



IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE EVENTOS CLIMÁTICOS SECOS E ÚMIDOS NO ABC PAULISTA NO PERÍODO DE 2000-2020 USANDO O SPI

Identification and characterization of dry and wet climate events in ABC Paulista in the period 2000-2020 using SPI

Identificación y caracterización de eventos climáticos secos y húmedos en ABC Paulista en el período 2000-2020 utilizando SPI

Marina de Oliveira  

Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), Diadema, SP, Brasil
oliveira.marina@unifesp.br

Nilton Manuel Évora do Rosário  

Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), Diadema, SP, Brasil
nrosario@unifesp.br

Luciana Varanda Rizzo  

Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), Diadema, SP, Brasil
lrizzo@unifesp.br

Michelle Simões Reboita  

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, MG, Brasil
reboita@unifei.edu.br

Anita Drumond  

Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), Diadema, SP, Brasil
anita.drumond@unifesp.br

Resumo: Neste estudo foram identificados os eventos climáticos secos e úmidos ocorridos no ABC Paulista (Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul, Diadema, Mauá, Rio Grande da Serra e Ribeirão

Pires), uma região de grande importância hídrica, econômica e industrial no Estado de São Paulo, no período de 2000 a 2020. Para tanto, foram utilizados dados mensais de precipitação estimados pelo algoritmo IMERG aplicado às medidas da constelação de satélites da GPM, e a técnica do Índice de Precipitação Padronizada (SPI), considerando as escalas temporais de acumulação de 1, 3, 6 e 12 meses. Para todas as escalas do SPI, foram registrados 45 eventos secos (SPI-1: 25, SPI-3: 13, SPI-6: 6 e SPI-12: 1) e 50 eventos úmidos (SPI-1: 27, SPI-3:15, SPI-6: 6 e SPI-12: 2) no ABC Paulista durante o período de estudo. Utilizando o teste z para o nível de significância de 5%, as condições úmidas predominaram na primeira década (2000-2010) no SPI-1, enquanto as condições de seca foram dominantes na segunda década (2010-2020) do período em estudo no SPI-6 e SPI-12. Os resultados indicam que o SPI é uma ferramenta útil para a análise de condições climáticas anômalas associadas à precipitação.

Palavras-chave: SPI. Precipitação. Eventos extremos climáticos. ABC Paulista.

Abstract: This study identifies dry and wet climate events that occurred in the ABC Paulista (Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul, Diadema, Mauá, Rio Grande da Serra and Ribeirão Pires) during the period from 2000 to 2020. A region with significant hydric, economic and industrial importance to the State of São Paulo. Monthly precipitation data estimated by the IMERG algorithm applied to measurements from the GPM satellite constellation and the Standardized Precipitation Index (SPI) technique were used. The time scales of accumulation selected were 1, 3, 6 and 12 months. For all SPI scales, were recorded 45 dry events (SPI-1: 25, SPI-3:13, SPI-6: 6 and SPI-12: 1) and 50 wet events (SPI-1: 27, SPI-3:15, SPI-6: 6 and SPI-12: 2) in ABC Paulista during the study period. Using the z test at the significance level of 5%, wet conditions predominated in the first decade 2000-2010 for the SPI-1, while drought conditions were dominant in the second decade (2010-2020) for the SPI-6 and SPI-12 scales results show that SPI may be a useful tool for the analysis of anomalous climate conditions associated with precipitation.

Keywords: SPI. Precipitation. Extreme climate events. ABC Paulista.

Resumen: En este estudio se han identificado los eventos climáticos secos y húmedos ocurridos en el ABC Paulista (Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul, Diadema, Mauá, Rio Grande da Serra y Ribeirão Pires), una región de gran importancia hídrica, económica y industrial en el Estado de São Paulo, durante el período 2000 a 2020. Para ello, los datos de precipitación mensual estimados por el algoritmo IMERG aplicado a las mediciones de los satélites GPM y la técnica del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), considerando las escalas temporales de acumulación de 1, 3, 6 y 12 meses, han sido utilizados. Para todas las escalas SPI, 45 eventos secos (SPI1: 25, SPI-3:13, SPI-6: 6 y SPI-12: 1) y 50 eventos húmedos (SPI1: 27, SPI-3:15, SPI-6: 6 y SPI-12: 2) en ABC Paulista han sido registrados durante el período de estudio. Utilizando el "test z" al nivel de significancia de 5%, las condiciones húmedas han predominado en la primera década 2000-2010 en el SPI-1, mientras que las condiciones secas han predominado en la segunda década (2010-2020) en las escalas SPI-6 y SPI-12. Los resultados apuntan que SPI es una herramienta útil para el análisis de condiciones climáticas anómalas asociadas con la precipitación.

Palabras clave: SPI. Precipitación. Eventos climáticos extremos. ABC Paulista.

Submetido em: 03/12/2021

Aceito para publicação em: 27/07/2022

Publicado em: 06/10/2022

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais têm revelado a importância dos estudos regionais e locais frente às mudanças no ambiente e seus impactos na vida da população (IPCC, 2018). Os estudos de eventos extremos de tempo e clima, além da sua importância do ponto de vista meteorológico, são fundamentais para o planejamento socioeconômico. A vulnerabilidade de regiões diante do aumento da temperatura e dos extremos climáticos evidencia as consequências dos impactos das mudanças climáticas. Dentre os impactos, pode-se destacar: o aumento de desastres ambientais, a escassez de água, os impactos nas atividades agrícolas, as inundações e a perda de vidas (Marengo et al., 2020; IPCC, 2021). A variabilidade climática pode representar um desafio de maior ou menor grau, dependendo da vulnerabilidade social e das condições ambientais da região, principalmente em áreas urbanas (Marengo, Valverde e Obregon, 2013).

O aumento na frequência de eventos extremos, bem como na duração e intensidade, tem sido atribuído ao aquecimento global, causado pelas emissões antrópicas de gases de efeito estufa (IPCC, 2012; 2021). Os eventos extremos podem ser de natureza meteorológica, quando ocorrem em períodos curtos de tempo, e climática, quando há persistência desses eventos por períodos maiores de tempo (IPCC, 2014; 2021). Segundo a WMO (2012), as condições climáticas úmidas e secas podem afetar diversos setores sociais e econômicos no curto, médio e longo prazo. As condições climáticas úmidas extremas normalmente se associam a impactos como inundações e deslizamentos de terra (Valverde, Cardoso e Brambila, 2018). A definição de seca, apesar de complexa, refere-se a um cenário climático caracterizado pela disponibilidade de água abaixo dos níveis considerados normais durante um determinado período, sem suprir a demanda hídrica (Redmond, 2002). Um evento seco pode ser classificado de acordo com os setores afetados: meteorológico, agrícola, hidrológico e socioeconômico (Wilhite e Glantz, 1985). Cenários de secas meteorológicas são identificados em condições anômalas de precipitação na escala de acumulação mensal. Já as secas agrícolas são identificadas em períodos acumulados de 3 a 6 meses, e as hidrológicas em períodos de 12 meses.

Vários indicadores são utilizados para quantificar, padronizar e comparar condições de extremos climáticos associadas à precipitação. Um índice amplamente utilizado tem sido

o proposto por McKee, Doesken e Kleist (1993), denominado Índice Padronizado de Precipitação (em inglês, *Standardized Precipitation Index*, SPI). O SPI permite a identificação de extremos climáticos apenas com dados de precipitação para diferentes escalas temporais (Santos et al. 2017; WMO, 2012). Duas vantagens do SPI são a sua natureza multiescalar e a dependência exclusiva de dados de precipitação (Altamirano, 2010; Santos et al., 2017; Guttman, 1998). Analisar diferentes escalas de precipitação acumulada é importante, pois podem refletir as alterações climáticas nos diferentes componentes do ciclo hidrológico. Dessa forma, é possível investigar condições que resultam em desastres ambientais e ameaças à segurança hídrica (WMO, 2012).

O SPI foi utilizado para a caracterização de eventos extremos em diferentes regiões (Kumar et al., 2009; Karavitis et al., 2011; Santos et al. 2017). No Brasil, nos últimos anos, o SPI foi utilizado para estudos em áreas sensíveis às alterações climáticas (Ndehedehe et al., 2020). Por exemplo, o SPI foi aplicado para a caracterização de eventos secos no Nordeste (Pontes Filho et al., 2020; Marengo et al., 2017; Martins, Magalhães, Fontenele, 2017; Cunha et al., 2018; Gutiérrez et al., 2014), assim como no monitoramento de secas e seus impactos na agricultura em áreas de transição Cerrado-Amazônia (Carvalho et al., 2020) e na região Sudeste (Pereira et al., 2018). No sudeste do Brasil, eventos de seca foram estudados por autores como Gozzo et al. (2019) e Nobre et al. (2016). Há estudos utilizando o SPI para o Estado de São Paulo (Meschiatti e Blain, 2016; Siqueira e Nery, 2017). Para a região metropolitana de São Paulo, De Faro et al. (2019) aplicaram o SPI para avaliar o estresse hídrico do sistema Cantareira e a sua relação com o abastecimento hídrico na região no período de 1983-2018. Além disso, o SPI é utilizado por grupos de pesquisa e órgãos institucionais brasileiros no monitoramento de períodos climáticos úmidos e secos, por exemplo, o Grupo de Estudos Climáticos da Universidade de São Paulo (GrEC-USP, em: <http://www.grec.iag.usp.br/data/spi_BRA.php>), Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE, em: <<http://clima1.cptec.inpe.br/spi/pt>>) e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, em <<https://clima.inmet.gov.br/prec>>).

