

VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO, DA ESCALA REGIONAL PARA A LOCAL

Space-temporal variability of precipitation extremes in Londrina (PR) and resulting impacts

Deise Fabiana Ely¹ 
André Kaiser de Castro² 
Bruno Tertuliano da Silva³ 
Fabiana Bezerra Mangili⁴ 

RESUMO

A chuva é caracterizada por uma heterogeneidade espacial e temporal e a compreensão dessas variações é importante para o desenvolvimento de alternativas à mitigação de seus impactos. Neste sentido, o presente artigo analisa a variabilidade espaço-temporal dos extremos de precipitação da escala regional (Paraná) à local (Londrina). A metodologia empregada propiciou estabelecer os limiares dos extremos das precipitações diárias no Paraná e em Londrina (P90, P95 e P99) e constatar que a área urbana do município é frequentemente atingida por chuvas ligeiras, moderadas e por eventos extremos úmidos e muito úmidos. O cálculo dos índices ITCCDMI – IPCC permitiu concluir que a área urbana concentra os resultados da variabilidade dos extremos de precipitações e os impactos mais frequentes derivam das chuvas fortes associadas aos vendavais no período da primavera e verão, mais especificamente nos meses de outubro e dezembro. De forma geral, as precipitações extremas têm contribuído para o aumento dos totais anuais e não para a frequência de dias chuvosos que, associadas à impermeabilização do solo e a um sistema deficiente de drenagem urbana, constituem agravantes das situações de riscos ambientais.

Palavras-chave: índices climáticos; impactos ambientais; planejamento urbano.

ABSTRACT

Rain is characterized by spatial and temporal heterogeneity and understanding these variations is important for the development of alternatives to mitigate its impacts. In this sense, this article analyzes the spatio-temporal variability of precipitation extremes from regional scale (Paraná) to the local scale (Londrina). The methodology used made it possible to establish the thresholds for the extremes of daily precipitation in Paraná state and the municipality of Londrina (P90, P95 and P99) and to verify that his urban area is frequently affected by light and moderate rainfall and by extreme wet and very humid events. The calculation of the ITCCDMI – IPCC indices led to the conclusion that the urban area concentrates the results of the variability of precipitation extremes and the most frequent impacts derive from heavy rains associated with windstorms in the spring and summer period, more specifically in the months of October and December. In general, extreme precipitation has contributed to the increase in annual totals and not to the frequency of rainy days which, associated with soil sealing and a deficient urban drainage system, constitute aggravating situations of environmental risks.

Keywords: climatic indices; environmental impacts; urban planning.

¹Doutora em Geografia. Professora do Departamento de Geografia da Universidade Estadual de Londrina (UEL). Coordenadora do Laboratório de Climatologia Geográfica (LabClima) da UEL. **E-mail:** deise@uel.br

²Licenciado em Geografia pela Universidade Estadual de Londrina (UEL). Laboratório de Climatologia Geográfica (LabClima) da UEL. **E-mail:** kaiserandre05@gmail.com

³Estudante do curso de Bacharelado em Geografia da Universidade Estadual de Londrina (UEL). Laboratório de Climatologia Geográfica (LabClima) da UEL. **E-mail:** bruno.tertuliano@uel.br

⁴Doutora em Geografia pela Universidade Estadual de Londrina (UEL). Geógrafa e analista ambiental no Parque Tecnológico Itaipu. **E-mail:** fabiana.mangili@pti.org.br

RESUMEN

La lluvia se caracteriza por la heterogeneidade espacial y temporal y la comprensión de estas variaciones es importante para el desarrollo de alternativas para mitigar sus impactos. Em este sentido, este artículo analiza la variabilidad espacio-temporal de los extremos de precipitación desde la escala regional (Paraná) hasta la escala local (Londrina). La metodología utilizada permitió establecer los umbrales de los extremos de precipitación diaria en el estado de Paraná y en el municipio de Londrina (P90, P95 y P99) y verificar que sua área urbana es frecuentemente afectada por lluvias ligeras, y moderadas y por eventos extremos húmedos y muy húmedos. El cálculo de los índices ITCCDMI – IPP permitió concluir que la zona urbana concentra los resultados de la variabilidad de los extremos de precipitación y los impactos más frecuentes derivan de las fuertes lluvias asociadas a los temporales de viento em el período de primavera y verano, más específicamente em los meses de octubre y diciembre. Em general, las precipitaciones extremas han contribuido al aumento de los totales anuales y no a la frecuencia de los días de lluvia que, asociadas al sellado del suelo y a um deficiente sistema de drenaje urbano, constituyen situaciones agravantes de riesgos ambientales.

Palabras-clave: índices climáticos; impactos ambientales; urbanismo.

INTRODUÇÃO

A variabilidade da precipitação tem sido estudada em diferentes escalas espaço-temporais e, especificamente, no Brasil tais estudos são de fundamental importância para subsidiar o planejamento das atividades agrícolas, o gerenciamento da disponibilidade hídrica para os reservatórios de usinas hidrelétricas e a produção de energia para as atividades industriais e domésticas, para o planejamento e a mitigação de impactos sobre as áreas urbanas; além de inúmeras outras condicionadas à oferta pluviométrica.

Dentre muitos estudos, alguns identificam tendências positivas na precipitação média anual na América do Sul e, mais especificamente, nas regiões sudeste e sul do Brasil (Barros, 2010; Haylock *et al.*, 2006; Marengo *et al.*, 2009; Zilli *et al.*, 2017).

No Paraná, contexto desta última região brasileira, Ely e Dubreuil (2017) verificaram tendências positivas estatisticamente significativas nos totais pluviométricos anuais nas regiões de Curitiba, norte do litoral, Centro-Sul, Oeste, Centro-Occidental, Norte Central e Norte Pioneiro. Minuzzi e Caramori (2011, p. 596) ressaltam que, desde meados do século XX, o Paraná apresenta uma tendência de aumento na quantidade de chuvas, principalmente, durante o verão e a primavera. Ely (2019) também observou tendências positivas significativas da precipitação na região metropolitana de Curitiba, no centro, norte e sudeste do Paraná no verão, inverno e primavera, influenciadas pelas tendências positivas apresentadas pelos meses de janeiro, fevereiro, junho, julho e outubro.

Ely e Fortin (2018) analisaram as tendências das precipitações nas regiões norte e leste do Paraná para o período de 1971 a 2014 por meio do cálculo de seis índices propostos pela equipe de especialistas em detecção e monitoramento de mudanças climáticas (ETCCDMI – IPCC) e

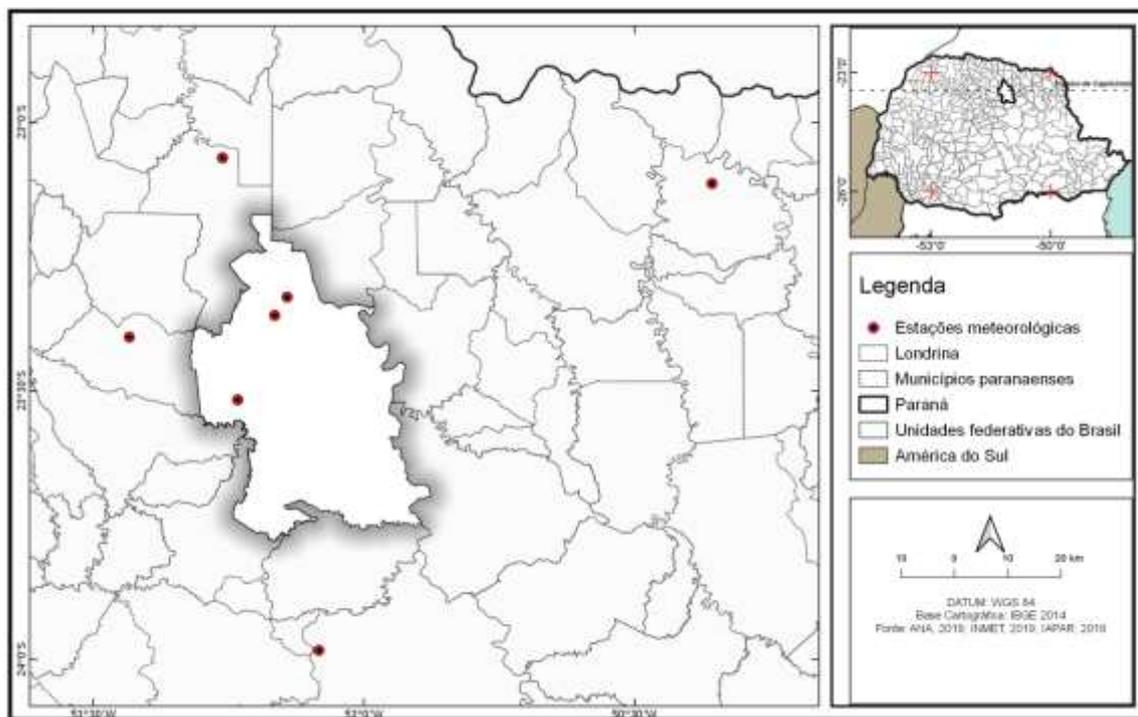
verificaram que para o total de dias úmidos anuais (PRCPTOT) ocorrem aumentos significativos nas estações meteorológicas da Lapa, Curitiba e Guaraqueçaba (leste do Paraná), assim como estas duas primeiras localidades registram aumentos significativos nos dias consecutivos com chuvas acima de 30mm (R_{xnday}). Todas as estações localizadas no leste do estado apresentaram tendências significativas de aumento no número de dias com chuvas superiores a 20mm (R20mm) e aquelas localizadas no norte registraram tendências negativas, mas com baixa significância estatística.

