

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

LUANA STELA ARANTES

**ORIGEM DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL EM BRASÍLIA -
DF A PARTIR DA COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA**

Porto Alegre

Março de 2023

LUANA STELA ARANTES

**ORIGEM DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL EM BRASÍLIA-DF
A PARTIR DA COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Linha de pesquisa: Análise Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Eliseu Aquino

Prof. Dr. Ulisses Franz Bremer
Departamento de Geografia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dra. Venisse Schossler
INCT da Criosfera /Centro Polar e Climático
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Vinícius Machado Rocha
Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Porto Alegre

2023

CIP - Catalogação na Publicação

Arantes, Luana Stela
Origem da precipitação pluvial em Brasília - DF a
partir da composição isotópica / Luana Stela Arantes.
-- 2024.
91 f.
Orientador: Francisco Eliseu Aquino.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2024.

1. Composição isotópica. 2. Precipitação pluvial.
3. Brasília. I. Aquino, Francisco Eliseu, orient. II.
Título.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente aos meus pais, Edilaine e Francisco, por permitirem que eu pudesse estar aqui hoje escrevendo essas palavras, por serem os responsáveis pela minha criação, por sempre me apoiarem nas minhas decisões e por acreditarem em mim, na minha capacidade de me tornar o que sempre sonhei. Agradeço também minha avó Possidônea e minha irmã Áurea por ficarem ao meu lado, nos momentos bons e nos ruins, por me ajudarem a não desistir e por me lembrarem que apesar de todas as dificuldades, o resultado valeria a pena.

Agradeço imensamente minha namorada e futura esposa, Daniele, por acreditar em mim e ser a minha força em todos os momentos que pensei em desistir, por estar sempre ao meu lado, pelas broncas que me deu, pelo apoio nos momentos tristes e principalmente pelas risadas. Nada disso seria possível sem o seu incentivo, sem sua paciência e sem o seu amor. O carinho que recebi e recebo diariamente dela é o que me fez continuar a seguir meus sonhos e acreditar que tudo o que fiz vai nos ajudar a ter o futuro que sonhamos juntas. Seu sorriso é minha força, e ter o seu amor é um presente.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Francisco Eliseu Aquino, por toda a paciência que teve comigo, por me ajudar a compreender um pouco mais sobre a Climatologia, por me introduzir num assunto completamente novo e ajudar a despertar minha curiosidade sobre essa área incrível que tive o prazer de estudar.

Agradeço também ao Professor Rogério Elias Soares Uagoda, do departamento de Geografia da UnB, que foi responsável por fazer as coletas que foram utilizadas nessa dissertação.

Quero agradecer também a UFRGS e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, que me auxiliaram de forma muito atenciosa mesmo minha pós-graduação sendo feita no formato remoto.

Por último, agradeço a CAPES pelo apoio financeiro, que me permitiu realizar muitos feitos, tornou o meu caminho mais fácil e me ajudou a concluir com sucesso essa dissertação.

Resumo

O estudo da meteorologia e da variabilidade climática em Brasília, localizada no Centro-Oeste do Brasil, é de especial interesse devido ao seu clima tropical continental, que é influenciado naturalmente pelas regiões Amazônica, Atlântico e Antártica. Com base nesta premissa, esta dissertação busca identificar a origem da precipitação por meio da composição isotópica de amostras coletadas na Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília (FAL/UnB) entre novembro de 2016 a agosto de 2018. Inicialmente, foram coletadas amostras mensais e de eventos individuais de precipitação entre novembro de 2016 e agosto de 2018, utilizando o coletor modelo Palmex Rain Sampler RS1, instalado na FAL/UnB. Estas amostras foram analisadas através da Espectroscopia por Tempo de Decaimento para determinar a composição de $\delta^{18}\text{O}$ das amostras. Vale destacar que essa metodologia é pouco explorada para este propósito no Brasil. Além disso, os resultados foram comparados com dados históricos (1965 a 1987) fornecidos pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA). Posteriormente, os dados de $\delta^{18}\text{O}$ da precipitação em Brasília foram relacionados com as assinaturas de $\delta^{18}\text{O}$ conhecidas de diferentes fontes de massas de ar, como equatorial, tropical e polar. Com isso, foram determinados os valores da razão isotópica de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) para diferentes tipos de precipitação, incluindo normal, extrema e mensal, na FAL/UnB. As análises isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ da precipitação em Brasília entre 2016 e 2018 revelaram variações significativas quando comparadas aos dados históricos (1965-1987) da IAEA. Os resultados mostraram que, embora os valores isotópicos mensais fossem geralmente semelhantes aos coletados pela IAEA, houve discrepâncias significativas em alguns meses de 2017. A análise dos ventos em 950 hPa ajudou a identificar as massas de ar responsáveis por essas variações. Fevereiro apresentou as maiores diferenças isotópicas devido às chuvas acima da média, influenciada pelas massas de ar Equatorial Continental e Tropical Atlântica. Em maio e dezembro, diferenças significativas também foram observadas, associadas a influências das massas de ar Equatorial Atlântica, Tropical Continental, e Equatorial Continental, especialmente após episódios de ZCAS.

Palavras-chave: O^{18} , eventos extremos precipitação, massas de ar, Região Centro-Oeste

Abstract

The study of meteorology and climate variability in Brasilia, located in the Midwest of Brazil, is of special interest due to its tropical continental climate, which is naturally influenced by the Amazon, Atlantic and Antarctic regions. Based on this premise, this dissertation seeks to identify the origin of precipitation through the isotopic composition of samples collected at the University of Brasilia's Água Limpa Farm (FAL/UnB) between November 2016 and August 2018. Initially, monthly samples and individual precipitation events were collected between November 2016 and August 2018, using the Palmex Rain Sampler RS1, installed at FAL/UnB. These samples were analyzed using Decay Time Spectroscopy to determine the $\delta^{18}\text{O}$ composition of the samples. It is worth noting that this methodology has been little explored for this purpose in Brazil. In addition, the results were compared with historical data (1965 to 1987) provided by the International Atomic Energy Agency (IAEA). Subsequently, the $\delta^{18}\text{O}$ data from precipitation in Brasilia was related to the known $\delta^{18}\text{O}$ signatures of different air mass sources, such as equatorial, tropical and polar. With this, oxygen isotope ratio ($\delta^{18}\text{O}$) values were determined for different types of precipitation, including normal, extreme and monthly, at FAL/UnB. The isotopic analyses of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in Brasília between 2016 and 2018 revealed significant variations when compared to historical data (1965-1987) from the IAEA. The results showed that although the monthly isotopic values were generally similar to those collected by the IAEA, there were significant discrepancies in some months of 2017. The analysis of winds at 950 hPa helped identify the air masses responsible for these variations. February showed the largest isotopic differences due to above-average rainfall, influenced by the Continental Equatorial and Atlantic Tropical air masses. In May and December, significant differences were also observed, associated with influences from the Atlantic Equatorial, Continental Tropical, and Continental Equatorial air masses, especially after SACZ episodes.

Keywords: O^{18} , extreme precipitation events, air masses, Central-West Region

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa destacando Brasília, área de estudo.....	18
Figura 2. Classificação climática de Köppen-Geiger.....	20
Figura 3. Centros dispersores das massas de ar que atuam na América do Sul.	23
Figura 4. Gráfico comparativo de precipitação acumulada (mm) de Brasília.....	26
Figura 5. Gráfico comparativo de temperatura média (°C) de Brasília.	28
Figura 6. Modelo Palmex Rain Sampler RS1 utilizado para coleta de amostras.	37
Figura 7. Espectrômetro tipo CRDS Picarro LD 2130i.....	41
Figura 8. Comportamento da temperatura média mensal (INMET e IAEA) de Brasília.	46
Figura 9. Comportamento da Precipitação Média Mensal INMET e IAEA de Brasília.	49
Figura 10. Média dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ para amostras coletadas em Brasília – IAEA. ...	50
Figura 11. Climatologia de janeiro/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de janeiro/2017 (b) e anomalia de janeiro/2018 (c) em 950 hPa.....	53
Figura 12. Climatologia de Fevereiro/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de Fevereiro/2017 (b), anomalia de Fevereiro/2018 (c), anomalia do dia 02/02/2017 (d), anomalia do dia 03/02/2017 (e), anomalia do dia 04/02/2017 (f), anomalia do dia 05/02/2017 (g), anomalia do dia 06/02/2017 (h), anomalia do dia 07/02/2017 (i), anomalia do dia 08/02/2017 (j), anomalia do dia 09/02/2017 (k), anomalia do dia 10/02/2017 (l), anomalia do dia 11/02/2017 (m), anomalia do dia 12/02/2017 (n), anomalia do dia 13/02/2017 (o), anomalia do dia 14/02/2017 (p), anomalia do dia 16/02/2017 (q), anomalia do dia 20/02/2017 (r), anomalia do dia 21/02/2017 (s), anomalia do dia 24/02/2017 (t), anomalia do dia 25/02/2017 (u), anomalia do dia 26/02/2017 (v), anomalia do dia 27/02/2017 (x), anomalia do dia 28/02/2017 (y), em 950 hPa.	58
Figura 13. Climatologia de março/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de março/2017 (b), anomalia de Março/2018 (c), anomalia do dia 02/03/2018 (d), anomalia do dia 04/03/2018 (e), anomalia do dia 05/03/2018 (f), anomalia do dia 06/03/2018 (g), anomalia do dia 07/03/2018 (h), anomalia do dia 08/03/2018 (i), anomalia do dia 09/03/2018 (j), anomalia do dia 10/03/2018 (k), anomalia do dia 11/03/2018 (l), anomalia do dia 12/03/2018 (m), anomalia do dia 13/03/2018 (n), anomalia do dia 14/03/2018 (o), anomalia do dia 20/03/2018 (p), anomalia do dia 21/03/2018 (q), anomalia do dia 22/03/2018 (r), anomalia do dia 24/03/2018 (s), anomalia do dia 25/03/2018 (t), anomalia do dia 31/03/2018 (u), em 950 hPa.	63
Figura 14. Climatologia de Abril/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de abril/2017 (b) e anomalia de abril/2018 (c) em 950 hPa.	64
Figura 15. Climatologia de Maio/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de maio/2017 (b) e anomalia de maio/2018 (c) em 950 hPa.....	65

Figura 16. Climatologia de Junho/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de junho/2017 (b) e anomalia de junho/2018 (c) em 950 hPa.	66
Figura 17. Climatologia de julho/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de julho/2017 (b) e anomalia de julho/2018 (c) em 950 hPa.	67
Figura 18. Climatologia de agosto/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de agosto/2017 (b), anomalia de agosto/2018 (c), anomalia do dia 09/08/2018 (d), anomalia do dia 16/08/2018 (e), anomalia do dia 18/08/2018 (f), anomalia do dia 19/08/2018 (g), anomalia do dia 25/08/2018 (h), anomalia do dia 26/08/2018 (i) em 950 hPa.	70
Figura 19. Climatologia de setembro/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de setembro/2017 (b) em 950 hPa.	71
Figura 20. Climatologia de outubro/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de outubro/2017 (b) em 950 hPa.	72
Figura 21. Climatologia de novembro/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de novembro/2016 (b) e anomalia de novembro/2017 (c) em 950 hPa.....	73
Figura 22. Climatologia de dezembro/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de dezembro/2016 (b), anomalia de dezembro/2017 (c), anomalia do dia 01/12/2017 (d), anomalia do dia 02/12/2017 (e), anomalia do dia 03/12/2017 (f), anomalia do dia 05/12/2017 (g), anomalia do dia 06/12/2017 (h), anomalia do dia 07/12/2017 (i), anomalia do dia 08/12/2017 (j), anomalia do dia 10/12/2017 (k), anomalia do dia 11/12/2017 (l), anomalia do dia 12/12/2017 (m), anomalia do dia 13/12/2017 (n), anomalia do dia 14/12/2017 (o), anomalia do dia 15/12/2017 (p), anomalia do dia 16/12/2017 (q), anomalia do dia 17/12/2017 (r), anomalia do dia 18/12/2017 (s), anomalia do dia 22/12/2017 (t), anomalia do dia 23/12/2017 (u), anomalia do dia 24/12/2017 (v), anomalia do dia 25/12/2017 (x), anomalia do dia 26/12/2017 (y), anomalia do dia 29/12/2017 (z), anomalia do dia 30/12/2017 (w), anomalia do dia 31/12/2017 (wi) em 950 hPa.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Temperatura Média Mensal (1961-1990).....	44
Tabela 2. Temperatura Média Mensal (1991-2020).....	44
Tabela 3. Temperatura Média Mensal IAEA (1965-1987)	45
Tabela 4. Comparação das normais de TMM do INMET versus IAEA	46
Tabela 5. Precipitação Média Mensal (1961-1990).....	47
Tabela 6. Precipitação Média Mensal (1991-2020).....	47
Tabela 7. Precipitação Total Média Mensal IAEA (1965-1987).....	48
Tabela 8. Comparação das normais de PMM do INMET versus IAEA	48
Tabela 9. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ para amostras coletadas em Brasília (1965 a 1987- IAEA) .	49
Tabela 10. Média dos registros isotópicos de ^{18}O pela IAEA.....	50
Tabela 11. Amostragens e valores de isótopos de ^{18}O	51
Tabela 12. Comparação dos valores de isótopos de Brasília.....	52

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AS	América do Sul
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
Aw	Clima tropical
BNOA	Baixa do Noroeste Argentino
C	Carbono
CCM	Complexos Convectivos de Mesoescala
CODEPLAN	Companhia de Planejamento do Distrito Federal
CPC	Centro Polar e Climático
CRDS	<i>Cavity Ring-Down Spectroscopy</i>
Cwa	Tropical de altitude
Cwb	Tropical de altitude
DF	Distrito Federal
ENOS	El Niño Oscilação Sul
FF	Frente fria
FP	Frente Polar
H	Hidrogênio
hPa	hectoPascal
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IT	Linhas de Instabilidades Tropicais
JBB	Jardim Botânico de Brasília
JBN	Jatos de Baixos Níveis
MAS	Monções Sul Americanas
mEc	Massa Equatorial Continental
mPa	Massa Polar Atlântica
mTa	Massa Tropical Atlântica
mTc	Massa Tropical Continental
N	Nitrogênio
NCEP	<i>National Center for Environmental Prediction</i>

NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NW	Noroeste
O	Oxigênio
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PMM	Precipitação Média Mensal
ppb	Partes por bilhão
ppm	Partes por milhão
RS1	<i>Palmex Rain Sampler Modelo RS1</i>
S	Enxofre
SCM	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SE	Sudeste
SF	Sistemas Frontais
SMAS	Sistema de Monção da América do Sul
TMM	Temperatura Média Mensal
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VCAN	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZCOU	Zona de Convergência de Umidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Apresentação.....	13
1.2. Relevância do tema de estudo.....	14
1.3. Objetivo Geral.....	16
1.4. Objetivos Específicos.....	17
1.5. Área de estudo.....	17
2. CARACTERÍSTICAS ATMOSFÉRICAS DO CENTRO-OESTE DO BRASIL	20
2.1. Climatologia do Centro-Oeste	20
2.2. Precipitação.....	24
2.3. Temperatura	26
2.4. Fenômenos Meteorológicos atuantes.....	28
2.4.1. Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).....	28
2.4.2. Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).....	29
2.4.3. El Niño Oscilação Sul (ENOS).....	30
2.4.4. Sistema de Monção da América do Sul (SMAS).....	32
2.4.5. Baixa do Chaco	33
2.4.6. Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS).....	34
2.4.7. Sistemas Frontais (SF).....	34
3. DADOS E METODOLOGIA	36
3.1. Dados de precipitação e temperatura de 1961 a 2020.....	36
3.2. Dados IAEA.....	36
3.3. Coleta da precipitação.....	36
3.4. Elaboração dos campos de vento e temperatura	38
3.5. Espectroscopia por tempo de decaimento.....	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
4.1. Aspectos da Temperatura Média em Brasília	44
4.1.1. Normais Climatológicas da temperatura de Brasília - INMET	44
4.1.2. Temperatura Média de Brasília - IAEA.....	45
4.2. Aspectos da precipitação em Brasília	46
4.2.1. Normais Climatológicas de precipitação de Brasília - INMET.....	46
4.2.2. Precipitação Média Brasília - IAEA	47

4.3. Composição isotópica $\delta^{18}\text{O}$ IAEA para Brasília.....	49
4.4. Resultados das amostras	51
4.5. Aspectos do campo de vento.....	52
5. CONCLUSÕES.....	80
5.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	81
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
7. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	89

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

Segundo Barry e Chorley (2009), os fatores climáticos predominantes são: a radiação solar, a circulação atmosférica, a distribuição entre continentes e oceanos, o relevo, as correntes marítimas e a cobertura vegetal do solo. Além disso, eles classificam os componentes do clima como: a temperatura do ar, o regime dos ventos, a umidade do ar, a nebulosidade e a precipitação. Os processos climáticos são realizados de forma simultânea, sendo partes de um sistema dinâmico, consistindo na entrada e modificação de energias provenientes do nível astronômico (macroescala) até o nível humano (microescala) (Ribeiro, 1993). Conhecer o regime climático de uma região é extremamente relevante, compreender como atuam os sistemas climáticos que formam os diferentes tipos de tempo (normais ou excepcionais), assim como explorar a frequência dos eventos extremos e como ele evolui ao longo do tempo. Essas análises possuem resultados que são de grande importância para fundamentar a gestão dos impactos e dos riscos tanto a população humana e suas atividades cotidianas, quanto para o ecossistema em geral (Petrucci, 2022).

O clima e suas modificações possuem uma grande influência em como as práticas sociais se projetam no espaço, sendo assim, monitorar a precipitação, umidade, temperatura, direção dos ventos, entre outros elementos, é uma maneira de conhecer a origem da dinâmica atmosférica e como ela se relaciona com a superfície terrestre (Sant'Anna Neto; Zavattini, 2000). Dessa forma, o espaço e o tempo (cronológico), são importantes durante a análise climática, pois permitem entender se as variações identificadas acontecem devido a mudanças ou se são ciclos periódicos, que se repetem de tempos em tempos, sendo apenas a variabilidade do clima (Sant'Anna Neto; Zavattini, 2000).

Segundo Ferreira e Da Silva Mello (2005) a circulação geral da atmosfera é o que determina grande parte do clima de qualquer região. Isso acontece em decorrência do aquecimento diferencial do globo pela radiação solar, da forma como os oceanos e continentes são distribuídos assimetricamente e também de suas características topográficas. Os padrões de circulação que são gerados na atmosfera são responsáveis por redistribuir o calor, umidade e momentum (quantidade de movimento) em todo o planeta. Entretanto, a redistribuição não ocorre de forma homogênea, sendo capaz de, em alguns momentos, diminuir as variações regionais dos elementos climáticos, como a

temperatura e a precipitação, sendo eles muito influentes nas atividades cotidianas da sociedade (Climanálise, 1986).

Este trabalho está organizado em cinco partes: a primeira parte apresenta o tema, a relevância do tema de estudo, objetivos e área de estudo; na segunda parte são descritas as características atmosféricas da região Centro-Oeste do Brasil, com dados de climatologia, precipitação, temperatura e fenômenos meteorológicos atuantes; na quarta parte são explicados os dados e metodologia, com uma explicação sobre a coleta da precipitação, a elaboração dos campos de vento e temperatura e o métodos de espectroscopia por tempo de decaimento; a quinta parte possui os resultados e discussão, indicando os aspectos da temperatura média em Brasília, os aspectos da precipitação, a composição isotópica, resultados das amostras e os aspectos do campo de vento; a sexta e última parte possui as conclusões finais do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

1.2. Relevância do tema de estudo

Este estudo irá trabalhar com o $\delta^{18}\text{O}$, utilizando a espectroscopia para analisar eventos de precipitação e a existência de eventos meteorológicos extremos na cidade de Brasília - DF. Os níveis do $\delta^{18}\text{O}$ de eventos normais de precipitação e os níveis dos mesmos isótopos em eventos extremos podem ser comparados, a fim de identificar o seu comportamento.

Estudar a composição isotópica da precipitação é muito importante, afinal ele é capaz de conceder a compreensão dos parâmetros climáticos que abrangem as mudanças físicas da água em seu trajeto na atmosfera. Diante das mudanças climáticas, a análise de modelagens de circulação geral da atmosfera se mostra de grande importância, pois através disso podemos compreender mais sobre o clima global (Gomes, 2022).

Quando o ciclo dos isótopos da molécula da água na natureza é tema para um estudo, muitas vezes pode ser confundido com o ciclo da água, que é gerido por dois fenômenos físicos, a evaporação e a condensação. Durante a condensação a precipitação é gerada por uma massa bem definida de vapor d'água contida em uma nuvem, enquanto na evaporação a água altera-se do estado líquido para o estado de vapor. Geralmente é possível notar que durante as mudanças de fases ocorrem um fracionamento isotópico, o que significa que, enquanto uma das fases ficará isotopicamente mais leve, a outra ficará isotopicamente mais pesada. Dessa forma, nota-se que entre as fases envolvidas no ciclo da água existe um certo fracionamento isotópico (Martinelli *et al.*, 2009).

Devido as trocas de fase no ciclo da água, os isótopos apresentam modificações nas proporções ao longo do ciclo hidrológico. Dessa forma, a transformação de um

elemento específico do seu estado físico ou químico a outro permite que cada evento de precipitação possua uma composição isotópica única, concedendo a estes um tipo de “impressão digital” da água (Clark & Fritz, 1997). A distribuição isotópica referente à alteração de fase no ciclo da água está relacionada ao fracionamento isotópico, que acontece em qualquer tipo de reação termodinâmica devido às diferenças nas taxas de reação para as diversas espécies moleculares.

A grande ocorrência de chuvas nos trópicos se associa a um regime convectivo vertical de pequena escala nomeado como “efeito da quantidade”, e com a progressão do fracionamento isotópico pela condensação do vapor, a fração isotopicamente rica é retirada e o vapor restante se torna rico em moléculas compostas por isótopos leves (Vuille *et al.*, 2003).

A forma como o conteúdo isotópico é distribuído no planeta está totalmente relacionada com as fontes de umidade global, como por exemplo, o oceano tropical, responsável por produzir aproximadamente 65% do fluxo de evaporação global entre as latitudes de 30°S a 30°N (Peixoto e Oort, 1983). O fracionamento depende da temperatura, sendo assim, o conteúdo de $\delta^{18}\text{O}$ na precipitação se mostra mais rico nos trópicos e diminui quando se direciona aos polos, devido à queda da temperatura (Roskanzi *et al.*, 1993).

Na América do Sul, o conteúdo isotópico que é observado na precipitação é determinado por quatro fatores importantes: fontes de umidade atmosférica (Oceanos Pacífico e Atlântico, e o Mar Caribenho); a cadeia de montanhas dos Andes, que atua como uma barreira capaz de bloquear e mudar a direção das massas de ar; a Bacia Amazônica, com sua intensa evaporação; e o movimento sazonal da ZCIT (Rozanski e Araguás, 1995).

De acordo com Vuille e Werner (2005), analisando os sistemas atmosféricos numa escala regional, é possível descrever qual é a influência do sistema de monção da América do Sul quando relacionado ao conteúdo isotópico das precipitações que são originadas por este sistema. A determinação de um regime repentino de precipitações durante o verão, na região dos trópicos e também em áreas subtropicais da América do Sul, se associa diretamente a presença do sistema de monção, originado através do gradiente de temperatura, que gera ações convectivas atuantes no Sul da Amazônia e na Cordilheira dos Andes.

Com o propósito de entender quais são as consequências das mudanças climáticas sobre o ciclo hidrológico, os isótopos estáveis existentes na precipitação estão sendo muito utilizados como uma ferramenta em estudos climáticos e hidrometeorológicos. Seu

uso está associado às alterações no estado físico (líquido, sólido e vapor) da molécula de água, que possui em sua constituição isótopos de oxigênio ($^{16}\text{O}/^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$) e hidrogênio ($^1\text{H}/^2\text{H}$), resultantes do processo de fracionamento isotópico, e que podem ser relacionados a variações de parâmetros climáticos, como temperatura, tipos de chuva, quantidade de precipitação, origem das massas de vapor, entre outros, capazes de proporcionar uma ligação entre as condições climáticas e os isótopos de precipitação (Kohn & Welker, 2005; Kurita *et al.*, 2009; Soderberg *et al.*, 2013; Aggarwal *et al.*, 2016; Gastmans *et al.*, 2017).

Os isótopos ambientais são denominados assim devido à sua ampla presença no meio ambiente, o que contribui para a compreensão dos processos naturais (Martinelli *et al.*, 2009).

O uso da metodologia de análise de isótopos estáveis em estudos ambientais é uma importante ferramenta na avaliação das influências das atividades antrópicas sobre os ambientes naturais (Martinelli *et al.*, 2009). Os isótopos estáveis mais utilizados em estudos ambientais são os de carbono (^{12}C e ^{13}C), nitrogênio (^{14}N e ^{15}N), oxigênio (^{17}O e ^{18}O), hidrogênio (^1H e ^2H) e enxofre (^{32}S e ^{34}S) (Neves, 2021).

A complexidade climática das áreas tropicais tem gerado esforços para entender as relações isotópicas clássicas entre temperatura (*temperature effect*) e precipitação (*amount precipitation*) com a composição isotópica da chuva, entretanto essa questão ainda não foi solucionada totalmente (Rozanski *et al.* 1993). Gomes (2022) discorre em seu trabalho como vários autores evidenciam mecanismos e correlações capazes de explicar as variações observadas, como por exemplo as alterações na composição isotópica da precipitação associadas a fonte de vapor da precipitação (Jouzel *et al.*, 2013), a destilação das massas de ar no decorrer do seu transporte (Ishizaki *et al.*, 2012), reciclagem da água através de processos de troca na superfície terrestre (Winnick *et al.*, 2014), sistemas atmosféricos de grande escala formadores de chuva (Dos Santos *et al.*, 2019A; Sánchez-Murillo *et al.*, 2016), associação com eventos relativos a fenômenos atmosféricos-oceânicos, como El Niño Oscilação Sul (ENOS) (Moerman *et al.*, 2013; Dos Santos *et al.*, 2019b), processos que acontecem durante a queda das gotas de chuva (Srivastava *et al.*, 2012), e também sobre a ação de processos convectivos (Aggarwal *et al.*, 2016).

1.3. Objetivo Geral

O objetivo desta dissertação é determinar a origem da chuva a partir da composição isotópica de amostras coletadas em Brasília – DF no período de novembro de 2016 a agosto de 2018.

1.4. Objetivos Específicos

- Definir os valores da razão isotópica de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) na precipitação normal, extrema e mensal em Brasília - DF;
- Relacionar dados de $\delta^{18}\text{O}$ na precipitação de Brasília com os dados históricos disponibilizados pela Agência Internacional de Energia Atômica (*International Atomic Energy Agency – IAEA*);
- Comparar os dados de $\delta^{18}\text{O}$ (precipitação) de Brasília com a composição de $\delta^{18}\text{O}$ conhecida de diferentes áreas fontes de massas de ar (tropical ou polar);
- Identificar as massas de ar responsáveis pela assinatura de $\delta^{18}\text{O}$ na precipitação mensal de Brasília pela análise dos campos da circulação atmosférica em 925 hPa da América do Sul.

1.5. Área de estudo

Brasília é a capital federal do Brasil e a sede do governo do Distrito Federal, a cidade está localizada na região Centro-Oeste do país (Figura 1), ocupando uma área de 5.760,784 km² de acordo com o censo de 2021. Segundo o último censo, a população de Brasília é de 2.817.068 pessoas, possuindo uma densidade demográfica de aproximadamente 489,01 hab/km² (IBGE, 2022). As principais bacias que compõem a rede hidrográfica da cidade são as dos rios Maranhão, Preto, Corumbá, Descoberto, Paranoá, São Bartolomeu e São Marcos. Brasília possui um relevo na maior parte plano, apresentando um suave ondulado, relevos inclinados que se estendem da base das chapadas e dos morros residuais em direção aos vales, e relevos dissecados ao longo dos rios (Codeplan, 2020).

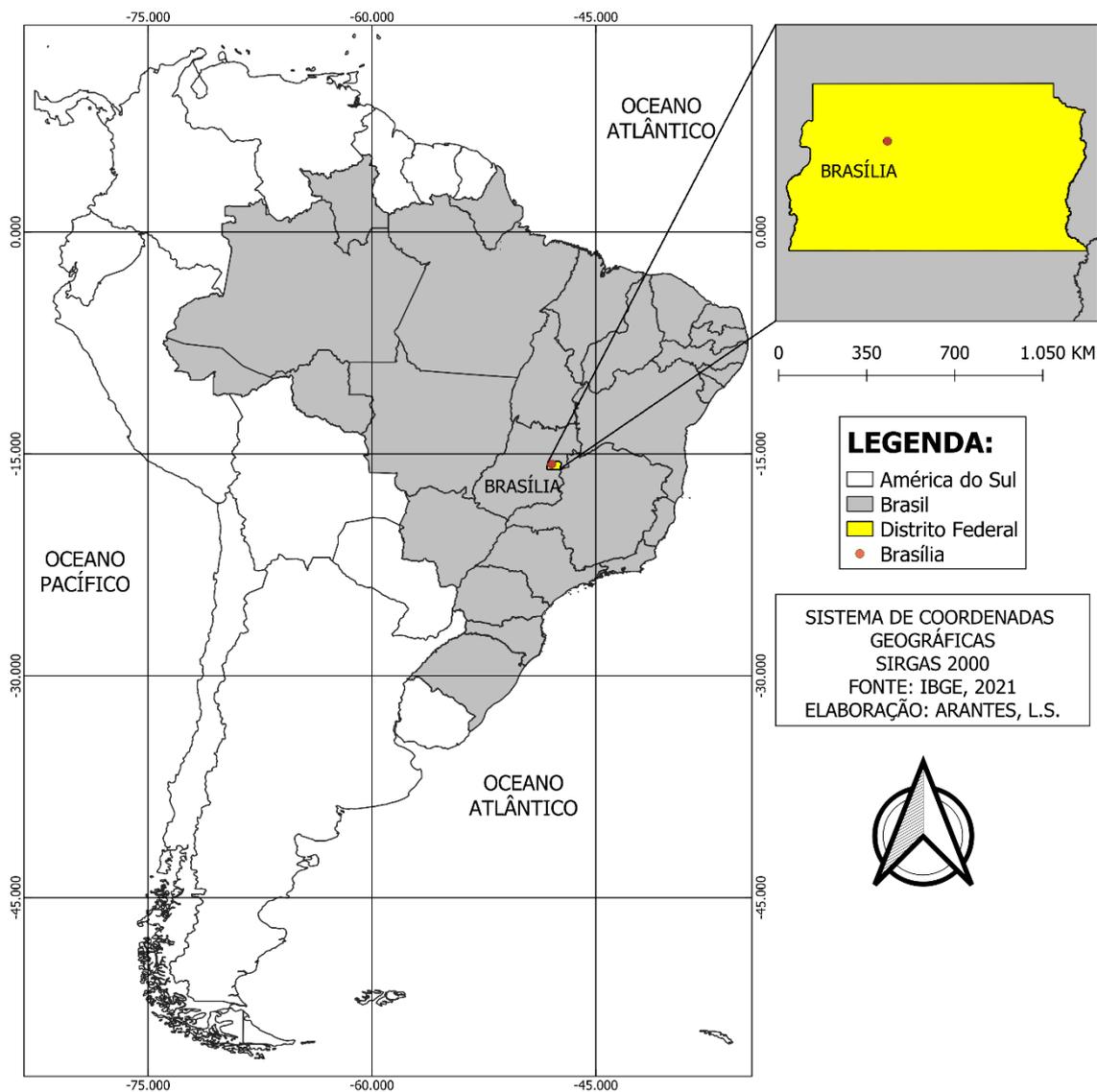


Figura 1. Mapa destacando Brasília, área de estudo.

Segundo o Codeplan (2017) o bioma predominante em Brasília é o Cerrado, possuindo uma vegetação composta por árvores de troncos e galhos retorcidos, casca grossa e folhas grandes, além de arbustos e gramíneas, e de acordo com o Jardim Botânico de Brasília (JBB) o município apresenta uma fauna abundante e diversificada, composta por espécies raras ou ameaçadas de extinção, tais como: tamanduá-bandeira, jaguatirica, lobo-guará, ouriço-caixeiro, águia-chilena, entre outros.

A altitude de Brasília varia entre aproximadamente 1.000 e 1.200 metros acima do nível do mar, e o clima, de acordo com a classificação de Köppen, pode ser encaixado nos tipos: tropical (Aw), tropical de altitude Cwa (Clima subtropical de inverno seco e verão quente) e tropical de altitude Cwb (Clima subtropical de altitude, com inverno seco e verão ameno) (Almeida, 2017). O clima predominante no Distrito Federal é classificado como Tropical Alternadamente Úmido e Seco, em que a média mensal de temperatura do

ar varia entre 22°C e 26°C, e a média anual de precipitação é de 1550mm. Sendo assim, pode-se dizer que o Distrito Federal possui duas estações bem definidas: a estação seca, de meados de abril até o começo de outubro, e a chuvosa, do início de outubro até abril (Galdino, 2015).

A temperatura de Brasília varia de forma relevante nas áreas menos urbanizadas, sendo possível verificar que a média das mínimas no inverno cai de 10°C a 5°C. A umidade relativa do ar é de cerca de 70%, e pode chegar a 20% ou menos durante o inverno. Os eventos extremos na região são ocasionados por causa da variabilidade no comportamento das chuvas de verão, o que causa excesso ou falta de chuva, afetando o abastecimento nos recursos hídricos e a produção agrícola (Anunciação, 2013; Castro Filho *et al.*, 2012).

2. CARACTERÍSTICAS ATMOSFÉRICAS DO CENTRO-OESTE DO BRASIL

2.1. Climatologia do Centro-Oeste

Para estudar a climatologia da região Centro-Oeste do Brasil, é preciso entender um pouco sobre a América do Sul. De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger (Figura 2), reavaliada por Peel *et al.* (2007), é possível identificar três climas predominantes na América do Sul, sendo elas: tropical em 60,1% da área total, temperado em 24,1%, e árido em 15,0%. No restante da área (0,8%) verifica-se o clima Polar ou de Montanha, que acontece somente nas áreas mais altas da Cordilheira dos Andes e no extremo sul do continente (Griebler Júnior, 2018).

