

# EFEITO DA OROGRAFIA NAS CHUVAS POR MEIO DA ANÁLISE DE ÍNDICES CLIMÁTICOS NA REGIÃO DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA

<https://doi.org/10.4215/rm2023.e22030>

Santos, B. C. <sup>a\*</sup> - Sanches, R. G. <sup>b</sup> - Neves, G. Z. F. <sup>c</sup> - Souza, P. H. <sup>d</sup>

(a) Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8218-6803>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/3575388027991557>.

(b) Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2471-5070>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/2395726310692375>.

(c) Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3952-8238>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/7502283592528073>.

(d) Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0399-9123>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/1955052278935490>.

## Article history:

Received 17 December, 2020

Accepted 8 October, 2023

Published 25 October, 2023

## (\*) CORRESPONDING AUTHOR

**Address:** Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Paulo, 05508-010, SP, Brasil.

**E-mail:** phsouza31@hotmail.com

## Resumo

A presente pesquisa analisou o efeito do relevo na variabilidade e nos extremos das chuvas, na porção central do estado de São Paulo, utilizando 31 postos pluviométricos de superfície. Para isso, aplicou os métodos de preenchimento de falhas (Ponderação Regional), classificação das chuvas (Índices de Anomalia de Chuva) e índices de precipitação (Rclimdex). Por meio dos métodos utilizados, verificou-se que a variabilidade pluviométrica mostrou nos parâmetros admitidos de normalidade com cerca de 17% dos anos, nos parâmetros úmidos cerca 18% dos anos e nos parâmetros secos cerca de 15% dos anos da série histórica de 1979-2017. Além disso, verificou-se que entre os trinta e oito anos da série histórica, que o ano de 1983 foi o mais chuvoso e ano de 2014 o mais seco. Por tratar-se de dois anos representativos distintos (úmido e seco) de pluviosidade, notou-se por meio dos índices de chuva, evidenciaram a força do efeito orográfico na intensificação das chuvas em volume e número de dias extremos nas regiões mais elevadas localizadas na porção meridional da área de estudo. Portanto, em razão da altitude que se manifesta associada a um acentuado desnível altimétrica que estabelece uma declividade elevada, que a região central do estado de São Paulo possui, suas características morfológicas cumprem um papel importante com o processo de intensificação das chuvas, principalmente nos anos chuvosos.

**Palavras-chave:** Precipitação; Índice de anomalia de chuva; Anos extremos; Rclimdex; Relevo.

## Abstract / Resumen

### EFFECT OF OROGRAPHY ON RAINS THROUGH THE ANALYSIS OF CLIMATE INDEXES IN THE WESTERN PLATEAU REGION OF PAULISTA

The present research analyzed the effect of relief on the variability and extremes of rainfall in the central portion of the state of São Paulo, using 31 surface rainfall gauges. For this, it applied the methods of filling gaps (Regional Weighting), rainfall classification (Rain Anomaly Indexes) and precipitation indexes (Rclimdex). Through the methods used, it was verified that the pluviometric variability showed in the admitted parameters of normality with about 17% of the years, in the wet parameters about 18% of the years and in the dry parameters about 15% of the years of the historical series of 1979 -2017. In addition, it was found that among the thirty-eight years of the historical series, the year 1983 was the wettest and the year 2014 the driest. As these were two distinct representative years (wet and dry) of rainfall, it was noted through the rainfall indexes, they showed the strength of the orographic effect in the intensification of rainfall in volume and number of extreme days in the higher regions located in the southern portion of the study area. Therefore, due to the altitude that manifests itself associated with a sharp altimetric difference that establishes a high slope, which the central region of the state of São Paulo has, its morphological characteristics play an important role with the process of intensification of the rains, mainly in the years rainy.

**Keywords:** Precipitation; Rainfall anomaly index; Extreme years; Rclimdex; Relief.

### EFFECTO DE LA OROGRAFÍA SOBRE LAS LLUVIAS A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE ÍNDICES CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN DEL MESETA OCCIDENTAL DE PAULISTA

Esta investigación analizó el efecto del relieve sobre la variabilidad y los extremos de las precipitaciones, en la parte central del estado de São Paulo, utilizando 31 estaciones pluviométricas de superficie. Para ello aplicó los métodos de llenado de vacíos, clasificación e índices de precipitación. A través de estas aplicaciones se verificó que la variabilidad de las precipitaciones de los años de la serie histórica 1979-2017 mostró normalidad en los parámetros aceptados en alrededor del 17%, en los parámetros húmedos alrededor del 18% y en los parámetros secos alrededor del 15%. Además, se encontró que entre los treinta y ocho años, el año 1983 fue excepcionalmente el más húmedo y el año 2014 fue el excepcionalmente más seco. Al tratarse de dos años distintos representativos (húmedo y seco) de precipitaciones, se observó la influencia del efecto orográfico en la intensificación de las precipitaciones en volumen y número de días extremos en las regiones más altas ubicadas en la porción sur del área de estudio. Por lo tanto, debido a la altitud que está asociada a un pronunciado desnivel altimétrico que establece una alta pendiente, que tiene la región central del estado de São Paulo, sus características morfológicas juegan un papel importante en el proceso de intensificación de las lluvias, especialmente en los años lluviosos.

**Palabras-clave:** Precipitación; Índice de anomalías de lluvia; Años extremos; Rclimdex; Alivio.

## INTRODUÇÃO

As chuvas, com suas variações temporais e espaciais advindas das oscilações climáticas, pois, contribuem com a delimitação dos padrões atmosféricos e auxiliam por conta da gravidade dos impactos ocasionados pelos eventos extremos, com o planejamento das atividades econômicas.

A análise da variabilidade das precipitações na escala regional, sobretudo no clima tropical, tem a pluviosidade como o *input* do volume hídrico pelo suprimento dos recursos hídricos na superfície, tornando preocupante qualquer alteração atmosférica que incida sobre o padrão das chuvas reduzindo seu volume ou distribuição ao longo do ano (RIBEIRO et al., 2014).

Muito embora a atmosfera tenha se apresentado ao longo da história humana como um domínio de regularidade, encontra-se em processo de reordenamento e mudanças, devido às ações humanas que modificam permanentemente sua composição, em escala local, como a mudança do uso do solo que contribuiu com a alteração promovida no albedo da superfície.

Infelizmente tal conjuntura ocasiona sérios problemas para a população e ecossistemas estabelecidos numa determinada área que não se encontra preparada para lidar com as consequências dos eventos extremos que lhe proporcionam aguaceiros (SANCHES et al., 2018), inundações (ABREU et al., 2017) e seca (SETH et al., 2015).