A região do ABC Paulista é caracterizada por áreas com alta vulnerabilidade socioambiental, o que aumenta a sua exposição aos eventos extremos (Marengo et al., 2020). Dessa forma, é uma importante região para a análise de extremos climáticos, pois

carece de estudos mais aprofundados (Valverde, 2017). A intensificação da vulnerabilidade social da região ocorreu durante o processo de urbanização acelerada no início da década de 80, em decorrência do intenso desenvolvimento industrial, tornando-se um importante polo econômico e comercial na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

No ABC Paulista, os impactos dos eventos climáticos têm sido recorrentes, mas pouco estudados (Valverde, 2017). Fernandes e Valverde (2017) estudaram a resiliência aos extremos meteorológicos a nível municipal. As ocupações irregulares em regiões de encostas no ABC Paulista tornaram a região particularmente vulnerável aos extremos climáticos de precipitação (Araújo, Dunder e Zanirato, 2018). A sensibilidade da região aos eventos extremos secos e úmidos tende a aumentar os problemas sociais, demográficos, de saneamento e de abastecimento hídrico (Valverde, Cardoso e Brambila, 2018; Valverde e Santos, 2014).

Estudos identificaram e caracterizaram o aumento da frequência e intensidade de extremos climáticos na região, com foco no aumento do risco a desastres ambientais, na frequência de inundações e deslizamentos de terra (Valverde, Cardoso e Brambila, 2018), assim como nos impactos relacionados à vulnerabilidade social de parcela significativa da população (Valverde, 2017). A região possui grande vulnerabilidade, pois 56% do território do ABC Paulista encontra-se dentro de áreas de proteção de mananciais ou com restrições ambientais, sendo grande parte dessas áreas ocupadas ilegalmente (Valverde, Cardoso e Brambila, 2018).

Diante do contexto apresentado, o objetivo deste trabalho é identificar e caracterizar eventos climáticos secos e úmidos na região do ABC Paulista durante o período de 2000 a 2020, detalhando-os quanto à sua duração, intensidade, severidade e pico. Para tal, será considerado o SPI para as escalas de acumulados de precipitação de 1, 3, 6 e 12 meses. O período em análise é caracterizado por significativas oscilações nos cenários climáticos na região do ABC Paulista (Valverde, 2017). É importante ressaltar que não foi encontrado nenhum trabalho para a região do ABC aplicando o índice SPI ou outros índices padronizados em estudos de variabilidade climática nas últimas décadas.

2. DADOS E METODOLOGIA

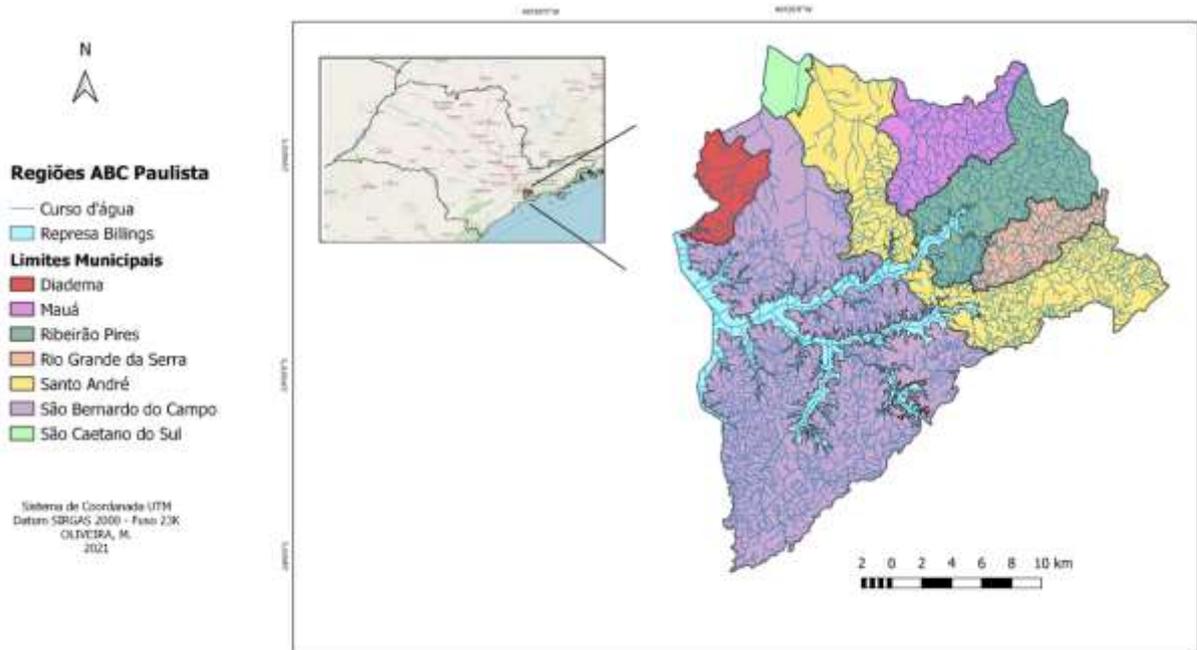
2.1. Área de estudo

A região do ABC Paulista (Figura 1) abrange uma área de 828,7 km² a sudeste da RMSP e possui uma população de aproximadamente 2,5 milhões de habitantes (IBGE, 2010). A região é composta por sete municípios: Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul, Diadema, Mauá, Ribeirão Pires e Rio Grande da Serra (IBGE, 2010).

Do ponto de vista do desenvolvimento urbano, segundo o Consórcio Intermunicipal do Grande ABC (2015), trata-se de uma região interligada entre seus municípios, com a presença de vias de alta circulação e com uma localização estratégica entre a RMSP e o Porto de Santos.

No que se refere ao clima, a região é caracterizada pelo clima subtropical úmido, de acordo com a classificação climática de Strahler (1969). Durante o verão austral, o clima é quente e úmido, e no inverno é frio e seco (Valverde e Santos, 2014). Os maiores acumulados de precipitação ocorrem nos meses do verão austral (DJF), sendo janeiro o mês mais chuvoso (com valores acumulados mensais de aproximadamente 250 mm) e os menores nos meses de inverno (JJA) (agosto com menos que 50 mm), segundo a climatologia do período 1999-2014 (Valverde, Cardoso e Brambila, 2018). O ABC Paulista é influenciado por distintos sistemas atmosféricos, que podem favorecer ou não a precipitação na região. Dentre esses sistemas, destacamos a fase ativa do sistema de monção da América do Sul (SMAS), que ocorre no verão, e é marcada pelo aumento da precipitação. Outro sistema atmosférico que influencia a região é o Anticiclone subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que contribui para a redução das chuvas na região quando expande a sua área de influência em direção ao sudeste do Brasil, inibindo a convecção e a passagem de sistemas frontais sobre a região sudeste do Brasil (Reboita et al., 2010, 2018). Devido à topografia do ABC Paulista, linhas de instabilidade pré-frontais, bloqueios atmosféricos e a brisa marítima também atuam na região (Reboita et al., 2010).

Figura 1 - Mapa da Região do ABC Paulista e seus municípios, na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), sua hidrografia e a Represa Billings.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

No que se refere à hidrologia, o ABC Paulista destaca-se pela importância que tem em relação à segurança hídrica da RMSP, devido aos corpos hídricos que possui, sendo a Represa Billings o corpo hídrico principal e de maior relevância na região (PDPA, 2010). A Represa Billings é o maior reservatório superficial de água doce existente na RMSP (Risso et al., 2018).

A região possui um relevo de transição entre planalto paulista e Serra do Mar, sendo que grande parte das moradias precárias estão localizadas nas áreas mais acidentadas. Segundo o Diagnóstico dos assentamentos precários nos municípios da Macrometrópole Paulista (Marques et al., 2013), moradias em áreas de várzeas ou de mananciais também estão expostas a riscos (Valverde, 2017; Araújo, Dunder e Zanirato, 2018).

2.2. Dados

Esse estudo utilizou estimativas mensais de precipitação provenientes dos satélites do projeto GPM-IMERG (em inglês, *Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurements*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Esses dados possuem cobertura global com resolução espacial de 0,1° x 0,1° (Huffman et al.,

2015). A falta de uma distribuição espacial e temporal homogênea de dados de precipitação para o ABC Paulista incentiva o uso de dados do GPM-IMERG (Huffman et al., 2015). O GPM-IMERG é uma combinação de diferentes bases de dados de precipitação obtidos via satélite, disponibilizada em rede. A sua vantagem é o oferecimento de cobertura espacial e temporal regular para análises regionais, como a deste trabalho.

