Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

TENDÊNCIAS E VARIABILIDADE CLIMÁTICA DE FRENTES FRIAS E PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

Trends and climate variability of cold fronts and rainfall in the metropolitan region of Sao Paulo

Tendencias y variabilidad climática de frentes fríos y precipitaciones en la región metropolitana de Sao Paulo

Caroline Santos Segura
Programa de Pós-graduação em meteorologia, Universidade de São Paulo (USP)
caroline.segura@usp.br

Rosmeri Porfírio da Rocha
Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo (USP)
rosmerir.rocha@iag.usp.br

Resumo: As frentes frias desempenham um papel crucial no regime de precipitação no sudeste do Brasil, especialmente na região metropolitana de São Paulo (RMSP). A compreensão das tendências e variabilidades desses sistemas e da chuva associada é fundamental para avaliar impactos climáticos locais. Este estudo tem como objetivo analisar as características das frentes frias, a precipitação e seus extremos, contribuindo para melhorar a compreensão das tendências climáticas na região. Analisa ainda a habilidade da reanálise ERA-20C em capturar climatologia observada de frentes frias. Entre 1960-2010, uma média de 39,6 frentes frias por ano foram observadas na estação meteorológica localizada na RMSP. A ERA-20C mostrou resultados muito próximos com os obtidos das observações. 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 1960-2010, este critério resultou em 486 eventos extremos de precipitação, dos quais 290 podem estar relacionados com a passagem de frentes frias na RMSP. Foram analisadas tendências para séries temporais de precipitação, frequência de frentes frias e precipitação extrema através do teste Mann-Kendall. Apenas a série temporal de precipitação anual acumulada apresentou taxa de crescimento linear significativa.

Palavras-chave: Sistemas frontais. Percentil 95. Clima de São Paulo. ERA 20C.

Abstract: Cold fronts play a crucial role in the precipitation regime in southeastern Brazil, especially in the metropolitan region of São Paulo (RMSP). Understanding the trends and variabilities of these systems and the associated rainfall is essential for assessing local climate impacts. This study aims to analyze the characteristics of cold fronts, precipitation, and their extremes, contributing to an improved understanding of climate trends in the region. It also examines the ability of the ERA-20C reanalysis to capture the observed climatology of cold fronts. Between 1960 and 2010, an average of 39.6 cold fronts per year were observed at the meteorological station located in the RMSP. The ERA-20C showed results very close to those obtained from observations. Precipitation extremes 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 1960-2010, this criterion resulted in 486 extreme precipitation events, of which 290 may be related to the passage of cold fronts in the RMSP. Trends for time series of precipitation, cold front frequency, and extreme precipitation were analyzed using the Mann-Kendall test. Only the time series of accumulated annual precipitation showed a significant linear growth rate.

Keywords: Frontal systems. 95th Percentile.Climate of São Paulo. ERA 20C.

Resumen: Las frentes frías desempeñan un papel crucial en el régimen de precipitación en el sureste de Brasil, especialmente en la región metropolitana de São Paulo (RMSP). Comprender las tendencias y variabilidades de estos sistemas y la lluvia asociada es fundamental para evaluar los impactos climáticos locales. Este estudio tiene como objetivo analizar las características de las frentes frías, la precipitación y sus extremos, contribuyendo a mejorar la comprensión de las tendencias climáticas en la región. También examina la capacidad de la reanálisis ERA-20C para capturar la climatología observada de las frentes frías. Entre 1960 y 2010, se observó un promedio de 39.6 frentes frías por año en la estación meteorológica ubicada en la RMSP. La ERA-20C mostró resultados muy cercanos a los obtenidos de las observaciones. Los extremos de precipitación se identificaron utilizando el percentil 95 de la precipitación diaria (en mm) de cada mes, considerando solo los días con precipitación superior a 0 mm. En el período 1960-2010, este criterio resultó en 486 eventos extremos de precipitación, de los cuales 290 pueden estar relacionados con el paso de frentes frías en la RMSP. Se analizaron las tendencias para las series temporales de precipitación, la frecuencia de frentes frías y la precipitación extrema mediante la prueba de Mann-Kendall. Solo la serie temporal de precipitación anual acumulada mostró una tasa de crecimiento lineal significativa.

Palabras clave: Sistemas frontales. Percentil 95. Clima de São Paulo. ERA 20C.

Submetido em: 30/05/2023
Aceito para publicação em: 15/01/2024
Publicado em: 25/01/2024

1. INTRODUÇÃO

O tempo na América do Sul é afetado pela passagem de sistemas frontais durante todo o ano, fato que ocorre porque o continente está localizado 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, vorticidade e onde a pressão relativa é mais baixa (PAMPUCH; AMBRIZZI, 2015). 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 (CAVALCANTI e KOUSKY, 2003; SIMMONDS et al, 2012). A frequência de sistemas frontais no Hemisfério Sul também foi estudada por Simmonds et al. (2012), na qual foi apontada uma maior ocorrência de sistemas frontais sobre a faixa de latitude compreendida entre 40°S e 60°S.

Assim, a frequência de frentes frias nas porções ciclogenéticas da América do Sul (CRESPO et al., 2021) 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). A maior frequência de frentes frias em maiores latitudes também foi documentada por Cardozo et al. (2021).

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 os sistemas frontais, uma no interior, com sentido norte, localizada entre o norte da Argentina até a região ao oeste da Amazônia, enquanto a outra trajetória situa-se ao longo da costa leste do Brasil (CAVALCANTI; KOUSKY, 2003).

O estudo de Pampuch e Ambrizzi (2015), utilizando dados de reanálise, mostrou 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. Nesse 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). O

critério para identificação de frentes é similar ao usado por Jesus et al (2016), o qual avaliou a contribuição das frentes para a precipitação sazonal na bacia do Prata utilizando simulações de modelos regionais.

