

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO DE ASTRONOMIA,
GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

CAROLINE SANTOS SEGURA

**TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS DE FRENTES FRIAS,
PRECIPITAÇÃO E PRECIPITAÇÃO EXTREMA NA REGIÃO
METROPOLITANA DE SÃO PAULO**

SÃO PAULO
2021
CAROLINE SANTOS SEGURA

TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS DE FRENTES FRIAS, PRECIPITAÇÃO E PRECIPITAÇÃO EXTREMA NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Meteorologia da Universidade de São Paulo, como requisito necessário à obtenção do título de Bacharel em Meteorologia.

Orientadora: Prof. Dra. Rosmeri Porfírio da Rocha

**SÃO PAULO
2021**

AGRADECIMENTOS

Aos professores do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, que contribuíram para a minha formação, em especial a minha orientadora, Dra. Rosmeri Porfírio da Rocha, pela orientação, aprendizado e amizade.

Aos meus pais, Ricardo Segura e Claudia Santos Segura, por todo o apoio, amor incondicional, incentivo e por sempre priorizarem a minha educação. Esse sonho não seria possível sem vocês.

Ao meu companheiro e amor da minha vida, Victor Luiz, pelo grande esforço e trabalho para tornar os meus anos de graduação mais confortáveis, pelo companheirismo nos melhores e piores momentos desta vida.

ABSTRACT

This work aims to analyze the existence of increasing or decreasing trends in the passage of cold fronts and precipitation (average and extreme) in the metropolitan region of São Paulo. Extreme precipitation events were identified using the 95th percentile of daily precipitation (in mm) for each month, considering only days with precipitation above 0 mm. In the period 1933-2017, this criterion resulted in 804 extreme precipitation events, providing an annual average of approximately 9 events. The identification of cold fronts was done using average daily data of temperature and meridional wind. The objective criteria for identifying fronts is based on the wind turn from the north to the south quadrant and its permanence in the south quadrant for at least 24 h after the turn and temperature drops simultaneously with the wind turn or in next 48 h. The fronts were identified in the observations of the IAG station (1960-2010) and in the centenary reanalysis of the ERA-20C (1900-2010). An annual average of 39.2 and 34.2 cold fronts were identified, respectively, in the IAG station and ERA-20C. In both datasets, the fronts are more frequent in winter-spring. Monotonic trends were identified in the time series of occurrence of cold fronts, extreme precipitation and total precipitation. However, the magnitude of trends in the occurrence of cold fronts and precipitation extremes is very small. In the period 1960 to 2017, the contribution of cold fronts to the precipitation extremes is great, since 58% of these events occurred between two days before and two days after the fronts, with the highest contribution for one day before the fronts. For the average daily precipitation, the greatest amount of precipitation was also registered one day before the cold fronts.

Keywords: climatology, cold front, precipitation, extreme precipitation

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de analisar a existência de tendências de aumento ou diminuição de passagens de frentes frias e precipitação (média e extrema) associada pela região metropolitana de São Paulo. Os extremos de precipitação foram identificados usando o percentil 95 da precipitação diária (em mm) de cada mês, considerando-se apenas os dias com precipitação acima de 0 mm. No período 1933-2017, este critério resultou em 804 eventos extremos de precipitação, fornecendo média anual de aproximadamente 9 eventos. A identificação de frentes frias foi feita através de dados diários médios de temperatura e componente meridional do vento. O critério objetivo de identificação de frentes considera o giro do vento do quadrante norte para o quadrante sul e sua permanência no quadrante sul por pelo menos 24 h após o giro e queda de temperatura simultânea ao giro do vento ou em até 48 h após. As frentes foram identificadas nas observações da estação do IAG (1960-2010) e na reanálise centenária da ERA-20C (1900-2010). Foram identificadas uma média anual de 39.2 e 34.2 de frentes frias, respectivamente, na estação do IAG e ERA-20C. Em ambos os conjuntos de dados as frentes são mais frequentes no inverno-primavera. Foram identificadas tendências monotônicas nas séries temporais de ocorrência de frentes frias, precipitação extrema e precipitação total. No entanto, a magnitude das tendências de ocorrência de frentes frias e de extremos de precipitação é muito pequena. No período 1960 a 2017, se destaca a grande contribuição das frentes frias para ocorrência de extremos de precipitação, desde que 58% destes eventos ocorreram entre dois dias antes e dois dias após as frentes, sendo a maior contribuição registrada um dia antes da passagem frontal. A precipitação média diária também mostra que o maior volume de precipitação ocorre um dia antes das frentes frias.

Palavras- Chave: climatologia, frente fria, precipitação, precipitação extrema

LISTA DE ABREVIACOES

IAG Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

RMSP Região Metropolitana de São Paulo

ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

ASAS Alta Subtropical do Atlântico Sul

ASPS Alta Subtropical do Pacífico Sul

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS	9
2.1 Objetivo Geral	9
2.2 Objetivos específicos	9
3. JUSTIFICATIVA	9
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
4.1 Características gerais de um sistema frontal:	10
4.2 Sistemas Frontais na América do sul	10
4.3 Sistemas Frontais na cidade de São Paulo	11
4.4 Eventos extremos de precipitação	12
5. METODOLOGIA	13
5.1 ÁREA DE ESTUDO	13
5.2 PERÍODO DE ESTUDO E DADOS	14
5.3 CRITÉRIOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE FRENTES FRIAS	14
5.4 Análise de tendências de séries temporais	16
5.4.1 Teste de hipótese para existência de tendência monotônica	16
5.4.2 Análise da magnitude da tendência	17
5.4.3 Detecção do ponto de mudança: O teste de Pettitt	18
6. RESULTADOS	19
6.1 Climatologia de passagens frentes frias: estação meteorológica do IAG-USP	19
6.2 Climatologia de frentes frias: reanálise da ERA-20C	23
6.3 Climatologia de precipitação	25
6.4 Climatologia do número de eventos de precipitação extrema diária	28
6.4 Frentes frias e extremos de precipitação	31
6.5 Análise de tendências nas séries temporais	33
6.5.1 Tendência na frequência de frentes frias	33
6.5.2 Tendência de precipitação	33
6.5.3 Tendência de número de eventos de precipitação extrema	34

7. COMPARAÇÃO ENTRE A CLIMATOLOGIA DE FRENTES FRIAS: ESTAÇÃO DO IAG E REANÁLISE DA ERA-20C (1960-2010)	34
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
9. REFERÊNCIAS	39

1. INTRODUÇÃO

A região metropolitana de São Paulo (RMSP) é caracterizada por alta densidade populacional e o tempo nessa região é diretamente influenciado pela passagem de sistemas frontais que ocorrem durante todo o ano (DAMETTO; ROCHA, 2005). A grande influência dos sistemas frontais no tempo da RMSP ocorre porque a porção sul-sudeste da América do Sul é um local ciclogênico, pois está localizada entre dois centros semi-permanentes de alta pressão (alta subtropical do Pacífico Sul e alta subtropical do Atlântico Sul), sendo assim, é uma região onde ocorrem gradientes horizontais de temperatura, umidade e vorticidade (PAMPUCH ; AMBRIZZI, 2015). A frequência de frentes frias na região da América do Sul é geralmente maior no inverno e na primavera e é menor durante o período entre janeiro e fevereiro (PAMPUCH ; AMBRIZZI, 2015). Durante o período de inverno a passagem de frentes frias pela região pode causar geadas e friagens (CAVALCANTI; KOUSKY, 2009).

No verão as frentes frias podem interagir com ar úmido e quente, com características tropicais, e podem produzir convecção profunda na RMSP. Tais eventos de convecção profunda geram precipitação intensa e acabam muitas vezes por causar prejuízos sociais e econômicos (CAVALCANTI; KOUSKY, 2009). Alguns eventos de convecção profunda que geram precipitação intensa são denominados de eventos extremos de precipitação. Um evento extremo de precipitação é definido quando para uma dada região, dentro de um determinado período, que pode ser acumulados diários (embora seja possível também analisar extremos de precipitação ocorridos em escala de tempo maior - como acumulados de três a cinco dias, mensal, anual - ou menor como horária, por exemplo) que ultrapassem um dado percentual da média climatológica ou algum outro limiar de precipitação (LIEBMANN; JONES; CARVALHO, 2001). A ocorrência de eventos extremos de precipitação geralmente está associada a deslizamentos de terra e inundações na RMSP (BROLLO; FERREIRA,2009).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar tendências climáticas de longo período de frentes frias, precipitação e precipitação extrema na região metropolitana de São Paulo.

2.2 Objetivos específicos

Identificar a frequência anual de frentes frias aplicando critérios objetivos baseados na metodologia similar às de Rodrigues (2004), Jesus (2014), Pampuch e Ambrizzi (2015) e também por Cavalcanti e Kousky (2003).

Identificar a frequência de eventos extremos diários de precipitação utilizando um critério baseado na metodologia de Sugahara, da Rocha e Silveira (2009).

Verificar a existência de tendências monotônicas de aumento ou diminuição de frequência de frentes frias, precipitação e precipitação extrema para a RMSP.

Construir climatologias anuais e sazonais de ocorrência de eventos extremos de precipitação e passagens de frentes frias na RMSP.

3. JUSTIFICATIVA

Estudar tendências climáticas de longo período de frentes frias e precipitação extrema na RMSP é de suma importância para previsões de possíveis problemas relacionados aos extremos de precipitação que frequentemente resultam em inundações, causando grandes prejuízos econômicos e sociais.

Diante de um cenário de mudanças climáticas é extremamente importante estudar a possibilidade de existir tendências de aumento ou diminuição de passagens de frentes frias pela região, pois estas exercem forte influência nas condições de tempo. Também é importante avaliar se existe tendência de aumento na ocorrência de eventos de precipitação extrema, já que estes estão correlacionados a prejuízos econômicos, sociais e frequentemente ocasionam mortes na RMSP.

Este trabalho propõe estudar tendências de aumento ou diminuição de passagens de frentes frias, eventos de precipitação extrema e precipitação total anual na região metropolitana de São Paulo e também busca estudar a contribuição das frentes frias para os eventos extremos de precipitação. A metodologia empregada para o estudo de tendências é similar à utilizada por Marengo et al. (2020) e Silva Dias et al. (2013).

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Características gerais de um sistema frontal:

Os sistemas frontais estão associados a ciclones extratropicais, os quais são importantes componentes da circulação geral da atmosfera e modulam o tempo e o clima em diversas regiões do planeta. O modelo conceitual do desenvolvimento desses sistemas foi descrito inicialmente por Bjerknes e Solberg (1922). De acordo com essa descrição, um ciclone extratropical possui duas massas de ar que tiveram origem em regiões com características distintas entre si, desta forma em um sistema frontal existe uma região de forte gradiente de propriedades, como temperatura e umidade. Também existe uma região que é definida como o limite entre essas duas massas de ar, zona frontal. Podemos afirmar que uma frente fria é a região definida pelo encontro entre uma massa de ar quente e outra fria, ambas com características homogêneas, que delimitam a zona frontal (WALLACE ; HOBBS, 2006).

