





DETERMINAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE INTENSIDADE - DURAÇÃO-FREQUÊNCIA DAS CHUVAS NO BAIXO CURSO DA BACIA DO RIO PARDO, ESTADO DE SÃO PAULO

DETERMINING INTENSITY-DURATION-FREQUENCY RAINFALL EQUATIONS IN THE LOWER COURSE OF THE RIO PARDO BASIN, SÃO PAULO STATE

DETERMINACIÓN DE LAS ECUACIONES DE INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA DE LAS LLUVIAS EN EL CURSO BAJO DE LA CUENCA DEL RÍO PARDO, ESTADO DE SÃO PAULO

// RESUMO

AUTOR

¹ Julio Cesar Demarchi 
¹ Maria Cristina Perusi 
¹ Edinéia Aparecida dos Santos Galvanin 
¹ Edson Luís Piroli 

FILIAÇÃO INSTITUCIONAL

¹ UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

E-MAIL

JULIO.DEMARCHI@UNESP.BR
CRISTINA.PERUSI@UNESP.BR
EDINEIA.GALVANIN@UNESP.BR
EDSON.PIROLI@UNESP.BR

DATA DE SUBMISSÃO: 22/10/24

DATA DE APROVAÇÃO: 06/04/26

DOI: 10.12957/GEOUERJ.2026.87837



E-ISSN 1981-9021

ESTE É UM ARTIGO DE ACESSO ABERTO
DISTRIBUÍDO SOB OS TERMOS DA LICENÇA
CREATIVECOMMONS BY-NC-SA 4.0, QUE
PERMITE USO, DISTRIBUIÇÃO E REPRODUÇÃO
PARA FINS NÃO COMERCIAIS, COM A CITAÇÃO
DOS AUTORES E DA FONTE ORIGINAL E SOB A
MESMA LICENÇA.

O estudo da relação entre a intensidade, a duração e a frequência das chuvas dos municípios ou bacias hidrográficas é essencial no dimensionamento de obras hidráulicas, de forma a evitar as inundações. O objetivo deste trabalho foi determinar as equações de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) dos postos pluviométricos do baixo curso da bacia do Rio Pardo, centro-oeste do estado de São Paulo, a partir de dados pluviométricos máximos diários de séries anuais, e analisar a distribuição espacial das chuvas intensas estimadas pelas equações. Os dados foram ajustados à distribuição de probabilidades de Gumbel. As precipitações teóricas (PT) de Gumbel diárias foram desagregadas em chuvas de menor duração pelo método das relações de durações, e os coeficientes “a”, “b”, “c” e “d” foram obtidos pela linearização da equação por meio de funções logarítmicas. As equações obtidas tiveram ótima qualidade de ajuste em relação às PT de Gumbel, atestada pelos parâmetros de avaliação utilizados, todos com valores superiores a 0,99. Para eventos de mesma duração e período de retorno, os postos pluviométricos “Águas de Santa Bárbara”, “Domélia”, “Fazenda São Luiz”, “Fazenda Palmeiras” e “Santa Cruz do Rio Pardo” apresentaram chuvas de maior intensidade, estimadas pelas equações IDF.

Palavras-chave: chuvas intensas; curva IDF; desagregação de chuvas. distribuição de Gumbel; hidrologia estatística.

// ABSTRACT

The study of the relationship among the intensity, duration, and frequency of rainfall in municipalities or watersheds is crucial for designing hydraulic structures to prevent flooding. This study aimed to determine Intensity-Duration-Frequency (IDF) equations for rainfall stations in the lower course of the Rio Pardo basin, located in the central-west region of São Paulo state, using maximum daily rainfall data from annual series. Additionally, the spatial distribution of rainstorms estimated by these equations was analyzed. The data were fitted to the Gumbel probability distribution. Gumbel theoretical daily precipitations (TP) were disaggregated into shorter duration rains using duration relationships, and coefficients "a", "b", "c", and "d" were obtained by linearizing the equation through logarithmic functions. The resulting equations showed excellent fit quality relative to Gumbel TP, as indicated by evaluation parameters, all exceeding 0.99. For rainfall events of same duration and return period, rainfall stations "Águas de Santa Bárbara", "Domélia", "Fazenda São Luiz", "Fazenda Palmeiras", and "Santa Cruz do Rio Pardo" exhibited higher intensity rains estimated by the IDF equations.

Keywords: intense rains; IDF curve. rainfall disaggregation; Gumbel distribution; statistical hydrology.