Como as chuvas derivam dos fenômenos atmosféricos que interagem com a superfície terrestre por meio da troca de calor e umidade (GOUVEA et al., 2018), toda mudança que promova essa reordenação na sua habitualidade pode ocasionar uma reorganização regional e local da precipitação que venha a redefinir sua distribuição espacial e anual, bem como nas tendências extremas do seu volume diário (ALVES et al., 2010; SANCHES et al., 2022).

Portanto, compreender o comportamento temporal e espacial da precipitação em áreas tropicais é de extrema relevância, considerando seu impacto na dinâmica urbana e rural e, assim, em seu planejamento estratégico. Nessa mesma perspectiva, a orografia é um fator que pode contribuir nesse processo desencadeado pela atmosfera, apresentando influências espaciais por meio das particularidades regionais de cada superfície topográfica e altimétrica.

Atentando para a gravidade dessa conjuntura que vai se firmando com um novo padrão climático de eventos extremos sobre as diferentes porções do planeta, o presente estudo procurou verificar os efeitos orográficos no padrão da precipitação durante o recorte histórico de 38 anos (1979-2017) na região central do estado de São Paulo.

## METODOLOGIA

### CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo, possui cerca de 9.151,7 km<sup>2</sup> e está inserida parcialmente dentro da Área de Proteção Ambiental (APA) Corumbataí, integrando um total de 17 municípios paulistas. A região passou por uma grande transformação no espaço geográfico nos últimos 35 anos, em especial a conversão de pastagens para monocultura de cana-de-açúcar, devido às características do solo e do clima e também pela posição estratégica que a região possui para as atividades agrícolas (BUENO et al., 2022).

Em termos geomorfológicos (Figura 1) do Estado de São Paulo, a área encontra-se localizada entre a transição do Planalto Ocidental, formada numa grande zona de relevo suave compostas por colinas, morros baixos e serras, com uma altitude média aproximadamente de 900m e a Depressão Periférica Paulista, apresentando um relevo predominantemente colinoso e suave, além de morros e serras isoladas com níveis de aproximadamente 600m (ROSS; MOROZ, 1996).

EFEITO DA OROGRAFIA NAS CHUVAS POR MEIO DA ANÁLISE DE ÍNDICES CLIMÁTICOS NA REGIÃO DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA

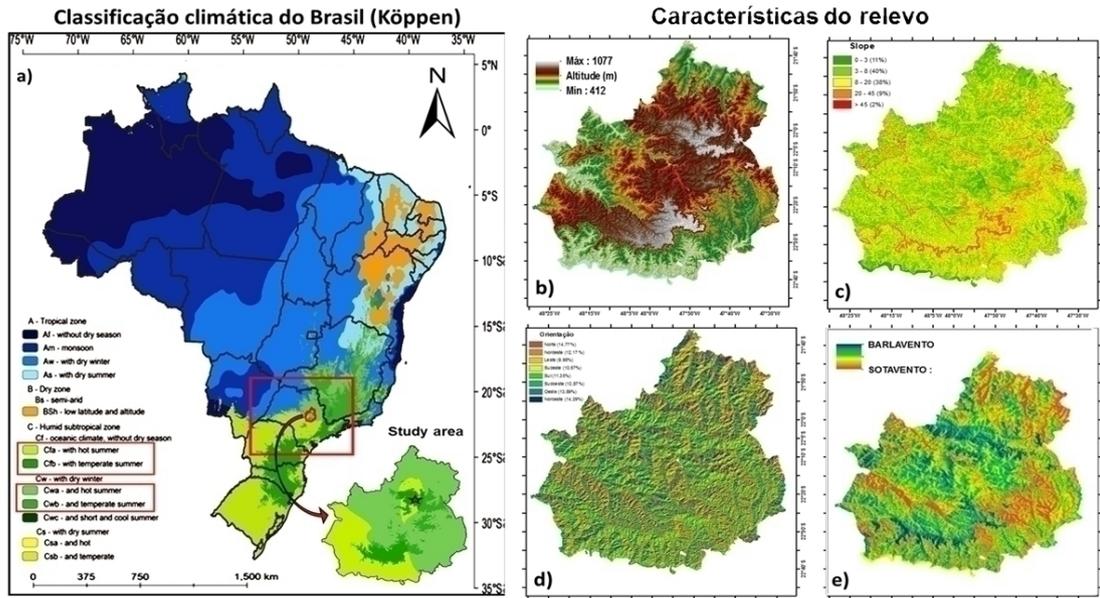


Figura 1 - (a) Localização da área de estudo sobre o mapa hipsométrico de São Paulo e os transectos (I e II) do relevo, representados pelas linhas tracejadas em branco, do perfil vertical no sentido N-S e do perfil horizontal na direção O-L. (b) Modelo digital de elevação; (c) Declividade do terreno; (d) Orientação das vertentes; (e) Orientação das vertentes a barlavento (úmido) e sotavento (seco).. Fonte: Elaborado pelos autores.

Outras características geomorfológicas são a declividade, a orientação das vertentes do relevo e a orientação das vertentes a barlavento e sotavento. A serra localizada na parte meridional do mapa apresenta particularidades morfológicas relevantes devido à sua altitude de 1100 metros em seu topo máximo, extensão longitudinal no sentido Leste-Oeste, declividade acentuada acima de 45% e orientação das escarpas voltadas para os quadrantes Sul, Norte e Leste. Portanto, essa formação possui alto coeficiente de permeabilidade, favorecendo a infiltração, que ocorre principalmente na região de recarga do Aquífero Guarani.

