



Relações entre urbanização e precipitação na Macrometrópole Paulista

Mariana Fadigatti Picolo, Thamiris Luisa de Oliveira
Brandão Campos e Edmilson Dias de Freitas

Introdução

Áreas urbanas ocupam apenas aproximadamente 1 % do globo, no entanto mais da metade da população mundial vive nessas regiões e existe uma estimativa de que esse número cresça para 68 % até 2050 (UN/DESA, 2018). O processo de urbanização se dá através da substituição do ambiente natural por materiais impermeáveis e de diferentes propriedades radiativas, como asfalto, tijolos e concreto, o que ocasiona mudanças no balanço de energia, definido pelas trocas de radiação, calor e umidade entre a superfície e atmosfera. As extensas áreas impermeáveis na região urbana aumentam o escoamento superficial, que em casos de chuvas intensas, sobrecarrega o sistema de drenagem. Somado às alterações de cursos d'água e canalização de rios, a população urbana se torna vulnerável a ocorrências de enchentes, alagamentos, enxurradas e deslizamento de terra. Estas ocorrências causam impactos sociais e econômicos, como perdas de vidas, danos a construções, perda de imóveis gerando grande número de desabrigados e interrupção de transportes públicos. A expansão desordenada de áreas urbanas faz com que pessoas ocupem áreas de risco, tornando-as mais vulneráveis. De acordo com Jha; Bloch & Lamond (2012), o número de pessoas afetadas por estes impactos cresceram nas últimas décadas e representa, atualmente, 1% da população global. No Brasil, entre 1990 e 2012, enxurradas foram responsáveis por 20% dos afetados por desastres naturais, sendo a principal causa de mortes, seguida por deslizamentos de terra (CEPED, 2013a). Em 2010, mais de 8 milhões de pessoas estavam em áreas de risco para enchentes, enxurradas e deslizamento de terra no Brasil (ALVALÁ et al., 2019).

O processo de urbanização propicia um ambiente suscetível à ocorrência de desastres naturais, o que não é muito comum em regiões rurais. Uma maneira de mostrar como as regiões rurais e urbanas são diferentes é através do balanço de energia (Figura 1). Considerando a mesma quantidade de radiação solar incidente, observa-se diminuição da radiação solar refletida (Q_R) na região urbana (menor albedo), quando comparada com região rural, aumentando a absorção de radiação. A quantidade de radiação solar refletida depende das propriedades radiativas das superfícies, pois os materiais mais escuros refletem menos radiação. A falta de água disponível para evaporar relacionada com a baixa cobertura de vegetação, a substituição por materiais impermeáveis e o rápido escoamento da chuva pelo sistema de drenagem faz com que a radiação absorvida seja utilizada no aquecimento das superfícies urbanas. Com isso, o termo do calor sensível (Q_H) se torna maior e o termo de calor latente menor (Q_E). O fluxo de calor sensível está relacionado com as trocas de calor entre a superfície e atmosfera e é dependente da temperatura, já o termo de calor latente está relacionado com a umidade, ou seja, com evaporação de água disponível e transpiração da vegetação.

A presença de prédios e o adensamento de construções na área urbana gera um aprisionamento da radiação solar através de múltiplas reflexões, e da radiação infravermelha (Q_L para cima). A radiação solar absorvida pelos poluentes na atmosfera e pelas superfícies é emitida proporcionalmente à sua temperatura no comprimento de onda infravermelho. O resfriamento devido à maior perda de radiação infravermelha emitida (maior temperatura) na região urbana é compensado pelo aprisionamento e pela liberação de calor antropogênico (Q_F).

A radiação infravermelha emitida pela atmosfera (Q_L para baixo) pode ser ainda maior na área urbana pela presença de poluentes, alterando os valores apresentados na Figura 1. Além disso, mais dois termos contribuem para o aquecimento da região, o termo de armazenamento (Q_S), que é maior na área urbanizada devido ao calor específico maior dos materiais presentes, e o calor antropogênico (Q_F), relacionado com fontes como automóveis, gastos com energia elétrica, ar-condicionado, aquecedores internos, etc. Todas estas alterações no balanço de energia fazem com que o ambiente urbano seja relativamente mais quente que suas vizinhanças, dando origem ao fenômeno da ilha de calor, um dos principais efeitos dos grandes centros urbanos.