As frentes frias afetam o tempo durante todo o ano, especialmente nas regiões sul e sudeste da América do Sul, sendo sistemas importantes para a precipitação local, como discutido por Reboita et al. (2015) e são fenômenos de notável importância, desencadeando uma série de impactos nas condições de tempo e no clima (Silva et al., 2022). Por exemplo, no inverno as frentes frias contribuem com grande porcentagem da chuva sazonal, mas possuem fraca influência na formação de geadas no sul de Minas Gerais (Silva et al., 2014). Silva et al. (2022) investigaram frentes frias responsáveis por ventos intensos na região da bacia de Santos, destacando as características sinóticas desses eventos. Os seus resultados revelam que as frentes frias associadas a ventos intensos na bacia de Santos estão correlacionadas com cavados intensificados em médias e altas altitudes, bem como um robusto anticiclone pós-frontal, este último contribuindo decisivamente para um gradiente de pressão mais acentuado.

Considerando a cidade de São Paulo, as frentes frias destacam-se como um importante sistema sinótico contribuindo para a precipitação local. Além disso, 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 a 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 um dia 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 sazonal, enquanto no verão esta contribuição diminuiu para 41%; na primavera e 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 entre um sistema e outro é de onze dias.

No geral, a precipitação afeta significativamente a vida das pessoas, especialmente quando se trata de eventos extremos de precipitação. Tais eventos 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. As projeções feitas pelo sexto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês) possuem alta confiança em afirmar que eventos extremos de precipitação se tornem mais frequentes à medida que o aquecimento global avança, na escala global estima-se com alta confiança que estes eventos se intensifiquem em 7% a cada 1°C de aquecimento na média de temperatura global (MASSON-DELMOTTE et al., 2021). Neste contexto, Solari et al. (2022) mostrou que frentes frias mais intensas (vorticidade ciclônica mais intensa e maior teor de umidade) estão associadas com extremos de chuva no sul da América do Sul.

Um evento de precipitação extrema pode ser definido quando a precipitação acumulada 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 superiores 90, 95 e 98 (SUGAHARA; da ROCHA; SILVEIRA, 2009). Os relatórios de números cinco e seis do IPCC usaram 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 (SUGAHARA; da ROCHA; SILVEIRA, 2009; FIELD et al., 2012).

O método de identificação de extremos baseado nos percentis também foi utilizado por Sugahara, Da Rocha e Silveira (2009), no qual para a cidade de São Paulo (estação do IAG-USP) foi usado o percentil 99 nos dados de precipitação diária do período 1933-2005. Essa análise mostrou um aumento com o tempo 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 região metropolitana de São Paulo (RMSP) devido à rápida e crescente urbanização e ao aumento da concentração de poluentes. Estes autores analisaram também 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.

O objetivo desta pesquisa foi investigar as características das frentes frias, a precipitação e seus extremos na RMSP, avaliando tendências de aumento ou diminuição na frequência de frentes frias e precipitação associada, contribuindo para aprofundar o entendimento da variabilidade e tendências climáticas na RMSP. Adicionalmente, busca-se analisar a capacidade dos dados da ERA 20C em representar a variabilidade climática observada na frequência de frentes frias na RMSP.

2. METODOLOGIA

2.1. DADOS

Neste trabalho foram utilizados dados de temperatura e velocidade do vento do período 1960 a 2010 da Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG-USP), localizada no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (PEFI), bairro da Água Funda, na RMSP. Para o mesmo período, a construção da climatologia de precipitação extrema utilizou dados de precipitação horária, que foram acumulados para obter valores diários.

Para o mesmo período, também foram utilizados dados médios diários da reanálise centenária ERA-20C do ECMWF (POLI et al., 2016) de temperatura do ar e componente meridional do vento. Para isso, foi escolhido o ponto com latitude e longitude mais próximos da localização exata da estação meteorológica do IAG-USP (23º39’7’’S e 46º37’22’’W), que

corresponde à latitude e longitude 23ºS e 46ºW já que a resolução espacial dos dados de reanálise da ERA-20C é de 1º. A ERA-20C é um conjunto de dados de reanálise desenvolvido pelo ECMWF que assimila dados observacionais de pressão atmosférica e vento de próximo à superfície sobre os oceanos, e representa a primeira reanálise desenvolvida especialmente levando-se em consideração aplicações em climatologia (POLI et al., 2016).

A seleção do período de estudo baseia-se principalmente na disponibilidade de dados da ERA-20C, que abrange o intervalo de 1900 a 2010. Dessa maneira, optou-se por focar a análise no período 1960-2010 que possui sobreposição temporal entre os dados da estação meteorológica do IAG-USP e da ERA-20C. Embora o período escolhido não abranja anos mais recentes, especialmente em relação aos dados de precipitação disponíveis na estação do IAG-USP, ainda assim compreende um intervalo de 50 anos, considerado adequado para capturar a variabilidade climática associada à passagem de frentes frias pela RMSP.

2.2. Critérios para identificação de frentes frias

A implementação de um algoritmo para identificação de frentes frias usando critérios objetivos, considerou a ocorrência simultânea de: giro do vento meridional 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 após. Este método objetivo de identificação de frentes frias foi também utilizado por Rodrigues et al. (2004), Dametto e Rocha (2005), Jesus (2014), sendo semelhante ao utilizado por Pampuch e Ambrizzi (2015).

2.3. Critério para identificação dos extremos diários de chuva

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. Desta forma, foram obtidos os valores apresentados na Tabela 1, onde os menores extremos (~19 mm/dia) ocorrem em julho-agosto e o maior em fevereiro (47,68 mm/dia). Este método é semelhante ao usado por Sugahara, Da Rocha e Silveira (2009), onde os autores estudaram extremos de precipitação baseados nos percentis 90%, 95% e 98%.