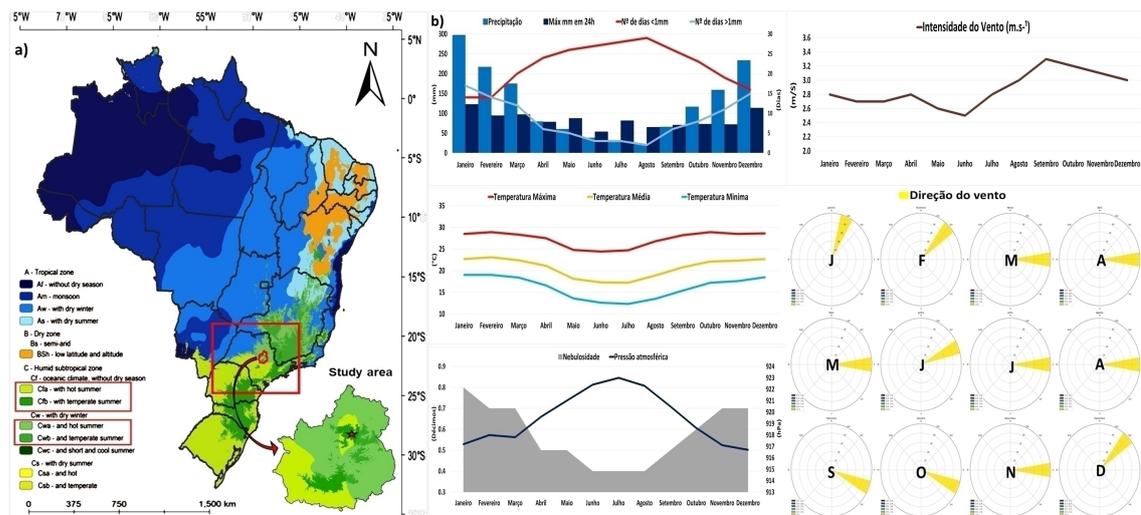


Figura 2 - (a) Localização da área de estudo no Estado de São Paulo dentro da classificação climática de Köppen para o Brasil; (b) Normal climatológica de São Carlos-SP (1991-2020). Fonte: Adaptado de Alvares (2013) e INMET (2020).

Entre os tipos climáticos do Brasil (Figura 2a) de acordo com a classificação de Köppen, a área de estudo possui como tipo o clima Cwb (ALVARES, et al., 2013). Segundo Monteiro (1973), o padrão climático na região representa uma caracterização importante no regime de chuvas sazonalmente dividido em dois períodos, com uma estação úmida (outubro a março) e outra seca (abril a setembro). Isso representa uma caracterização importante no padrão climático, como demonstrado pelos elementos climáticos (temperatura, umidade do ar, precipitação, dias consecutivos úmidos e secos, pressão atmosférica, nebulosidade, velocidade e direção do vento) apresentados na Figura 2b.

Monteiro (1973) relata que, por ser uma região planáltica, na faixa da borda do Planalto Ocidental Paulista, onde encontra-se o relevo de Cuestas, há trechos mais elevados que contribuem para um ligeiro aumento na quantidade de precipitação por efeito orográfico. Para Tavares et al. (1985), há um contraste na faixa da borda do Planalto Ocidental Paulista entre os fronts norte e sul das Cuestas. Isso ocorre devido à variação da insolação anual recebida em cada uma delas, sendo a escarpa sul mais fria e úmida do que a norte.

O padrão atmosférico das chuvas na área de estudo está associado com a interação dinâmica entre sistemas atmosféricos tropicais e extratropicais, controlados pelo avanço de sistemas frontais polares no continente sul-americano (Figura 3), que contribuem na configuração de episódios de ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul) e, portanto, gerando condições de instabilidade atmosférica e elevados volumes precipitados de chuvas sobre a porção Centro-Sul do Brasil (REBOITA, et al., 2012; FERREIRA; REBOITA, 2022).

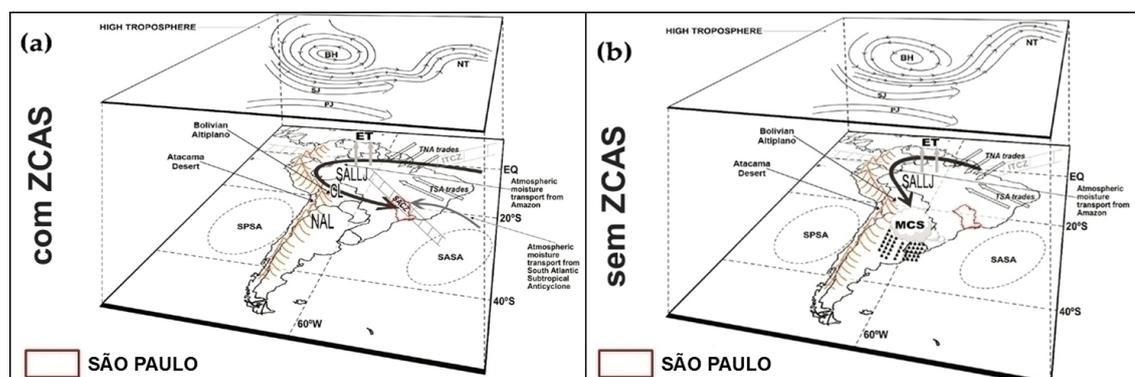


Figura 3 - Esquema de importantes feições de circulação atmosférica sobre a região sul-americana, considerando eventos com (a) e sem (b) ZCAS sobre o estado de São Paulo. Fonte: Adaptado Ferreira & Reboita (2022).

Diante disso, esse padrão representa um aspecto importante e pontual de variação sazonal da distribuição das chuvas, frente ao padrão da circulação atmosférica regional que compõe a área estudada, diante da eventualidade da tendência de episódios excepcionais que se manifestarem na região (SANCHES, 2022; SANTOS, et al., 2020 e 2021).

Portanto, as chuvas verificadas por meio dos registros contidos em estações pluviométricas constituem a principal estratégia para sua compreensão e delineamento de suas vinculações, como frequência, picos de variância e significância, entre outros aspectos estatísticos e, suas observações espacialmente e temporalmente.

## SELEÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Para sua realização a pesquisa selecionou e utilizou 31 postos pluviométricos contendo dados diários com séries históricas de 38 anos (1979-2017). Os dados foram coletados na plataforma online *Hidroweb*, da Agência Nacional de Águas (ANA), e no website do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO), vinculado à Secretaria de Agricultura e Abastecimento do estado de São Paulo. Após a aquisição dos dados foi feita a compilação das informações obtidas e o tratamento quantitativo dos dados diários de precipitação, seguida pela organização de tabelas e gráficos nas escalas

temporais anual, mensal e diária por meio do software Microsoft® Excel 2016. A etapa seguinte ocupou-se com o processo de preenchimento mensal das lacunas existentes nos dados dos postos que apresentaram falhas, para isto, foi utilizado um método (ponderação regional) capaz de estimar valores de precipitação em postos com hiatos de dados (BERTONI & TUCCI, 2009).

A Equação 1 apresenta o método de ponderação regional.

$$P_x = \frac{1}{3} \left( \frac{P_z}{P_{zm}} + \frac{P_y}{P_{ym}} + \frac{P_w}{P_{wm}} \right) \cdot P_{xm}$$

Onde  $P_x$  é o posto com a existência de lacunas a preencher e  $P_z$ ,  $P_y$  e  $P_w$  são os postos com dados disponíveis no mesmo intervalo de tempo, nos arredores do posto  $P_x$ . Já as variáveis  $P_{xm}$ ,  $P_{zm}$ ,  $P_{ym}$  e  $P_{wm}$ , são os valores médios da precipitação para cada posto.