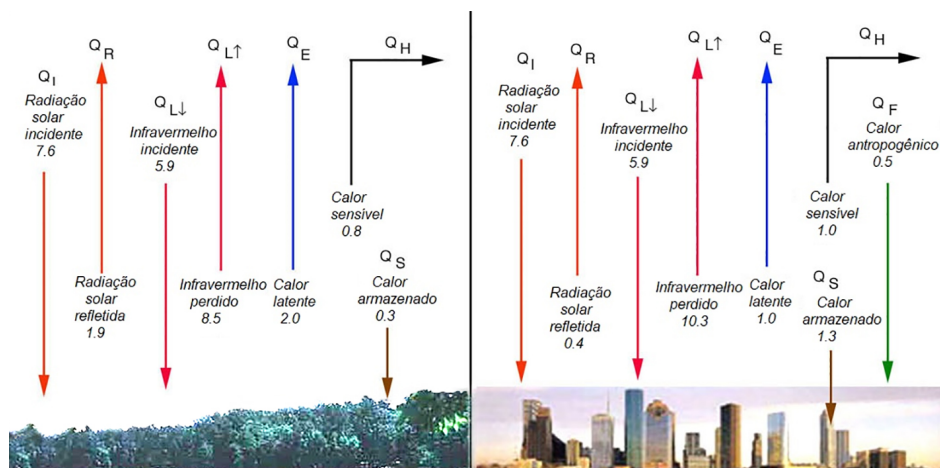


Figura 1 Balanço de energia para uma região rural (esquerda) e urbana (direita), valores típicos para cada termo. As unidades estão em $\text{kW h m}^{-2} \text{dia}^{-1}$. Adaptado de <http://www.ruf.rice.edu/~sass/UHI.html>.

A ilha de calor (Figura 2) é uma circulação em que o ar mais frio ao redor flui para os centros urbanos, gerando uma região de convergência em baixos níveis na região urbanizada, esta convergência, combinada com o ar quente, gera movimentos ascendentes. Em geral, a ilha de calor é mais intensa à noite, em períodos de vento calmo e céu claro. A intensidade tem relação com o tamanho da cidade e com a densidade de construções (ZHOU et al., 2017).

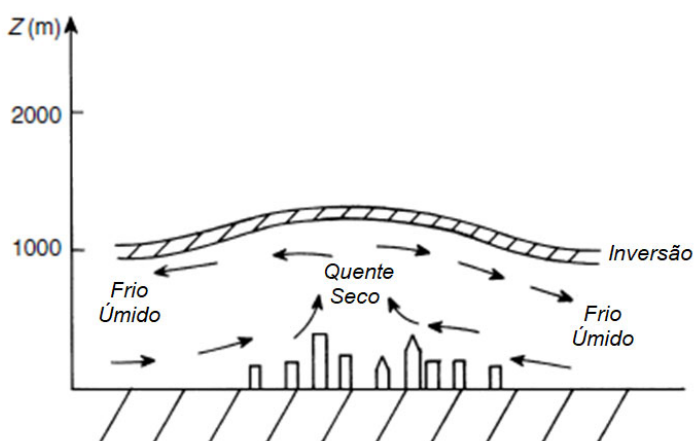


Figura 2 Esquema de uma ilha de calor. Adaptado de Cotton & Pielke (2007).

O processo de urbanização pode impactar eventos de tempestades, ocasionando mudanças na quantidade, localização e movimentação da precipitação (CHANGNON et al., 1981, LIU & NIYOGI, 2019). Esses efeitos estão relacionados com a ilha de calor, mas também com o aumento da rugosidade da superfície, devido à presença de construções, e com a poluição (SHEPHERD, 2005).

O objetivo deste artigo é fazer uma revisão bibliográfica dos impactos do processo de urbanização na precipitação, destacando as causas e consequências. O primeiro tópico propõe o tema e a área de estudo, o segundo tópico traz uma revisão explicitando os efeitos da ilha de calor, rugosidade da superfície e poluição urbana. O terceiro foca nos impactos já estudados na Macrometrópole Paulista. Por último, uma conclusão é feita, incluindo uma discussão sobre temas que ainda precisam ser abordados em futuros estudos.

Macrometrópole Paulista

A Macrometrópole Paulista (MMP) é uma região composta por cinco regiões metropolitanas (Regiões Metropolitanas de São Paulo, RMSP, da Baixada Santista, RMBS, de Campinas, RMC, do Vale do Paraíba e Litoral Norte, RMVPLN, e de Sorocaba, RMS), pelas Aglomerações Urbanas de Jundiaí e de Piracicaba e a Unidade Regional Bragantina. Localizada na região leste do Estado de São Paulo, é composta por 174 municípios, ocupando uma área de 53.000 km² com uma população estimada de 33 milhões de pessoas; possui 11.000 km² de área urbana, além de responder por 82,5 % do PIB do Estado (TRAVASSOS et al., 2020).

O clima no Estado de São Paulo é bastante variável espacialmente, e na MMP é dominado por um regime de monção, com o começo da estação chuvosa na primavera e término no começo de outono, e estação seca no inverno (MARENGO et al., 2020). Por ser uma região de transição climática (TARIFA & ARMANI, 2001) é afetada por sistemas tropicais provenientes das regiões norte e centro-oeste, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (CARVALHO et al., 2004), e de latitudes médias vindos da região sul do país, como as frentes frias (SILVA DIAS, 1987). A ZCAS pode ser definida como uma banda de intensa convecção, se estendendo da região Amazônica para a região sudeste do país.