// RESUMEN

El estudio de la relación entre la intensidad, duración y frecuencia de las lluvias en municipios o cuencas hidrográficas es fundamental para el diseño de obras hidráulicas que prevengan inundaciones. El objetivo de este trabajo fue determinar las ecuaciones de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de las estaciones pluviométricas en el curso bajo de la cuenca del río Pardo, en el centro-oeste del estado de São Paulo, utilizando datos máximos diarios de precipitación de series anuales, y analizar la distribución espacial de las lluvias intensas estimadas por dichas ecuaciones. Los datos se ajustaron a la distribución de probabilidades de Gumbel. Las precipitaciones teóricas (PT) de Gumbel diarias se desagregaron en lluvias de menor duración mediante el método de relaciones de duración, y los coeficientes "a", "b", "c" y "d" se obtuvieron mediante la linealización de la ecuación a través de funciones logarítmicas. Las ecuaciones obtenidas mostraron una excelente calidad de ajuste en relación con las PT de Gumbel, según los parámetros de evaluación utilizados, todos con valores superiores a 0,99. Para eventos de igual duración y período de retorno, las estaciones pluviométricas "Águas de Santa Bárbara", "Domélia", "Fazenda São Luiz", "Fazenda Palmeiras" y "Santa Cruz do Rio Pardo" presentaron lluvias de mayor intensidad estimadas por las ecuaciones IDF.

Palabra Clave: lluvias intensas. curvas IDF; desagregación de lluvias; distribución de Gumbel; hidrología estadística.

INTRODUÇÃO

As precipitações máximas são eventos extremos com duração e distribuição espacial e temporal críticas que podem intensificar a erosão do solo, inundações e os danos resultantes, entre outros prejuízos. Determinar a intensidade, duração e frequência ou período de retorno dessas precipitações é essencial para projetar sistemas de drenagem e outras infraestruturas. Como a disponibilidade de longas séries pluviométricas é, em geral, muito mais frequente que a de vazão, o estudo das precipitações máximas é um caminho possível para se conhecer a vazão de enchente de uma bacia ou uma cheia de projeto, a maior enchente para a qual uma obra deve ser projetada (BERTONI; TUCCI, 2007).

Nesse contexto, o estudo das precipitações máximas é realizado por meio das curvas e equações IDF, que relacionam as grandezas intensidade, duração e frequência das chuvas. A partir de dados pluviográficos, as chuvas são discretizadas em durações menores. Para cada duração, são obtidos os índices pluviométricos máximos anuais, e ajustada uma distribuição estatística, a partir da qual se obtém a probabilidade de excedência ou período de retorno, e se constroem as curvas IDF. As equações IDF sintetizam os feixes de curvas IDF (BERTONI; TUCCI, 2007). Devido à escassez de dados pluviográficos no Brasil, métodos de desagregação de registros pluviométricos foram desenvolvidos para estudar a relação entre intensidade, duração e frequência em locais com dados limitados (CAMINHA; SOUZA; OLIVEIRA, 2020).

As principais distribuições de probabilidade utilizadas em Hidrologia para ajustar séries de valores máximos de precipitação e vazão são: a distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV), a de Extremos de Fréchet ou Log-Gumbel, a Log-Normal, a Gama com dois ou três parâmetros, e a Assintótica de Valores Extremos do tipo I ou distribuição de Gumbel (MELLO; SILVA; BESKOW, 2020). Pesquisadores como Damé *et al.* (2014), Brito e Kellner (2016), Penner e Lima (2016), Pereira, Duarte e Sarmento (2017), Cruz *et al.* (2019), Caminha, Souza e Oliveira (2020) obtiveram ajustes estatisticamente significativos com a distribuição de Gumbel para equações IDF. A distribuição de Gumbel é a mais utilizada na análise de frequência de variáveis hidrológicas e apresenta a vantagem de não necessitar de tabelas de probabilidade, pois o ajuste dos dados é realizado apenas a partir da média e do desvio padrão da série de precipitações máximas diárias anuais (PEREIRA; DUARTE; SARMENTO, 2017).

Diversos métodos podem ser utilizados no ajuste das equações IDF. Penner e Lima (2016) compararam quatro métodos: (1) linearização da equação IDF para chuvas de medição diária por pluviômetros, desagregadas em chuvas de 24 horas de duração, (2) desagregação em chuvas de menores durações, (3) regressão não-linear pelo método de Gauss-Newton e (4) aplicação do método “ln ln”,

proposto por Martinez Júnior e Magni (1999). O método 3 foi o mais eficiente, seguido dos métodos 2 e 1. O método 4 foi considerado inadequado para o estado de São Paulo (DAEE-CTH, 2018).