## ANÁLISE DAS SÉRIES HISTÓRICAS (1979-2017) DE CHUVAS

Para a análise das chuvas optou-se inicialmente por estabelecer classes representativas do total das chuvas anuais, para fins de individualizar, os postos pluviométricos e os anos representativos do ritmo excepcional, que se apresentam mais chuvosos ou mais secos em relação ao padrão habitual da precipitação.

A fim de verificar a variabilidade temporal pluviométrica na região, aplicou-se o método IAC (Índices de Anomalia de Chuva) proposta por Rooy (1965) e adaptado por Freitas (2005). Esse método é expresso na fórmula (Equação 2):

$$IAC = 3 \left[ \frac{(N - \bar{N})}{(\bar{M} - \bar{N})} \right] \quad (\text{Anomalias positivas})$$

$$IAC = -3 \left[ \frac{(N - \bar{N})}{(\bar{X} - \bar{N})} \right] \quad (\text{Anomalias negativas})$$

Sendo que  $N$  é a precipitação média anual, correspondente ao ano gerado do IAC (mm),  $\bar{N}$  precipitação média da série histórica (mm),  $\bar{M}$  representa as dez maiores precipitações da série histórica (mm) e  $\bar{X}$  a média das dez menores precipitações da série histórica (mm). As anomalias com valores positivos são consideradas acima da média e negativos abaixo da média.

Por meio dos valores encontrados, classificou-se o regime pluviométrico, conforme as classes mostradas na Tabela 1.

Metodologia Índice de Anomalia de Chuva (IAC)		
Classificação	Padrões Pluviométricos (SIGLAS)	Desvio (+) ou (-)
Anos Chuvosos	Extremamente chuvoso (EC)	> +4
	Muito chuvoso (MC)	+2 a +4
Anos Normais	Chuvoso (C)	0 a +2
	Normal (N)	0
Anos Secos	Seco (S)	0 a -2
	Muito seco (MS)	-2 a -4
	Extremamente seco (ES)	< -4

Tabela 1 - Índice de Anomalia de Chuva – IAC de classificação pluviométrica. Fonte: adaptado de Freitas (2005).

## ANÁLISE DOS ANOS EXTREMOS CHUVOSO E SECO

Após a classificação dos anos, foram selecionados dois anos padrão excepcionais (chuvoso e seco) para auxiliar na compreensão da pluviosidade regional e sua interação com o relevo dentro da área estudada delimitada.

Atualmente, destacam-se aplicações de índices climáticos para observação dos dados pluviométricos, como o *script* RClindex (HAYLOCK et al., 2006; SANCHES et al., 2018; STEPHENSON et al., 2014; ZHANG; YANG, 2004) que ressalta a análise das chuvas por meio de diferentes índices de precipitação (Tabela 2).

Índice (Identificação)	Nome do índice	Definição	Unidade Observada
<b>RX1day</b>	Máximo de chuva acumulado em 1 dia	Máximo de chuva acumulada em um único dia	<b>mm</b>
<b>RX 5 dias</b>	Máximo de chuva acumulada em 5 dias	Máximo de chuva acumulada em cinco dias consecutivos	<b>mm</b>
<b>DCS</b>	Dias consecutivos secos	Número máximo de dias em que as chuvas < 1 mm	<b>dias</b>
<b>DCU</b>	Dias consecutivos úmidos	Número máximo de dias em que as chuvas ≥ 1 mm	<b>dias</b>
<b>Rnn*</b>	Dias chuvosos acima de <i>nn</i> milímetros	Número de dias acima de <i>nn</i> milímetros de chuva	<b>dias</b>

\*Admite-se  $RR_{ij}$  como a quantidade diária de precipitação num dia  $i$  num período  $j$ . Assim,  $nn^*$  representa qualquer valor razoável de precipitação diária, onde soma-se o número de dias, sendo:  $RR_{ij} \geq nmm$

Tabela 2 - Metodologias Utilizadas para Análise dos Dados de Precipitação (Índice Climáticos no RClindex). Fonte: Adaptado de Zhang e Yang (2004).

Os índices são calculados pelos dados pluviométricos referente ao valor máximo acumulado em um único dia de chuva (RX1 dia), ao valor máximo acumulado em 5 dias consecutivos de chuva (RX5 dias), ao número máximo de dias consecutivos secos (DCS), ao número máximo de dias consecutivos úmidos (DCU) e ao número de dias acima de valores pré-estabelecidos a partir da detecção de *outliers* ( $Rnnn^*$ ).

Entre os índices utilizados, o  $Rnn$  se destaca pela função de representar o número de dias acima de um valor definido, destacando sua possibilidade de ajustes nos valores-base, ou seja, podendo atribuir um valor referencial para eventos intensos ou extremos aos valores de precipitação.

Dessa forma, a determinação do valor de  $nn^*$  de chuvas de comportamento anômalo foi realizada por meio de *outliers*. Segundo Chrun, Cukier e Sneeringer (2008), a determinação do *outlier* pode ser entendida por uma avaliação da evolução e da identificação de comportamentos excepcionais em séries históricas dos dados, identificando-os a partir da média e utilizando (+/-) três ou quatro desvios padrões por limite (Equação 3).

$$\left\{ x_i: x_i > \bar{x} + t * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \right\}$$

A determinação de tais valores de chuvas intensas e extremas pressupõem a identificação de conjunturas anormais ou *outliers* na série de dados (SANCHES et al., 2018). Para o presente estudo, foram determinados o valor RX46 mm (número de dias acima de 46 mm de chuva) para o presente estudo. Segundo Sanches (2022), o cálculo do índice RX46 mm expressa as chuvas atípicas em relação à precipitação diária, ou seja, os *outliers* diários encontrados dentro do recorte histórico (1979-2017) dos postos pluviométricos selecionados. Após os resultados obtidos, foi realizado a interpolação das informações, por meio do método de IDW (Interpolação pela Ponderação do Inverso da Distância). Este

método pode estimar espacialmente um valor para um determinado local que não apresenta informações, por meio do cálculo da média ponderada das amostras vizinhas pelo inverso da distância entre o ponto a ser interpolado dentro de uma vizinhança (FARIAS; FRANCISCO; SENNA, 2017). Desta forma, mapas foram gerados em um sistema SIG para visualizar espacialmente o efeito do relevo na distribuição espacial das chuvas na região central do estado de São Paulo.

## RESULTADOS

### ANÁLISE DA CLASSIFICAÇÃO DAS CHUVAS ANUAIS

A seguir, a Figura 4 sintetiza o total de frequência das classes de precipitação, no período de 1979-2017 para os 31 postos selecionados. O gráfico na parte inferior da Figura 4 (a) mostra a variabilidade dos valores dos desvios das chuvas anuais em relação à média histórica (1968 mm). Entre os anos, o ano de 1983 foi o que apresentou maiores desvios e o ano de 2014 registrou os menores desvios entre o período de 1979-2017.