A região sudeste da América do Sul foi identificada como uma das regiões mais favoráveis a ocorrências de tempestades (ZIPSER et al., 2006; ALBRECHT et al., 2016) e, principalmente no verão, os eventos são frequentes, inclusive com a formação de tempestades organizadas na forma de linhas de instabilidade (BENDER, 2012). A distribuição de chuva no Estado de SP é fortemente influenciada pela ZCAS durante o verão (CARVALHO et al., 2002), no entanto, a passagem de frentes frias na região também pode levar a grandes acumulados de precipitação. Lima, Satyamurty & Fernández (2010) mostraram que durante a estação chuvosa (outubro a março do ano seguinte), 53 % dos eventos extremos de chuva entre 1960-2005 estavam relacionados com frentes frias, enquanto que 47 % estavam relacionados com episódios de ZCAS na região sudeste do Brasil. Além de circulações de larga escala que podem atuar na região, como a ZCAS e frentes já mencionadas, fenômenos de mesoescala também são importantes nas ocorrências de precipitação, como circulação de vale-montanha e brisa marítima. A brisa marítima atua na porção leste da Macrometrópole, na região da Baixada Santista, Vale do Paraíba e RMSP, e pode interagir com a circulação de vale-montanha (FREITAS, 2003). Assim, tempestades podem estar relacionadas com eventos que se desenvolvem com a ausência de uma forçante sinótica, que podem ser caracterizados como tempestades pulsantes (MILLER & MOTE, 2017). Ainda, a precipitação apresenta uma variabilidade interanual e interdecadal relacionada à variabilidade climática (MACHADO et al., 2021).

Urbanização e seus impactos na precipitação

Impactos urbanos em ocorrências de tempo severo vêm sendo estudado nos últimos anos, um dos estudos pioneiros no tema foi o METROMEX (CHANGNON et al., 1981), que avaliou esses impactos na região de St. Louis, Missouri, EUA, na década de 70. Os resultados mais relevantes foram o aumento de precipitação nos centros urbanos e em torno de 50 – 75 km corrente abaixo da cidade. Liu & Niyogi (2019) realizaram uma meta-análise de vários estudos sobre impactos urbanos e também encontraram que o aumento de precipitação é mais intenso na região corrente abaixo (18 %) e no centro urbano (16 %). No entanto, aumento nas laterais (4 e 2 %) e corrente acima (1 %) também são observados.

Estudos recentes corroboram os resultados do aumento de precipitação nos centros urbanos e corrente abaixo da cidade do METROMEX (SHEPHERD et al., 2002; GANESHAN et al., 2013; NIYOGI et al., 2017); assim como também mostraram aumento de extremos na região urbana e tendência de crescimento da precipitação ao longo de décadas devido ao processo de urbanização (BURIAN & SHEPHERD, 2005; KISHTAWAL et al., 2010). Por outro lado, Zhang et al. (2009) e Song et al. (2014) mostraram uma tendência de queda na precipitação na região de Pequim, China, ao longo de décadas, com o rápido processo de urbanização, o que tem ocasionado problemas de abastecimento de água. De acordo com Zhang et al. (2009) isso pode estar relacionado com a diminuição de vapor d'água na região urbana. Esses resultados evidenciam que centros urbanos em diferentes regiões podem apresentar impactos distintos em longo prazo.

Geometria urbana e ilha de calor

Os impactos em diferentes regiões com relação ao centro urbano podem estar relacionados com a propagação corrente abaixo da convergência em baixos níveis, associada à ilha de calor. Utilizando modelagem numérica, Rozoff; Cotton & Adegoke (2003) e Han & Baik (2008) mostraram a formação e a advecção corrente abaixo da circulação de ilha de calor, evidenciando que a convergência relacionada pode iniciar convecção. Ainda de acordo com Han & Baik (2008), quanto mais intensa a fonte de calor e mais fraca a velocidade do vento, mais próxima da fonte é a convecção e, por consequência, a precipitação observada. O aumento da rugosidade da superfície relacionado com a presença de prédios também gera padrões de convergência na área urbana. No entanto, de acordo com Rozoff; Cotton & Adegoke (2003) este padrão é observado corrente acima e não é suficiente para iniciar convecção, mas pode interagir com a circulação de ilha de calor e impactar na iniciação da convecção.

Outro ponto que também pode evidenciar as diferentes regiões impactadas são as mudanças na estrutura de tempestades e efeitos de barreira pela presença de prédios (BORNSTEIN & LEROY, 1990; NIYOGI et al., 2011; DOU et al., 2015). Dou et al. (2015), corroborando os resultados anteriormente mostrados por Bornstein & Leroy (1990) para a região da cidade de Nova York, discutiram que os impactos urbanos em diferentes áreas, na região de Pequim na China, estão relacionados com a intensi-

dade da ilha de calor. Em condições intensas de ilha de calor, os máximos ocorrem na região urbana, enquanto que em situações mais fracas existe um efeito de barreira (devido à presença de prédios), ocasionando máximos de precipitação na região lateral e na região corrente abaixo.