4.2 Sistemas Frontais na América do sul

O tempo na América do sul é afetado pela passagem de sistemas frontais durante todo o ano, fato que ocorre porque a América do sul está localizada entre dois centros semi-permanentes de alta pressão, isto é, a alta subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e a alta subtropical do Pacífico Sul (ASPS). Assim é uma região onde há gradientes horizontais de temperatura, umidade, vortacidade e onde a pressão relativa é mais baixa, já que está localizada entre dois centros de alta pressão. Com tais condições, algumas regiões específicas da América do Sul apresentam características muito favoráveis para o desenvolvimento de sistemas frontais, entre elas está a costa sudeste da Argentina, aproximadamente entre

50°S-45°S, e a costa leste do Uruguai, entre 38°S-32°S (JESUS, 2014). Assim, a frequência de frentes frias nas porções ciclogênicas da América do Sul é alta se comparada a frequência de sistemas na parte norte do continente, isto é, a frequência anual de frentes aumenta em direção ao sul do continente (PAMPUCH; AMBRIZZI, 2015). Estudo de Pampuch e Ambrizzi (2015) utilizando dados de reanálise mostraram que a região norte-central da Argentina apresenta entre 50 e 45 passagens de frentes frias durante o ano; sobre o Brasil a região sul apresenta entre 50 e 45 e a região sudeste entre 30 e 25 sistemas durante o ano. Neste estudo, as frentes frias foram identificadas a partir de um critério objetivo, o qual depende de três fatores: diminuição de temperatura no nível de 925 hPa; giro do componente meridional do vento (em 925 hPa) do quadrante norte para o quadrante sul e aumento da pressão ao nível médio do mar (PAMPUCH ; AMBRIZZI, 2015). A climatologia de Cavalcanti e Kousky (2003) de sistemas frontais na América do Sul mostra que a quantidade de frentes frias é maior durante o inverno e começo da primavera, entre junho e outubro, e é menor entre janeiro e fevereiro . A América do sul apresenta duas trajetórias mais comuns para sistemas frontais, uma no interior, localizada entre o norte da Argentina, com sentido norte, até a região ao oeste da Amazônia, enquanto a outra trajetória situa-se ao longo da costa leste do Brasil (CAVALCANTI; KOUSKY, 2003).

As frentes frias são sistemas importantes para a precipitação local, por isso afetam o tempo durante todo o ano, especialmente nas regiões sul e sudeste da América do Sul, como discutido por Reboita et al (2015).

4.3 Sistemas Frontais na cidade de São Paulo

As frentes frias que atingem a cidade de São Paulo atuam durante todo o ano e interferem bastante nas condições de tempo da região. As frentes são um importante mecanismo na remoção de poluentes, são responsáveis por quedas intensas de temperatura, especialmente durante o inverno, e tanto no inverno quanto no verão, são sistemas importantes para o regime de precipitação local (DAMETTO; ROCHA, 2005; JESUS, 2014). Na cidade de São Paulo alguns padrões foram observados (DAMETTO; ROCHA, 2005) durante a passagem de frentes frias:

- A temperatura do ar sofre um aumento um dia antes e tende a diminuir um dia depois da passagem da frente fria;

- O vento médio dois dias antes da passagem da frente é de noroeste, no dia da passagem da frente e nas próximas 48 horas é de sudeste;
- Durante o inverno as frentes frias contribuem com cerca de 59% da precipitação total, enquanto no verão as frentes contribuem com cerca de 41% da precipitação total;
- No inverno ocorre a maior frequência de passagens de frentes frias, sendo o intervalo médio de nove dias entre a passagem de um sistema e outro. No verão a frequência das frentes frias diminui e o intervalo médio de passagem entre um sistema e outro é de onze dias.

4.4 Eventos extremos de precipitação

Eventos extremos de precipitação são fenômenos bastante controversos. Muitas vezes estes eventos causam prejuízos irreparáveis como perda de vidas por afogamentos devido a inundações em áreas urbanas e também costumam afetar negativamente a agricultura. Especialmente no Estado de São Paulo, Brollo e Ferreira (2009) mostraram que as principais causas de desastres naturais envolvem enchentes e deslizamentos, ou seja, a maioria dos desastres naturais envolve precipitação intensa. Apenas entre o período de 2000 a 2008, foram registrados 367 casos de deslizamento e 944 casos de enchentes (BROLLO; FERREIRA, 2009). Por outro lado, eventos de precipitação extrema podem ser fundamentais para mudar a situação de reservatórios de água em períodos de seca.

O quinto relatório (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) identificou que existe uma tendência de aumento de eventos de precipitação extrema em escala global (FIELD et al, 2012). O mesmo relatório ainda mostrou tendência de aumento de eventos extremos de precipitação (incluindo não apenas chuva, mas também neve) em regiões nas quais há tendência de diminuição da precipitação total. Um evento de precipitação extrema pode ser definido quando a precipitação que ocorre em um dia ultrapassa um dado percentual da média climatológica para a região em questão. Na cidade de São Paulo, a grande maioria desses eventos acontece no período de outubro a março (LIEBMANN; JONES; CARVALHO, 2001). Eventos de precipitação extrema também podem ser definidos a partir dos percentis, geralmente são usados os percentis 90, 95 e 98 (SUGAHARA; ROCHA; SILVEIRA, 2009). O quinto relatório do IPCC usou ambas as definições de eventos extremos de precipitação para que a diversidade do ciclo de precipitação global fosse bem compreendida, pois o limiar para que um evento de precipitação seja considerado extremo

depende dos totais climatológicos da região e também da época do ano. Assim, em uma localidade específica, o limiar para precipitação extrema durante o verão não é o mesmo durante o inverno, devido a sazonalidade de precipitação para cada região (FIELD et al, 2012).

O método de identificação de extremos baseado nos percentis foi utilizado por Sugahara da Rocha e Silveira (2009), no qual para a estação do IAG-USP foi usado o percentil 99 nos dados de precipitação diária do período 1933-2005, onde nota-se aumento tanto na frequência como na intensidade de eventos extremos de chuva. Silva Dias et al. (2013) discutiram a expectativa de mudanças no padrão de precipitação na RMSP devido tanto à rápida e crescente urbanização e ao aumento da concentração de poluentes; estes autores analisaram também a frequência de extremos de precipitação utilizando os percentis de 80, 95 e 99, mostrando tendências de aumento na frequência dos extremos considerando os três percentis. Análise similar para a mesma região foi conduzida por Marengo et al. (2020) que concluíram que o aumento observado no total anual da chuva seria principalmente um resultado do aumento na frequência de eventos extremos de precipitação.

5. METODOLOGIA

5.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está inserida na RMSP, a qual também é conhecida como região da Grande São Paulo. É uma região de altíssima densidade populacional, sendo uma das dez regiões metropolitanas mais populosas do mundo, além de também ser de extrema importância para a economia nacional. A região é composta por 39 municípios, os quais juntos abrigam aproximadamente 21,6 milhões de habitantes, de acordo com a estimativa do IBGE realizada no ano de 2018. A região metropolitana de São Paulo tem condições de tempo fortemente influenciado pela topografia, pois está inserida na região sudeste do Brasil, a qual é uma região de topografia bastante acidentada, o que acaba favorecendo precipitação orográfica (NIMER, 1989); e também pela proximidade do oceano, com a atuação do sistema de brisa marítima (PEREZ; SILVA DIAS, 2017), e também pela atuação de sistemas frontais (DAMETTO; DA ROCHA 2005; JESUS, 2014).

5.2 PERÍODO DE ESTUDO E DADOS

Neste trabalho serão analisados dados de temperatura e velocidade do vento do período de tempo entre os anos de 1960 a 2017 da Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas localizado no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (PEFI), bairro da Água Funda, na região metropolitana de São Paulo. Embora a série da EM/IAG se inicie em fins de 1932, a mudança de instrumentos em 1958 resultou em uma forte alteração da velocidade do vento, como mostrado por Pereira, Santos e Xavier (2007). Portanto, optou-se por identificar as frentes frias apenas a partir de 1960.

Para a construção da climatologia de precipitação extrema foram utilizados dados de precipitação horária e duração de chuva compreendidos entre os anos 1933 e 2017 da estação do IAG-USP.

Também foram utilizados dados de reanálise de médias diárias da centenária ERA-20C do ECMWF referentes ao período 1900-2010 de temperatura do ar e velocidade meridional do vento, foi escolhido o ponto de latitude e longitude mais próximos da localização exata da estação meteorológica do IAG ($23^{\circ}39'7''\text{S}$ e $46^{\circ}37'22''\text{W}$), a resolução espacial dos dados de reanálise da ERA-20C é de 1° . Assim, o ponto de latitude e longitude mais próximas possíveis é o ponto 23°S e 46°W .

A ERA-20C é um conjunto de dados de reanálise desenvolvido pelo ECMWF que assimila dados observacionais de pressão atmosférica e vento de superfície, a ERA-20C é o primeiro conjunto de dados de reanálise que foi desenvolvida especialmente levando-se em consideração aplicações em climatologia (POLI et al, 2016).

5.3 CRITÉRIOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE FRENTES FRIAS

Serão utilizados dados de média diária de componente meridional do vento, temperatura média diária e precipitação acumulada diária.

Também serão utilizados dados de reanálise da denominada ERA-20C (desenvolvida pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) para o ponto de latitude e longitude mais próximos da localização da estação meteorológica do IAG-USP, a qual compreende o período entre 1900 e 2010, para comparação de resultados.

A metodologia empregada neste trabalho foi dividida em três etapas, uma consistiu na implementação de um algoritmo para identificação de frentes frias usando critérios objetivos, como a ocorrência simultânea de:

- Giro da componente meridional do vento do quadrante norte para o quadrante sul e sua permanência no quadrante sul por pelo menos 24h após o giro.

- Queda de temperatura simultânea ao giro do vento ou em até 48h.

Este método objetivo de identificação de frentes frias foi também utilizado por Jesus (2014), Rodrigues et al (2004), Dametto e Da Rocha (2005) e é semelhante ao método utilizado por Pampuch e Ambrizzi (2015).

Após a implementação do algoritmo foi realizada uma climatologia anual e mensal da passagem de frentes frias para a região estudada.

O algoritmo foi escrito na linguagem de programação *python*, especificamente utilizando-se a biblioteca *Pandas*, a qual é amplamente utilizada para análises em ciência de dados.

A segunda etapa consistiu no estudo e na climatologia dos dados de precipitação, onde foram identificados eventos de precipitação extrema. O primeiro passo para identificação dos eventos extremos foi calcular o percentil 95 (o cálculo foi feito utilizando-se da biblioteca *Pandas*, em linguagem de programação *python*) para os dados de precipitação diária para cada mês. O percentil 95 para cada mês é calculado considerando-se apenas os dias com precipitação maior do que zero. Este método é semelhante ao usado por Sugahara, da Rocha e Silveira (2009), onde os autores estudam extremos de precipitação baseados nos percentis 90, 95 e 98.