Foi utilizada a versão “GPM_3IMERGM V6” que se encontra disponível em: https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGM_06/summary?keywords=IMERG.

Utilizando o *software* MATLAB, dados geoespaciais e vetoriais em sistemas de informação geográfica (SIG) e arquivos *shapefiles* das malhas municipais do ABC Paulista (IBGE, 2018), foi calculada a série temporal dos valores médios mensais de precipitação sobre o domínio do ABC Paulista entre junho/2000 e maio/2020. Considerando a resolução espacial dos dados do GPM-IMERG, cada cena consistia em 8 pontos de grade sobre a área de estudo. Oliveira et al. (2020) comparou dados de precipitação do GPM/IMERG com dados de superfície do DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) para a região do ABC Paulista de 2001 a 2016. Os autores mostraram que o GPM/IMERG reproduziu de maneira satisfatória a variabilidade temporal registrada nos dados do DAEE.

2.3. Metodologia

Foram calculadas séries temporais do SPI a partir de dados mensais de precipitação extraídos do projeto GPM-IMERG para o período de 2000-2020. A climatologia foi caracterizada entre junho/2000 e maio/2020, baseando-se no ciclo anual da precipitação. Considera-se junho como o início do Inverno Austral, estação caracterizada pelos menores valores climatológicos de precipitação acumulada mensal (Valverde, Cardoso e Brambila, 2018). Assim, foram utilizados 20 anos completos de dados. O uso do SPI teve como objetivo identificar os eventos climáticos secos e úmidos na região do ABC Paulista em diferentes escalas temporais. A metodologia teve como base a apresentada em Drumond et al. (2021):

a) Obtenção do SPI: O SPI está relacionado ao número de desvios-padrão em que a precipitação acumulada varia em relação ao valor de sua média climatológica. Para o presente estudo, o cálculo da série temporal do SPI foi realizado utilizando a função “spi” do pacote denominado “SPEI” do *software* de computação científica R (<https://cran.r->

project.org/web/packages/SPEI/SPEI.pdf). Neste trabalho, foram utilizadas as escalas de SPI-1, 3, 6 e 12 meses. Uma explicação detalhada sobre o SPI, seu cálculo e suas aplicações pode ser consultada em WMO (2012). Assim como para outras análises climatológicas, recomenda-se usar 30 anos ou mais para ajustar a distribuição gama aos dados de cada mês. Ao usar longos períodos, a série temporal de SPI pode se aproximar de uma série temporal de anomalia normalizada. Reconhecemos que ao utilizar apenas 20 anos de dados neste trabalho, a incerteza na determinação dos parâmetros de forma e escala da distribuição gama pode ser maior. Porém, verificou-se que a correlação entre a série temporal do SPI-1 e da anomalia de precipitação mensal normalizada é de 0,97, indicando uma concordância satisfatória na representação dos desvios da normalidade em relação ao volume de precipitação.

b) Classificação de condições climáticas secas e úmidas: Após o cálculo do valor do SPI, pode-se classificar os resultados em condições climáticas secas e úmidas. Uma condição climática seca é definida pela ocorrência de valores negativos de SPI, que refletem um estado climático de déficit de precipitação acumulada naquele intervalo de tempo (1, 3, 6 e 12 meses). As condições climáticas úmidas são identificadas pelos valores positivos do SPI, indicando intervalos de precipitação nas escalas de análise. Ambas as condições podem provocar impactos em diferentes setores sociais, ambientais e econômicos (WMO, 2012).

Seguindo McKee, Doesken e Kleist (1993), os valores mensais de SPI obtidos nas diferentes escalas de acumulação temporal de precipitação são classificados de acordo com a sua magnitude (Tabela 1), assim como aplicados na identificação de um evento climático anômalo. Dependendo da aplicação, o fato do SPI não utilizar outras variáveis além da precipitação para o seu cálculo também pode ser considerado uma desvantagem em relação a outros índices. A temperatura e a evapotranspiração, por exemplo, também possuem influência na configuração de períodos secos/úmidos (Hayes et al., 2011). Contudo, neste trabalho o foco está na identificação dos episódios climáticos extremos em função do excesso ou déficit de precipitação. Foi utilizado o teste Z de proporção para avaliar a predominância de condições climáticas ao longo das décadas (Morettin e Bussab, 2017).

Tabela 1 - Classificação dos valores do SPI de acordo com a sua magnitude.

| SPI | Categorias |
|---------------|---------------------|
| 2 ou mais | Extremamente úmido |
| 1,5 à 1,99 | Severamente úmido |
| 1,0 à 1,49 | Moderadamente úmido |
| 0 a 0,99 | Levemente úmido |
| -0,99 à -1,0 | Levemente seco |
| -1,0 à -1,49 | Moderadamente seco |
| -1,5 à -1,99 | Severamente seco |
| -2,0 ou menos | Extremamente seco |

Fonte: Adaptado de McKee, Doesken e Kleist (1993).

c) Classificação e características de eventos climáticos extremos secos e úmidos: A partir das condições climáticas é possível analisar a sua persistência, ou seja, o período de tempo em que uma certa condição persiste, eventualmente resultando em um evento climático. Uma sequência de valores de SPI negativos (positivos), seguidos por um valor igual ou menor (maior) que -1 (1) definem um evento climático seco (úmido). O episódio seco (úmido) termina quando o valor do SPI se torna positivo (negativo)(McKee et al., 1993).

Seguindo a metodologia aplicada por Drumond et al. (2021), os eventos foram definidos segundo a persistência ou magnitude das condições anômalas. Foi considerado que a duração mínima de um evento é de 1 mês, desde que o valor absoluto do SPI seja superior a 1, indicando condições climáticas anômalas moderadas ou de maior magnitude (Tabela 1). Para durações superiores a 1 mês, os eventos são compostos por valores consecutivos de mesmo sinal. Desta forma, foram considerados como dois eventos independentes duas sequências de mesmo sinal que sejam separadas por um intervalo de 1 mês.

Segundo McKee, Doesken e Kleist (1993), é possível calcular diferentes parâmetros para a caracterização de um evento climático: duração (número de meses do evento), severidade (soma dos valores mensais do SPI registrados durante o evento), intensidade

(fração entre severidade e duração) e pico (valor absoluto máximo do SPI no evento). Neste trabalho, foram selecionados apenas os eventos que tiveram início e fim entre junho/2000-maio/2020.

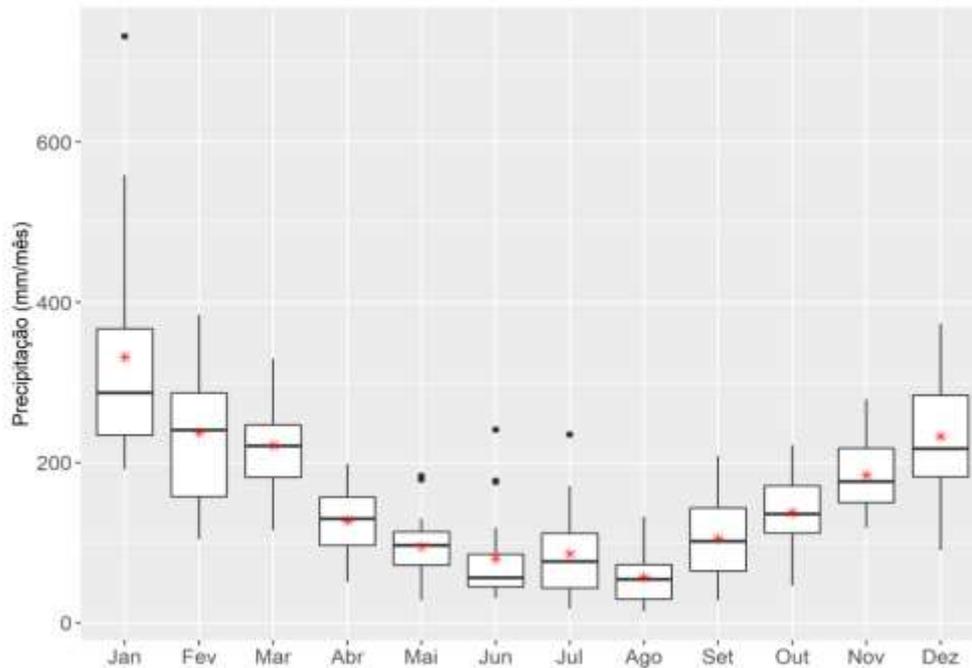
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Climatologia da precipitação no ABC Paulista

A Figura 2 apresenta o ciclo anual da precipitação na região do ABC Paulista no período 2000-2020, de acordo com as estimativas do algoritmo IMERG. A precipitação média anual obtida foi de 1896 mm/ano. Cerca de 42% da precipitação anual ocorreu durante o verão (DJF), com o mês de janeiro contribuindo com 17% do total sazonal (média de 331 mm/mês). Já o inverno (JJA), responde por apenas 12% da precipitação anual, sendo agosto o mês com menor contribuição (57 mm/mês).