Os impactos urbanos podem ser observados em eventos com a ausência de forçantes sinóticas mais significativas (MOTE et al., 2007; ASHLEY et al., 2012), em que a ilha de calor é mais intensa, mas também em ocorrências relacionadas a uma forçante sinótica (GANESHAN et al., 2013; ZHONG; YANG, 2015). Outro ponto importante com relação à circulação de ilha de calor é a possível interação com outras circulações de mesoescala, como brisa marítima/lacustre e vale-montanha, amplificando a convecção. Vários estudos já identificaram essa interação para vários lugares do mundo (FREITAS et al., 2007; SHEPHERD et al., 2010; LIN et al., 2011).

Aerossóis

Os efeitos da concentração de aerossóis na precipitação são diversos, Rosenfeld (2000) e Givati & Rosenfeld (2004) identificaram uma diminuição da chuva relacionada à concentração de núcleos de condensação de nuvens (CCN). Segundo Givati & Rosenfeld (2004), o impacto é maior em nuvens rasas. Outros estudos mostraram aumento da precipitação (BELL et al., 2008; LACKE et al., 2009). Rosenfeld et al. (2008) discute dois distintos efeitos da presença de poluição na atmosfera, com relação ao impacto na radiação e na microfísica. Poluentes na atmosfera diminuem a quantidade de radiação solar que chega à superfície, gerando resfriamento. Uma parte da radiação é refletida de volta para o espaço e outra absorvida pelos poluentes, aquecendo a baixa troposfera. Isto estabiliza a atmosfera, ou seja, o perfil vertical de temperatura apresenta um aumento com altura em baixos níveis, suprimindo convecção. Na parte de microfísica, uma maior concentração de CCN diminui a conversão de gotas de nuvem em gotas de chuva, devido à uma maior concentração de gotas menores. Este processo pode diminuir a precipitação em nuvens rasas, mas intensificar nuvens convectivas. A desaceleração na conversão de gota de nuvem em chuva, atrasa a precipitação, e portanto, maior conteúdo de água líquida pode ser carregada à alturas com baixas temperaturas (abaixo de 0 °C) em nuvens profundas. O aumento da condensação e

do congelamento em altos níveis, libera mais calor latente, intensificando a convecção. Utilizando modelagem numérica Carrió; Cotton & Cheng (2010) e Han; Baik & Khain (2012) descrevem este processo e o consequente aumento da precipitação com o aumento da concentração de CCN. No entanto, de acordo com Rosenfeld et al. (2008) e Carrió; Cotton & Cheng (2010) o aumento da concentração acima de um limite pode ser prejudicial, suprimindo a precipitação, esta concentração pode depender da distância da base da nuvem até o nível de congelamento e da instabilidade atmosférica. Van Den Heever & Cotton (2007) também mostraram que a presença de aerossóis de diferentes tamanhos (GCCN e CCN) produzem impactos na microfísica e dinâmica das tempestades e que estes impactos são não lineares, dificultando conclusões diretas dos efeitos do aumento da concentração.

A utilização de sensoriamento remoto é uma importante ferramenta nos estudos deste tópico, por exemplo, utilizando satélites é possível obter dados de precipitação, nuvens, aerossóis, radiação, cobrindo uma extensa área. Muitos estudos utilizaram dados de precipitação de radar ou satélite para identificar os impactos urbanos corrente abaixo (ou em diferentes regiões), assim como para verificar efeitos da presença de aerossóis (SHEPHERD et al., 2002, FAN et al., 2016). A utilização de satélites para estas análises é particularmente importante em regiões com redes observacionais esparsas, possibilitando o estudo em várias regiões do mundo.

Ainda, a sua utilização é uma possibilidade na melhoria da compreensão de processos envolvendo a interação de aerossóis e nuvens, inclusive auxiliando no desenvolvimento de parametrizações e validação de modelos (ROSENFELD et al., 2014a, FAN et al., 2016). Com novas ferramentas de alta resolução é possível, por exemplo, obter concentrações de CCN na atmosfera (ROSENFELD et al., 2014b; ROSENFELD et al., 2016).

Sistemas precipitantes e o processo de urbanização na Macrometrópole Paulista

Na estação chuvosa da RMSP durante as últimas duas décadas foi observado um aumento significativo no volume total sazonal de chuva (MARENGO et al., 2020), o que pode ser explicado pelo deslocamento mais a sudoeste da ZCAS nas décadas recentes (ZILLI et al., 2017) e pelo aumento na frequência de eventos extremos de precipitação diária. Marengo et

al. (2020) analisaram duas estações meteorológicas pontuais sobre a RMSP e encontraram que na década de 1950 não houve chuva acima de 50 mm/dia, enquanto na última década esse limiar tem ocorrido entre 2 a 5 vezes por ano. No entanto, ocorrências de chuva fraca (entre 0.1 e 5 mm/dia) apresentam uma tendência de queda, enquanto o número de dias consecutivos sem chuva tem aumentado, assim como a duração da estação seca. Os autores ainda indicam aumento na intensidade e frequência de chuvas intensas na RMSP no período de 2040 e 2100. Silva Dias et al. (2013) mostraram tendência de aumento da precipitação na cidade de São Paulo entre 1933 e 2010, que, durante o verão, pode ter relação com o processo de urbanização. Na MMP, Machado et al. (2021) também identificaram aumento da precipitação anual e de extremos entre 1940 e 2016. O aumento dos extremos tem uma correlação com índices climáticos. No entanto, ainda de acordo com os autores existe evidência de que o aumento na ocorrência e frequência de extremos seja maior em áreas urbanizadas.