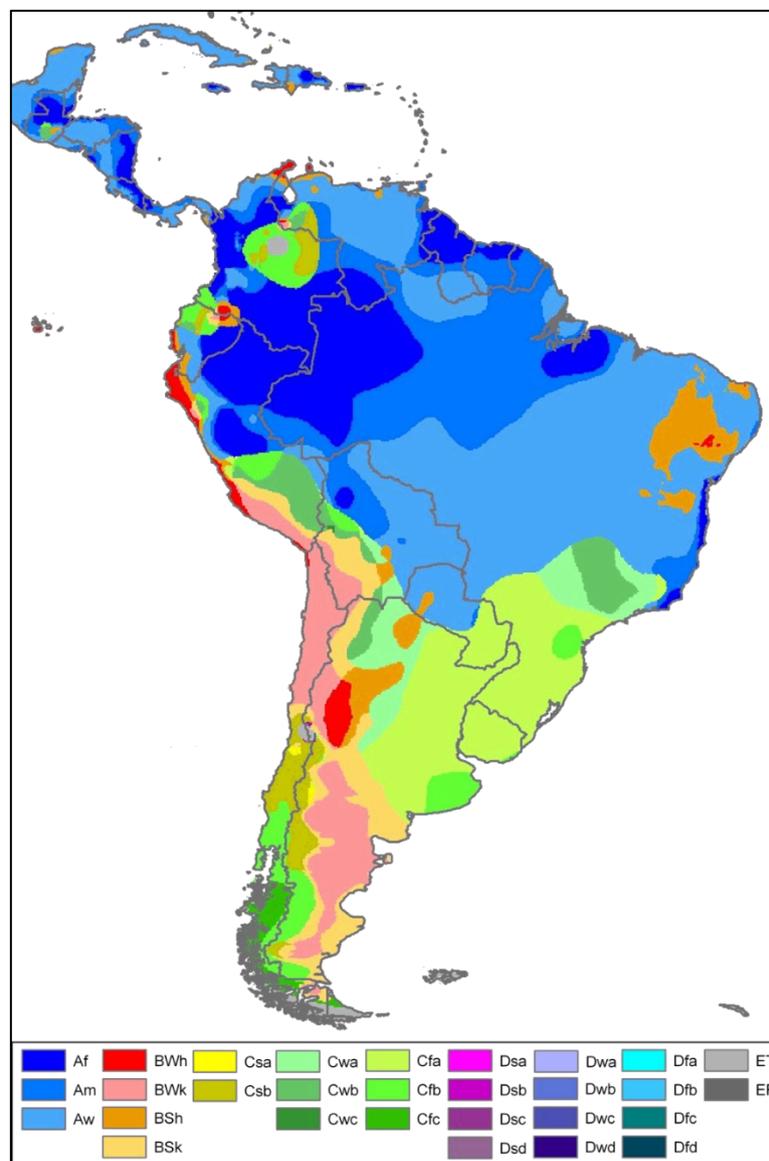


Figura 2. Classificação climática de Köppen-Geiger.

Fonte: Adaptado de Peel *et al.* (2007).

Em virtude do aquecimento desigual do planeta pela radiação solar e pela sua posição latitudinal, o continente Sul Americano é atravessado pelas principais zonas de pressão que atuam no Hemisfério Sul. Da região equatorial, local de convergência relacionada aos ventos alísios, até as altas subtropicais individualizadas em duas amplas células semi-fixas e estáveis sobre os oceanos, e também as baixas polares, se referindo a Baixa Troposfera. Na Alta Troposfera é possível visualizar outros sistemas, como o Jato Polar, Jato Subtropical e a Alta da Bolívia. A movimentação das massas de ar atuantes sobre a América do Sul também é necessária para a compreensão das condições temporais no continente (Alves *et al.*, 2007).

De acordo com Siqueira (2012) a América do Sul encontra-se entre os dois maiores oceanos existentes, os Oceanos Pacífico e Atlântico. Sendo assim, o continente sofre influência de ambos os oceanos em seu clima. Durante o verão a circulação atmosférica atuante na América do Sul apresenta algumas características marcantes como a Baixa do Chaco, a Alta da Bolívia e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), enquanto no inverno são ressaltadas as incursões de ar frio por todo o continente até a região Sul da Amazônia. Já o deslocamento meridional da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é responsável por condicionar as variações sazonais da região nordeste do continente, além da interação meridional entre os trópicos e extratropicais, que é encarregado por determinar as características do clima na parte central e no sul do continente (Satyamurty *et al.*, 1998).

Para analisar a climatologia da região Centro-Oeste é preciso verificar o relevo, a localização geográfica exata (latitude e longitude), e os fenômenos meteorológico que ocorrem na grande, meso e micro escalas da região. Cada um destes itens citados tem sua importância, e podem contribuir para a ocorrência de mudanças térmicas, capazes de modificar os processos de transferência de energia e umidade, contribuindo também para a ocorrência de tempestades (Barros e Balero, 2012).

De acordo com Nimer (1979) enquanto o relevo e a altitude levam à diversificação térmica, o mecanismo atmosférico, determinando uma marcha estacional de precipitação pluviométrica com máximo no verão e mínimo no inverno, atua de forma a criar uma uniformidade regional. Sendo assim, na região Centro-Oeste, o relevo, através da variação de altitude e de latitude, levam a uma heterogeneidade climática, enquanto o mecanismo atmosférico, que é um fator dinâmico, assegura um tipo de homogeneidade.

Existem algumas massas de ar que são capazes de influenciar no clima da região Centro-Oeste. No verão, ela sofre influência da Massa Equatorial Continental, enquanto no inverno acontece o encontro da Massa Tropical Atlântica com a Massa Polar Atlântica.

As modificações que são provocadas pelas massas de ar são responsáveis pela existência e diferença entre os períodos quente e úmida, frio e seco (Maciel, 2002).

Borsato e Mendonça (2015) definem as massas de ar da seguinte maneira:

(...) podem ser definidas como um corpo de ar com milhares de quilômetros de diâmetro e com características uniformes. As massas de ar são grandes células de ar na troposfera, por isso na circulação secundária. Dentro dessas células há uma uniformidade na temperatura e na umidade relativa, e uma gradativa variação na pressão a partir de um centro ciclônico ou anticiclônico. Uma são semifixas, outras migratórias. A região onde uma massa de ar adquire as suas propriedades e características de temperatura e umidade é chamada de região de origem. As áreas mais comuns de origens são as grandes massas líquidas, regiões geladas, polares, e as grandes extensões continentais. Aquelas massas de ar migratórias tendem a adquirir as características correspondentes às áreas por onde se deslocam, o frio das regiões polares, o calor dos trópicos, a umidade dos oceanos ou a secura dos continentes. O estado do tempo dentro de uma massa de ar varia localmente e diariamente, devido ao aquecimento ou arrefecimento, ou ainda, à precipitação ao longo do tempo cronológico.

A região Centro-Oeste é dominada constantemente pela massa Tropical Atlântica (mTa) que, por causa da ação do anticiclone semifixo do Atlântico Sul, tem uma influência muito importante durante todo o ano (Figura 3). Durante o verão, essa massa se torna instável em virtude do aquecimento basal que sofre ao entrar em contato com o continente. Enquanto que, no inverno, o resfriamento basal é responsável por aumentar a estabilidade superior, colaborando para a ocorrência de tempo estável (Monteiro, 1962).

Segundo Barros (2003), a massa Equatorial Continental (mEc), que se origina na planície amazônica, é quente e possui uma alta umidade específica. No verão, devido à atração causada pelos sistemas de baixa pressão no interior do continente, a mEc tende a avançar do noroeste para sudeste, ou até mesmo para leste-sudeste, alcançando a região Centro-Oeste, provocando a elevação das temperaturas, e tornando-se o causador do aumento da umidade e das precipitações. A mPa é o sistema atmosférico que tem menos atuação na região de Brasília, que está localizada no Planalto Central Brasileiro, portanto ela recebe mais intensamente a mEc e a mTa (Borsato e Mendonça, 2015).

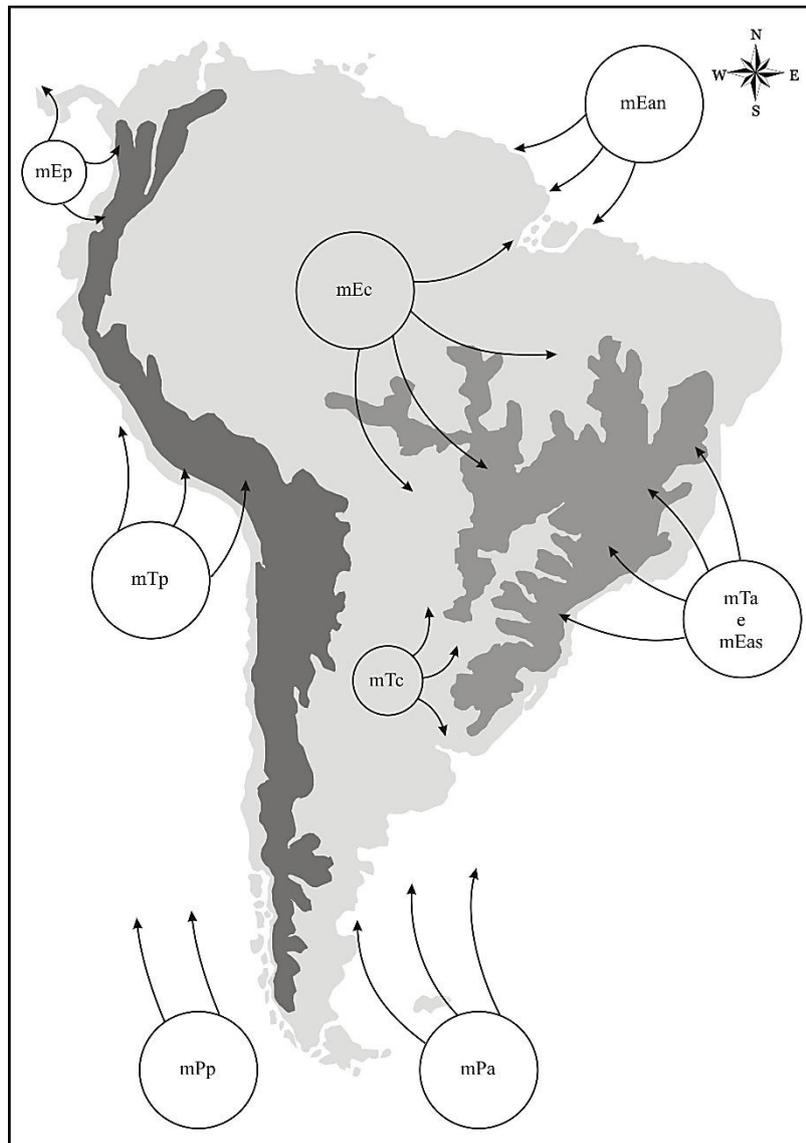


Figura 3. Centros dispersores das massas de ar que atuam na América do Sul.

Fonte: Torres e Machado, 2008.

Conforme Nimer (1989) explica em seu trabalho, no outono as massas mEa e mTa se expandem em direção ao centro do país, fazendo com que a mEc recue para a região setentrional do Brasil, o que configura o final do período chuvoso no Centro-Oeste. Durante o inverno o enfraquecimento da mEc permite o avanço das massas mTa e mEa, e enquanto o Anticiclone Polar Atlântico se fortalece a mPa avança sobre a região Sul, atingindo o Sudeste e o Centro-Oeste. Dessa forma, essa dinâmica traz ao estado de Goiás e ao Distrito Federal as características que os configura com um inverno frio e seco. Na primavera a mTa possui maior atuação do que no verão, pois é fortalecida pelos sistemas atmosféricos dominantes. As massas mEa e mTa realizam o recuo para sua área de origem (Oceano Atlântico) devido ao fortalecimento da mEc, trazendo para o Centro-Oeste o retorno das chuvas a partir de outubro e novembro.

Segundo Barros e Balero (2012) o tempo ensolarado é constantemente suscetível a sofrer mudanças bruscas, que são provocadas por diferentes sistemas de circulação ou até mesmo por correntes perturbadas, podendo destacar as seguintes: sistema de correntes perturbadas de norte – da convergência intertropical (ZCIT), sistema de correntes perturbadas de oeste – de linhas de instabilidade tropicais (IT) e sistema de correntes perturbadas de sul – do anticiclone polar e frente polar (FP) (Nimer, 1979).

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), as Monções Sul Americanas (MAS), a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), Sistemas Frontais (SF), as Linhas de Instabilidade, Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) Tropicais ou Subtropicais e Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM), são os principais fenômenos meteorológicos atuantes na região Centro-Oeste (Vilar, 2016).

2.2. Precipitação

De acordo com Vera *et al.* (2006) a precipitação anual na região Centro-Oeste brasileira ultrapassa o valor de 1500 mm/ano. Os sistemas atmosféricos de origem tropical e extratropical são os responsáveis por atuar nessa região (Climanálise, 1986). O setor localizado mais ao norte é influenciado por sistemas atuantes na Amazônia, como as CCMs tropicais, enquanto a região mais ao sul recebe influência de sistemas extratropicais, como as linhas de instabilidade e as frentes frias. No Centro-Oeste a precipitação é máxima durante o verão, afinal também é impactada pelo sistema de monção da América do Sul.

Barros e Balero (2012) explicam em seu trabalho que o regime das precipitações na região Centro-Oeste é tipicamente tropical, tendo uma máxima durante o verão e uma mínima durante o inverno. Cerca de 70% da precipitação acumulada durante o ano se precipita de novembro a março em quase toda a região. De acordo com Barros (2003), o trimestre novembro-dezembro-janeiro é o mais chuvoso no Distrito Federal, onde cerca de 45 a 55% do total anual da precipitação é registrado. Porém, Alves (2009) indica que na região Centro-Oeste o período mais chuvoso é de dezembro a fevereiro.

O inverno no Centro-Oeste é excessivamente seco, sendo o contrário do verão, onde a precipitação é abundante. No inverno as chuvas são incomuns, principalmente no setor oriental de Goiás e no Distrito Federal, onde é comum não se ter registro de chuvas durante um mês inteiro. Além de que, as chuvas não são fartas, portanto, os totais mensais de precipitação são pouco significativas durante essa época do ano (Nimer, 1979). Dessa forma, Barros (2003) destaca que o mês que antecede o inverno (maio) e o mês que o sucede (setembro) também são poucos chuvosos em grande parte do Centro-Oeste. Sendo

assim, a duração do período seco é de geralmente cinco meses, além do trimestre de inverno os meses de maio e setembro também são considerados um período seco (Barros e Balero, 2012).

O deslocamento para sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que acompanha a marcha aparente do Sol na direção do Trópico de Capricórnio está associado ao período de chuvas da região. No centro da América do Sul a ZCIT avança para sul com maior frequência do que para as regiões costeiras, o que causa instabilidade no Brasil central durante os meses de verão. No verão as temperaturas são elevadas durante todo o ano, devido a influência da massa de ar tropical marítima e equatorial, enquanto no inverno a região não apresenta nenhuma ou baixa precipitação, devido ao deslocamento da ZCIT para norte (Cardoso *et al.*, 2014).

Sant'Anna Neto *et al.* (2000), ressalta que no regime tropical no Brasil há um outro fenômeno gerador de chuva importante, trata-se da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Esse fenômeno meteorológico se configura no verão e é mantido pela interação entre a convecção tropical e a convergência associada à Frente Polar Atlântica. Em alguns períodos, percebe-se a formação de um canal associado à convergência de umidade e massa, similar à ZCAS, mas sem configuração mínima de quatro dias. Este padrão similar é chamado de Zona de Convergência de Umidade (ZCOU). (Borsato, 2007).

As medições das Normais Climatológicas que são disponibilizadas pelo INMET, que consideram os elementos do clima nos anos de 1961 a 1990 e de 1991 a 2020, relacionados à Brasília, indicam duas estações bem definidas, uma seca – de maio até setembro, e outra chuvosa – de outubro a abril (Figura 4).

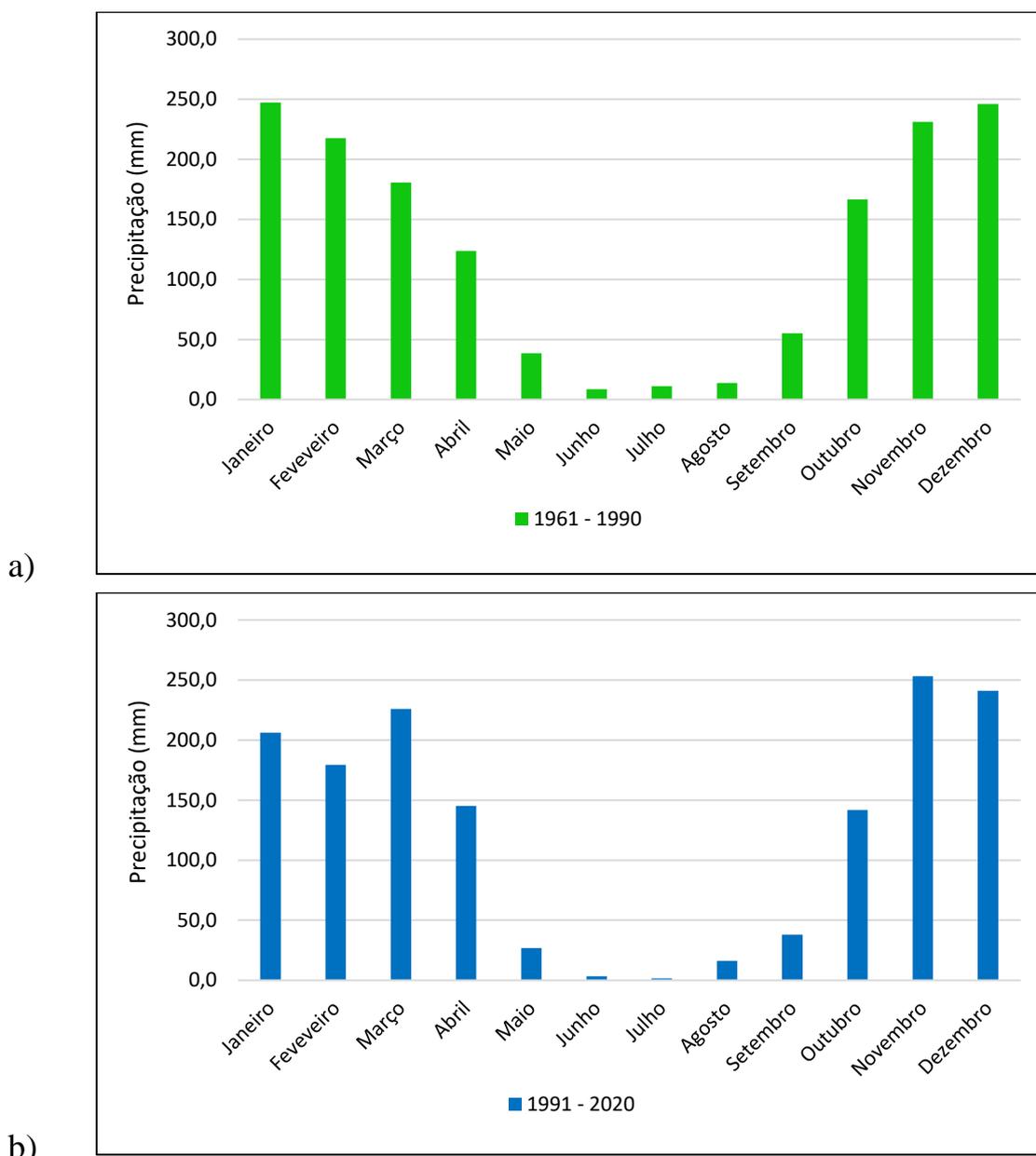


Figura 4. Gráfico comparativo de precipitação acumulada (mm) de Brasília.

Fonte: Dados do INMET.

Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/DF/83377>. Acesso em janeiro de 2023.

2.3. Temperatura

O estudo da temperatura do ar é fundamental para a compreensão dos outros fenômenos climatológicos de uma região, colaborando para o planejamento e gerenciamento do uso e ocupação do solo. Os elementos do clima estão associados com a formação da fitofisionomia de uma região, e também é responsável por influenciar nas práticas cotidianas da população (Cardoso *et al.*, 2012).

Segundo Santos (2010), a importância da temperatura de superfície está relacionada à chance de sua aplicação no campo da meteorologia, além de análises

focadas em recursos minerais, especialmente na determinação de modelos relacionados ao balanço de energia e bioclimáticos. Os dados relacionados à temperatura de superfície terrestre possuem uma grande carga científica, no que diz respeito ao fornecimento de contribuições muito relevantes associadas a diversos aspectos das atividades econômicas e comerciais relacionados à agricultura (Silva e Santos, 2007).

Existem diversos fatores regionais que exercem influência tanto na dinâmica da temperatura quanto na da precipitação. No que diz respeito à temperatura, a latitude emerge como o principal determinante de sua variação em diversas regiões do globo terrestre, pois a posição latitudinal está diretamente vinculada à quantidade de radiação recebida. Além disso, a proximidade com corpos d'água desempenha um papel significativo, afinal quanto maior a quantidade e proximidade desses corpos hídricos, mais amena tende a ser a temperatura. Nas regiões tropicais, onde se encontram o estado de Goiás e o Distrito Federal, as notáveis diferenças de temperatura são frequentemente atribuídas ao efeito da variação da altitude. Em média, a temperatura do ar diminui cerca de 0,6°C a cada 100 metros de altura (AYOADE, 1983, p. 7-8).

De acordo com o estudo de Da Silva *et al.* (2008), o clima que predomina no Distrito Federal é o Tropical Sazonal, com um inverno seco. A temperatura média anual permanece entre 22°C e 23°C (Figura 5), enquanto as máximas absolutas mensais não apresentam muitas variações ao longo dos meses do ano, podendo atingir mais de 40°C. As mínimas absolutas mensais variam muito, podendo atingir valores baixos nos meses de maio, junho e julho.

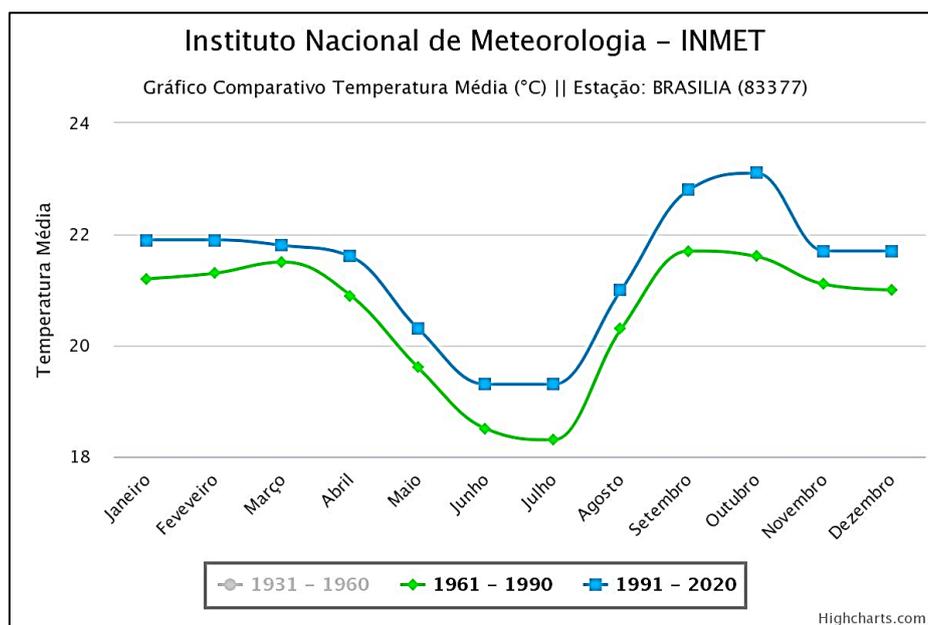


Figura 5. Gráfico comparativo de temperatura média (°C) de Brasília.

Fonte: Dados do INMET.

Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/DF/83377>. Acesso em outubro de 2023.

2.4. Fenômenos Meteorológicos atuantes

2.4.1. Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)

Segundo Melo *et al.*, (2009) as diferentes formas no aquecimento da atmosfera ao redor do planeta são capazes de causar movimentos globais atmosféricos, ou seja, massas de ar se deslocam, e são capazes de movimentar massas de ar de temperaturas diferentes em vários locais do planeta. Na região equatorial o aquecimento solar intenso é o fator causador da ascensão do ar e da formação de várias nuvens e muita chuva. É nessa região que se encontra a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), uma banda de nebulosidade que exerce influência direta sobre as precipitações nos continentes africano, asiático e sul-americano, conforme demonstrado por Hastenrath e Heller (1977), Citeau *et al.* (1988), e Uvo (1989). Esse sistema meteorológico é caracterizado por uma faixa zonal de atividade convectiva que opera na região tropical do planeta, provocando instabilidade e desempenhando um papel crucial na modulação do clima das regiões tropicais (FERREIRA, 1996), sendo um fenômeno relacionado à circulação global em larga escala.

A ZCIT é uma zona de nebulosidade que se ordena na região equatorial do planeta e migra de forma sazonal de uma posição ao norte (14°N) durante os meses de agosto-setembro, para uma posição localizada mais ao Sul (2°S) durante os meses de março-abril, em anos considerados normais. O deslocamento sazonal para Norte e para Sul está

vinculado a diversas razões, podendo ressaltar a continentalidade, maritimidade, relevo das terras emersas e a vegetação que cobre os continentes (Griebler, 2018). A ZCIT se forma na área de baixas latitudes, em que acontece o encontro entre os ventos alísios originários do Sudeste com aqueles de origem do Nordeste, criando a ascendência das massas de ar, que normalmente são úmidas. Os ventos são calmos, portanto, as calmarias tornam-se constantes, e as correntes de ar que ascendem dão origem a nuvens convectivas e precipitações frequentes (Torres e Machado, 2011).

Torres e Machado (2008) explicam que a ZCIT funciona como um divisor entre as circulações atmosféricas celulares que se localizam próximas ao Equador, sejam as células norte ou sul de Hadley. Ela é móvel, pois se desloca no decorrer do ano sob a ação do movimento aparente do Sol. Apresenta sua posição próxima ao Sul em março e próxima ao Norte em setembro, possuindo uma diferença temporal de cerca de 50 dias. A disponibilidade diária e sazonal é influenciada por diversos fatores, tais como a continentalidade ou a maritimidade, o relevo e a vegetação.

Esse circuito de escoamento em formato de célula acontece graças a radiação solar, que é muito intensa na faixa do Equador, ressaltando as baixas pressões na superfície e a convergência em baixos níveis dos ventos alísios de Nordeste e Sudeste (provenientes dos hemisférios Sul e Norte), além de provocar divergências nos níveis superiores. O escoamento nos níveis superiores passa por um resfriamento adiabático, seguido pela condensação e precipitação, resultando na formação e circulação dos ventos contra alísios que se direcionam para as médias e altas latitudes. Uma parcela desses ventos sobre uma subsidência (zonas de cinturões anticiclônicos), se aquece e volta a ser alísio outra vez, concluindo o circuito da célula de Hadley (Martins, 2022).

Segundo Alves *et al.* (2007), a ZCIT é o aspecto mais importante para determinar se haverá abundância ou deficiência de chuva no setor norte do Nordeste do Brasil, alternando entre os hemisférios Sul e Norte de forma sazonal. Esse sistema atua principalmente nos meses entre fevereiro e maio.

2.4.2. Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é um fenômeno atmosférico que ocorre durante o verão da América do Sul, definido pela persistência de uma banda de nebulosidade orientada no sentido Noroeste-Sudeste (NW-SE), relacionada com uma região de convergência bem acentuada em baixos níveis. Possui uma extensão que vai a partir do Centro Sul da Amazônia, até regiões Centro-Oeste e Sudeste, Centro Sul da Bahia, Norte do estado do Paraná e que se desenvolve em direção ao Oceano Atlântico

Sudoeste (Ferreira *et al.*, 2004). A principal consequência da atuação desse sistema meteorológico se dá no impacto que acontece no regime pluviométrico no final da primavera e nos meses de verão austral, em uma grande extensão do Brasil e de países ao redor, sendo o motivo para que existam períodos intensos e constantes de precipitação em algumas regiões, e também a diminuição considerável das chuvas nas regiões adjacentes (Nogués-Paele e Mo, 1997; Satyamurty *et al.*, 1998; Carvalho *et al.*, 2004; Grimm, 2011; Quadro *et al.*, 2012).

A ZCAS é o resultado da intensificação do calor e da umidade que se origina a partir do encontro entre massas de ar quentes e úmidas da Amazônia e do Atlântico Sul na porção central do Brasil. Normalmente uma ZCAS se estende desde o Sul da região Amazônica até a porção central do Atlântico Sul (Mendonça e Danni-Oliveira, 2007).

Climatologicamente, o período em que a ZCAS atua se relaciona de forma direta com a configuração do Sistema de Monção da América do Sul (SMAS), que tem uma função significativa para o transporte de umidade para a região central da América do Sul (Gan *et al.*, 2004; Reboita *et al.*, 2010; Grimm, 2011). Nogués-Paele *et al.* (2002) validam em seu trabalho que o SMAS, e a ZCAS, se desenvolvem na primavera austral (Setembro - Novembro), associado à migração da convecção para a região central da Amazônia, ele atinge seu auge durante o verão austral, quando há uma grande quantidade de precipitação sobre a região central da Amazônia e sobre a região Sudeste do Brasil, e começa a se dissipar no início do outono, próximo do mês de Março, quando o máximo da convecção regressa para o extremo Norte da América do Sul.

2.4.3. El Niño Oscilação Sul (ENOS)

O fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) é determinado como um fenômeno de interação entre dois componentes de grande importância, sendo um de natureza oceânica (El Niño e La Niña), e outro de natureza atmosférica (Oscilação Sul). O ENOS possui duas fases, a quente, conhecida como El Niño, e outra fria, a La Niña. A forma como a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Oceano Pacífico equatorial (área central e junto à costa Oeste da América do Sul) reage quando associado aos campos de pressão (caracterizado pelo Índice de Oscilação Sul) é capaz de alterar o padrão de circulação geral da atmosfera. Logo, pode influenciar no clima de várias regiões do mundo, tornando-se responsável pelos desvios extremos que ocorrem em relação ao clima normal, ou seja, pelas anomalias climáticas persistentes, que são aquelas com duração de 6 a 18 meses (Da Cunha *et al.*, 2011).

O ENOS se origina no Oceano Pacífico equatorial, onde, devido aos ventos alísios, que sopram majoritariamente de Sudeste no Hemisfério Sul, possui um padrão de circulação oceânica em que, na costa da América do Sul, as águas são usualmente frias, enquanto no seu extremo oposto, na região da Indonésia e costa da Austrália, as águas geralmente são quentes. Nos anos de El Niño é possível detectar, antes mesmo de se estabelecer, um certo enfraquecimento dos ventos alísios na região do Pacífico equatorial. Isso altera o padrão de circulação oceânica, reduzindo a ressurgência de águas frias na costa da América do Sul e levando as águas quentes do Pacífico Oeste para uma posição a Leste da linha internacional da mudança de data. O Índice de Oscilação Sul é o responsável por reproduzir as anomalias de pressão da superfície, ou seja, quando é negativo é um episódio de El Niño, e quando é positivo as águas mais frias do que o normal aparece na região central e na parte Leste do Oceano Pacífico equatorial, e esse episódio frio é chamado de La Niña, que causa anomalias climáticas inversas às do episódio quente, o El Niño (Da Cunha *et al.*, 2011).

As fases quente e fria do ENOS no Brasil possuem impactos que atingem principalmente sobre a precipitação pluvial das regiões Sul e Nordeste, em que durante os anos de El Niño a precipitação pluviométrica revela valores muito acima do normal climatológica na região Sul, e abaixo do normal no Nordeste, enquanto durante os anos de La Niña acontece exatamente o contrário (Grimm *et al.*, 1996; De Oliveira e Satyamurty, 1998; Marengo e Oliveira, 1998; Diaz *et al.*, 1998; Berlato e Fontana, 2003).

Na região Centro-Oeste, não se observam variações na precipitação pluviométrica durante eventos de El Niño, exceto no Sul do Mato Grosso do Sul, onde há registros de chuvas acima da média e temperaturas mais altas durante esses eventos (Oliveira, 1999; Mendonça & Danni-Oliveira, 2007).

Um estudo breve de Pereira *et al.* (2009) sobre a influência do fenômeno La Niña na precipitação em Goiás não encontrou mudanças no regime de chuvas da região, embora tenham sido observadas anomalias de temperatura durante a ocorrência do fenômeno. Por outro lado, Romero e Marcuzzo (2013) identificaram que tanto o El Niño quanto a La Niña influenciam a precipitação máxima diária, alterando a dinâmica das chuvas na região, embora sem um padrão claro. Dessa forma, ambos os fenômenos podem aumentar ou diminuir o volume das chuvas.

2.4.4. Sistema de Monção da América do Sul (SMAS)

O Sistema de Monção da América do Sul (SMAS) detém alguns aspectos do escoamento em baixos e altos níveis, que colaboram para a formação da convecção que alavanca o período chuvoso sobre as regiões Central e Sudeste do Brasil durante o verão.

De acordo com Zhou e Lau (1998), existem algumas características atmosféricas que possibilitam a configuração inicial da estação chuvosa sobre a América do Sul em baixos níveis, sendo elas: 1) o transporte de umidade em baixos níveis que provém da Amazônia; 2) a redução da pressão sobre a região do Chaco Argentino, ou Baixa do Chaco; 3) influência da Alta Subtropical do Atlântico Sul sobre o escoamento continental e 4) configuração da ZCAS. Já em altos níveis da atmosfera destacam-se a formação da Alta da Bolívia e a configuração do Jato de Altos Níveis. Conforme é discutido por Gan *et al.* (2004), a característica dos regimes de monções é a reversão dos ventos, e esta só acontece no vento zonal em toda a troposfera quando inicia-se a estação chuvosa e a seca (Gan *et al.*, 2009).

Segundo Mechoso *et al.* (2004) a distribuição da massa continental, a orografia e a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) são importantes para definir quais são as características do SMAS. Ele é caracterizado por uma intensa precipitação sobre o Brasil central e sobre a Bolívia, onde ao nordeste se vincula a ZCIT do Atlântico. O anticiclone em altos níveis que se associa ao escoamento tipo monção é a Alta da Bolívia, que se estabiliza junto ao Altiplano. Os ventos alísios que provém do Oceano Atlântico tropical são responsáveis por fornecer a umidade para o sistema de monção, e seu transporte se intensifica ao longo do Leste dos Andes, em que o Jatos de Baixos Níveis (JBN) da América do Sul se desenvolve com ventos mais intensos sobre a Bolívia. O JBN possui um papel significativo no transporte de umidade da Amazônia para os subtropicais, onde produz um aumento da chuva nessa região. Observa-se também que o sistema de baixa pressão em superfície que se associa a esse escoamento do tipo monção se desenvolve sobre a região do Chaco, no centro da América do Sul. O sistema de baixa pressão presente sobre o Norte da Argentina e Oeste do Paraguai é um aspecto climatológico existente ao longo de todo o ano, porém ele apresenta maior intensidade durante o verão (Mechoso *et al.*, 2004).