Tabela 1- Valores mensais do percentil 95% de precipitação calculados a partir da climatologia de 1960-2010 do IAG.

Mês	Valores do percentil 95% de precipitação (mm)
Janeiro	42,60
Fevereiro	47,58
Março	37,51
Abril	28,19
Maio	24,04
Junho	21,22
Julho	19,72
Agosto	19,34
Setembro	23,23
Outubro	31,97
Novembro	33,00
Dezembro	36,80

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

2.4. Critério para identificação de tendências e magnitude de tendências em séries temporais

O teste Mann-Kendall tem como funcionalidade a detecção de tendência em séries temporais. É um teste não paramétrico, pois não assume que os dados sigam uma determinada distribuição de probabilidade e é bastante eficaz para identificar tendências monotônicas em uma série temporal (POHLERT, 2016).

A hipótese nula (H0) para o teste de Mann Kendall é que não existe tendência, a hipótese alternativa é que a série apresenta tendência monotônica (crescente ou decrescente). O teste compara a direção das diferenças entre pontos sucessivos na série temporal. Se a maioria das diferenças for positiva, isso indica uma tendência crescente; se a maioria for negativa, indica uma tendência decrescente. A estatística de teste é baseada na contagem dessas diferenças. A significância estatística é então avaliada para determinar se rejeitamos a hipótese nula em favor da hipótese alternativa (POHLERT, 2016).

O teste de Mann Kendall é calculado como:

(1) $$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} sgn(Xj - Xk)$$

Onde:

1, se x > 0

(2) sgn = 0, se x = 0

-1, se x <0

Em amostras extensas, conforme descrito por Mann (1945) e Kendall (1975), estatística S assume uma distribuição aproximadamente normal, com média zero e variância σ² que pode ser expressa por:

$$(3)\ \sigma^2(S) = N(N-1)(2N+5)/18$$

Na equação (3) o termo N se refere ao tamanho da amostra de dados. A significância da estatística do teste S pode ser avaliada por meio de um teste bilateral, que é dado por:

$S - 1/\sqrt{\sigma}$, se S > 0

(5) Z = 0, se S = 0

S+1/√σ, se S < 0

O teste de hipótese assume que a H0 é verdadeira dado que a série temporal não apresenta tendência monotônica. O teste calcula a probabilidade de não apresentar tendência no conjunto de dados, usando como referência o p-valor, com frequência menor ou igual a 0,05 (POHLERT, 2016). A hipótese nula H0 não pode ser validada quando $|Z| > Z_{\propto/2}$, tal que α é o p-valor escolhido e $Z_{\propto/2}$ é a variável padronizada para a distribuição normal, considerando a região da cauda direita da distribuição padrão (SANTOS, PORTELA; 2007). Neste trabalho, para avaliar a significância estatística das possíveis tendências nas séries temporais, o p-valor foi escolhido como 0,05.

A magnitude da tendência é calculada através do teste de Sen's Slope (POHLERT, 2016), no qual é a taxa de mudança linear da variável é dada por:

$$(6)\ d = (Xj - Xi)/(j-1)\ ,\ para\ 1 < i < j \leq N$$

Na equação (6) X é a variável, d é a declividade, i e j são os índices. 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 precipitação anual, o teste de magnitude de tendência de

Sen's Slope quantifica em média quanto a precipitação anual mudou em cada ano da série temporal.

3. RESULTADOS

3.1. Climatologia de frentes frias

Para avaliar se a climatologia de frentes frias obtida a partir dos dados de reanálise da ERA-20C representam a climatologia de frentes frias observada através dos dados da estação do IAG-USP foi feita uma comparação entre a quantidade de frentes identificadas pelo algoritmo e a média anual de frentes frias utilizando para o período de 1960-2010 de ambos os conjuntos de dados.

A Tabela 2 mostra resumidamente as diferenças encontradas entre as duas análises, temos que o algoritmo identificou uma quantidade menor de frentes frias nos dados da ERA-20C, fornecendo uma média anual menor, de 36,06 frentes por ano. A média anual da frequência de frentes frias identificada a partir dos dados do IAG-USP é igual a 39,6, também apresentada na Tabela 2. Foi observada uma diferença de 176 frentes entre os dois conjuntos de dados analisados.

Tabela 2- Comparação entre climatologia de frentes frias ERA-20C e IAG-USP entre 1960-2010.

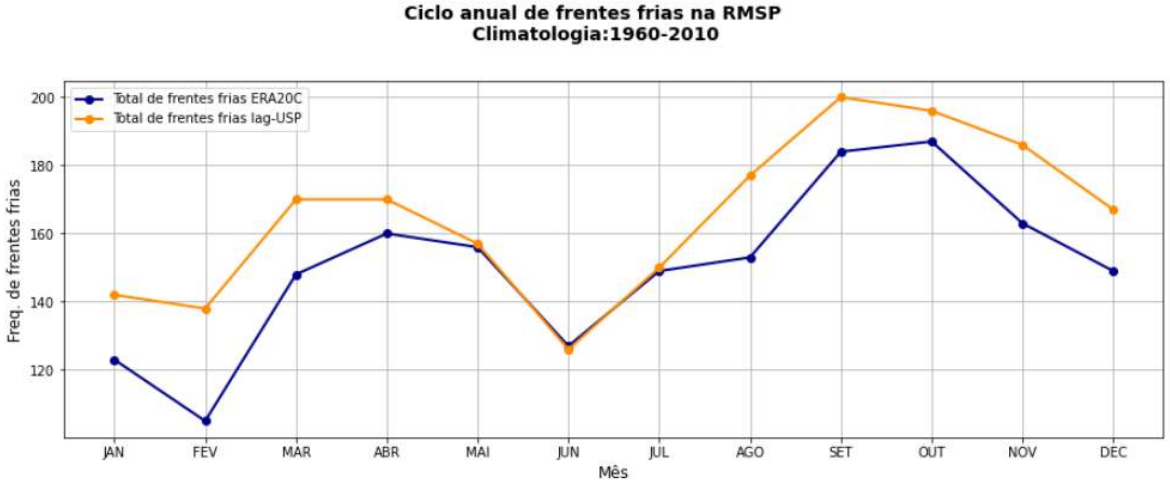
Conjunto de dados	Quantidade total de frentes	Média anual de frentes
ERA-20C	1803	36,0
IAG-USP	1979	39,6