Naccarato; Pinto & Pinto (2003) identificaram uma densidade de raio maior nas regiões metropolitanas de São Paulo, Campinas e São José do Rio Preto com relação às áreas ao redor. Ainda, mostraram uma correlação positiva entre número de flashes e concentração de PM_{10} . Estes resultados podem estar relacionados com a ilha de calor intensificando a convecção em áreas urbanas, assim como com a poluição.

A formação da ilha de calor na cidade de São Paulo e RMSP é estudada há alguns anos (LOMBARDO, 1984; FREITAS, 2003). Freitas et al. (2007) mostraram aceleração da brisa devido ao aumento do gradiente de temperatura pela presença da ilha de calor. Esta aceleração ocorre até o centro da área urbana, sendo então observada uma desaceleração a partir do centro da RMSP. A interação entre a ilha de calor e a brisa marítima pode amplificar a convecção na região, dando origem às fortes tempestades observadas na cidade de São Paulo e RMSP (PEREIRA FILHO et al., 2004; FREITAS et al., 2009; VEMADO & PEREIRA FILHO, 2016). Durante eventos de brisa marítima entre 2005 e 2008, Vemado e Pereira Filho (2016) mostraram que a precipitação acumulada é 4 vezes maior nas áreas urbanas da RMSP do que ao redor, com acumulados de até 600 mm. Os maiores valores ocorrem na região central com máximos ligeiramente deslocados para leste. A presença de áreas urbanas em simulações numé-

ricas de um evento de tempo severo na RSMP aumentou a precipitação em até 100 % no estudo de Freitas et al. (2009), o aumento foi maior na região leste.

Os eventos severos observados com tanta frequência atualmente na MMP ocorreram devido à variabilidade climática natural, ao aquecimento global e/ou efeitos da urbanização. A combinação de eventos severos de precipitação com áreas urbanizadas gera diversos danos econômicos e até perda de vidas.

Devido ao processo de urbanização da região, nos últimos anos, rios foram canalizados e cursos d'água sofreram alterações, além da substituição de áreas permeáveis por materiais impermeáveis, o que faz com que a região sofre com enchentes, inundações, enxurradas e alagamentos, sendo evidente a deficiência de drenagem urbana em episódios de chuva forte. Deslizamentos de terra também são observados na região, principalmente afetando regiões de ocupação desordenada com habitações precárias. De acordo com a Atlas de Desastres Naturais (CEPED, 2013b), inundações, enxurradas, alagamentos e deslizamentos de terra afetaram em torno de 3,6 milhões de pessoas entre 1991 e 2012 no Estado de São Paulo; entre desabrigados e desalojados foram mais de 200 mil. A RMSP foi a mais afetada do Estado por essas ocorrências. Com relação a impactos econômicos, Santos (2013) mostrou que os efeitos dos frequentes eventos de alagamento na cidade de São Paulo não são apenas observados na cidade. Em 2008 estas ocorrências tiveram um impacto em torno de 170 milhões de reais no PIB do Brasil. Durante a estação chuvosa de 2016 a 2019 (outubro a março do ano seguinte), Travassos et al. (2020) identificaram 47 mortes relacionadas à eventos de chuva na MMP (38 na RSMP), destas a maioria foi por afogamento, seguido por deslizamento de terra. Mortes também ocorreram por raios, desabamentos e queda de árvores. Do total de mortes por afogamento, a maior parte (15 das 20) foi em regiões identificadas como não vulneráveis, enquanto todas por deslizamento de terra ocorreram em áreas vulneráveis. De acordo com os autores, as mortes por afogamento indicam problemas de infraestrutura urbana, com áreas impermeabilizadas próximas a córregos, intensificando escoamento superficial. Também indicam falta de conhecimento por parte da população com relação aos riscos de permanência em áreas inundadas, assim como a ausência de estrutura de resgate para responder rapidamente às ocorrências. Em áreas vulneráveis,

as mortes por deslizamento de terra ocorreram devido à presença de habitações precárias em áreas suscetíveis.

Conclusões

O processo de urbanização altera as propriedades térmicas, radiativas e aerodinâmicas de uma região, modificando as trocas de calor e umidade entre a superfície e a atmosfera e dando origem ao fenômeno de ilha de calor. Muitos estudos apresentam evidências de impactos urbanos em ocorrências de tempestades, alterando a estrutura, a localização e a intensidade da precipitação, como foi mostrado ao longo deste artigo. O aumento da precipitação é maior na região corrente abaixo e no centro, mas também pode ser observado nas laterais e corrente acima de centros urbanos. Além disso, várias regiões observaram tendência de aumento da precipitação e de eventos extremos ao longo de décadas devido ao processo de urbanização. No entanto, tendência de queda também foi identificada, levando a prejuízos no abastecimento de água na região de Pequim. Os impactos estão relacionados à ilha de calor, aumento da rugosidade da superfície e poluentes atmosféricos.