Tabela 1- Valores do percentil 95 da precipitação diária (em mm), para cada mês do ano, com base nos dados da EM/IAG no período 1933-2017.

Mês	Percentil 95 (mm)
Janeiro	41,4
fevereiro	44,1
Março	36,14
Abril	26,63
Maiο	21,93
Junho	23,37
Julho	19,16
Agosto	18,74
Setembro	24,62
Outubro	30,46
Novembro	34,22
Dezembro	35,95

Na terceira e última etapa da metodologia serão avaliadas tendências de aumento ou diminuição tanto no número de ocorrências de eventos extremos de precipitação, quanto do número de passagens de frentes frias usando análise de séries temporais. A tendência de cada série temporal foi estudada através da aplicação de testes de hipótese não-paramétricos, neste caso serão aplicados os testes de Mann-Kendall e de Pettitt, a aplicação do teste Mann-Kendall, assim como o cálculo da magnitude de tendência foram feitos através do pacote *pyMannkendal*, disponível em linguagem python. A aplicação do teste de Pettitt foi feita através do pacote *pyHomogeneity*, também disponível em python.

Este método de análise de tendência de séries temporais climáticas foi usado por diversos trabalhos de climatologia, como Marengo et al (2020) e Gajbhiye et al (2016). Também foi estudada a contribuição das frentes frias para a ocorrência de eventos extremos de precipitação.

5.4 Análise de tendências de séries temporais

5.4.1 Teste de hipótese para existência de tendência monotônica

Séries temporais consistem em um conjunto de dados coletados em sequência durante um período de tempo. São muito importantes para análises climáticas, pois desta forma é possível explorar tendências de aumento ou decrescimento de uma determinada variável.

A análise de séries temporais exige construções estatísticas robustas que levam em conta se a série temporal segue alguma distribuição de probabilidade, se é estacionária, dentre outras características. Ao examinar uma série temporal, encontramos três elementos

principais: tendência, sazonalidade e ciclos com periodicidades diversas. A tendência de uma série temporal é caracterizada por mudanças sistemáticas de longo prazo na média, tal mudança não necessita de ser linear. Os padrões sazonais de uma série temporal são variações sistemáticas que acontecem de acordo com fatores de sazonalidade, padrões sazonais sempre possuem uma frequência conhecida, já as variações cíclicas em uma série temporal são mudanças que acontecem em uma frequência desconhecida (HYNDMAN;ATHANASOPOULOS, 2021). É possível observar todos os três fatores em séries temporais climáticas, envolvendo temperatura do ar ou precipitação, por exemplo.

O teste Mann-Kendall é amplamente utilizado para análise de tendências em séries temporais climáticas, sendo este recomendado pela *World Meteorological Organization*. Mann-Kendall é um teste não paramétrico desde que não assume que os dados sigam uma determinada distribuição de probabilidade e é bastante eficaz para identificar tendências monotônicas em uma série temporal. A hipótese nula (H_0) para o teste de Mann Kendall é que não existe tendência, a hipótese alternativa é que a série apresenta tendência monotônica (crescente ou decrescente) (POHLERT, 2016). O teste estatístico de Mann Kendall é calculado a partir da seguinte equação:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k) \quad (1)$$

Onde :

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

O teste de hipótese assume que a hipótese nula é verdadeira e dado que a série temporal não apresenta tendência monotônica, o teste calcula a probabilidade de não apresentar tendência no conjunto de dados analisado, usando como referência o valor *p-value* (usado com frequência como menor ou igual a 0,05). Para que a eficácia do teste não seja comprometida, é necessário que os dados não possuam forte autocorrelação, pois quando a autocorrelação existe e é positiva, há uma maior probabilidade de se identificar tendência monotônica quando essa na verdade não existe (POHLERT, 2016).

5.4.2 Análise da magnitude da tendência

A magnitude da tendência é calculada através do teste de Sen's Slope (POHLERT, 2016), o qual é a taxa de mudança linear da variável, dado por:

$$d_k = \frac{X_j - X_i}{j - i}, \text{ para } 1 < i < j \leq n \quad (3)$$

onde X é a variável, d é a declividade, i e j são os índices e n é a quantidade de dados disponíveis. A magnitude da tendência é a mediana dos valores de declividade calculados para todos os índices i e j.

No contexto deste trabalho, na análise de séries temporais climáticas, usando como exemplo uma série temporal de temperatura do ar hipotética, o teste de magnitude de tendência de Sen's Slope quantifica em média quanto a temperatura do ar mudou em cada ano da série temporal.

5.4.3 Detecção do ponto de mudança: O teste de Pettitt

O teste não paramétrico de Pettitt é bastante utilizado na análise de séries temporais climáticas, pois possibilita detectar a presença de pontos de mudança (POHLERT, 2016). O teste de Pettitt verifica se uma determinada amostra de dados é homogênea e pertence à mesma população. Desta forma, a hipótese nula é que a série temporal é homogênea e não existe ponto de mudança. A hipótese alternativa é que a série temporal é não-homogênea e há ponto de mudança. Através do teste de Pettitt é possível conhecer a média da série antes e após o ponto de mudança. O teste de Pettitt não garante a existência de uma tendência, mas sim de um ponto de mudança (PAIVA ; SÁFADI, 2021).

O teste de Pettitt é expresso por:

$$K_T = \max |U_{t,T}| \quad (4)$$

onde :

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(X_i - X_j) \quad (5)$$

A posição do ponto de mudança é dada por K_T . A probabilidade de significância para existência de um ponto de mudança é determinada pelo *p-value*, o qual comumente é usado como sendo menor ou igual a 0,05.

6. RESULTADOS

6.1 Climatologia de passagens frentes frias: estação meteorológica do IAG-USP

Para o período entre 1960 e 2017, utilizando o critério objetivo de identificação de frentes frias (baseado em mudança da componente meridional do vento do quadrante norte para o quadrante sul e a sua manutenção no quadrante sul por até 48h e queda de temperatura simultânea ao giro do vento ou em até 48h após) foram contabilizadas **2237** frentes na região metropolitana de São Paulo. A frequência média por ano foi de aproximadamente 39.2 passagens de frentes, o número mínimo de frentes nesse período foi de 30 passagens no ano de 1989, enquanto o número máximo observado foi 46 em 1962 e 2009. Nota-se que a frequência de frentes identificadas pelo algoritmo é maior do que a frequência média para a região sudeste do Brasil, a qual varia entre 25 e 30 sistemas por ano (PAMPUCH; AMBRIZZI, 2015). No entanto, a frequência de frentes para a região metropolitana de São Paulo apresentada em trabalho anterior (DAMETTO; DA ROCHA, 2005) de 35 frentes por ano, é compatível com a média obtida neste trabalho. As diferenças observadas na frequência anual de frentes obtidas nos trabalhos de Dametto e da Rocha (2005) e Pampuch e Ambrizzi (2015) se devem às diferenças na metodologia e dados utilizados, pois no trabalho de Pampuch e Ambrizzi (2015) o critério de identificação de frentes, além de depender do giro da componente meridional do vento do quadrante norte para o sul e queda de temperatura, também depende de um aumento da pressão atmosférica no nível médio do mar. Como a frequência de frentes frias aumenta em direção ao sul do Brasil (PAMPUCH; AMBRIZZI, 2015) , estas frequências na região metropolitana de São Paulo são ligeiramente inferiores às de ~42 frentes frias por ano obtidas mais ao sul, sobre o oceano no leste de Santa Catarina, por Rodrigues et al. (2004) que usou o mesmo método para identificação de frentes frias.

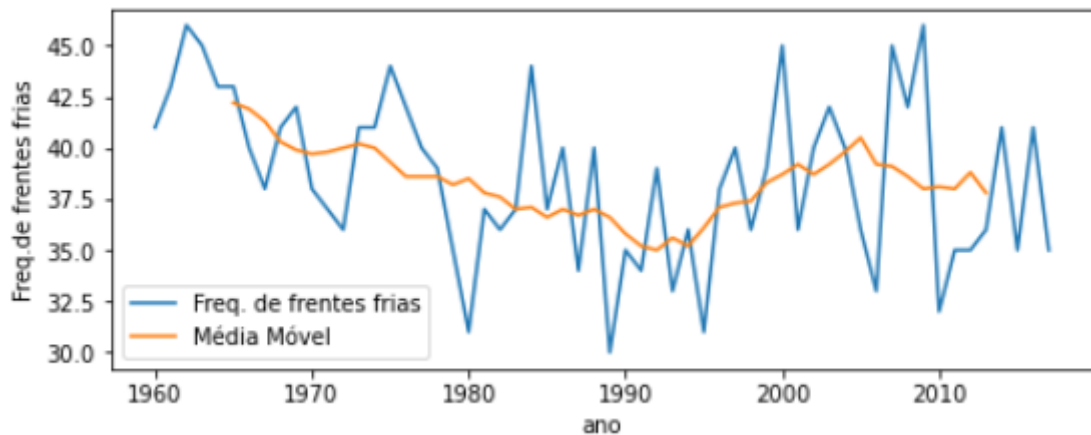


Figura 1 - Série temporal do número de passagens de frentes frias por ano na região metropolitana de São Paulo.

A série temporal de frentes frias é apresentada na Figura 1. Nota-se uma tendência de diminuição de passagens de frentes frias na região metropolitana de São Paulo, especialmente entre 1960 a 2000. No período entre os anos 2000 e 2009 a figura 1 sugere haver uma tendência de aumento de frentes frias, porém, analisando o período entre 2010 e 2017 esta tendência não fica clara.

A Figura 1 exibe a média móvel da frequência de frentes frias considerando períodos de 10 anos. A média móvel permite analisar o comportamento médio de uma série temporal e variações de períodos mais longos. A curva da média móvel entre o período de 1970 a 1999 sugere uma tendência bastante sutil de diminuição de frentes para a região metropolitana de São Paulo. A partir dos anos 2000 nota-se aumento da média móvel de frequência de frentes frias, com um pico no ano de 2005 e logo após uma aparente diminuição.

