

Caracterização Temporal e Espacial dos Alagamentos no Município de São Paulo

Temporal and Spatial Characterization of the Floods in Municipality of São Paulo

Caracterización Temporal y Espacial de las Inundaciones en el Municipio de São Paulo

Diéssica Talissa Burdo Timóteo da Silva

Mestre em Ciências Ambientais, Universidade Brasil, Brasil.
diessicalissa@outlook.com

Juliana Heloisa Pinê Américo-Pinheiro

Professora Titular, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Universidade Brasil, Brasil.
juliana.pinheiro@ub.edu.br

Gisele Herbst Vazquez

Professora Titular, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Universidade Brasil, Brasil.
gisele.vazquez@ub.edu.br

Luiz Sergio Vanzela

Professor Titular, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Universidade Brasil, Brasil.
luiz.vanzela@ub.edu.br

RESUMO

Dentre os desastres naturais, os alagamentos são um dos que mais causam impactos ambientais, econômicos e sociais. O objetivo neste trabalho foi realizar a caracterização espacial e temporal dos alagamentos no município de São Paulo – SP, durante o ano de 2018, e identificar os fatores de suscetibilidade das bacias hidrográficas. Para isso, a metodologia do estudo foi desenvolvida de três formas: (a) avaliação da distribuição temporal dos alagamentos, (b) avaliação da distribuição espacial dos alagamentos e (c) identificação de características físicas e fisiográficas relacionadas com a maior ocorrência de alagamentos. A distribuição temporal foi avaliada pela análise da distribuição de frequências relativas da ocorrência de alagamentos ao longo do ano e a distribuição espacial foi realizada a partir do número absoluto de alagamentos por Subprefeitura e curso d'água do município de São Paulo. Foram observados 264 alagamentos, sendo a maior ocorrência no período de maior pluviosidade, compreendendo os meses de janeiro a março e de novembro a dezembro e as subprefeituras da Sé, Lapa, Pinheiros e Santo Amaro. Concluiu-se que bacias hidrográficas sujeitas a precipitações mensais acima de 100 mm, com coeficiente de compactidade acima de 1,70, este índice não se aplica a alagamentos como pode ser aplicado a enchentes, pois é imprescindível que não seja avaliado cada fator de forma individualizada e sim em um conjunto que associados irão influenciar na suscetibilidade de cada bacia, desnível geométrico total acima de 160 m e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) médio inferior a 0,20, possuem alta suscetibilidade a alagamentos.

PALAVRAS-CHAVE: Mudanças climáticas. Planejamento urbano. Precipitação.

ABSTRACT

Among natural disasters, floods are one of the ones that most cause environmental, economic and social impacts. The objective in this work was to carry out the spatial and temporal characterization of floods in the city of São Paulo - SP, during 2018, and to identify the factors of susceptibility of hydrographic basins. For this, the study methodology was developed in three ways: (a) evaluation of the temporal distribution of floods, (b) evaluation of the spatial distribution of floods and (c) identification of physical and physiographic characteristics related to the highest occurrence of floods. The temporal distribution was evaluated by analyzing the distribution of relative frequencies of the occurrence of floods throughout the year and the spatial distribution was performed based on the absolute number of floods by Subprefecture and watercourse in the municipality of São Paulo. 264 floods were observed, the highest occurring in the period of greatest rainfall, comprising the months from January to March and from November to December and the sub-prefectures of Sé, Lapa, Pinheiros and Santo Amaro. It was concluded that hydrographic basins subject to monthly rainfall above 100 mm, with a coefficient of compactness above 1.70, this index does not apply to flooding as it can be applied to floods, as it is essential that each form factor is not evaluated individualized, but in a group that associates will influence the susceptibility of each basin, total geometric difference above 160 m and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) below 0.20, have a high susceptibility to flooding.

RESUMEN

Dentro de los desastres naturales, las inundaciones son uno de los que más impactos ambientales, económicos y sociales provocan. El objetivo de este trabajo fue realizar la caracterización espacial y temporal de las inundaciones en la ciudad de São Paulo - SP, durante el año 2018, e identificar los factores de susceptibilidad de las cuencas hidrográficas. Para ello, la metodología de estudio se desarrolló de tres formas: (a) evaluación de la distribución temporal de las inundaciones, (b) evaluación de la distribución espacial de las inundaciones y (c) identificación de las características físicas y fisiográficas relacionadas con la mayor ocurrencia de inundaciones. La distribución temporal fue evaluada analizando la distribución de frecuencias relativas de ocurrencia de inundaciones a lo largo del año y la distribución espacial fue realizada a partir del número absoluto de inundaciones por Subprefectura y curso de agua en el municipio de São Paulo. Fueron observadas 264 inundaciones, con mayor ocurrencia en el período de mayor precipitación pluvial, comprendiendo los meses de enero a marzo y de noviembre a diciembre y las subprefeituras de Sé, Lapa, Pinheiros y Santo Amaro. Se concluyó que cuencas sujetas a precipitaciones mensuales superiores a 100 mm, con un coeficiente de compactidad superior a 1.70, este índice no aplica a inundaciones como puede aplicarse a inundaciones, siendo imperativo que no se evalúe cada factor de forma individualizado sino de forma conjunto que va a influir asociado a la susceptibilidad de cada cuenca, desnivel geométrico total superior a 160 m e índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) promedio inferior a 0,20, tienen alta susceptibilidad a inundaciones.

1 INTRODUÇÃO

O mundo é cada vez mais impactados por desastres naturais, causando perdas humanas, materiais e naturais, principalmente com a intensificação das mudanças climáticas. O IPCC (2018, p. 7) estima que as atividades humanas causaram cerca de 1,0°C de aquecimento global acima dos níveis pré-industriais, com uma variação provável de 0,8°C a 1,2°C. Com o avanço do crescimento populacional nas áreas urbanas e suas demandas, cidades de todo o Brasil e, principalmente capitais como a cidade de São Paulo, são mais vulneráveis a uma maior diversidade de desastres naturais. As consequências se constituem em problemas desafiadores para a gestão pública e organização do território, devido a forma com a qual foi ocupada.

O processo de urbanização interfere nos ciclos hidrológicos naturais alterando a ocorrência, intensidade e localização da precipitação, evapotranspiração, infiltração e escoamento superficial, interferindo nos recursos hídricos em qualidade e quantidade (VASCONCELOS; MOTA, 2020, p. 314). Nesse contexto, destacam-se os eventos de origem nas precipitações intensas como as inundações, enchentes, alagamentos, enxurradas e movimento de massas. De acordo com a CNM (2022), somente entre 2017 e 2022 no Brasil, esses eventos afetaram mais de 549 mil habitações e 28,8 milhões de pessoas, provocando 637 óbitos. Somente os alagamentos, que são originados do acúmulo momentâneo da água por deficiência do sistema de drenagem urbano (GOMES et al.; 2015, p. 2341), foram responsáveis por 5 óbitos, 6 feridos, 6 enfermos, 1.048 desabrigados e 954 desalojados no ano de 2012 (BRASIL, 2013, p. 62).