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Para ambos os conjuntos de dados temos as maiores médias mensais de frentes frias nos meses de setembro e outubro e as menores nos meses de janeiro, fevereiro e junho (Figura 1). Assim, de acordo com as informações de variabilidade mensal média apresentadas na Figura 1, é possível dizer que o conjunto de dados de reanálise da ERA-20C é capaz de representar adequadamente a variabilidade sazonal de frequência de frentes frias na RMSP, quando comparada com os dados medidos na estação meteorológica do IAG-USP. Os valores mostrados na Figura 1 são ligeiramente menores do que os encontrados por Rodrigues et al (2004) para a climatologia das frentes frias no litoral de Santa Catarina. Entretanto, apesar das diferenças nas médias mensais, Rodrigues et al. (2004) também observou valores maiores na

frequência de frentes frias nos meses de setembro, outubro e novembro e valores menores em junho, janeiro e fevereiro. A menor frequência de frentes frias no mês de junho pode ser explicada pela atuação da ASAS. Segundo Bastos e Ferreira (2000) e Reboita et al. (2019) a variabilidade sazonal da intensidade da ASAS ao longo do ano é muito importante para o clima da região sudeste do Brasil e durante os meses de junho, julho e agosto pode inibir a passagem de frentes frias na região sudeste do Brasil. A correlação de Pearson entre as séries temporais apresentadas na Figura 1 é de 0,89, indicando a grande habilidade da ERA-20C em capturar a fase do ciclo anual observado.

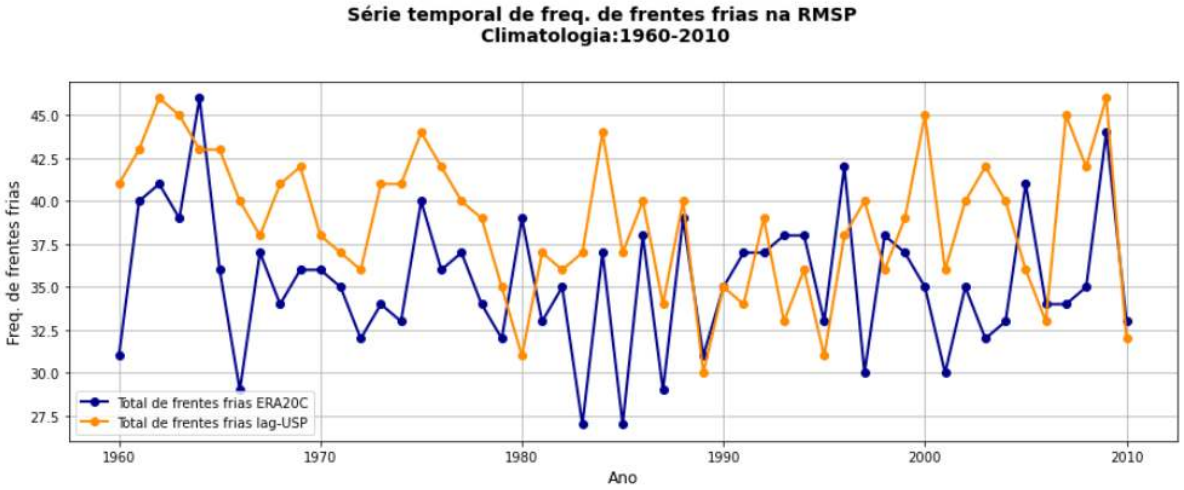
Figura 1 - Ciclo anual do número de frentes frias considerando os dados da ERA-20C e os dados da estação meteorológica do IAG-USP no período 1960-2010**.**



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A série temporal de frequência de frentes frias é apresentada na Figura 2. Nota-se que ambas as séries exibem uma grande variabilidade interanual. O coeficiente de correlação de Pearson para as séries temporais é igual a 0,33, evidenciando correlação relativamente baixa. Apesar de ambas as séries apresentarem algumas defasagens, existem períodos onde a variabilidade é similar, apesar das diferenças nas frequências anuais totais, como para 1970-1980.

Figura 2 - Série temporal de frequência anual de frentes frias considerando os dados da ERA-20C e os dados do IAG-USP.