Dentro da MMP, na RMSP, a formação da ilha de calor, assim como aumento da intensidade da precipitação com a presença da cidade em simulações numéricas, tendência de crescimento e aumento na frequência de eventos extremos foi observada, sendo possível concluir que o processo de urbanização impacta ocorrências de tempestades e precipitação nesta região. Aumento da frequência de eventos extremos e tendência de crescimento da precipitação também foram identificados dentro da MMP como um todo, estando correlacionadas com índices climáticos. No entanto, também existem evidências de que estes aumentos sejam mais intensos em áreas urbanizadas. A maior densidade de raios na RMC, assim como na RMSP, do que em áreas ao redor, indica que o processo de urbanização também impacta tempestades na RMC. Como a ilha de calor é proporcional ao tamanho da cidade, espera-se que cidades menores dentro da MMP tenham impactos menores, ou não apresentem impactos que possam ser observados. No entanto, a MMP possui várias áreas urbanizadas próximas e, principalmente em um cenário de crescimento urbano, as ilhas de calor de cada região podem interagir e impactar a área

de uma forma mais ampla, como em um conceito de arquipélago urbano discuto por Shepherd et al. (2013).

Muitos dos impactos urbanos na precipitação na MMP ainda necessitam de mais estudo, utilizando, por exemplo, radar e satélite para avaliar a precipitação relacionada a centros urbanos, na tentativa de identificar efeitos corrente abaixo ou lateral em diferentes padrões sinóticos. Assim como compreender o impacto da ilha de calor, rugosidade e aerossóis nestas ocorrências.

Os diversos eventos severos que causam impactos sociais e econômicos na região podem ainda ser agravados em uma perspectiva futura de expansão urbana, somado aos cenários de mudanças climáticas. Desta forma, projeções de cenários de expansão urbana para o futuro precisam ser estudadas. Ainda, mudanças no padrão de localização das chuvas podem ocorrer, fazendo com que o abastecimento de água, que hoje compromete 1 milhão de pessoas (RAMOS et al., 2020), possa ser agravado dentro da MMP.

Agradecimentos – Os autores agradecem o apoio recebido da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processo n. 2015/03804-9 e bolsa 2019/12015-9, bem como apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (processo nº 88887.369618/2019-00).

Referências

- ALBRECHT, R. I. et al. Where Are the Lightning Hotspots on Earth? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 97, n. 11, p. 2051–2068, 1 nov. 2016. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-D-14-00193.1>>.
- ASHLEY, W. S.; BENTLEY, M. L.; STALLINS, J. A. Urban-induced thunderstorm modification in the Southeast United States. **Climatic Change**, v. 113, n. 2, p. 481–498, 10 jul. 2012. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10584-011-0324-1>>.
- ALVALÁ, R. et al. Mapping characteristics of at-risk population to disasters in the context of Brazilian early warning system. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 41, p. 101326, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101326>>.
- BELL, T. L. et al. Midweek increase in U.S. summer rain and storm heights suggests air pollution invigorates rainstorms. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, n. D2, p. D02209, 31 jan. 2008. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2007JD008623>>.
- BENDER, A. **Eventos de tempo severo associados às linhas de instabilidade sobre o estado de São Paulo**. 2012. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14133/tde-24062013-113838/>>.

- BORNSTEIN, R.; LEROY, M. Urban barrier effects on convective and frontal thunderstorms. In: Fourth AMS Conference on Mesoscale Processes, Bolder, CO. **Anais...** Bolder, CO: American Meteorological Society, 1990.
- BURIAN, S. J.; SHEPHERD, J. M. Effect of urbanization on the diurnal rainfall pattern in Houston. **Hydrological Processes**, v. 19, n. 5, p. 1089–1103, 30 mar. 2005. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.5647>>.
- CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme Precipitation Events in Southeastern South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, v. 15, n. 17, p. 2377–2394, set. 2002. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2377:EPEISS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2377:EPEISS>2.0.CO;2)>.
- CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88–108, jan. 2004. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017%3C0088:TSACZI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017%3C0088:TSACZI%3E2.0.CO;2)>.
- CEPED, UFSC. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012: volume Brasil**. 2013a. Disponível em: <<https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/>>.
- CEPED, UFSC. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012: volume São Paulo**. 2013b. Disponível em: <<https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/>>.
- CARRIÓ, G. G.; COTTON, W. R.; CHENG, W. Y. Y. Urban growth and aerosol effects on convection over Houston: Part I: The August 2000 case. **Atmospheric Research**, v. 96, n. 4, p. 560–574, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.01.005>>.
- CHANGNON, S. A. et al. Metromex: A Review and Summary. In: CHANGNON, S. A. (Ed.). **Meteor. Monogr. No. 40**. 1. ed. Boston, MA: American Meteorological Society, 1981. p. 181.
- COTTON, W. R.; PIELKE, R. A. Sr. **Human Impacts on Weather and Climate**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 308 p.
- DOU, J. et al. Observed Spatial Characteristics of Beijing Urban Climate Impacts on Summer Thunderstorms. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 54, n. 1, p. 94–105, 1 jan. 2015. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JAMC-D-13-0355.1>>.
- FAN, J. et al. Review of aerosol–cloud interactions: Mechanisms, significance, and challenges. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 73, n. 11, p. 4221–4252, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/JAS-D-16-0037.1>>.
- FREITAS, E. D. **Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes**. 2003. PhD University of São Paulo, Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences, 2003.
- FREITAS, E. D. et al. Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of São Paulo, Brazil. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 122, n. 1, 2007.
- FREITAS, E. D. et al. **Factors involved in the formation and development of severe weather conditions over the Megacity of São Paulo**. 89th American Meteorological Society Meeting. Phoenix, AZ, AMS, 2009.
- GANESHAN, M.; MURTUGUDDE, R.; IMHOFF, M. L. A multi-city analysis of the UHI-influence on warm season rainfall. **Urban Climate**, v. 6, p. 1–23, dez. 2013. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212095513000485>>.

