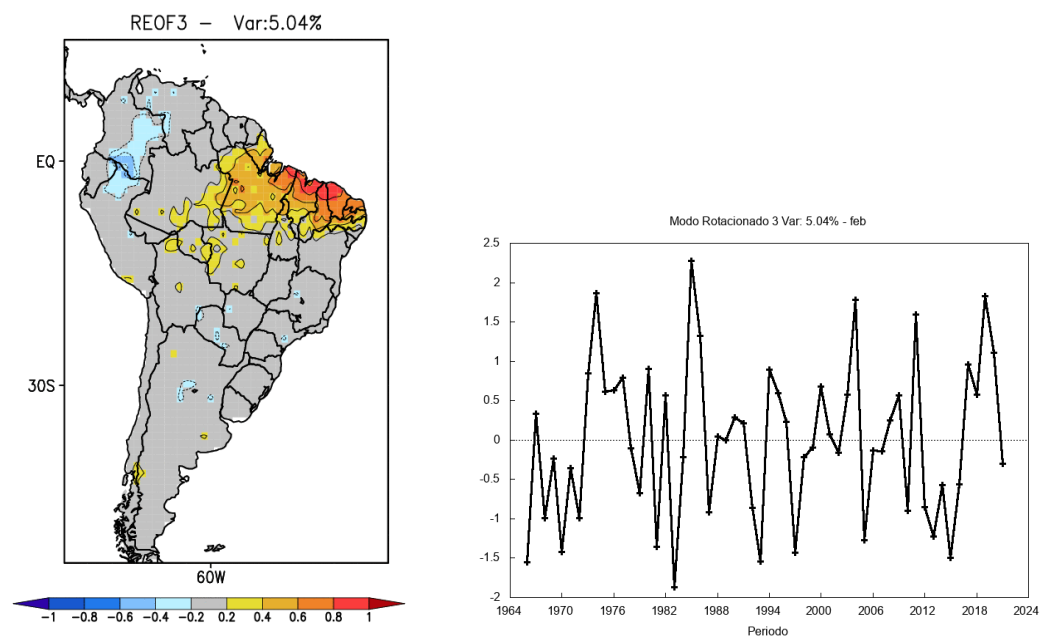


FIGURA 32 – Primeiro modo rotacionado de SPI3 de primavera. O Factor Loadings (FL) é apresentado à esquerda e o Factor Scores (FS) à direita.

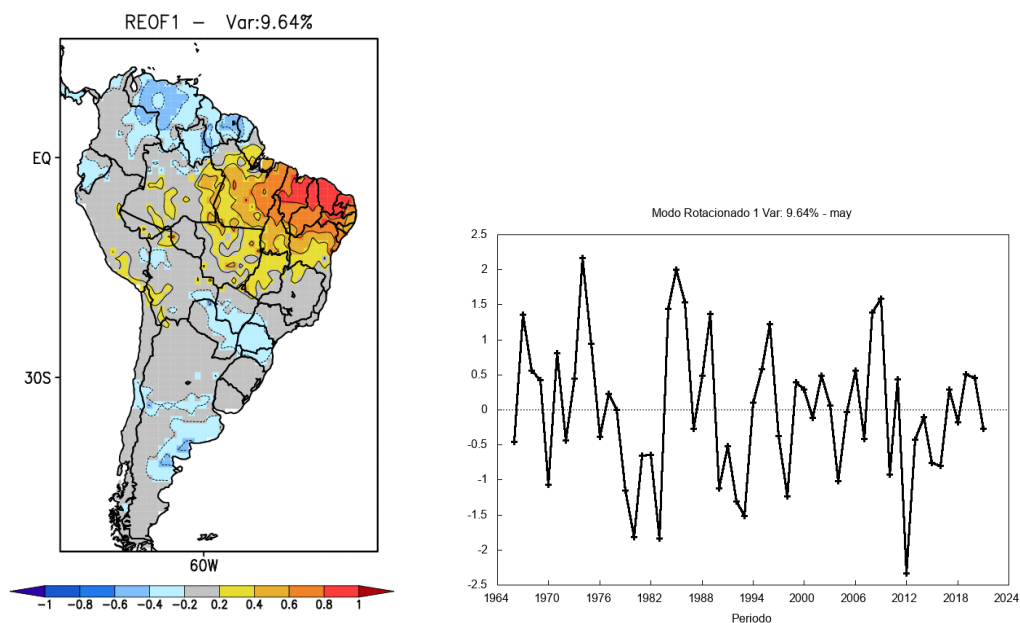


FIGURA 33 – Quinto modo rotacionado de SPI12 de meses corridos. *Factor Loadings* (FL) são apresentados à esquerda e *Factor Scores* (FS) à direita.

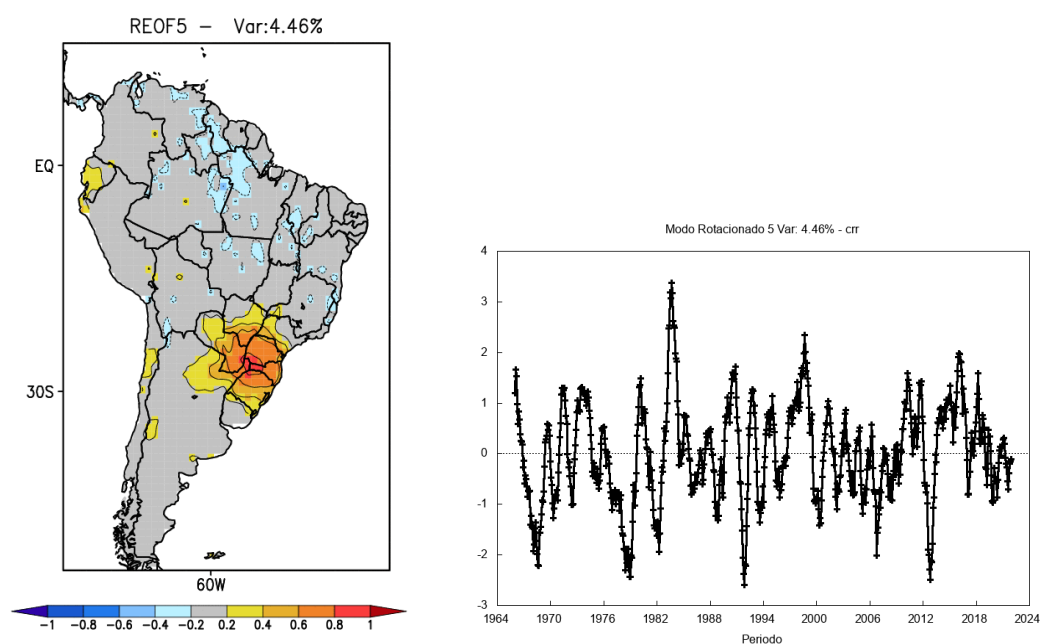


FIGURA 34 – Quarto modo rotacionado para o SPI 12 de (a) meses corridos, (b) primavera e (c) verão, respectivamente. Os *Factor Loadings* (FL) são apresentados na linha superior e os *Factor Scores* (FS) na linha inferior.