O controle dos alagamentos depende do planejamento urbano, que, por sua vez, depende da infraestrutura urbana e forma de ocupação do ambiente. Segundo Wright et al. (2012, p. 2), a compactação dos solos em áreas urbanas resulta em menores taxas de infiltração de água e menor volume de estoque no solo em relação aos solos naturais. Além disso, a retificação de canais, superfícies impermeáveis e a elaboração de redes de drenagem tendem a diminuir o tempo de resposta hidrológica das bacias urbanas e reduzir a infiltração levando a maiores picos de enchente.

Dentre as medidas utilizadas para aumentar a permeabilidade do solo nos centros urbanos está o aumento das áreas verdes. Além de produzir sombreamento, proteção e formação do solo, ciclagem de nutrientes, manutenção da microbiota, melhoria do microclima urbano, absorção de partículas de poluição e gases, beleza estética, produção de alimentos, usos medicinais e culturais e servindo de abrigo e suporte para as mais variadas de formas de vida, contribui com a infiltração da água no solo, diminuindo o escoamento superficial (NASCIMENTO et al., 2022, p.117). Mas além das medidas estruturais que visem melhorar a drenagem urbana é importante se conhecer fatores que aumentam a sustentabilidade aos alagamentos, sendo imprescindível o desenvolvimento de estudos e pesquisas relacionadas ao monitoramento e caracterização das precipitações e alagamentos, como contribuição para o planejamento e gestão em áreas urbanas de grande porte.

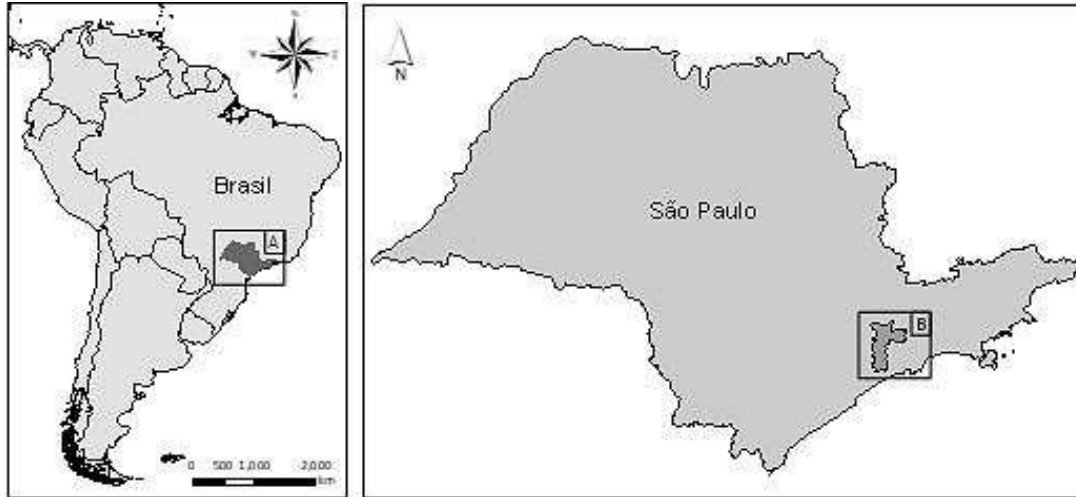
Assim, o objetivo neste trabalho foi a caracterização espacial e temporal dos alagamentos no município de São Paulo – SP durante o ano de 2018 e identificação dos fatores de suscetibilidade das bacias hidrográficas aos alagamentos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e caracterização da área de estudo

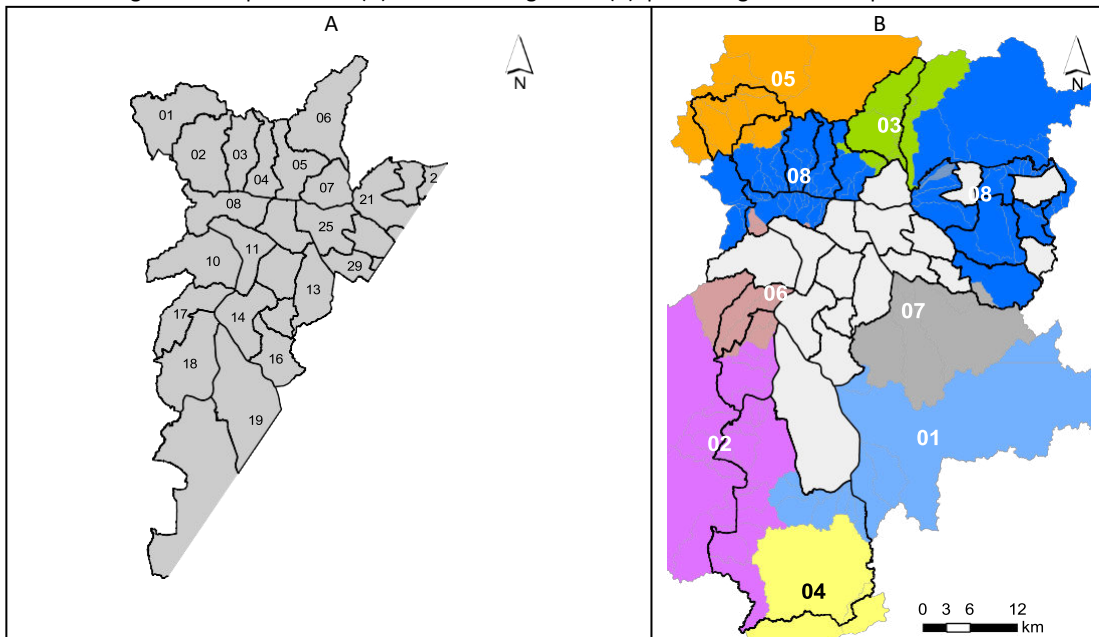
O estudo foi realizado no município de São Paulo, capital paulista, localizado na Região Sudeste do Brasil (Figura 1) entre as latitudes 23°23'13,20" e 24°00'51,97" Sul e longitudes 46°18'13,63" e 46°52'03,08" Oeste.

Figura 1 - Localização do Estado de São Paulo (A) e do Município de São Paulo Capital (B).



O município possui área de 1.521,110 km² (IBGE, 2018) e população estimada em 12.252.023 (IBGE, 2020), sendo organizado em 32 subprefeituras e abrangido por 8 bacias hidrográficas (Figura 2).