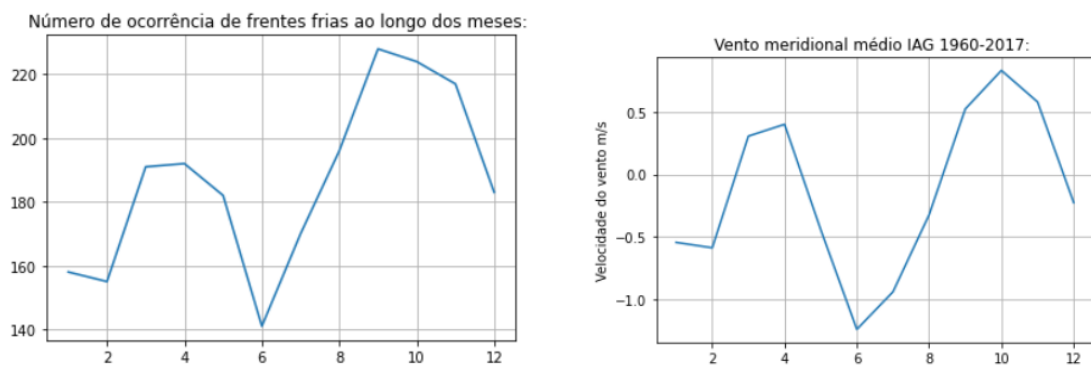


Figura 2 - Ciclo anual de: (a) número total de passagens de frentes frias, (b) vento meridional médio na região metropolitana de São Paulo entre 1960-2017.

A Figura 2 exibe como as 2237 frentes identificadas pelo algoritmo entre 1960-2017 estão distribuídas ao longo dos meses. É observado um número maior de sistemas entre os meses de setembro e outubro, há uma diminuição de sistemas a partir de novembro, ocorre um aumento a partir de fevereiro e uma queda bastante acentuada no mês de junho. Considera-se então que o período em que mais foram observadas frentes frias, foi o período compreendido entre o inverno (julho, agosto e setembro) e a primavera (outubro, novembro e dezembro). A curva do ciclo sazonal mostra que o pico de frequências ocorreu em setembro, com um total de 228 frentes. A estação que apresentou a menor frequência de frentes frias foi outono, a curva mensal da Figura 2a apresenta uma queda na frequência especialmente entre os meses de maio e junho. Nota-se que a evolução anual da frequência de frentes frias acompanha a do vento meridional, ou seja, as frentes são mais frequentes quando o vento de norte (valores negativos de velocidade do vento) enfraquece (primavera), ou seja quando o vento de sul é predominante (valores positivos de velocidade do vento) e menos frequentes quando se intensifica (junho). A análise que mostrou que a maior frequência de frentes frias ocorre entre julho e outubro é consistente com trabalhos anteriores como os de Rodrigues et al (2004) para o litoral de Santa Catarina, Jesus (2014) para a estação de Rio Grande (Rio grande do Sul) e Pampuch e Ambrizzi (2015). Esses últimos autores também mostraram que a frequência de frentes acontece em maior número durante o inverno e a primavera, especialmente nos meses de junho a outubro, considerando a região sudeste do Brasil. Também foi observado que para a maioria das localidades da América do Sul, o máximo de frequência de frentes ocorre durante o inverno e a primavera (CAVALCANTI; KOUSKY, 2003). A redução acentuada no número de frentes frias em junho também foi encontrada em Rodrigues et al. (2004) e na estação do IAG em particular pode ser explicada por: (a) a intensificação do vento de norte em junho; (b) o critério de persistência de vento de sul um dia após a passagem da frente fria. Em ambos os casos, os ventos de norte mais intensos em junho (Figura 2b) representam um "campo básico" menos favorável à mudança de direção de norte para sul e persistência de sul. No caso de relaxar o critério de persistência, o número de frentes frias aumenta em todos os meses, mas junho ainda apresenta decréscimo na frequência, embora menos acentuado como encontrado também por Rodrigues et al (2004). A intensificação do vento de quadrante norte em junho pode ser explicada devido ao comportamento da Alta Subtropical do Atlântico Sul, a qual atinge seu pico de intensidade entre junho, julho e agosto (SUN et al, 2017). Durante o pico de intensidade da ASAS em São Paulo predominam ventos do quadrante norte, mais

especificamente ventos de nordeste (BASTOS; FERREIRA, 2000). A variabilidade da intensidade da ASAS ao longo do ano é muito importante para o clima da região e durante os meses de junho, julho e agosto o sistema pode inibir a passagem de frentes frias na região sudeste do Brasil (BASTOS; FERREIRA, 2000). Desta forma, o mínimo de frentes observadas em junho pode ser explicado pela influência da ASAS na região sudeste do Brasil durante seu período de maior intensidade (junho, julho e agosto).

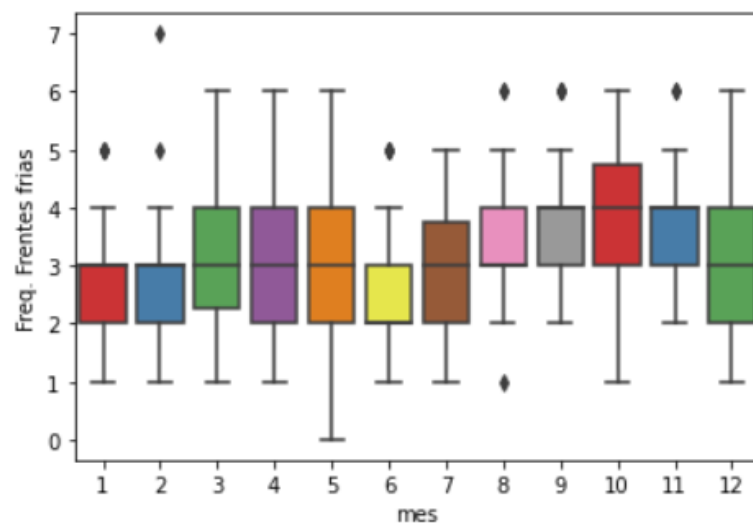


Figura 3 - Diagrama de caixa do ciclo anual de frequência de frentes frias sobre RMSP entre 1960-2017.

A figura 3 exibe o diagrama de caixa do ciclo anual de frequência de frentes para região metropolitana de São Paulo entre 1960-2017, a figura agrega informações além do ciclo anual apresentado anteriormente na Figura 2a. É possível observar na Figura 3 para cada mês, o valor mínimo, o primeiro quartil, a mediana, o terceiro quartil e o valor máximo, além dos eventos *outliers*. O diagrama de caixa foi construído através da biblioteca *seaborn*, disponível em linguagem de programação python e amplamente utilizada para visualização de dados. Um evento *outlier* é definido em função da distância interquartil.

Analisando os meses de janeiro e fevereiro, temos que o valor mínimo é de 1 passagem frontal e o máximo de 5 passagens frontais para janeiro e 7 para fevereiro. Observa-se na Figura 3 a tendência de aumento de frequência de frentes nos meses de setembro, outubro e novembro. Para o mês de outubro há frequência mínima média de 1 sistema e frequência máxima de seis passagens de frentes. Os meses de setembro e novembro mostram frequência mínima de dois sistemas e máxima de 6. A Figura 3 mostra ainda que junho apresenta distribuição (mediana, concentração de valores em torno da mediana, e

outliers) similar aos meses de janeiro e fevereiro, enquanto abril, maio e dezembro apresentam maior variabilidade interanual (como mostra os valores do primeiro e terceiro quartil, distribuídos em torno da mediana) do que os demais meses do ano.

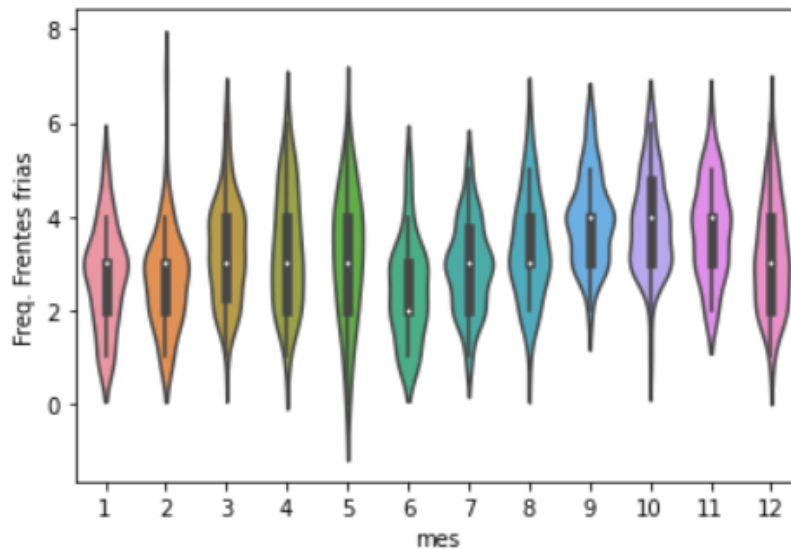


Figura 4 - Gráfico violino do ciclo anual de frequência de frentes frias para RMSP entre 1960-2017.

A Figura 4 mostra o gráfico violino para o ciclo anual de frentes frias na RMSP. Este tipo de gráfico é bastante relevante, pois agrega informações além das apresentadas nas Figura 2 e 3, como a densidade de probabilidade dos dados de frequência de passagens frontais de acordo com cada mês.

O gráfico do tipo violino foi construído através da biblioteca *seaborn*, disponível em linguagem de programação *python* e além de informações disponibilizadas nos diagramas de caixas, como valor mínimo, primeiro quartil, mediana, terceiro quartil e valor máximo, o gráfico do tipo violino apresenta também uma estimativa da densidade de probabilidade dos dados.

Desta forma, fica ainda mais evidente que a maior frequência de passagens frontais na RMSP ocorre entre os meses de setembro, outubro e novembro. E os meses de menor frequência dezembro, janeiro, fevereiro e junho.

6.2 Climatologia de frentes frias: reanálise da ERA-20C

A Figura 5 mostra a série temporal de frequência de frentes obtidas a partir dos dados de reanálise da ERA-20C, exibe uma visão mais ampla das mudanças na frequência desses sistemas pela RMSP no período de 1900 a 2010. Ao longo dos 110 anos, foram identificadas 3763 frentes, com frequência média anual de 34 sistemas, ou seja, um pouco menor do que a frequência obtida diretamente da estação do IAG-USP (39 por ano). O ano com a maior frequência foi o ano de 1964, com 46 sistemas e o de menor frequência foi 1903 com apenas 25 sistemas. A série temporal da média móvel de frequência frentes sugere uma aparente tendência de longo período de aumento da frequência desses sistemas sobre a RMSP.