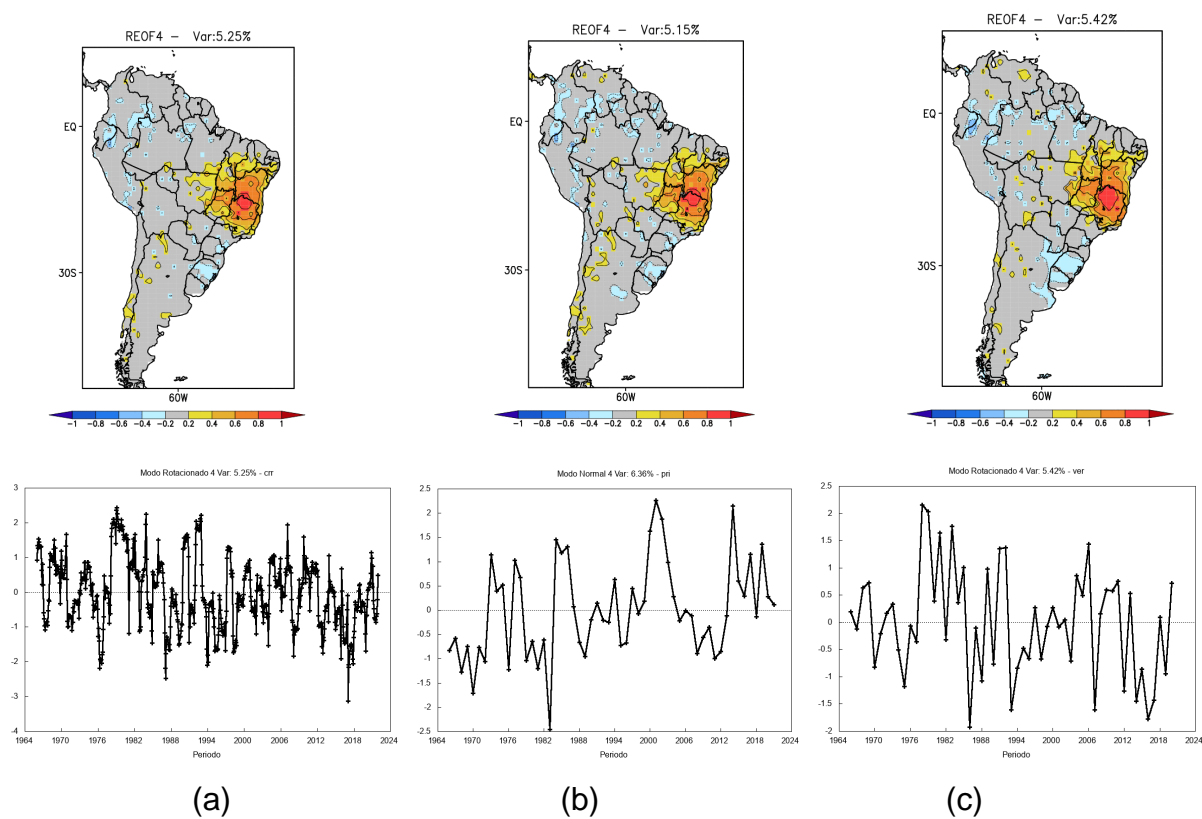


FIGURA 35 – Primeiro (a) e segundo (b) modo rotacionado de SPI3 para meses corridos. São apresentados o padrão espacial (FL), a série temporal (FS) e correlação com a série de TSM global com média móvel de três meses. Regiões em azul ou vermelho apresentam significância melhor que 0,10.

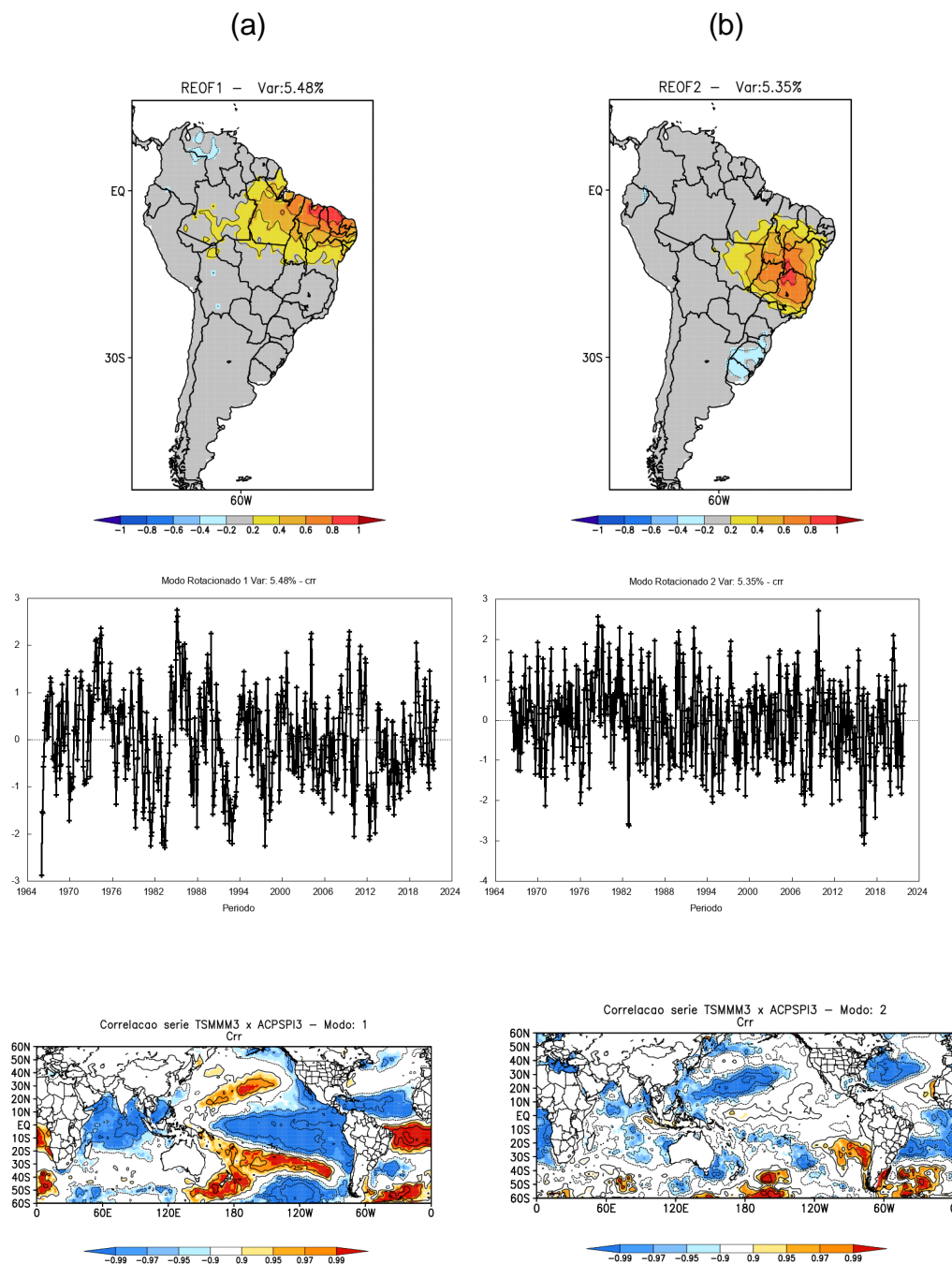


FIGURA 36 – Terceiro (a) e quarto (b) modo rotacionado de SPI3 para meses corridos. São apresentados o padrão espacial (FL), a série temporal (FS) e correlação com a série de TSM global com média móvel de três meses. Regiões em azul ou vermelho apresentam significância melhor que 0,10.