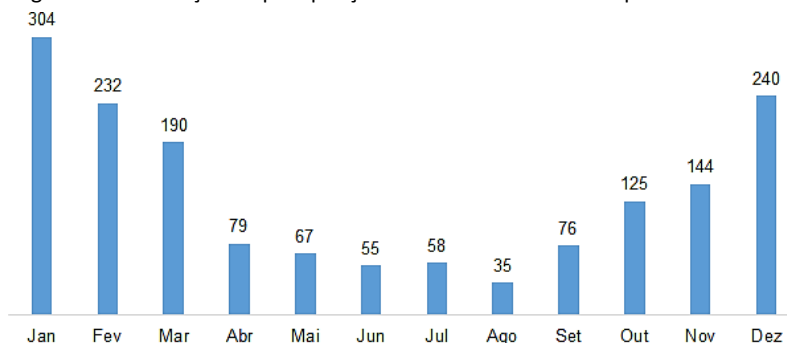
Figura 2 - Subprefeituras (A) e bacias hidrográficas (B) que abrangem o município de São Paulo.



01- Perus	17- Campo Limpo	01- Billings
02- Pirituba-Jaraguá	18- M'boi Mirim	02- Guarapiranga
03- Freguesia-Brasilândia	19- Capela do Socorro	03- Rio Cabuçu De Cima
04- Casa Verde-Cachoeirinha	20-Parelheiros	04- Rio Capivari/Rio Branco
05-Santana-Tucuruvi	21- Penha	05-Rio Juqueri
06- Jaçana-Tremembé	22- Ermelino Matarazzo	06- Rio Pinheiros
07- Vila Maria-Vila Guilherme	23-São Miguel	07- Rio Tamanduateí
08-Lapa	24-Itaim Paulista	08-Rio Tietê
09-Sé	25-Mooça	
10-Butanta	26-Aricanduva-Formosa-Carrão	
11-Pinheiros	27-Itaquera	
12-Vila Mariana	28-Guaianases	
13-Ipiranga	29-Vila Prudente	
14-Santo Amaro	30-São Mateus	
15-Jabaquara	31- Cidade Tiradentes	
16-Cidade Ademar	32- Sapopemba	

O clima do município de São Paulo, segundo Koppen, é classificado como Subtropical Úmido Quente (Cfa) sem estação seca (ROLIM et al., 2007, p. 714), com precipitação média anual de 1.605 mm (Figura 3), sendo os meses de maior e menor precipitação média, janeiro e agosto (CIIAGRO, 2020). Os solos do município são constituídos das subordens Argissolos Vermelho-Amarelos, Cambissolos Háplicos, Gleissolos Háplicos, Gleissolos Melânicos, Latossolos Amarelos, Latossolos Vermelho-Amarelos, Neossolos Litólicos e Organossolos Háplicos (ROSSI, 2017).

Figura 3 - Distribuição da precipitação média mensal no município de São Paulo.



Fonte: Elaborado a partir de dados de 1996 a 2014 do CIIAGRO (2020).

2.2 Caracterização dos alagamentos

A caracterização dos alagamentos no município de São Paulo foi realizada de três formas: (a) distribuição temporal dos alagamentos, (b) distribuição espacial dos alagamentos e (c) identificação de características físicas e fisiográficas relacionadas com a maior ocorrência de alagamentos. Foi realizada a determinação da distribuição temporal da precipitação mensal em 2018 para complementar a análise. A análise utilizou o ano de 2018, pois foi o único período de disponibilidade de dados de alagamento com data e local de ocorrência.

2.3 Distribuição temporal

A distribuição temporal foi avaliada pela análise da distribuição de frequências relativas da ocorrência de alagamentos ao longo do ano. Os dados foram obtidos do banco de dados georreferenciado GeoSampa, que permite visualizar os dados e informações diretamente no mapa digital da cidade (MDC) e/ou por meio de serviços on-line (WMS e WFS); permite também download de arquivos em diversos formatos e software (SÃO PAULO, 2019).

De acordo com São Paulo (2019), o MDC é o suporte cartográfico do Sistema de Informações Geográficas do Município de São Paulo (SIG-SP), regulamentado pelo Decreto Municipal 57.770, de 3 de julho de 2017. O Mapa Digital da Cidade (MDC) é uma base cartográfica digital cadastral nas escalas 1:1.000 na área urbana e 1:5.000 na área rural do Município de São Paulo, resultado de levantamento aerofotogramétrico realizado no ano de 2004, com recursos do Programa de Modernização da Administração Tributária (PMAT), do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES).

Os dados dos alagamentos foram compilados da camada “Ocorrências” obtidos por download do tema “Proteção e Defesa Civil” do GeoSampa. O arquivo é no formato “SHAPEFILE” possui informações como data e local de ocorrência. Os dados foram trabalhados no software ArcGis 10 versão Educacional, sendo exportados para uma tabela do software Microsoft Excel onde foi possível tabular a quantidade de alagamentos por mês. Em seguida elaborou-se um histograma da distribuição mensal dos alagamentos.

Visando estabelecer possíveis correlações com a precipitação, realizou-se a análise de regressão da frequência absoluta de alagamentos em função da precipitação mensal. Foram testados os modelos linear, quadrático, exponencial, logarítmico e potência, em que a seleção do melhor modelo de resposta foi com base na significância estatística (valor de p) e coeficiente de determinação (r^2). Os dados de precipitação mensal de 2018 foram obtidos das estações do INMET (2020) do Mirante de Santana (código 83781) e de Interlagos (código A771) (Figura 4). Com os dados tabulados de precipitação mensal nas duas estações, realizou-se uma média para a determinação da precipitação média mensal do município de São Paulo.

Figura 4 - Localização das estações meteorológicas utilizadas na compilação da precipitação mensal em 2018.