Zandonadi *et al.* (2016) observaram a ocorrência de aumento na precipitação total atrelado às precipitações extremas para a maioria das estações localizadas na bacia do rio Paraná.

Na literatura não há uma definição precisa do conceito e dos limiares que caracterizam os eventos pluviométricos extremos, mas são destacados seus aspectos quanto à dinamicidade, baixa frequência e alta intensidade. De acordo com Goudard (2019), são utilizados diferentes limiares pluviométricos para a identificação dos eventos pluviométricos extremos em diferentes regiões e localidades.

O município de Londrina está localizado entre as latitudes 23°08'47"S e 23°55'46"S e as longitudes 50°52'23"O e 51°19'11"O, no norte do Paraná, com uma extensão territorial de 1.652,57km² (Figura 1) e uma população estimada em 569 mil habitantes em 2019; sendo que apenas 3% destes residem na área rural. Fundado em 1934, sua economia é baseada na prestação de serviços e nas atividades ligadas ao agronegócio (Londrina, 2019). Com a concentração de 97% da população na área urbana, o espaço urbano londrinense reflete a atuação dos promotores imobiliários que, nas décadas de 1980 e 1990, motivaram a edificação de bairros residenciais verticalizados próximos à área central e, após os anos 2000, foram estendidos para outras áreas da cidade.

Figura 1 - Localização do município de Londrina e das estações consideradas no diagnóstico e espacialização dos extremos de precipitação.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A área urbana inicial de Londrina foi planejada em Londres pela Companhia de Terras Norte do Paraná sobre um espigão com altitudes que variam de 520 a 610m acima do nível do mar. Ao longo dos anos, o processo de urbanização se estendeu para áreas ao norte e noroeste da cidade sobre um padrão de relevo com formas mais suavizadas, com vertentes menos inclinadas e altitude média entre 550 e 620m; bem como para as áreas ao sul e sudeste, onde ocorre maior dissecação do relevo, com altitudes entre 350 e 500m. A associação das formas das vertentes ao uso do solo urbano produziu sulcos, ravinas e voçorocas em diversas vertentes do município, decorrentes da implantação de vias com cobertura asfáltica que impulsionam o escoamento concentrado das águas pluviais em locais desprovidos de galerias (Ely *et al.*, 2008).

Pelo fato de Londrina estar localizada em uma área de transição climática (Zavatini, 1983) apresenta anos em que predominam as características do tipo climático Cwa -temperado com verão quente e úmido e outros com características do tipo Cfa - temperado sem estação seca com verão quente (Dubreuil *et al.*, 2017).

Em virtude da heterogeneidade espacial e temporal da chuva, compreender as variações espaciais e temporais, intensidade, frequência e duração dos eventos extremos de precipitação em escala regional e local é importante para o desenvolvimento de alternativas mais

apropriadas à mitigação de possíveis danos causados pelos mesmos, principalmente em virtude dos diferentes níveis de vulnerabilidade da sociedade que ocupa os espaços. Estudos desta natureza podem contribuir para subsidiar a atuação de diversos atores nos variados setores das atividades cotidianas, como o gerenciamento de riscos pela Defesa Civil, o planejamento e a gestão urbana. O presente trabalho tem como objetivo analisar a variabilidade espaço-temporal (1977 a 2018) e impactos decorrentes dos extremos de precipitação, partindo da escala regional (Paraná) para a escala local, representada pelo município de Londrina.

Como destacado na revisão bibliográfica apresentada, o norte do Paraná evidencia tendências positivas para as chuvas anuais e para os meses de primavera, verão e inverno, justificando a investigação da possibilidade de aumento da frequência na ocorrência de eventos extremos de precipitação no município objeto deste estudo, onde não são raros os registros de alagamentos na área urbana, mesmo que apresente fundos de vales profundos e encaixados preservados de ocupações. Impactos que demandam por estudos que procuram compreender sua gênese climática e que possam colaborar com o planejamento de ações e de implantação de obras urbanas que estejam em sintonia com a situação climática.

METODOLOGIA

O desenvolvimento do presente trabalho iniciou com a produção de um histórico sobre os eventos pluviométricos extremos ocorridos e analisados em escala local (Londrina – Pr). Apesar do município de Londrina contar com mais de cinco estações meteorológicas e demais postos pluviométricos, o acesso aos dados que são produzidos por diferentes institutos é burocrático e demorado. Diante destas dificuldades, optou-se por trabalhar com as séries de dados climáticos disponibilizadas pelo Instituto de Desenvolvimento Rural (IDR-Paraná), pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pela Agência Nacional de Águas (ANA) que possibilitaram a elaboração da interpolação e espacialização dos dados da escala regional (Paraná) para a escala local (Londrina).

Diante do exposto, optou-se pela produção de um diagnóstico espaço-temporal dos extremos de precipitação na escala do estado do Paraná, onde o município de Londrina está inserido, com a utilização dos dados das precipitações diárias de 305 estações e postos meteorológicos das redes dos referidos institutos que dispõe de dados para o período de 1977 a 2018 e subsidiaram a elaboração dos cálculos dos percentis 90%, 95% e 99%. Esta técnica de ordenação dos valores de uma variável em cem intervalos de probabilidades iguais a $1/100 = 1\%$ (Xavier; Xavier; Alves, 2007) permite identificar tanto os eventos extremos nos limites superiores e inferiores, bem como os intermediários. O presente trabalho foca nos valores extremos

identificados pelos percentis 95% e 99% que, de acordo Goudard, Pinheiro e Mendonça (2015), representam as precipitações mais significativas da série histórica considerada.

Posteriormente foi computada a frequência (número de dias de precipitação) acumulada em classes (quadro 1) para 7 estações, 3 delas localizadas no interior do município de Londrina (do norte em direção ao sul - LdaInmet, Ldalapar e LdaAna – figura 1) e 4 em municípios próximos, possibilitando a espacialização das referidas classes. Os dados destas 4 estações externas aos limites do município de Londrina foram considerados com o objetivo de ampliar os resultados das interpolações, que necessitam de uma maior densidade de pontos de observações para produzir um resultado condizente com a variabilidade espacial do fenômeno pluviométrico.

Quadro1 - Classes e limiares de precipitação.

Classes e parâmetros de precipitação	Limiares
Ligeira	0,1 a 2,4 mm/24h
Moderada	2,5 a 7,4 mm/ 24h
Intensa	7,5 a 14,9 mm/ 24h
Muito Intensa	15 mm/24h até uma unidade a menos que o P95%
Eventos Extremos - Dias muito úmidos	Precipitação (mm) \geq Percentil 95%/24h
Eventos Extremos - Dias extremamente úmidos	Precipitação (mm) \geq Percentil 99%/ 24h

Fonte: Goudard, Pinheiro e Mendonça (2015, p. 210).

Os dados pluviométricos diários das 3 estações localizadas no município de Londrina (figura 1) foram manipulados por meio dos softwares RHtestsV4/RclimDex e ClimPACT, desenvolvidos em linguagem R pela equipe de especialistas em detecção e monitoramento de mudanças climáticas - ETCCDMI – IPCC. A homogeneização dos dados foi realizada com o software RHtestsV4/Rclimdex (Wang; Feng, 2013) visando a detecção de problemas relativos à inconsistência nos dados e depois foram calculados os índices de precipitação baseados na frequência, intensidade e duração dos extremos pluviométricos por meio do ClimPACT; semelhante ao RclimDex (Zhang; Yang, 2004), descritos no quadro 2.

Monteiro e Carvalho (2013, p. 118) destacam que “os índices climáticos geralmente são baseados na utilização isolada de elementos do clima e procuram compreender a variabilidade, os ritmos climáticos e a excepcionalidade de eventos” e o cálculo de tais índices varia, podendo ser classificados em índices climáticos simples ou relativos e índices bioclimáticos. No presente trabalho, após ter sido feito o controle de qualidade dos dados, foram calculados oito índices climáticos simples estabelecidos pelo ETCCDMI – IPCC (Quadro 2).

Quadro 2 - Descrição dos índices utilizados no presente estudo.

Índice	Nome do indicador	Definição	Unidade
PRCPTOT	Acumulado anual das precipitações	Total anual de chuvas acumulado nos dias com chuvas ($P \geq 1\text{mm}$)	mm
R20mm	Número de dias com fortes precipitações	Número anual de dias com $P \geq 20\text{mm}$	dias
Rx1dia	Máximo de chuva acumulado em 1 dia	Máximo de chuva acumulada em 1 dia	mm
Rx5dias	Máximo de chuva acumulado em 5 dias consecutivos	Máximo de chuva acumulada em 5 dias consecutivos	mm
CDD	Dias secos consecutivos	Número máximo de dias consecutivos com $P < 1\text{mm}$	dias
SDII	Índice simples de intensidade diária	Total de chuvas acumulado dividido pelo número de dias com chuva (quando o dia esteve $\geq 1,0\text{mm}$) no ano	mm/dia
R95pTOT	Contribuição dos dias muito úmidos	Porcentagem das chuvas no $P > 95^{\text{th}}$ sobre a precipitação total anual (PRCPTOT)	%
R99pTOT	Contribuição dos dias extremamente úmidos	Porcentagem das chuvas no $P > 99^{\text{th}}$ sobre a precipitação total anual (PRCPTOT)	%

Fonte: Adaptado de Zhang e Yang (2004).