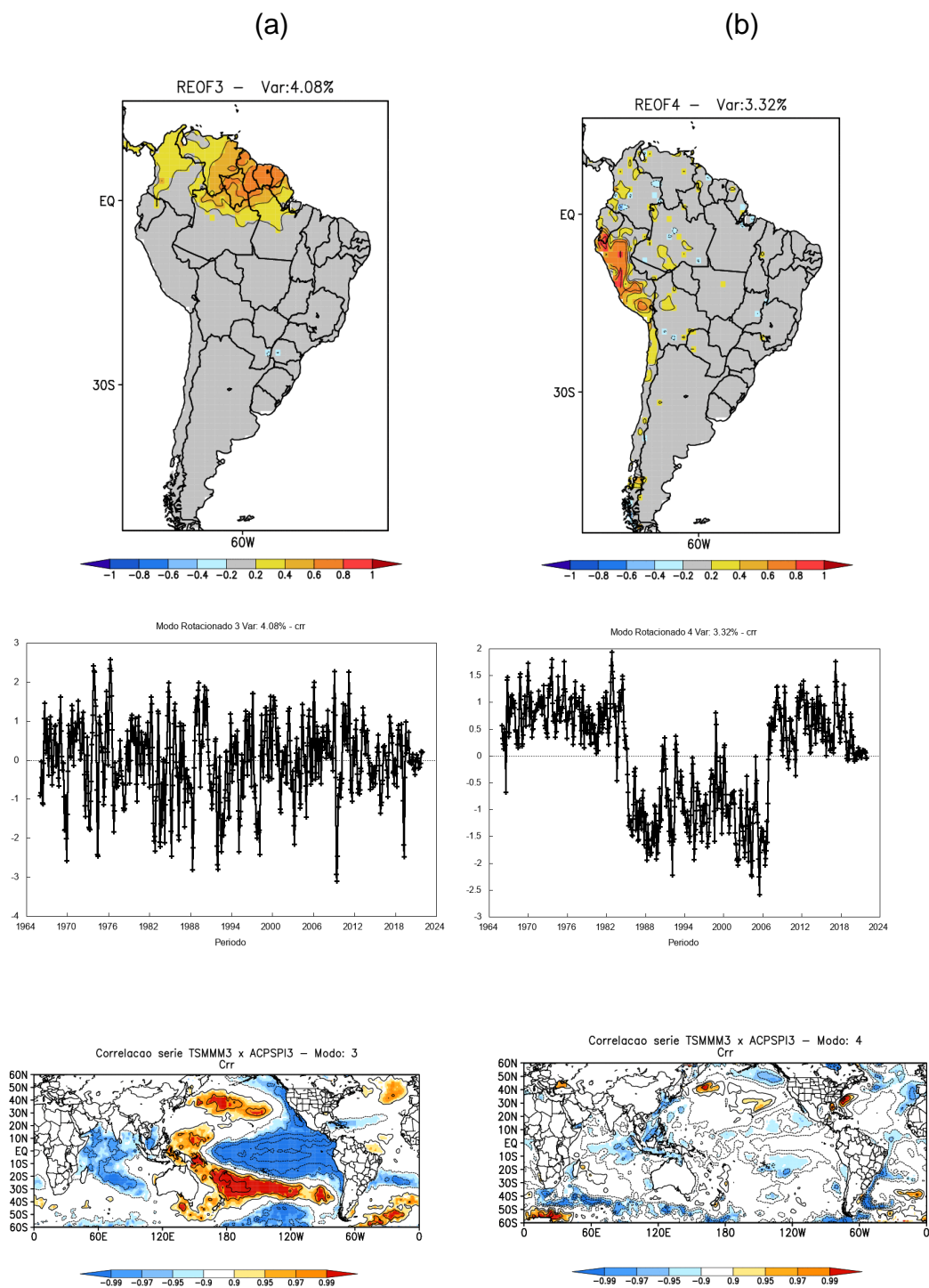


FIGURA 37 – Quinto (a) e sexto (b) modo rotacionado de SPI3 para meses corridos. São apresentados o padrão espacial (FL), a série temporal (FS) e correlação com a série de TSM global com média móvel de três meses. Regiões em azul ou vermelho apresentam significância melhor que 0,10.

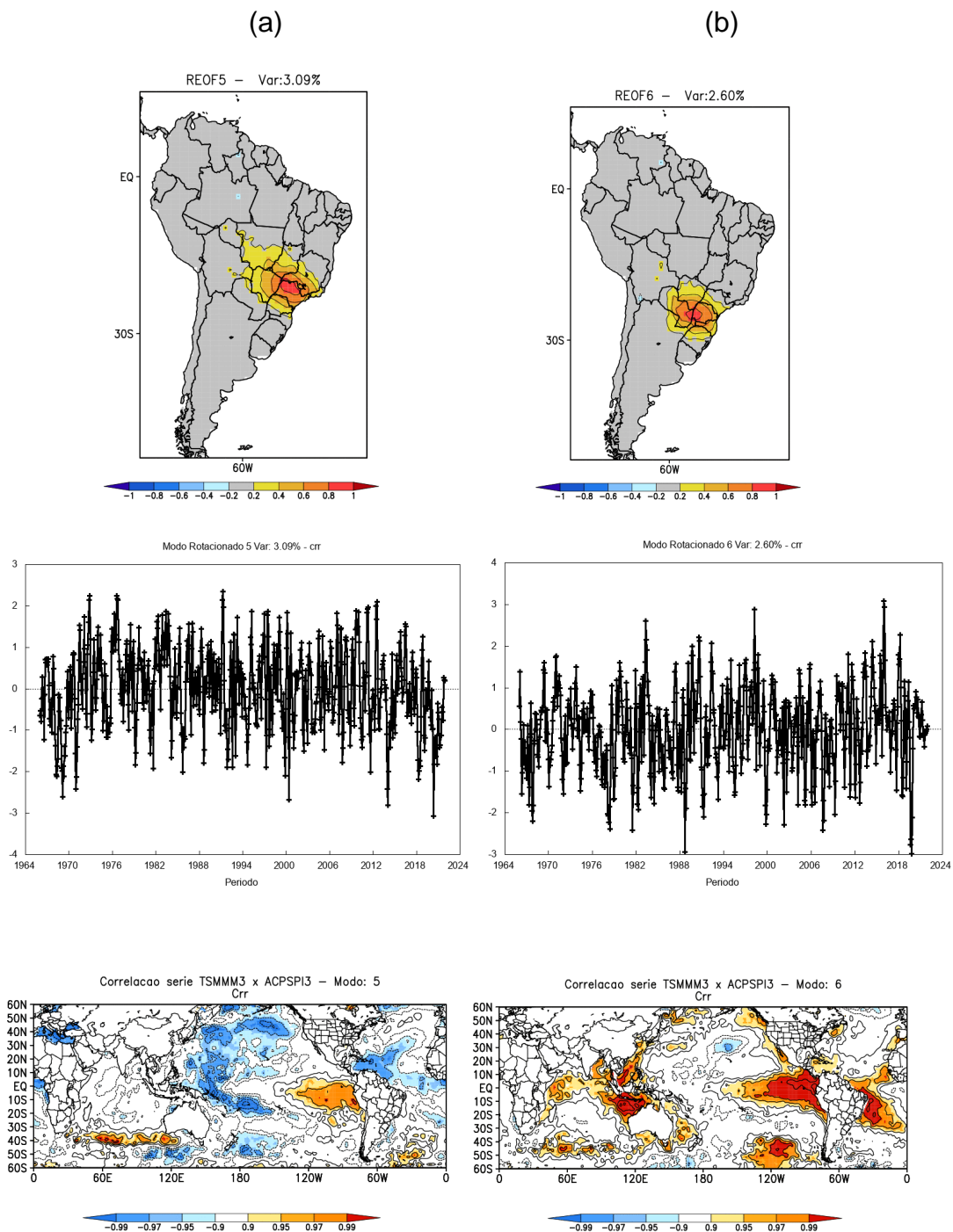


FIGURA 38 – Primeiro (a) e segundo (b) modo rotacionado de SPI6 para meses corridos. São apresentados o padrão espacial (FL), a série temporal (FS) e correlação com a série de TSM global com média móvel de seis meses. Regiões em azul ou vermelho apresentam significância melhor que 0,10.