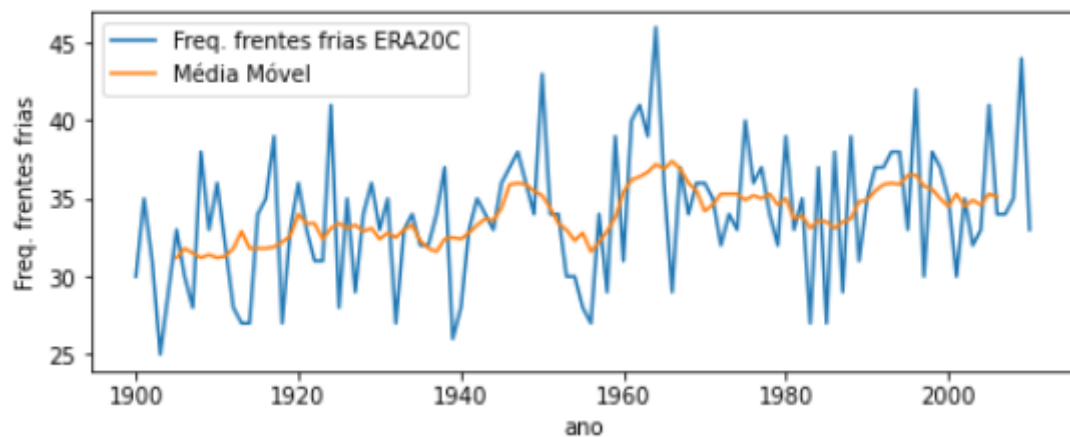


Figura 5 - Série temporal de frequência anual de frentes frias para RMSP na ERA-20C entre 1900-2010.

As figuras 6, 7 e 8 mostram a sazonalidade da frequência de frentes na ERA-20C. Do gráfico de ciclo anual, figura 6, nota-se maior frequência de frentes entre os meses de setembro e outubro e menor frequência entre janeiro e fevereiro, em concordância com as observações do IAG (Figura 2). Também é observado uma queda na frequência entre maio e junho, tal queda também é observada no ciclo anual de frentes obtido a partir dos dados da estação meteorológica do IAG.

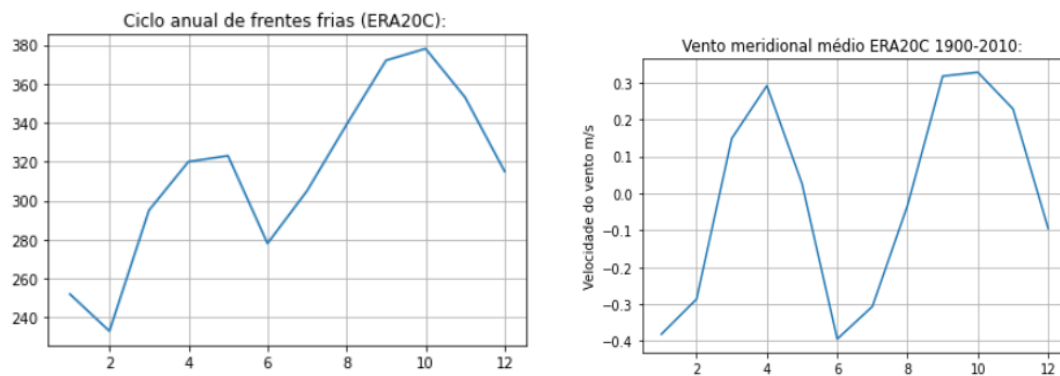


Figura 6 - Ciclo anual de: (a) número total de passagens de frentes frias, (b) vento meridional médio na região metropolitana de São Paulo entre 1960-2017.

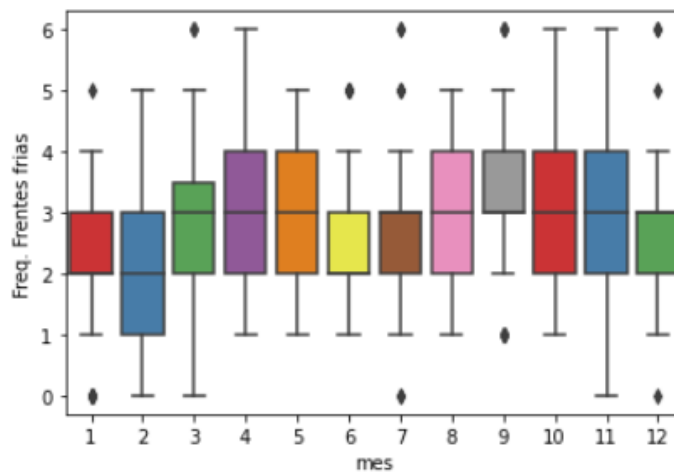


Figura 7- Boxplot para o ciclo anual de frentes frias para RMSP (ERA-20C) no período 1900-2010.

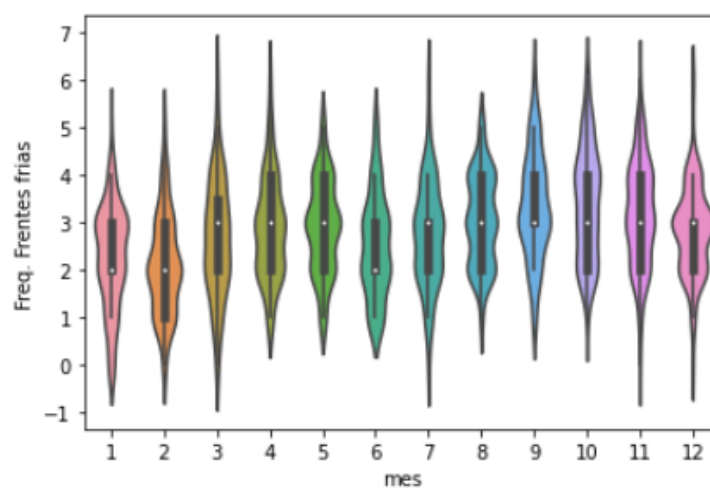


Figura 8 - Violin plot para ciclo anual de frentes frias para RMSP (ERA-20C) entre 1900-2010.

6.3 Climatologia de precipitação

A série temporal dos totais de precipitação anual (Figuras 9) evidenciam que a precipitação anual para a região metropolitana de São Paulo sofreu diversas mudanças ao longo do período analisado. Para todo o período, a média de precipitação anual é de 1413.14 mm. Alguns anos extremos se destacam. O ano com o menor total anual de precipitação foi o ano de 1933, com apenas 849.8 mm em apenas 147 dias com chuva registrados e somente 3 eventos extremos. Em contraste, o ano com maior quantidade total de precipitação foi o ano de 1983, com 2236 mm em 182 dias de chuva e 22 eventos extremos. Também é interessante analisar que o ano com o maior número de dias de chuva, 1939 com 198 dias de chuva, apresentou ocorrência de somente 2 extremos de precipitação.

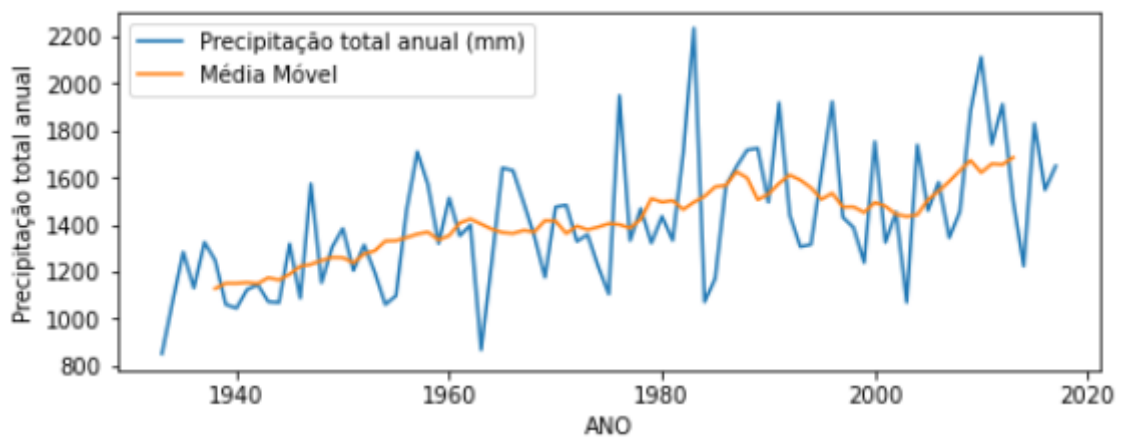


Figura 9- Série temporal de precipitação para região metropolitana de São Paulo (IAG-1933-2017).

As Figuras 10, 11 e 12 mostram a sazonalidade da precipitação da região metropolitana de São Paulo, a qual é caracterizada por maiores volumes de precipitação no trimestre de dezembro, janeiro (mês com o maior total de precipitação, com valores acima de 225 mm) e fevereiro, enquanto os menores acumulados ocorrem no período de maio, junho, julho e agosto, mês com o menor total de precipitação, com pouco menos de 50 mm.

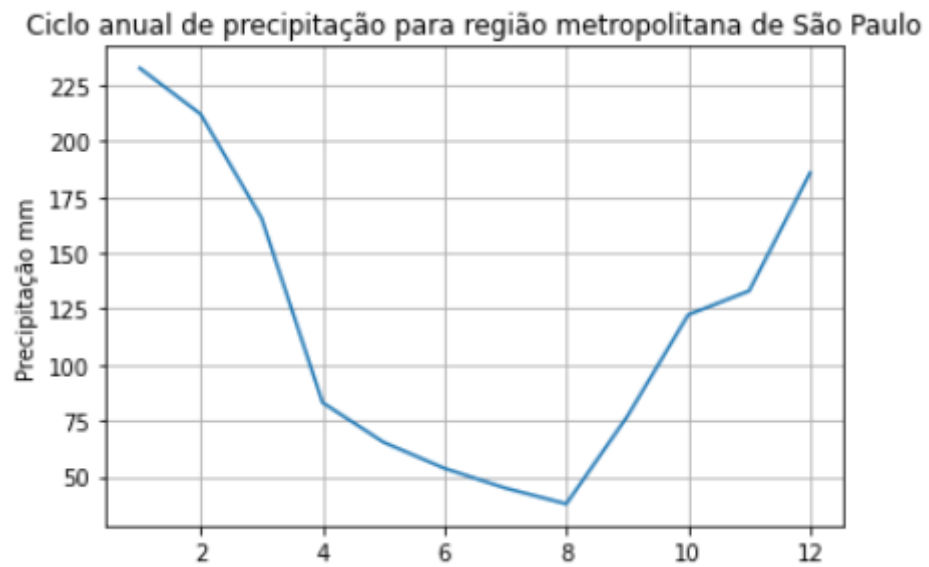


Figura 10- Ciclo anual de precipitação para região metropolitana de São Paulo (IAG- 1933-2017)