O pacote ClimPACT também permite avaliar as tendências climáticas por meio do cálculo da tendência linear, obtido pelo método dos mínimos quadrados ou *slope estimate*, nível de significância estatística da tendência ou *p-value*, coeficiente de determinação R^2 e erro padrão (*slope error*). Podem ser considerados indícios de possíveis mudanças climáticas os resultados em que o índice apresenta tendência linear (positiva ou negativa) superior ao erro padrão de estimativa e com uma significância com valor de $p < 0,1$. O *p-value* deve ser entre $\geq 0,05$ a $0,1$ para indicar uma significância estatística entre 90 e 95% (boa significância). Valores inferiores a $0,05$ indicam significância estatística superior a 95% (alta significância).

Para o diagnóstico dos impactos decorrentes dos extremos de precipitações em Londrina (PR) foi elaborado um levantamento bibliográfico e produzida uma análise das condições meteorológicas dos episódios de chuvas identificados como mais extremos, ocorridos em 2012 e 2016.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Histórico dos eventos pluviométricos em Londrina

As áreas latitudinais onde ocorre o confronto dos sistemas meteorológicos tropicais (centros de baixas pressões tropicais, jatos de baixos e altos níveis, complexos convectivos de mesoescala, linhas de instabilidade) e extratropicais (frentes frias e anticiclones) motiva uma forte instabilidade atmosférica que produz uma zona de transição climática, onde o município de

Londrina está inserido. Esta dinamicidade atmosférica predominante no norte do Paraná instiga o desenvolvimento de estudos que procuram aprofundar a análise dos eventos pluviométricos extremos.

Pereira *et al.* (2011) caracterizaram a dinâmica atmosférica dos episódios de eventos extremos ocorridos em Londrina no mês de outubro de 2009, quando foi registrado um total pluviométrico mensal de 396,3mm, rajadas de vento e queda de granizo que causaram prejuízos à população; motivando decreto de estado emergência no município. Os autores destacam que o referido evento causou redução na qualidade e na produtividade do trigo e que a ocorrência de eventos similares está associada aos fortes ventos produzidos no transcorrer do outono até a primavera.

Silva, Caramori e Faria (2012) utilizaram dados diários de precipitação para o período de 1961 (INMET) a 2010 (IAPAR/EMATER) para as estações localizadas em Londrina com o objetivo de estimar as máximas pluviométricas por meio da identificação dos eventos extremos diários ocorridos em cada ano da série histórica e identificaram a maior precipitação com volume de 310,73 mm acumulados em 6 dias para um período de retorno de 30 anos e, ao considerar as chuvas extremas precipitadas em um dia, existe a probabilidade de ocorrer precipitações máximas diárias de 79,61 mm para o período de retorno de 2 anos, de 98,69 mm em 5 anos, 116,11 mm em 10 anos, 136,6 mm em 20 anos e 150,22 mm em 30 anos.

Fraga, Silveira e Jayme (2013) produziram uma análise das ameaças sócio naturais geradas pelas chuvas intensas que atingiram a área urbana de Londrina nos anos de 2011 e 2012. Analisaram os totais pluviométricos mensais da estação meteorológica de Londrina pertencente ao INMET, notícias veiculadas em jornais e dados da Defesa Civil do município. E concluíram que a alta concentração de chuvas, aliada a impermeabilização do espaço urbano e a dimensão das galerias pluviais são corresponsáveis pelos acidentes ambientais nos dois anos estudados.

Vacario e Machado (2019) estudaram as transformações urbanas ocorridas na bacia do Ribeirão Cambé, que corta a área urbana de Londrina no sentido Oeste – Sudeste e a relação destas transformações com a ocorrência de inundações e alagamentos. Com base no banco de dados da Defesa Civil do Paraná os autores identificaram pontos de inundações e alagamentos mais frequentes na área urbana de Londrina, sendo que dos dez pontos identificados oito estão localizados na bacia do referido ribeirão, considerando o período de 1990 a 2018. Foi constatado que ao longo das últimas seis décadas, desde a construção da barragem do Lago Igapó 1 e após a década de 1990, houve um aumento nos eventos de inundações e alagamentos na área da referida bacia.

Salton (2019) calculou limiares para a definição dos extremos de precipitação diária e horária em diferentes intervalos (60, 30, 15 e 10 minutos) para o período de 1986 a 2016 em Londrina. De acordo com os percentis 90%, 95% e 99% a autora identificou que as precipitações do percentil 90% são

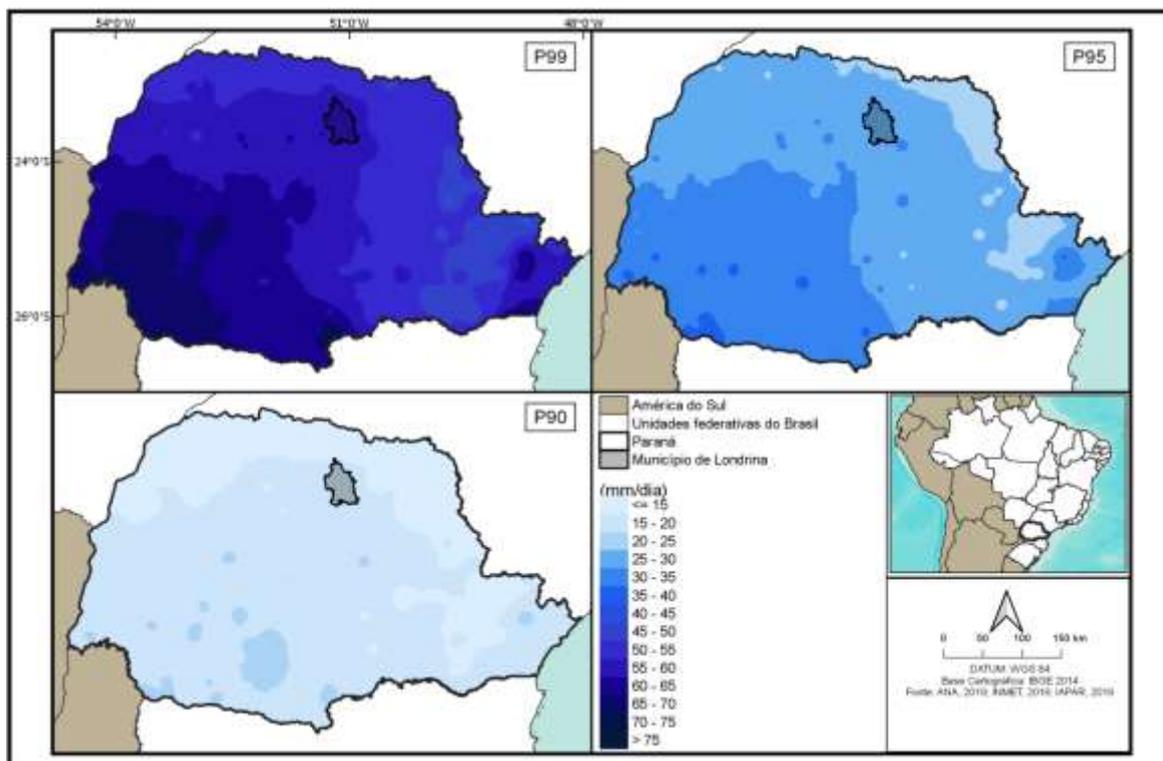
[...] as mais expressivas, tanto para as chuvas diárias (iguais ou superiores a 15,6 mm) quanto para as chuvas horárias (iguais ou superiores a 7,2; 6,7; 5,2 e 4,2 mm para chuvas máximas em 60, 30, 15 e 10 min, respectivamente). Nos meses de verão, as precipitações horárias definidas pelo percentil 99% (iguais ou superiores a 30,1; 24,7; 17,4 e 13,0 mm para chuvas máximas em 60, 30, 15 e 10 min, respectivamente) atingiram frequências superiores em relação às precipitações diárias identificadas pelo mesmo percentil (iguais ou superiores a 56,8 mm) (Salton, 2019, p. 50).

A referida autora destaca que os eventos pluviais extremos diários são mais frequentes em Londrina nos meses de verão, seguidos da primavera, outono e inverno. E por meio da manipulação dos registros dos dados de desastres naturais da Defesa Civil do Paraná verificou que o vendaval é mais recorrente no município, seguido de enxurradas, alagamentos e deslizamentos; também com maior número de ocorrências em outubro e dezembro.

Diagnóstico dos extremos de precipitações

Os extremos das precipitações foram calculados para todo o estado do Paraná considerando os dados das precipitações diárias para o período de 1977 a 2018. Na figura 2 estão representados os valores correspondentes aos percentis 99%, 95% e 90% para o recorte espacial do estado. Em Londrina as precipitações diárias entre 55 e 60mm são classificadas no percentil P99%, as de 25 a 30mm no P95% e aquelas entre 15 a 20mm no P90%; valores que foram detalhados por Salton (2019) que identificou os percentis para intervalos de tempos menores na mesma localidade, como por exemplo, 30,1mm (P99%) para o intervalo de 60 minutos; 24,7mm em 30 minutos; 17,4mm em 15 minutos e 13,0mm para 10 minutos.

Figura 2 - Extremos de precipitação no estado do Paraná calculados por meio dos percentis para o período de 1977 a 2018.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Destaca-se que Londrina tem uma média anual das precipitações de 1632mm (tabela 1), sendo que os meses de verão são os mais chuvosos, principalmente janeiro com média de 223,9 mm. Observa-se redução das médias pluviométricas nos meses de inverno (julho e agosto), mas nestes meses são registradas chuvas concentradas caracterizadas por eventos pluviométricos extremos superiores a 90mm em 24h.