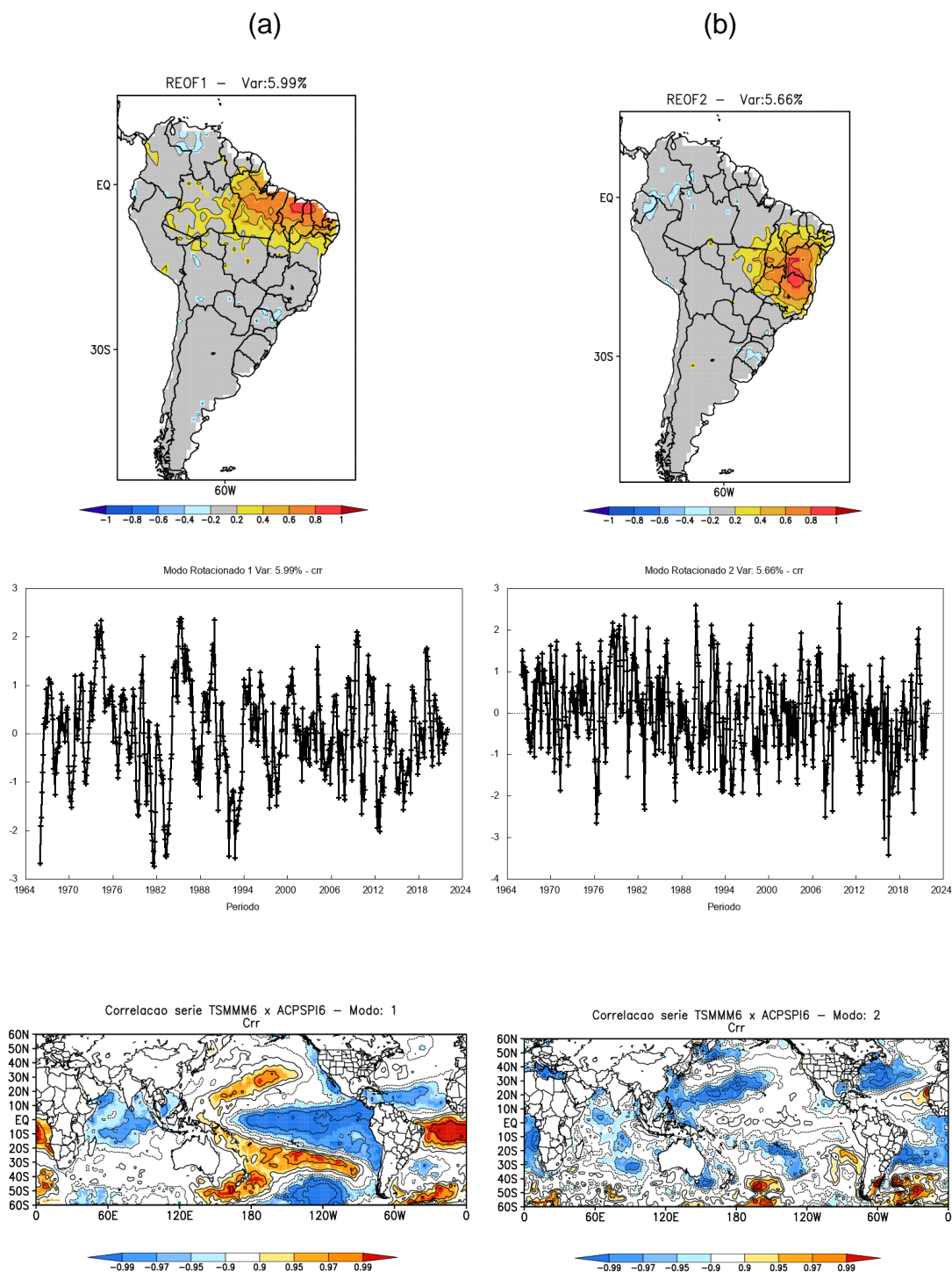


FIGURA 39 – Terceiro modo rotacionado de SPI6 para meses corridos. São apresentados o padrão espacial (FL), a série temporal (FS) e correlação com a série de TSM global com média móvel de seis meses. Regiões em azul ou vermelho apresentam significância melhor que 0,10.

(a)

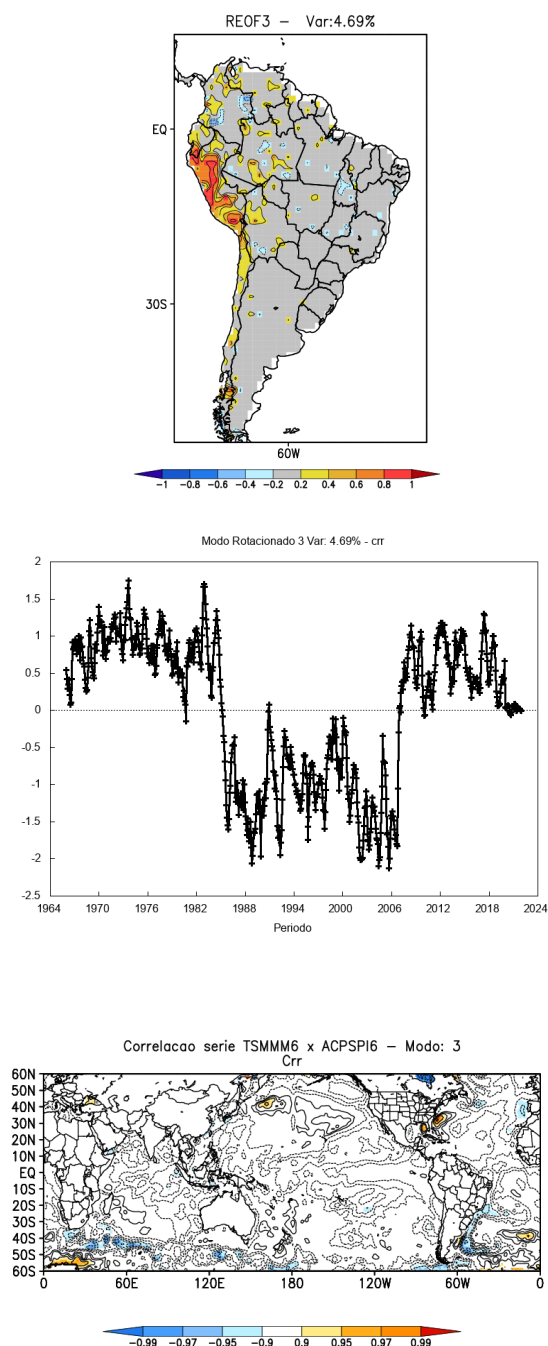
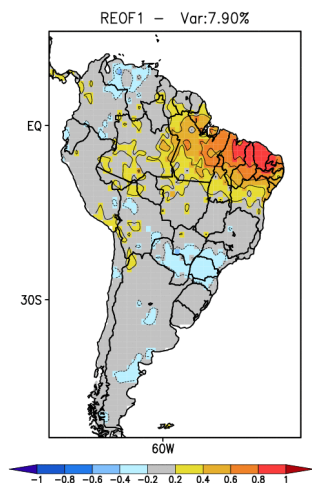


FIGURA 40 – Primeiro (a) e segundo (b) modo rotacionado de SPI12 para meses corridos. São apresentados o padrão espacial (FL), a série temporal (FS) e

correlação com a série de TSM global com média móvel de doze meses. Regiões em azul ou vermelho apresentam significância melhor que 0,10.

(a)



(b)

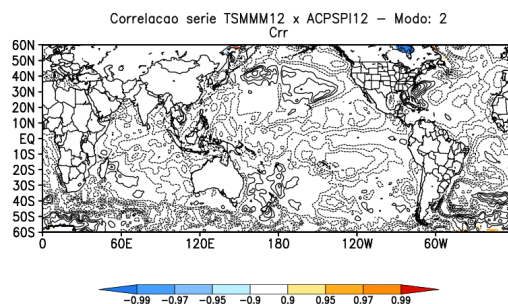
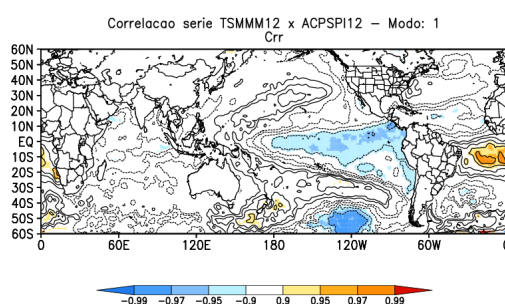
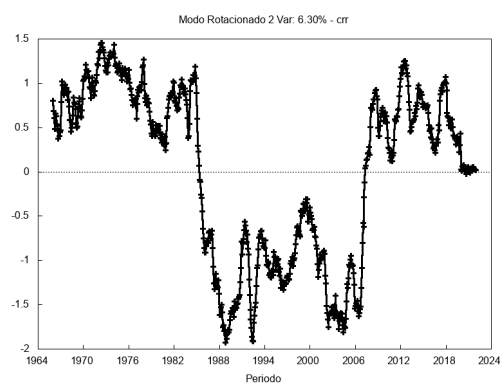
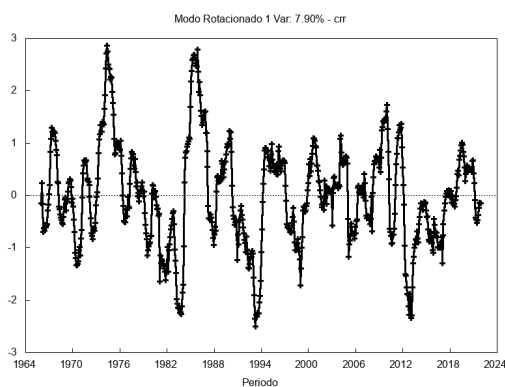
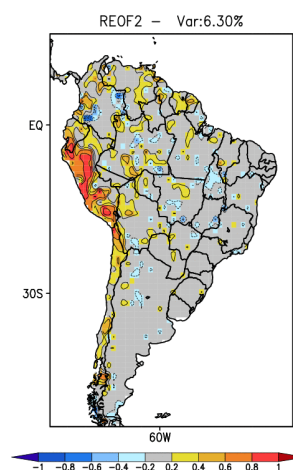


FIGURA 41 – Primeiro (a), segundo (b) e segundo (c) modo rotacionado de TSM com médias móveis de 3, 6 e 12 meses para meses corridos, respectivamente. São apresentados o padrão espacial (FL), a série temporal (FS) e correlação com as séries de SPI3, 6, 12, respectivamente. Regiões em azul ou vermelho apresentam significância melhor que 0,10.