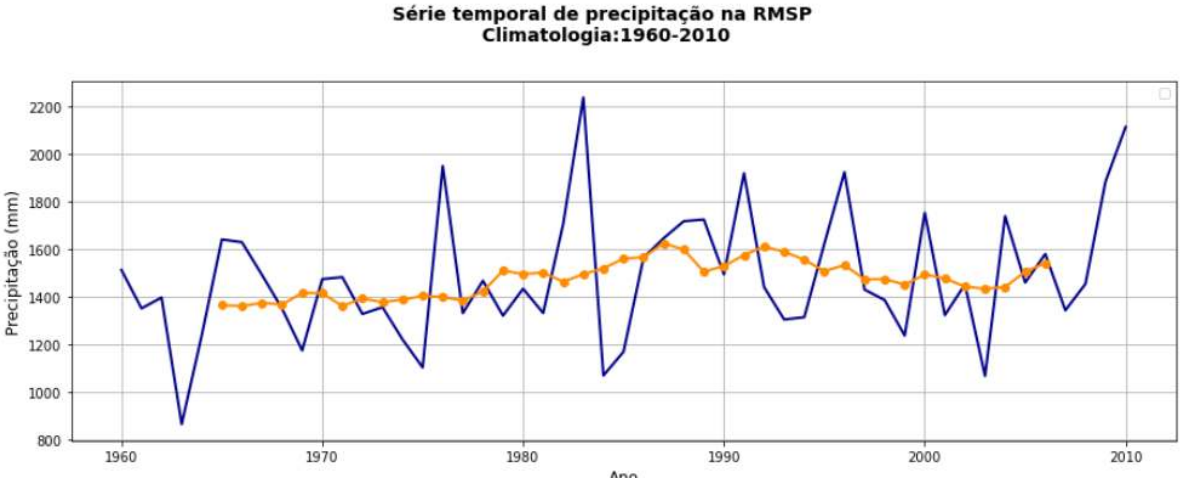


Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

3.2. Climatologia de precipitação

A série temporal dos totais de precipitação anual (Figura 3) evidencia que a precipitação anual para a RMSP sofreu diversas mudanças ao longo do período analisado. Para todo o período, a média de precipitação anual é de 1481,36 mm. Alguns anos se destacam: o ano com o menor total anual de precipitação foi o ano de 1963, com apenas 866,5 mm. Em contraste, o ano com maior quantidade total de precipitação foi o ano de 1983, com 2236,0 mm.

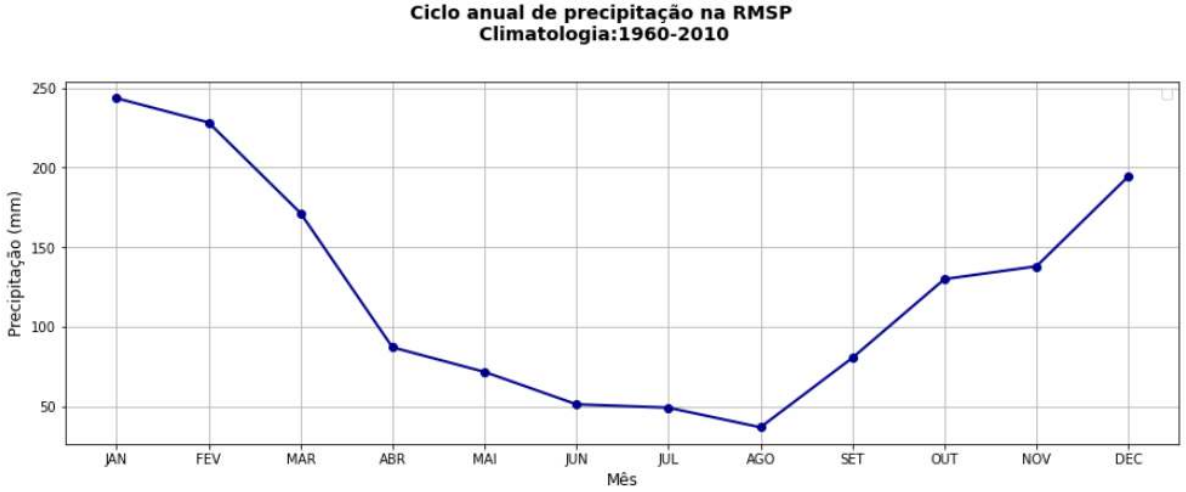
Figura 3 -Série temporal para o IAG-USP (1960-2010) da precipitação total anual (curva em azul) e a sua média móvel com janela igual a 10 anos (curva laranja).



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A Figura 4 apresenta a sazonalidade da precipitação na RMSP, 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 em maio, junho, julho e agosto, mês com o menor total de precipitação, menos de 50 mm. A sazonalidade evidenciada na Figura 4 é muitíssimo semelhante à da Figura 1 apresentada por Sugahara et al. (2009), onde a climatologia mensal de precipitação para a RMSP foi obtida no período de 1933-2005 para a mesma da estação meteorológica do IAG-USP.

Figura 4 - Média mensal de precipitação para a RMSP calculada a partir dos dados da estação meteorológica do IAG-USP para o período 1960-2010**.**



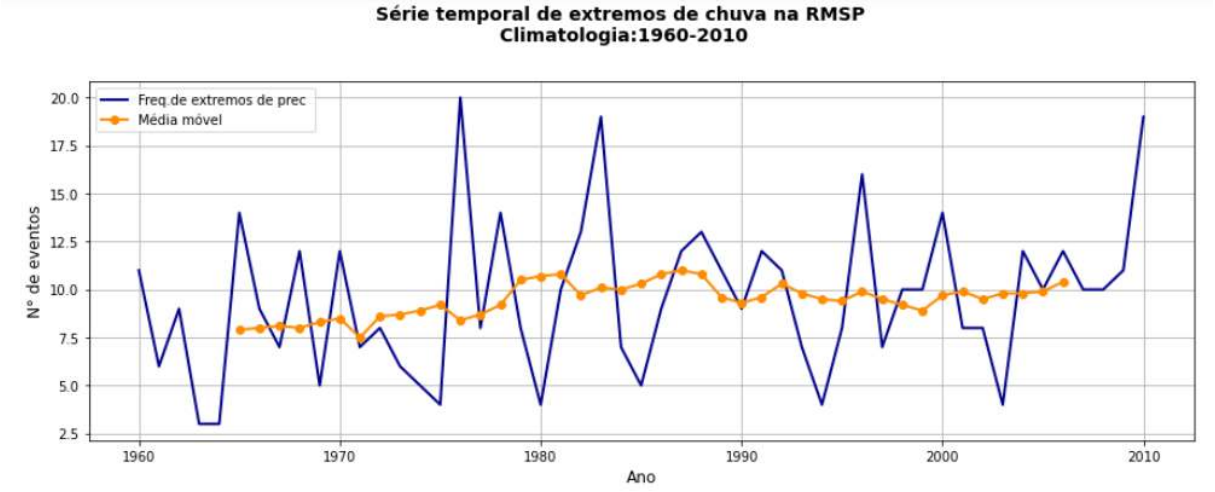
Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