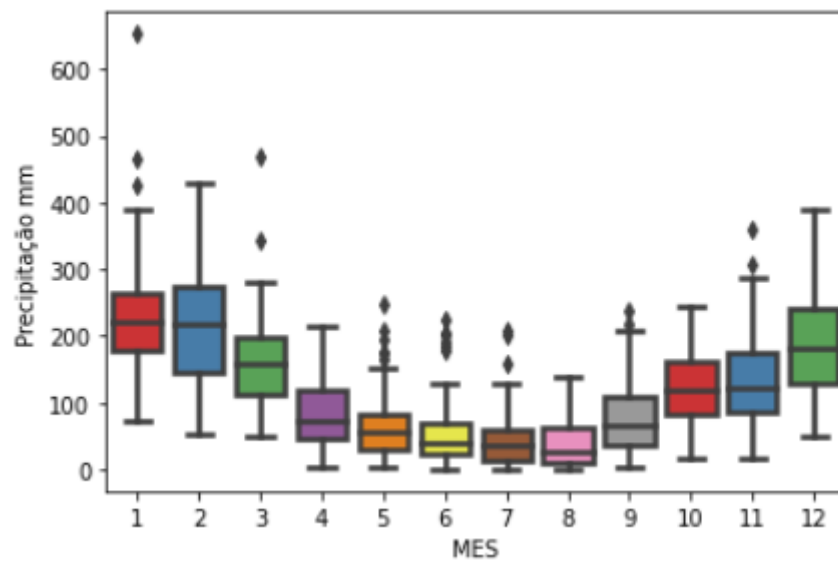


Figura 11-Boxplot para o ciclo anual de precipitação para RMSP (IAG-1933-2017)

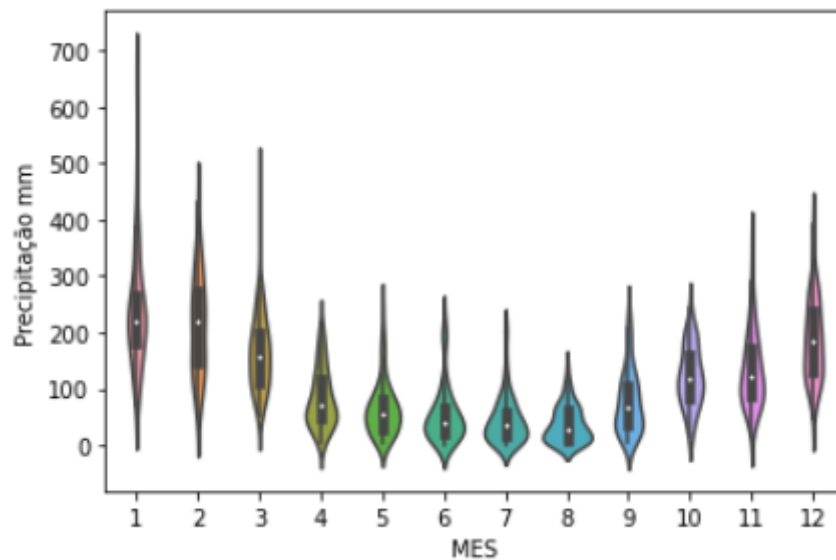


Figura 12 -Violin Plot para ciclo anual de precipitação para RMSP (IAG-1933-2017).

A Figura 12 exibe em detalhes a distribuição sazonal de precipitação para São Paulo, onde é possível visualizar os máximos e mínimos observados durante o ano e a densidade de probabilidade. Nota-se na figura 12 que a amplitude da quantidade de precipitação é maior no mês de janeiro, onde os valores mais prováveis estão concentrados na faixa de 100 a 400 mm, com média de aproximadamente 200 mm. O mês com menor amplitude (diferença entre máximos e mínimos) é o mês de agosto, com média de aproximadamente 50 mm, onde a faixa de maior probabilidade de precipitação concentra-se entre 0 e 100 mm.

6.4 Climatologia do número de eventos de precipitação extrema diária

Na figura 13, a série temporal de número de eventos de precipitação extrema diária na região metropolitana de São Paulo apresenta uma aparente tendência crescente na frequência de eventos extremos do período entre 1933 e 1990. De 1990 até 2000 nota-se uma queda na média móvel de eventos extremos. Após esse período de decréscimo nota-se a retomada do crescimento da média móvel de extremos.

Ao longo dos 84 anos analisados, foram identificados 804 eventos extremos, com média de aproximadamente 9 eventos extremos por ano. O ano com maior número de eventos extremos foi 1983, com 22 ocorrências e o ano com o número mínimo foi 1933, no

qual foram registrados apenas 3 eventos. É interessante notar que o ano com o maior número de extremos registrados ficou acima da média em relação a dias com chuva e o ano com o menor registro de extremos ficou abaixo da média em relação a dias com chuva. A média anual de dias com chuva é 156, em 1983 foram registrados 182 dias com precipitação acima de 0 mm e em 1933 foram registrados 147 dias com precipitação.

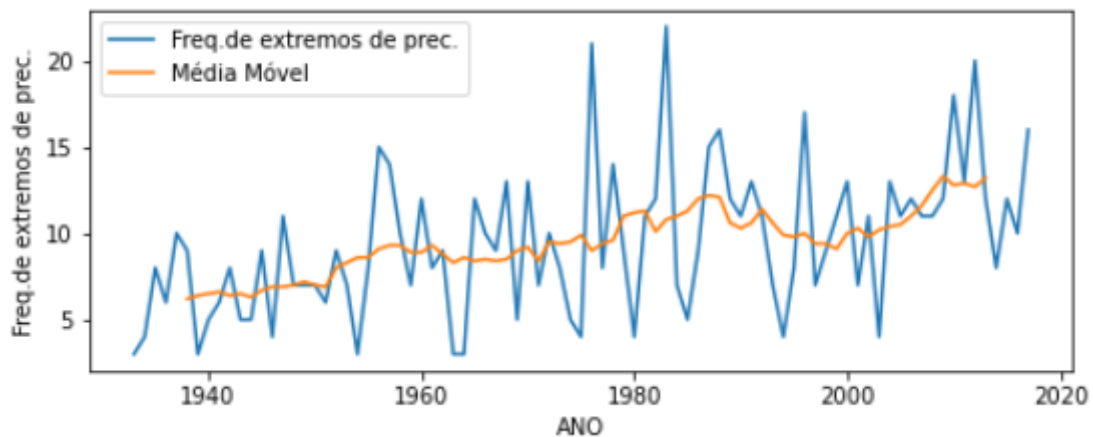


Figura 13- Série temporal da frequência anual de eventos extremos de precipitação para região metropolitana de São Paulo (IAG).

A Figura 14 apresenta o ciclo anual do número de eventos extremos de precipitação entre 1933-2017. Da Figura 10 temos que os meses que mais acumularam extremos de precipitação foram janeiro, dezembro, fevereiro e março e os meses julho e agosto apresentaram menor ocorrência de extremos. A figura 14 pode ser comparada com o ciclo anual de eventos extremos apresentado em Liebmann, Jones e De Carvalho (2001), onde também tem-se menor quantidade de extremos entre junho, julho e agosto e maior quantidade em dezembro, janeiro e fevereiro. No trabalho de Liebmann, Jones e De Carvalho (2001) eventos extremos de precipitação foram avaliados utilizando-se dados de 127 estações meteorológicas na região de São Paulo, o critério para identificação de eventos extremos é diferente da empregada neste trabalho, cada estação estudada possui uma média climatológica de precipitação anual total, desta forma foram considerados três classes de extremos de chuva : os que excedem no período de 24 horas 3% da média anual climatológica, os que excedem no período de 24 horas 4% da média anual climatológica e os s

que excedem no período de 24 horas 5% da média anual climatológica(LIEBMANN; JONES ; CARVALHO, 2001).

A figura 15 mostra informações referentes a *outliers*, máximos e mínimos observados. Nota-se que os meses onde a amplitude de ocorrência de extremos é maior são os de janeiro, março, setembro, novembro e dezembro, onde o número máximo de extremos observados nesses meses foi 5 e o mínimo 0. Os meses de abril, julho, agosto e outubro apresentaram máximo de 3 eventos e mínimo de 0 eventos. Fevereiro, maio e junho apresentaram amplitude máxima de 4 eventos. Durante março, abril, maio, junho, julho, agosto, setembro e outubro a amplitude de ocorrência de extremos é menor e igual a 2. Para todos os meses, o número mínimo de extremos observados foi zero.



Figura 14- Ciclo anual do número de eventos extremos de precipitação para região metropolitana de São Paulo (IAG - 1933-2017).

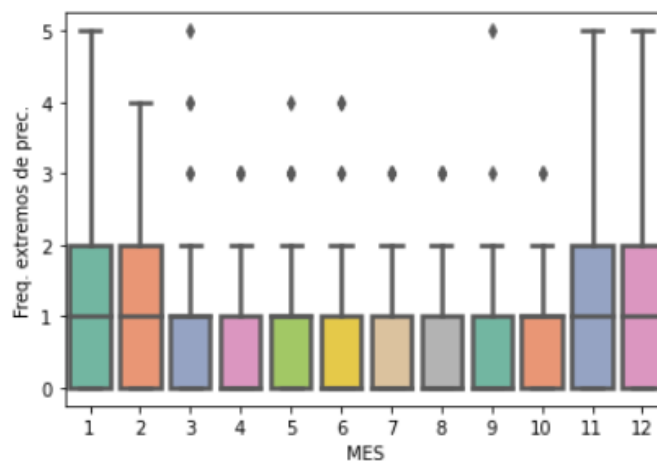


Figura 15 -Boxplot para ciclo anual do número de eventos extremos de precipitação extrema para RMSP (1933-2017)

6.4 Frentes frias e extremos de precipitação

A aplicação do método (percentil de 95%) de identificação de extremos de precipitação resultou em 608 eventos extremos durante o período de 1960 a 2017. Cruzando a informação de ocorrência de chuva extrema com a informação de passagem de frentes frias pela região, é possível afirmar que 96 eventos ocorreram exatamente no dia da passagem do sistema frontal, 116 eventos ocorreram um dia antes da passagem frontal e 31 eventos ocorreram um dia após a passagem da frente. E dos eventos ocorridos nesses três dias em relação às frentes frias, a maioria ocorreu durante a primavera e o verão. Desta forma foi possível avaliar a contribuição dos sistemas frontais para a precipitação extrema na região.

As figuras 16 e 17 ilustram, respectivamente, a quantidade de ocorrência dos extremos de precipitação e a precipitação média diária (podendo ou não estar associada a extremos de chuva) correspondente para dois dias antes da passagem frontal ($k-2$), um dia antes da passagem da frente ($k-1$), no dia da passagem da frente (k) e para um dia após a passagem da frente ($k+1$) e dois dias após passagem frontal ($k+2$). Nota-se na Figura 16 a concentração de eventos extremos no dia anterior e no próprio dia da frente, resultando em precipitação média maior (Figura 17) um dia antes da passagem da frente, e diminui rapidamente até um dia depois da passagem da frente. A figura 18 mostra a precipitação média diária gerada por eventos extremos de chuva e indica que o máximo volume de precipitação extrema ocorre no dia da passagem, com média diária de 46.04 mm. Esse perfil é diferente do apresentado pela figura 16, onde na figura 16, mostra que a precipitação diária média é mais intensa um dia antes da passagem da frente. A figura 18 considera apenas a precipitação diária média associada a eventos extremos de precipitação ocorridos durante a passagem do sistema frontal. Desta forma, pela Figura 18, nota-se que considerando apenas os eventos extremos de precipitação, a chuva gerada por eles é maior no dia da passagem da frente, diferente do perfil médio de precipitação mostrado pela figura 16.