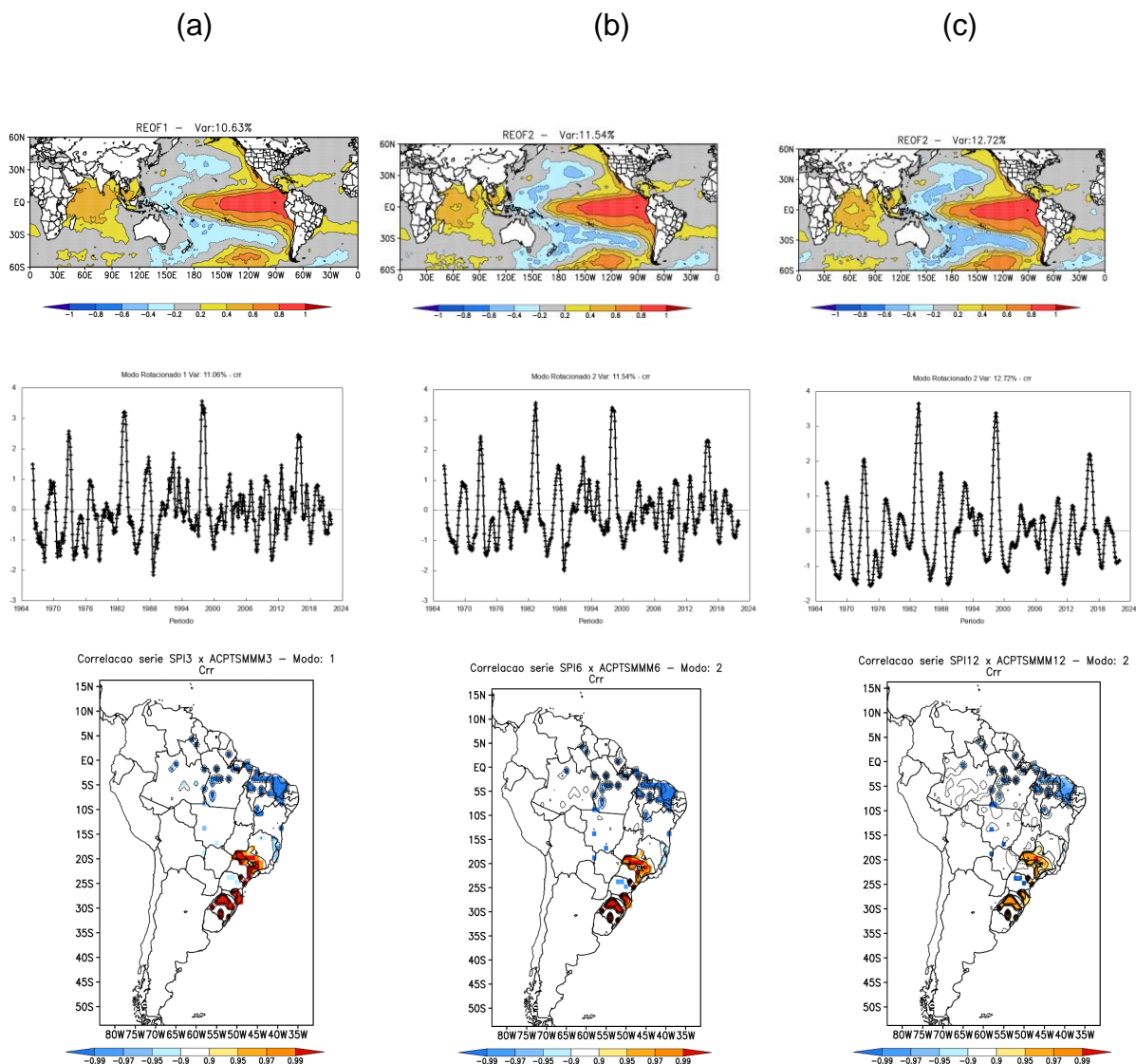


FIGURA 42 – Segundo (a), terceiro (b) e quarto (c) modo rotacionado de SPI3 para fevereiro, representando a variabilidade de SPI para verão. São apresentados, na linha superior, o padrão espacial (FL) e, na linha inferior, a série temporal (FS).

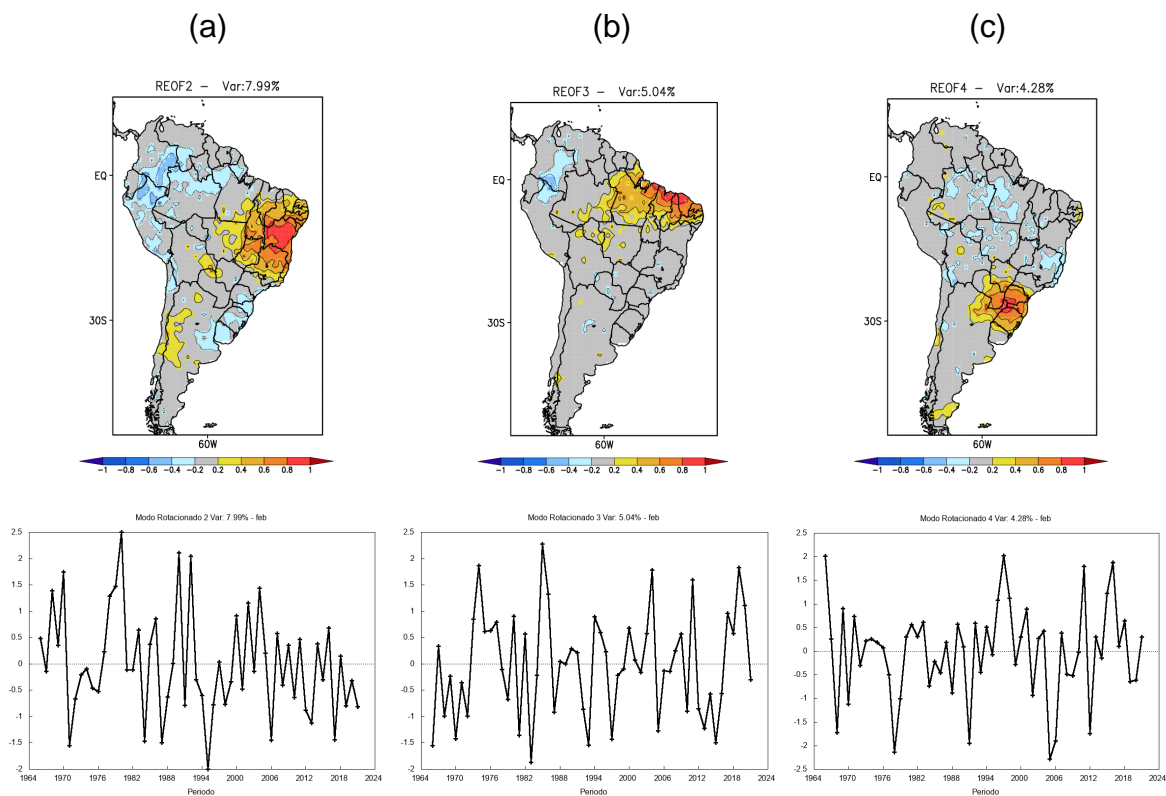
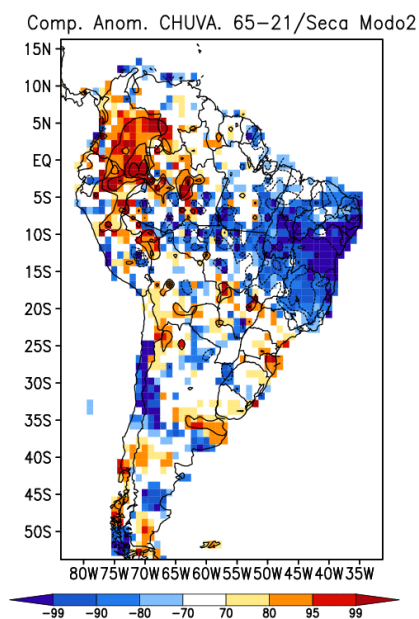
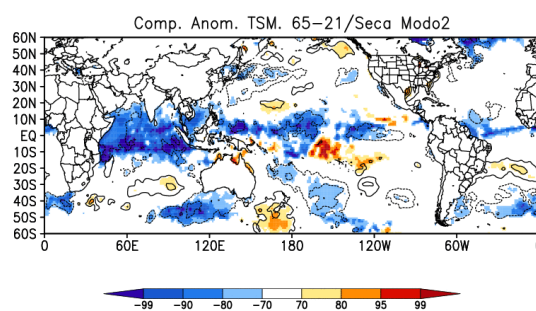


FIGURA 43 – Composição de Anomalias de PPT (a), TSM (b) e SLP (c), usando as anomalias dos verões de 1971, 1984, 1987, 1995 e 2006, de fases negativas do segundo modo de SPI3 para fevereiro, em relação à série total (1965-2021). Regiões em azul ou vermelho apresentam nível de confiança de acordo com a barra de cores.