Dentre dos trinta e oito anos de dados, as classificações das chuvas anuais em relação à média (1468 mm) mostram que cerca de 17% dos anos foram habituais (N), 45% entre as classes secas (S, MS e ES) e 38% entre as classes úmidas (C, MC e EC). O histograma na Figura 4 (b) no canto inferior à direita, apresenta o número de ocorrências das classes pluviométricas, e os mapas na Figura 4 (b) exibem espacialmente a distribuição da frequência da classificação das chuvas, entre os trinta e um postos de superfície. Nota-se no histograma na Figura 4 (b), uma frequência de anos da classe considerada Seca (S) maior do que da Normal (N). Em relação às classes extremamente seco (ES) e chuvoso (EC), observa uma maior recorrência da classe EC do que da ES ao longo da série histórica (1979-2017).

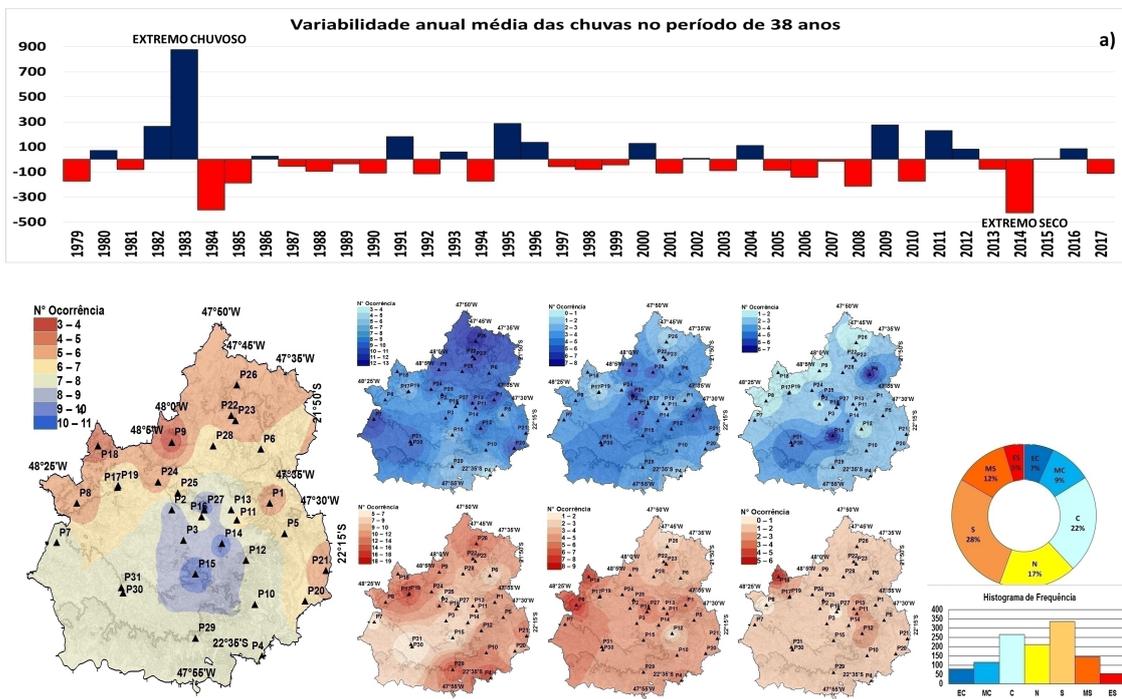


Figura 4 - a) Variabilidade pluviométrica anual no período de 1979-2017. b) Distribuição espacial do número de ocorrência das classes pluviométricas (EC, MC, C, N, S, MS e ES) do Índice de Anomalia de Chuva (IAC) na área de estudo. Fonte: Elaborado pelos autores.

No propósito de visualizar a distribuição espacial das classes de frequência, os mapas apresentam os locais onde concentram o maior ou menor número de ocorrências (entre 0 a 11) das sete categorias (N, S, C, MS, MC, ES e EC) pluviométricas para a área de estudo. Nota-se, entre na classe habitual (N), que a porção centro-sul foi a que apresentou uma maior recorrência dentro da média, principalmente, aos arredores da borda norte da Serra de Itaqueri e na porção mais ao norte, notou-se uma ocorrência menor de anos dentro do padrão pluviométrico.

Para as classes úmidas, as porções norte e sudoeste apresentaram uma frequência de anos chuvosos mais recorrente. Por outro lado, as classes secas, as porções sudoeste e sudeste mostram uma periodicidade recorrente de anos abaixo da média. Por último, os anos extremos (chuvoso e seco) apresentaram uma maior ocorrência de extremos chuvosos no entorno da serra localizada ao sul e uma maior ocorrência de extremos secos na porção noroeste da área de estudo.

## ANÁLISE DOS ANOS EXTREMOS DE 1983 (CHUVOSO) E 2014 (SECO)

A partir da identificação dos anos extremos de 1983 (chuvoso) e 2014 (seco) na série histórica (1979-2017), foi possível comparar as diferenças pluviométricas na área de estudo para verificar a influência do relevo em anos extremos distintos.

Na Figura 5, os mapas e gráficos exibem os resultados comparando por meio dos índices PROCTOT (a), DCS (b), DCU (c), RX1 dia (d), RX5 dias (e), e RX46 mm (f) das chuvas distribuídas para o ano extremo chuvoso de 1983 e extremo seco de 2014. Nota-se no gráfico na Figura 5 (a), que os acumulados anuais das chuvas (PRCTOT) em relação à média apresentaram valores extremamente distintos.

De forma espacial, os mapas mostram acumulados mais elevados na porção ao centro-sul, em relação às áreas mais baixas a sudeste para o ano de 1983. Por outro lado, o ano de 2014 registrou valores extremamente abaixo, principalmente, na porção central-norte e leste do mapa. No entanto, a porção meridional do mapa registrou volumes levemente superior ao restante da área de estudo, porém ainda permanecendo abaixo da média.

Em relação aos dias consecutivos secos (DCS), o ano de 1983 indicou uma menor estiagem na porção centro-sul, variando entre 30 a 40 dias, e na porção centro-norte, entre 40 a 50 dias. Para o ano de 2014, o período de estiagem de dias consecutivos secos foi abaixo de 45 dias para a maior parte da área de estudo. Apenas a região central do mapa apontou um período mais duradouro na estiagem com um total de 70 dias.