3.3. Climatologia de eventos de precipitação extrema diária

Na Figura 5, a série temporal de número de eventos de precipitação extrema diária na RMSP apresenta uma aparente tendência crescente na frequência de extremos do período entre 1960 e 1990. De 1990 até 2000 nota-se uma tênue queda na média móvel de eventos extremos. O ano de 1976 destaca-se como o ano com maior número de ocorrências de extremos dentro do período analisado, totalizando 20 eventos diários de extremos de chuva. É interessante notar que 1976 não foi o ano com o maior acumulado de precipitação anual para o período analisado. Em contrapartida, em 1963 foram identificados apenas 3 eventos diários extremos de chuva, sendo este também o ano com o menor acumulado anual de precipitação. Ao longo dos 50 anos foram identificados 27 eventos de precipitação superior a

80 mm por dia, sendo 2006 o ano em que mais ocorreram extremos dessa intensidade, totalizando 3 eventos. A série temporal de extremos superiores a 80 mm por dia é mostrada na Figura 6 e indica que tais eventos não são comuns na RMSP, visto que o maior número observado em um único ano foi de apenas 3, ainda assim, após o ano 2000, a ocorrência deste tipo de extremo aparenta maior frequência.

Figura 5 - Série temporal da frequência absoluta de eventos extremos (acima do percentil de 95%) diários de precipitação para a estação meteorológica do IAG para o período 1960-2010**.**



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Figura 6 -Série temporal da quantidade de eventos extremos diários de precipitação superiores a 80 mm por dia para a RMSP para os dados da estação meteorológica do IAG-USP para o período 1960-2010**.**

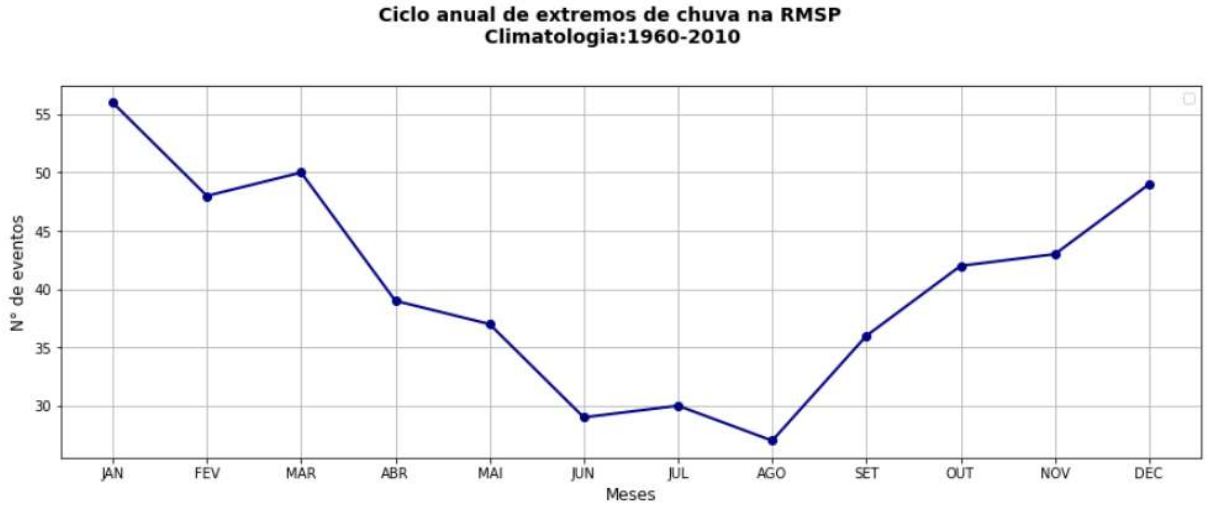


Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A Figura 7 apresenta o ciclo anual do número de eventos extremos de precipitação entre 1960-2010. Nota-se 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 7 pode ser comparada com o ciclo anual de eventos extremos apresentado em Liebmann, Jones e De Carvalho (2001), onde também se tem 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, mas com critério para identificação de eventos extremos sendo diferente do empregado neste trabalho, ou seja, utilizaram a 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 sazonalidade da Figura 7 também é compatível com o ciclo anual de extremos diários de precipitação apresentado no trabalho de Sugahara et al. (2009), onde os eventos extremos foram identificados utilizando o percentil 99%, expondo uma quantidade menor ou igual 30 extremos para os meses de julho, agosto e setembro e acima de 55 eventos para o mês de janeiro, seguido de 50 eventos em março.

Figura 7 - Ciclo anual da frequência absoluta de eventos extremos (95%) de precipitação diária para os dados do IAG-USP para o período 1960-2010**.**



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

3.4. Contribuição das frentes frias para eventos diários extremos de chuva

A aplicação do método (percentil de 95%) de identificação de extremos de precipitação resultou em 486 eventos extremos durante o período de 1960 a 2010, dos quais 290 foram relacionados com a passagem de uma frente fria pela RMSP. Cruzando a informação de ocorrência de chuva extrema com a de passagem de frentes frias pela região, é possível afirmar que 78 eventos ocorreram exatamente no dia da passagem da frente fria, 98 eventos ocorreram um dia antes, 44 eventos ocorreram dois dias antes, 27 eventos ocorreram um dia após e 43 eventos aconteceram dois dias após a passagem da frente fria. Desta forma foi possível associar a contribuição das frentes frias para a ocorrência de eventos extremos diários de chuva na RMSP. Para estimar essa contribuição foram considerados os eventos extremos que ocorreram em um período de 5 dias, desde dois dias antes até dois dias depois, centrado na passagem da frente fria. Estimando-se, desta forma, que as frentes frias contribuíram com 59,67% da precipitação extrema ocorrida em 1960-2010.