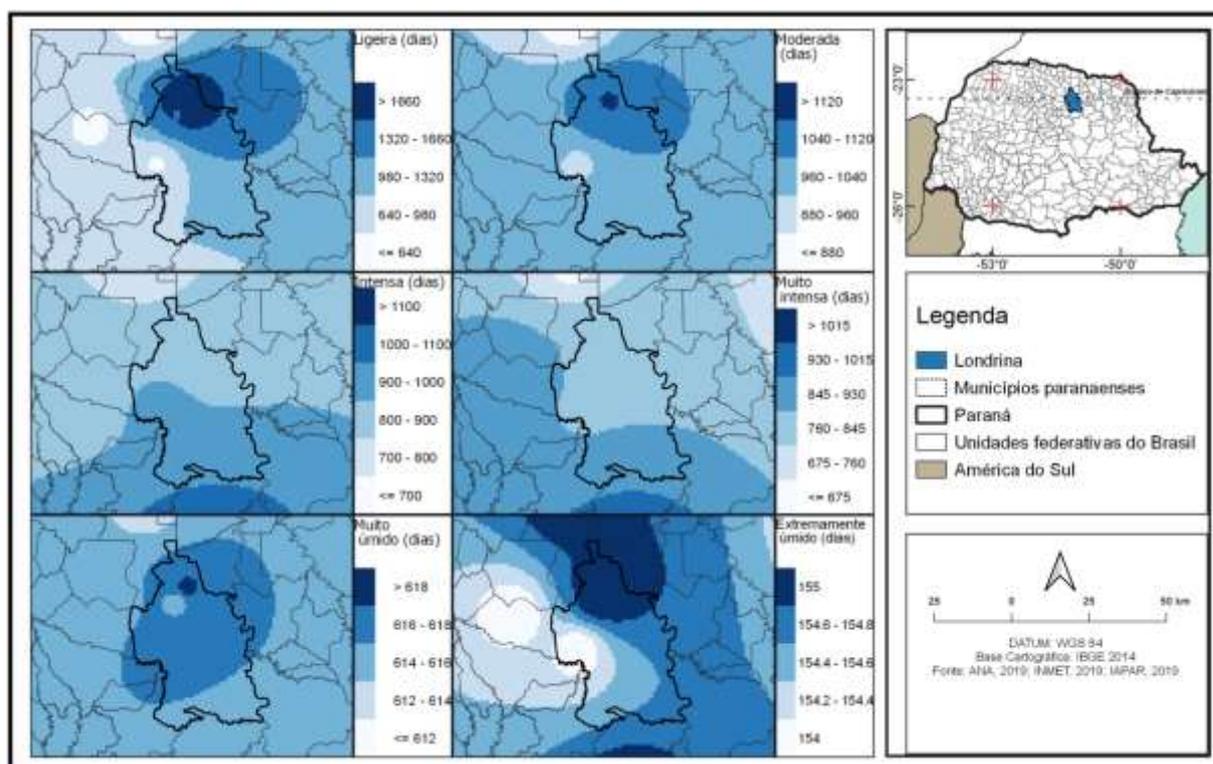
Tabela 1 - Precipitações em Londrina (PR) no período de 1976 a 2019.

	Médias	Máxima 24h	Ano	Dias com chuva
Jan	223,9	232,8	2016	16
Fev	187,1	93,6	1993	14
Mar	137,6	124,6	1992	12
Abr	108,0	151,2	1984	8
Mai	116,6	87,6	2016	8
Jun	94,5	200,5	2012	8
Jul	71,3	91,8	2015	6
Ago	54,1	91,4	2018	6
Set	115,1	82,8	1998	9
Out	152,2	106,4	1994	11
Nov	165,6	142,7	1992	11
Dez	205,8	117,1	1989	14
Média histórica	1632mm			

Fonte: IDR-Paraná (2020).

A frequência dos dias com precipitações acumuladas nas classes estabelecidas no quadro 1 foi espacializada para Londrina na figura 3 e constata-se maior ocorrência de chuvas ligeiras (0,1 a 2,4mm/24h), moderadas (2,5 a 7,4mm/24h), de eventos extremos muito úmidos (de 616 a acima de 618 dias no período analisado) e extremamente úmidos (superiores a 154 dias) no norte do município; onde está localizada a área urbana. Enquanto no sul do município são mais frequentes as chuvas intensas (7,5 a 14,9mm/24h) e muito intensas (superiores a 15mm até uma unidade a menos que o P95%). Esta espacialização está diretamente atrelada à influência dos sistemas produtores dos eventos extremos em Londrina que, segundo Berezuk e Sant'Anna Neto (2006, p. 13) são: a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), intensos sistemas frontais e as instabilidades tropicais.

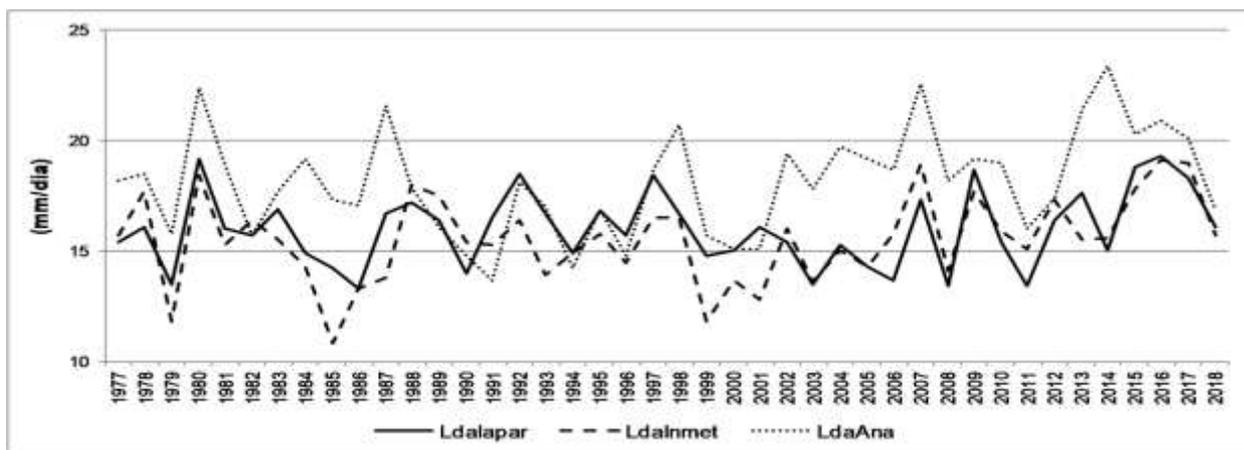
Figura 3 - Frequência acumulada em classes de precipitação em Londrina (PR) no período de 1977 a 2018.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O índice SDII (figura 4) auxilia na verificação da ocorrência de chuvas intensas em Londrina, onde a intensidade diária das precipitações supera os 15mm em 24 anos analisados e em 17 anos ficou abaixo deste limiar. Nos anos de 1980, 1987, 1998, 2007, 2014, 2015, 2016 e 2017 a intensidade diária das precipitações ultrapassou os 20mm na área rural (LdaAna).

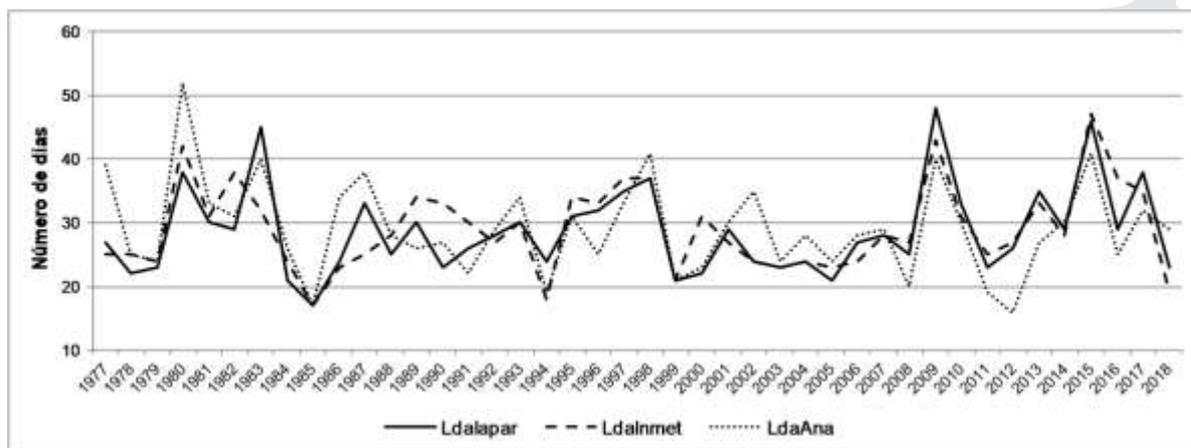
Figura 4 - Índice simples de intensidade diária (SDII) em Londrina (PR) no período de 1977 a 2018.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O índice R20mm computa o número de dias com precipitações superiores a 20mm, ou seja, superior ao P90% calculado para as 3 estações localizadas no município de Londrina (figura 5) e verifica-se que, frequentemente, ocorrem de 20 a 40 dias com precipitações superiores a este limiar. Os anos de 1983, 2009 e 2015 superaram os 40 dias e 1980 registrou mais de 50 dias. Durante a metade dos 41 anos considerados a estação localizada na zona rural (LdaAna) registrou um número maior de dias com fortes precipitações. A zona urbana passou a receber mais chuvas fortes na última década (2008 a 2018).

Figura 5 - Número de dias com fortes precipitações (R20mm) em Londrina (PR) no período de 1977 a 2018.