- GIVATI, A.; ROSENFELD, D. Quantifying Precipitation Suppression Due to Air Pollution. **Journal of Applied Meteorology**, v. 43, n. 7, p. 1038–1056, jul. 2004. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<1038:QPSDTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<1038:QPSDTA>2.0.CO;2).
- HAN, J. Y.; BAIK, J. J. A Theoretical and Numerical Study of Urban Heat Island–Induced Circulation and Convection. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 65, n. 6, p. 1859–1877, 1 jun. 2008. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/2007JAS2326.1>.
- HAN, J. Y.; BAIK, J. J.; KHAIN, A. P. A numerical study of urban aerosol impacts on clouds and precipitation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 69, n. 2, p. 504–520, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-071.1>.
- JHA, A. K.; BLOCH, R.; LAMOND, J. **Cities and flooding: a guide to integrated urban flood risk management for the 21st century**. World Bank Publications, 2012. 631 p.
- KISHTAWAL, C. M. et al. Urbanization signature in the observed heavy rainfall climatology over India. **International Journal of Climatology**, v. 30, n. 13, p. 1908–1916, 15 nov. 2010. Disponível em: <http://doi.org/10.1002/joc.2044>.
- LACKE, M. C.; MOTE, T. L.; SHEPHERD, J. M. Aerosols and associated precipitation patterns in Atlanta. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 28, p. 4359–4373, set. 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231009003550>.
- LIMA, K. C.; SATYAMURTY, P.; FERNÁNDEZ, J. P. R. Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in Southeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 101, n. 1–2, p. 121–135, 12 jul. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0207-9>.
- LIN, C. Y. et al. Impact of the Urban Heat Island Effect on Precipitation over a Complex Geographic Environment in Northern Taiwan. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 50, n. 2, p. 339–353, 1 fev. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2504.1>.
- LIU, J.; NIYOGI, D. Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 7301, 13 dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42494-2>.
- LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor da metrópole paulistana**. São Paulo, 1984. Tese de Doutorado, FFLCH, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.
- MACHADO, C. B. et al. Extreme Rainfall Events in the Macrometropolis of São Paulo: Trends and Connection with Climate Oscillations. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 60, n. 5, p. 661–675, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-20-0173.1>.
- 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**, v. 1472, n. 1, p. 5–20, 2020.
- MILLER, P. W.; MOTE, T. L. Standardizing the Definition of a “Pulse” Thunderstorm. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 5, p. 905–913, 1 maio 2017. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-D-16-0064.1>.
- MOTE, T. L.; LACKE, M. C.; SHEPHERD, J. M. Radar signatures of the urban effect on precipitation distribution: A case study for Atlanta, Georgia. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 20, 1 out. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2007GL031903>.
- NACCARATO, K. P.; PINTO JR, O.; PINTO, I. R. C. A. Evidence of thermal and aerosol effects on the cloud to ground lightning density and polarity over large urban areas of

Southeastern Brazil. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 13, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2003GL017496>>.

NIYOGI, D. et al. Urban Modification of Thunderstorms: An Observational Storm Climatology and Model Case Study for the Indianapolis Urban Region*. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 50, n. 5, p. 1129–1144, 1 maio 2011. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/2010JAMC1836.1>>.

NIYOGI, D. et al. Urbanization Impacts on the Summer Heavy Rainfall Climatology over the Eastern United States. **Earth Interactions**, v. 21, n. 5, p. 1–17, 1 jun. 2017. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/EI-D-15-0045.1>>.

PEREIRA FILHO, A. J. et al. **Enchentes na Região Metropolitana de São Paulo** (S. B. de Meteorologia, Ed.) **XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia** Fortaleza, CE, 2004. .

RAMOS, R. F. et al. Environmental sanitation in São Paulo Macrometropolis: perspectives for a multi-level governance. **Ambiente & Sociedade**, v. 23, 2020. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2020000100350&tlng=en>.

ROSENFELD, D. Suppression of Rain and Snow by Urban and Industrial Air Pollution. **Science**, v. 287, n. 5459, p. 1793, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1126/science.287.5459.1793>>.