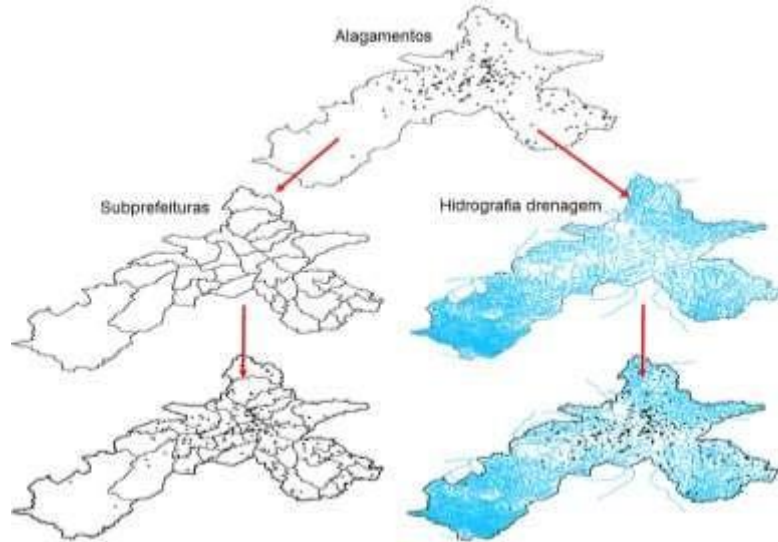


2.4 Distribuição temporal

A avaliação da distribuição temporal foi realizada a partir do número absoluto de alagamentos por Subprefeitura e curso d'água do município de São Paulo. O processo iniciou com o download dos dados da camada de “Subprefeituras”, no tema “Limites Administrativos”, e da camada “Hidrografia drenagem”, no tema “Meio Físico”. Com os dados todos importados para o software ArcGIS 10 versão Educacional, realizou-se a atribuição da informação de ocorrência de alagamentos nas camadas de Subprefeituras e Hidrografia drenagem, utilizando a ferramenta de união espacial (Figura 5). Em seguida foi realizada a determinação da

quantidade de alagamentos por subprefeitura e hidrográfica, sendo os dados apresentados na forma de distribuição por classes em mapas.

Figura 5 - União espacial entre a localização dos alagamentos e os limites das subprefeituras e a hidrográfica.

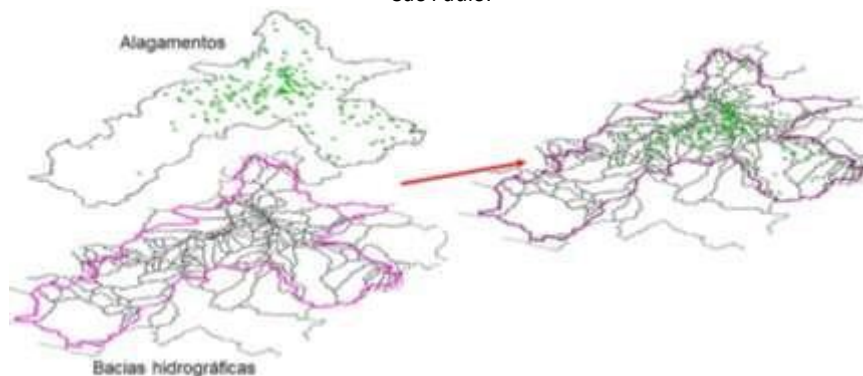


2.3 Relação com as características das bacias hidrográficas

A relação dos alagamentos com as características das bacias hidrográficas foi avaliada pela comparação das variáveis físicas e fisiográficas entre bacias com as seguintes ocorrências de alagamentos: sem ocorrência de alagamentos (SOA), com 1 a 4 alagamentos (14A) e com mais 5 alagamentos (M5A) em 2018.

Para a obtenção dos alagamentos por bacia hidrográfica realizou-se o download da camada dos divisores de águas das bacias denominada “Bacia Hidrográfica”, do tema “Meio Físico” na plataforma GeoSampa (SÃO PAULO, 2019). Em seguida atribuiu-se a informação de ocorrência de alagamentos na camada de divisores de águas das bacias hidrográficas utilizando a ferramenta união espacial do software ArcGIS versão Educacional (Figura 6).

Figura 6 - União espacial entre a localização dos alagamentos e os limites das bacias hidrográficas do município de São Paulo.



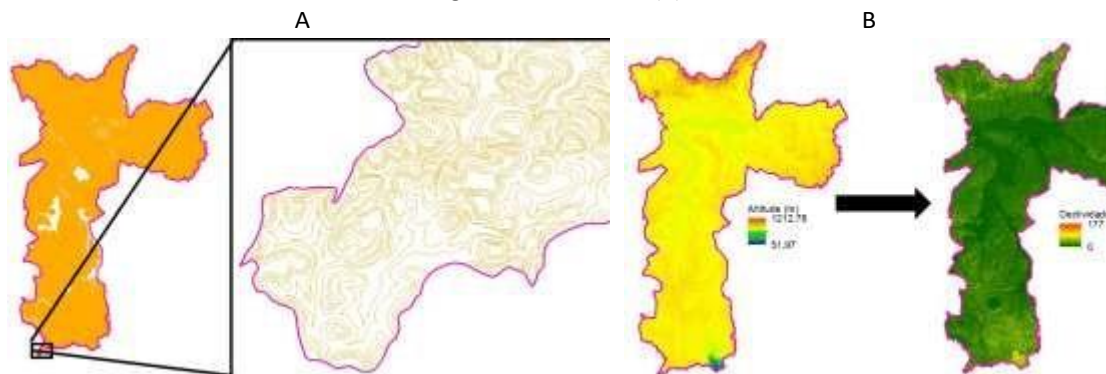
As variáveis físicas e fisiográficas avaliadas nas bacias hidrográficas foram amplitude altimétrica (ΔH), declividade média (Dec), densidade de drenagem (Dd), coeficiente de compacidade (Kc) e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), determinadas utilizando-se as equações/metodologias apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Equações/metodologias empregadas na determinação de características físicas fisiográficas das bacias hidrográficas do município de São Paulo.

Variável	Equação/Metodologia
Amplitude altimétrica (ΔH) expressa em metros	$\Delta H = H_{m\acute{a}x} - H_{m\acute{i}n}$ (1) , em que " $H_{m\acute{a}x}$ " é a altitude máxima e " $H_{m\acute{i}n}$ " é a altitude mínima das bacias hidrográficas, expressa em metros.
Declividade média (Dec) expressa em porcentagem	Determinada para cada bacia hidrográfica a partir da aplicação da ferramenta de SLOPE sobre a camada de isolinhas altimétricas.
Densidade de drenagem (Dd) expressa em quilômetros de rede de drenagem por quilômetro quadrado de área de bacia hidrográfica	$Dd = \frac{L_t}{A}$ (2) , em que " L_t " é o comprimento total da rede de drenagem expressa em quilômetros e " A " é a área de drenagem da bacia hidrográfica expressa em quilômetros quadrados.
Coefficiente de compacidade (Kc) que é adimensional	$Kc = 0,28 \left(\frac{P}{\sqrt{A}} \right)$ (3) , em que " P " é o perímetro expresso em quilômetros e " A " é a área de drenagem da bacia hidrográfica expressa em quilômetros quadrados.
Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) que é adimensional	$NDVI = \frac{\sum NDVI_i}{A}$ (4) , em que " $NDVI_i$ " é o índice de vegetação por diferença normalizada do pixel " i " e " A " a área de drenagem da bacia hidrográfica. Os NDVIs dos pixels ($NDVI_i$) foram determinados pela equação 05. $NDVI_i = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \right)$ (5) NDVI – Índice de vegetação por diferença normalizada; ρ_{NIR} – Reflectância na banda do infravermelho próximo; ρ_R – Reflectância na banda do vermelho.