Conforme Vera *et al.* (2005) esclarecem em seu trabalho, o ciclo de vida do SMAS possui uma fase úmida que tem início na Amazônia equatorial e se desenvolve de forma rápida para Leste e Sudeste no final de setembro e início de outubro, seguido por uma estação úmida com chuvas muito abundantes na bacia Amazônica. Do final de novembro

até o final de fevereiro acontece a fase madura, onde a principal atividade convectiva, sobre o Brasil central, se une a uma banda de nebulosidade na direção Sudeste, com precipitação se estendendo ao Sudeste do Brasil e ao Oceano Atlântico adjacente. O SMAS começa a se dissipar próximo de março, quando as áreas de precipitação intensa sobre a Amazônia começam a diminuir e migram de forma gradual para Noroeste na direção do Equador, enquanto o período chuvoso na costa Leste do Nordeste do Brasil permanece de abril a junho.

Gan *et al.* (2004) demonstram que o ciclo médio anual da precipitação no Brasil central possui um aumento rápido nos meses de primavera (setembro e novembro), uma diminuição também muito rápida em abril, um período mais chuvoso nos meses de dezembro a fevereiro, e que cerca de 90% da precipitação total anual ocorre de outubro até abril.

2.4.5. Baixa do Chaco

A Baixa do Chaco é um sistema de baixa pressão localizado na planície do Chaco, entre a Bolívia, o Norte da Argentina e o Paraguai, criado pelo forte aquecimento superficial característico das estações mais quentes e do escoamento de Norte em baixos níveis, que por diversas vezes pode ser considerada uma extensão da baixa equatorial. Não confundir com a Baixa do Noroeste Argentino (BNOA), que depende da orografia dos sistemas transientes (Seluchi *et al.*, 2003; Seluchi & Saulo, 2012; Escobar & Seluchi, 2012). Pode-se dizer que a BNOA é uma baixa termoorográfica, enquanto a Baixa do Chaco é considerada uma baixa térmica. Em decorrência do aquecimento superficial, a liberação do fluxo de calor latente da convecção torna-se capaz de aumentar a espessura da camada entre 1000 e 250 hPa, o que explica o desenvolvimento da Baixa do Chaco e da Alta da Bolívia de forma concomitante (Lenters & Cook, 1999; Seluchi & Saulo, 2010).

De acordo com Nimer (1979) a Baixa do Chaco é um sistema que se estabelece em uma região caracterizada como uma zona baixa e delimitada, quente e árida, a Leste dos Andes e ao Sul do Trópico, correspondendo ao Chaco argentino-paraguaio. A Baixa do Chaco desempenha um papel importante na conexão da frente fria com as instabilidades de baixa latitude favorecidas pelo jato (Monteiro, 2007). Parte da umidade e do calor da Amazônia é transportada pelos Jatos de Baixos Níveis (JBN) e a Baixa do Chaco é a fonte receptora, contribuindo para a instabilidade e propagação da frente fria sobre o Oceano Atlântico. Sendo assim, as condições de tempo são bastante instáveis, com núcleos de cumulonimbus, chuvas muito intensas, rajadas de ventos em superfície e

queda de granizo, principalmente sobre o Paraguai, Oeste do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, e Sudoeste do Paraná (Monteiro, 2022).

2.4.6. Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS)

Vilar (2016) desenvolve em seu trabalho que a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) é um sistema de alta pressão que se localiza em torno de 30° de latitude sul, sobre o Sul do oceano Atlântico. Se associam a circulação média meridional da atmosfera, ou seja, à célula de Hadley no Hemisfério Sul. A circulação da ASAS é responsável por transportar a umidade do Oceano Atlântico Sul na direção da bacia Amazônica, enquanto o bloqueio que é imposto ao escoamento pela Cordilheira dos Andes fortalece a circulação, causando um desvio para Sul a Leste dos Andes, na direção dos subtropicais, com ventos máximos que ocorrem nas proximidades da Bolívia.

A ASAS possui uma importância significativa para o clima da América do Sul, principalmente para o Brasil, pois é capaz de afetar seu clima no inverno e também no verão, quando está bem posicionada e caracterizada. Durante o verão, o transporte de umidade nos baixos níveis ao longo da ZCAS é impactado pela circulação ligada a ASAS, enquanto no inverno ela impossibilita que as frentes entrem e causem inversão térmica e a concentração de poluentes nos grandes centros urbanos.

Segundo Varejão-Silva (2001), devido a posição semifixa do anticiclone do Atlântico Sul, as atividades ocorridas nesse centro de ação que são responsáveis por condicionar o regime de ventos predominantes no Brasil. No mês de janeiro a região Centro-Oeste é atingida por ventos vindos do Norte e Nordeste do anticiclone do Atlântico, e em julho os padrões de ventos são muito semelhantes, havendo uma intensificação dos ventos de Nordeste na região Centro-Oeste (Vilar, 2016).

2.4.7. Sistemas Frontais (SF)

Os Sistemas Frontais (SF) são compostos por uma frente quente, uma frente fria e um sistema de baixa pressão. A frente quente acontece quando uma massa de ar quente se movimenta sobre uma superfície que anteriormente era ocupada por uma massa de ar frio, sendo assim o ar frio recua e o ar quente avança. A rampa da massa de ar frio é o que delimita a separação entre as duas massas de ar, apresentando uma inclinação gradual. Dessa forma, o ar quente ascende sobre o ar frio que é mais denso, e assim que o ar quente avança sobre o ar frio, ele se expande, resfria e se condensa. As frentes quentes são responsáveis por favorecer a formação gradual das nuvens estratiformes e da precipitação fraca. As nuvens com características Cirrus, Cirrostratus e Altostratus são formadas

devido ao avanço mais lento da massa quente e da pouca turbulência que proporciona (Andrade, 2005). Em torno de 300 km, próximo da frente quente, aparecem as nuvens Stratus e Nimbostratus, que podem precipitar. A precipitação associada a frente acontece na dianteira da frente, antes mesmo da frente chegar (Martins, 2022).

Martins (2022) descreve que as frentes frias acontecem quando o ar frio se move sobre uma frente quente, e esta possui uma inclinação mais intensa e brusca do que a quente. As frentes frias possuem uma velocidade maior do que a observada nas frentes quentes, sendo assim as condições do contorno dessa frente são mais intensas, com gradientes também mais intensas, ventos e cisalhamento mais fortes (Andrade, 2005). Ao chegar quase sempre é formada uma nuvem Cirrustratus ou Cirrus, em altos níveis, na condição pré-frontal. O ar frio, que é mais denso, força o levantamento do ar quente, que se expande, resfria e se condensa, o que possibilita uma precipitação mais intensa, porém com uma duração menor. Antes da chegada da frente fria é possível notar um aumento da temperatura e também uma diminuição na pressão. No eixo de inclinação da região da frente fria localizam-se as nuvens de grande desenvolvimento vertical, conhecidas como Cumulonimbus - Cbs. Assim que ela passa, observa-se a queda da temperatura e dias de céu mais claro, relacionada com a alta pressão que se encontra na retaguarda da frente fria. As frentes estacionárias acontecem quando não há nenhum tipo de deslocamento de uma massa de ar sobre a outra, sendo assim, ela pode ficar estacionária por alguns dias.

3. DADOS E METODOLOGIA

3.1. Dados de precipitação e temperatura de 1961 a 2020

Os dados que foram utilizados de precipitação média mensal (PMM) e temperatura média mensal (TMM) para Brasília pertencem ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e foram retirados da sua página da internet através do *link* <https://portal.inmet.gov.br/normais>, que disponibiliza todos os dados das Normais Climatológicas.

A Organização Meteorológica Mundial regulamentou tecnicamente as normais, definindo-as como “valores médios calculados para um período relativamente longo e uniforme, compreendendo um mínimo de três décadas consecutivas”. Seguindo as recomendações, o INMET compilou os dados de 209 estações meteorológicas distribuídas pelo país, e disponibilizou em 1992 as Normais Climatológicas de 1961-1990. Em 2022 o INMET disponibilizou também os dados da Normal de 1991-2020, que corresponde aos dados compilados de 271 estações meteorológicas que estavam em operação durante este período.

3.2. Dados IAEA

A IAEA (*International Atomic Energy Agency*) efetuou coletas e medições de amostras da água precipitada no período de 1965-1987 na cidade de Brasília. Em sua página oficial (http://www.naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html) é possível encontrar diversos dados e informações, como temperatura média, precipitação, entre outros.

3.3. Coleta da precipitação

As amostras de água precipitada foram coletadas na Fazenda Água Limpa (FAL) da Universidade de Brasília, no Distrito Federal. Para que fosse realizada a coleta utilizou-se um pluviômetro, modelo *Palmex Rain Sampler RS1* (Figura 6), no qual a água coletada durante a chuva permanece armazenada e isolada, a fim de evitar sua evaporação e qualquer possibilidade de fracionamento isotópico. Em seguida, as amostras foram transferidas para recipientes menores, para que fossem armazenadas em uma geladeira até o momento da análise laboratorial.



Figura 6. Modelo Palmex Rain Sampler RSI utilizado para coleta de amostras.

Fonte: Rain Sampler, 2023

Foi feita uma rotina para realizar a coleta, a fim de diminuir eventuais perdas de material amostral. A rotina foi criada para ter uma organização melhor na retirada das amostras, acontecendo semanalmente nas sextas-feiras. As amostras eram recolhidas do coletor e guardadas em um recipiente próprio para serem armazenadas em um refrigerador. No fim de cada mês as quatro amostras retiradas nas semanas anteriores (equivalente ao respectivo mês) eram armazenadas no refrigerador para sua conservação até que chegasse o período da análise laboratorial. No dia da análise, uma amostra representativa do mês era preparada a partir das amostras semanais.

Eventualmente, quando existia alguma possibilidade de ocorrer eventos extremos (previstos pela meteorologia, notícias na mídia ou observações das condições meteorológicas), a amostra de água da chuva anterior era recolhida do pluviômetro e armazenada, enquanto o equipamento era deixado “livre” para receber água do evento esperado. Assim que o evento terminava a amostra era recolhida, armazenada em um frasco separado, e identificada de maneira distinta em relação às amostragens de rotina. No final do mês uma alíquota destas amostras especiais era misturada ao volume mensal de amostras para que acontecesse a homogeneização da água mensal. A rotina implementada tinha como finalidade não causar desvios em relação às medidas mensais.

3.4. Elaboração dos campos de vento e temperatura

Os campos médios e as anomalias do vetor vento e da temperatura média mensal em 950 hPa, utilizados para analisar o comportamento desses campos neste trabalho, foram elaborados a partir dos dados do *National Center for Environmental Prediction (NCEP)*.

De acordo com o NOAA (2024), os dados estão acessíveis desde janeiro de 1948 até o presente para a maioria das variáveis, sendo atualizadas na primeira ou segunda semana do mês com os dados referentes ao mês anterior.

As figuras geradas representando as médias ou anomalias (diferença entre a média e a média total) de variáveis, são provenientes da reanálise do NCEP e de outros conjuntos de dados. A climatologia que está sendo utilizada para realizar os cálculos necessários são referentes ao período de 1991 a 2020, para corresponder ao novo período de tempo normal do clima (NOAA, 2024). As imagens foram fornecidas pelo *NOAA Physical Sciences Laboratory*, Boulder Colorado, em seu site <https://psl.noaa.gov/>.

3.5. Espectroscopia por tempo de decaimento

Para realizar as medições dos isótopos de oxigênio nas amostras de água da chuva coletadas em Brasília foi utilizado o método de espectroscopia por tempo de decaimento em cavidade ressonante (*Ring-Down*), com o equipamento disponível no laboratório de isótopos do CPC no Instituto de Geociências.

Várias moléculas gasosas possuem um espectro de absorção de energia único que é bastante característico na região do infravermelho próximo. Ao ser exposto a pressão sub-atmosférica o espectro apresenta linhas bem espaçadas e com comprimentos de onda conhecidos. Sendo assim, cada espécie gasosa pode ser definida com a quantificação da absorção medida pela altura de um pico de absorção específico (Griebler Júnior, 2018).

Atualmente, nos espectrômetros de infravermelho convencionais, os gases presentes em quantidades traço (quantidades da ordem de partes por milhão – ppm ou partes por bilhão – ppb) não fornecem absorção alta o suficiente para serem medidos, o que limita a sensibilidade em partes por milhão (ppm), nos melhores cenários. A Espectroscopia por Tempo de Decaimento em Cavidade (*CRDS*, em inglês) impede que aconteça essa limitação de sensibilidade utilizando um caminho de vários quilômetros de comprimento. Sendo assim, é habilitado o monitoramento de fases em segundos até níveis de leitura de partes por bilhão (ppb) e, quando necessário, até mesmo em partes por trilhão (ppt).

Griebler Júnior (2018) explica como o equipamento CRDS funciona, no qual o feixe de laser (adquirido a partir de um diodo de mono frequência) entra em uma cavidade com dois ou mais espelhos de alta reflexão. Os analisadores utilizam cavidades de três espelhos para suportar a viagem contínua da onda de luz. Isso proporciona uma relação sinal-ruído superior quando é comparada com uma cavidade de dois espelhos. Quando o laser está ligado a cavidade é preenchida com a luz circulante do laser de forma muito rápida, então um fotodetector sensível a pequenas quantidades de luz executa um sinal que é diretamente proporcional à intensidade de luz na cavidade, a partir de um vazamento de luz por uma abertura em um dos espelhos.

Assim que o fotodetector atinge a condição de medida (em apenas alguns décimos de microssegundos), a onda contínua do laser é desligada de forma repentina. A luz que se encontra dentro da cavidade continua a circular entre os espelhos (aproximadamente 100.000 vezes), contudo, por causa refletividade imperfeita dos espelhos, pois atinge 99,999%, a intensidade da luz na cavidade diminui de forma exponencial com o tempo. Esse decaimento, nomeado de “*ring down*”, é medido em tempo real pelo fotodetector, e o período de tempo para o decaimento é dado apenas em função da refletividade dos espelhos quando é atingido o valor zero, que é quando a cavidade está sem luz. Levando em consideração que a cavidade do espectrômetro possui somente 25 cm de comprimento, o caminho efetivo da luz dentro desta pode chegar ser superior a 20 km.

Caso alguma espécie gasosa capaz de absorver a luz do laser é colocada dentro da cavidade, podemos obter um segundo mecanismo de perda, ou absorção. Isso possibilita a aceleração do decaimento, quando comparado com a ausência do gás de interesse. O espectrômetro é capaz de calcular automaticamente e continuamente o tempo de decaimento na cavidade com e sem absorção do gás de interesse, produzindo medidas quantitativas precisas de qualquer perda de luz dentro da cavidade que possa acontecer ao longo do tempo, e permitindo discriminar a perda devido a absorção dos espelhos. Griebler Júnior (2018) também esclarece que os dados de concentração finais são robustos, afinal são determinados em função da diferença entre os dois tempos de decaimento, que são gerados sob as mesmas condições analíticas, sendo assim, não sofrem com flutuações na intensidade do laser.

A equação para realizar o cálculo da razão isotópica (isto é, a razão entre a medição e o padrão utilizado) é a seguinte:

$$\delta = \frac{R - R_0}{R_0}$$

Equação - 4.6.1.

Onde:

δ = medida de enriquecimento, ou de empobrecimento, de um isótopo em uma amostra. Como geralmente é da ordem de 0,001 expressa-se seu valor em partes por mil, ou então $\delta\%$, multiplicando seu valor por 10^3 .

R = razão isotópica da amostra

R_0 = razão isotópica padrão.

Em um segundo instante também foram utilizados dados de análise isotópica que foram disponibilizados pela IAEA para Brasília, entre 1965 e 1987. Estes dados foram comparados com os dados coletados e processados no CPC.

Para a terceira etapa o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) foi consultado, com o intuito de adquirir dados meteorológicos de temperatura e pluviosidade para relacionar esses dados às medidas isotópicas. Com as medidas realizadas em laboratório em mãos e dos dados conseguidos com a IAEA, foi feita uma comparação e análise das semelhanças e diferenças das condições ambientais/climáticas em dois períodos distintos.

Com as relações entre os dados isotópicos e os dados meteorológicos, procura-se criar um perfil comportamental da ocorrência de precipitação em um determinado período de tempo. As medições dos isótopos de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ apresentam abundância isotópica, que é registrada em notação de δ em partes por mil (‰), em que:

$$\delta = \left(\frac{R_A}{R_S} - 1 \right) \times 1000$$

Equação - 4.6.2.

R_A é a relação molar entre o isótopo mais raro e o isótopo mais abundante ($\text{D}/^1\text{H}$ ou $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$), enquanto R_S é a relação molar da amostra em questão e um padrão internacional. O padrão internacional para a análise de isótopos estáveis de hidrogênio e para o isótopo estável de oxigênio é o VSMOW.

O modelo de espectrômetro que foi utilizado para a análise dos isótopos estáveis é o PICARRO L2130i. Gribler Júnior (2018) descreve o básico do seu funcionamento, informando que inicialmente as amostras são armazenadas em um refrigerador a $+4^\circ\text{C}$ e colocadas em um recipiente de 2,0 mL de volume. Para que isso seja feito é utilizada uma

seringa equipada com filtro *Millipore Express* (PES) Membrana de 0,22 μm de tamanho de poro (Figura 7), para que seja bloqueada qualquer partícula s31ida maior que este diâmetro, que pode prejudicar as leituras e também o equipamento.



Figura 7. Espectr31metro tipo CRDS Picarro LD 2130i.

As amostras s31o colocadas no espectr31metro por um amostrador *PAL SYSTEM HTC-xt* que utiliza uma seringa para colher um volume de amostra de um frasco de 2,0 mL. Todas as amostras s31o analisadas oito vezes (sendo oito injeç31es consecutivas) para impedir que aconteça o “efeito mem31ria”, que 31 o desvio na an31lise causado por poss31veis resqu31cios da amostra que foi analisada anteriormente no mesmo equipamento. Por31m, para realizar o c31lculo s31o utilizadas somente as duas 31ltimas injeç31es realizadas para cada amostra, para de fato minimizar ao m31ximo os poss31veis desvios de leitura e para “ambientar” melhor o sistema com a amostra que est31 sendo analisada.

Os padrões internos do Laboratório do CPC, que são derivados de padrões internacionais VSMOW, são incorporados nas amostras de análise. Neste trabalho, optou-se por utilizar os padrões DEPLAT, ULW, LUA e PRT, selecionados por apresentarem valores de isótopos mais próximos aos locais em questão.

A ordem de análise é estabelecida conforme as instruções do fabricante do equipamento. Sendo assim, a sequência é organizada da seguinte maneira: inicia-se com amostras-padrões (DEPLAT, ULW, ULW), seguidas por oito amostras-testes com valores desconhecidos, duas amostras de checagem (LUA, PRT), mais oito amostras-teste com valores desconhecidos, e por fim, cinco amostras de checagem (DEPLAT, ULW, ULW, LUA, PRT). O método de análise e calibração baseia-se em curvas de calibração, e os materiais de referência foram utilizados na quantificação dos padrões secundários, que compõem as referidas curvas (Godoy *et al.*, 2012). Os resultados das análises são registrados em arquivos digitais que podem ser processados matematicamente por meio do software Excel. Amostras de checagem (LUA21, PRT21) foram utilizadas para validar cada sequência de amostras-testes e para criar um gráfico de controle, onde as amostras de checagem representam uma amostra analisada repetidas vezes (Godoy *et al.*, 2012).

A etapa de análise de cada amostra demanda um período de 9 minutos, abrangendo o tempo de coleta da amostra por meio de seringa, a injeção da amostra no módulo de evaporação, a transferência para a câmara de análise, a execução da análise em si e, por fim, a remoção da amostra da câmara de análise, com 8 repetições deste processo. O tempo total dedicado à análise desta amostragem totalizou 24 horas.

No processo de cálculo das amostragens, é realizada uma avaliação estatística usando o Coeficiente de Determinação (R^2) para avaliar a adequação dos dados ao modelo de cálculo utilizado. O símbolo R^2 representa o coeficiente de determinação, o qual revela a proporção da variação total compartilhada pelos elementos que compõem os pares analisados. Dessa forma, a qualidade da regressão é expressa por meio desse coeficiente.

$$R^2 = \text{Variação explicada de Y} / \text{Variação total de Y}$$

Equação - 4.6.3.

Lembrando que, em uma escala de variação de 0 a 1, quanto mais próximo o valor de R^2 estiver de 1, maior será a conformidade dos valores calculados com o modelo empregado e, conseqüentemente, mais confiável será a validade da regressão. Isso se deve ao fato de que o R^2 representa a percentagem da variação da variável de resposta, que é

explicada pela relação com uma ou mais variáveis preditoras. Nos conjuntos de dados nos quais essa ferramenta estatística foi aplicada, observou-se uma concordância com o modelo utilizado com uma precisão de, pelo menos, 98%.

O processamento dos dados laboratoriais foi realizado utilizando o programa Microsoft Office Excel 2016. Uma planilha foi elaborada para organizar os resultados das análises laboratoriais, simplificando a comparação com outros dados isotópicos fornecidos pelo IAEA.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Aspectos da Temperatura Média em Brasília

As variáveis meteorológicas apresentadas neste trabalho são derivadas das observações diárias, feitas às 12, 18 e 24 UTC pela Rede de Estações Meteorológicas Convencionais.

As "Normais Climatológicas" são calculadas através da média de parâmetros meteorológicos, seguindo critérios recomendados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM).

4.1.1. Normais Climatológicas da temperatura de Brasília - INMET

Os valores da temperatura média mensal (TMM) da Normal Climatológica de 1961 até 1990 para Brasília, fornecidos pelo INMET, estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Temperatura Média Mensal (1961-1990)

Mês	TMM (°C)
Janeiro	21,2
Fevereiro	21,3
Março	21,5
Abril	20,9
Maió	19,6
Junho	18,5
Julho	18,3
Agosto	20,3
Setembro	21,7
Outubro	21,6
Novembro	21,1
Dezembro	21,0

No ano de 2022 o INMET disponibilizou os dados atualizados das Normais Climatológicas para o Brasil de 1991-2020. Os valores de TMM da Normal de 1991 até 2020 para Brasília são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Temperatura Média Mensal (1991-2020)

Mês	TMM (°C)
Janeiro	21,9
Fevereiro	21,9

Março	21,8
Abril	21,6
Maió	20,3
Junho	19,3
Julho	19,3
Agosto	21,0
Setembro	22,8
Outubro	23,1
Novembro	21,7
Dezembro	21,7

4.1.2. Temperatura Média de Brasília - IAEA

A IAEA registrou a coleta no período de 1965 a 1987, os valores da temperatura média mensal de Brasília são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Temperatura Média Mensal IAEA (1965-1987)

Mês	TMM (°C)
Janeiro	21,3
Fevereiro	21,3
Março	21,4
Abril	20,9
Maió	19,7
Junho	18,7
Julho	18,3
Agosto	20,3
Setembro	21,4
Outubro	21,5
Novembro	21,0
Dezembro	21,1

A Tabela 4 e a Figura 8 apresentam os dados comparando as Normais Climatológicas de Temperatura Média Mensal do INMET x IAEA. É possível notar que os dados do INMET 1961-1990 e do IAEA 1965-1987 possuem uma média semelhante, devido ao período da coleta ser equivalente. Enquanto nos anos de 1991-2020 apresentou-se um aumento da temperatura média em Brasília em todos os meses do ano.

Tabela 4. Comparação das normais de TMM do INMET versus IAEA

Mês	TMM (°C) INMET 1961-1990	TMM (°C) INMET 1991-2020	TMM (°C) IAEA 1965-1987
Janeiro	21,2	21,9	21,3
Fevereiro	21,3	21,9	21,3
Março	21,5	21,8	21,4
Abril	20,9	21,6	20,9
Mai	19,6	20,3	19,7
Junho	18,5	19,3	18,7
Julho	18,3	19,3	18,3
Agosto	20,3	21,0	20,3
Setembro	21,7	22,8	21,4
Outubro	21,6	23,1	21,5
Novembro	21,1	21,7	21,0
Dezembro	21,0	21,7	21,1

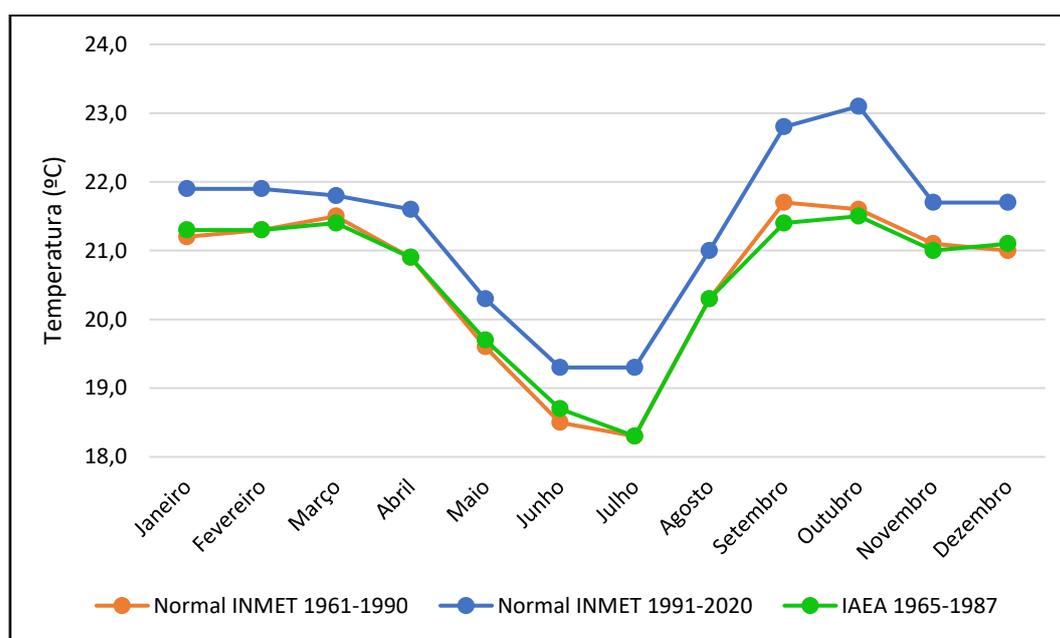


Figura 8. Comportamento da temperatura média mensal (INMET e IAEA) de Brasília.

4.2. Aspectos da precipitação em Brasília

4.2.1. Normais Climatológicas de precipitação de Brasília - INMET

Os valores da precipitação média mensal (PMM) dos anos de 1961 até 1990 para Brasília são exibidos na Tabela 5.

Tabela 5. Precipitação Média Mensal (1961-1990)

Mês	PMM (mm)
Janeiro	247,4
Fevereiro	217,5
Março	180,6
Abril	123,8
Maio	38,6
Junho	8,7
Julho	11,1
Agosto	13,9
Setembro	55,2
Outubro	166,6
Novembro	231,1
Dezembro	246,0

Juntamente com os dados de temperatura, o INMET também disponibilizou os dados atualizados de precipitação média mensal de Brasília para os anos de 1991 até 2020. Os dados da PMM para Brasília nesses anos são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Precipitação Média Mensal (1991-2020)

Mês	PMM (mm)
Janeiro	206,0
Fevereiro	179,5
Março	226,0
Abril	145,2
Maio	26,9
Junho	3,3
Julho	1,5
Agosto	16,3
Setembro	38,1
Outubro	141,8
Novembro	253,1
Dezembro	241,1

4.2.2. Precipitação Média Brasília - IAEA

Os dados registrados pelas coletas de precipitação em Brasília realizados pela IAEA no período de 1965-1987 podem ser analisados na Tabela 7.

Tabela 7. Precipitação Total Média Mensal IAEA (1965-1987)

Mês	PMM (mm)
Janeiro	206,1
Fevereiro	198,1
Março	187,8
Abril	127,5
Maio	39,9
Junho	5,4
Julho	11,6
Agosto	11,8
Setembro	51,1
Outubro	181,4
Novembro	246,2
Dezembro	247,9

Semelhante ao demonstrado para Temperatura Média Mensal, na Tabela 8 e Figura 9 abaixo pode-se observar os comparativos das Normais Climatológicas da Precipitação Média Mensal com dados cedidos pelo INMET e pelo IAEA. Nota-se que os valores são muito semelhantes, principalmente pelos dados de 1961-1990 fornecidos pelo INMET e 1965-1987 fornecidos pelo IAEA. Os valores dos anos de 1991-2020 também se assemelham com os outros anos analisados, porém os meses de março, abril, agosto e novembro demonstraram um aumento nos valores, enquanto os meses de maio, junho, julho, setembro e dezembro apresentam valores inferiores aos registrados anteriormente.

Tabela 8. Comparação das normais de PMM do INMET versus IAEA

Mês	PMM (°C) INMET 1961-1990	PMM (°C) INMET 1991-2020	PMM (°C) IAEA 1965-1987
Janeiro	247,4	206,0	206,1
Fevereiro	217,5	179,5	198,1
Março	180,6	226,0	187,8
Abril	123,8	145,2	127,5
Maio	38,6	26,9	39,9
Junho	8,7	3,3	5,4
Julho	11,1	1,5	11,6
Agosto	13,9	16,3	11,8
Setembro	55,2	38,1	51,1
Outubro	166,6	141,8	181,4
Novembro	231,1	253,1	246,2
Dezembro	246,0	241,1	247,9

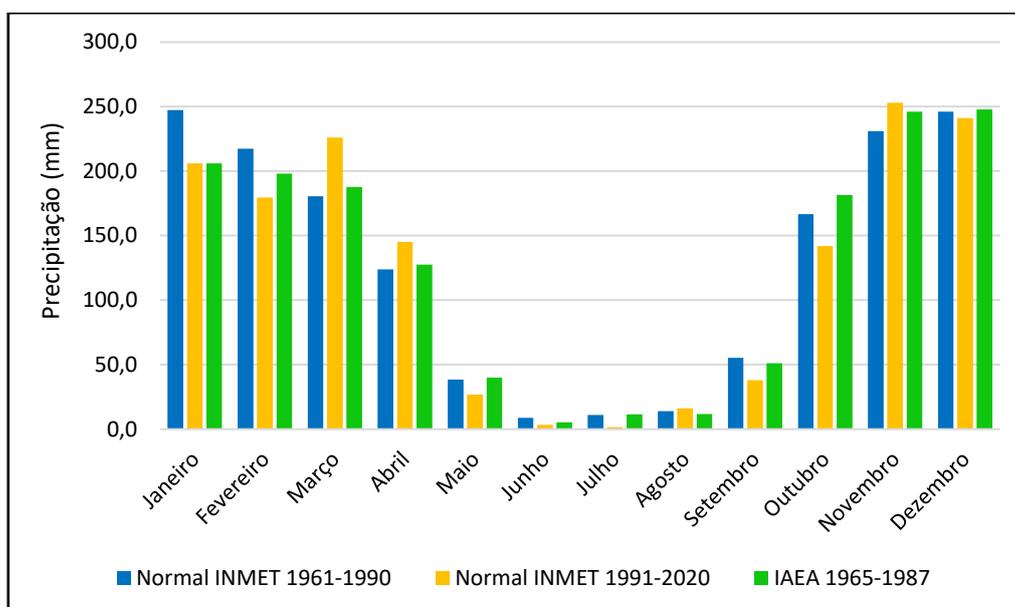


Figura 9. Comportamento da Precipitação Média Mensal INMET e IAEA de Brasília.

4.3. Composição isotópica $\delta^{18}\text{O}$ IAEA para Brasília

O IAEA efetuou as medições de $\delta^{18}\text{O}$ na precipitação em Brasília nos anos de 1965 até 1987, porém o período de 1977 a 1982 ocorreu falha na coleta. Foram medidos os valores de $\delta^{18}\text{O}$ para os meses que possuíam amostras disponíveis. A tabela 9 apresenta os valores mensais, valores médios e o desvio-padrão para todos os doze meses do ano.

Tabela 9. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ para amostras coletadas em Brasília (1965 a 1987- IAEA)

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1965			-8,53	-4,85		-4,20	-2,20	1,40	-0,30	-4,00	-4,60	-2,20
1966	-7,60	-7,70	-4,90	-4,90	1,70				-1,80	-0,50		-11,60
1967	-4,58	-3,52	-8,72	-4,59					0,53	-1,77	-6,08	-7,86
1968	-1,43	-14,73	-4,10	-4,97	-1,52			-0,79	-2,14		-1,99	-6,83
1969		-5,38		-4,82	-6,95				2,61	-1,63		-7,35
1970	2,76	-9,46	-3,92	-1,14	-6,80				-0,25		-6,13	
1971	0,56	0,52	-0,71	-2,68	-2,68	-1,69	-1,66		-2,71	-7,32	-8,38	-4,44
1972	-7,64		-3,79		-4,97	-0,90			0,79	-3,20		
1973	-6,21	-2,37	-8,15		-2,80					-6,09	-5,13	
1974	-4,29	-5,75	-13,48	-7,81	-4,11			-0,72		-1,37	-6,33	-5,96
1975	-3,84	-4,54	-2,35	-11,09	-3,06		-1,73		-1,18	-1,17	-3,53	-5,57
1976	-2,47	-5,29	-2,98	-3,34	-1,86				-1,54		-6,64	-5,23
1977												
1978												
1979												
1980												
1981												
1982												
1983	-9,20		-6,10		-3,30	-2,40	-3,80		-1,20	-3,60	-5,70	-5,10

1984	-4,00	-5,40		-6,90				-4,40		-2,10	-2,30	
1985				-3,20	-2,60			-2,90	-2,80	-3,10	-0,70	-7,20
1986	-7,40	-2,90	-3,40	-1,30	-1,30		-1,00	-1,10	-2,20	-4,60	-4,30	-3,30
1987	-3,5	-2,8	-5,3	-7,9	-0,6	-0,4						
Média	-4,20	-5,33	-5,46	-4,96	-2,92	-1,92	-2,08	-1,42	-0,94	-3,11	-4,75	-6,05
Desvio Padrão	3,343	3,768	3,305	2,734	2,315	1,486	1,053	2,001	1,568	2,010	2,154	2,421

Na Tabela 10 pode-se verificar a média mensal dos registros isotópicos efetuados pela IAEA, enquanto na Figura 10 é apresentada a comparação da média mensal dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ registrados em 2017 pelo laboratório após o tratamento dos dados.