Os resultados concordam com Valverde, Cardoso e Brambila (2018), que analisaram estações meteorológicas em sete municípios do ABC Paulista, para o período entre 1999-2014 (período variável para cada estação). Os autores identificaram os meses mais chuvosos (DJF) e secos (JJA).

Figura 2 – Diagrama de caixas apresentando o ciclo anual de precipitação acumulada mensal (mm/mês) sobre o ABC Paulista para o período entre junho/2000 e maio/2020. As extremidades das caixas representam os 1º Quartil (Q1) e 3º Quartil (Q3), a média (asterisco vermelho) e a mediana (linha horizontal dentro de cada caixa). As linhas verticais representam a faixa de valores observados excluindo os valores discrepantes (*outliers*) e os pontos representam os valores discrepantes (*outliers*), definidos como: valores menores que $Q1 - 1,5 * IQ$ ou valores maiores que $Q3 + 1,5 * IQ$. (IQ= intervalo interquartil, $Q3 - Q1$).



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

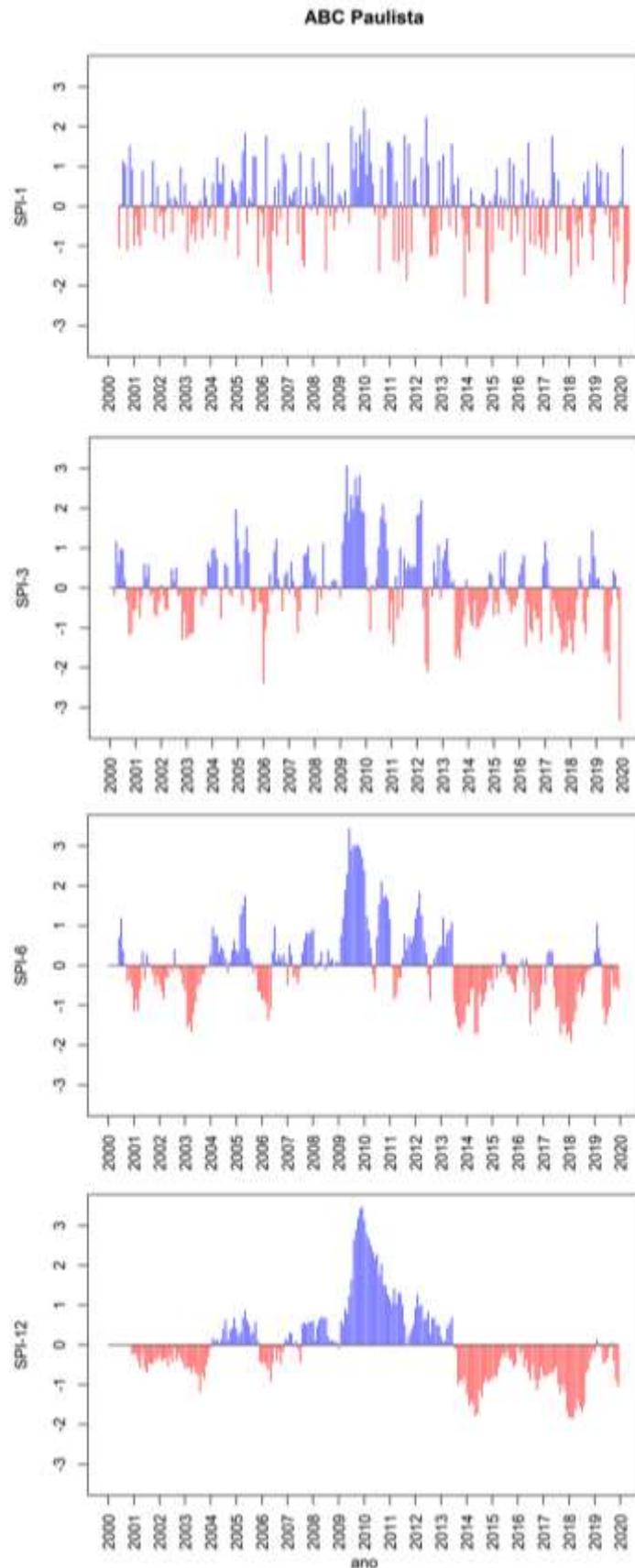
3.2. Análise das condições climáticas secas e úmidas

O SPI auxilia na identificação das variações da precipitação em relação à climatologia. A Figura 3 apresenta a série temporal de 2000 a 2020 do SPI nas escalas de acumulação mensal (SPI-1), trimestral (SPI-3), semestral (SPI-6) e anual (SPI-12). Áreas em azul, valores positivos, indicam condições úmidas. Áreas em vermelho, valores negativos, representam condições secas. Há uma alternância entre períodos caracterizados por predominância de condições secas e úmidas (Figura 3), que pode ser observada nas outras escalas de SPI. Na escala SPI-12, por exemplo, a série inicia-se com condições secas, com pico em janeiro/2004 (-1,18), e em julho deste mesmo ano o SPI-12 tornou-se positivo (0,17). Nesse período (janeiro/2004 até junho/2004), por exemplo, foi registrado um déficit hídrico na RMSP (incluindo o ABC Paulista), e que trouxe diversas consequências negativas aos setores energético e econômico da região (Rodrigues, Martini e Serni, 2002; Tolmasquim, 2000).

Ainda para o SPI-12, no ano de 2005 foi identificado o predomínio de condições úmidas na categoria leve, ou seja, valores positivos do SPI nesse intervalo (pico em outubro/2005 com 0,86). Estas condições úmidas também foram identificadas pelo SPI nas escalas menores, atingindo o pico de 1,83 (SPI-1) e 1,97 (SPI-3) em maio/2005. Pode-se observar um longo período marcado por condições úmidas em torno do ano de 2010 nas quatro escalas de acumulação analisadas. Na escala SPI-12, esse período é bastante evidente, e teve início em torno de 2008, depois de um período de condições secas menor tanto em duração quanto em magnitude. Em 2010, foram registrados os maiores acumulados mensais de precipitação no ABC Paulista durante o período estudado, atingindo o valor de 732 mm para o mês de janeiro/2010, o dobro da média climatológica mensal para o mês (331,6 mm). Segundo o SPI-1, o mês de janeiro/2010 registrou o valor de 2,46 (categoria extremo). O pico foi atingido no SPI-12 em maio/2010 (3,47, categoria extremo) e o período úmido teve fim em dezembro/2013, quando o valor do SPI tornou-se negativo (-0,06).

Em seguida, houve predomínio de condições secas entre 2014 e 2020, que também se configuraram em diferentes escalas de SPI. Neste período, as condições secas tiveram início em dezembro/2013 e persistiram ao longo de 2014, com condições de seca severa em todas as escalas do SPI, atingindo o pico de condições extremas no SPI-1 em outubro/2014 (-2,44). O ano de 2014 foi marcado por uma crise hídrica, caracterizada por reduções drásticas no volume de água nos principais reservatórios que abastecem a RMSP, incluindo o reservatório do Rio Grande no ABC Paulista (Nobre et al., 2016; Coelho et al., 2016). Condições de seca também foram observadas em 2020, com o SPI-1 registrando valor mínimo em março/2020 (-2,46, categoria seco extremo) e o SPI-3 em maio/2020 (-3,32, categoria seco extremo). Durante essas condições, que se estenderam por 2020, foram registrados casos de ondas de calor que afetaram todo o sudeste da América do Sul, com o aumento da temperatura e casos de seca agrícola (Fernandes et al., 2021; Marengo et al., 2021).

Figura 3 - Série temporal dos valores mensais do SPI-1, SPI-3, SPI-6 e SPI-12 para o ABC Paulista durante 2000-2020.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Ao separar o período de estudo em décadas (década de 2000: junho/2000-maio/2010; década de 2010: junho/2010-maio/2020), a Tabela 2 apresenta a distribuição dos valores mensais das escalas SPI-1, 3, 6 e 12 segundo as categorias definidas por McKee, Doesken e Kleist (1993) e acumuladas nas décadas de 2000 e 2010. Os valores mensais de SPI foram classificados de acordo com a sua magnitude, seguindo a Tabela 1.

Os resultados sugerem um predomínio de condições úmidas na década de 2000, com ocorrência de valores na categoria extrema nas escalas SPI-3, 6 e 12. Considerando o nível de significância de 5%, a aplicação do teste Z para proporções de condições secas e úmidas confirmou a predominância de condições úmidas na década de 2000 para a escala mensal SPI-1 ($p=0,04$). Já na década de 2010, as análises apontam para um predomínio de condições secas, com registro de valores atingindo a categoria extrema nas escalas SPI-1 e 3. O teste Z para proporções confirmou a predominância de condições secas nessa década para as escalas semestral (SPI-6, $p=0,007$) e anual (SPI-12, $p=0,001$) (Morettin e Bussab, 2017). Apesar da década de 2010 iniciar com condições úmidas, as condições secas predominaram durante este período nas escalas SPI-6 e SPI-12. Este resultado está coerente com as análises de Fontão e Zavattini (2019), que avaliaram o padrão de chuva e o abastecimento de água na RMSP, considerando o ano de 2010 como chuvoso e os anos seguintes (principalmente o ano de 2014) predominantemente secos.