Por outro lado, os dias consecutivos úmidos (DCU) tiveram uma maior continuidade na porção sudeste do mapa, quando comparadas às áreas centrais e periféricas, para o ano de 1983. Essas áreas a sudeste estão localizadas sobre o domínio da Depressão Periférica na transição ou próximos da borda da Serra de Itaqueri. Dessa forma, a barreira natural exercida pelo relevo deve influir na circulação regional, ocasionando a formação de nuvens e posteriormente em chuvas orográficas, que repercutem consequentemente no aumento no número de dias úmidos sobre eventos de ZCAS.

Já para o ano de 2014, os dias consecutivos úmidos (DCU) ocorreram abaixo de 11 dias para a área de estudo. Observou-se no mapa, que áreas ao noroeste evidenciaram menores períodos de dias de chuva e algumas porções isoladas registraram períodos maiores. Novamente, os valores superiores de dias úmidos aconteceram em áreas influenciadas pela orografia (altitude e declividade).

Para o máximo de chuva acumulado em um dia (RX1) para o ano 1983, observou espacialmente que os maiores acumulados se manifestaram nas áreas setentrional e meridional do mapa. A região centro-sul apresentou novamente condições diferenciadas por conta da barreira orográfica, quando comparado com áreas rebaixadas, no processo de intensificação das chuvas no período de vinte e quatro horas. Para o RX1 dia para o ano 2014, observou que os acumulados em 24h apresentaram valores abaixo de 70 mm em grande parte da área de estudo. Porém, regiões na parte ocidental do mapa evidenciaram acumulados de até 110 mm em um único dia e em outras partes localizadas no centro-sul e oriental, tiveram valores inferiores a 50 mm.

EFEITO DA OROGRAFIA NAS CHUVAS POR MEIO DA ANÁLISE DE ÍNDICES CLIMÁTICOS NA REGIÃO DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA

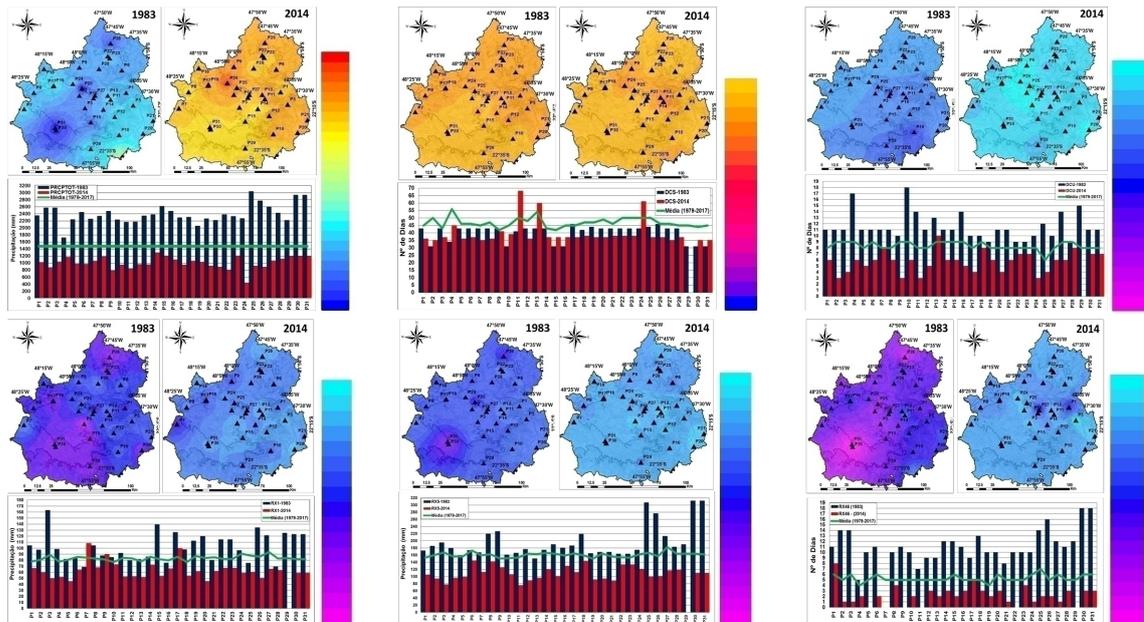


Figura 5 - Distribuição espacial dos índices pluviométricos do ano extremo chuvoso de 1983 e o ano extremo seco de 2014. Fonte: Elaborado pelos autores.

Para as chuvas acumuladas em cinco dias (RX5), percebeu que no ano de 1983, a distribuição das chuvas foi de maneira homogênea em toda área de estudo, com exceção na porção meridional, que mostrou valores superiores. Por outro lado, os acumulados de chuvas em cinco dias em 2014, registraram valores abaixo para grande parte da área de estudo e em algumas regiões, mostraram valores acumulados ligeiramente significativos.

Por último, os dias com chuvas extremas acima de 46 mm, evidenciaram para o ano de 1983, maior ocorrência dias de precipitação extrema, nas áreas centro-sul e norte do mapa, onde apresentam as maiores altitudes. Por outro lado, a porção sudeste que apresentam menores altitudes, tiveram menores ocorrência de dias de chuva extrema. Para o ano de 2014, evidenciou ocorrência dias de precipitação extrema abaixo de 8 dias. Nota-se no mapa, um comportamento praticamente homogêneo no número de dias (2 a 3) extremos para toda a área de estudo e uma diminuição (0 a 2) para a porção central e leste do mapa, todavia, algumas porções isoladas apresentaram registros ligeiramente superiores a 3 dias.

Entre os pontos isolados, destaque para a região centro-leste, que isoladamente obteve o maior número de chuvas extremas acima 46 mm com cerca de 8 dias. Na porção ocidental do mapa também registrou número de dias extremos moderadamente significativos com cerca de 5 dias. Diante dessas informações, constata-se que em anos secos a ocorrência de chuvas extremas é quase nula com episódios de no máximo de 3 dias, quando comparado com anos chuvosos, onde a ocorrência de chuvas extremas aumenta substancialmente o número de dias acima de 46 mm, principalmente em regiões onde a presença do relevo é marcante.

## DISCUSSÃO

A ocorrência de das chuvas intensas, mesmo sob influência do relevo, tende a se concentrar durante o período primavera-verão (outubro-março), onde a passagem de sistemas atmosféricos desencadeia a formação de instabilidade e contribui para a ocorrência de eventos extremos de precipitação em escalas de tempo mais curtas.

Segundo Houze (2012), a precipitação orográfica é intrinsecamente um fenômeno transitório e tende a ocorrer durante a passagem de um distúrbio meteorológico preexistente, e as taxas de precipitação podem variar substancialmente durante o curso de uma única tempestade, conforme as mudanças das condições sinóticas atuantes ao longo do dia.