Também foi avaliada da mesma forma a contribuição das frentes frias para a precipitação acumulada. Para o período 1960-2010 a estação meteorológica do IAG-USP registrou um acumulado de precipitação de 75.579,30 mm, sendo 49,46% desse acumulado associado com as passagens de frentes frias pela região.

Considerando a contribuição de frentes frias para a precipitação no verão, tem-se o percentual de 49,01% e para o inverno esse percentual aumenta para 64,79%. Apesar de apresentarem diferenças nos valores absolutos, a variabilidade sazonal (menor no verão e maior no inverno) da contribuição das frentes frias para a precipitação é semelhante à encontrada por Dametto e da Rocha (2005). Neste estudo, para o período 1981-2002 as frentes frias contribuíram com 59% da chuva no inverno e 41% no verão, de forma que torna mais evidente a relevância das frentes frias para a precipitação especialmente durante o período de inverno.

3.5. Análise das tendências das séries temporais

A Tabela 3 mostra resumidamente o resultado do teste de tendência de Mann-Kendall para cada uma das séries temporais anuais analisadas. O teste apenas identificou tendência

de diminuição na série temporal de frequência anual de frentes frias identificada a partir dos dados da estação meteorológica do IAG-USP. Não foram identificadas tendências nas outras séries temporais, todas analisadas para o período de 1960-2010. A magnitude da tendência é a taxa de mudança linear da variável analisada com o intervalo de tempo utilizado na série temporal.

Na Tabela 3 é possível observar que a única série temporal que apresenta magnitude de tendência relevante é a série temporal de precipitação anual acumulada, onde há taxa de aumento de 3,95 mm por ano. Tal tendência é comparável à obtida por Silva Dias et al. (2013), onde a mudança linear na precipitação anual é de 5,518 mm/ano. A diferença na magnitude da tendência pode ser explicada pela diferença de tamanho nas séries temporais, pois Silva Dias et al. (2013) utilizou o período de 1933 a 2010 do IAG-USP, desta forma, há uma diferença de 27 anos entre as duas séries.

A tendência de aumento na série temporal de precipitação acumulada pode ser reflexo do crescimento da frequência de eventos de precipitação extrema, conforme salientado por Marengo et al. (2020) e indicado pela Figura 6 (extremos acima de 80 mm/dia). Vários autores discutem os fatores que contribuem para esse aumento, incluindo a crescente urbanização no estado de São Paulo, como em Sugahara et al. (2012) que compararam séries temporais do IAG-USP com outras nas vizinhanças e com menor efeito urbano. Machado et al. (2021) também evidenciou que áreas mais urbanizadas apresentam maiores tendências de aumento na precipitação e de eventos extremos. Adicionalmente, variações associadas a fenômenos de baixa frequência, como apontado por Silva Dias et al. (2013), são consideradas elementos explicativos, como a Oscilação Decadal do Pacífico e a Oscilação do Atlântico Norte, que segundo os autores possivelmente respondem por 85% do aumento da precipitação extrema na RMSP.

Tabela 3- Tendência e magnitude de tendência das séries temporais de frequência de frentes frias, precipitação anual total e extremos (95%) diários de chuva.

Série temporal	Tendência	Magnitude de tendência
Frequência anual de frentes frias (ERA-20C)	–	-0.23
Frequência anual de frentes frias (IAG-USP)	Diminuição	-0.083
Precipitação anual acumulada	—	3.95
Eventos diários totais de precipitação extrema anual	—	0.07

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o período 1960-2010, foram contabilizadas 1803 frentes frias na ERA-20C, com frequência média anual de 36 sistemas e na série do IAG, foram identificadas 1979 frentes, com média anual de aproximadamente 39,6 frentes por ano, com maiores frequências durante o inverno e início da primavera e, as menores frequências nos meses de verão. Tanto dos dados da IAG quanto da ERA-20C, os ciclos anuais apresentaram ocorrências mínimas de frentes frias no mês de junho, o que pode estar relacionado com o fortalecimento do vento de norte e a exigência do algoritmo em persistência de vento de sul no dia após a frente. Dessa forma, com o vento de norte mais intenso, as condições tornam-se menos favoráveis para a persistência do vento de sul por mais um dia.

Analisando a contribuição das frentes frias para ocorrência de extremos de precipitação, no período de 1960 a 2010 ocorreram 486 extremos, dos quais 78 no dia exato da passagem da frente fria pela RMSP, 98 ocorreram um dia antes, 44 ocorreram dois dias antes, 27 ocorreram um dia após e 43 eventos aconteceram dois dias após a passagem da frente fria. Desta forma, foi possível relacionar 59,67% dos extremos de precipitação com as passagens de frentes frias na RMSP. Além da contribuição das frentes frias para a precipitação extrema, também foi avaliada a contribuição para a precipitação sazonal, sendo esta contribuição de 49,01% para a precipitação do verão e de 64,79% para a precipitação do inverno.

A análise de tendências e magnitude de tendências nas séries temporais de precipitação, precipitação extrema e frequência anual de frentes frias mostrou que apenas a

série de frequência anual de frentes frias apresentou tendência considerada estatisticamente significativa pelo teste Mann-Kendall, embora com magnitude de tendência muito pequena de -0.083. A única série temporal com magnitude de tendência relevante é a série de precipitação anual acumulada, com magnitude de aumento de 3,95 mm/ano.