Ao analisar em conjunto a Figura 3 e a Tabela 2, é importante ressaltar os efeitos das condições úmidas observadas em torno de 2010 em ambas as décadas. Valores positivos (úmidos) foram registrados a partir de julho/2009 para todas as escalas de SPI, atingindo a categoria extrema em todas elas durante janeiro/2010. Essas condições úmidas extremas ocorreram nas escalas SPI-3, 6 e 12 em fevereiro/2011, e aparecem nos tons de azul mais escuro na década de 2010, na Tabela 2. Conseqüentemente, os efeitos dessas condições úmidas se mostraram presentes em ambas as décadas.

Tabela 2 - Número de ocorrências dos valores mensais de SPI-1, SPI-3, SPI-6 e SPI-12 para o ABC Paulista nas categorias segundo Tabela 1 e acumuladas nas décadas de 2000 e 2010.

| | | CONDIÇÕES SECAS | | CONDIÇÕES ÚMIDAS | | | |
|--------------------|----------|-----------------|------|--------------------|------|------------|--|
| | | 2000 | 2010 | 2000 | 2010 | | |
| SPI-1 | Leve | 40 | 38 | Leve | 46 | 41 | |
| | Moderado | 5 | 15 | Moderado | 15 | 9 | |
| | Severo | 4 | 6 | Severo | 8 | 7 | |
| | Extremo | 1 | 3 | Extremo | 1 | 1 | |
| Total por década | | 50 | 62 | Total por década | 70 | 58 | |
| Total geral | | 112 | | Total geral | | 128 | |
| SPI-3 | Leve | 48 | 43 | Leve | 41 | 40 | |
| | Moderado | 9 | 14 | Moderado | 7 | 6 | |
| | Severo | 0 | 9 | Severo | 7 | 4 | |
| | Extremo | 1 | 2 | Extremo | 5 | 2 | |
| Total por década | | 58 | 68 | Total por década | 60 | 52 | |
| Total geral | | 126 | | Total geral | | 112 | |
| SPI-6 | Leve | 44 | 48 | Leve | 49 | 31 | |
| | Moderado | 6 | 18 | Moderado | 4 | 8 | |
| | Severo | 2 | 8 | Severo | 2 | 5 | |
| | Extremo | 0 | 0 | Extremo | 8 | 2 | |
| Total por década | | 52 | 74 | Total por década | 63 | 46 | |
| Total geral | | 126 | | Total geral | | 109 | |
| SPI-12 | Leve | 53 | 56 | Leve | 48 | 22 | |
| | Moderado | 1 | 10 | Moderado | 1 | 11 | |
| | Severo | 0 | 11 | Severo | 1 | 2 | |
| | Extremo | 0 | 0 | Extremo | 5 | 8 | |
| Total por década | | 54 | 77 | Total por década | 55 | 43 | |
| Total geral | | 131 | | Total geral | | 98 | |

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

3.3. Identificação e características dos eventos climáticos extremos

Uma análise complementar consistiu na identificação e caracterização de eventos extremos climáticos. A Tabela 3 apresenta o número de eventos climáticos secos e úmidos identificados em cada escala temporal do SPI (1, 3, 6 e 12 meses).

No total, foram encontrados 45 eventos secos, sendo 25 (SPI-1), 13 (SPI-3), 6 (SPI-6) e 1 (SPI-12). No caso dos eventos úmidos, foram encontrados 50 eventos, sendo 27 (SPI-1), 15 (SPI-3), 6 (SPI-6) e 2 (SPI-12). Nota-se números praticamente similares nas quatro escalas estudadas entre eventos secos e úmidos.

Tabela 3 - Número de eventos climáticos secos e úmidos identificados no ABC Paulista durante o período de 2000-2020 nas escalas temporais SPI-1, 3, 6 e 12.

| | Seco | Úmido |
|---------------|------|-------|
| SPI-1 | 25 | 27 |
| SPI-3 | 13 | 15 |
| SPI-6 | 6 | 6 |
| SPI-12 | 1 | 2 |
| Total | 45 | 50 |

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Os eventos climáticos secos (úmidos) foram descritos pela data de início, data final e pelos parâmetros (duração, severidade, intensidade e pico) nas Tabelas 4 e 5. Para os eventos climáticos secos (Tabela 4), na escala SPI-1, foram encontrados dois eventos de máxima severidade (4,48) dentro da série. O primeiro ocorreu em abril-junho/2006 e o segundo em novembro/2013-fevereiro/2014. O evento mais intenso (2,44) e de maior pico (-2,44) foi encontrado em outubro/2014, que durou apenas um mês, porém atingiu a categoria extrema. Condições secas foram observadas na região sudeste do Brasil durante os anos de 2014-2015, provocando uma crise hídrica no abastecimento de água dos principais reservatórios que abastecem a RMSP e o ABC Paulista (Nobre et al. 2016; Coelho et al., 2016; Valverde, 2017). O evento seco mais longo registrado na escala SPI-1 ocorreu

em agosto/2019-dezembro/2019, com duração de 5 meses, que também trouxe impactos socioambientais na região (Marengo et al., 2020).

No SPI-3, o evento mais longo ocorreu de fevereiro/2003-março/2004 (14 meses), o de maior pico em dezembro/2005-agosto/2006 (atingindo a categoria extremo em junho/2006 com -2,39), o mais intenso (1,51) em setembro/2012-novembro-2012, e o mais severo em setembro/2017-setembro/2018 (13,16). No SPI-6, também foram observados eventos simultâneos aos eventos na escala SPI-1 e 3, evidenciando a propagação de condições secas por diferentes escalas de acumulação da precipitação. Destacou-se o evento SPI-6 de dezembro/2013-junho/2015, com a maior duração (19 meses), severidade (19,29), intensidade (1,02). O evento de maior pico (-1,91) foi encontrado em novembro/2017-abril/2019 na categoria severo, coincidindo com eventos identificados nas escalas de tempo menores. No SPI-12 foi identificado apenas um evento seco (dezembro/2013-junho/2019) com duração de 67 meses, severidade de 57,53, intensidade de 0,86, e pico em agosto/2018 (-1,85) na categoria severo.

Durante o período completo de 2014-2020, para o SPI-12, a condição seca foi predominante, apesar da alternância de eventos secos e úmidos presentes nas escalas de acumulação menores (mensal, trimestral e semestral), conforme observado na Figura 4. O único evento seco, portanto, pode ser analisado a partir de dois picos importantes: o primeiro em ocorrência, mas secundário em relação ao valor do pico, registrado em outubro/2014 (-1,77) e o segundo, considerado principal, em agosto/2018 (-1,85).

Na Tabela 5, pode-se observar os eventos úmidos identificados de 2000 a 2020. Na escala SPI-1 o evento de junho/2009 a maio/2010 foi considerado o mais longo (11 meses), com valor de severidade de 14,96 e com o maior pico (2,46 em janeiro/2010) nessa escala. Contudo, o evento de agosto/2011, com duração de apenas um mês, foi o mais intenso (1,79) entre os eventos identificados no SPI-1. Ainda na mesma tabela, na escala SPI-3, o evento de julho/2009 a junho/2010 foi o maior nesta escala em todos os parâmetros. Foi um evento que durou 12 meses, se destacou com os maiores valores de severidade (24,27) e intensidade (2,02) nessa escala, e o pico atingiu a categoria extrema (3,03) em setembro/2009. O mesmo ocorre na escala SPI-6, na qual foi identificado um evento que se destaca por apresentar os maiores parâmetros da escala. Em janeiro/2009-setembro/2010, na escala SPI-6, os parâmetros também se destacaram dos demais, pois teve uma duração

de 21 meses, severidade (32,93), intensidade (1,57) e pico em novembro/2009 na categoria extremo (3,45). No SPI-12, foram identificados dois eventos, o primeiro sendo julho/2009-janeiro/2012 que se destaca por ter maiores valores em todos os parâmetros. Foi um evento na categoria extremo, e o pico foi em maio/2010 (3,47). Em 2010, foram registrados deslizamentos de terra, inundações e impactos sociais principalmente nas regiões periféricas do ABC Paulista (Diário do Grande ABC, 2010). O segundo (março/2012-novembro/2013), teve o seu pico (1,27) em julho/2012 na categoria moderado.