De maneira comparativa e sintetizando os resultados das análises para os anos atípicos de 1983 (chuvoso) e 2014 (seco), a circulação atmosférica foi, nitidamente, distinta em ambos os anos, sobretudo durante o primeiro semestre, reproduzindo numa dinâmica hidroclimática discrepante e denotando um processo que resultou em chuvas intensas no verão do ano de 1983 e, em uma acentuada e prolongada, estiagem no ano de 2014.

Segundo Santos et al., (2020), o ano úmido de 1983 apresentou um verão associado a sucessivas passagens frontais, que resultaram em tipos de tempo úmidos, essencialmente nublados e/ou encobertos, com chuvas frequentes e abundantes em volumes excepcionais para a área de estudo. Por outro lado, no ano seco de 2014, a intensa presença de massas de ar tropicais no verão repercutiu em tipos de tempo estáveis e longas sequências de dias secos, pouco frequentes nessa época do ano.

*seed-feeder* (Figura 6). Para Houze (2012) e Roe (2005), o efeito acontece quando nuvens de grande escala preexistentes em níveis mais elevados “semeiam” ao passar sobre o relevo com mais precipitação, “alimentando” o desenvolvimento de nova cobertura de nuvem em níveis mais baixos do terreno. Portanto, a precipitação produzida da nuvem semeadora acrescenta umidade adicional quando ela cai por meio da nuvem alimentadora, seja por coalescência ou por borda, e assim a precipitação é aumentada sobre o relevo.

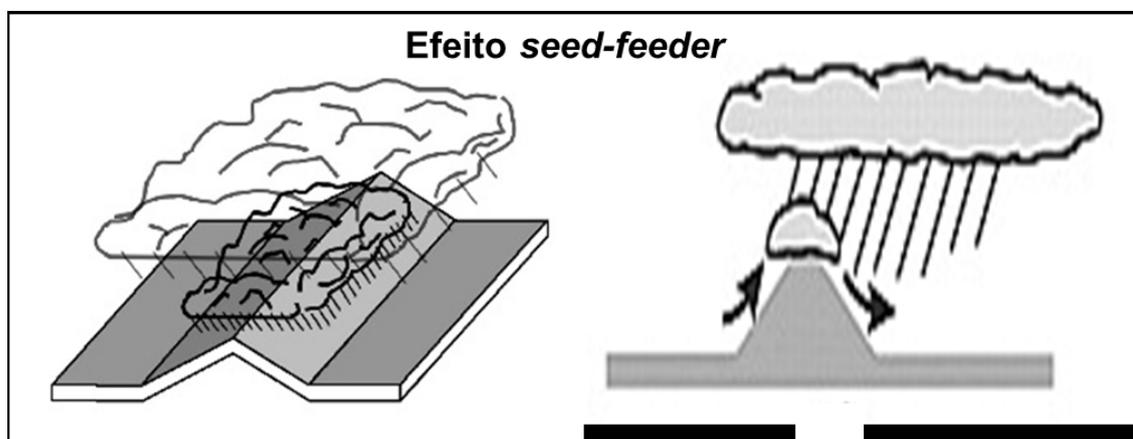


Figura 6 – Efeito orográfico “alimentador-semeador” ou *seed-feeder*. Fonte: Adaptado de Roe (2005) e Houze (2012).

Diante disso, a ação dos sistemas frontais e episódios de ZCAS distribuem por toda a área de estudo um volume de precipitação que unifica a descrição climática das chuvas, no entanto, a orografia favorece uma particularidade em razão da contribuição extra que proporciona em porções específicas onde o relevo é marcante dentro da área de estudo (SANTOS, 2021).

Portanto, observando-se os mapas, foi possível verificar que nas regiões onde o relevo possui uma declividade e altitude significativa, os índices pluviométricos são superiores, em relação às regiões de relevo mais plano. Em face disso, por tratar-se de dois anos representativos distintos (úmido e seco) para a série histórica (1979-2017), entende-se que a maior pluviosidade destas regiões elevadas em relação às demais, tanto em 1983 como em 2014, indicaram possivelmente a influência do efeito orográfico nos elevados volumes precipitados (HOUZE, 2012; ROE, 2005).

## CONCLUSÕES

A utilização do método Índice de Anomalia de Chuva (IAC) para a classificação anual (no período de 1979 a 2017) do comportamento temporal das chuvas e dos índices climáticos (RClimdex) para análise dos anos extremos de 1983 (chuvoso) e 2014 (seco), mostrou-se eficiente e capaz de demonstrar a influência do efeito orográfico na área de estudo. Ficou comprovada a diferença na distribuição espaço-temporal da precipitação devido à influência restrita do efeito orográfico em

algumas partes da área de estudo, após a utilização do Índice de Anomalia de Chuvas (IAC) para a série histórica adotada. Além disso, os índices DCU, DCS, RX1 dia, RX5 dias e RX46 mm, ao aplicarem o RClindex, evidenciaram a força do efeito orográfico na intensificação das chuvas, especialmente na porção meridional da área de estudo.

Diante disso, é possível afirmar que algumas partes do relevo que estão presentes na área de estudo, considerando a sua extensão, altimetria e declividade, desempenham um papel fundamental no processo de intensificação das chuvas, sobretudo durante os anos de maior pluviosidade.

Com base nessas análises, é importante destacar que a compreensão dos anos extremos de chuvas (enchentes ou secas), que têm o poder de causar sérios transtornos à qualidade de vida das pessoas e ao desempenho das atividades econômicas, deve ser inserida como parte das políticas públicas mitigadoras dos possíveis impactos que o sistema hidroclimático da região central do estado de São Paulo pode enfrentar em anos climáticos atípicos.