(a)



(b)



(c)

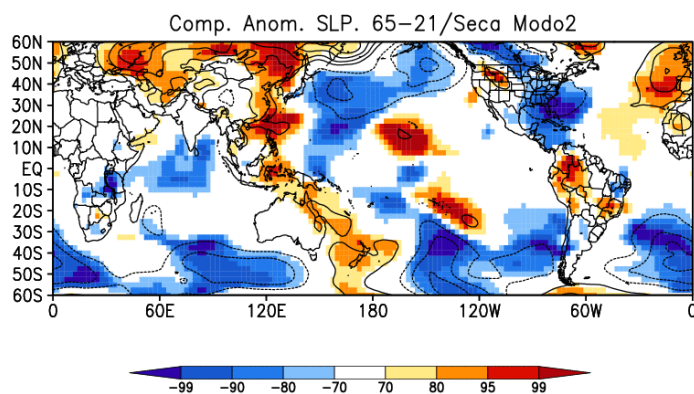
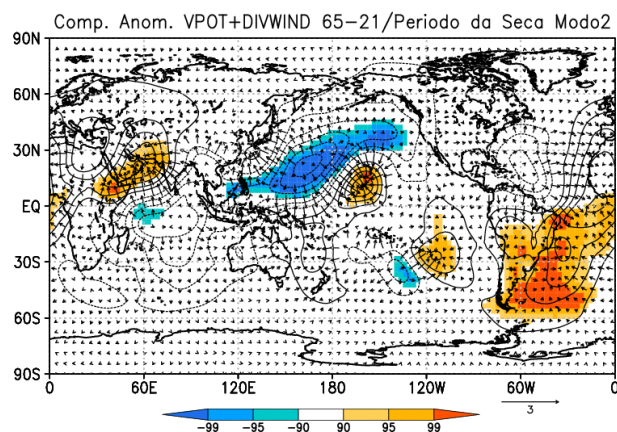


FIGURA 44 – Composição de Anomalias de VPOT+DIVWIND (a), PSI (b) e PSIZA (c) em 200 hPa, usando as anomalias dos verões de 1971, 1984, 1987, 1995 e 2006, de fases negativas do segundo modo de SPI3 para fevereiro, em relação à série total (1965-2021). Regiões em azul ou vermelho apresentam nível de confiança de acordo com a barra de cores.

(a)



(b)

(c)

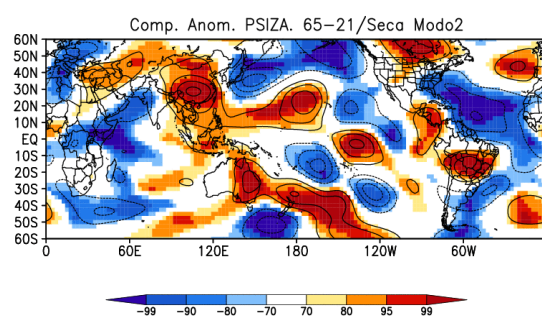
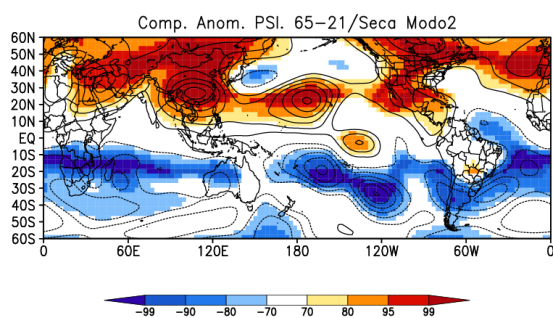
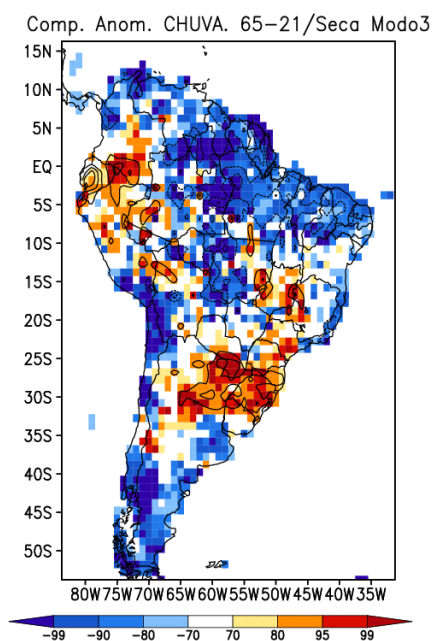
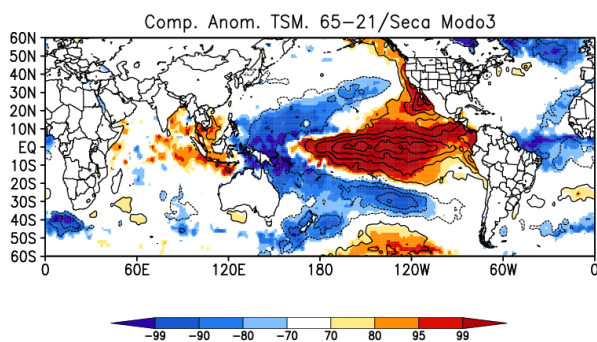


FIGURA 45 – Composição de Anomalias de PPT (a), TSM (b) e SLP (c), usando as anomalias dos verões de 1966, 1983, 1993, e 2015 de SPI de fases negativas do terceiro modo de SPI3 para fevereiro, em relação à série total (1965-2021). Regiões em azul ou vermelho apresentam nível de confiança de acordo com a barra de cores.

(a)



(b)



(c)

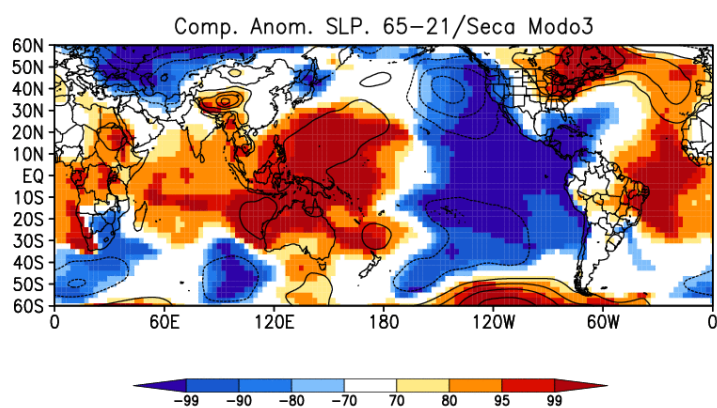
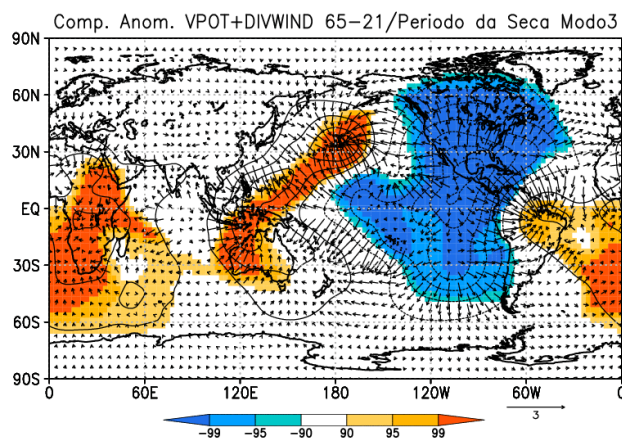


FIGURA 46 – Composição de Anomalias de VPOT+DIVWIND (a), PSI (b) e PSIZA (c) em 200 hPa, usando as anomalias dos verões de 1966, 1983, 1993, e 2015, de fases negativas do terceiro modo de SPI3 para fevereiro, em relação à série total (1965-2021). Regiões em azul ou vermelho apresentam nível de confiança de acordo com a barra de cores.