Tabela 4 - Eventos climáticos secos para o SPI-1, -3, -6 e -12 identificados no ABC Paulista durante o período de 2000-2020. Para cada escala, estão destacados os eventos com o máximo de duração (negrito), severidade (itálico), intensidade (sublinhado) e pico (asterisco).

| Data Inicial | Data final | Duração (meses) | Severidade | Intensidade | Pico | Data Inicial | Data final | Duração (meses) | Severidade | Intensidade | Pico |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|-------------|--------|
| SPI-1 | | | | | | SPI-3 | | | | | |
| 10/2000 | 10/2000 | 1 | 1,11 | 1,11 | -1,11 | 02/2001 | 09/2001 | 8 | 4,80 | 0,60 | -1,19 |
| 02/2003 | 02/2003 | 1 | 1,15 | 1,15 | -1,15 | 02/2003 | 03/2004 | 14 | 7,94 | 0,57 | -1,27 |
| 02/2005 | 02/2005 | 1 | 1,26 | 1,26 | -1,26 | 12/2005* | 08/2006* | 9 | 6,10 | 0,68 | -2,39* |
| 11/2005 | 02/2006 | 4 | 2,55 | 0,64 | -1,50 | 09/2007 | 11/2007 | 3 | 1,94 | 0,65 | -1,11 |
| <i>04/2006</i> | <i>06/2006</i> | 3 | <i>4,48</i> | 1,49 | -2,16 | 07/2010 | 08/2010 | 2 | 1,16 | 0,58 | -1,08 |
| 08/2007 | 09/2007 | 2 | 2,86 | 1,43 | -1,52 | 05/2011 | 07/2011 | 3 | 2,83 | 0,94 | -1,43 |
| 07/2008 | 07/2008 | 1 | 1,62 | 1,62 | -1,62 | <u>09/2012</u> | <u>11/2012</u> | 3 | 4,52 | <u>1,51</u> | -2,11 |
| 08/2010 | 08/2010 | 1 | 1,65 | 1,65 | -1,65 | 12/2013 | 04/2014 | 5 | 6,82 | 1,36 | -1,78 |
| 03/2011 | 03/2011 | 1 | 1,38 | 1,38 | -1,38 | 06/2014 | 03/2015 | 10 | 6,87 | 0,69 | -1,01 |
| 05/2011 | 05/2011 | 1 | 1,40 | 1,40 | -1,40 | 09/2016 | 04/2017 | 8 | 7,45 | 0,93 | -1,45 |
| 07/2011 | 07/2011 | 1 | 1,10 | 1,10 | -1,10 | <i>09/2017</i> | <i>09/2018</i> | 13 | <i>13,16</i> | 1,01 | -1,63 |
| 09/2011 | 09/2011 | 1 | 1,85 | 1,85 | -1,85 | 12/2018 | 02/2019 | 3 | 2,27 | 0,76 | -1,14 |
| 11/2011 | 11/2011 | 1 | 1,15 | 1,15 | -1,15 | 10/2019 | 01/2020 | 4 | 5,57 | 1,39 | -1,89 |
| 08/2012 | 11/2012 | 4 | 4,47 | 1,12 | -1,26 | SPI-6 | | | | | |
| 11/2013 | 02/2014 | 4 | 4,48 | 1,12 | -2,29 | 03/2001 | 09/2001 | 7 | 4,98 | 0,71 | -1,14 |
| <u>10/2014*</u> | <u>10/2014*</u> | 1 | 2,44 | <u>2,44</u> | -2,44* | 02/2003 | 04/2004 | 15 | 9,56 | 0,64 | -1,66 |
| 01/2015 | 01/2015 | 1 | 1,15 | 1,15 | -1,15 | 02/2006 | 10/2006 | 9 | 6,67 | 0,74 | -1,37 |
| 04/2016 | 04/2016 | 1 | 1,73 | 1,73 | -1,73 | <u>12/2013</u> | <u>06/2015</u> | 19 | <i>19,29</i> | <u>1,02</u> | -1,70 |
| 11/2016 | 12/2016 | 2 | 1,81 | 0,91 | -1,07 | 11/2016 | 07/2017 | 9 | 6,72 | 0,75 | -1,47 |
| 02/2017 | 03/2017 | 2 | 1,98 | 0,99 | -1,21 | 11/2017* | 04/2019* | 18 | 18,09 | 1,01 | -1,91* |
| 07/2017 | 07/2017 | 1 | 1,18 | 1,18 | -1,18 | SPI-12 | | | | | |
| 12/2017 | 02/2018 | 3 | 3,45 | 1,15 | -1,76 | <u>12/2013*</u> | <u>06/2019*</u> | 67 | 57,53 | <u>0,86</u> | -1,85* |
| 04/2018 | 07/2018 | 4 | 3,06 | 0,77 | -1,49 | | | | | | |
| 11/2018 | 01/2019 | 3 | 2,51 | 0,84 | -1,37 | | | | | | |
| 08/2019 | 12/2019 | 5 | 4,25 | 0,85 | -1,94 | | | | | | |

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Tabela 5 - Eventos climáticos úmidos para o SPI-1, -3, -6 e -12 identificados no ABC Paulista durante o período de 2000-2020. Para cada escala, estão destacados os eventos com o máximo de duração (negrito), severidade (itálico), intensidade (sublinhado) e pico (asterisco).

| Data inicial | Data final | Duração (meses) | Severidade | Intensidade | Pico | Data inicial | Data final | Duração (meses) | Severidade | Intensidade | Pico |
|-----------------|-----------------|-----------------|------------|-------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|-------------|-------|
| SPI-1 | | | | | | SPI-3 | | | | | |
| 07/2000 | 09/2000 | 1 | 2,22 | 0,74 | 1,14 | 09/2000 | 01/2001 | 5 | 3,90 | 0,78 | 1,17 |
| 11/2000 | 12/2000 | 2 | 2,44 | 1,22 | 1,51 | 04/2004 | 08/2004 | 5 | 3,87 | 0,77 | 1,00 |
| 07/2001 | 10/2001 | 4 | 1,24 | 0,31 | 1,14 | 04/2005 | 07/2005 | 4 | 3,82 | 0,96 | 1,97 |
| 04/2004 | 07/2004 | 4 | 3,43 | 0,86 | 1,23 | 09/2005 | 11/2005 | 3 | 3,38 | 1,13 | 1,52 |
| 03/2005 | 05/2005 | 3 | 3,84 | 1,28 | 1,83 | 11/2006 | 01/2007 | 3 | 2,37 | 0,79 | 1,23 |
| 07/2005 | 10/2005 | 4 | 2,82 | 0,71 | 1,27 | 12/2007 | 06/2008 | 7 | 3,85 | 0,55 | 1,04 |
| 03/2006 | 03/2006 | 1 | 1,77 | 1,77 | 1,77 | 10/2008 | 12/2008 | 3 | 1,22 | 0,41 | 1,12 |
| 11/2006 | 12/2006 | 2 | 2,39 | 1,20 | 1,32 | 07/2009* | 06/2010* | 12 | 24,27 | <u>2,02</u> | 3,07* |
| 07/2007 | 07/2007 | 1 | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 11/2010 | 04/2011 | 6 | 7,74 | 1,29 | 2,09 |
| 01/2008 | 02/2008 | 2 | 1,69 | 0,85 | 1,21 | 10/2011 | 10/2011 | 1 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 08/2008 | 08/2008 | 1 | 1,60 | 1,60 | 1,60 | 12/2011 | 08/2012 | 9 | 9,32 | 1,04 | 2,20 |
| 10/2008 | 10/2008 | 1 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 02/2013 | 04/2013 | 3 | 1,99 | 0,66 | 1,09 |
| 07/2009* | 05/2010* | 11 | 14,96 | 1,36 | 2,46* | 06/2013 | 11/2013 | 6 | 3,67 | 0,61 | 1,24 |
| 12/2010 | 02/2011 | 3 | 4,69 | 1,56 | 1,63 | 05/2017 | 08/2017 | 4 | 2,48 | 0,62 | 1,17 |
| <u>08/2011</u> | <u>08/2011</u> | 1 | 1,79 | <u>1,79</u> | 1,79 | 03/2019 | 07/2019 | 5 | 3,06 | 0,61 | 1,44 |
| 10/2011 | 10/2011 | 1 | 1,56 | 1,56 | 1,56 | SPI-6 | | | | | |
| 12/2011 | 04/2012 | 5 | 2,70 | 0,54 | 1,23 | 03/2005 | 01/2006 | 11 | 7,30 | 0,66 | 1,73 |
| 06/2012 | 07/2012 | 2 | 3,28 | 1,64 | 2,24 | 01/2009* | 09/2010* | 21 | 32,93 | <u>1,57</u> | 3,45* |
| 12/2012 | 12/2012 | 1 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 12/2010 | 06/2011 | 7 | 10,61 | 1,52 | 2,11 |
| 02/2013 | 02/2013 | 1 | 1,29 | 1,29 | 1,29 | 12/2011 | 11/2012 | 12 | 10,01 | 0,83 | 1,84 |
| 06/2013 | 07/2013 | 2 | 2,12 | 1,06 | 1,58 | 03/2013 | 11/2013 | 9 | 5,93 | 0,66 | 1,20 |
| 09/2015 | 09/2015 | 1 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 05/2019 | 09/2019 | 5 | 2,08 | 0,42 | 1,06 |
| 11/2015 | 11/2015 | 1 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | SPI-12 | | | | | |
| 05/2016 | 06/2016 | 2 | 1,91 | 0,96 | 1,59 | 07/2009* | 01/2012* | 31 | 56,04 | <u>1,81</u> | 3,47* |
| 04/2017 | 06/2017 | 3 | 2,77 | 0,92 | 1,75 | 03/2012 | 11/2013 | 21 | 12,00 | 0,57 | 1,28 |
| 02/2019 | 05/2019 | 4 | 2,67 | 0,67 | 1,07 | | | | | | |
| 01/2020 | 02/2020 | 2 | 1,65 | 0,82 | 1,48 | | | | | | |