Tabela 10. Média dos registros isotópicos de ^{18}O pela IAEA

Mês	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]
Janeiro	$-4,20 \pm 3,34$
Fevereiro	$-5,33 \pm 3,77$
Março	$-5,46 \pm 3,30$
Abril	$-4,96 \pm 2,73$
Maio	$-2,92 \pm 2,32$
Junho	$-1,92 \pm 1,49$
Julho	$-2,08 \pm 1,05$
Agosto	$-1,42 \pm 2,00$
Setembro	$-0,94 \pm 1,57$
Outubro	$-3,11 \pm 2,01$
Novembro	$-4,75 \pm 2,15$
Dezembro	$-6,05 \pm 2,42$

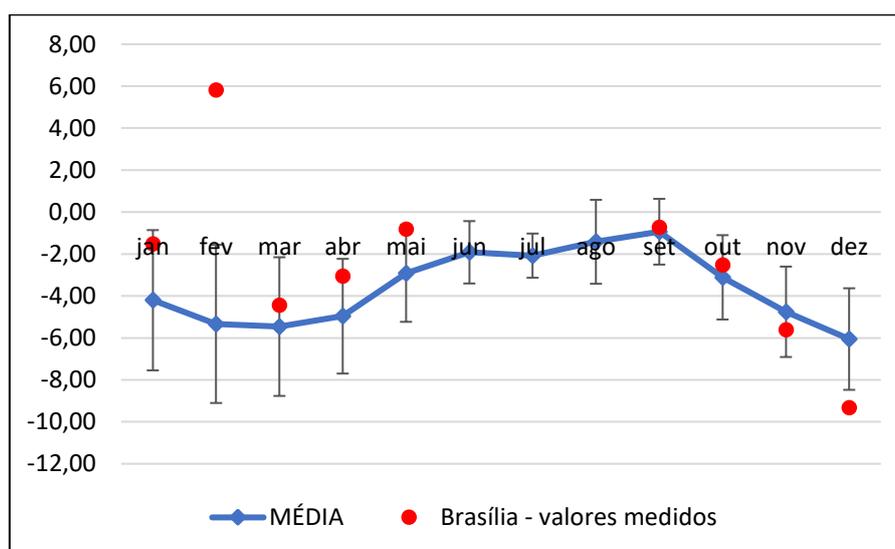


Figura 10. Média dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ para amostras coletadas em Brasília – IAEA.

4.4. Resultados das amostras

Foram realizadas análises prévias com um equipamento para ser feita a calibração, testes e a obtenção de uma prévia de resultados para compreensão das grandezas dimensionais dos eventos examinados.

Obteve-se alguns resultados a partir das análises feitas, apresentados na Tabela 11, a seguir:

Tabela 11. Amostragens e valores de isótopos de ^{18}O

Meses	Anos	Valor médio de ^{18}O
Novembro	2016	-3,70
Dezembro	2016	-4,63
Janeiro	2017	-1,51
Fevereiro	2017	5,82
Março	2017	-4,44
Abril	2017	-3,06
Maiο	2017	-0,82
Junho	2017	-
Julho	2017	-
Agosto	2017	-
Setembro	2017	-0,72
Outubro	2017	-2,52
Novembro	2017	-5,61
Dezembro	2017	-9,33
Janeiro	2018	-4,24
Fevereiro	2018	-6,86
Março	2018	-
Abril	2018	-3,85
Maiο	2018	-2,96
Junho	2018	-
Julho	2018	-
Agosto	2018	0,02

As amostras apresentadas acima são referentes as coletas realizadas na Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília (FAL/UnB) durante novembro de 2016 até agosto de 2018.

Ao observar os valores de $\delta^{18}\text{O}$ adquiridos nas análises laboratoriais, conclui-se que as grandezas dos valores numéricos das amostras mensais variam sazonalmente no período de tempo apresentado. Os valores indicam o empobrecimento do isótopo entre

maio/2017 e setembro/2017, e apresentam uma deterioração gradual no nível de $\delta^{18}\text{O}$ entre outubro/2017 e fevereiro/2018. Os meses que não apresentam nenhum valor são decorrentes da falta de chuva, portanto não houveram dados para serem coletados. O que pode indicar que existe alguma variação sazonal das fontes de umidades dos eventos de chuva comum para esse período de tempo.

Tabela 12. Comparação dos valores de isótopos de Brasília

Meses	Anos			
	1965-1987	2016	2017	2018
Janeiro	-4,20	-	-1,51	-4,24
Fevereiro	-5,33	-	5,82	-6,86
Março	-5,46	-	-4,44	-
Abril	-4,96	-	-3,06	-3,85
Maio	-2,92	-	-0,82	-2,96
Junho	-1,92	-	-	-
Julho	-2,08	-	-	-
Agosto	-1,42	-	-	0,02
Setembro	-0,94	-	-0,72	-
Outubro	-3,11	-	-2,52	-
Novembro	-4,75	-3,70	-5,61	-
Dezembro	-6,05	-4,63	-9,33	-

Para melhorar a visualização dos dados comparativos, a tabela 12 apresenta a distribuição da média dos registros isotópicos realizados pela IAEA de 1965 a 1987, juntamente com os dados analisados pelo laboratório CPC/UFRGS nos anos de 2016, 2017 e 2018 ao longo de todos os doze meses do ano. Os meses sem nenhum valor registrado representam a ausência de dados nos meses indicados.

4.5. Aspectos do campo de vento

Com o objetivo de verificar qual a origem das massas de ar, optou-se pela utilização do nível de 950 hPa para uma visualização melhor dos campos de vento.

Os campos a seguir apresentam as médias ou anomalias (diferença entre a média e a climatologia) de variáveis, originárias da reanálise do NCEP e de outros conjuntos de dados.

JANEIRO

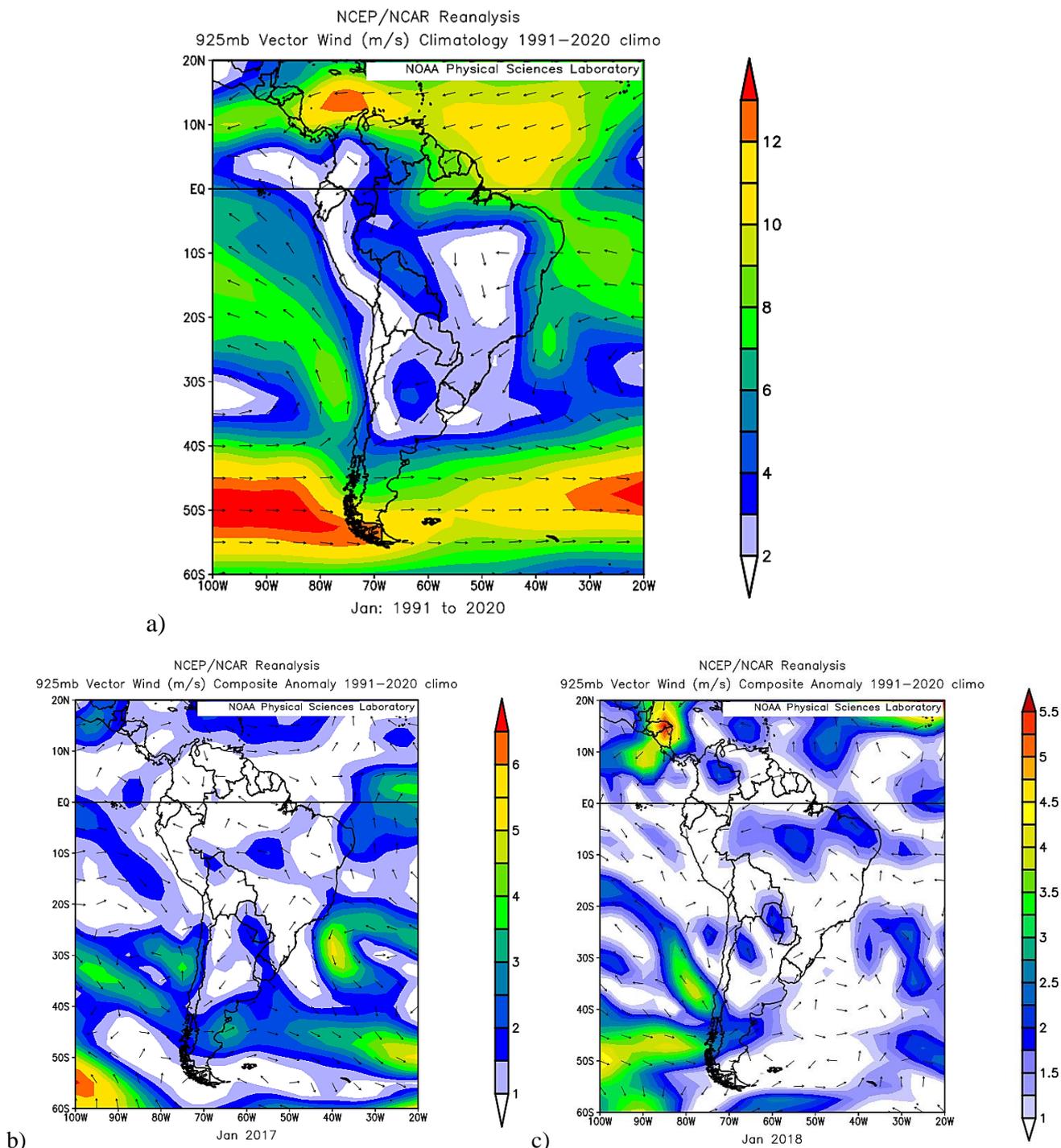
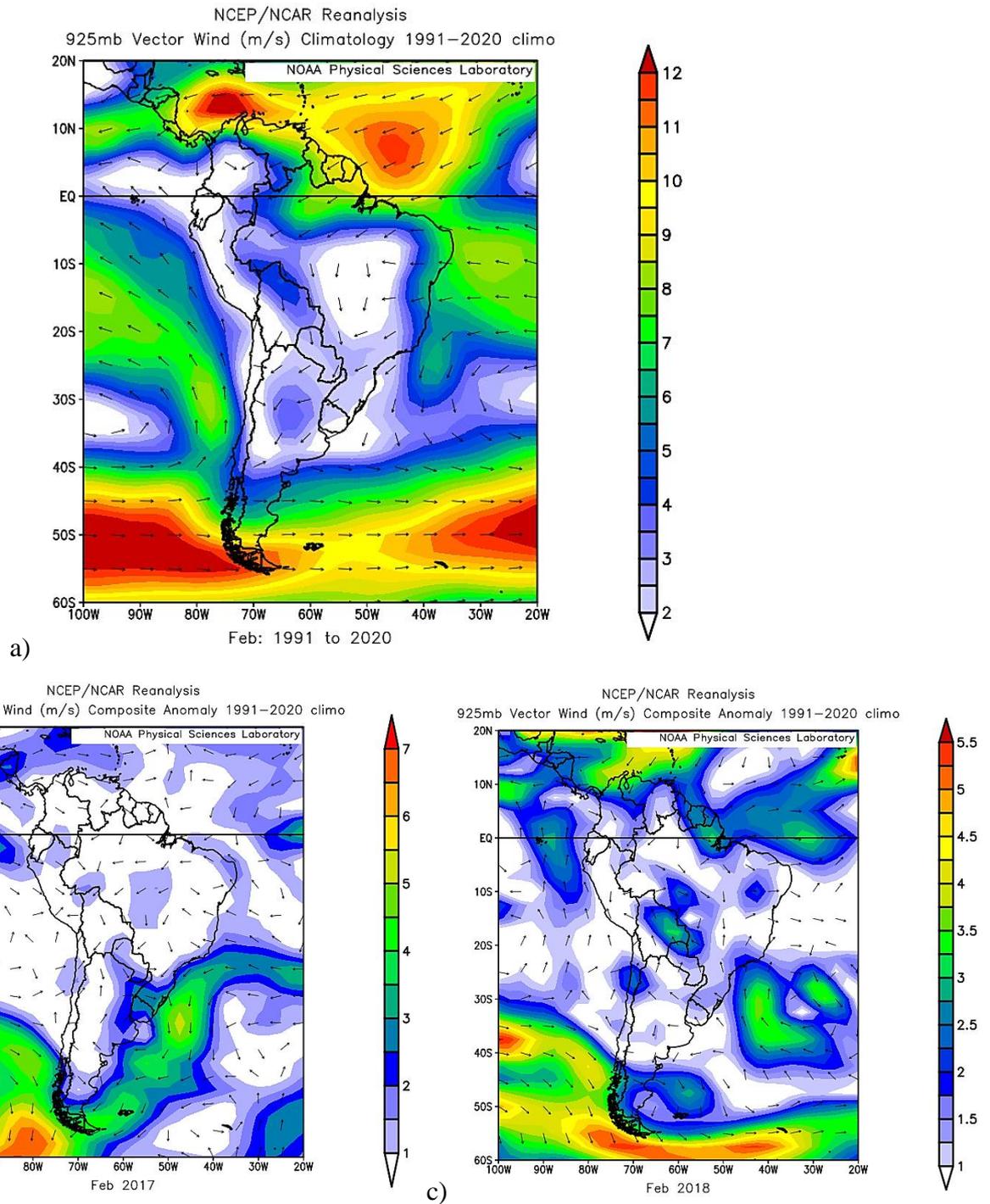


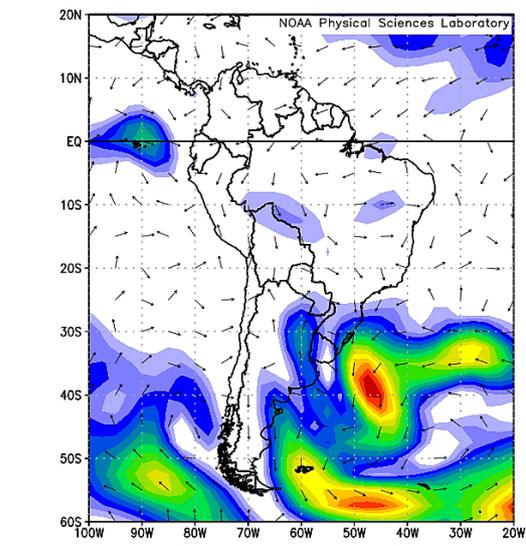
Figura 11. Climatologia de janeiro/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de janeiro/2017 (b) e anomalia de janeiro/2018 (c) em 950 hPa.

Em janeiro de 2017, o valor de $\delta^{18}\text{O}$ foi de **-1,51**, enquanto em 2018 esse valor foi de **-4,24**, indicando uma grande diferença entre os valores nesses anos. No entanto, o valor de 2018 é semelhante à média registrada pela IAEA entre 1965-1987, que foi **-4,20**. Durante o período de 1991-2020, observa-se uma oscilação na direção dos ventos, variando entre Norte e Leste.

Em 2017 e 2018 a região de Brasília é influenciada por circulação provenientes do Leste e Sul.

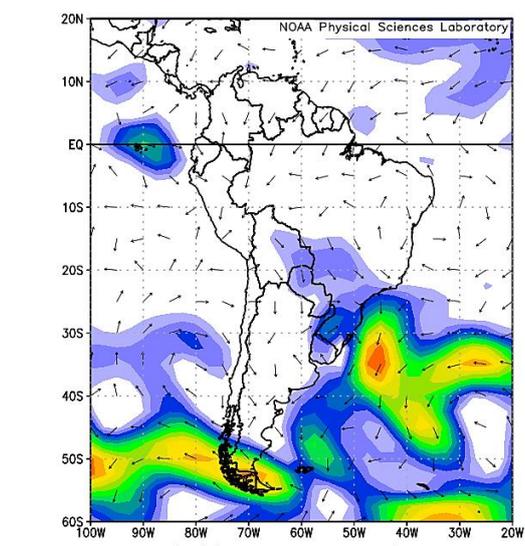
FEVEREIRO





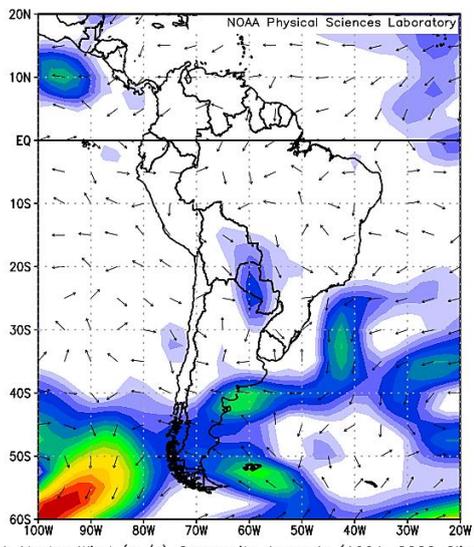
d)

NCEP/NCAR Reanalysis



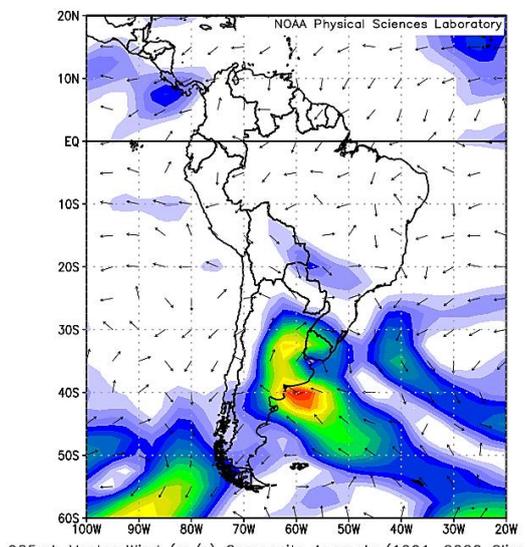
e)

NCEP/NCAR Reanalysis



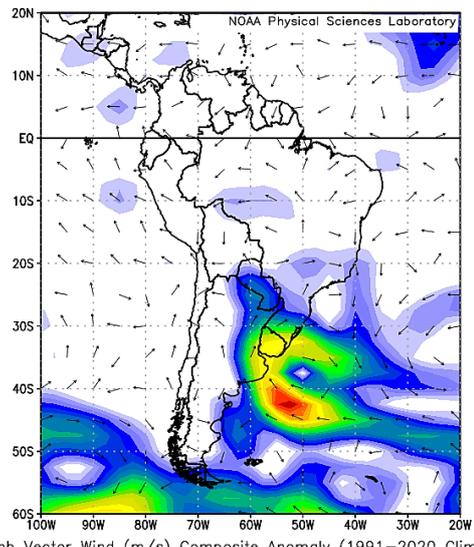
f)

NCEP/NCAR Reanalysis



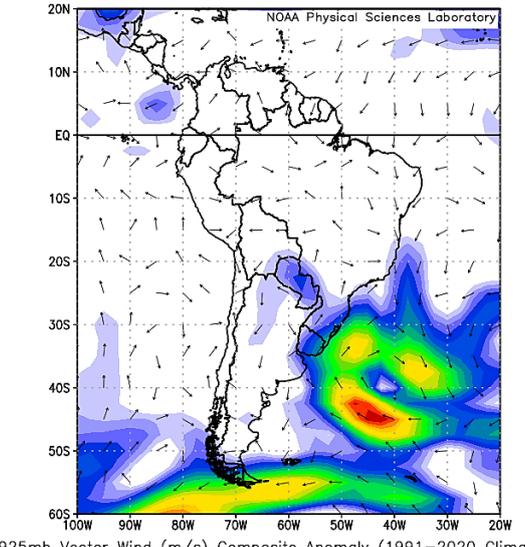
g)

NCEP/NCAR Reanalysis



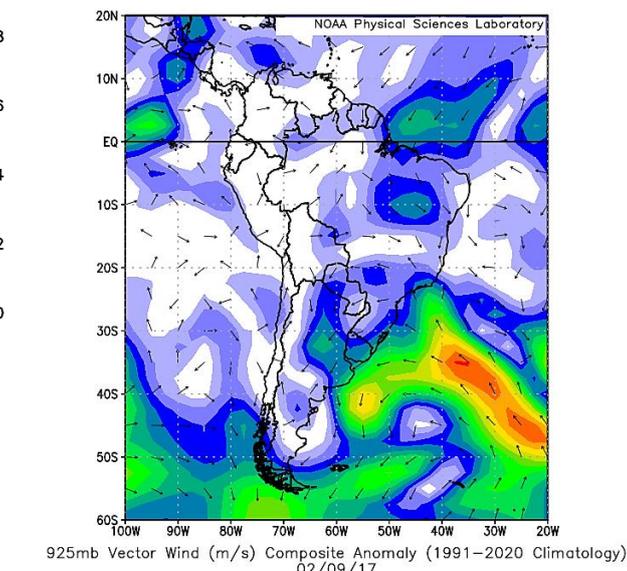
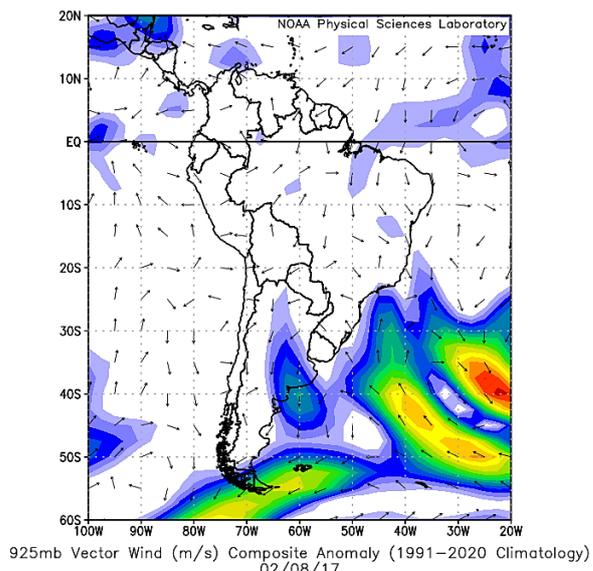
h)

NCEP/NCAR Reanalysis



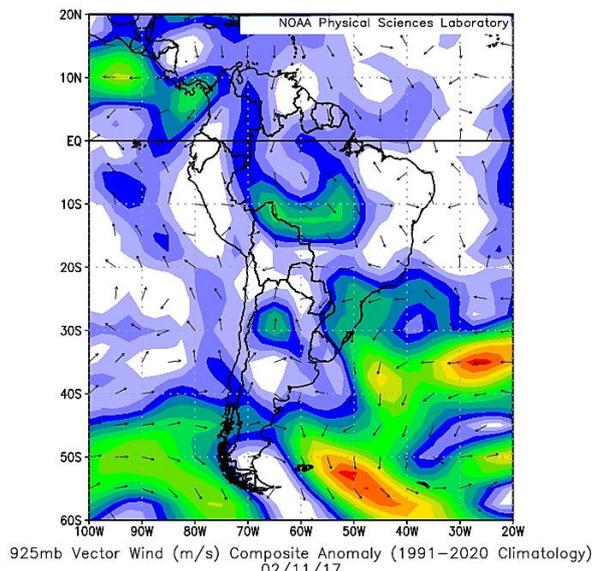
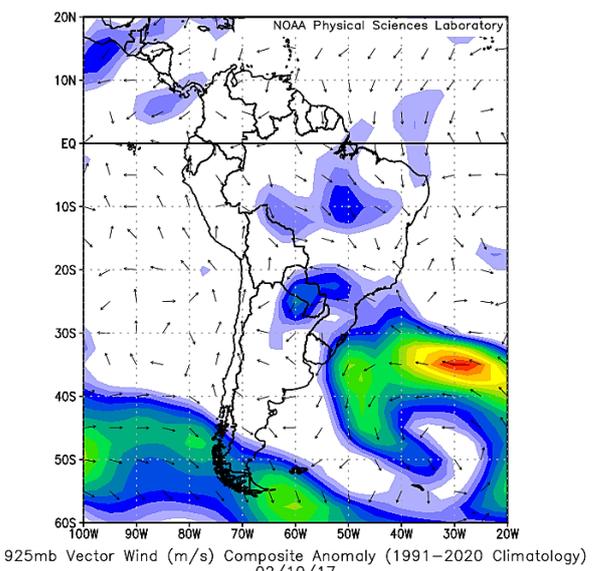
i)

NCEP/NCAR Reanalysis



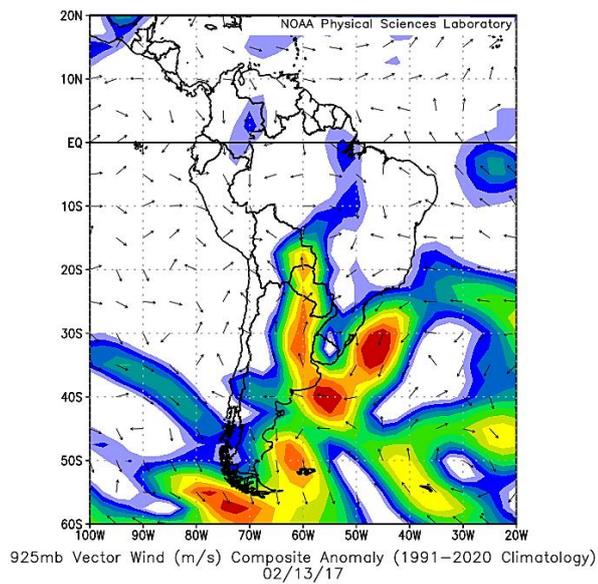
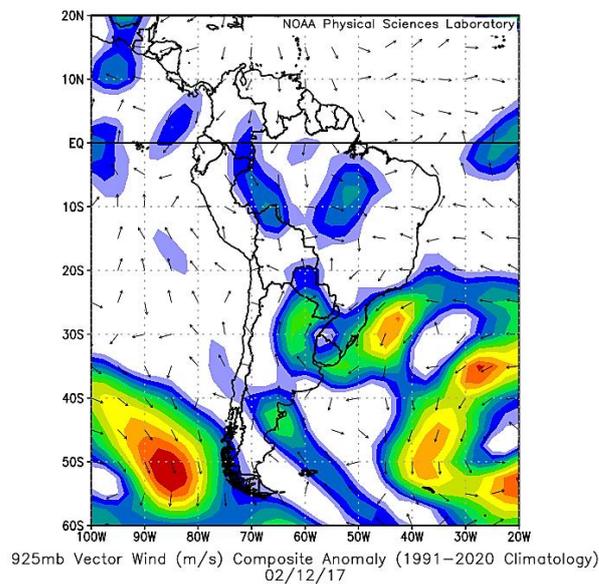
j)

k)



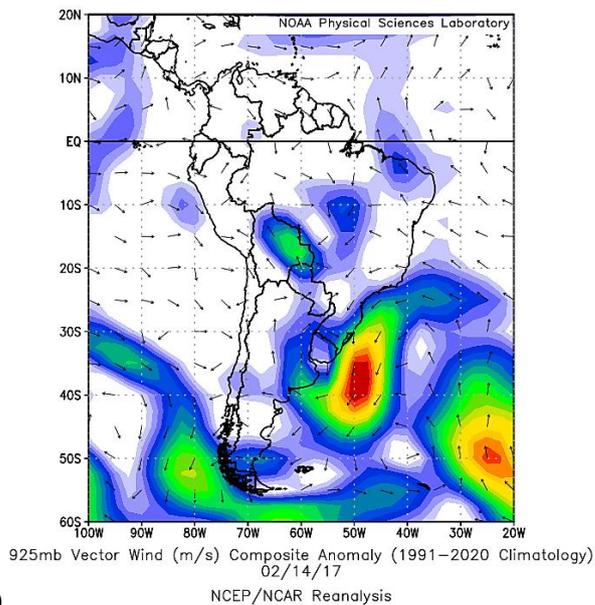
l)

m)

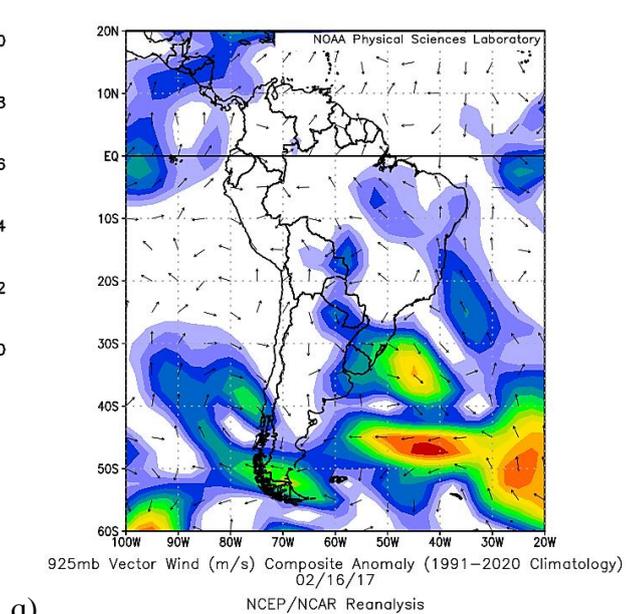


n)

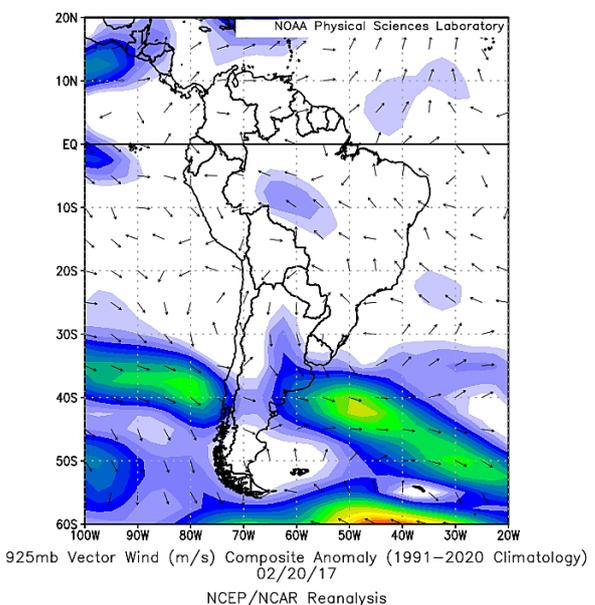
o)



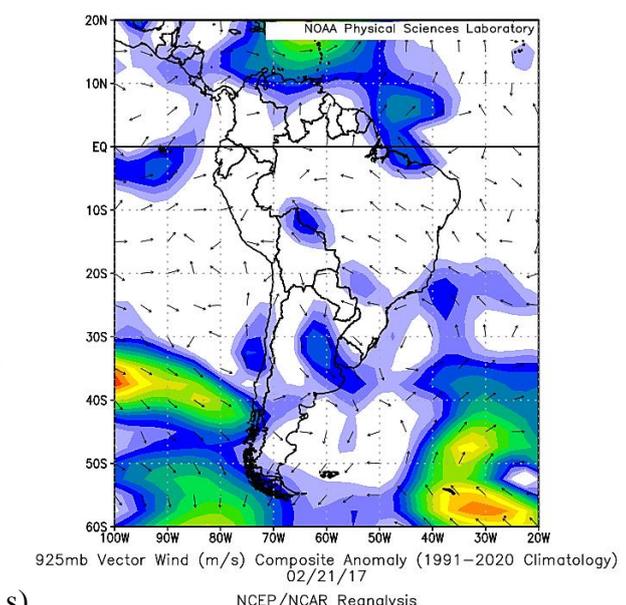
p)



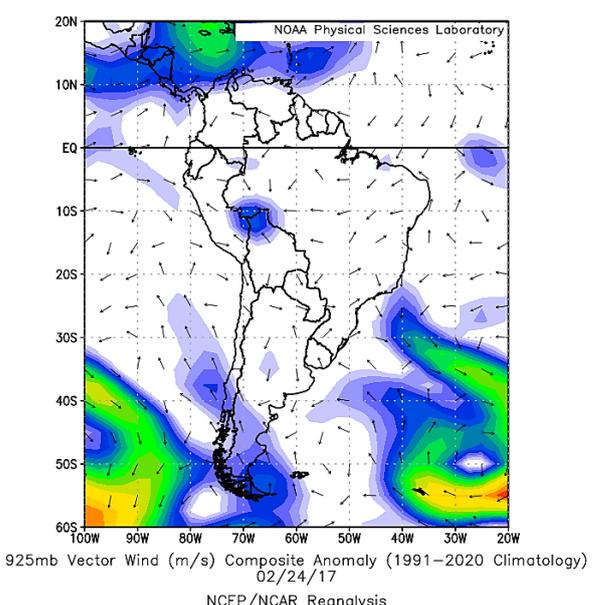
q)



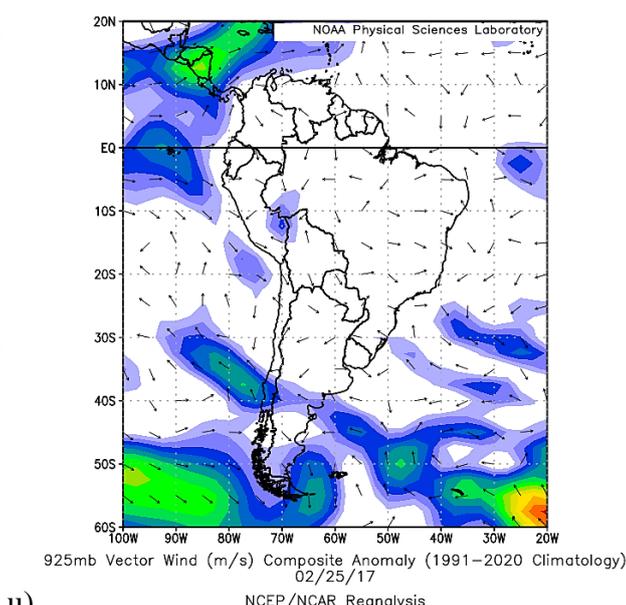
r)



s)



t)



u)