Pereira, Duarte e Sarmiento (2017) e Caminha, Souza e Oliveira (2020) utilizaram o método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), disponível na ferramenta iterativa “Solver”, no software Microsoft Excel®, para ajustar os coeficientes da equação IDF. Cruz *et al.* (2019) produziram equações IDF a partir de séries de dados pluviométricos diários derivados de satélite e disponibilizados pela ferramenta CMORPH (*Climate Prediction Center Morphing Technique*) em três estações sintéticas distribuídas latitudinalmente sobre o município de Altamira (PA). Eles encontraram coeficientes de ajuste satisfatórios, demonstrando que o uso de dados de satélite é viável em locais com escassez de dados ou que não possuem séries históricas longas.

O estudo das precipitações máximas ganha ainda mais importância nos tempos atuais, com as mudanças climáticas e de seus efeitos hidrológicos, ambientais e sociais. Artaxo (2000) destacou que além do aumento das temperaturas, as mudanças climáticas podem alterar a dinâmica da precipitação e da circulação atmosférica, aumentando os eventos climáticos extremos em frequência e intensidade e elevando o nível do mar.

Debortoli *et al.* (2017) elaboraram índices de vulnerabilidade à ocorrência de inundações e de deslizamentos de terra no Brasil para o período 2011-2100, utilizando variáveis climáticas, ambientais e socioeconômicas, com cenários futuros de extremos climáticos derivados do cenário RCP/AR5 8.5 do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Os resultados mostraram um aumento na vulnerabilidade às inundações na região centro-sul do país, especialmente na região Sul e no sul do Mato Grosso do Sul, além do Rio de Janeiro, sul de Minas Gerais e estado de São Paulo, com menor crescimento, mas com destaque para as regiões de Campinas e de Botucatu, onde estão as principais nascentes do Rio Pardo, objeto de estudo deste trabalho.

O aumento das temperaturas médias no estado de São Paulo nos últimos cem anos foi de 1,92°C (ARTAXO, 2020). Esse aumento levou Pilan, Nakayama e Mendes (2015) a identificar um aumento nos índices pluviométricos médios na série de dados pós-1980 no período chuvoso, em comparação com os dados pré-1980, nos postos pluviométricos Sarutaiá e Ribeirão Bonito, no interior de São Paulo, e no observatório IAG/USP, na capital São Paulo. No período seco, constatou-se o aumento da precipitação média nestes dois postos pluviométricos do interior, além das regiões de Campos do Jordão, Franca e Olímpia, resultados variáveis de acordo com o teste estatístico utilizado.

O baixo curso da bacia do Rio Pardo apresenta baixa cobertura pluviométrica e pluviográfica, e ausência de equações de chuvas intensas. Apenas o município de Salto Grande, onde encontra-se a foz do Rio Pardo, possui equação IDF publicada pelo DAEE-CTH (2018). A área deste trecho da bacia compreende apenas sete postos pluviométricos com série de dados adequadas para este tipo de estudo

hidrológico. A maioria dos postos pluviométricos da área de estudo e áreas adjacentes apresentou tendência de aumento da precipitação máxima diária anual ao longo da série histórica, o que pode constituir um indicativo de intensificação deste tipo de evento climático extremo. Além disso, os municípios que integram o baixo curso da bacia do Rio Pardo tiveram crescimento populacional médio de 5,27 % no período 2010-2022, segundo os Censos Demográficos dos respectivos anos (IBGE, 2010; IBGE, 2022). Esse aumento populacional traz consigo mudanças no uso da terra, aumento da impermeabilização do solo, mudanças no ciclo hidrológico e crescimento da pressão sobre os sistemas de drenagem e sobre os cursos d'água. Portanto, conhecer a dinâmica, a distribuição espacial e a relação entre a intensidade, a duração e a frequência das chuvas máximas da sub-bacia é fundamental para o dimensionamento dos sistemas de macro e microdrenagem, de outras obras hidráulicas, e para o planejamento da ocupação urbana e agrícola.