Os dados necessários para a determinação da densidade de drenagem (L_t e A) e o coeficiente de compacidade (P e A) foram obtidos das camadas de "Hidrografia drenagem" e "Bacia hidrográfica". Os dados para os cálculos da amplitude altimétrica ($H_{m\acute{a}x}$ e $H_{m\acute{i}n}$) e declividade média foram obtidos a partir d modelo digital do terreno interpolado a partir das isolinhas altimétricas contidas nas camadas de "Curvas mestras" e "Curvas intermediárias", obtidas do tema "Topografia" na plataforma GeoSampa (SÃO PAULO, 2019). Em seguida a partir de técnicas de geoprocessamento gerou-se o modelo digital de declividades a partir do modelo digital do terreno (Figura 7).

Figura 7 - Camada das isolinhas altimétricas (A) utilizadas na geração do modelo digital do terreno e o modelo digital de declividades (B).



As reflectâncias do infravermelho próximo e do vermelho (ρ_R e ρ_{NIR}), para ao cálculo do NDVI (Figura 8), foram das bandas 4 (vermelho) e 8 (infravermelho próximo) das imagens do satélite Sentinel 2-A (Tabela 2), com data de imageamento de 30 de agosto de 2018.

Figura 8 - Imagem NDVI do município de São Paulo em 30 de agosto de 2018.

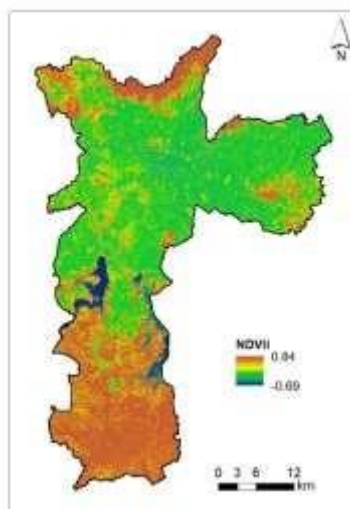


Tabela 2 - Característica das bandas das imagens do satélite Sentinel 2A.

Bandas	Re (m)	Nome	λ_c (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	Rr (bits)	Rt (dias)
2	10	Blue	492,4	66	12	5
3		Green	559,8	36		
4		Red	664,6	31		
8		NIR	832,8	106		
5	20	Red Edge 1	704,1	15		
6		Red Edge 2	740,5	15		
7		Red Edge 3	782,8	20		
8a		Red Edge 4	864,7	21		
11		SWIR 1	1613,7	91		
12		SWIR 2	2202,4	175		
1	60	Aerossol	442,7	21		
9		Water Vapor	945,1	20		
10		Cirrus	1373,5	31		

Re (resolução espacial); λ_c (comprimento de onda central da banda); $\Delta\lambda$ (amplitude da banda); (Rr (resolução radiométrica); Rt (resolução temporal).

2.4 Análise estatística

A análise estatística para a caracterização da distribuição temporal e espacial dos alagamentos compreendeu a distribuição de frequências absolutas e relativas. A identificação de características físicas e fisiográficas entre as classes de ocorrência de alagamentos (SOA, 14A e M5A) foi comparada por análise de variância e teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância. O total de repetições para cada variável nas três classes de ocorrência de alagamentos foram de 161 repetições para SOA, 80 repetições para 14A e 12 repetições para M5A. As análises estatísticas e gráficos foram realizados pelos softwares Microsoft Excel e Sisvar. Os mapas e tratamentos geoespaciais foram executados com o uso do software ArcGIS 10.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Precipitação

No ano de 2018, a precipitação total anual obtida a partir das estações meteorológicas do Mirante de Santana e de Interlagos foi de 1.248 mm (Figura 9), sendo 22,2% menor que a média anual de 1996 a 2014 (CIIAGRO, 2020). Pelo estudo de Ramires e Mello-Théry (2018), entre os anos de 2008 a 2013, a maior média anual registrada foi em 2010, com 1.890 mm.

Também foi inferior ao descrito por Obregon et al. (2014, p. 97), que por estudos de tendências em chuvas extremas e desastres hidrogeometeorológicos, verificaram que a variabilidade espacial de 1.300 a 2.500 mm sobre a região metropolitana de São Paulo.

Figura 9 - Distribuição da precipitação mensal (mm) em 2018 no município de São Paulo, obtida da média das estações meteorológicas do Mirante de Santa e Interlagos.



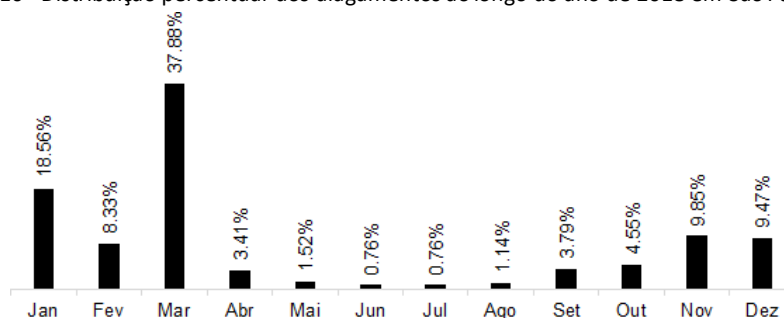
As maiores precipitações no ano de 2018 ocorreram nos meses de janeiro (244 mm), março (221 mm) e dezembro (191 mm), que somaram mais de 50% do total anual. Enquanto os menores valores totais mensais observados foram nos meses de maio (13 mm), julho (23 mm) e junho (26 mm). Estes resultados foram semelhantes aos obtidos por Fontão e Zavattini (2017, p. 2198), em que os meses de maiores precipitações médias foram março, novembro e dezembro. Comparando com os valores médios mensais dos dados históricos obtidos por Dias et al. (2013), que avaliou a precipitação de 1933 a 2010, verificou-se que a maior variação abaixo da média em quantidade foi no mês de fevereiro, com mais de 50% a menos do esperado.

Um dos fatores que interferem no regime natural de precipitações é o clima urbano provocado por efeitos locais em grandes dimensões da área urbana, incluindo as ilhas de calor e efeitos da poluição (DIAS et al., 2013, p. 708).

3.2 Distribuição temporal dos alagamentos

No município de São Paulo - SP, em 2018, foram observados um total de 264 alagamentos, em que 84,09% se concentraram em 5 meses (janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro) (Figura 10), mesmos meses que concentraram 68,7% da precipitação anual de 2018.