Dada a passagem de uma frente fria e a ocorrência de um evento de precipitação extrema, os maiores volumes de precipitação associada ao evento extremo ocorrem no dia da

passagem da frente, apesar de a maioria dos eventos acontecerem um dia antes da passagem da frente.



Figura 16 - Precipitação média desde dois dias antes até dois dias depois das frentes frias

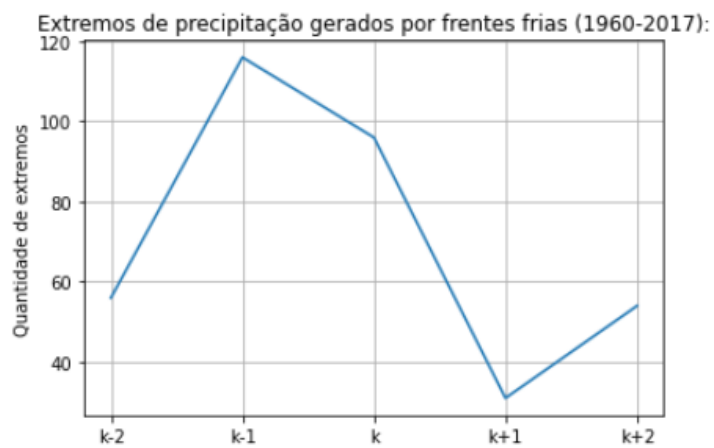


Figura 17 - Número de extremos de precipitação desde dois dias antes até dois dias depois de frentes frias

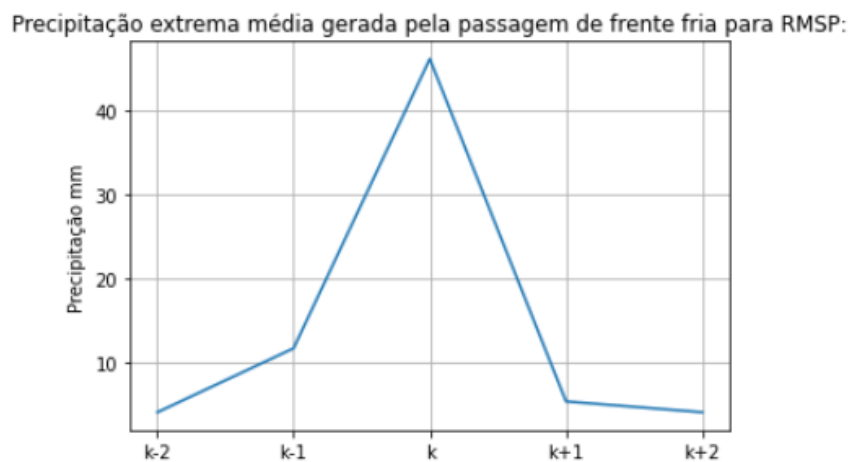


Figura 18 - Precipitação extrema média diária gerada pela passagem de frente fria para RMSP.

6.5 Análise de tendências nas séries temporais

6.5.1 Tendência na frequência de frentes frias

Para o estudo da frequência de frentes frias foram analisadas duas séries temporais: uma construída a partir dos dados de temperatura e vento da estação meteorológica do IAG e outra a partir das mesmas variáveis da reanálise da ERA-20C. Em ambas as séries temporais o teste Mann-Kendall rejeitou a hipótese nula de não existência de tendência monotônica com nível de significância de 95%. Entretanto, na série de dados do IAG, o teste identificou tendência de queda na frequência de frentes frias, com magnitude de -0,077 frentes/ ano. Na série temporal da reanálise da ERA-20C de número de ocorrência de frentes frias, o teste identificou tendência de aumento na frequência, com magnitude de 0,004 frentes/ ano. A diferença de tendência no teste provavelmente ocorre devido a diferença no período analisado, pois a série temporal de frequência de frentes do IAG compreende o período de 1960 a 2010, enquanto a série da ERA-20C compreende um período mais longo, de 1900 a 2010.

O teste de Pettitt também foi aplicado nas duas séries temporais. Para a série da ERA-20C o teste identificou um ponto de ruptura no ano de 1959 (com nível de significância de 95%), antes do ponto a média de frequência anual de frentes frias era de 32,5 e após a média anual aumentou para 35,4. Enquanto que o teste de Pettitt aplicado na série temporal do IAG, mostra um ponto de ruptura em 1979 (com nível de significância de 95%), de forma que a média de frequência antes de 1979 era de 41 frentes por ano e após 1979 caiu para aproximadamente 37.

6.5.2 Tendência de precipitação

O teste Mann-Kendall foi aplicado a série temporal de precipitação com um nível de significância de 95% e rejeitou-se a hipótese nula de que não há uma tendência monotônica na série temporal. A magnitude da tendência, calculada a partir do teste de Sen's Slope é de 5,94 mm/ano. Essa tendência é semelhante à obtida por Silva Dias et al (2013), onde a mudança linear na precipitação anual é de 5.518 mm/ano.

Também foi aplicado o teste de Pettitt, o qual identificou um ponto de ruptura na série temporal no ano de 1956, quando a precipitação média anual antes do ponto de ruptura era de 1178,38 mm e após esse ano aumentou para 1500,23 mm.

6.5.3 Tendência de número de eventos de precipitação extrema

Para a série temporal de frequência de eventos extremos de precipitação, o teste Mann-Kendall rejeitou a hipótese nula com um nível de significância de 95%, identificando tendência de aumento, mas com magnitude pequena de 0,071 eventos/ ano.

O teste de Pettitt identificou um ponto de ruptura em 1976 com nível de significância também de 95%. A média de frequência de extremos antes de 1976 era de 6 eventos extremos por ano e subiu consideravelmente para aproximadamente 10 eventos extremos por ano.

7. COMPARAÇÃO ENTRE A CLIMATOLOGIA DE FRENTES FRIAS: ESTAÇÃO DO IAG E REANÁLISE DA ERA-20C (1960-2010)

Para entender se a climatologia de frentes frias obtida a partir dos dados de reanálise da ERA-20C representam aquela obtida com dados da estação meteorológica do IAG utilizando apenas os dados referentes ao período de 1960-2010 de ambos os conjuntos de dados.

A Tabela 2 mostra resumidamente as diferenças encontradas entre os dois dados. Basicamente, o algoritmo identificou uma quantidade menor de frentes nos dados da ERA-20C e assim foi obtida uma média anual menor, de 36.06 frentes por ano, valor ligeiramente maior do que a média obtida para o período de 1900-2010 da ERA-20C de 34 sistemas por ano. Foi observada uma diferença de 176 frentes entre os dois conjuntos de dados analisados.

A tabela 3 mostra as diferenças mensais na contabilização da quantidade de frentes pelo algoritmo utilizando dois conjuntos de dados : O conjunto de dados da estação meteorológica do IAG e o conjunto de dados de reanálise da ERA-20C. As menores diferenças foram observadas nos meses de maio (1), junho (1) e julho (1). As maiores diferenças ocorrem nos meses de fevereiro (33), agosto (24) e novembro (23). Apesar das

diferenças nas quantidades mensais, ambos os ciclos apresentam mínimos em junho e fevereiro e máximos em setembro e outubro.

Tabela 2 - Comparação entre climatologias de frentes frias ERA-20C e IAG

Conjunto de dados	Quantidade de frentes	média anual
ERA-20C	1803	36.0
IAG	1979	39.6

Tabela 3 - Diferenças mensais nas quantidades de frentes frias contabilizadas usando e dados da estação meteorológica do IAG e da ERA-20C

Mês	Quantidade de frentes ERA-20C	Quantidade de frentes IAG-USP	Diferença na quantidade de frentes: IAG-ERA20C
Janeiro	122	142	20
Fevereiro	105	138	33
Março	148	170	22
Abril	160	170	10
Maio	156	157	1
Junho	127	126	-1
Julho	149	150	1
Agosto	153	177	24
Setembro	184	200	16
Outubro	187	196	9
Novembro	163	186	23
Dezembro	149	167	18

Considerando apenas o período de 1960-2010 para ambos os conjuntos de dados, temos que no caso do conjunto de dados de reanálise da ERA-20C, o teste de Mann-Kendall rejeitou a hipótese de existência de tendência com 95% de significância. Da mesma forma, o teste de Pettitt não identificou mudanças na média da série temporal de quantidade anual de

frentes frias (também com 95% de significância) e desta forma pode-se afirmar que dentro do período de 1960-2010 da ERA-20C, a série é considerada homogênea. O resultado é diferente do obtido para o mesmo período da série temporal de quantidade anual de frentes frias obtida através do conjunto de dados da estação do IAG, onde o teste Mann-Kendall identificou tendência de diminuição de frentes com magnitude pequena de $-0,076$ e o teste de Pettitt identificou existência de ponto de ruptura em 1978, sendo que a média anual de frentes antes do ponto é 41.1 e a média depois do ponto é de 37.5. Desta forma, evidenciam-se as diferenças de tendência e homogeneidade nas duas séries temporais, entretanto apesar das diferenças, pode-se dizer que em relação à climatologia de frentes frias, o conjunto de dados da ERA-20C é capaz de representar razoavelmente bem a variabilidade mensal de número de frentes frias na região metropolitana de São Paulo, especialmente nos meses de maio, junho e julho, onde a diferença na quantidade de frentes foi mínima.

A tabela 4 mostra a média mensal de frentes frias calculadas utilizando os dois conjuntos de dados usados neste tópico e mostra que as diferenças observadas nas médias mensais de frequência de frentes frias do IAG e da ERA-20C não são diferenças expressivas. Para ambos os conjuntos de dados temos que as maiores médias mensais ocorrem nos meses de setembro e outubro e as menores médias ocorreram nos meses de janeiro, fevereiro e junho. Assim, de acordo com as informações de variabilidade mensal média apresentadas nas tabelas 3 e 4, é possível dizer que o conjunto de dados de reanálise da ERA-20C é capaz de representar bem a variabilidade de frequência mensal de frentes frias na região metropolitana de São Paulo, quando comparada com a variabilidade mensal de frequência de frentes obtida a partir do conjunto de dados medidos na estação meteorológica do IAG. Os valores mostrados na tabela 4 são ligeiramente menores do que os encontrados por Rodrigues et al (2004) para a climatologia dos frentes fria no litoral de Santa Catarina, entretanto, apesar das diferenças nas médias mensais, Rodrigues et al (2004) também observou valores maiores na frequência média dos frentes frias nos meses de setembro, outubro e novembro e valores menores em junho, janeiro e fevereiro.