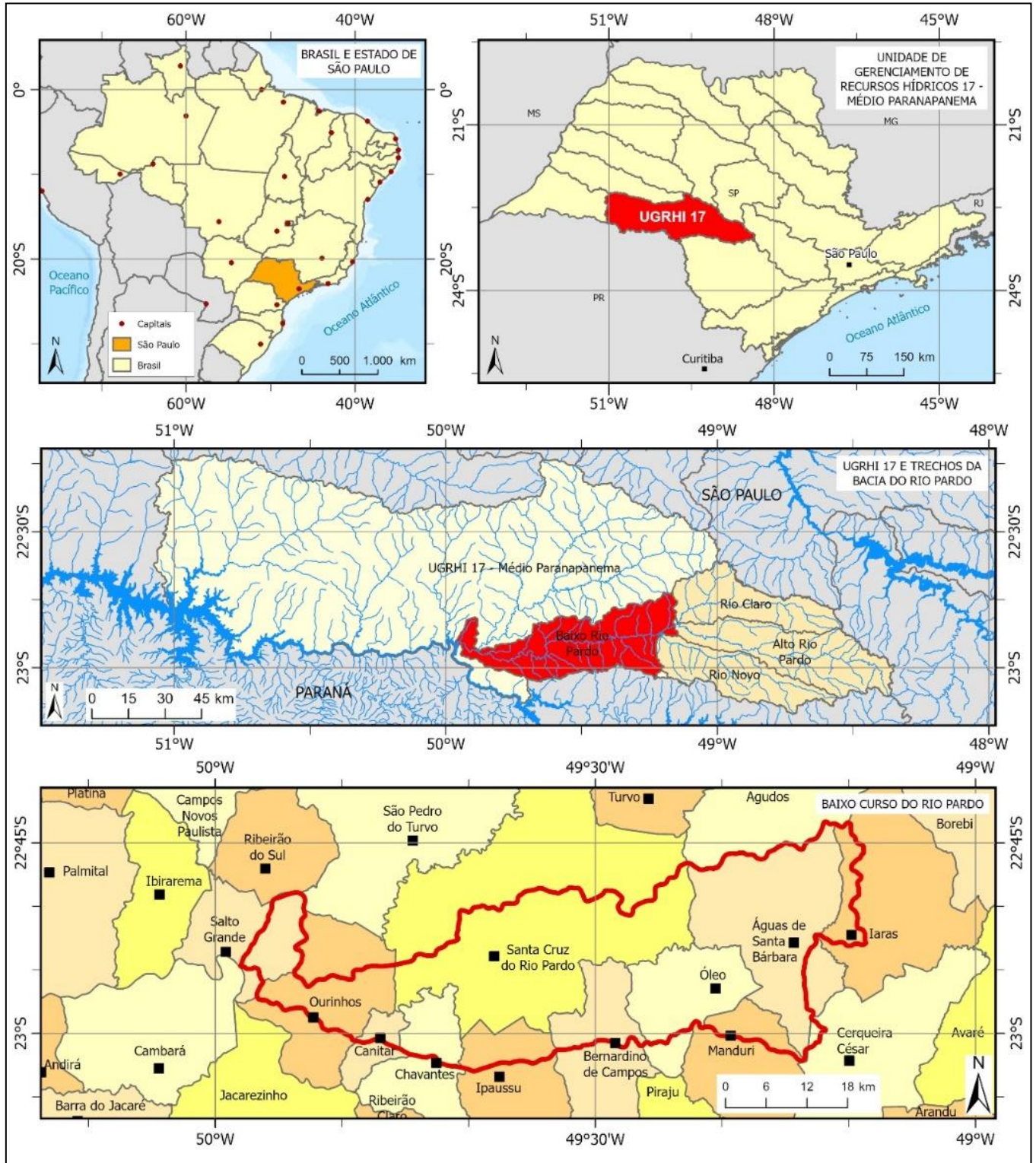
Nesse contexto, o objetivo deste estudo é elaborar as equações Intensidade-Duração-Frequência (IDF) dos postos pluviométricos do baixo curso da bacia do Rio Pardo, localizada no centro-oeste do estado de São Paulo, a partir das precipitações máximas diárias obtidas das séries anuais, e mapear as chuvas intensas em diferentes intensidades, durações e períodos de retorno.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização geográfica da área de estudo

O baixo curso da bacia do Rio Pardo localiza-se no centro-oeste do estado de São Paulo (Figura 1). A área total é de 1.577,85 km², em catorze municípios, entre eles Águas de Santa Bárbara, Bernardino de Campos, Canitar, Chavantes, Iaras, Manduri, Óleo, Ourinhos e Santa Cruz do Rio Pardo, cujos perímetros urbanos encontram-se total ou parcialmente no território da bacia. As altitudes mínima e máxima são de 379 m e 758 m, respectivamente, e declividade média de 6,95 %, o que favorece a ocupação e a mecanização agrícola. Em conjunto com o alto curso e as sub-bacias dos Rios Claro e Novo, forma a bacia do Rio Pardo, com área total de 4.801,47 km² (PIROLI, 2013).