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

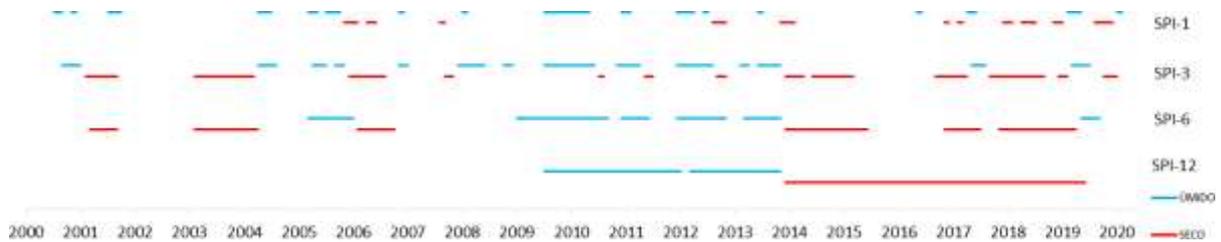
A Figura 4 sintetiza a ocorrência dos eventos climáticos úmidos e secos identificados durante o período de estudo para as quatro escalas de SPI. No geral, devido à persistência das condições climáticas de déficit ou de excesso de precipitação no tempo, é possível observar a propagação das condições climáticas anômalas por diferentes escalas de acumulação temporal do SPI. Também é possível observar o extenso período seco marcado entre 2014-2019, já discutido.

Vale relembrar que as condições secas observadas no início da série temporal SPI-12 (Figura 3) não foram consideradas como um evento extremo nesta metodologia aplicada, porque provavelmente estão associadas a um evento que iniciou antes do período de análise, ou seja, antes de junho de 2000. Condições secas severas foram registradas na RMSP em 2014-2015 (Sabesp, 2015). Em 2014, a crise hídrica de abastecimento de água nos reservatórios que abastecem a RMSP e o ABC Paulista trouxe inúmeros prejuízos socioeconômicos, e desencadeou, em caráter de urgência, diversas ações de planejamento hídrico e social para cenários climáticos extremos (Nobre et al. 2016; Coelho et al. 2016; Valverde, 2017).

Neste trabalho foi feito um levantamento das condições e a identificação dos eventos extremos no ABC Paulista como um todo. O trabalho teve como foco a análise detalhada do índice SPI para a escala regional, seguindo os objetivos propostos. Porém, é importante considerar também a variabilidade climática dentro da região, uma vez que a área de estudo é heterogênea do ponto de vista geográfico e também socioambiental. Essas análises da variabilidade intrarregional serão consideradas em um trabalho futuro. A partir dos resultados desse estudo, considera-se também importante futuramente estudar os padrões dinâmicos atmosféricos envolvidos nesses eventos.

A análise das escalas do SPI permite classificar segundo os parâmetros de duração, intensidade, severidade e pico. Paralelamente, eles categorizam as consequências ambientais decorrentes dos eventos. Dessa forma o índice se mostrou útil para identificar e quantificar os eventos climáticos.

Figura 4 - Eventos climáticos secos (vermelho) e úmidos (azul) identificados no ABC Paulista nas escalas SPI-1, SPI-3, SPI-6 e SPI-12 durante o período junho 2000 a maio 2020. Os espaços em branco indicam a ausência de eventos segundo a metodologia aplicada neste trabalho.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

4. CONCLUSÃO

Neste estudo, foram identificados e caracterizados os eventos climáticos úmidos e secos na região do ABC Paulista para o período de 2000 a 2020, utilizando o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) nas escalas de acumulação mensal (SPI-1), trimestral (SPI-3), semestral (SPI-6) e anual (SPI-12). Os resultados obtidos foram sintetizados abaixo:

- 42% da precipitação anual do ABC Paulista se concentrou no verão (DJF), sendo janeiro o mês de maior contribuição (17%) e, no inverno (JJA), julho apresentou menor acumulado anual (3%);
- Os períodos de condições úmidas e secas foram alternados ao longo das séries temporais do SPI. Mais evidente no SPI-12, com o início da série um período seco, seguido por um período úmido com pico extremo em janeiro de 2010 e após, por um segundo período seco que se estendeu de 2014 a 2020;
- Houve um predomínio de condições úmidas na década de 2000, com valores do teste z significativo para a escala mensal SPI-1 ($p=0,04$). Nessa escala, foram encontradas 128 condições, sendo 70 úmidas.
- Para a década de 2010, houve a predominância de condições secas nas escalas SPI-6 ($p=0,007$) em que foram identificados 126 condições, sendo 74 secas; e também na escala SPI-12 ($p=0,001$), de 171 condições, 77 secas.
- Foram identificados para as quatro escalas:
 - Para o SPI-1, foram registrados 25 eventos secos e 27 úmidos.
 - Em SPI-3, foram 13 eventos secos e 15 úmidos.
 - Para SPI-6, foram 6 eventos secos e 6 úmidos.

- Para SPI-12 foi 1 evento seco e 2 úmidos.
- Em destaque no SPI-12, no evento seco foram registrados dois picos importantes: outubro/2014 (-1,77) e agosto/2018 (-1,85) ambos na categoria severo. O evento teve duração de 67 meses, o maior registrado em toda a série do SPI. Os dois eventos úmidos registrados nessa escala tiveram: o primeiro, com pico em maio/2010 (3,47) na categoria extremo e com duração de 31 meses e o segundo, com pico em julho/2012 (1,27) na categoria moderado.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o auxílio financeiro das agências de fomento CNPq (parcial, nº 139943/2020-0) e FAPESP (nº 2020/09548-2), essenciais para a realização da pesquisa de Iniciação Científica da primeira autora.

REFERÊNCIAS

ALTAMIRANO, R. J. A. **Climatologia dos eventos chuvoso e secos severos, extremos e muito extremos usando o Índice de Precipitação Normalizada (SPI) para as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil**, Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE: São José dos Campos, 2010.

ARAÚJO, G. P.; DUNDER, B. D.; ZANIRATO, S. H. Ações do Consórcio Intermunicipal do ABC que Convergem com as Adaptações às Mudanças Climáticas Globais em Grandes Centros Urbanos: uma Análise do 1º Plano Plurianual Regional Participativo do Grande ABC. In: 1º ANNAPAS SUDESTE: **Sustentabilidade e interdisciplinaridade: Avanços e desafios para o desenvolvimento**. Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade. 26-28 set., 2018.

BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Avaliação e adaptação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) às condições climáticas do Estado de São Paulo. **Bragantia (online)**, v. 64, n. 4, 2005, p. 695-705. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/brag/a/vShvq4MQggzntcxjnqRS8GN/?lang=pt>>. Acesso em: 19 jul. 2021.

CARVALHO, M. Â. C. C.d. et al. Drought Monitoring Based on Remote Sensing in a Grain-Producing Region in the Cerrado–Amazon Transition, Brazil. **Water**, v.12, 3366 p., 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/12/12/3366>>. Acesso em: 23 jul. 2021.

COELHO, C.A.S.; et al. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: Regional scale mechanisms and teleconnections. **Clim. Dyn**, v. 46, p. 3737–3752, 2016.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ. **A bacia**: caracterização geral. Disponível em: <<https://comiteat.sp.gov.br/a-bacia/caracterizacao-geral/>>. Acesso em 23 jul. 2021.

CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL DO GRANDE ABC. Plano de Ação de Enfrentamento às Mudanças Climáticas do Grande ABC. 2016. Disponível em: <<https://consorcioabc.sp.gov.br/imagens/noticia/Plano%20de%20Acao%20de%20Enfrentamento%20as%20Mudancas%20Climaticas%20do%20Grande%20ABC.pdf>>. Acesso em 12 jul. 2021.

CUNHA, A.P.M.A. et al. Changes in the spatial–temporal patterns of droughts in the Brazilian Northeast. **Atmos. Sci. Lett**, v. 19, p. 1–8, 2018.

DIÁRIO DO GRANDE ABC. Temporal castiga e para o Grande ABC. 2010. Disponível em: <<https://www.dgabc.com.br/Noticia/282879/temporal-castiga-e-para-o-grande-abc>>. Acesso em: 16 jul. 2021.

DRUMOND, A. et al. Dry and Wet Climate Periods over Eastern South America: Identification and Characterization through the SPEI Index. **Atmosphere**, v.12, n.2, 2021.

FERNANDES, R. A.; VALVERDE, M.C. Análise da resiliência aos extremos climáticos de chuva: Estudo preliminar na região de Mauá no ABC Paulista – São Paulo. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**. n.44 , p. 1-17, 2017.

FERNANDES, V. R. et al. Secas e os impactos na região sul do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, [S.l.], v. 28, 2021. ISSN 2237-8642. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/74717/43814>>. Acesso em: 21 jun. 2021.