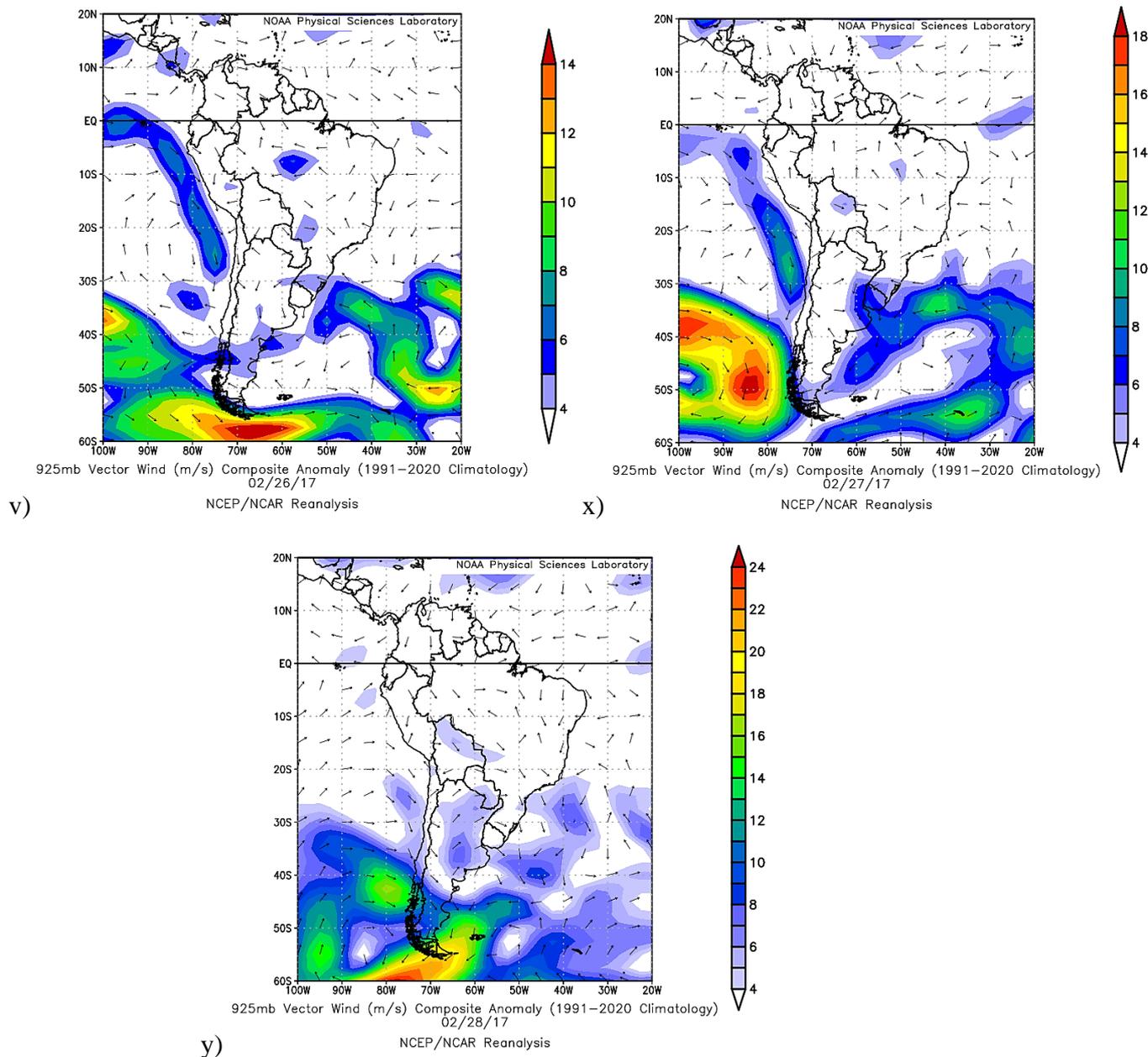


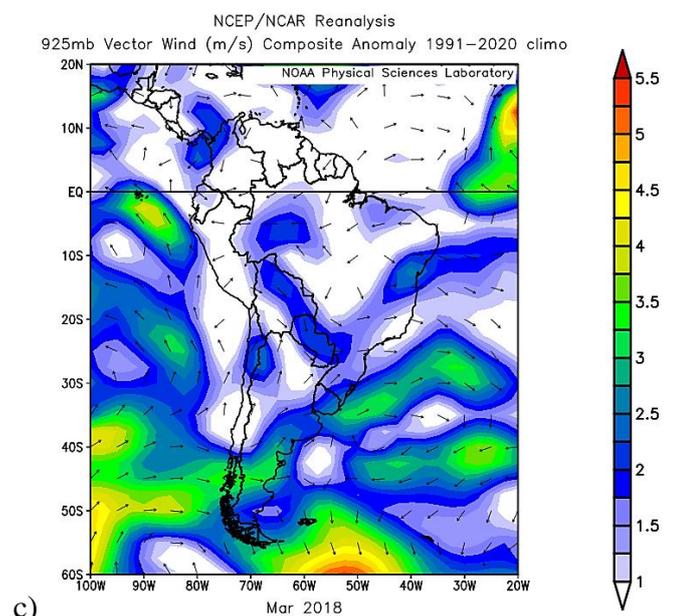
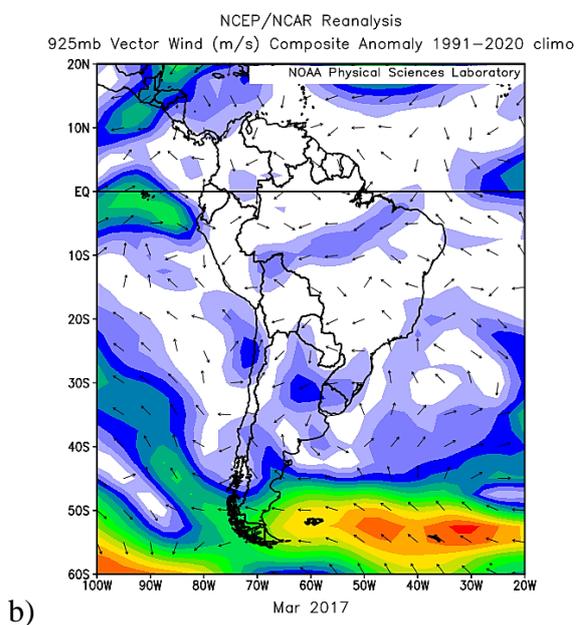
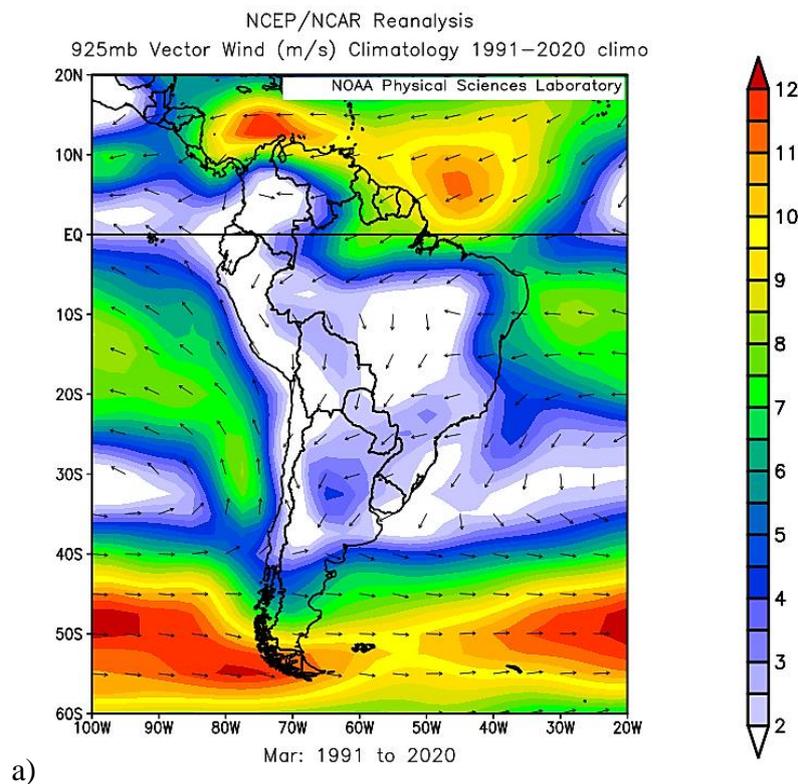
Figura 12. Climatologia de Fevereiro/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de Fevereiro/2017 (b), anomalia de Fevereiro/2018 (c), anomalia do dia 02/02/2017 (d), anomalia do dia 03/02/2017 (e), anomalia do dia 04/02/2017 (f), anomalia do dia 05/02/2017 (g), anomalia do dia 06/02/2017 (h), anomalia do dia 07/02/2017 (i), anomalia do dia 08/02/2017 (j), anomalia do dia 09/02/2017 (k), anomalia do dia 10/02/2017 (l), anomalia do dia 11/02/2017 (m), anomalia do dia 12/02/2017 (n), anomalia do dia 13/02/2017 (o), anomalia do dia 14/02/2017 (p), anomalia do dia 16/02/2017 (q), anomalia do dia 20/02/2017 (r), anomalia do dia 21/02/2017 (s), anomalia do dia 24/02/2017 (t), anomalia do dia 25/02/2017 (u), anomalia do dia 26/02/2017 (v), anomalia do dia 27/02/2017 (x), anomalia do dia 28/02/2017 (y), em 950 hPa.

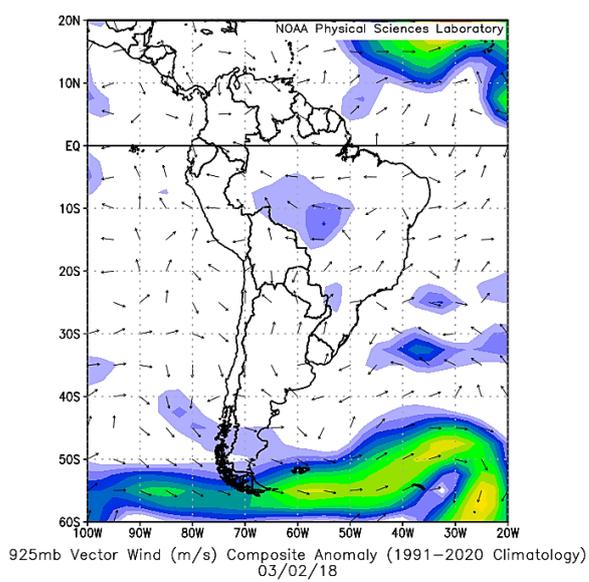
O mês de fevereiro apresentou o valor de **5,82** em 2017, um valor muito diferente dos outros apresentados, sendo o único positivo na tabela, demonstrando ser uma

anomalia quando comparada com o valor de **-6,86** indicado no ano de 2018 e **-5,33** da média de 1965-1987 feita pela IAEA.

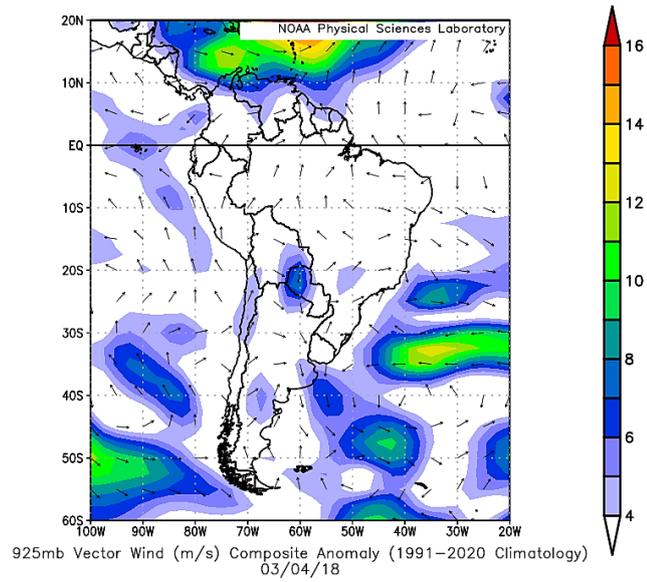
Em 2017 o vento foi predominantemente influenciado pelo ASAS, como mostram as figuras acima, porém a direção demonstra uma grande variedade ao longo do ano, sendo possivelmente influenciada pelos ventos alísios durante o verão. Os principais fenômenos que aparentam impactar em Brasília no ano de 2017 são a ZCIT, a presença do ASAS e também dos Jatos de Baixos Níveis (JBN).

MARÇO

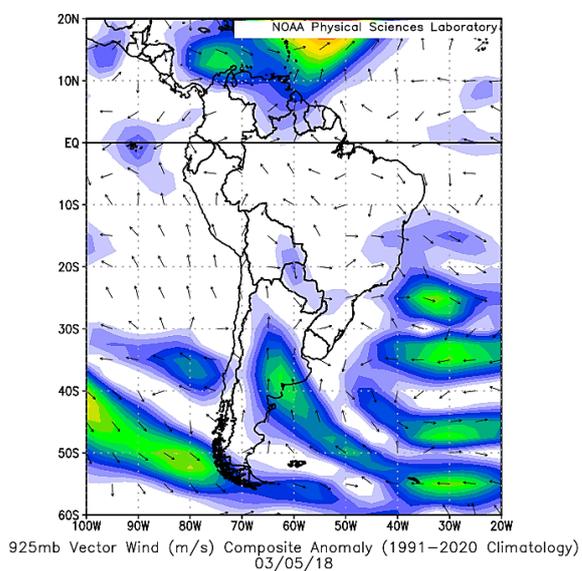




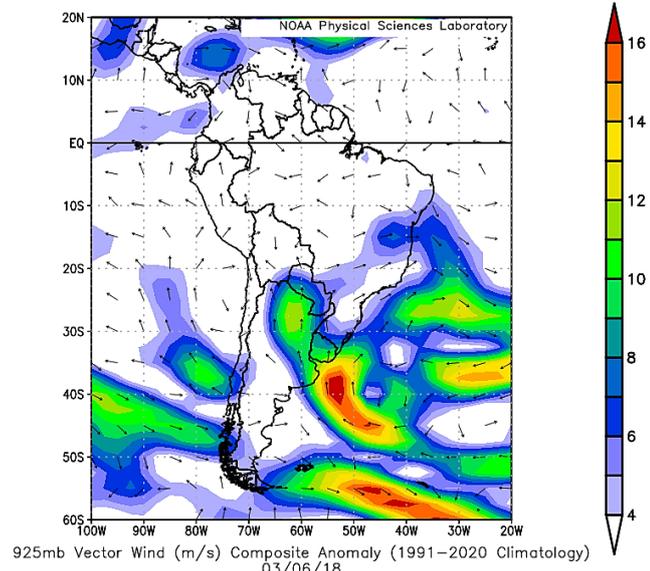
d)



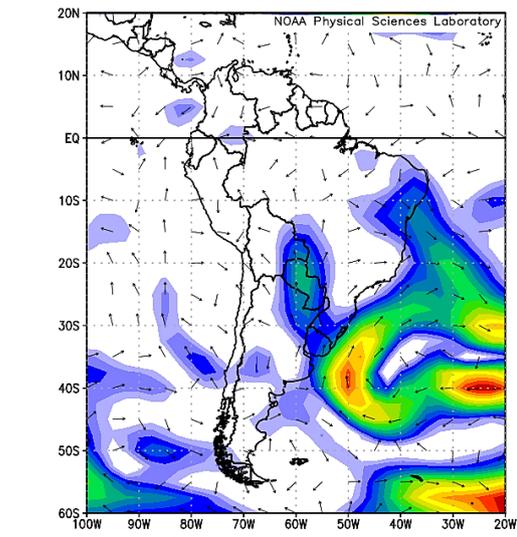
e)



f)

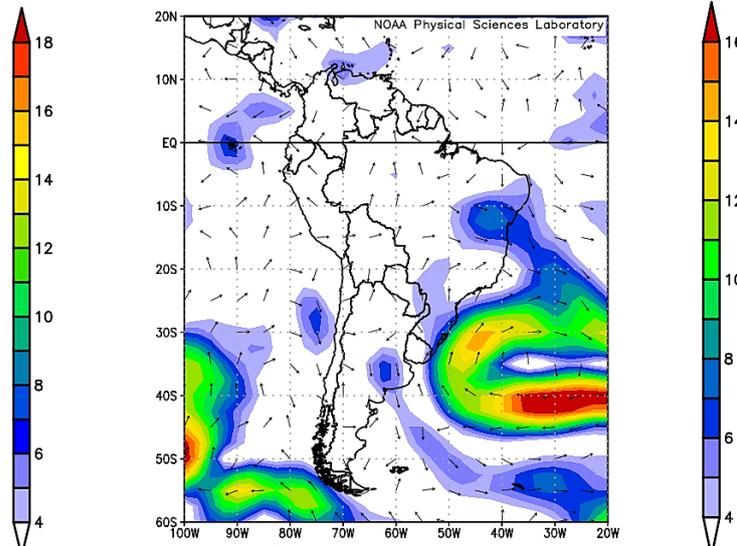


g)



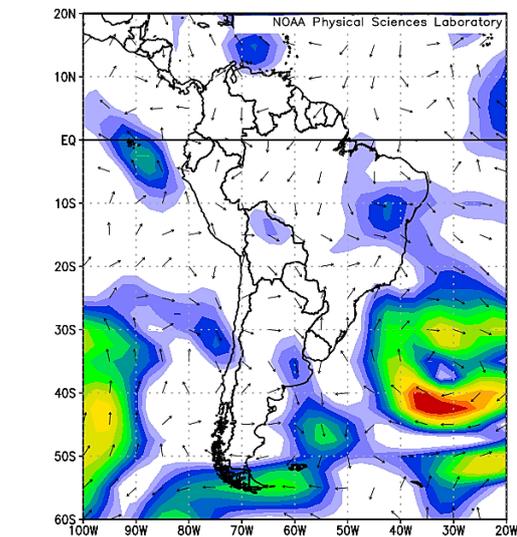
h)

925mb Vector Wind (m/s) Composite Anomaly (1991-2020 Climatology)
03/07/18
NCEP/NCAR Reanalysis



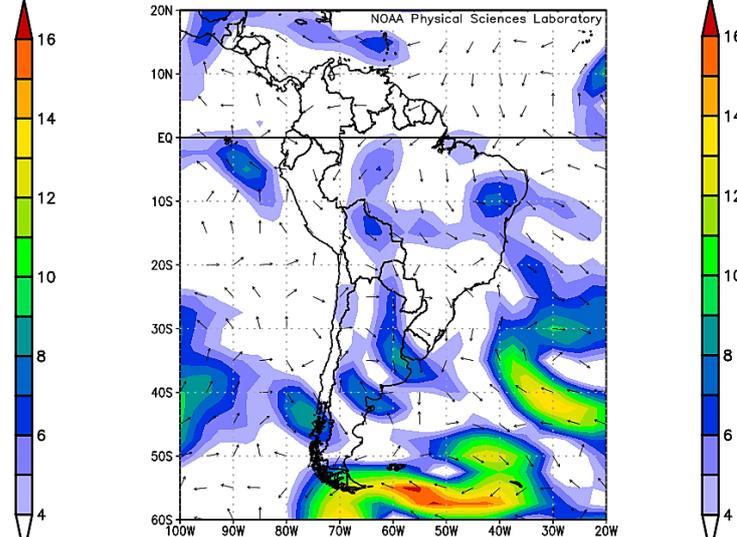
i)

925mb Vector Wind (m/s) Composite Anomaly (1991-2020 Climatology)
03/08/18
NCEP/NCAR Reanalysis



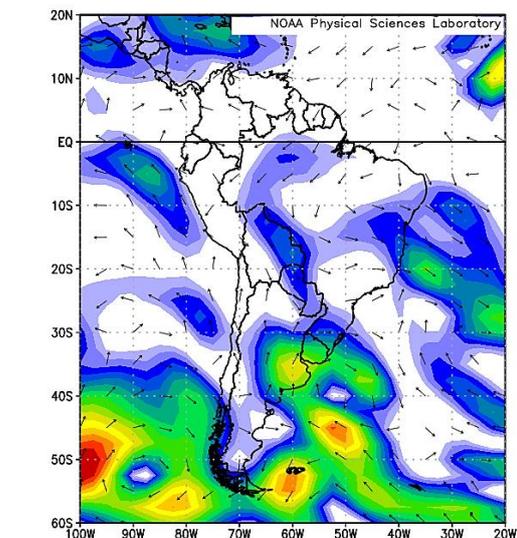
j)

925mb Vector Wind (m/s) Composite Anomaly (1991-2020 Climatology)
03/09/18
NCEP/NCAR Reanalysis



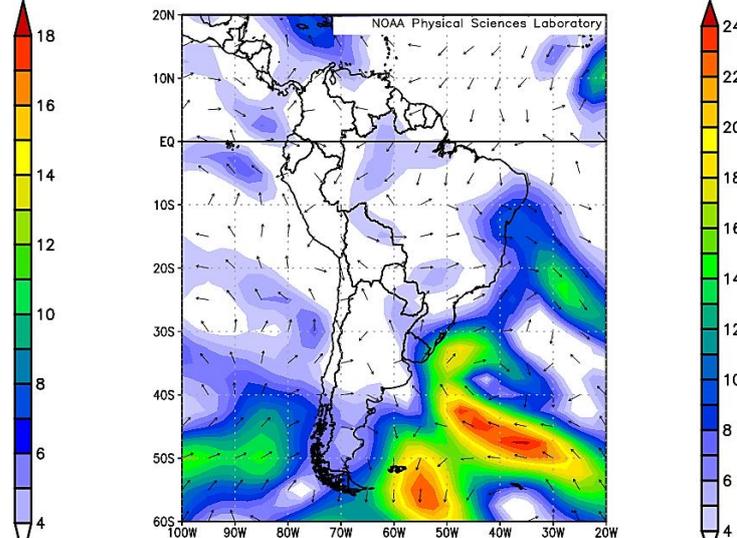
k)

925mb Vector Wind (m/s) Composite Anomaly (1991-2020 Climatology)
03/10/18
NCEP/NCAR Reanalysis



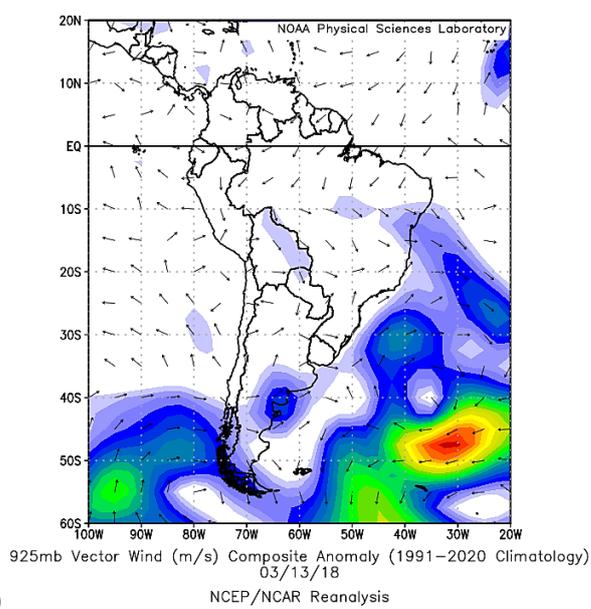
l)

925mb Vector Wind (m/s) Composite Anomaly (1991-2020 Climatology)
03/11/18
NCEP/NCAR Reanalysis

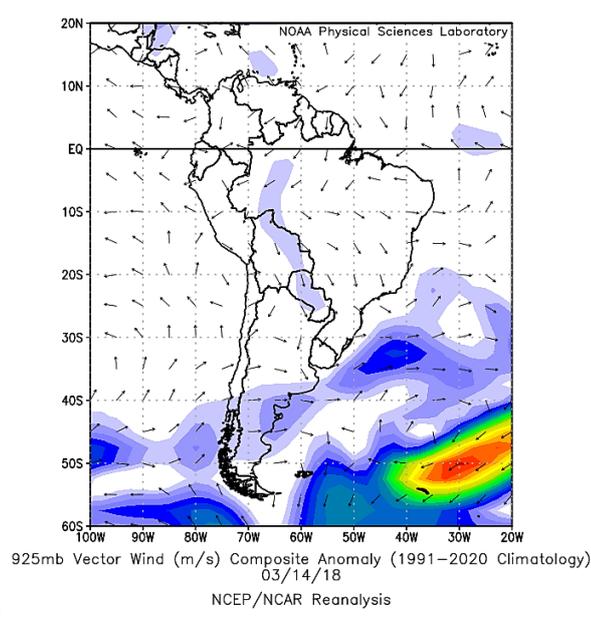


m)

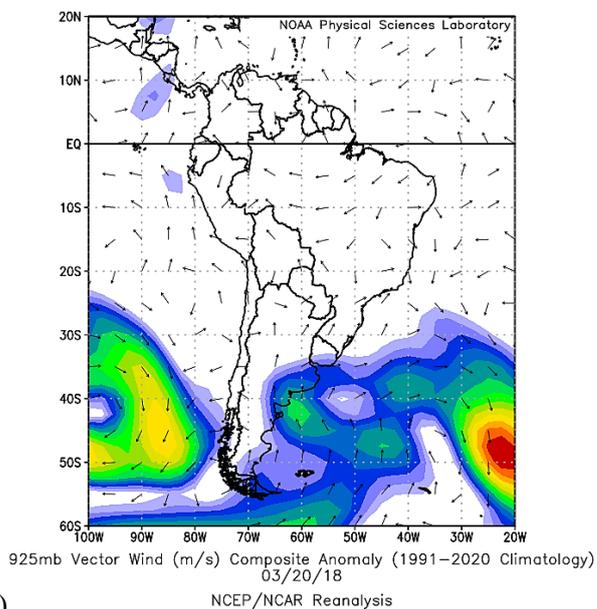
925mb Vector Wind (m/s) Composite Anomaly (1991-2020 Climatology)
03/12/18
NCEP/NCAR Reanalysis



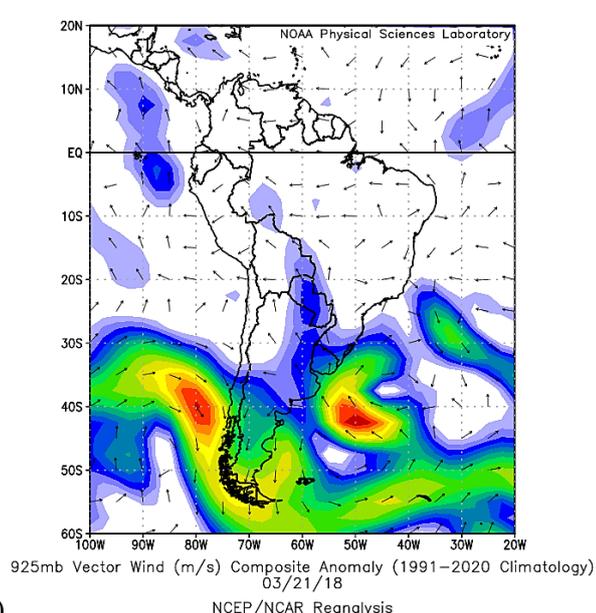
n)



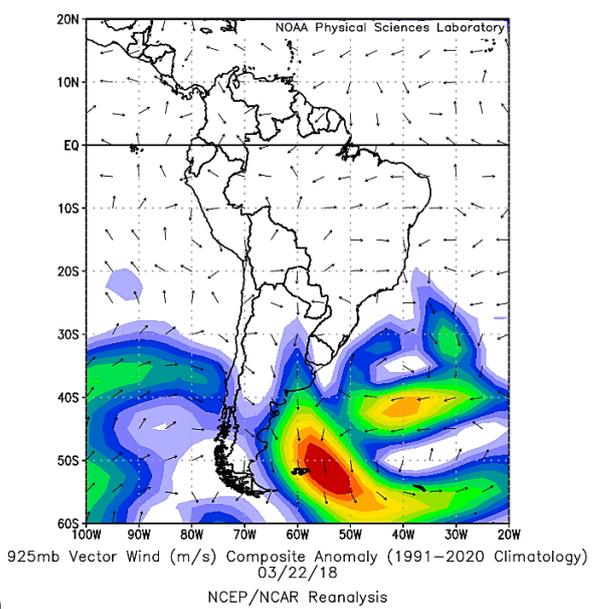
o)



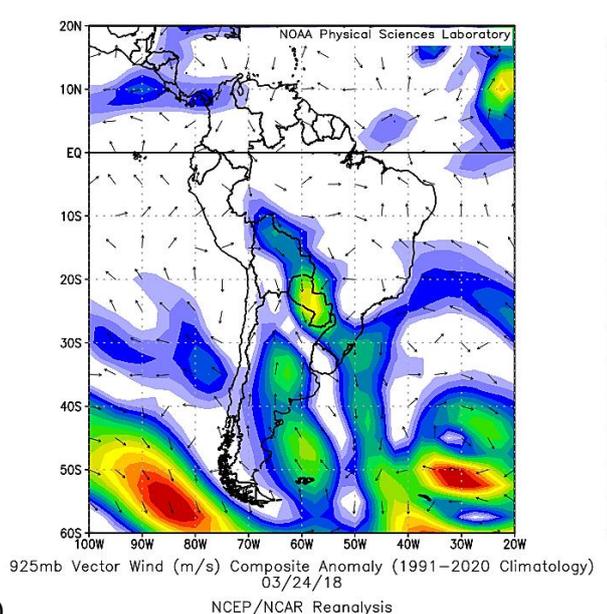
p)



q)



r)



s)

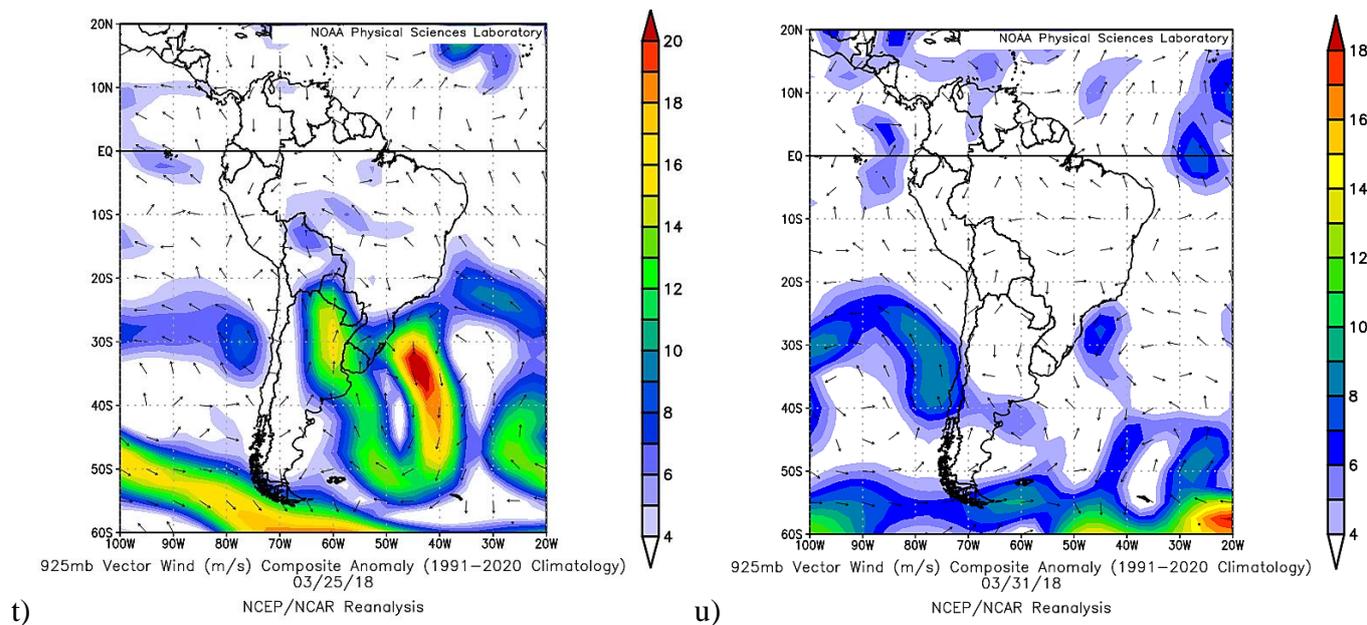


Figura 13. Climatologia de março/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de março/2017 (b), anomalia de Março/2018 (c), anomalia do dia 02/03/2018 (d), anomalia do dia 04/03/2018 (e), anomalia do dia 05/03/2018 (f), anomalia do dia 06/03/2018 (g), anomalia do dia 07/03/2018 (h), anomalia do dia 08/03/2018 (i), anomalia do dia 09/03/2018 (j), anomalia do dia 10/03/2018 (k), anomalia do dia 11/03/2018 (l), anomalia do dia 12/03/2018 (m), anomalia do dia 13/03/2018 (n), anomalia do dia 14/03/2018 (o), anomalia do dia 20/03/2018 (p), anomalia do dia 21/03/2018 (q), anomalia do dia 22/03/2018 (r), anomalia do dia 24/03/2018 (s), anomalia do dia 25/03/2018 (t), anomalia do dia 31/03/2018 (u), em 950 hPa.

Ao verificar as figuras acima é possível verificar que a climatologia de 1991-2020 apresenta ventos provenientes de Leste e Norte.

Em março de 2017 o valor de $\delta^{18}\text{O}$ foi de **-4,44**, porém em 2018 não houve registro de isótopos, pois não houve precipitação nesse período segundo o banco de dados da estação de Brasília fornecida pelo INMET.

O mês de março em 2018, apesar de não ter registro de isótopos, houve precipitação em vários dias ao longo do mês. Observa-se que há um padrão da direção dos ventos em Brasília no começo do mês, proveniente principalmente de Sudoeste, Sudeste e Oeste, enquanto ao longo do mês os ventos mudam de Oeste para Norte e depois retornam para Oeste e Leste. Os principais fenômenos que podem ter influenciado o campo de vento em Brasília nesse mês são o ASAS, ZCIT e Frentes Frias (FF).

ABRIL

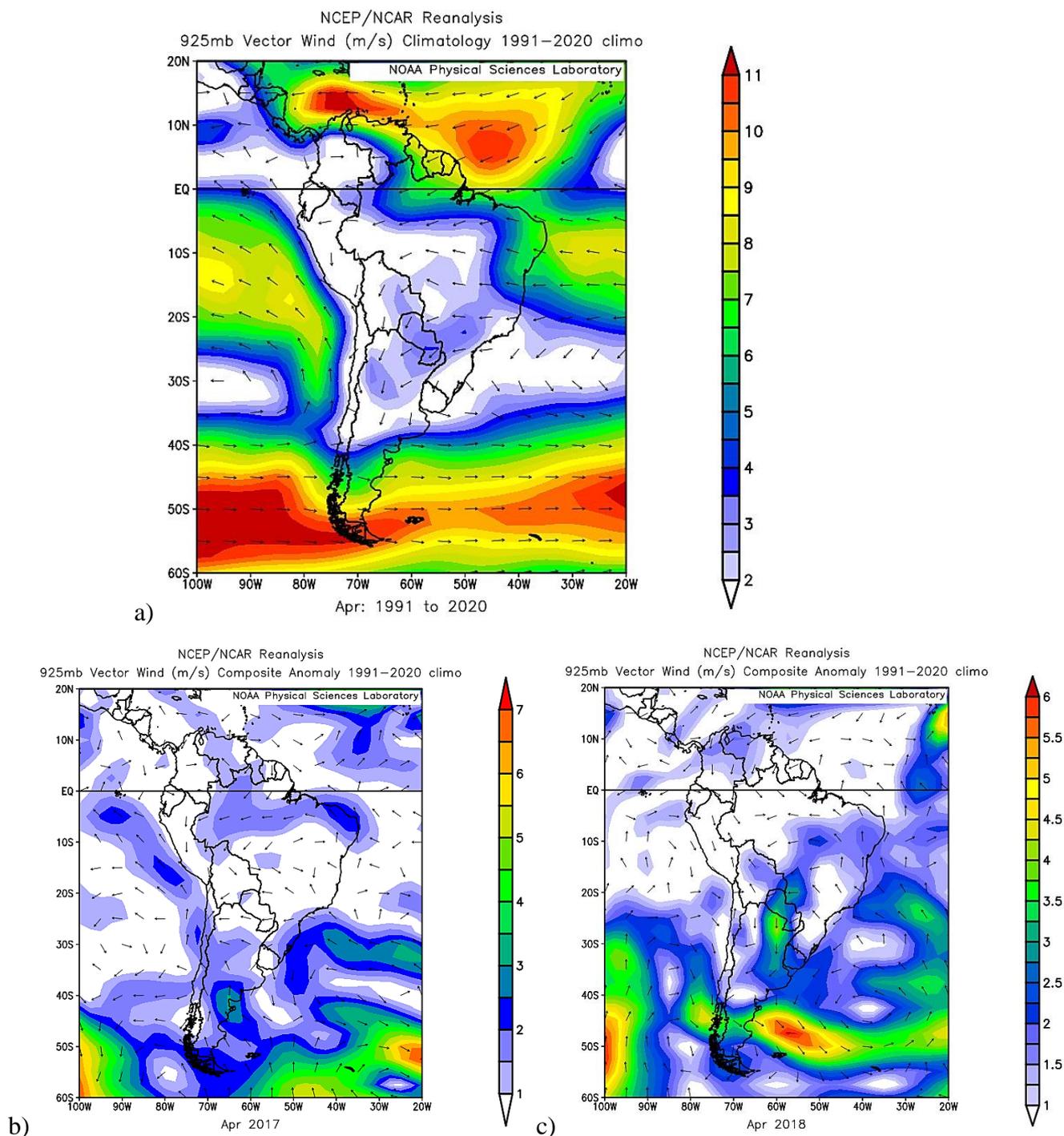


Figura 14. Climatologia de Abril/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de abril/2017 (b) e anomalia de abril/2018 (c) em 950 hPa.