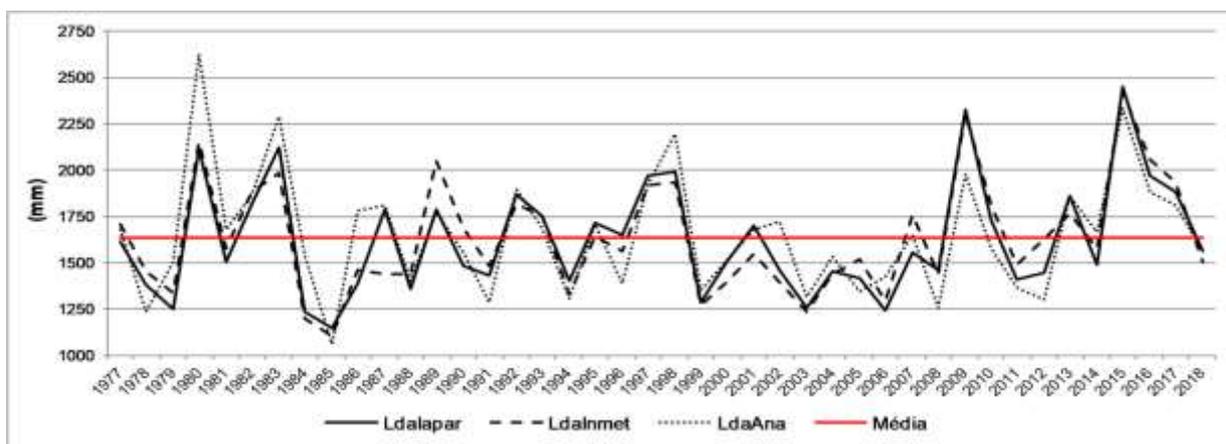


Fonte: Elaborado pelos autores.

A média histórica das precipitações anuais em Londrina é de 1.632mm (figura 6) e foi verificado que a estação rural (LdaAna) registrou maiores acumulados de chuva nos anos de 1980

a 1983 (2.622,9; 1.679,1; 1.868,1 e 2.286,2mm respectivamente), 1986 e 1987 (1.780,4 e 1.812mm), 1992 (1.895,9mm), 1998 (2.197,2mm) e 2002 (1.723,4mm). Após 2004 as estações localizadas na área urbana (LdaIapar e LdaInmet) passaram a computar os maiores acumulados (de 1.450 a mais de 2.000mm nos anos de 2009 e 2015).

Figura 6 - Acumulado anual das precipitações (PRCPTOT) em Londrina (PR) no período de 1977 a 2018.

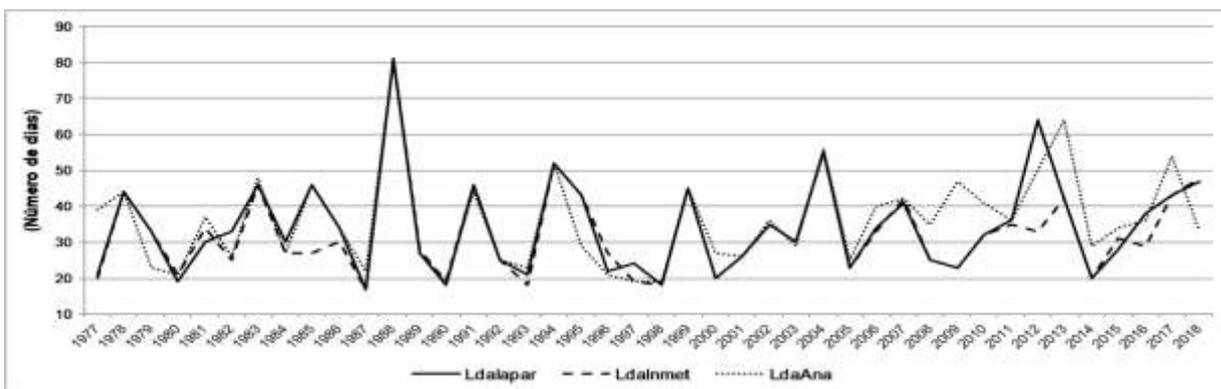


Fonte: Elaborado pelos autores.

De acordo com Ely (2019, p. 88-89) a variabilidade das chuvas no Paraná apresenta uma estrutura temporal organizada em quatro fases: 1) seca entre 1977 e 1981; 2) úmida entre 1982 e 1998; 3) outra fase seca entre 1999 e 2012 e 4) uma fase mais recente que parece se estabelecer como úmida a partir de 2013. Em Londrina os anos extremos de 1980 e 2009 se destacam com precipitações superiores a 2.000mm (figura 6) no interior das fases secas no Paraná.

No município estudado ocorrem períodos de 20 a 40 dias consecutivos secos (figura 7), sem muitas distinções entre as estações localizadas nas áreas urbana e rural. Depois de 2006 passa a ocorrer uma diferenciação, com um número maior de dias consecutivos secos na área rural (LdaAna). O ano de 1988 registrou mais de 80 dias consecutivos sem chuvas.

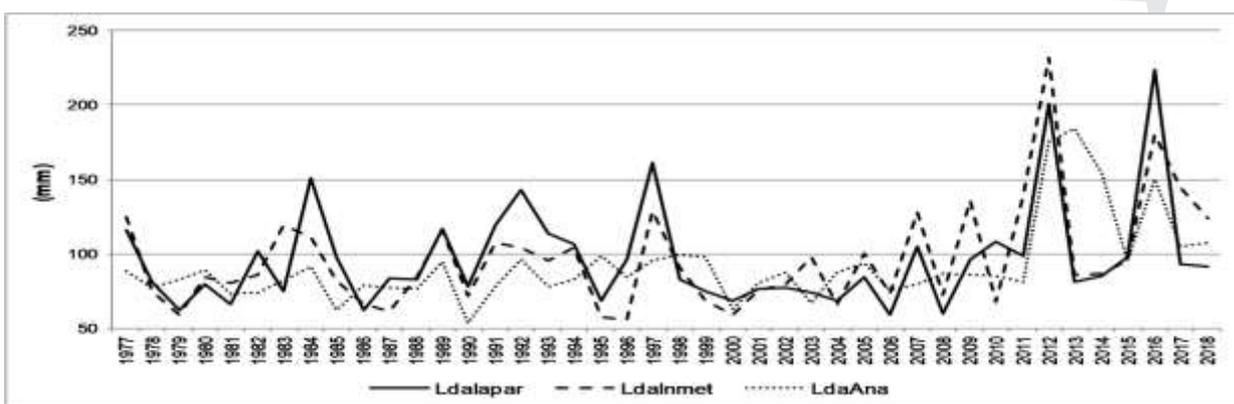
Figura 7 - Número máximo de dias secos consecutivos (CDD) em Londrina (PR) no período de 1977 a 2018.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na figura 8 pode-se constatar que a área urbana de Londrina (LdaIapar e LdaInmet) registrou precipitações diárias extremas superiores a 100mm nos anos de 1977, 1982, 1984, 1985, 1989, 1991 a 1994, 1997, 2007 a 2011; sendo que os anos com os registros mais extremos foram 2012 e 2016, com precipitações diárias superiores a 200mm. A estação localizada na área rural somente passou a registrar chuvas diárias superiores a 100mm após 2012, limiares superiores e mais frequentes que aqueles calculados por Silva, Caramori e Faria (2012) para o tempo de retorno de 30 anos.

Figura 8 - Máximo acumulado de chuva em 1 dia (Rx1dia) em Londrina (PR) no período de 1977 a 2018.

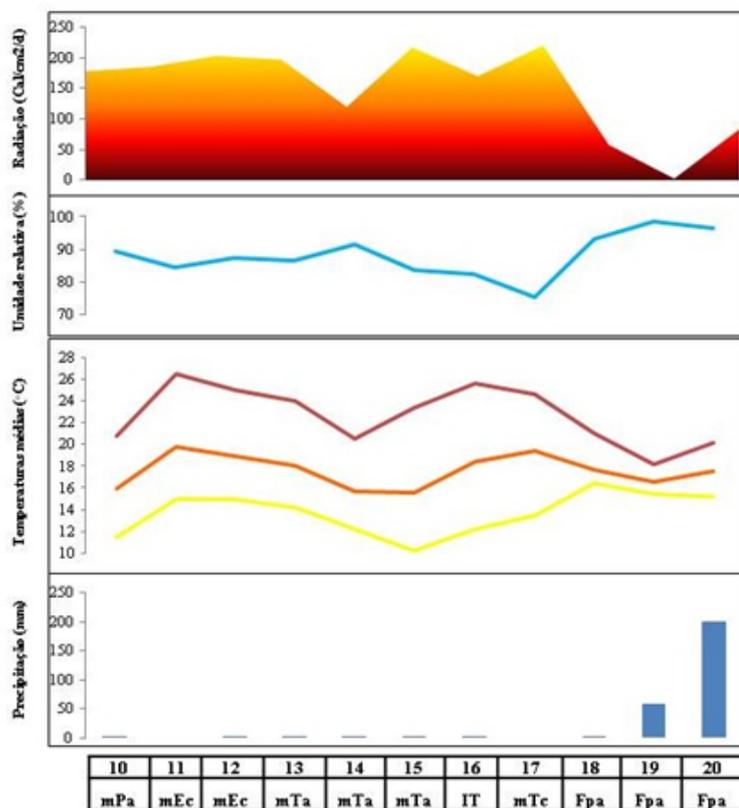


Fonte: Elaborado pelos autores.

Com uma análise mais detalhada dos episódios de chuvas extremas dos anos de 2012 e 2016 (figuras 9 e 10) foi identificado que o primeiro ocorreu em 20 de junho, inverno, quando foram registrados 200,5mm em 24h em Londrina. O solo estava em processo de reposição e

saturação de água com chuvas ligeiras registradas nos dias 10, 12, 13, 14, 15, 16 e 18. A partir deste último dia, com a permanência da Frente Polar Atlântica nas latitudes do município, foram produzidos 260,1mm em três dias, ou seja, 165,6mm superiores à média histórica do mês de junho (94,5mm).