(a)



(b)

(c)

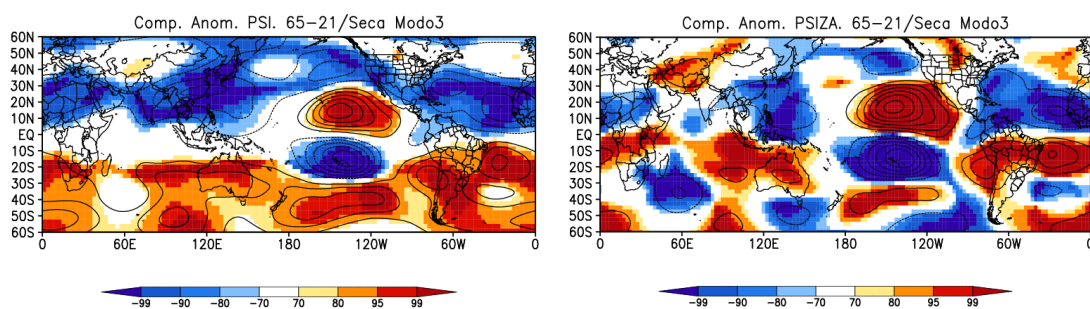


FIGURA 47 – Composição de Anomalias de PPT (a), TSM (b) e SLP (c), usando as anomalias dos verões de 1968, 1978, 1991, 2005, 2006 e 2012, de fases negativas do quarto modo de SPI3 para fevereiro, em relação à série total (1965-2021). Regiões em azul ou vermelho apresentam nível de confiança de acordo com a barra de cores.

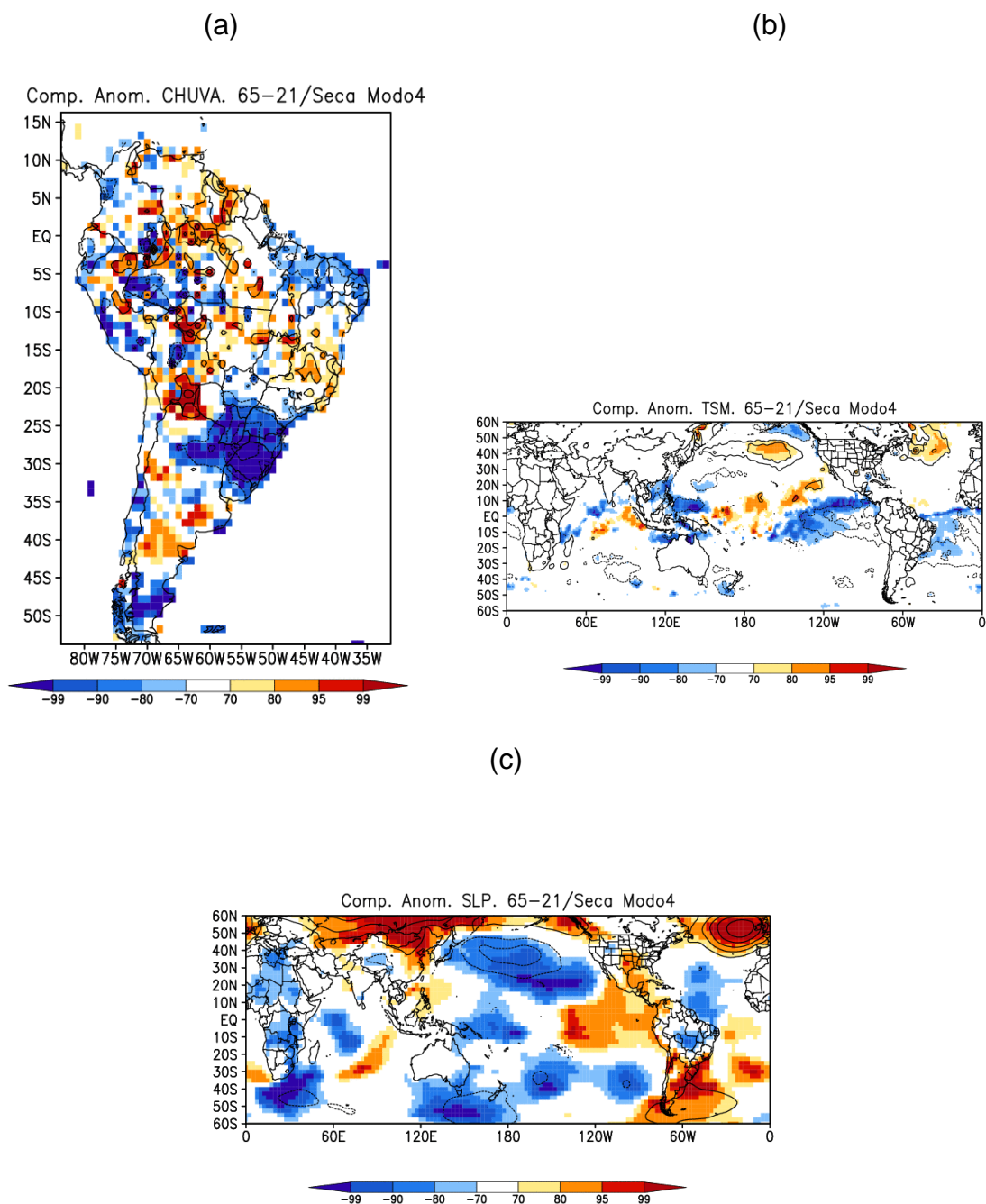
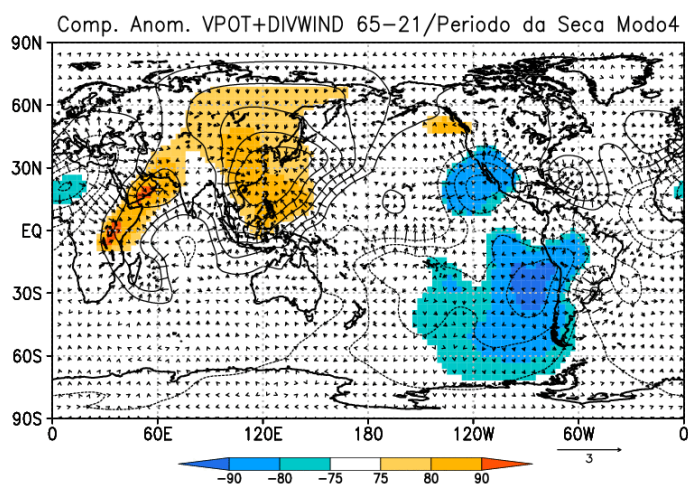


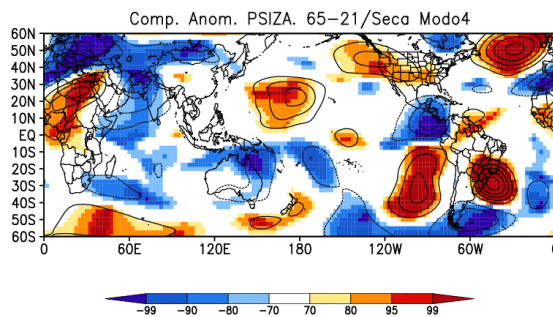
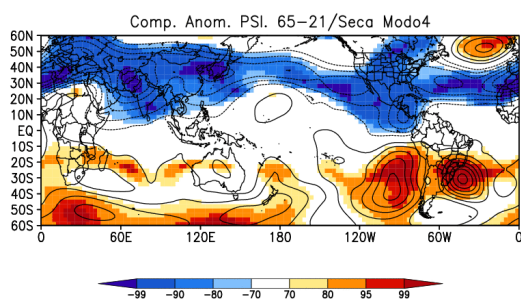
FIGURA 48 – Composição de Anomalias de VPOT+DIVWIND (a), PSI (b) e PSIZA (c) em 200 hPa, usando as anomalias dos verões de 1968, 1978, 1991, 2005, 2006 e 2012, de fases negativas do quarto modo de SPI3 para fevereiro, em relação à série total (1965-2021). Regiões em azul ou vermelho apresentam nível de confiança de acordo com a barra de cores.