A climatologia de 1991-2020 para o referido mês, em 950 hPa, mostra que os ventos predominantes são de origem Leste. Durante abril de 2017 o valor apresentado de $\delta^{18}\text{O}$ foi de **-3,06**, enquanto em 2018 o valor é próximo ao do ano anterior, sendo de **-3,85**. Em 2017 e 2018 é possível notar que o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) pode ter influenciado nas anomalias de vento em Brasília, devido a sua origem vinda de

Sudeste. Porém em 2017 o vento apresenta uma origem diferente, além de Sudeste também é possível verificar ventos vindos de Noroeste.

MAIO

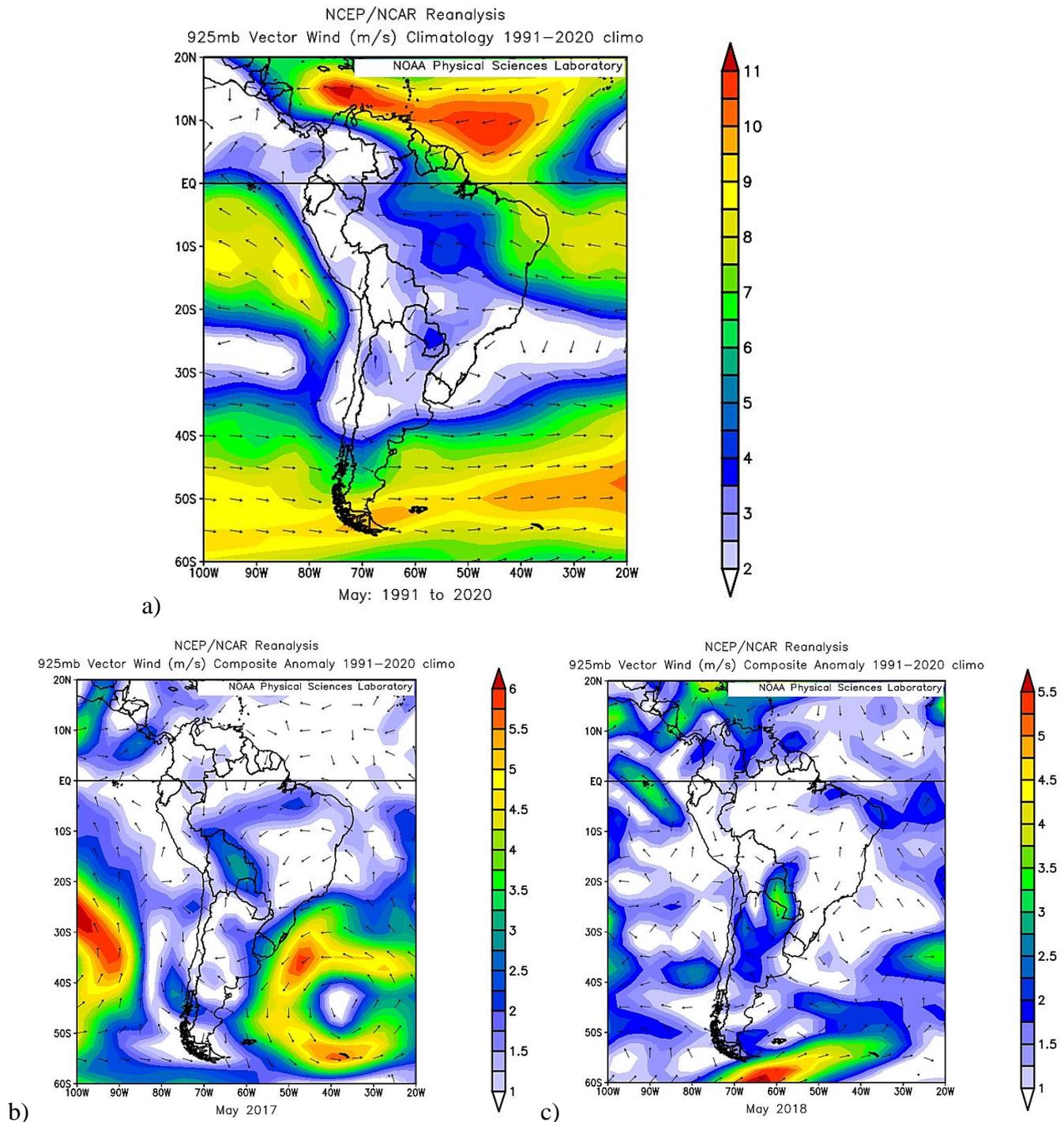


Figura 15. Climatologia de Maio/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de maio/2017 (b) e anomalia de maio/2018 (c) em 950 hPa.

A climatologia de 1991-2020 para Brasília indica que o vento se originava da direção leste, com alguma influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

Em maio de 2017, o valor $\delta^{18}\text{O}$ foi de **-0,82**, com ventos do Leste, sugerindo alguma influência da ZCIT. Já em 2018, o valor de $\delta^{18}\text{O}$ apresentou uma diferença significativa, com uma anomalia de **-2,96** em torno de Brasília e ventos de diversas direções, como Sul e Leste.

JUNHO

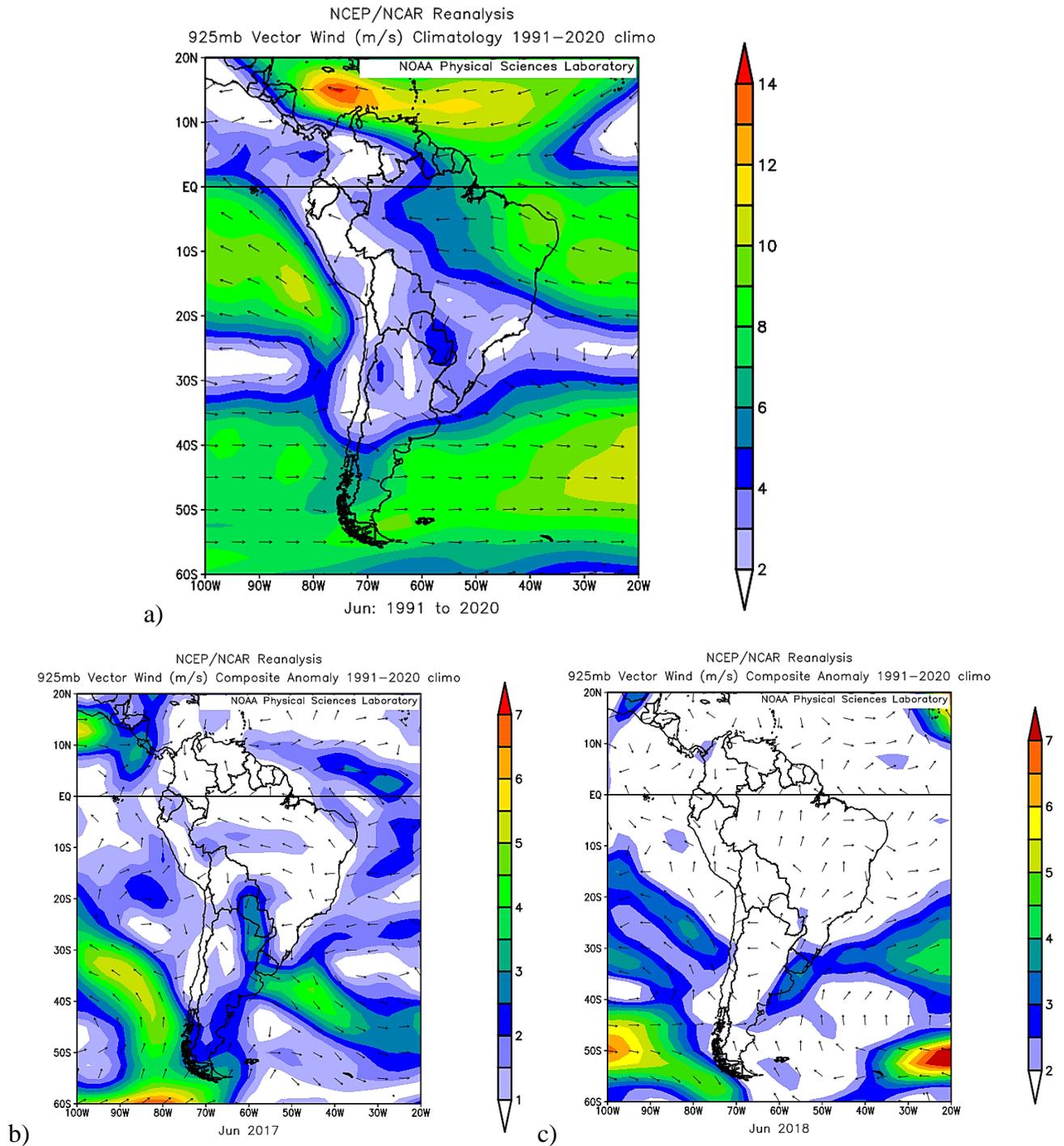


Figura 16. Climatologia de Junho/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de junho/2017 (b) e anomalia de junho/2018 (c) em 950 hPa.

De acordo com o banco de dados da estação Brasília A001 fornecida pelo INMET, durante o mês de junho dos anos de 2017 e 2018 não foi possível coletar dados de $\delta^{18}\text{O}$ em Brasília devido à ausência de precipitação. Os dados de precipitação para 2017 e 2018 estão zerados, indicando a falta de informação para análise.

JULHO

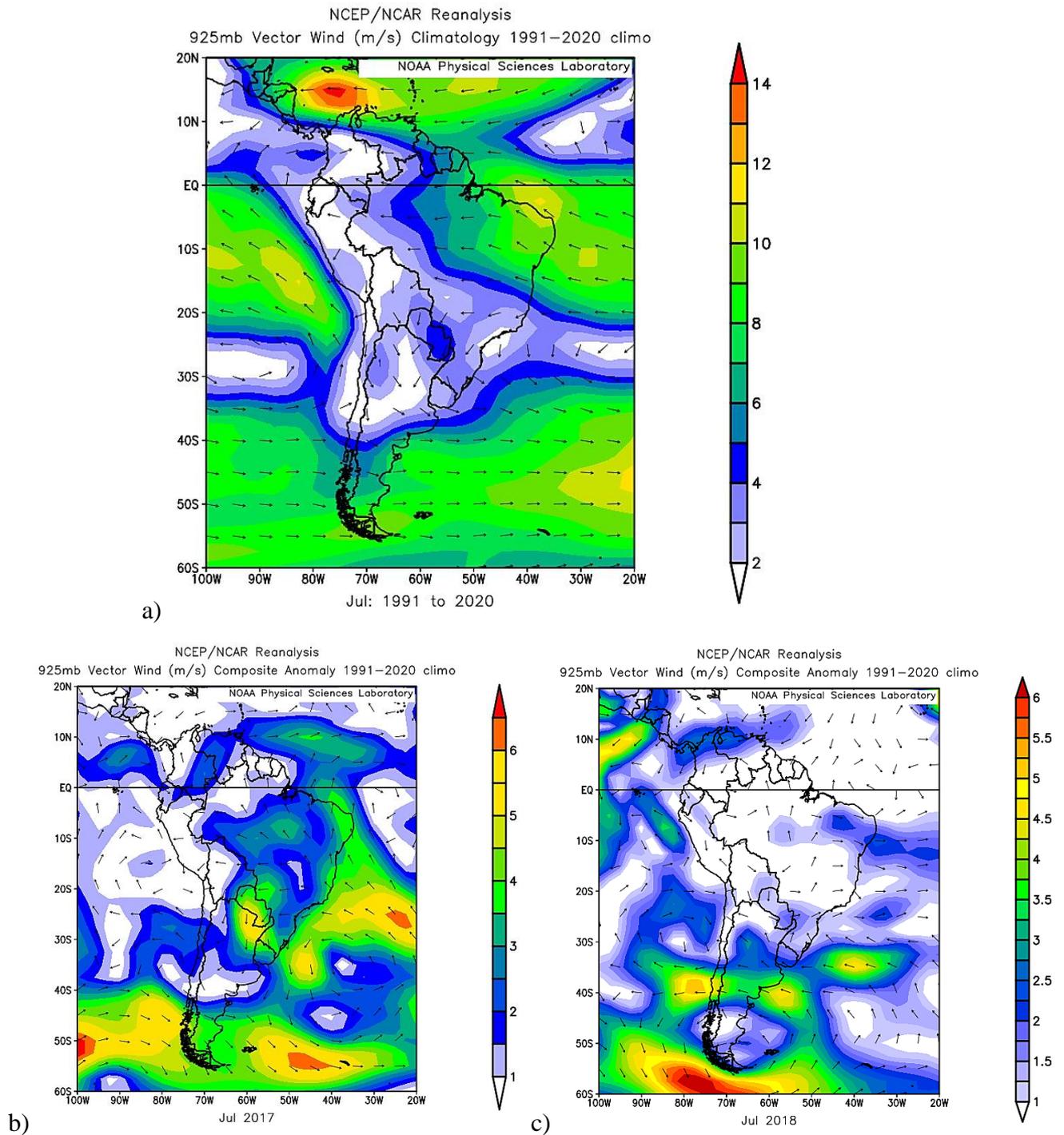
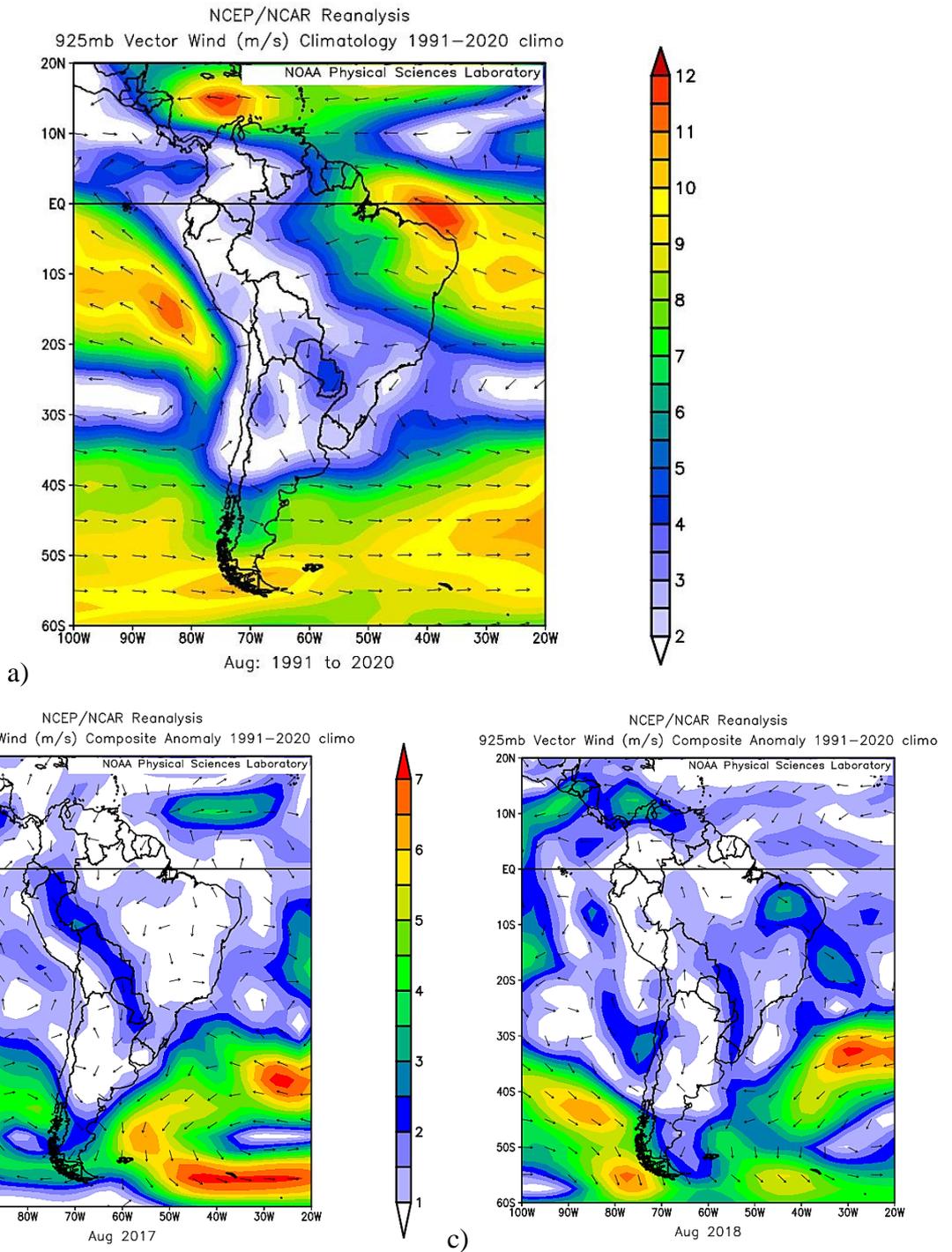


Figura 17. Climatologia de julho/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de julho/2017 (b) e anomalia de julho/2018 (c) em 950 hPa.

Similar a junho, no mês de julho de 2017 e 2018 não foi possível coletar dados de $\delta^{18}\text{O}$ em Brasília devido à falta de precipitação, como é apontado na tabela 11.

AGOSTO



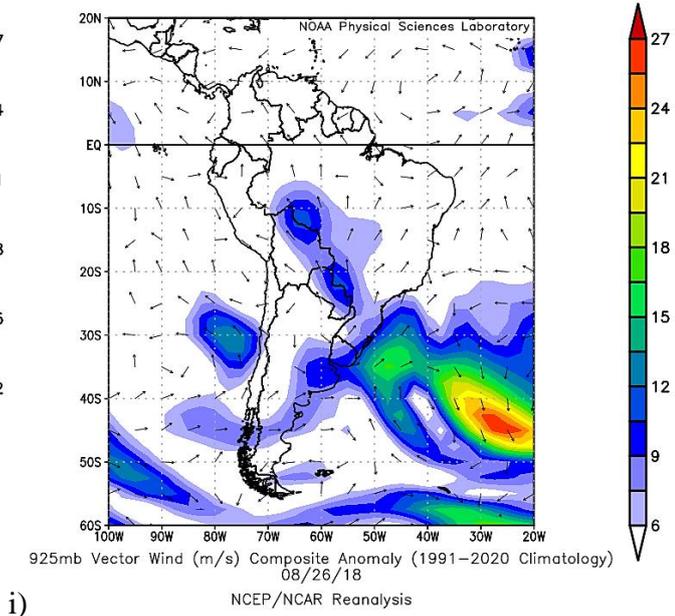
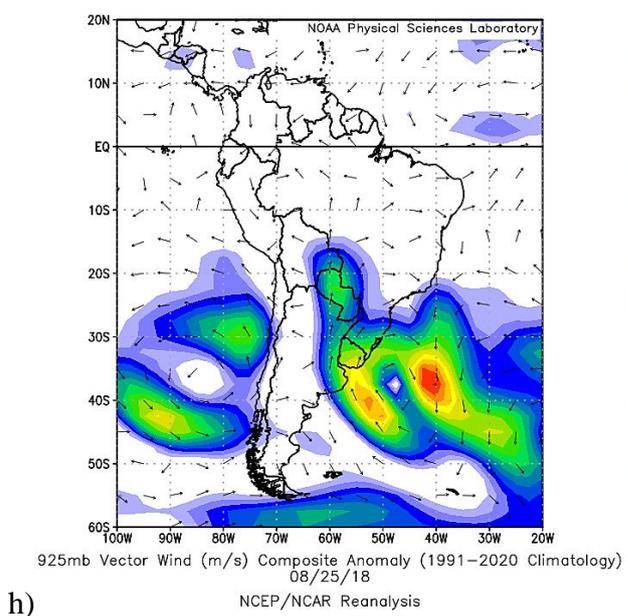
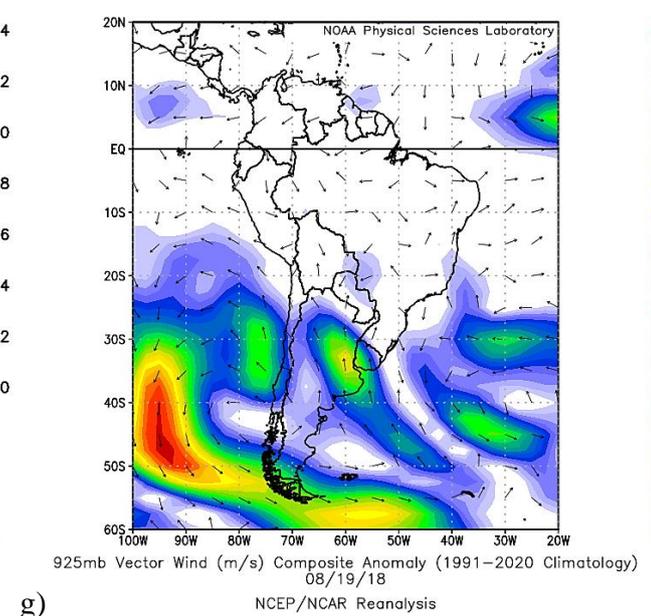
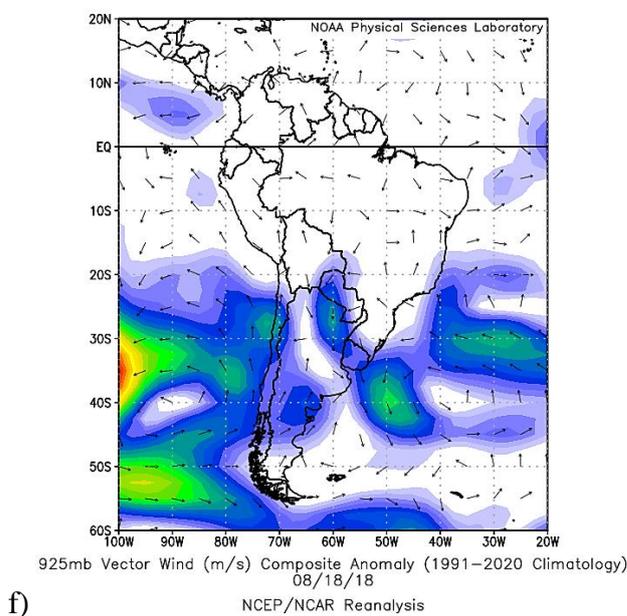
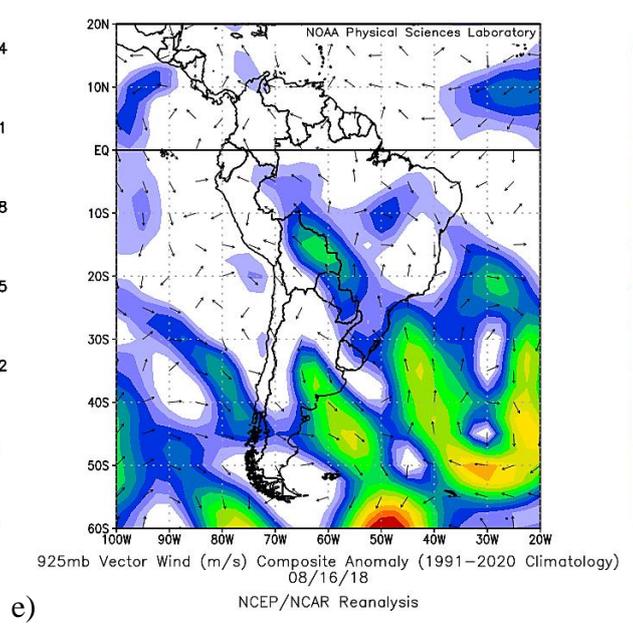
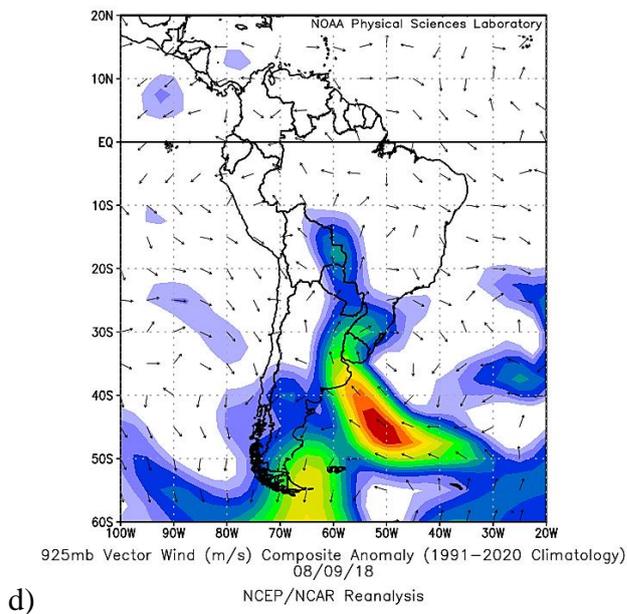
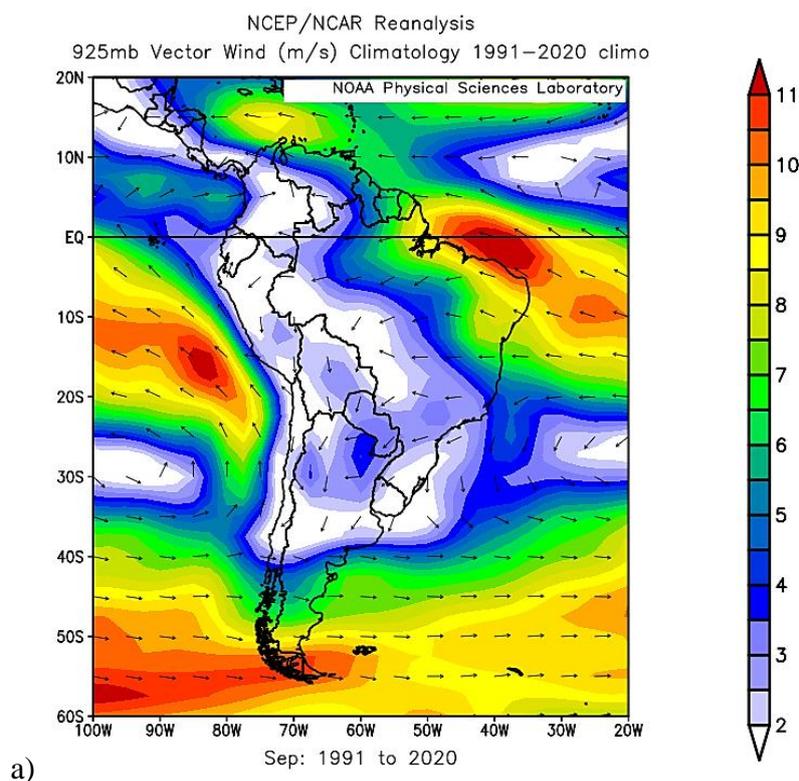


Figura 18. Climatologia de agosto/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de agosto/2017 (b), anomalia de agosto/2018 (c), anomalia do dia 09/08/2018 (d), anomalia do dia 16/08/2018 (e), anomalia do dia 18/08/2018 (f), anomalia do dia 19/08/2018 (g), anomalia do dia 25/08/2018 (h), anomalia do dia 26/08/2018 (i) em 950 hPa.

Nas imagens acima é possível verificar que no período de 1991-2020 os ventos predominantes foram de origem leste. Em agosto de 2017 não houve nenhum registro do valor de $\delta^{18}\text{O}$, pois segundo o banco de dados da estação Brasília A001 fornecida pelo INMET, não havia nenhum dado para ser coletado, devido à ausência de precipitação.

No mês de agosto de 2018 o valor apresentado foi de **0,02**, indicando precipitação em alguns dias do mês, com um padrão de ventos originários do Sul, em consequência da provável formação de um Ciclone Tropical no Oceano Atlântico.

SETEMBRO



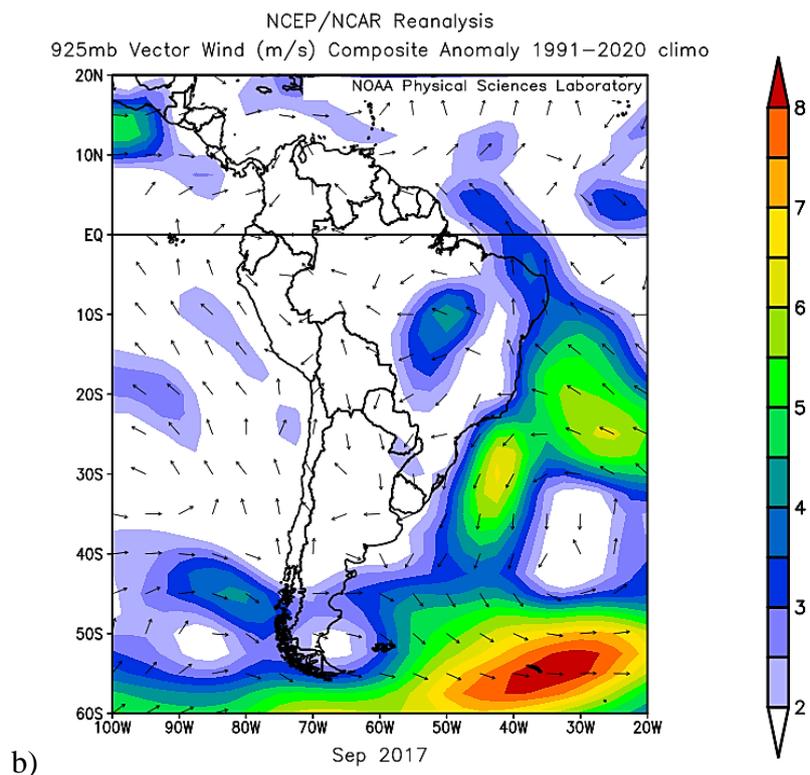


Figura 19. Climatologia de setembro/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de setembro/2017 (b) em 950 hPa.

A climatologia de 1991-2020 apresenta ventos de Sudeste e Leste abrangendo Brasília, podendo ser influência da ZCIT ou de ventos alísios. No mês de setembro os dados de $\delta^{18}\text{O}$ apresentaram um valor de **-0,72**, sendo 2017 o único ano estudado. Observa-se que os ventos estão intensos e vem da direção Leste, podendo ser influenciadas pelo ASAS e também pela ZCIT.

OUTUBRO

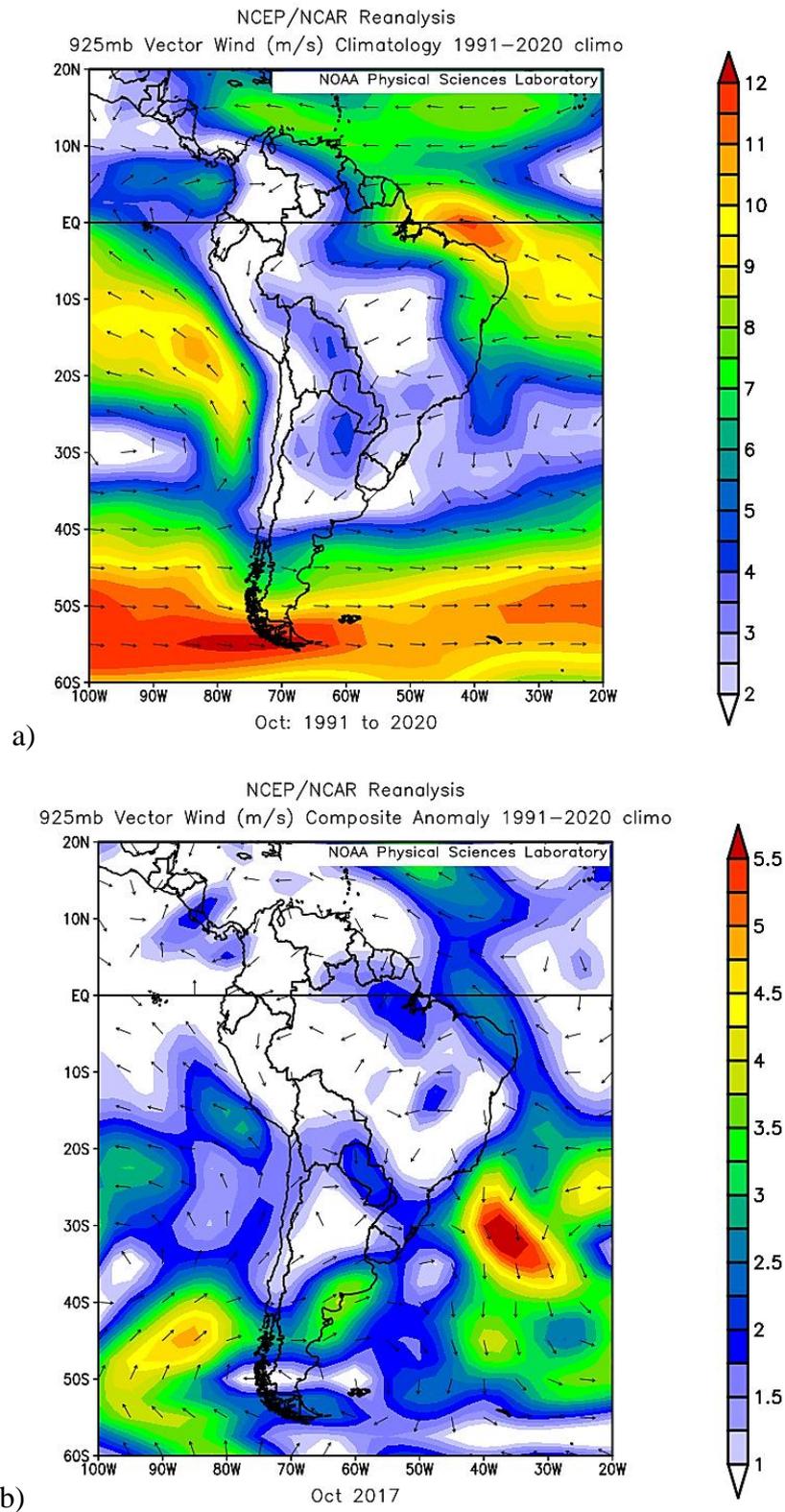


Figura 20. Climatologia de outubro/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de outubro/2017 (b) em 950 hPa.