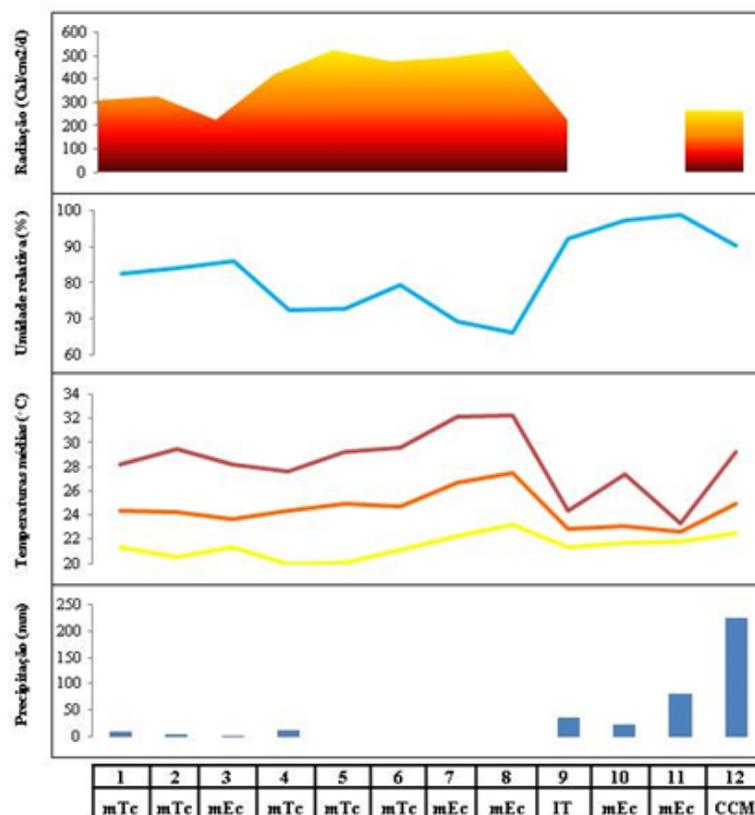
Figura 9 - Condição meteorológica do episódio 20 de junho de 2012.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O episódio de 2016 ocorreu em janeiro num período de domínio da massa Tropical continental, que produz aquecimento da superfície, registrando máximas superiores a 30°C nos dias 6, 7 e 8 (figura 10). Conforme Grimm (2009, p. 268-271), existem duas fontes de vapor d'água disponíveis para o sul do Brasil: o oceano Atlântico e a faixa tropical do continente. No verão os fluxos de vapor d'água tropicais se dirigem para o sul e aportam umidade para dentro do continente, produzindo convecção que se materializa em Instabilidades Tropicais (IT) e Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM's).

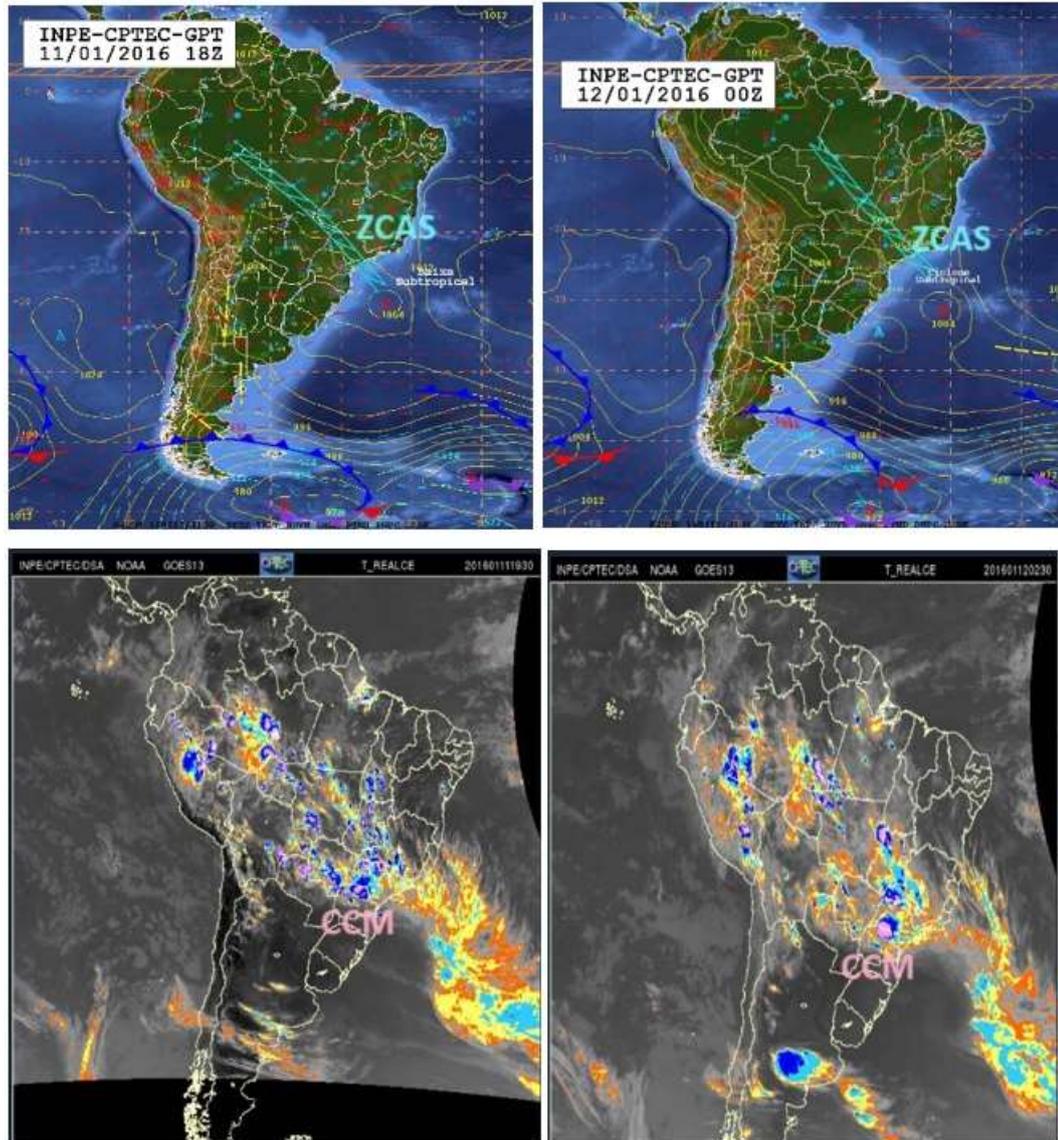
Figura 10 - Condição meteorológica do episódio 12 de janeiro de 2016.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Nos dias 9 e 10 atuaram IT's em Londrina e produziram aumento significativo da umidade relativa do ar (92% e 97,3%) e precipitações (96 e 24mm) (figura 10). Os fluxos tropicais úmidos colaboraram para a continuidade das chuvas no dia 11 (81mm) decorrente da atuação da ZCAS (faixa de nuvens com temperaturas muito baixas com alinhamento noroeste – sudeste), culminando com a atuação de CCM's (figura 11) nos dias 11 e 12 com precipitações de 81 e 223,6mm; sendo que o total acumulado de chuvas nestes 4 dias foi de 364,4mm, 140,5mm superiores à média histórica do mês de janeiro (223,9mm) no município estudado.

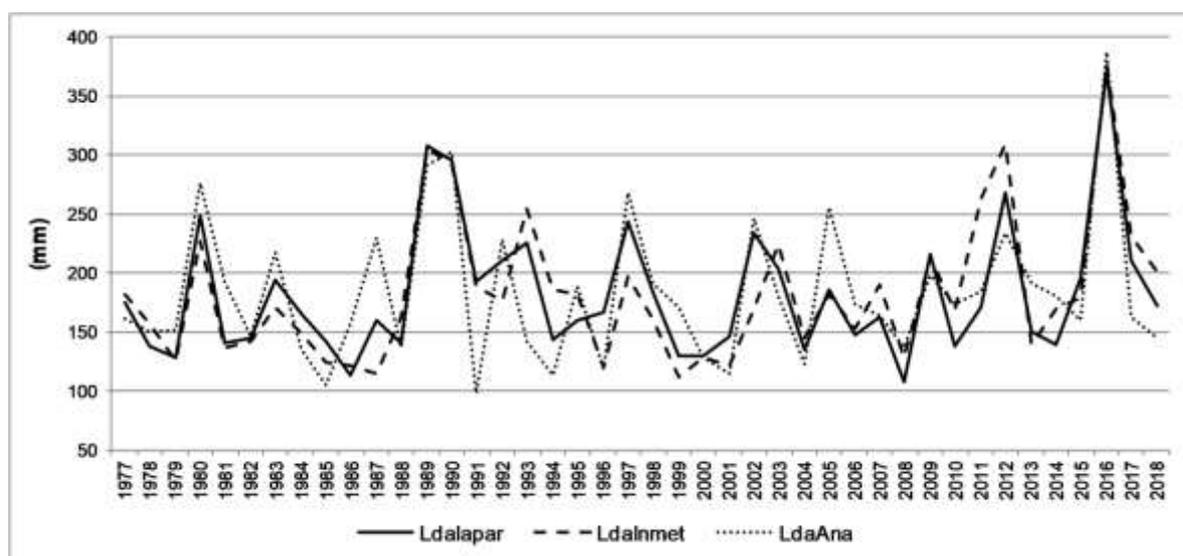
Figura 11 - Sequência das cartas sinóticas e imagens T-realçada do satélite GOES13 do episódio 12 de janeiro de 2016.