ROSENFELD, D. et al. Flood or drought: How do aerosols affect precipitation? **Science**, v. 321, n. 5894, p. 1309–1313, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1126/science.1160606>>.

ROSENFELD, D. et al. Combined satellite and radar retrievals of drop concentration and CCN at convective cloud base. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 9, p. 3259–3265, 2014a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/2014GL059453>>

ROSENFELD, D. et al. Global observations of aerosol cloud precipitation climate interactions. **Reviews of Geophysics**, v. 52, n. 4, p. 750–808, 2014b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/2013RG000441>>.

ROSENFELD, D. et al. Satellite retrieval of cloud condensation nuclei concentrations by using clouds as CCN chambers. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 21, p. 5828–5834, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1073/pnas.1514044113>>.

ROZOFF, C. M.; COTTON, W. R.; ADEGOKE, J. O. Simulation of St. Louis, Missouri, Land Use Impacts on Thunderstorms. **Journal of Applied Meteorology**, v. 42, n. 6, p. 716–738, 13 fev. 2003. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042%3C0716:SOSLML%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042%3C0716:SOSLML%3E2.0.CO;2)>.

SANTOS, E. T. **Impactos econômicos de desastres naturais em megacidades: o caso dos alagamentos em São Paulo**. 2013. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/12/12138/tde-17022014-143009/>>.

SHEPHERD, J. M. A Review of Current Investigations of Urban-Induced Rainfall and Recommendations for the Future. **Earth Interactions**, v. 9, n. 12, p. 1–27, 1 jul. 2005. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/EI156.1>>.

SHEPHERD, J. M. et al. The Impact of Urbanization on Current and Future Coastal Precipitation: A Case Study for Houston. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 37, n. 2, p. 284–304, 1 abr. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1068/b34102t>>.

SHEPHERD, J. M.; PIERCE, H.; NEGRI, A. J. Rainfall Modification by Major Urban Areas: Observations from Spaceborne Rain Radar on the TRMM Satellite. **Journal of Applied Meteorology**, v. 41, n. 7, p. 689–701, jul. 2002. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041%3C0689:RMBMUA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041%3C0689:RMBMUA%3E2.0.CO;2)>.

SHEPHERD, J. M. et al. Urban climate archipelagos: A new framework for urban impacts on climate. **Earthzine**, 2013.

SILVA DIAS, M. A. F. Sistemas de mesoescala e previsão de tempo a curto prazo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 2, n. 1, p. 133–150, 1987.

SILVA DIAS, M. A. F. et al. Changes in Extreme Daily Rainfall for São Paulo, Brazil. **Climatic Change**, p. 1–18, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10584-012-0504-7>>.

SONG, X. et al. Rapid urbanization and changes in spatiotemporal characteristics of precipitation in Beijing metropolitan area. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 119, n. 19, p. 11,250–11,271, 16 out. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/2014JD022084>>.

TARIFA, J. R.; ARMANI, J. Os climas urbanos. In: TARIFA T. R., J. R. E. A. (Ed.). **Os climas na cidade de São Paulo: Teoria e prática**. Coleção Novos Caminhos. São Paulo: Pró-Reitoria de Cultura e Extensão, Universidade de São Paulo, Laboratório de Climatologia – FFLCH, Cap 4, p. 47–70.

TRAVASSOS, L. et al. Why do extreme events still kill in the São Paulo Macro Metropolis Region? Chronicle of a death foretold in the global south. **International Journal of Urban Sustainable Development**, v. 13, n. 1, p. 1–16, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/19463138.2020.1762197>>.

UN/DESA. **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, Highlights**. Disponível em: <<https://population.un.org/wup/Publications/>>.

VAN DEN HEEVER, S. C.; COTTON, W. R. Urban Aerosol Impacts on Downwind Convective Storms. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 46, n. 6, p. 828–850, 1 jun. 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/JAM2492.1>>.

VEMADO, F.; PEREIRA FILHO, A. J. Severe Weather Caused by Heat Island and Sea Breeze Effects in the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil. **Advances in Meteorology**, v. 2016, p. 13, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/2016/8364134>>.

ZHANG, C. L. et al. Impacts of urban expansion and future green planting on summer precipitation in the Beijing metropolitan area. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, n. D2, p. D02116, 30 jan. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2008JD010328>.

ZHONG, S.; YANG, X. Ensemble simulations of the urban effect on a summer rainfall event in the Great Beijing Metropolitan Area. **Atmospheric Research**, v. 153, p. 318–334, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809514003627>>.

ZHOU, B.; RYBSKI, D.; KROPP, J. P. The role of city size and urban form in the surface urban heat island. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 4791, 6 dez. 2017. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/s41598-017-04242-2>>.

ZILLI, M. T. et al. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 5, p. 2269–2279, abr. 2017. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/joc.4840>>.

ZIPSER, E. J. et al. WHERE ARE THE MOST INTENSE THUNDERSTORMS ON EARTH? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 87, n. 8, p. 1057–1072, ago. 2006. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-87-8-1057>>.