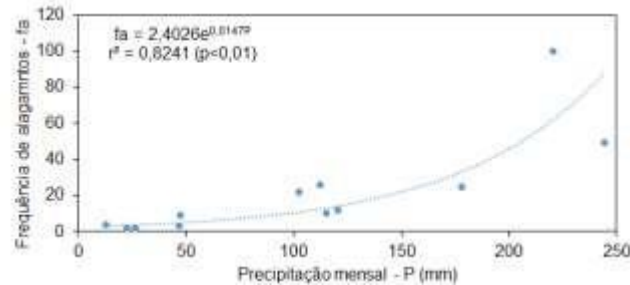
Figura 10 - Distribuição percentual dos alagamentos ao longo do ano de 2018 em São Paulo - SP.



O mês de março foi o de maior ocorrência (37,88%) seguido de janeiro (18,56%) e novembro (9,85%), enquanto os meses de junho a agosto foram os de menor ocorrência. De uma forma geral, pode-se observar a proporcionalidade entre os meses de maior ocorrência de alagamentos e de precipitação (Figuras 9 e 10). Essa relação é confirmada pela resposta da

frequência mensal de alagamentos em função da precipitação mensal foi significativa ($p < 0,01$) e com melhor ajuste (r^2) no modelo exponencial (Figura 11).

Figura 11 - Resposta da frequência mensal de alagamentos em função da precipitação mensal.



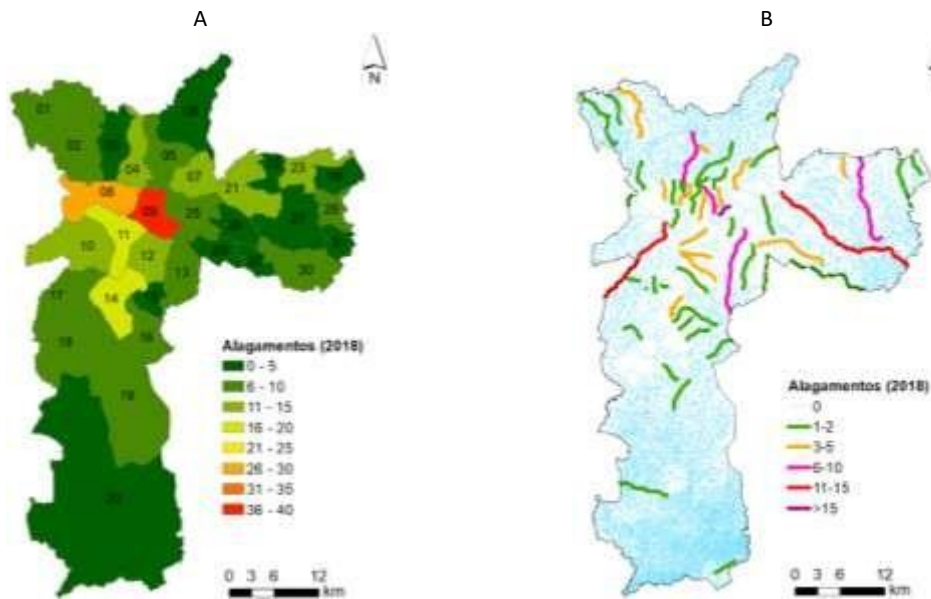
Pelo modelo (Figura 11) observa-se que em totais mensais de até 40 mm espera-se o incremento de 1 alagamento para cada acréscimo de 20 mm mensais. Com totais mensais precipitados entre 50 e 100 mm, espera-se o incremento de 1 alagamento a cada acréscimo de 10 mm mensais. E para totais precipitados acima de 100 mm, o aumento esperado é de 1 alagamento para cada incremento de 3 a 5 mm na precipitação mensal.

Este comportamento pode ser explicado pela umidade antecedente do solo que cresce com a precipitação acumulada no mês. E quanto maior a umidade antecedente do solo, menor será a capacidade de infiltração e maior a contribuição com escoamento superficial para os alagamentos. De acordo com Alencar et al. (2006, p. 111) as variáveis precipitação antecedente, intensidade de precipitação e as interações entre essas e a variável precipitação, e ainda a interação entre ambas (intensidade de precipitação versus precipitação antecedente), influenciam significativamente na ocorrência de escoamento superficial na microbacia do Córrego Capetinga.

3.3 Distribuição espacial dos alagamentos

A subprefeitura de maior ocorrência em 2018 foi a 09-Sé, entre 36 a 40 alagamentos, seguido da 08-Lapa, de 26 a 30 alagamentos (Figura 12A), representando 24,2% do total de alagamentos no período.

Figura 12 - Distribuição espacial dos alagamentos do ano de 2018 nas Subprefeituras (A) e cursos d'água de São Paulo – SP.



As subprefeituras 11-Pinheiros e 14-Santo Amaro também apresentaram altas ocorrências (de 16 a 20 alagamentos). Entretanto, 43,8% das subprefeituras apresentaram ocorrências na classe de 0 a 5 alagamentos em 2018. As subprefeituras de 26-Aricanduva/Formosa/Carrão, 15-Jabaquara e 31-Cidade Tiradentes não apresentaram alagamentos no período avaliado.

Analisando os alagamentos por curso d'água, verificou-se que os três com maior ocorrência de alagamentos em 2018 (Figura 12B) foram os Córregos Anhangabaú (o único com mais de 15 alagamentos) e o Córrego Pirajussara e Rio Aricanduva (entre 11 e 15 alagamentos), fato este, que explica o resultado dos alagamentos nas subprefeituras. Os alagamentos nestes cursos d'água representaram 16,7% do total dos alagamentos em 2018.