Fonte: CPTEC (2023).

Quando se considera o máximo acumulado de chuva em 5 dias consecutivos (figura 12), os valores registrados em Londrina oscilam de 100 a 250mm; demonstrando a frequência maior que aquela identificada por Silva, Caramori e Faria (2012) para o tempo de recorrência de 2, 5, 10 e 20 anos. Nos anos de 1989, 1990, 2012 e 2016 estes acumulados superaram 300mm; com o padrão da área rural acompanhando o da urbana.

Figura 12 - Máximo acumulado de chuva em 5 dias (Rx5dias) em Londrina (PR) no período de 1977 a 2018.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Com relação às tendências climáticas, foi verificado que a porcentagem total das precipitações diárias no P95% e no P99% (tabela 2) apresentam valores positivos nas estações localizadas na área urbana (LdaInmet) e na rural (LdaAna). A estação localizada na área urbana (LdaIapar) registra tendência negativa. Mas os valores, tanto positivos, quanto negativos não são estatisticamente significativos; tais como aqueles identificados por Ely e Fortin (2018, p. 292).

Tabela 2 - Tendências do índice porcentagem total das precipitações diárias no P95% e P99%.

R95pTOT	LdaIapar	LdaInmet	LdaAna
Tendência Linear	-0,165	0,236	0,194
<i>p-value</i>	0,165	0,017	0,09
R99pTOT	LdaIapar	LdaInmet	LdaAna
Tendência Linear	-0,035	0,063	0,136
<i>p-value</i>	0,643	0,271	0,075

Fonte: Elaborado pelos autores.

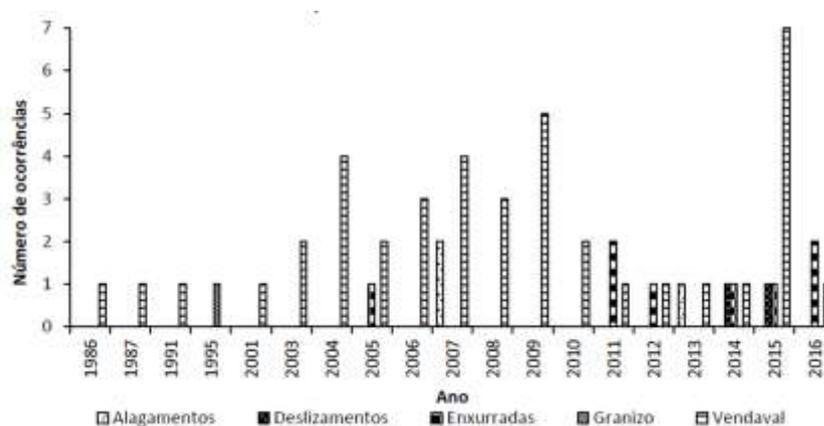
Diagnóstico dos impactos

Barros, Mendes e Castro (2015) organizaram os dados dos eventos registrados pela Defesa Civil do Paraná em Londrina para o período de 1980 a 2012, identificando 39 eventos relacionados às enxurradas, alagamentos, escorregamentos/deslizamentos e vendavais/tempestades. Destes, 33 foram vendavais/tempestades, 3 enxurradas, 2 alagamentos e 1 escorregamento/deslizamento, ou

seja, em 32 anos de dados foi contatada a predominância de impactos derivados de vendavais/tempestades no município.

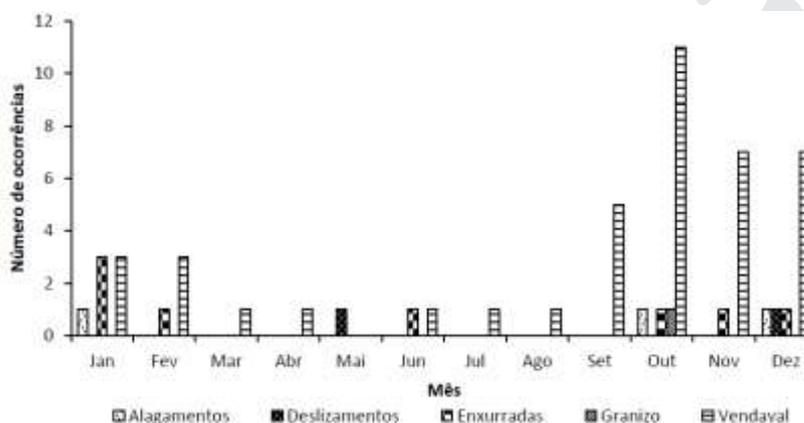
Salton (2019) produziu um levantamento dos desastres naturais registrados em Londrina junto à base de dados da Defesa Civil do Paraná para um período histórico maior, sintetizado nas figuras 13 e 14. Observa-se que a Defesa Civil registra as ocorrências dos vendavais separados das chuvas fortes, destacando-se os anos de 2004 e 2007 com 4 registros de vendavais, assim como 2009 (5 vendavais) e 2015 com 7 eventos; este último também registrou 1 enxurrada e 1 deslizamento (figura 13). O trabalho da referida autora demonstra que os meses de primavera/verão são os que concentram o maior número de desastres naturais em Londrina, sendo que os meses de outubro e dezembro apresentaram maior número de registros (14 e 10 respectivamente) e três diferentes tipos de desastres (figura 14).

Figura 13 - Ocorrências anuais de desastres naturais no município de Londrina (PR).



Fonte: Salton (2019, p.46).

Figura 14 - Ocorrências mensais de desastres naturais no município de Londrina (PR) no período de 1986 a 2016.



Fonte: Salton (2019, p. 47).

Rinaldo (2014) analisou os alagamentos ocorridos em Londrina no período de 2009 a 2011 e verificou que os pontos de alagamentos ocorrem em áreas planas e com falta de bueiros localizados no quadrilátero que compõe o centro histórico da cidade de Londrina, disposto em um espigão com vertentes suavemente inclinadas.

Caldana *et al.* (2019) destacam que ocorreram 8 alagamentos, 8 enxurradas e 2 deslizamentos decorrentes de eventos extremos de precipitação no período de 2000 a 2018 em Londrina, afetando 211.741 pessoas. E acrescentam ainda que o evento de janeiro de 2016 produziu danos a 52.000 pessoas, aproximadamente, que ficaram desabrigadas ou desalojadas em virtude de danos estruturais em suas residências ou foram afetadas devido às interdições nas rodovias e pontes.

Barros, Mendes e Castro (2015) salientam que o evento extremo ocorrido em junho de 2012 em Londrina provocou danificações em pontes e alagamentos em vários pontos da cidade, além do transbordamento do Lago Igapó; prejuízos que se repetiram em 2013.

Vacario e Machado (2019) ressaltam que todo o sistema dos Lagos Igapó (1, 2, 3 e 4) apresenta pontos de assoreamento, pois configura áreas de ocupação recente e com constantes obras de construção civil, concentrando áreas recorrentes de alagamento e inundações no interior da área urbana de Londrina.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da variabilidade espaço temporal dos extremos de precipitações tem se destacado nos trabalhos de Climatologia devido à severidade dos impactos que geram, principalmente, em áreas urbanas das cidades inseridas no contexto de países em desenvolvimento que demandam ações locais voltadas à sua mitigação; demonstrando a importância da temática tratada no presente trabalho.

A metodologia empregada permitiu estabelecer os limiares dos extremos das precipitações diárias tanto na escala do Paraná quanto na escala de Londrina (P90 de 15 a 20mm; P95 de 25 a 30mm e P99 de 55 a 60mm) e constatar que a área urbana do município é frequentemente atingida por chuvas ligeiras, moderadas e por eventos extremos úmidos e muito úmidos. Também foi verificado que a intensidade diária das precipitações ocorre acima do P90 na maioria dos anos analisados, que ocorrem de 20 a 40 dias com chuvas superiores a este limiar, mas as precipitações diárias acima do P99 também são frequentes no município. Na última década foi registrado aumento na frequência de chuvas fortes (R20mm) sobre a área urbana e um maior acumulado das chuvas anuais, as precipitações diárias (Rx1dia) superiores a 100mm têm sido mais frequentes, destacando-se os anos de 2012 e 2016, que também despontam com o máximo acumulado de chuvas em 5 dias (Rx5dias) superiores a 300mm.

O cálculo dos índices do ITCCDMI – IPCC para Londrina permitiu concluir que, mesmo a área urbana concentrando os resultados da variabilidade dos extremos de precipitações, os impactos mais frequentes derivam das chuvas fortes associadas aos vendavais no período da primavera e verão, mais especificamente nos meses de outubro e dezembro.

A análise dos dados da Defesa Civil do Paraná elaborada pelos autores citados registra apenas 3 alagamentos em 33 anos em Londrina, enquanto aquela oriunda de fontes jornalísticas possibilitou a identificação de pontos de alagamentos no quadrilátero central e pontos de inundações na área urbana da bacia do Ribeirão Cambé.

A área urbana do município é cortada por 84 cursos d'água de diferentes dimensões, com fundos de vales mais encaixados e com vertentes suavemente inclinadas, ocupadas com vegetação preservada, pois a legislação ambiental associada às ações das administrações municipais contribui para a preservação dos fundos de vale dos processos de ocupação; aspectos que colaboram para uma baixa frequência na ocorrência de alagamentos e inundações.