Figura 1. Localização do baixo curso da bacia do Rio Pardo



Elaboração: dos autores (2024).

A área de estudo encontra-se na Bacia Sedimentar do Paraná, unidade geotectônica de idade Paleozoica caracterizada pelo acúmulo de grande espessura de sedimentos, lavas basálticas e *sills* de diabásio (IPT, 1981). A bacia do baixo curso do Rio Pardo constitui-se de três formações geológicas: Serra Geral, Adamantina e Marília. A Formação Serra Geral, Grupo São Bento, compreende rochas vulcânicas em derrames basálticos ocorridos entre os períodos Jurássico Superior e o Cretáceo Inferior, intercaladas por arenitos. Os arenitos do Grupo Bauru, Formações Adamantina e Marília, acumularam-se no período Cretáceo após a cessação dos derramamentos vulcânicos (IPT, 1981).

Do ponto de vista geomorfológico, a área de estudo localiza-se no Planalto Ocidental Paulista, Unidade Planalto Centro-Ocidental, caracterizada por colinas amplas e baixas com topos convexos ou tabulares, vales com entalhamento médio inferior a 20 m, dimensões interfluviais médias entre 1.750 e 3.750 m, altimetria entre 400 e 700 m e declividade média entre 2 e 10 %. A baixa dissecação e a densidade de drenagem baixa originam relevos de baixa fragilidade potencial nos topos das colinas, enquanto as vertentes mais inclinadas podem ser extremamente suscetíveis à erosão devido às características texturais dos solos (ROSS; MOROZ, 1997).

O clima dos municípios da área de estudo é do tipo Cfa segundo Köppen-Geiger, mesotérmico ou temperado, com temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C, verão quente com médias iguais ou superiores a 22°C e precipitação média anual variando de 1.274 mm em Manduri a 1.391 mm em Santa Cruz do Rio Pardo (ALVARES *et al.*, 2013). Rolim *et al.* (2007) mostram que o baixo curso da bacia do Rio Pardo encontra-se na transição do tipo climático Am para o Cfa, observado à montante da bacia. O tipo Am caracteriza-se pelo clima tropical de monção com breve estação seca, chuvas intensas durante o resto do ano e temperatura média do mês mais frio maior ou igual a 18°C (ALVARES *et al.*, 2013; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

De acordo o IBGE (2004), na área de estudo há o predomínio da floresta estacional semidecidual, subgrupo “vegetação secundária e atividades agrárias”, presente em quase todo o baixo curso da bacia do Rio Pardo, com exceção de sua porção leste, ocupada por savanas (cerrado), subgrupo “atividades agrárias”.

Os tipos de solos são variados: Nitossolos Vermelhos no vale do Rio Pardo e algumas bacias afluentes, Latossolos Vermelhos eutroféricos e distroféricos nas demais áreas do centro e a jusante da bacia, e Argissolos Vermelho-Amarelos nas vertentes centrais e leste, mais suscetíveis à erosão (ROSSI, 2017).