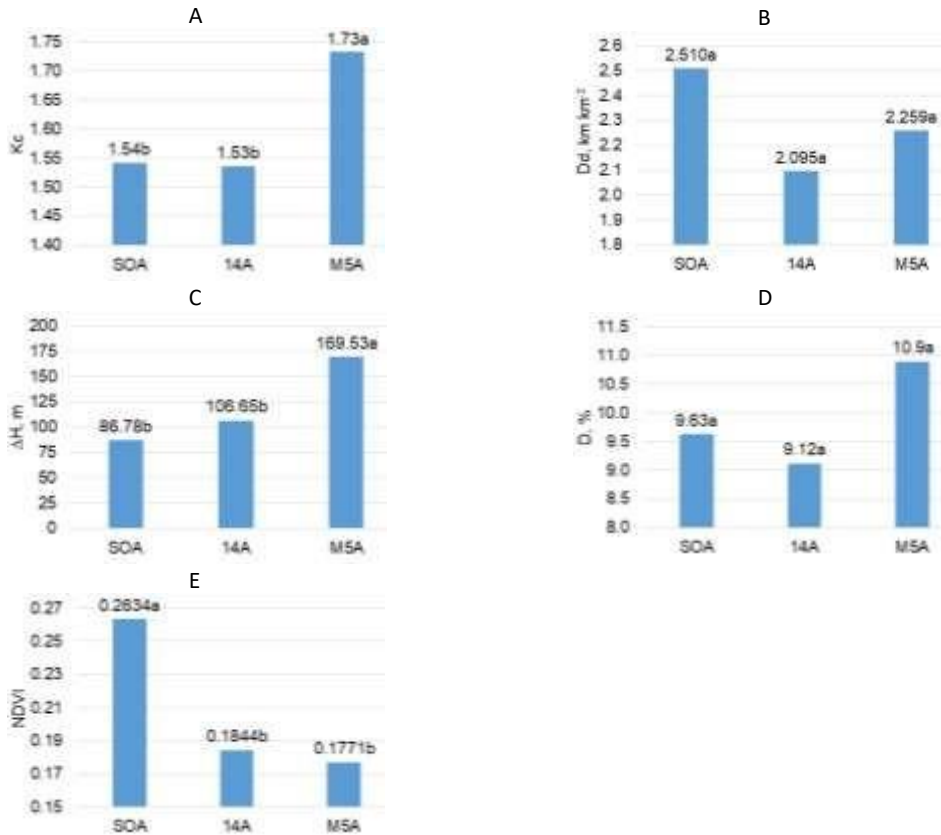
Essa variabilidade espacial na ocorrência de alagamentos no município de São Paulo pode ser explicada pela variabilidade espacial dos fatores que interferem no escoamento superficial. A ANA (2012, p. 37) os divide em climáticos (ligados à intensidade da chuva, duração da chuva e a chuva antecedente), fisiográficos (ligados à área e forma da bacia, à permeabilidade e capacidade de infiltração e à topografia da bacia) e obras hidráulicas (ligadas à construção de barragens, canalização ou retificação e derivação ou transposição).

Os danos resultantes dos alagamentos para um município com grande infraestrutura urbana e população são significativos. Em análise de Haddad e Teixeira (2015, p. 111), as subprefeituras com maiores potenciais de perdas econômicas entre os anos de 2008 e 2012 são Lapa, Pinheiros, Sé e Vila Mariana. Além de medidas mais tradicionais, outra forma que poderia de conceder maior veracidade e acesso à informação sobre esses eventos, segundo Hirata et al. (2015, p. 10), é a contribuição social por meio de um aplicativo de celular. O autor ressalta que o uso de aparelhos celulares para a transmissão do dado contribui para a característica dinâmica do sistema, uma vez que o usuário pode informar a ocorrência no momento do evento e contar com as demais ferramentas disponibilizadas pelo celular, como câmeras de foto e vídeo para a complementação da informação, para que em tempo quase que real a população possa evitar circular por vias alagadas ao receber alertas por e-mail.

3.4 Relação com as características das bacias

As bacias hidrográficas com 5 ou mais alagamentos em 2018 (M5A) se caracterizaram por apresentar, significativamente, maiores médias de coeficientes de compacidade e desníveis geométricos totais (Figura 14A e 14C).

Figura 15. Comparação entre as médias de coeficiente de compacidade - Kc (A), densidade de drenagem - Dd (B), desnível geométrico total - ΔH (C), declividade – D (D) e índice de vegetação por diferença normalizada - NDVI das bacias hidrográficas sem ocorrência de alagamentos (SOA), com 1 a 4 alagamentos (14A) e com 5 ou mais alagamentos (M5A) em 2018.



Os valores médios de densidade de drenagem e declividade média não se diferenciaram estatisticamente entre as 3 classes de ocorrência de alagamentos em 2018 (Figura 14B e 14D). E as bacias hidrográficas sem ocorrência de alagamentos em 2018 foram as que apresentaram média de NDVI significativamente superior as bacias com alagamentos (Figura 14E). As bacias hidrográficas com maiores ocorrências de alagamento (5 ou mais) apresentaram Kc médio de 1,73 e ΔH médio de 169,53 m. Nas bacias hidrográficas com ocorrências de 4 ou menos alagamentos em 2018 apresentaram Kc médios praticamente iguais, variando de 1,53 a 1,54, e ΔH médios variando de 86,78 a 106,65 m. As bacias hidrográficas com 5 ou mais alagamentos (M5A) em 2018 média de ΔH 75,2% superior que a média das demais classes. A maior suscetibilidade a alagamentos em bacias de maior ΔH já era esperado porque a topografia do terreno interfere no escoamento superficial (ANA, 2012, p.37), proporcionando maior energia cinética ao escoamento e maior suscetibilidade a alagamentos.

Nas bacias de maior classe de ocorrência de alagamento de 2018 (M5A), o coeficiente de compacidade médio foi de 12,7% superior que a média das demais classes de ocorrência (SOA e 14A). Quanto menor o valor de Kc, mais circular é a bacia, menor o tempo de concentração e maior a tendência de haver picos de enchentes (MENDES, 2018, p. 981), comportamento esse

que não foi observado para os alagamentos. As bacias que seriam classificadas como de baixa suscetibilidade a enchentes (K_c maior que 1,50), foram as de maior ocorrência de alagamentos, demonstrando a necessidade de se avaliar as características físicas e fisiográficas de forma integrada.

Para os alagamentos, este comportamento pode estar relacionado ao efeito conjunto da capacidade de infiltração e forma da bacia, ou seja, as bacias de alto coeficiente de escoamento superficial (baixa permeabilidade), tem maior capacidade de acumular escoamentos quanto maior for o comprimento da bacia em relação a sua largura (bacias alongadas). Este fato poderia explicar o motivo pelo qual a relação entre coeficiente de compacidade e alagamentos, neste trabalho, não seguiu o mesmo comportamento da relação coeficiente de compacidade e enchentes.

Segundo Costa, Souza Filho e Risso (2007, p. 3835-3836) o NDVI é um índice que varia de -1 a +1 e quanto mais próximo de 1 maior a quantidade de área foliar verde, ou seja, cobertura de vegetação. As bacias sem ocorrência de alagamentos apresentaram NDVI médio de 0,2634, enquanto nas bacias com ocorrência de alagamentos o NDVI médio variou de 0,1771 a 0,1844. O NDVI médio nas bacias hidrográficas enquadradas na classe de SOA foi 45,8% superior que a média observada nas bacias de classes 14A e M5A. Este resultado já era esperado porque o valor do NDVI está relacionado com o percentual de cobertura vegetal da superfície (JENSEN, 2007, p. 388-389) e, conseqüentemente, com o coeficiente de escoamento superficial da bacia hidrográfica.