Tabela 4 - Médias mensais da frequência de frentes frias contabilizadas usando o conjunto de dados da estação meteorológica do IAG e dos dados de reanálise da ERA-20C

Mês	Média mensal de frentes (IAG)	Média mensal de frentes (ERA-20C)
-----	-------------------------------	-----------------------------------

Janeiro	2.44	2.84
Fevereiro	2.10	2.76
Março	2.96	3.4
Abril	3.20	3.4
Mai	3.12	3.14
Junho	2.54	2.52
Julho	2.98	3.00
Agosto	3.06	3.54
Setembro	3.68	4.00
Outubro	3.74	3.92
Novembro	3.26	3.72
Dezembro	2.98	3.34

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho estudou tendências climáticas de frentes frias, precipitação e precipitação extrema para a região metropolitana de São Paulo. Para isso, utilizou dados de precipitação, temperatura e componente meridional do vento medidos na estação meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas localizado no Parque da Água Funda e da reanálise da ERA-20C (pertencente ao ECMWF) para a latitude e longitude mais próximas do Parque da Água Funda. Adicionalmente, analisou a contribuição das frentes frias para a ocorrência de extremos de precipitação.

Para todo o período 1900-2010, foram contabilizadas 3763 frentes frias na ERA-20C, com frequência média anual de 34 sistemas. A série temporal de frentes obtida da ERA-20C apresentou tendência de aumento, com magnitude de 0.004 frentes/ano, segundo o teste Mann-Kendall. O teste de Pettitt identificou uma ruptura nessa série em 1956, quando a média que era de 32,5 sistemas por ano subiu para 35,4 frentes/ano no período subsequente. A importância do teste de Pettitt reside no fato de o mesmo verificar a homogeneidade da série

temporal, desta forma, podendo aferir se durante o período de tempo analisado houve alguma mudança na média da variável de interesse.

Na série do IAG, foram identificadas 2237 frentes, com média anual de aproximadamente 39 frentes por ano, com maiores frequências durante o inverno e início da primavera e, as menores frequências nos meses de verão. A série temporal de frentes frias do IAG, apresentou tendência de diminuição, com magnitude de -0.07 frentes/ano, segundo o teste Mann-Kendall. Nesta série, o teste de Pettitt identificou um ponto de ruptura no ano de 1979, com média antes do ponto de 41 frentes/ano diminuindo para 37 frentes/ano no período seguinte.

Ambos os ciclos anuais de frentes frias, tanto dos dados da IAG quanto da ERA-20C, apresentam ocorrências mínimas de frentes frias no mês de junho, a qual pode estar relacionada com o fortalecimento do vento de norte neste mês e a exigência do algoritmo em persistência de vento de sul no dia após a frente, pois dessa forma, com o vento de norte mais intenso, temos condições menos favoráveis para a persistência do vento de sul por mais um dia. Essa menor frequência de frentes frias em junho, embora menos acentuada, também foi encontrada por Rodrigues et al. (2004) no leste de Santa Catarina. Apesar das diferenças, ambos os ciclos apresentam máximo de frequência de frentes na primavera e mínimos de frequência em junho e no verão.

A série temporal entre 1933-2017 de precipitação anual apresenta tendência de aumento de 5,94 mm/ano, segundo o teste de Mann-Kendall. O teste de Pettitt identificou um ponto de ruptura em 1956, com a média anterior 1178,38 mm/ano aumentando para 1500,23 mm/ano no período seguinte. Analisando a precipitação média desde dois dias antes até dois dias depois da passagem frontal tem-se que o maior volume de precipitação diária ocorre um dia antes da passagem frontal (6,4 mm/dia), seguido pela dia da passagem frontal (5,7 mm/dia), diminuindo dois dias após a passagem frontal (abaixo de 3,5 mm/dia).

A série temporal entre 1933-2017 de extremos de precipitação no IAG também apresentou tendência de aumento muito pequena, com 0,07 extremos/ano, segundo o teste de Mann-Kendall. O teste de Pettitt identificou um ponto de ruptura em 1976, quando a média de extremos antes era 6 eventos/ano e após aumentou para aproximadamente 10 eventos/ano. Foram contabilizados 804 extremos de precipitação, a maioria ocorreu nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro e a minoria em junho, julho e agosto. Analisando a contribuição das frentes frias para ocorrência de extremos de precipitação, no período de 1960 a 2017

ocorreram 608 eventos, sendo que 9,2% ocorreram dois dias antes da passagem da frente, 19,0% um dia antes da passagem da frente, 15,7% no dia da passagem, 5% um dia depois e 8,8% dois dias depois. Desta forma foi possível relacionar 58% dos extremos de precipitação com as passagens de frentes frias na região metropolitana de São Paulo frontal.

Sugere-se para a continuação do trabalho, o aprimoramento do algoritmo para a identificação de frentes frias, adicionando outras variáveis atmosféricas e condições, como por exemplo, aumento de pressão atmosférica após a passagem da frente e condição mínima necessária de queda de temperatura, o mínimo necessário de queda de temperatura poderia ser obtido através de uma climatologia da queda de temperatura provocada pela passagem de uma frente fria na RMSP (o uso dessas condições tornaria o algoritmo mais preciso).

Também sugere-se utilizar dados de outras estações meteorológicas da região sudeste, a fim de se obter uma visão mais ampla das tendências nas séries temporais de ocorrência de frentes, precipitação e precipitação extrema em outras regiões do estado de São Paulo. E também sugere-se fazer uma análise comparativa entre os dados de precipitação, ocorrência de extremos de precipitação, climatologia do número de passagens de frentes frias da estação meteorológica do IAG e da ERA-20C para verificar se a ERA-20C é suficientemente capaz de representar a variabilidade climática da região metropolitana de São Paulo.

9. REFERÊNCIAS

BROLLO, M. , FERREIRA, C.. **Indicadores de desastres naturais no Estado de São Paulo**. 10.13140/RG.2.2.25747.27688. , 2009.

BJERKNES, J. ; SOLBER, H. Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation , **Monthly weather review**, vol. 50, p.468-473, Setembro, 1922.

BASTOS, C.; FERREIRA, N. **Análise Climatológica da Alta Subtropical do Atlântico Sul**. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2000. Anais. Rio de Janeiro, p.

612-619, 2000.

CAVALCANTI, I. ; KOUSKY, V. **Climatology of South American cold fronts**, *In: International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*. 2003. p. 2003.

CAVALCANTI, I. ; KOUSKY, V. Frentes Frias sobre o Brasil. In: Cavalcanti, I. F. A., Ferreira, N. J., Justi da Silva, M. G. A.; Silva dias, M. A. F. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de textos. Cap. 9, p. 133-147, 2009.

DAMETTO, G. S; ROCHA, R. P. da. **Características climáticas dos sistemas frontais na cidade de São Paulo**. São Paulo: IAG/USP, 2005.

FIELD, C.B.; BARROS, V.; STOCKER, T.F.; DAHE, Q., INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change**. ,Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NK, USA. 582 p. 2012.

GAJBHIYE, S.; MESHAM, C.; SINGH, S.K.; SRIVASTAVA, P.K; ISLAM, T., **Precipitation trend analysis of Sindh River basin, India, from 102-year record (1901–2002)**. *Atmos. Sci. Lett.*, 17: 71-77, 2016.

HYNDMAN, R.J., ATHANASOPOULOS, G., **Forecasting: principles and practice**, 3rd edition, OTexts: Melbourne, Australia, OTexts.com/fpp3, 2021.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (29 de agosto de 2018). **Estimativas da população residente nos municípios brasileiros com data referência em 1º de julho de 2018**.

JESUS, Eduardo Marco de. **Simulações climáticas regionais para o CORDEX sobre a América do Sul e impactos das frentes frias na climatologia simulada**. Dissertação de mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, Brazil, p. 117, 2014.

LIEBMANN, B. ; JONES, C. ; DE CARVALHO, L. M.V. Interannual variability of daily extreme precipitation events in the state of São Paulo, Brazil. **Journal of Climate**, v. 14, n. 2, p. 208–218, 2001.

MARENGO, J.A, AMBRIZZI T; ALVES, L.M; BARRETO, N.J.C.; REBOITA, M. S. ; RAMOS, A.M., **Changing Trends in Rainfall Extremes in the Metropolitan Area of São Paulo: Causes and Impacts**. *Front. Clim.* 2:3. doi: 10.3389/fclim.2020.00003, 2020

- NIMER, Edmon. Climatologia do Brasil. IBGE, 1989.
- PAMPUCH, L. A. ; AMBRIZZI, T. **Sistemas Frontais Sobre a América Do Sul Parte II: Climatologia e intervalo de passagem em dados de Reanálise I Do Ncep/Ncar.** In :IX **Workshop Brasileiro de Micrometeorologia.** Santa Maria-RS, Brasil, 2015.
- PAIVA, D.A., SÁFADI, T. Study of Tests for trend in time series. **Brazilian Journal of Biometrics**, Vol. 39 No. 2 , 2021.
- PEREZ e SILVA DIAS. Long-term study of the occurrence and time of passage of sea breeze in São Paulo, 1960-2009. **International Journal of Climatology**, v. 37, p. 1210-1220, 2017.
- PEREIRA F., A.J., SANTOS, P.M., XAVIER, T.M.B.S., **Evolução do tempo e do clima na região metropolitana de São Paulo.** São Paulo: Linear B; IAG/USP, 282p, 2007.
- POLI, P.; HERBACH, H., DEE, D. P.; BERRISFORD, P.; SIMMONS, A. J., VITART, F.; LALOYLAUX, P.; TAN, D. G. H.; PEUBEY, C.; THÉPAUT, J.; TRÉMOLET, Y.; HÓLM, E. V.; BONAVIDA, M.; ISAKSEN, L.; FISHER, M., ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century, **Journal of Climate**, 29(11), 4083-4097, 2016.
- POHLERT, T. **Non-parametric trend tests and change-point detection.** CC BY-ND, v. 4, 2016.
- REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. da. **Entendendo o tempo e o clima na América do Sul.** Terra e Didática, Campinas, SP, v. 8, n. 1, p. 34–50, 2015. DOI: 10.20396/td.v8i1.8637425.
- RODRIGUES, M. L.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geofísica.** 22. 135-151. 10.1590/S0102-261X2004000200004, 2004.
- SILVA DIAS, M.A.; DIAS, J.; CARVALHO, L.; FREITAS, E. ;SILVA DIAS, P. **Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil.** Climatic Change. 116. 705-722. 10.1007/s10584-012-0504-7, 2013.
- SUGAHARA S.; ROCHA R.; SILVEIRA R., Non-stationary frequency analysis of extreme daily rainfall in Sao Paulo, Brazil. **International Journal of Climatology.** 29. 1339 - 1349. 10.1002/joc.1760, 2009.
- SUN, X., COOK, K. H., e VIZY, E. K. The South Atlantic Subtropical High: Climatology and Interannual Variability, **Journal of Climate**, 30(9), 3279-3296, 2017.
- WALLACE, John M. ; HOBBS, Peter V. **Atmospheric Science: An Introductory Survey: Second Edition.** Elsevier , p. 504, 2006.