Similar a setembro, a climatologia de 1991-2020 indica ventos provenientes de Leste, enquanto no mês de outubro há apenas o valor de $\delta^{18}\text{O}$ de 2017, sendo ele **-2,52**.

O vento vem de diferentes direções, sendo do Norte, Leste e Oeste, sendo possível que a influência seja dos Jatos de Baixo Níveis (JBN) e ASAS.

NOVEMBRO

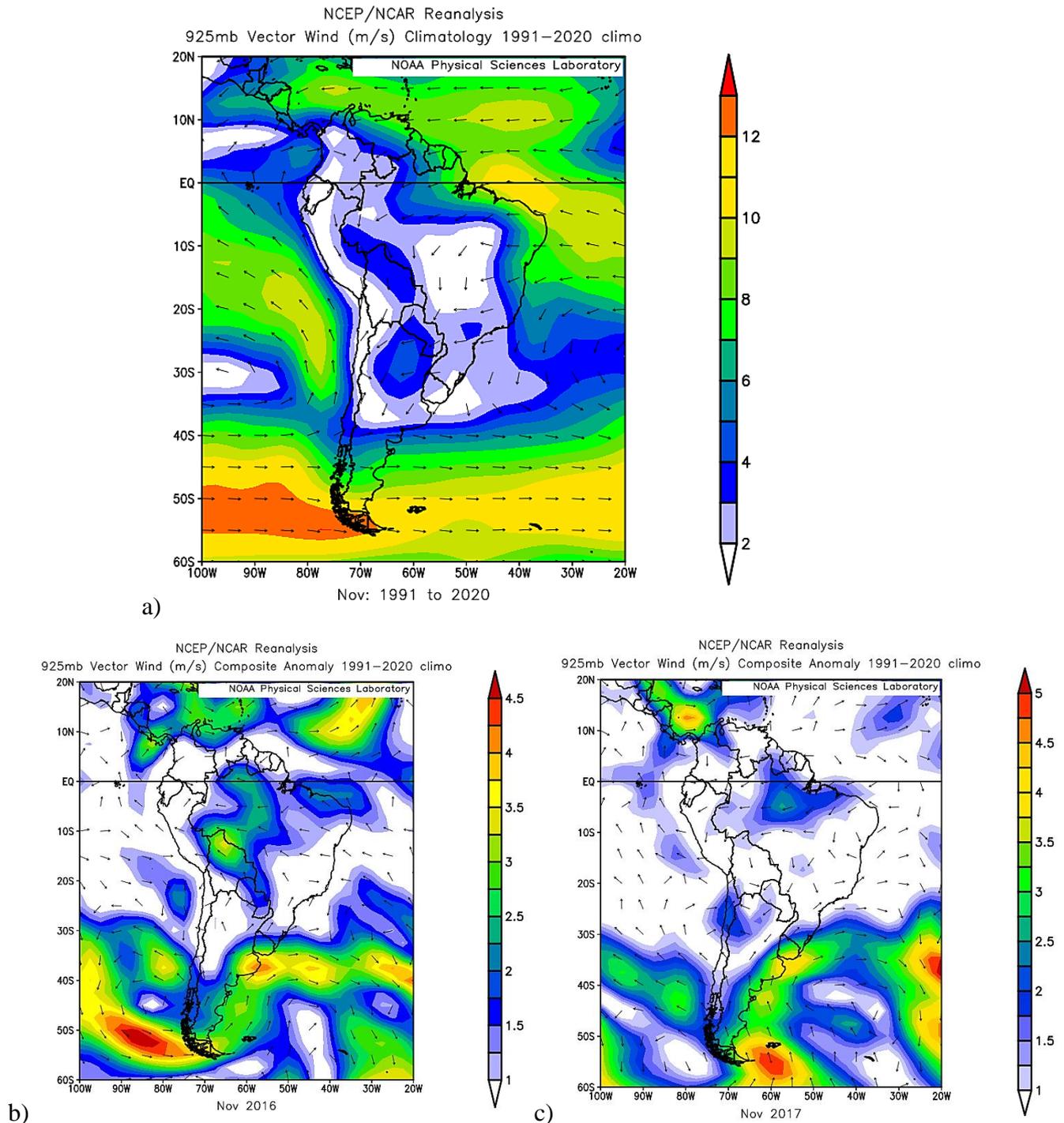
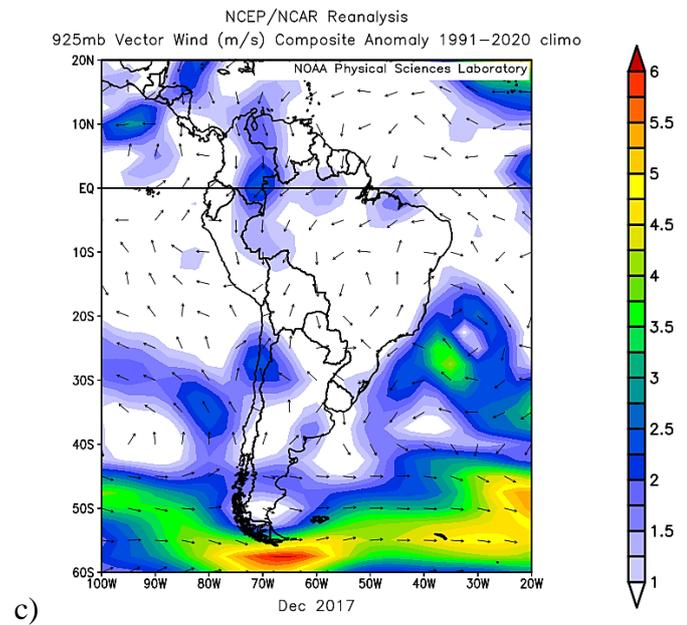
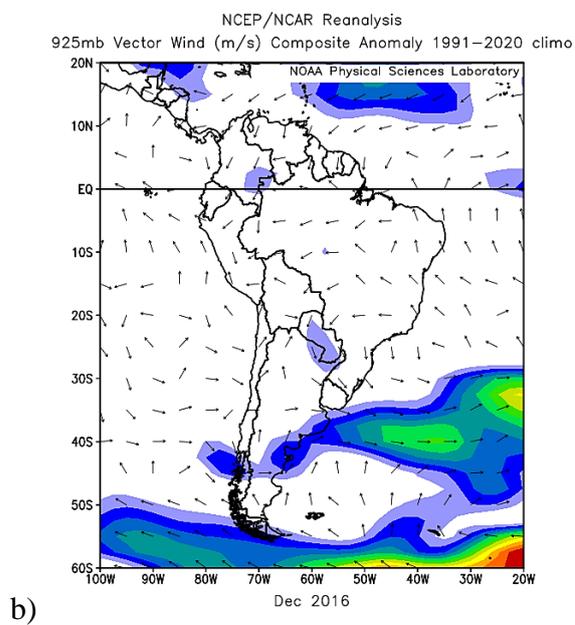
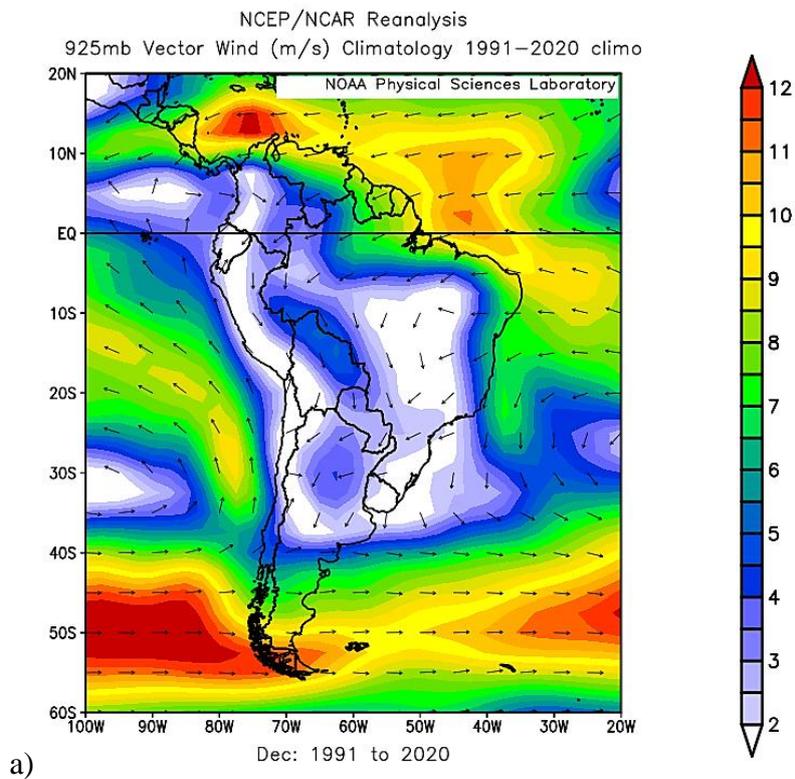


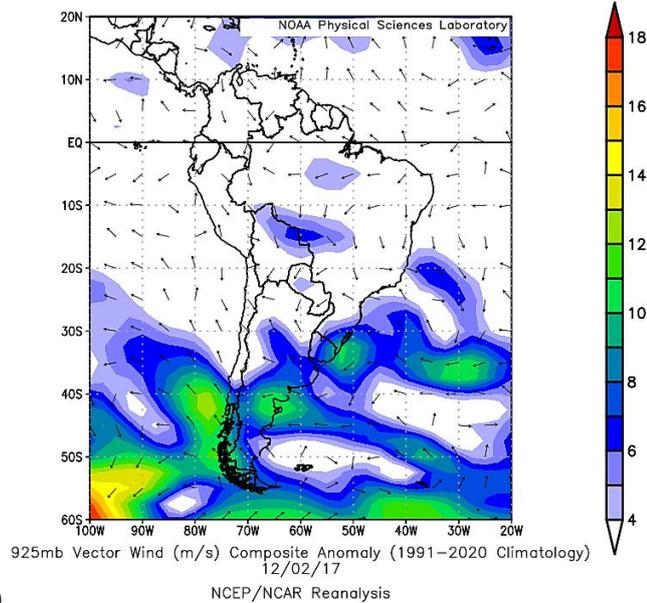
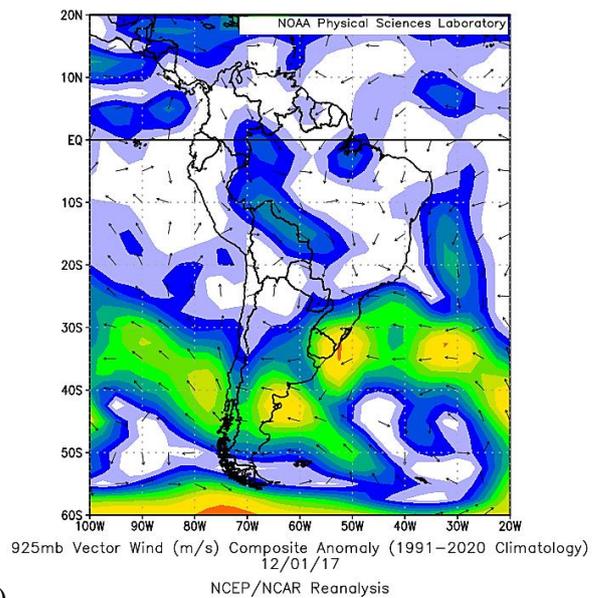
Figura 21. Climatologia de novembro/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de novembro/2016 (b) e anomalia de novembro/2017 (c) em 950 hPa.

A climatologia de 1991-2020 demonstra que os ventos são derivados de Norte e Leste, podendo indicar influência dos ventos alísios, ZCIT e ASAS.

Em 2016, o valor de $\delta^{18}\text{O}$ foi **-3,70**, com um campo de vento soprando de Leste, enquanto em 2017 o valor foi de **-5,61**, com um campo de vento variável entre Norte e Leste.

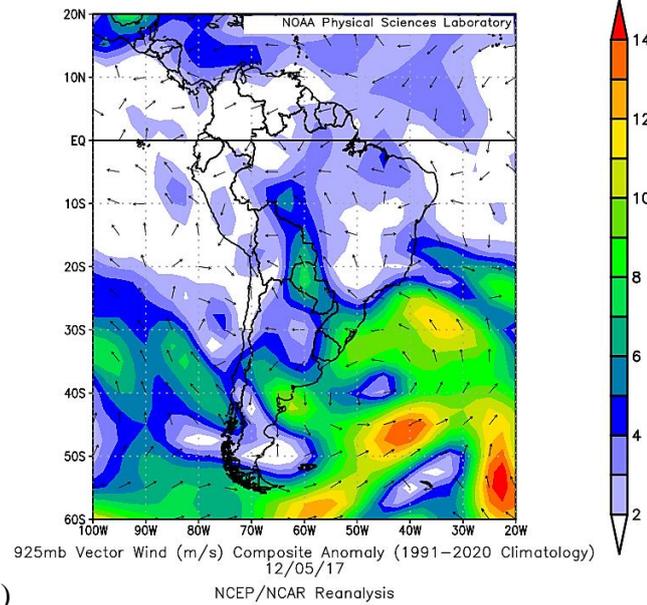
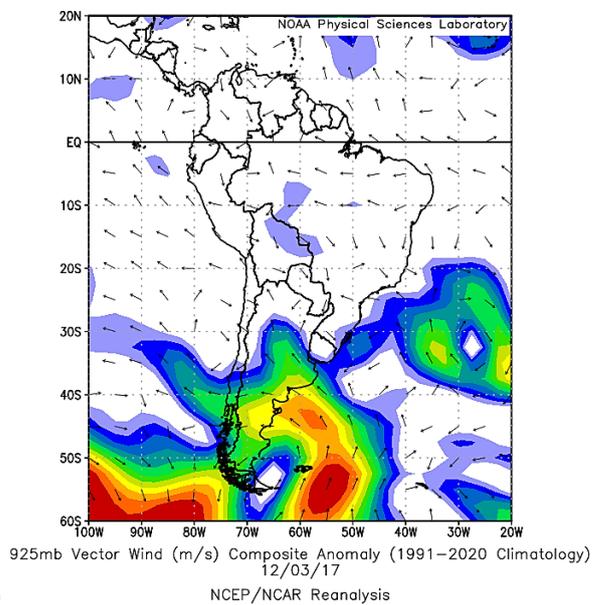
DEZEMBRO





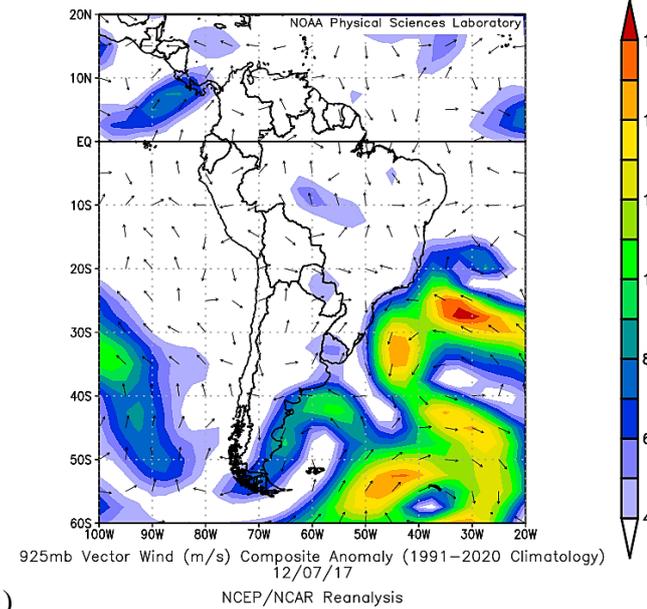
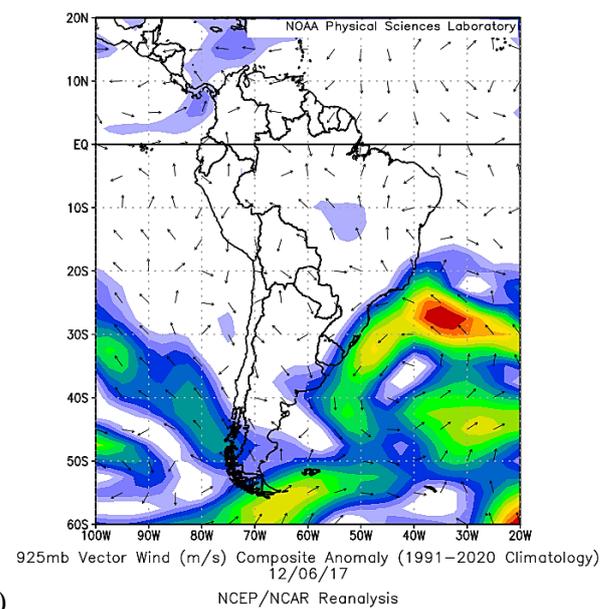
d)

e)



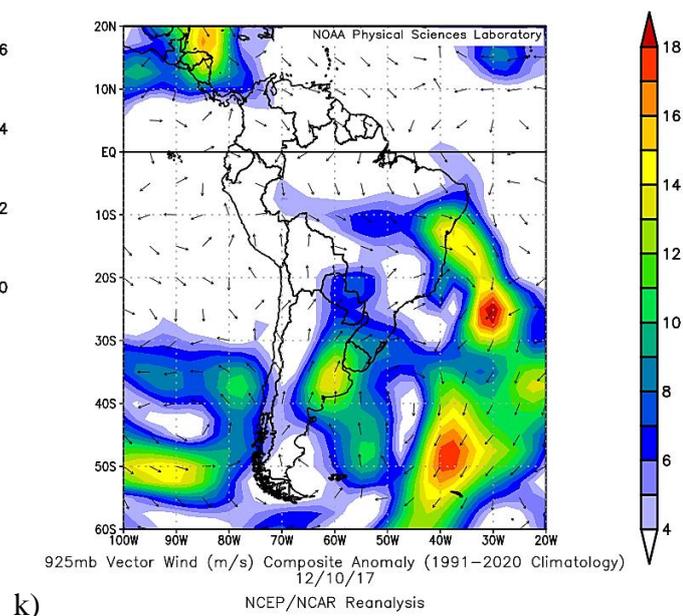
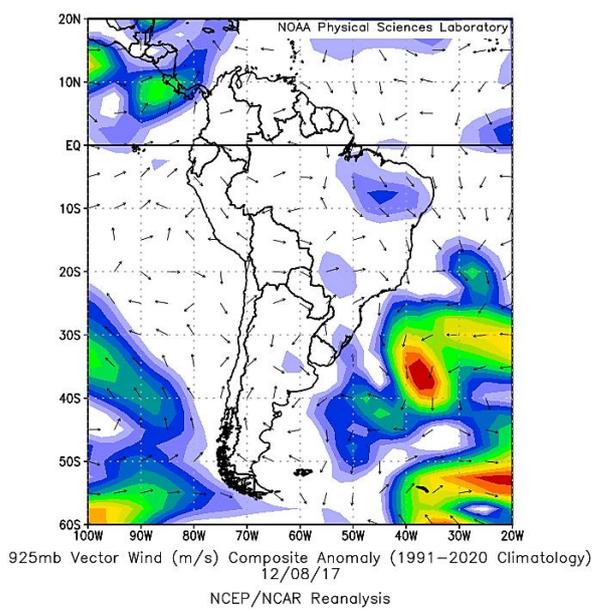
f)

g)



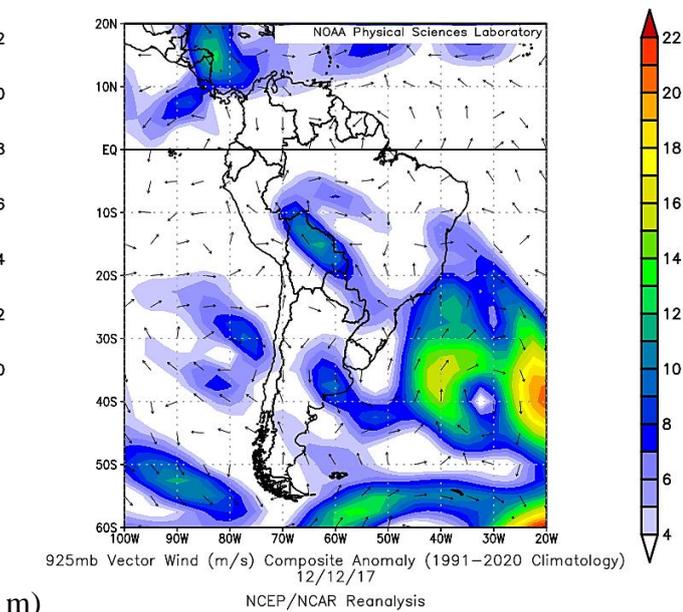
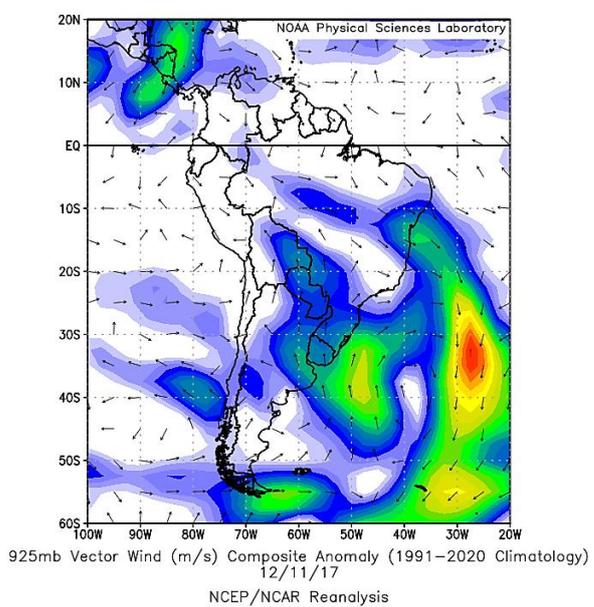
h)

i)



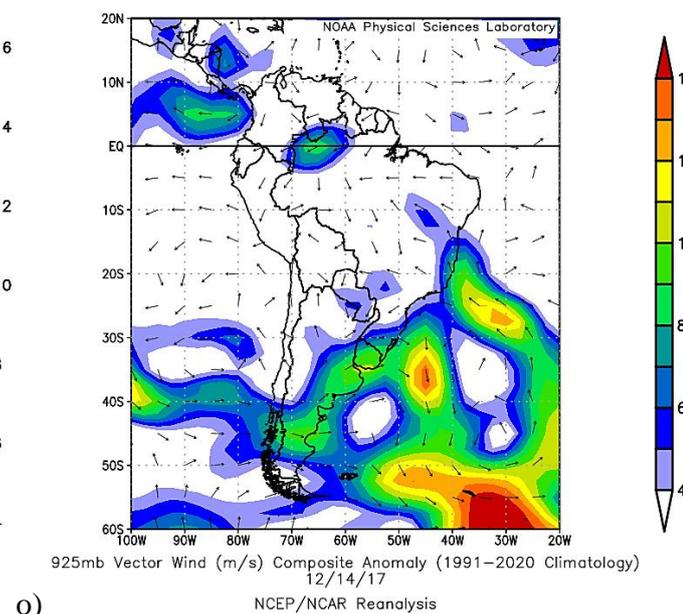
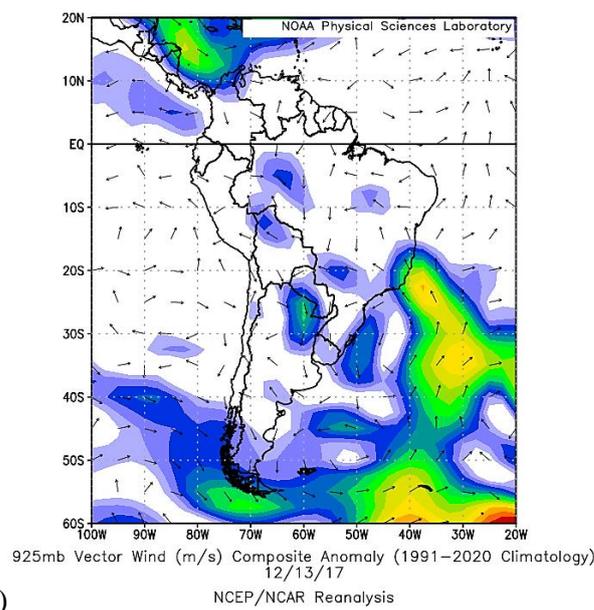
j)

k)



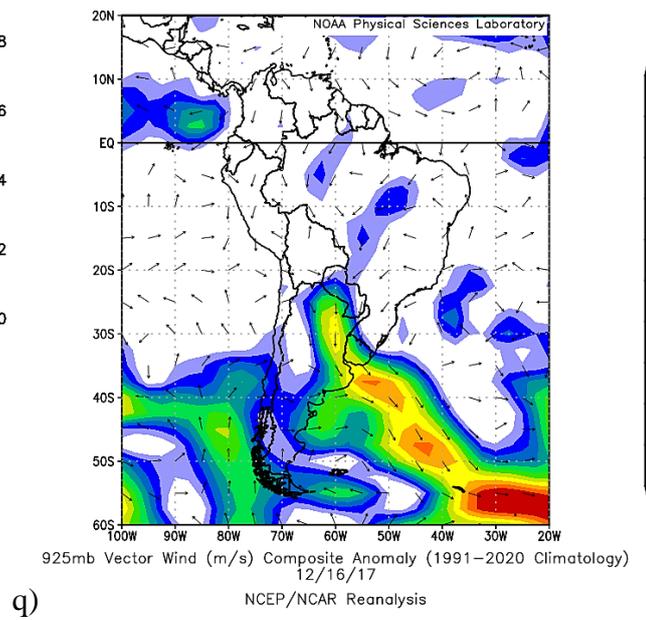
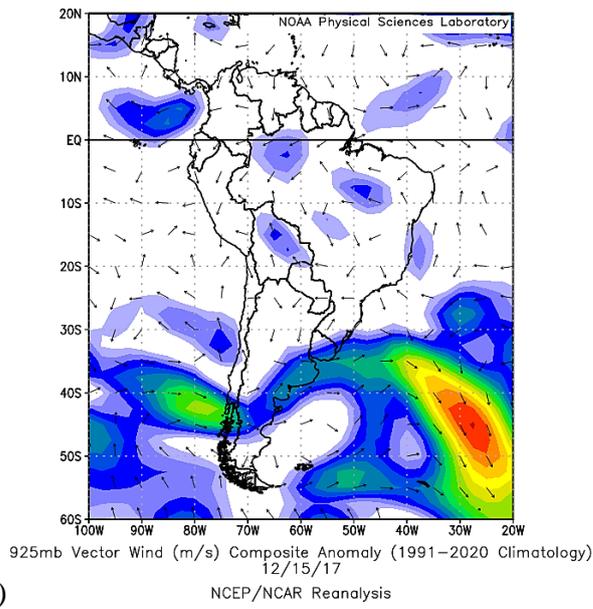
l)

m)



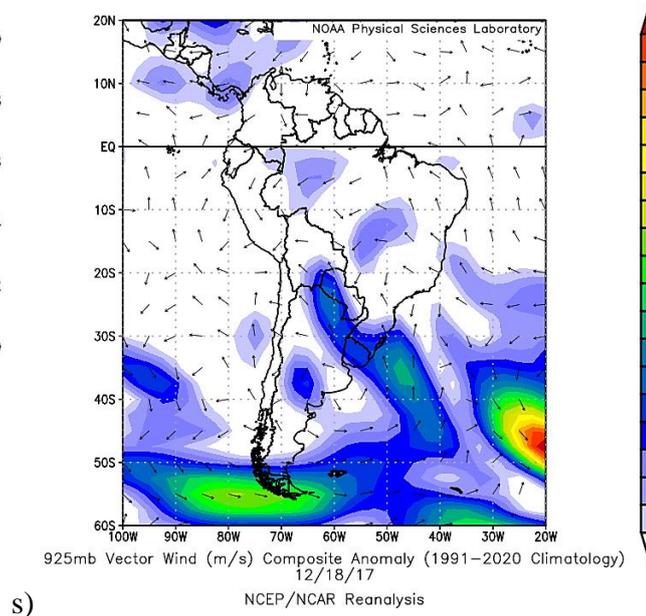
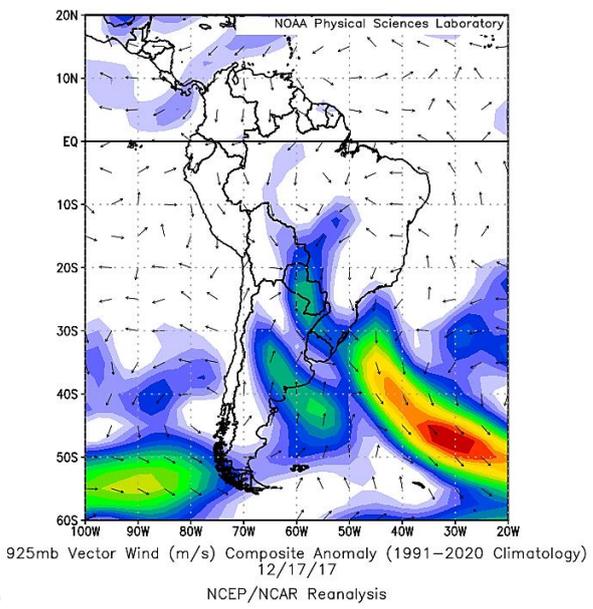
n)

o)



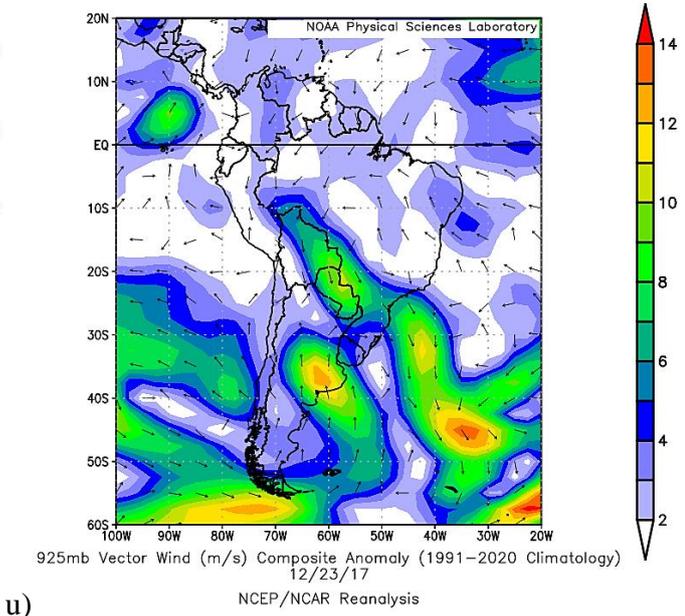
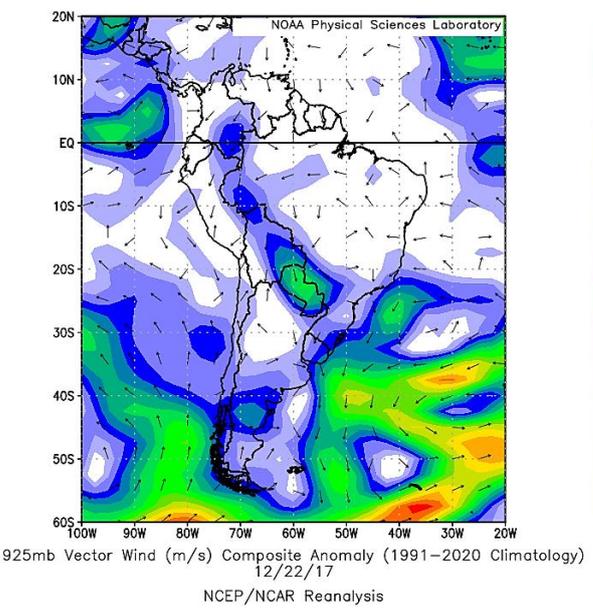
p)

q)



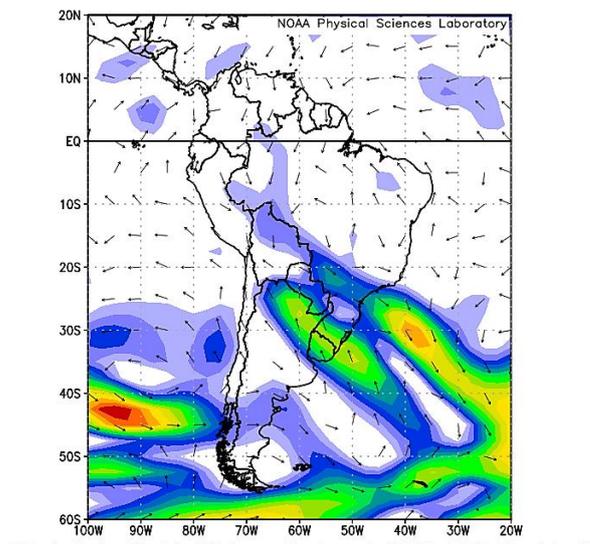
r)

s)



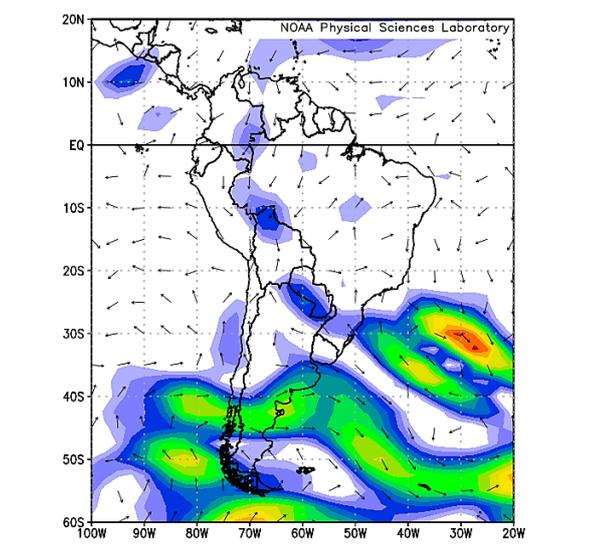
t)

u)



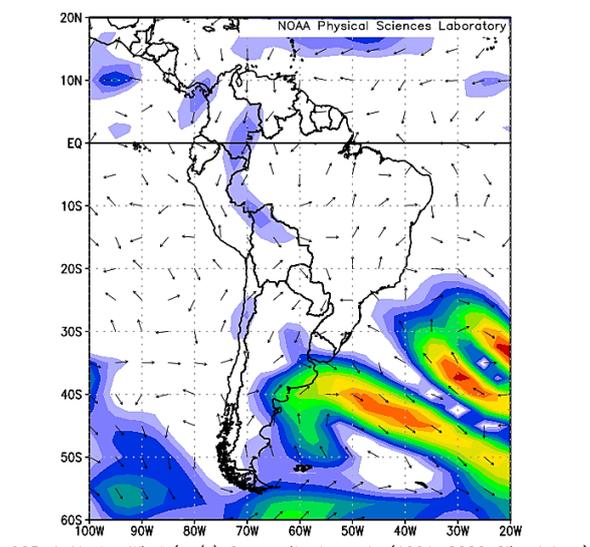
v)

NCEP/NCAR Reanalysis



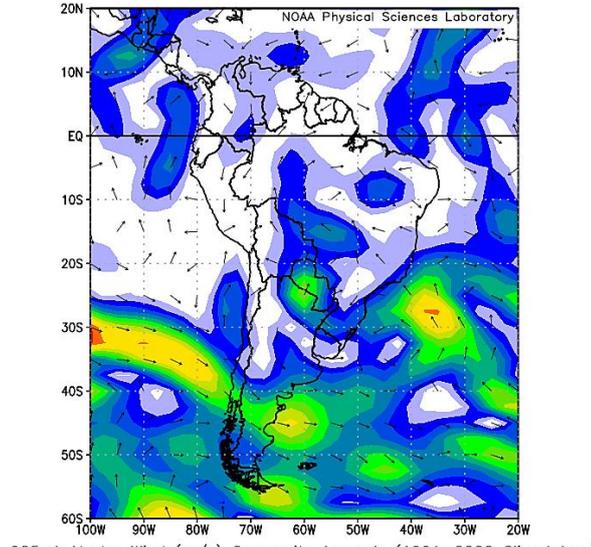
x)

NCEP/NCAR Reanalysis



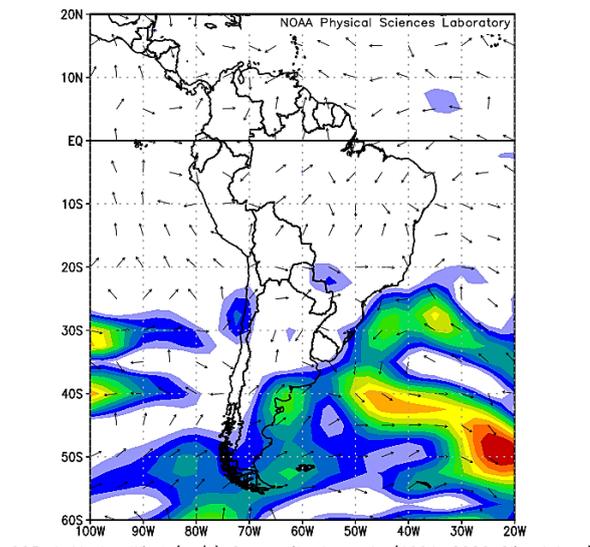
y)

NCEP/NCAR Reanalysis



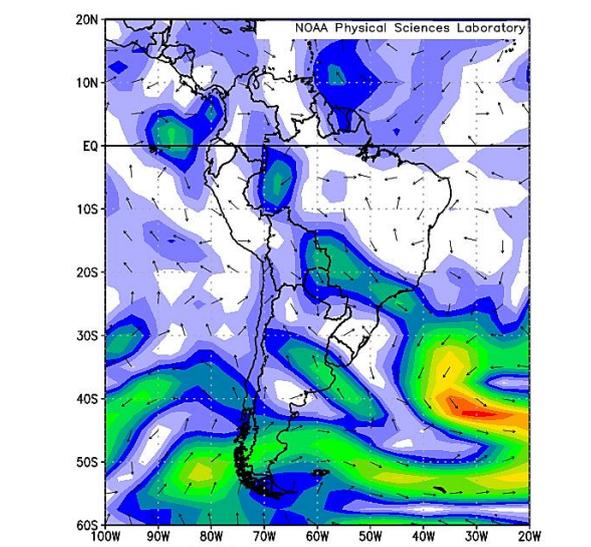
z)

NCEP/NCAR Reanalysis



w)

NCEP/NCAR Reanalysis



wi)

NCEP/NCAR Reanalysis

Figura 22. Climatologia de dezembro/1991-2020 do campo de vento médio (a), anomalia de dezembro/2016 (b), anomalia de dezembro/2017 (c), anomalia do dia 01/12/2017 (d), anomalia do dia 02/12/2017 (e), anomalia do dia 03/12/2017 (f), anomalia do dia 05/12/2017 (g), anomalia do dia 06/12/2017 (h), anomalia do dia 07/12/2017 (i), anomalia do dia 08/12/2017 (j), anomalia do dia 10/12/2017 (k), anomalia do dia 11/12/2017 (l), anomalia do dia 12/12/2017 (m), anomalia do dia 13/12/2017 (n), anomalia do dia 14/12/2017 (o), anomalia do dia 15/12/2017 (p), anomalia do dia 16/12/2017 (q), anomalia do dia 17/12/2017 (r), anomalia do dia 18/12/2017 (s), anomalia do dia 22/12/2017 (t), anomalia do dia 23/12/2017 (u), anomalia do dia 24/12/2017 (v), anomalia do dia 25/12/2017 (x), anomalia do dia 26/12/2017 (y), anomalia do dia 29/12/2017 (z), anomalia do dia 30/12/2017 (w), anomalia do dia 31/12/2017 (wi) em 950 hPa.