FONTÃO, Pedro Augusto Breda; ZAVATTINI, João Afonso. Variabilidade das chuvas anuais na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e no Sistema Cantareira: classificação e frequência dos anos-padrão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.l.], v. 12, n. 2, p. 457-469, 2019.

GARGIULO, J. R. B. C. O reservatório Billings. In: **Reservatórios que abastecem São Paulo: problemas e perspectivas**. Orgs: POMPÊO, M.; MOSCHINI - CARLOS, V. São Paulo: Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, 2020.

GOZZO, L. et al. Climatology and Trend of Severe Drought Events in the State of Sao Paulo, Brazil, during the 20th Century. **Atmosphere**, v. 10, n. 4, 2019.

GUTIERREZ, A. P. et al. Drought preparedness in Brazil. **Weather and Climate Extremes**, v. 3, p. 95-106, 2014.

GUTTMAN, N.B. Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 113-121, 1998.

HAYES, M. et al. The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal meteorological drought index recommended. **Bull. Am. Meteorol. Soc**, v. 92 , p. 485–488, 2011.

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J. **Day 1 IMERG Final Run Release Notes**, 2015, p.

1-9. Disponível em: <https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_FinalRun_Day1_release_notes.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2021.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **IBGE - Cidades**. 2010. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/uf.php?lang=&coduf=35&search=sao-paulo>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Malha Municipal**. 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

IPCC. **Central and South America. In Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. V.R. Barros, C.B. Field, D.J. Dokken, et al., Eds.: 1499–1566. Cambridge, UK and New York, NY: Cambridge University Press, 2014.

IPCC. **Global Warming of 1.5°C: Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems**. c. 3, 2018.

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. 2012.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. 2021.

KARAVITIS, C. A. et al. Application of the Standardized Precipitation Index (SPI) in Greece. **Water**, v. 3, p. 787-805, 2011.

KUMAR, N. M. et al. On the use of Standardized Precipitation Index (SPI) for drought intensity assessment. **Royal Meteorological Society**, 2009.

MARENGO, J. A. et al. Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI: **Sumário Técnico** – Ministério do Meio AMBIENTE-MMA, Secretaria de Biodiversidade e Florestas – SBF, Diretoria de Conservação Da Biodiversidade – DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade-Sub projeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, 2007.

MARENGO, J. A. et al. Changing Trends in Rainfall Extremes in the Metropolitan Area of São Paulo: Causes and Impacts. **Frontiers in Climate**, 2, 2020a.

MARENGO, J. A. et al. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Acad. Bras. Cienc**, v. 90, p. 1973–1985, 2017.

MARENGO, J. A. et al. Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in

the Metropolitan Area of São Paulo: a review. **Annals of the New York Academy of Sciences**, p.1–16, 2020b.

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M.C.; OBREGON, G. Observed and projected changes in rainfall extremes in the Metropolitan Area of São Paulo. **Clim. Res**, v. 57, p. 61–72, 2013.

MARENGO, J. A. et al.. A onda de calor de outubro de 2020 na América do Sul central. **Revista Internacional de Climatologia**. 2021.

MARTINS, E.S.P.R.; MAGALHÃES, A.R.; FONTENELE, D. A seca plurianual de 2010–2017 no Nordeste e seus impactos. **Parcerias Estratégicas**, v. 22, 2017, p.17–40.

MARQUES, E. et al. **Diagnóstico dos assentamentos precários nos municípios da Macrometrópole Paulista Primeiro Relatório**. Centro de Estudos da Metrópole — CEM/ Cebrap Fundação de Desenvolvimento Administrativo – FUNDAP. 2013. Disponível em: <https://centrodametropole.fflch.usp.br/sites/centrodametropole.fflch.usp.br/files/user_files/ckeditor/654-Relatorio%20II_Assentamentos_Fundap_final_logo.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2021.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N.J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: **Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, Boston, MA, USA, 17–22 Jan, 1993**; p. 179–184. Disponível em: <https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2021.

MESCHIATTI, M. C.; BLAIN, G. Constantino. Increasing the regional availability of the Standardized Precipitation Index: an operational approach. **Bragantia** (online) v. 75, n. 4, 2016.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. Estatística básica. 9ª Edição. São Paulo. **Editora Saraiva**. cap. 6 e 7. 2017.

NDEHEDEHE, C. E. et al. Hydrological hotspots of climatic influence in Brazil: A two-step regularization approach, **Atmospheric Research**, v. 246, 2020.

NOBRE, C. A. et al. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resources**, v. 8, p. 252–262, 2016.

NOGUEIRA, S. M. et al. **Manual de instrução para implantação, gestão e mudanças de hábitos no programa de redução em consumo de água: manual do multiplicador**. São Paulo: Cobrape : BBL, Vitalux, Gerentec, ETEP, RESTOR, 2014.

OLIVEIRA, M.C.Q.D. et. al. Air pollution persistent exceedance events in the Brazilian metropolis of Sao Paulo and associated surface weather patterns. **Int. J. Environ. Sci. Technol.** 2021.

OLIVEIRA, M.; DRUMOND, A.R.M.; ROSÁRIO, N. M.É. Análise comparativa entre as estimativas de precipitação mensal do GPM/IMERG e as medições do DAEE para a região do Grande ABC de 2001 a 2016.. In: Anais da Semana Acadêmica de Engenharia Meteorológica.

Anais...Macaé (RJ), LAMET/UENF, 2020. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/ISAEM2020/278489-ANALISE-COMPARATIVA-ENTRE-AS-ESTIMATIVAS-DE-PRECIPITACAO-MENSAL-DO-GPMIMERG-E-AS-MEDICOES-DO-DAEE-PARA-A-REGIAO->>. Acesso em: 06 jul. 2021.

OTKIN, J. A. et al. Development of a Flash Drought Intensity Index. **Atmosphere**. vol. 12, n. 6, 2021.

PALMER, W.C. Meteorological drought. Washington, **US Weather Bureau Res**, n. 45, 1965.

PDPA. **Elaboração do Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings**. Relatório Final. Secretaria de Estado do Meio Ambiente Estado de São Paulo. Coordenadoria de Planejamento Ambiental. 2020.

PEREIRA, V. R. et al. Impacts of climate change on drought: changes to drier conditions at the beginning of the crop growing season in southern Brazil. **Bragantia** (online) v. 77, n. 1, p. 201-211, 2018.

PONTES FILHO, J. D. et al. Copula-Based Multivariate Frequency Analysis of the 2012–2018 Drought in Northeast Brazil. **Water**, v.12, 2020.

REBOITA, M. S. et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n.2, p. 185–204, 2010.

REBOITA, M.S. et al. The South Atlantic Subtropical Anticyclone: Present and Future Climate. **Front. Earth Sci.** p. 7-8, 2018.

REDMOND, K. T. The depiction of drought: A commentary. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, n. 83, p. 1143–1147, 2002.

RODRIGUES, J. F., MARTINI, R.R.; SERNI, P.J.A. Hidreletricidade no Brasil: o que aconteceu com o nosso modelo?.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, Campinas, 2002. **Proceedings online**. Disponível em: <<http://seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/AGRENER2002/pdf/0020.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2021.

SABESP- CHESS. **Crise Hídrica, Estratégia e Soluções da Sabesp**. 2015. Disponível em: <https://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/crisehidrica/chess_crise_hidrica.pdf>. Acesso em: 24 jun 2021.

SANTOS, S. R. Q. et al. Determinação de Regiões Homogêneas do Índice de Precipitação Normalizada (SPI) na Amazônia Oriental Determinação de Regiões Homogêneas do Índice de Precipitação Normalizada (SPI) na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 1, 2017.

SIQUEIRA, B.; NERY, J. T. Análise do Índice Padronizado de Precipitação para o Estado de São Paulo (Analysis of the Standardized Precipitation Index for the State of São Paulo). **Revista Brasileira de Geografia Física**, (S.l.), v. 10, n. 6, 2017, p. 1775-178. Acesso em: 25 jul. 2021.

STRAHLER, A. N. **Physical Geography**, John Wiley & Sons, New York, 1969.

TOLMASQUIM, M. As Origens da Crise Energética Brasileira. **Revista Ambiente & Sociedade**. Ano III. n. 6/7, p. 179-183, 2000.

VALVERDE, M. C.; CARDOSO, A. D. O.; BRAMBILA, R. O Padrão de chuvas na região do ABC Paulista: os extremos e seus impactos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018.

VALVERDE, M. C. The interdependence of climate and socioeconomic vulnerability in the ABC Paulista Region. **Ambiente e Sociedade**, v. 20, n.3, p. 39–60, 2017.

VALVERDE, M. C. et al. Urban climate assessment in the ABC Paulista Region of São Paulo, Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 735, 2020.

VALVERDE, M. C.; SANTOS, C. L. **Pluvial Flooding in Santo André City - São Paulo**: observation and prediction. In: The 6th International Conference on Flood Management - ICFM6, São Paulo, 2014.

WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. **Water Int.**, v. 10, p.111–120, 1985.

WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Standardized Precipitation Index User Guide. Org.: SVOBODA, M.; HAYES, M.; WOOD, D. (WMO-No. 1090), Geneva, 2012.