Para Nobre et al. (2011, p. 244) o agravamento dos problemas de drenagem está atrelado a ocupação dos fundos de vale e a má qualidade ambiental dos espaços urbanos, agonizados pela eliminação de áreas verdes, impermeabilização do solo, favelização de terrenos de baixada descartados pela especulação imobiliária, formação de áreas de risco ao longo de cursos d'água etc. Os mesmos autores também colocam o incremento de áreas verdes como uma importante medida de adaptação da região metropolitana de São Paulo às mudanças climáticas.

4 CONCLUSÕES

No município de São Paulo, em 2018, observou-se 264 alagamentos, sendo a maior ocorrência no período de janeiro a março e de novembro a dezembro (84,09% das ocorrências). O incremento da frequência mensal de alagamentos teve resposta exponencial em função da precipitação mensal. As subprefeituras da Sé e Lapa foram as de maior ocorrência no período avaliado seguidas de Pinheiros e Santo Amaro. Os córregos Anhangabaú, Pirajussara e Rio Aricanduva foram os de maior ocorrência de alagamentos (16,7% do total). A ocorrência de alagamentos foi maior em bacias hidrográficas com maiores coeficiente de compacidade e desníveis geométricos totais, e com menores valores de índice de vegetação por diferença normalizada. Pode-se considerar que bacias hidrográficas com desnível geométrico total acima de 160 m e NDVI médio inferior a 0,20, possuem alta suscetibilidade a alagamentos, sobretudo em precipitações mensais acima de 100 mm.

REFERÊNCIAS

ANA – Agência Nacional das Águas. **Hidrologia básica**. Brasília: ANA, 2012. 55p.

ALENCAR, D. B. S. de; SILVA, C. L. da; OLIVEIRA, C. A. da S. Influência da precipitação no escoamento superficial em uma microbacia hidrográfica do Distrito Federal. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p. 103-112, 2006.

BRASIL. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012**. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013. 126p.

CIAGRO - CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS. **Ciiagro online**. Disponível em: <<http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/>> Acesso: 22 jun. 2020.

COSTA, F. H. dos S.; SOUZA FILHO, C. R. de; RISSO, A. Análise temporal de NDVI e mapas potenciais naturais de erosão na região do Vale do Ribeira, São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis, INPE, 2007. p. 3833- 3839.

CNM – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS MUNICÍPIOS. **Prejuízos causados pelas chuvas em todo país entre 2017 e 2022**. Porto Alegre: CNM, 2022. 5p.

DIAS, M. A. F. S.; DIAS, J.; CARVALHO, L. M. V.; FREITAS, E. D.; DIAS, P. L. S. Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, **Brazil. Climatic Change**, v.116, p.705-722, 2013.

FONTÃO, P. A. B., ZAVATTINI, J. A. Tipos de tempo e ritmo pluvial na região metropolitana de São Paulo (RMSP): Análise comparativa dos anos 2003 e 2014. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 17, 2017, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: UNICAMP, 2017. p. 2193-2204.

HADDAD, E. A.; TEIXEIRA, E. Economic impacts of natural disasters in megacities: The case of floods in Sao Paulo, Brazil. **Habitat International**, v. 45, p. 106-113, 2015.

HIRATA, E.; GIANNOTTI, M.A.; LAROCCA, A.P.C.; QUINTANILHA, J.A. Flooding and inundation collaborative mapping – use of the Crowdmapp/Ushahidi platform in the city of Sao Paulo, Brazil. **Journal of Flood Risk Management**, v.11, p. 1-12, 2018.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades**. Brasília: IBGE, 2020. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama>> Acesso em: 10 out. 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades**. Brasília: IBGE, 2018. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama>> Acesso em: 10 fev. 2020.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Aquecimento Global de 1,5°C**. Suíça: IPCC, 2018. 27p.

JENSEN, J.R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. 2.ed. Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall, 2007.

GOMES, E. DE S.; MOURA, B.; PLAVIACK, G.; NOVACOSKI, J.; STORI, K. R. Oficina didática sobre os conceitos de inundações, enchentes, alagamentos e enxurradas. In: CONGRESSO NACIONAL DE EDUCAÇÃO, 12., 2015, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: PUCPR, 2015. p. 23535-23546.

OBREGÓN, G. O.; Marengo, J. A.; NOBRE, C. A. Rainfall and climate variability: long-term trends in the Metropolitan Area of São Paulo in the 20th century. **Climate Research**, v. 61, p. 93-107, 2014.

MENDES, A. T. Delimitação da bacia hidrográfica do Rio Santo Antônio pela ferramenta de delimitação automática TauDEM. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.11, n.03, p. 973-986, 2018.

NASCIMENTO, A. P. B. DO; SANTOS, S. R. DOS; GAUDERETO, G.; GALLARDO, A. L. C. F. Os serviços ecossistêmicos de espaços verdes urbanos: contribuições para a Agenda 2030. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v.10, n.77, p. 108-120, 2022.

NOBRE, C. A.; YOUNG, A. F.; ORSINI, J. A. M.; SALDIVA, P. H. N.; NOBRE, A. D.; OGURA, A. T.; THOMAZ, O.; VALVERDE, M. V.; PÁRRAGA, G. O. O.; SILVA, G. C. M. da; SILVEIRA, A. C.; RODRIGUES, G. de O. Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: região metropolitana de São Paulo. In: MOTTA, R. S. DA;

HARGRAVE, J.; LUEDEMANN, G.; GUTIERREZ, M. B. S. (org) **Mudança do clima no Brasil**: aspectos econômicos, sociais e regulatórios. Brasília: Ipea, 2011. pp. 233-260.

RAMIRES, J. Z. S., MELLO-THÉRY, N. A. Uso e ocupação do solo em São Paulo, alterações climáticas e os riscos ambientais contemporâneos. **Revista Franco-Brasileira de Geografia**, n. 34, 2018. Disponível em: <<https://journals.openedition.org/confins/12779?lang=pt#quotation>> . Acesso em: 10 out 2022.

ROLIM, G. S.; CAMARGO, M. B. P. de; LANIA, D. G.; MORAES, J. F. L. de. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, v.66, n.4, p. 711-720, 2007.

ROSSI, M. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo**: Revisado e Ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017.

SÃO PAULO. **GeoSampa**: Tutorial internet. Disponível em: <http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/downloadArquivoOL.aspx?orig=DownloadTutorial&arq=tutorial_mapa.pdf&arqTipo=TUTORIAL/>. Acesso em: 01/06/2019.

VASCONCELOS, F. D. M; MOTA, F. S. Gestão ambiental, legislação e os recursos hídricos na cidade de Fortaleza (CE), Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v.55, n.3, p. 313-330, 2020.

WRIGHT, D., SMITH, J. A., VILLARINI, G., BACCK, L. M. Hydroclimatology of flash flooding in Atlanta. **Water Resources Research**, v. 48, n. 4, p. 1-14, 2012.