Portanto, é essencial que as autoridades públicas estejam cientes dos resultados dessas análises para elaborar estratégias eficientes de planejamento e prevenção de desastres naturais. Tais estratégias devem incluir medidas para o monitoramento e controle das áreas mais propensas a enchentes e deslizamentos de terra, bem como a implementação de políticas de educação e conscientização da população sobre os riscos associados a eventos climáticos extremos.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, F. G.; SOBRINHA, L. A.; BRANDÃO, J. L. B.: **Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 22, n. 2, p. 239-250, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016146750>
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G.: **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, 711–728. 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ALVES E. D. L., PRADO do, M. F., SILVA da, S. T., VIEIRA F. L., SILVA G. M.; **Análise climática da precipitação em Israelândia – GO e Piranhas – GO utilizando o Índice de Anomalia de Chuva (IAC)**. Enciclopédia Biosfera. Vol. 6, nº 11, p. 1-13, 2010.
- BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. Precipitação. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, p. 177-241, 2009.
- BUENO, L.O., ANJINHO, P.D., BOLLELI, T.M. et al.: **Erosion susceptibility mapping in the Central-Eastern Region of São Paulo in the last few decades**. Environmental Monitoring and Assessment, 194, 927, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10632-5>
- CHRUN, D.; SNEERINGER, G.; CUKIER, M.: **On the Use of Security Metrics Based on Intrusion Prevention System Event Data: An Empirical Analysis**. 2008 11th IEEE 144 High Assurance Systems Engineering Symposium (HASE). Anais... p.49–58, 2008. Disponível em: . Acesso em: 17/10/2020.
- FARIAS, O. G.; FRANCISCO, C. N.; SENNA, M. C. A. **Avaliação de métodos de interpolação espacial aplicados à pluviosidade em região montanhosa no litoral sul do estado do Rio de Janeiro**. Revista Brasileira de Climatologia, ano 13-vol. 21, p.172-185, jul/dez, 2017.
- FREITAS, M. A. S. **Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semiáridas**. Revista Tecnologia. Vol. 19, nº 1 p.84-95, 2005.
- GOUVEA, R. L.; CAMPOS, C. C.; MENEZES J. T.; MOREIRA, G. F.; **Análise de frequência de precipitação e caracterização de anos secos e chuvosos para a bacia do Rio Itajaí**. Revista Brasileira de Climatologia. Vol. 22, nº 14, p. 309-323, 2018.
- HAYLOCK, M. R. et al.; **Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature**. Journal of Climate, v. 19, n. 8, p. 1490–1512, 1 abr. 2006.
- HOUZE, R. A., Jr.; **Orographic effects on precipitating clouds**. Rev. Geophys, 50, RG1001, 2012.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas**. Disponível em: . Acesso em: 06/01/2020.

MONTEIRO, C.A.F.: **A Dinâmica Climática e as Chuvas no Estado de São Paulo: estudo geográfico sob a forma de atlas**. São Paulo: USP/IG, 1973.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P.: **Entendendo o tempo e o clima na América do Sul**. Terrae Didatica, v. 8, n. 1, p. 34–50, 2012. <https://doi.org/10.20396/td.v8i1.8637425>

RIBEIRO, R. E. P.; ÁVILA, P. L. R.; BRITO de, J. I. B.; SANTOS do, E. G.; SOUSA de, L. F. **Análise da tendência climática nas séries temporais de temperatura e precipitação de Tucuruí – Pará**. Revista Brasileira de Geografia Física. Vol. 7, nº 5, p. 798-807, 2014.

ROE, G.H. **Orographic precipitation**. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, v. 33, p. 645-671, 2005.

ROOY, M. P V. **A rainfall anomaly index independente of time and space**. Notes. Weather Bureau of South Africa. Vol.14, p.43-48, 1965.

ROSS, J.L.S.; MOROZ, I.C. **Mapa geomorfológico do estado de São Paulo**. Revista do Departamento de Geografia, v. 10, p. 41-58, 1996.

SANCHES, R. G.; NEVES, G. Z. DE F.; SANTOS, B. C. DOS; et al. **Intense Rainfall in São Carlos/SP: Determination of Threshold Values Using Climate Indices and Their Spatio-Temporal Repercussion**. American Journal of Climate Change, v. 07, p. 388, 2018.

SANCHES, R. G.; SANTOS, B. C.; NEVES, G. Z. F.; SILVA, M. S. D.; & SOUZA, P. H.: **Análise da tendência pluviométrica na região central do estado de São Paulo**. Revista Brasileira De Climatologia, 30(18), 777–797, 2022. <https://doi.org/10.55761/abclima.v30i18.15668>

SANCHES, R., SANTOS, B., MIANI, R., NEVES, G., SILVA, M., TECH, A. **Analysis of Daily Rainfall in São Carlos/SP, Brazil over 1979-2017 using Laplace Trend Test**. Journal of Geoscience and Environment Protection, 8, 104-125., 2020. doi: 10.4236/gep.2020.87006

SANTOS, B. C.; FONTÃO, P. A. B.; SOUZA, P. H.: **O efeito do relevo nas chuvas na porção central do Estado de São Paulo em anos padrão extremos**. Revista do Departamento de Geografia, 40:132–147, 2020. <https://doi.org/10.11606/rdg.v40i0.172973>

SANTOS, B. C.; SOUZA, P. H.; SANCHES, R. G.; BOLLELI, T. M.; TECH, A. R. B.: **O efeito do Planalto Ocidental Paulista na Variabilidade e nos Anos Extremos das Chuvas no período de 1979-2019**. Caderno de Geografia, v. 31, Número Especial 2, p. 168-186, 2021. <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2021v31nesp2p168156>

SETH, A.; FERNANDES, K.; CAMARGO, S.J. **Two summers of São Paulo drought: Origins in the western tropical Pacific**. Geophysical Research Letters, v. 42, n. 24, p. 10,816-10,823, 2015.

STEPHENSON, T. S. et al. **Changes in extreme temperature and precipitation in the Caribbean region, 1961–2010**. International Journal of Climatology, v. 34, n. 9, p. 2957–2971, 1 jul. 2014.

TAVARES, A. C.; REYNALDO, N. A.; DONATTO, M. C .B. D. C.; CRUZ, M. P.: **O Uso da Análise Episódica na Caracterização de Aspectos Topoclimáticos da Serra de Itaqueri-SP**. Boletim de Geografia - UEM, v. 3, n. 3, p. 84-108, 1985. <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v3i3.12275>

ZHANG, X.; YANG, F.; RCLimDex (1.0) User Guide. **Climate Research Branch Environment Canada**: Downsview. Ontario, Canada, 2004.

### Afiliação dos Autores

Santos, B. C. - Pesquisador na Universidade Federal de São Carlos, São Carlos (SP), Brasil.

Sanches, R. G. - Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) na área de Climatologia Aplicada São Carlos (SP), Brasil.

Neves, G. Z. F. - Professor na Universidade de São Paulo, Itirapina (SP), Brasil.

Souza, P. H. - Professor na Universidade Federal de Alfenas, Alfenas (MG), Brasil.

### **Contribuição dos Autores**

Santos, B. C. - O autor contribuiu para a elaboração, realização e manipulação da escrita.  
Sanches, R. G. - O autor contribuiu para a elaboração, realização e manipulação da escrita.  
Neves, G. Z. F. - O autor contribuiu para a elaboração, realização e manipulação da escrita.  
Souza, P. H. - O autor contribuiu para a elaboração, realização e manipulação da escrita.

### **Editores Responsáveis**

Alexandra Maria Oliveira  
Alexandre Queiroz Pereira