A compreensão de situações sinóticas que conduzem a ocorrência de eventos de chuva extrema associados com a passagens de frentes frias pela RMSP ainda é bastante preliminar, sendo necessários e de grande importância estudos que aprofundem o diagnóstico e prognóstico de tais situações na RMSP. Portanto, em um estudo futuro que analise os padrões sinóticos de variáveis atmosféricas (vento, temperatura, pressão, etc.) é de extrema relevância para a região, que ano a ano está sujeita às enchentes e deslizamentos.

REFERÊNCIAS

BASTOS, Camilla; FERREIRA, Nelson. Análise Climatológica da Alta Subtropical do Atlântico Sul. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11,2000. Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro, 2000.

BROLLO, Maria; FERREIRA, Claudio. Indicadores de desastres naturais no Estado de São Paulo. *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 11,2009. Águas de São Pedro. **Anais** [...]. Águas de São Pedro: Sociedade Brasileira de Geologia, 2009.

CARDOZO, Amanda Balbino; REBOITA, Michelle Simões; GARCIA, Sâmia Regina. Climatologia de frentes frias na América do Sul e sua relação com o modo anular sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, 2021.

CAVALCANTI, Iracema; KOUSKY, Vernon. Climatology of South American cold fronts, *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY,8, 2003, Wellington, Nova Zelândia. **Anais** […]. Wellington: American Meteorological Society, 2003.

CRESPO, Natalia Machado *et al.* A potential vorticity perspective on cyclogenesis over center-eastern South America. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 1, p. 663-678, 2021.

DAMETTO, Guilherme Santini. Características climáticas dos sistemas frontais na cidade de São Paulo*. In* :CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14, 2005. Rio de Janeiro. **Anais** […]. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2005.

FIELD, Christopher B*. et al.* **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, 2012.

MASSON-DELMOTTE, Valérie *et al*. Summary for Policymakers. *In:* **Climate Change 2021**: the Physical Science Basis: contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Cambridge: Cambridge University Press. 2021. p. 3-30.

JESUS, Eduardo Marco de *et al*. Contribution of cold fronts to seasonal rainfall in simulations over the southern La Plata Basin. **Climate Research**. v. 68, n. 2-3, p. 243-255, 2016.

JESUS, Eduardo Marco de. **Simulações climáticas regionais para o CORDEX sobre a América do Sul e impactos das frentes frias na climatologia simulada.**2014**.** Dissertação (Mestrado em meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, Brasil, 2014.

KENDALL, Maurice George, **Rank Correlation Methods**, 4. ed. Londres: Charles Griffin, 1975.

LIEBMANN, Brant *et al*. 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.

MACHADO, Carolyne Bueno *et al*. Extreme Rainfall Events in the Macro metropolis of São Paulo: trends and Connection with Climate Oscillations. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 60, n. 5, p. 661-675, 2021.

MANN, Henry Berthold. Non-parametric test against trend, **Econometrica**, v. 13, 245-259, 1945.

MARENGO, Jose Alberto *et al*. Changing Trends in Rainfall Extremes in the Metropolitan Area of São Paulo: causes and Impacts. **Frontiers in Climate***,* v. 2, p.3, 2020.

PAMPUCH, Luana Albertani; AMBRIZZI, Tércio. Sistemas Frontais Sobre a América Do Sul Parte I: climatologia e intervalo de passagem em dados de Reanálise I Do Ncep/Ncar. *In*: WORKSHOP BRASILEIRO DE MICROMETEOROLOGIA, 9, 2015.Santa Maria. **Anais** [...]. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2015.

POHLERT, Thorsten. Non-parametric trend tests and change-point detection**. CC BY-ND**, v. 4, p. 1-18, 2016.

POLI, Paul *et al*. ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century. **Journal of Climate**, v**.**29, n. 11, p. 4083-4097, 2016.

REBOITA, Michelle Simões *et al*. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terra e Didática**, v. 8, n. 1, p. 34–50, 2015.

REBOITA, Michelle Simões *et al*. The South Atlantic subtropical anticyclone: present and future climate. **Frontiers in Earth Science**, v. 7, p. 8, 2019.

RODRIGUES, Maria Laura Guimarães; FRANCO, Davide; SUGAHARA, Shigetoshi. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 22, n. 2, p. 135–151, 2004.

SANTOS, João Filipe; PORTELA, Maria Manuela. Tendências em séries de precipitação mensal em Portugal continental: aplicação do teste de Mann-Kendall. *In:* SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E

RECURSOS HIDRÍCOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 8, 2007. São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo, 2007.

SILVA DIAS, Maria Assunção Faus da *et al*. Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. **Climatic Change**, v. 116, p. 705-722, 2013.

SILVA, Jamyle Magalhães da *et al*. Cold fronts responsible for intense winds in the Santos Basin, Brazilian Southeast Offshore Region. **Atmósfera**, v. 37, p. 533–550, 2022.

SIMMOND, Ian; KEAY, Kevin; BYE, John Arthur Tristram. Identification and Climatology of Southern Hemisphere Mobile Fronts in a Modern Reanalysis, **Journal of Climate**, v. 25, n. 6, p. 1945-1962, 2012.

SOLARI, Florencia; BLAZQUEZ, Josefina; SOLMAN, Silvina. Relationship between frontal systems and extreme precipitation over southern South America. **International Journal of Climatology**, v. 42, n.15, p. 7535-7549, 2022.

SUGAHARA, Shigetoshi *et al*. Homogeneity assessment of a station climate series (1933-2005) in the Metropolitan Area of São Paulo: Instruments change and urbanization effects. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 107, 2012.

SUGAHARA, Shigetoshi; ROCHA Rosmeri Porfírio da; SILVEIRA, Reinaldo., Non-stationary frequency analysis of extreme daily rainfall in Sao Paulo, Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 29, p. 1339 - 1349, 2009.