De forma geral, as precipitações extremas têm contribuído para o aumento dos totais anuais e não para a frequência dos dias chuvosos; lembrando que são frequentes de 20 a 40 dias consecutivos secos no município. A maior frequência na ocorrência de precipitações extremas associada à impermeabilização do solo e um sistema deficiente de drenagem urbana constituem agravantes das situações de riscos ambientais. A busca por soluções está circunscrita à competência municipal, diretamente atrelada às diretrizes de uso e ocupação do solo que precisam considerar a intensidade e a disseminação dos problemas socioambientais urbanos levantados por este trabalho, que ressalta a deficiência de ações da administração pública no planejamento e implementação de serviços de manutenção e de limpeza de bueiros, das tubulações das galerias pluviais, de obras de engenharia para a mitigação de erosões e assoreamento e demais intervenções de controle e fiscalização do uso e da ocupação do espaço urbano.

No contexto do presente trabalho ainda vale destacar a necessidade do desenvolvimento de pesquisas que atualizem a análise do clima urbano de Londrina, pois os processos geradores da concentração de calor, aquecimento e convecção típicos das áreas urbanizadas pode estar impulsionando a ocorrência dos extremos de precipitação.

AGREDECIMENTOS

Itaipu Binacional e Parque Tecnológico Itaipu (PTI).

REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **HIDROWEB**. Disponível em: www.ana.gov.br. Acesso em: 11 jan. 2019.

BARROS, Mirian V. F.; MENDES, Crislaine; CASTRO, Paulo H. M. de. Vulnerabilidade socioambiental à inundação na área urbana de Londrina – PR. **Confinos**, São Paulo, SP, n. 24, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4000/confinos.10228>

BARROS, Vicente. Introduction. *In*: BARROS, Vicente; CLARKE, Robin; SILVA DIAS, Pedro (ed.). **Climate change in the La Plata Basin**. Montevideo: Inter-American Institute for Global Change, 2010. p. 8-15.

BEREZUK, André G.; SANT'ANNA NETO, João L. Eventos climáticos extremos no oeste paulista e norte do Paraná, nos anos de 1997, 1998 e 2001. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 2, p. 9 - 22, 2006.

CALDANA, Nathan F. da S.; MARTELÓCIO, Alan C.; RUDKE, Anderson P.; NITSCHKE, Pablo. Eventos extremos e variabilidade pluviométrica em Londrina – PR: estudo de caso das chuvas de 11 de janeiro de 2016. **Geografia em Questão**, Marechal Cândido Rondon, PR, v. 12, n. 2, p. 9 – 27, 2019.

CPTEC - CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. Disponível em: www.cptec.inpe.br. Acesso em: 12 out. 2023.

DUBREUIL, Vicent; FANTE, Karime P.; PLANCHON, Olivier; SANT'ANNA NETO, João L. Les types de climats annuels au Brésil: une application de la classification de Köppen de 1961 à 2015. **EchoGéo**, Aubervilliers, FR, v. 41, 2017. DOI: 10.4000/echogeo.15017

ELY, Deyse F. Padrões espaciais das tendências das precipitações sazonais e mensais no estado do Paraná - Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 25, p. 83 - 105, 2019. Edição Especial. <https://doi.org/10.5380/abclima.v0i0.66375>

ELY, Deyse F.; BARROS, Mirian V. F.; ARCHELA, Rosely S.; BARROS, Omar N. F.; MELLO, N. A. de; GRATÃO, Lúcia H. B. Feições morfológicas. *In*: BARROS, Mirian V. F.; ARCHELA, Rosely S.; BARROS, Omar N. F.; GRATÃO, Lúcia H. B.; THÉRY, Hervé; MELLO, Neil A. de. **Atlas ambiental da cidade de Londrina**. Londrina: UEL, 2008. Disponível em: <http://www.uel.br/revistas/atlasambiental/>

ELY, Deyse F.; DUBREUIL, Vicent, Análise das tendências espaço-temporais das precipitações anuais para o estado do Paraná Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 21, p. 553-569, 2017.

ELY, Deyse F.; FORTIN, Gilles. Analyse des tendances de la pluviométrie dans le nord-est de l'état du Paraná, Brésil. *In*: COLLOQUE DE L'ASSOCIATION INTERNATIONALE DE CLIMATOLOGIE, 31., Nice, FR. **Actes [...]**. Nice: AFC, 2018. p. 288 – 293.

FRAGA, Nilson C.; SILVEIRA, Heitor M. da; JAYME, Nabi S. Acidentes sócio-naturais extremos em Londrina, PR: uma análise dos impactos frente ao planejamento urbano, nos anos de 2011 e 2012. *In*: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE INVESTIGAÇÕES SOBRE

VULNERABILIDADE DOS DESASTRES SOCIONATURAIS – SIIVDS, 2013, Florianópolis, SC. **Anais** [...]. Florianópolis: UFSC, 2013. p. 1 – 5.

GOUDARD, Gabriela. **Eventos pluviiais extremos e riscos hidrometeorológicos híbridos na Bacia do Alto Iguaçu (Paraná)**. 2019. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

GOUDARD, Gabriela; PINHEIRO, Gabriela M.; MENDONÇA, Francisco de Assis. Variabilidade pluvial e eventos extremos em Curitiba (PR). **Revista Equador**, Teresina, PI, v. 4, p. 1096 – 1104, 2015.

GRIMM, Alice M. Clima da região sul do Brasil. *In*: CAVALCANTI, Iracema; FERREIRA, Nelson J.; DIAS, Maria Assunção F.; JUSTI, Maria Gertrudes A. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2009. p. 3259 – 275.

HAYLOCK, Malcolm R.; PETERSON, Thomas C.; ALVES, Lincoln M.; AMBRIZZI, Tercio; ANUNCIACÃO, Yumiko M. T.; BAEZ, John; VINCENT, Lucie A. Trends in total and extreme South American rainfall 1960–2000 and links with sea surface temperature. **Journal of Climate**, Washington, v. 19, n. 8, p. 1490–1512, 2006.

IDR-Paraná. Instituto de Desenvolvimento Rural Do Paraná. IAPAR-EMATER. **Monitoramento de médias históricas**. Disponível em: http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Londrina.htm. Acesso em: 5 nov. 2020.

LONDRINA. Prefeitura Municipal. **Perfil de Londrina**. Londrina, PR: Prefeitura Municipal, 2019.

MARENGO, José A.; JONES, Rob; ALVES, Lincoln M., VALVERDE, María C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, Chichester, GB, v. 29, n. 15, p. 2241-2255, 2009. DOI: 10.1002/joc.1863

MINUZZI, Rosandro B.; CARAMORI, Paulo H. Variabilidade climática sazonal e anual da chuva e veranicos no Estado do Paraná. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 58, n. 5, p. 593-602, 2011.

MONTEIRO, Ana; CARVALHO, Vânia. Uma abordagem metodológica para avaliação de eventos climáticos extremos. *In*: TRINDADE, Marly C. de C.; SANT'ANNA NETO, João L.; MONTEIRO, Ana (org.). **Climatologia urbana e regional: questões teóricas e estudos de caso**. São Paulo: Outras Expressões, 2013. p. 117-142.

PEREIRA, Livia M. P.; COSTA, Ângela B. F.; CARAMORI, Paulo H.; GALDINO, Jonas; RICCE, Wilian da S.; BORROZZINO, Edmirson. Caracterização da dinâmica atmosférica e episódios de eventos extremos ocorridos em outubro de 2009 em Londrina – PR. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 17., 2011, Guarapari, ES. **Anais** [...]. Guarapari, ES: Incaper, 2011., 2011. p. 1-5.

RINALDO, Sandra A. M. **Alagamento urbano no centro histórico de Londrina – PR: nos anos de 2009, 2010 e 2011**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) – Universidade Estadual de Londrina, 2014.

SALTON, Flávia G. **Ocorrência de eventos extremos de precipitação em Londrina (PR): uma análise a partir dos impactos**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Geografia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

SILVA, Glauco M. F. da; CARAMORI, Paulo H.; FARIA, Rogério T. de Precipitações pluviais extremas em Londrina – PR. **Revista Geografar**, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 153 – 173, 2012.

VACARIO, Ester P. L.; MACHADO, Gilnei. Inundações urbanas em Londrina PR: um estudo de caso da bacia do ribeirão Cambé. **Geografia em Questão**, Marechal Cândido Rondon, PR, v. 12, n. 1, p. 120 – 141, 2019.

WANG, Xiaolan L.; FENG, Yang. **RHtestsv4: user manual**. Toronto: Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology Directorate, Science and Technology Branch Environment Canadá, 2013.

XAVIER, Terezinha M. B S.; XAVIER, Airton F. S.; ALVES, José M. B. **Quantis e eventos extremos: aplicações em ciências da terra e ambientais**. Fortaleza: RDS Editora, 2007.

ZANDONADI, Leandro; ACQUAOTTA, Fiorella; FRATIANNI, Simona; ZAVATTINI, João Afonso. Changes in precipitation extremes in Brazil (Paraná River basin). **Theoretical and Applied Climatology**, Viena, p. 741-756, 2016. DOI: 10.1007/s00704-015- 1391-4

ZAVATINI, João Afonso. **Variações do ritmo pluvial no oeste de São Paulo e norte do Paraná: eixo Araçatuba – Presidente Prudente – Londrina**. 1983. Tese (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, SP, São Paulo.

ZHANG, Xuebin; YANG, Feng. **RClimDex (1.0): user guide**. Toronto: Climate Research Branch, Environment Canada, 2004.

ZILLI, Marcia T.; CARVALHO, Leila M. V.; LIEBMANN, Brant; SILVA DIAS, Maria Assunção F. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. **International Journal of Climatology**, Chichester, GB, v. 37, p. 2269 – 2279, 2017. DOI: 10.1002/joc.4840

Recebido em: 28 de julho de 2023

Aceito em: 11 de outubro de 2023