(a)



(b)

(c)



7. REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas – ANA. (2020). **Séries Históricas de Estações (Portal HidroWeb v3.1.1)** Retrieved in 2020, July 15, from <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>.

ALTAMIRO, R. J. A. Climatologia dos eventos chuvosos e secos severos, extremos e muito extremos usando o índice de precipitação normalizada (SPI) para as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil. **Dissertação de Mestrado (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE**, 2010.

ALVES, P. V. Uma climatologia da seca para a América do Sul. **Trabalho de iniciação científica – Escola de Ciência e Tecnologia**. Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2019.

ANFREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. A importância do Atlântico Tropical Sul e Pacífico Leste na variabilidade de precipitação no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.22 , p. 66-74, 2007.

CAVALCANTI, I. F. de A; FERREIRA, N. J.; DA SILVA, M. G. J.; SILVA DIA, M. A. F. Tempo e clima no Brasil. São Paulo: **Editora Oficina de Textos**, 2009.

CHAN, S. C.; BEHERA, S. K.; YAMAGATA, T. Indian Ocean dipole influence on South American rainfall. **Geophysical Research Letters**, v.35, n. 14, 2008.

COSTA, P. F. A. Identificação de secas extremas, seus mecanismos e seus impactos na Bacia do Paraná/Prata. 2015. **Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Ciência e Tecnologia**. Universidade Federal do Paraná, Paraná.

NASCIMENTO, B. M. Estudo comparativo dos índices SPEI e SPI na caracterização de secas no centro-oeste de São Paulo. **Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Meteorologia) – Faculdade de Ciências da Universidade**

Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Universidade Estadual do Estado de São Paulo, 2021.

EIDT, R. T. Influências de anomalias extratropicais de TSM dos oceanos Pacífico Sul e Atlântico Sul na precipitação das regiões Sul e Centro Oeste do Brasil. 2018. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – **Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais (INPE), São José Dos Campos, 2018.**

EMBRAPA. **Soja em Números (Safrá 2021/22)**, 2022. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em: 29 de mar. 2023.

FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. **Um mapa de Unidades de Resposta Hidrológica para a América do Sul**. IX: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015.

GIBBS, W. J.; MAHER, J. V. Rainfall deciles as drought indicators. *Bulletin Bureau of Meteorology*, v. 48, p. 84, 1967.

GRIMM, A. M. The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: Regional processes versus remote influences. **Journal of Climate**, v.16, n. 2, p. 263-280, 2003.

GRIMM, A. M. E SABOIA, J. P. J. Interdecadal Variability Of The South American Precipitation In The Monsoon Season. *Journal Of Climate*, v. 28, n. 2, p. 755– 775, jan. 2015.

GRIMM, A. M., A. S. ALMEIDA C. A. A. BENETI, E. A. LEITE, 2020: The combined effect of climate oscillations in producing extremes: the 2020 drought in southern Brazil. **Brazilian Journal of Water Resources**, 25, e48, 2020.

GRIMM, A. M. Interannual climate variability in South America: Impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v.25, n.4, p. 537-554, 2011.

HAYES, M. J. et al. Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 80, n. 3, p. 429–438, mar. 1999.

HAYES, M. et al. The Lincoln Declaration On Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index Recommended. **Bulletin Of The American Meteorological Society**, v. 92(4), p. 485-488, 2011.

LAUREANTI, N.C. A influência de modos de variabilidade de TSM de diferentes escalas nas características de precipitação na América do Sul. **Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola de Ciência e Tecnologia**. Universidade Federal do Paraná, Paraná.

LIEBMANN, B. e ALLURED, D. Daily precipitation grids for South America. **Bull. Amer. Met. Soc.**, v. 86, p.1567-1570, 2005.

LLOYD-HUGHES, B. e SAUNDERS, M. A. A drought climatology for Europe. **International Journal of Climatology**, v. 22, n. 13, p. 1571–1592, 2002.

MARENGO, J. A. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. **Theoretical Applied Climatology**, v78 , p79-96, 2004.

MARENGO, J. A. et al. The Drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v.21, p195-516, 2008.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Clima da Região Amazônica. In: CAVALCANTI, I. F. de A; FERREIRA, N. J.; DA SILVA, M. G. J.; SILVA DIA, M. A. F. Tempo e clima no Brasil. São Paulo: **Editora Oficina de Textos**, 2009. P. 197-2012.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas, condições meteorológicas extremas e eventos climáticos no Brasil**. Disponível em: <http://www.fbds.org.br/cop15/FBDS_MudancasClimaticas.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2023.

MCKEE, T. B. et al. The relationship of drought frequency and duration to time scales. **Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society**, p.179-186, 1993.

MCKEE, T. B. et al. Drought Monitoring With Multiple Time Scales. **Ninth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society**, p.233-236,1995.

MO, K. C. e BERBERY, E. H. Drought and Persistent Wet Spells over South America Based on Observations and the U.S. CLIVAR Drought Experiments. **Journal of Climate**, v. 24, n. 6, p. 1801–1820, mar. 2011.

MO, K. C. e SCHEMM, J. E. Droughts and Persistent Wet Spells over the United States and Mexico. **Journal of Climate**, v. 21, n. 5, p. 980–994, mar. 2008.

NOBRE, A. D. O future climático da Amazônia: relatório de avaliação científica. **ARA (Articulación Regional Amazônica)**, 2014.

PALMER, W. C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index. **Weatherwise**, v.21, p. 156-161, 1968.

RAYNER, N. A. et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 108, no. D14, p. DOI10.1029/2002JD002670, 2003.

REBOITA, M. s.; GAN, M. A.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, 185-2004, 2010.

RICHMAN, M. B. Rotation of principal components. **Journal of Climatology**, v. 6, n. 3, p. 293–335, 1986.

SCHLESINGER, M. E.; RAMANKUTTY, N. An oscillation in the global climate system od period 65-70 years. **Nature**, v.367, p.723-726, 1994.

SCHNEIDER, U. GPCP Full Data Reanalysis Version 6.0 at 1.0°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on HTS-based and Historic Data, 2011.

SHIAU, J. T. Effects of Gamma-Distribution Variations on SPI-Based Stationary and Nonstationary Drought Analyses. **Water Resources Management**, v. 34, p. 2081–2095, 2020.

STRANG, D. M. G. D. Análise climatológica das normais pluviométricas do Nordeste Brasileiro. **São José dos Campos: CTA/IAE**, 1972.

TEDESCHI, R. G.; CAVALCANTI, I. F. A.; GRIMM, A. M. Influences os two types of ENSO on South American Precipitation. **International Journal of Climatology**, v.33, p 1382.1400, 2013.

THOM, H. C. S. A note on the gamma distribution. **Monthly Weather Review**, v. 86, n. 4, p. 117-122, 1958.

TRENBERTH, K. E. Some Effects of Finite Sample Size and Persistence on Meteorological Statistics. Part I: Autocorrelations. **Monthly Weather Review**, v. 112, n. 12, p. 2359–2368, dez. 1984.

VICENTE-SERRANO, S. M.; SANTIAGO BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, J. I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. **Journal of Climate**, v. 23, n. 7, p. 1696-1718, 2010.

VIANA, L. P.; HERDIES, D.L. Case Study of a Cold air Outbreak Incursion Extreme Event in July 2013 on Brazilian Amazon Basin. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, n.1, p. 27-39, 2018.

WILKS, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Science*, 2. Ed. San Diego, CA: **Academic Press**, 2006.

ZARGAR, A., SADIQ, R. Naser, B. E KHAN, F. I. A review of drought indices. **Environmental Reviews**, v. 19, p. 333-349, 2011.

WANG, B.; DING, Q. Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years. **Geophysical Research Letters**, v.33, p. 1-4, 2006.

WMO, **Standardized Precipitation Index User Guide**, World Meteorological Organization, 2012. Disponível em: <
<https://public.wmo.int/en/resources/library/standardized-precipitation-index-user-guide>>