A climatologia de 1991-2020 indica influência de ventos vindo de Leste do Atlântico e Norte da Amazônia. No mês de dezembro também foram estudados apenas os anos de 2016 e 2017. O valor de $\delta^{18}\text{O}$ no ano de 2016 foi de **-4,63** enquanto em 2017 o valor foi de **-9,33**, demonstrando uma grande anomalia quando os dados são comparados. Em dezembro dos anos de 2016 e 2017 o vento foi anormalmente fraco, em 2016 houve a predominância de circulação vinda de Sudeste, e do Sul em 2017.

Devido ao valor de **-9,33** apresentado no ano de 2017, foram analisados os dias em que houve registro de precipitação. A direção do vento foi variada, porém com maior atuação de Norte, Sul e Leste, indicando uma possível influência de diversos fenômenos climáticos, como ZCAS, ZCIT, ASAS, JBN e Alta da Bolívia.

5. CONCLUSÕES

Essa dissertação teve como objetivo relacionar os valores de isótopos na precipitação mensal e extrema em Brasília, utilizando como método a espectroscopia de cavidade ressoante para realizar as medições dos valores isotópicos. O período de amostragem não foi de anos completos, portanto iniciou em novembro de 2016 e terminou em agosto de 2018, com alguns meses sem dados registrados, devido à ausência de precipitação na região estudada. Sendo assim, abaixo estão as conclusões deste trabalho.

- Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ da precipitação coletada e analisada pelo laboratório do CPC/UFRGS demonstraram valores mensais similares aos coletados pela IAEA em 1965-1987, porém alguns meses apresentaram uma grande diferença quando comparados. Os dados se assemelham em 2016 e 2018, mas em 2017 os meses de janeiro, fevereiro, abril, maio e dezembro são os que possuem maior discrepância com os demais resultados apresentados.

- A análise dos campos vetor vento em 950 hPa, possibilitou a identificação da origem das massas de ar responsáveis por diversas variações significativas nos valores de $\delta^{18}\text{O}$.

- O mês de fevereiro foi o responsável pela maior diferença entre os outros valores de isótopos, sendo ele **5,82** em 2017 e **-6,86** em 2018 devido às chuvas acima da média nesse mês nos dois anos. Os fenômenos predominantes nesse mês foram a ZCIT, ASAS e JBN (Figuras 12b e 12c). Dessa forma, as massas de ar predominantes que podem ter exercido influência nas condições climáticas na região nesses anos foram a Equatorial Continental e a Tropical Atlântica.

- Em maio de 2017 o valor de $\delta^{18}\text{O}$ foi de **-0,82** e **-2,96** em 2018, indicando uma diferença significativa entre os valores dos dois anos. Em 2017, a influência foi provocada pela ZCIT e AB (Figura 15b), indicando que as massas de ar responsáveis por influenciar aquela região foram a Equatorial Atlântica e Tropical Continental em ambos os anos.

- No mês de dezembro outra anomalia é observada, com um valor isotópico de **-4,63** em 2016 e **-9,33** em 2017. Em 2016, a influência é proveniente da massa de ar Tropical Atlântica (Figura 22b), enquanto em 2017, após um episódio de ZCAS (Figura 22c), é possível deduzir que a massa de ar Equatorial Continental foi responsável pela atividade convectiva em Brasília neste ano.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Este estudo levanta questões relevantes que podem servir como temas para futuras pesquisas:

- Realizar uma análise comparativa da composição isotópica da precipitação durante anos de El Niño e La Niña, afim de investigar como esses fenômenos podem impactar na dinâmica de precipitação em Brasília;

- Investigar como as mudanças climáticas podem estar afetando a composição isotópica da precipitação em Brasília ao longo do tempo. Isso poderia incluir uma análise de tendências históricas e projeções futuras com base em cenários de mudanças climáticas;

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGARWAL, P. K. *et al.* Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios. **Nature Geoscience**, v. 9, n. 8, p. 624–629, 2016.

ALMEIDA, J. M. V. de. **Mudanças Climáticas no Distrito Federal**. 2017. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

ALVES, L. M. Clima da Região Centro-Oeste do Brasil. *In.* Cavalcanti, IFA, Ferreira, NJ, Silva, MGJ, Silva Dias, MAF (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. Ed. **Oficina de Textos**, 2009.

ALVES, R. C. M. de. *et al.* Descrição e caracterização dos fenômenos atmosféricos mais frequentes no território brasileiro. **Elaborado por: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Laboratório de Meteorologia e Qualidade do Ar. Para: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Programa Energia Brasileiro-Alemão. Ndo programa**, p. 4-001.00, 2007. Disponível em: <https://energypedia.info/images/4/40/Descri%C3%A7%C3%A3o_e_carateriza%C3%A7%C3%A3o_dos_fen%C3%B4menos_atmosf%C3%A9ricos_mais_frequentes_no_territ%C3%B3rio_brasileiro.pdf>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2023.

ANDRADE, K. M. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul**. 2005. 187 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

ANUNCIACÃO, Y. M. T. **Regimes de Tempo e Precipitação Extrema de Verão Observados e Simulados na Região central do Brasil**. 2013. 127 p. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas). Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

AYOADE, J. O.. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 11. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. 332 p.

BARROS, J. R. **A chuva no Distrito Federal: o regime e as excepcionalidades do ritmo**. 2003. 216 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2003.

BARROS, J. R.; BALERO, J. C. S. da. A influência do clima e do tempo do Centro-Oeste do Brasil nas condições de voo na região. **Élisée, Rev. Geo. UEG**, Goiânia, v.1, n. 2, p. 25-49, jul./dez. 2012.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, tempo e clima**. Bookman Editora, 2009.

BERLATO, Moacir A.; FONTANA, Denise Cybis. **El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul: aplicações de previsões climáticas na agricultura**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2003.

BORSATO, V. da A. **A dinâmica atmosférica e a gênese das chuvas na bacia do rio Paraná no período de 1980 a 2003**. 2007. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2007.

BORSATO, V. da A.; MENDONÇA, F. A. Participação da massa polar atlântica na dinâmica dos sistemas atmosféricos no Centro Sul do Brasil. **Mercator (Fortaleza)**, v. 14, p. 113-130, 2015.

- CARDOSO, M. R. D. *et al.* Caracterização da temperatura do ar no estado de Goiás e no Distrito Federal. **Revista Brasileira de Climatologia**. v. XI, p. 119-134, jul./dez. 2012.
- CARDOSO, M. R. D. *et al.* Classificação climática de Köppen-Geiger para o estado de Goiás e o Distrito Federal. **ACTA Geográfica**, Boa Vista, v. 8, n. 16, p. 40-55, jan./mar. 2014.
- CARVALHO, L. M. V. *et al.* The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal and Interannual Activity and Extreme Rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88-108, 2004.
- CASTRO FILHO, H. C. *et al.* Análise Espacial da Precipitação Pluviométrica na Bacia do Lago Paranoá: Comparação de Métodos de Interpolação. **Revista Geonorte**, Edição Especial 2, v. 1, n. 5, p. 336 – 345, 2012.
- CITEAU, J. *et al.* Position de la Zone de Convergence a 28 N et température de surface de l'océan. **Veille Climatique Satellitaire**, v. 21, p. 3-7, 1988.
- CLARK, I. D.; FRITZ, P. **Environmental isotopes in hydrogeology**. CRC press, 1997.
- CLIMANÁLISE. Boletim de monitoramento e análise climática. – Número Especial, 1986. CPTEC/INPE/MCT. São José dos Campos, SP. 125 págs.
- CODEPLAN – Companhia de Planejamento do Distrito Federal. **Atlas do Distrito Federal 2017**. Disponível em: <<https://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/05/Atlas-do-Distrito-Federal-2017.pdf>>. Acesso em: 27 dez. 2022.
- CODEPLAN – Companhia de Planejamento do Distrito Federal. **Atlas do Distrito Federal 2020**. Disponível em: <<https://www.codeplan.df.gov.br/atlas-do-distrito-federal-2020/>>. Acesso em: 27 dez. 2022.
- DA CUNHA, G. R. *et al.* El Niño/La Niña-Oscilação Sul e seus impactos na agricultura brasileira: fatos, especulações e aplicações. **Revista Plantio Direto**, p. 19, jan./fev. 2011.
- DA SILVA, F. A. M. *et al.* Caracterização Climática do Bioma Cerrado. *In: Cerrado: Ecologia e Flora*. EMBRAPA Informação Tecnológica, Brasília – DF. 1º Ed. Cap. 3. p. 69-88, 2008.
- DE OLIVEIRA, G. S.; SATYAMURTY, P. **O El Niño de 1997/98: evolução e impactos no Brasil**. 1998.
- DIAZ, A. F.; STUDZINSKI, C. D.; MECHOSO, C. R. Relationships between precipitation anomalies in Uruguay and southern Brazil and sea surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. **Journal of Climate**, v. 11, n. 2, p. 251-271, 1998.
- DOS SANTOS, V. *et al.* Variabilidade da Composição isotópica da precipitação na região central do estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, v. 33, n. 2, p. 171-181, 2019.
- ESCOBAR, G. C. J.; SELUCHI, M. E. Classificação sinótica dos campos de pressão atmosférica na América do Sul e sua relação com as baixas do Chaco e do noroeste argentino. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, p. 365-375, 2012.

- FERREIRA, A. G.; DA SILVA MELLO, N. G. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista brasileira de climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.
- FERREIRA, N. J. *et al.* Composição da Zona de Convergência do Atlântico Sul em Períodos de El Niño e La Niña. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.1, p. 89-98, 2004.
- FERREIRA, N. S. Zona de convergência intertropical. **Boletim do Climanálise Especial** - Comemoração dos 10 anos, São Paulo, 1996. Disponível em: http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliEsp10a/zcit_1.html. Acesso em: 22 jul. 2024.
- GALDINO, S. Distribuição espacial da erosividade da chuva no Estado de Goiás e no Distrito Federal. Campinas: **Embrapa Monitoramento por Satélite**, 2015 (Boletim de Pesquisa da Embrapa).
- GAN, M. A.; KOUSKY, V. E.; ROPELEWSKI, C. F. The South America monsoon circulation and its relationship to rainfall over west-central Brazil. **Journal of climate**, v. 17, n. 1, p. 47-66, 2004.
- GAN, M. A.; RODRIGUES, L. R.; RAO, V. B. Monção na América do Sul. **Chapter**, v. 19, p. 297-312, 2009.
- GASTMANS, Didier *et al.* Controls over spatial and seasonal variations on isotopic composition of the precipitation along the central and eastern portion of Brazil. **Isotopes in Environmental and Health Studies**, v. 53, n. 5, p. 518-538, 2017.
- GODOY, J. M.; GODOY, M. L. D. P.; NETO, A. Direct determination of δ (D) and δ (18O) in water samples using cavity ring down spectrometry: Application to bottled mineral water. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 119, p. 1-5, 2012.
- GOMES, R. R. **Controles climáticos sobre a variação temporal da composição isotópica na região central do estado de São Paulo**. 2022. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- GRIEBLER JÚNIOR, J. C. **Origem da precipitação do Rio Grande do Sul a partir da composição isotópica**. 2018. 112 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- GRIMM, A. M. *et al.* Anomalias de precipitação no sul do Brasil em eventos El Niño. *In: Congresso Brasileiro de Meteorologia*. p. 1098-1102. 1996.
- 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, p. 537-554, 2011.
- HASTENRATH, S.; HELLER, L.. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 103, n. 435, p. 77-92, 1977.
- IBGE. **Brasília (DF) | Cidades e Estados**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/df/brasilia.html>. Acesso em: 27 dez. 2022.

- ISHIZAKI, Y. *et al.* Interannual variability of H218O in precipitation over the Asian monsoon region. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 117, n. D16, 2012.
- JOUZEL, J. *et al.* Water isotopes as tools to document oceanic sources of precipitation. **Water Resources Research**, v. 49, n. 11, p. 7469-7486, 2013.
- KOHN, M. J.; WELKER, J. M. On the temperature correlation of $\delta^{18}\text{O}$ in modern precipitation. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 231, n. 1–2, p. 87–96, 2005.
- KURITA, N. *et al.* The relationship between the isotopic content of precipitation and the precipitation amount in tropical regions. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 102, n. 3, p. 113–122, 2009.
- LENTERS, J. D.; COOK, K. H. Summertime precipitation variability over South America: Role of the large-scale circulation. **Monthly Weather Review**, v. 127, n. 3, p. 409-431, 1999.
- MARENGO, J. A.; OLIVEIRA, G.S. de. Impactos do fenômeno La Niña no tempo e clima do Brasil: desenvolvimento e intensificação do La Niña 1998/1999. *In: Congresso brasileiro de meteorologia*. 1998.
- MARTINELLI, L. A.; OMETTO, J. P. H. B.; FERRAZ, E. S.; VICTORIA, R. L.; CAMARGO, P. B. de; MOREIRA, M. Z. Desvendando Questões Ambientais com Isótopos Estáveis. **São Paulo: Oficina de Textos**, 2009. v. 01. 144p.
- MARTINS, A. C. **Fatores climáticos e sistemas meteorológicos que atuam sobre o Brasil-uma revisão bibliográfica**. 2022. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Meteorologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- MECHOSO, C. ROBERTO *et al.* The American monsoon systems. *In: Proceeding of the 3rd international workshop on monsoons*. Hangzhou, China, November. 2004. p. 2-6.
- MELO, A. B. C. de; CAVALCANTI, I. F. de A.; SOUZA, P. P. de. Zona de convergência intertropical do Atlântico. **Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina de textos**, p. 25-41, 2009.
- MENDONÇA, F. A.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. Climatologia: Noções básicas e climas do Brasil. **São Paulo: Oficina de Textos**, 2007. 208 p.
- MOERMAN, J. W. *et al.* Diurnal to interannual rainfall $\delta^{18}\text{O}$ variations in northern Borneo driven by regional hydrology. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 369, p. 108-119, 2013.
- MONTEIRO, C. A. de F. Da necessidade de um caráter genético à classificação climática (Algumas considerações metodológicas a propósito do estudo do Brasil Meridional). **Revista Geográfica**, Rio de Janeiro, v. 31, n. 57, p. 29-44, 1962.
- MONTEIRO, M. A. **Climatologia para aviação**. 2022.
- MONTEIRO, M. A. **Dinâmica atmosférica e a caracterização dos tipos de tempo na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá**. 2007. 224 p. Tese (Doutorado em Geografia) - Departamento de Geografia. Centro de Ciências Humanas e da Educação. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Physical Sciences Laboratory. **Composites**. Disponível em: <https://psl.noaa.gov/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- NEVES, G. das. **Modelos espaciais isotópicos de carbono no solo em diferentes escalas do Brasil**. 2021. 109 p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Faculdade UnB Planaltina, Universidade de Brasília, Planaltina, 2021.
- NIMER, E. *Climatologia do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 1979, 422 p.
- NIMER, E. *Climatologia do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 1989, 2. ed., 427 p.
- NOGUÉS-PAEGLE J. et al. Progress in Pan American CLIVAR Research: Understanding the South American Monsoon, **Meteorologica**. 1 and 2. 3-32, 2002.
- NOGUÉS-PAEGLE, J., MO, K., C. Alternating Wet and Dry Conditions over South America During Summer. **Monthly Weather Review**, v. 125, p. 279-291, 1997.
- Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**, Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Organizadores: Andrea Malheiros Ramos, Luiz André Rodrigues dos Santos, Lauro Tadeu Guimarães Fortes. INMET, Brasília/DF, Brasil, 2009.
- Normais Climatológicas do Brasil 1981-2010**, Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Organizadores: Francisco de Assis Diniz, Expedito Ronald Gomes Rebello e Andrea Malheiros Ramos. INMET, Brasília/DF, Brasil, 2018.
- OLIVEIRA, G.S. de. O El Niño e você: o fenômeno climático. **São José dos Campos: Transtec**, 1999.
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and earth system sciences**, v. 11, n. 5, p. 1633-1644, 2007.
- PEREIRA, R. C. G.; PAZ, R. L. F.; AMORIM, A. O. Estação chuvosa 2008-2009 do estado de Goiás: Análise e relação com o fenômeno “La Niña”. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 101, 2009, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...** Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <<https://www.sbagro.org/files/biblioteca/2233.pdf>>. Acesso em 14 jul. 2024.
- PETRUCCI, E. **Análise espacial da precipitação pluvial e eventos extremos secos na bacia hidrográfica do rio São Francisco-Brasil, série histórica de 1985 a 2018**. 2022. 271 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.
- PETTERSEN, S. **Weather analysis and forecasting**. McGraw-Hill, 1956.
- QUADRO, M. F. L. de. **Estudo de vórtices ciclônicos de mesoescala associados à zona de convergência do Atlântico Sul**. 2012. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- REBOITA, M. S. *et al.* Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 25, p. 185-204, 2010.
- RIBEIRO, A. G. As escalas do clima. **Boletim de Geografia Teórica**, v. 23, n. 45-46, p. 288-294, 1993.

- ROMERO, V.; MARCUZZO, F. F. N. Influência do El Niño e La Niña no número de dias de precipitação pluviométrica do Estado de Goiás. **Revista Acta Geográfica**, Boa Vista, v. 7, n. 14, p. 93-106, jan./abr. 2013.
- ROZANSKI, K.; ARAGUÁS ARAGUÁS, L.; GONFIANTINI, R. Isotopic patterns in modern global precipitation. **Climate change in continental isotopic records**, v. 78, p. 1-36, 1993.
- ROZANSKI, Kazimierz; ARAGUÁS ARAGUÁS, Luís. Spatial and temporal variability of stable isotope composition of precipitation over the South American continent. **Bulletin de l'Institut Français d'études Andines**, v. 24, n. 3, p. 379-390, 1995.
- SAHA, Suranjana *et al.* The NCEP climate forecast system reanalysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, n. 8, p. 1015-1058, 2010.
- SÁNCHEZ-MURILLO, R. *et al.* Key drivers controlling stable isotope variations in daily precipitation of Costa Rica: Caribbean Sea versus Eastern Pacific Ocean moisture sources. **Quaternary Science Reviews**, v. 131, p. 250-261, 2016.
- SANT'ANNA NETO, João Lima; ZAVATINI, João Afonso. **Variabilidade e mudanças climáticas: implicações ambientais e socioeconômicas**. Eduem, 2000.
- SANTOS, N. B. F. dos. **Distribuições espaciais e temporais de temperaturas de superfície no bioma cerrado: Uma análise integrada a partir de dados orbitais de resolução moderada**. 2010. p. 102. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.
- SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; SILVA DIAS, P. L. Tropics-South America. Chapter in *Meteorology of the Southern Hemisphere*. **Meteorological Monograph–American Meteorology Society**, v. 27, n. 1, p. 201-225, 1998.
- SELUCHI, M. E. *et al.* The northwestern Argentinean low: A study of two typical events. **Monthly Weather Review**, v. 131, n. 10, p. 2361-2378, 2003.
- SELUCHI, M. E.; SAULO, A. C. Baixa do Noroeste Argentino e Baixa do Chaco: características, diferenças e semelhanças. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, p. 49-60, 2012.
- SELUCHI, M. E.; SAULO, A. C. Mecanismos físicos associados à formação da Baixa do Chaco. *In: Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belém*. 2010.
- SERRA, A. B. **As massas de ar da América do Sul**. 1942.
- SERRA, A. e RATABONNA, L. **As massas de ar na América do Sul**. Rio de Janeiro. Ministério da Agricultura, 1942, 57 p.
- SILVA, J. W. F.; SANTOS, R. L. Estimativa da temperatura da superfície do solo de uma região semi-árida a partir do IRMSS (banda 4) do CBERS-2. **Anais do**, v. 13, p. 1159-1166, 2007.
- SIQUEIRA, A. H. B. **Variabilidade do clima da América do Sul e sua relação com os índices oceânicos e atmosféricos**. 2012. 79 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2012.
- SODERBERG, K. *et al.* Using atmospheric trajectories to model the isotopic composition of rainfall in central Kenya. **Ecosphere**, v. 4, n. 3, p. 1–18, 2013.

- SRIVASTAVA, R.; RAMESH, R.; RAO, T. N. Relationship between stable isotope ratios and drop size distribution in tropical rainfall. **Journal of Atmospheric Chemistry**, v. 69, p. 23-31, 2012.
- TORRES, F. T. P.; MACHADO, P. J. O. **Introdução à Climatologia**. 2008.
- TORRES, F.T. P.; MACHADO, P. J. O. **Introdução à Climatologia**. São Paulo: Cengage Learning. 2011. 255 p.
- UVO, C. B. **A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro**. 1989. 99 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1989.
- VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. INMET, 2001.
- VERA, C. *et al.* A unified view of the American Monsoon Systems. **J. Climate**, 2005.
- VERA, C. *et al.* The South American low-level jet experiment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 87, n. 1, p. 63-78, 2006.
- VIANNA, E. O. **O campo térmico urbano: ilhas de calor em Brasília - DF**. 2018. 296 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.
- VILAR, R. de A. A. **Condições de tempo severo e formação de tornados em Brasília-DF: um estudo de caso**. 2016. 98 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- VUILLE, Mathias *et al.* Modeling $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the tropical Americas: 1. Interannual variability and climatic controls. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 108, n. D6, 2003. Disponível em: <<http://www.atmos.albany.edu/facstaff/mathias/pubs/pubs.html>>. Acesso em: 02 mai. 2023.
- VUILLE, Michael; WERNER, Martin. Stable isotopes in precipitation recording South American summer monsoon and ENSO variability: observations and model results. **Climate Dynamics**, v. 25, p. 401-413, 2005.
- WINNICK, M. J. *et al.* Quantifying the isotopic ‘continental effect’. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 406, p. 123-133, 2014.
- ZHOU, Jiayu; LAU, K. M. Does a monsoon climate exist over South America?. **Journal of climate**, v. 11, n. 5, p. 1020-1040, 1998.
- ZHOU, Jiayu; LAU, K.-M. Principal modes of interannual and decadal variability of summer rainfall over South America. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 21, n. 13, p. 1623-1644, 2001.

7. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

Bacias do DF. Adasa, 2016. Disponível em: <<http://cobranca-rh-df.adasa.df.gov.br/page7.html>>. Acesso em: 27 dez. 2022.

BARCELLOS, Deise Rodrigues; DE QUADRO, Mário Francisco Leal. Classificação de eventos extremos de precipitação quanto sua intensidade, persistência e abrangência na região das ZCAS. **Metodologias e Aprendizado**, v. 2, p. 76-81, 2019.

BARRY, Roger G.; CHORLEY, **Richard J.** **Atmosfera, tempo e clima.** São Paulo: Bookman, 2009. E-book. ISBN 9788565837392. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788565837392>. Acesso em: 8 de mai. 2023.

CAMARGO, Caroline Holstein de. **Análise do conteúdo de oxigênio hidrogênio ($\delta^{18}\text{O}$, δD) na precipitação sobre a Bacia Amazônica de 2013 a 2017.** 2019.

CELLE-JEANTON, H.; GONFIANTINI, R.; TRAVI, Y.; SOL, B. 2004. Oxigen-18 variations of rainwater during precipitation: application of the Rayleigh model to selected rainfalls in southern France. **Journal of Hydrology**. 289, 165-177.

CHEN, Baode; LIN, Xin; BACMEISTER, Julio T. Frequency distribution of daily ITCZ patterns over the western–central Pacific. **Journal of Climate**, v. 21, n. 17, p. 4207 - 4222, 2008.

CHIANG, John CH; KUSHNIR, Yochanan; GIANNINI, Alessandra. Deconstructing Atlantic Intertropical Convergence Zone variability: Influence of the local cross-equatorial sea surface temperature gradient and remote forcing from the eastern equatorial Pacific. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 107, n. D1, p. ACL 3-1-ACL 3-19, 2002.

Climatempo. Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/noticia/2017/02/27/chuva-supera-a-media-em-brasil-e-em-cuiaba-9060>>. Acesso em: 30 jan. 2024.

CORREIO, L. V.-E. P. **Chuva volta a cair no Distrito Federal a partir desta segunda-feira.** Disponível em: <https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/cidades/2018/02/19/interna_cidades_df,660615/chuva-volta-a-cair-no-distrito-federal-a-partir-desta-segunda-feira.shtml>. Acesso em: 30 jan. 2024a.

CORREIO, L. V.-E. P. **Volume de chuvas em fevereiro supera expectativas antes do fim do mês.** Disponível em: <https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/cidades/2018/02/27/interna_cidades_df,662467/fevereiro-um-dos-meses-mais-chuvosos-do-df.shtml>. Acesso em: 30 jan. 2024b.

COSTA, Milla Nóbrega de Menezes *et al.* **Episódio de tempo severo em Brasília-DF: importância de fatores locais no desenvolvimento de convecção profunda.** 2014.

DAWSON, Todd E.; BROOKS, Paul D. **Fundamentals of stable isotope chemistry and measurement. Stable isotope techniques in the study of biological processes and functioning of ecosystems**, p. 1-18, 2001.

DIAS, M. A. F. S.; SILVA, M. G. A. J. Para entender Tempo e Clima. In: CAVALCANTI, I. F. A. et al. (orgs). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009, p. 15- 22.

DOS SANTOS, Vinícius et al. Isotopic composition of precipitation during strong El Niño–Southern Oscillation events in the Southeast Region of Brazil. **Hydrological Processes**, v. 33, n. 4, p. 647-660, 2019.

DOS SANTOS, Vinícius et al. Regional atmospheric dynamics govern interannual and seasonal stable isotope composition in southeastern Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 579, p. 124-136, 2019.

GARCIA, Sâmia Regina. **Variabilidade do sistema de monção da América do Sul: relações com a oscilação decadal do Pacífico**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2006.

Governo do Distrito Federal. **Brasília é terra de clima**. Disponível em: <<https://www.df.gov.br/333/#:~:text=Bras%C3%ADlia%20%C3%A9%20terra%20de%20clima>>. Acesso em: 23 dez. 2022.

GUSMÃO, Ana Maria. Alta da Bolívia. **Revista climanálise**. Cachoeira paulista, ed. Especial, p. 143-146, 1996.

Infoclima. Disponível em: <http://infoclima.cptec.inpe.br/~rinfo/infoclima/nov_2017.shtml>. Acesso em: 30 jan. 2024.

Jardim Botânico de Brasília. **Fauna Cerrado**. Disponível em: <<https://www.jardimbotanico.df.gov.br/educacao-ambiental/fauna-cerrado/>>. Acesso em: 27 dez. 2022.

Levantamento sobre o comportamento da chuva, temperatura e umidade, em Brasília-DF para abril de 2017. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Levantamento_comportamento_ABR_Brasilia-2017_1.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2024.

Levantamento sobre o comportamento da chuva, temperatura e umidade, em Brasília-DF para maio de 2017. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Levantamento_comportamento_MAI_Brasilia-2017_1.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2024.

LIMA, Leonardo Mendonça de. **Atualização de informações bioclimáticas para Brasília**. 2019.

LOUZADA, C. de O. IMPACTO DOS EVENTOS ENOS (EL NIÑO E LA NIÑA) NA AGRICULTURA FAMILIAR NO ESTADO DO AMAZONAS. **Formação (Online)**, [S. l.], v. 26, n. 49, 2019. DOI: 10.33081/formacao.v26i49.5939. Disponível em: <https://revista.fct.unesp.br/index.php/formacao/article/view/5939>. Acesso em: 14 jul. 2024.

MARQUES, Jenyffer Alfonso. **Índice de participação das massas de ar no estado de Goiás e Distrito Federal**. 2020.

MENEZES, L. S. *et al.* **Mudanças climáticas no DF e RIDE: detecção e projeções das mudanças climáticas para o Distrito Federal e região integrada de desenvolvimento do DF e entorno**. 2016.

- Meteorologia prevê mais chuvas para o Distrito Federal.** Disponível em: <<https://agenciabrasil.etc.com.br/radioagencia-nacional/geral/audio/2017-02/meteorologia-preve-mais-chuvas-para-o-distrito-federal?download&filename=>>>. Acesso em: 30 jan. 2024.
- MONTEIRO, C. A. de F. Sobre a análise geográfica de sequências de cartas de tempo: pequeno ensaio metodológico sobre o estudo do clima no escopo da Geografia. **Revista Geográfica**, v. 32, n. 58, p. 169-179, 1963.
- NUNES, A. B. **Estudo de caso de sistemas meteorológicos em altos níveis sobre a América do Sul: Análise Sinótica.** Anuário do Instituto de Geociências–UFRJ [Online], v. 40, 2017.
- PEREIRA, Alexandre Leandro; BENEDITO, Evanilde. Isótopos estáveis em estudos ecológicos: métodos, aplicações e perspectivas. **Revista Biociências**, v. 13, 2007.
- QUADRO, Mario Francisco Leal; PEZZI, Luciano Ponzi; ROSA, Eliana Bertol. O Climanálise e o monitoramento da ZCAS nos últimos 30 anos. **Revista Climanálise: edição comemorativa**, v. 30, p. 19-25, 2016.
- SALINI, Micheline Finatto. **A influência do fenômeno El Niño Oscilação Sul–ENOS (La Niña e El Niño) na ocorrência de inundações no Vale do Taquari–RS.** 2012.
- SANTORO, Fernando Paulin. **Análise de variabilidade da Zona de Convergência Intertropical através de dados de satélites.** 2022.
- SANTOS, Vinícius dos. **Variações na composição isotópica da precipitação na porção central do Estado de São Paulo e sua relação com sistemas climáticos.** 2018.
- SENGUPTA, Saikat; SARKAR, A. Stable isotope evidence of dual (Arabian Sea and Bay of Bengal) vapour sources in monsoonal precipitation over north India. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 250, n. 3-4, p. 511-521, 2006.
- SETTE, Denise Maria. Os climas do cerrado do Centro-Oeste. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, 2005.
- SOUZA, Ingrid Monteiro Peixoto de. **Identificação de eventos de chuvas extremas em Brasília-DF: estudo de caso na área urbana da Bacia do Lago Paranoá.** 2020.
- VALVERDE, María C.; MARENGO, José A. Mudanças na circulação atmosférica sobre a América do Sul para cenários futuros de clima projetados pelos modelos globais do IPCC AR4. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 125-145, 2010.