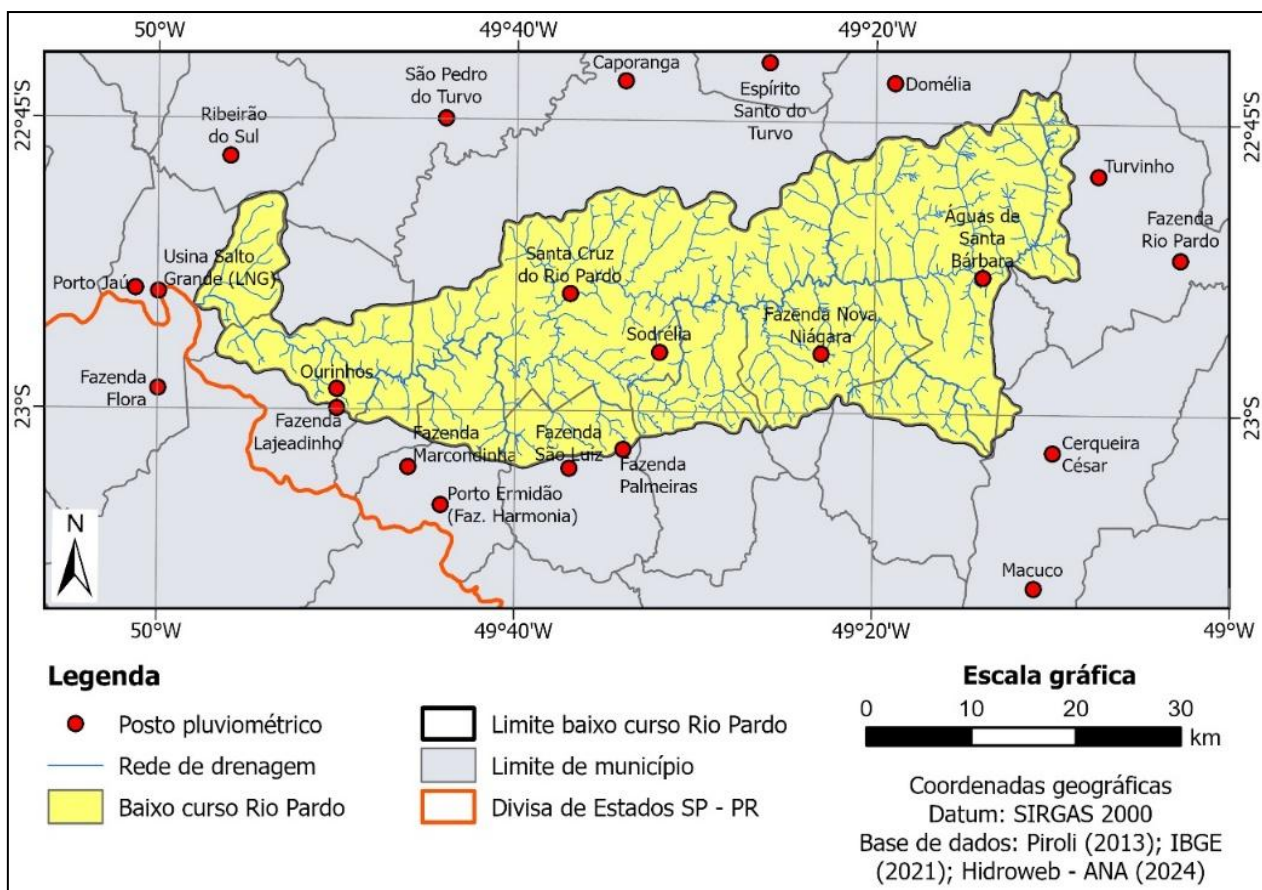
A população total dos municípios da área de estudo é de 208.303 habitantes (IBGE, 2022), com aproximadamente metade vivendo no município de Ourinhos (SP). A concentração populacional nas zonas urbanas e as consequentes transformações no uso da terra podem intensificar os efeitos negativos

das chuvas intensas, como as inundações, os processos erosivos, os assoreamentos de rios e córregos, entre outros.

Procedimentos metodológicos

Utilizaram-se dados diários de precipitação das séries temporais de 22 postos pluviométricos, dos quais 7 postos estão situados na área da bacia do baixo curso do Rio Pardo e 15 postos estão localizados nas bacias adjacentes, em distâncias que variam de 1,17 km a 13,48 km do limite da área de estudo. Os dados foram obtidos no sistema HIDROWEB v. 3.2.7, da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA), menu “Séries Históricas de Estações”¹ (Figura 2).

Figura 2. Localização dos postos pluviométricos no baixo curso da bacia do Rio Pardo



Elaboração: dos autores (2024).

¹ HIDROWEB / ANA – Séries Históricas de Estações – disponível em <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>.

As equações IDF foram elaboradas no programa Microsoft Excel® pelos métodos de desagregação de chuvas diárias em precipitações de menor duração, proposto pelo DAEE-CETESB (1980), e do ajuste dos dados à distribuição de Gumbel. Para o ajuste das equações, utilizou-se o método da linearização dos membros da equação por funções logarítmicas, conforme metodologia apresentada por Britto e Kellner (2016).

Os dados pluviométricos diários foram tabulados com a obtenção do número de dias com falhas de dados por mês e dos maiores índices pluviométricos mensais e anuais de todos os postos. Para a inclusão do maior dado pluviométrico de cada ano na série temporal a ser utilizada no ajuste da equação IDF, foram adotados os seguintes critérios: 1) A série de dados anual deve apresentar menos de 10 dias de falhas de dados; 2) Não pode haver falha de dados no período chuvoso, definido como os meses de outubro a março, que representam, na média de todos os postos, 71,33 % do índice pluviométrico anual, com desvio padrão de 1,24 %; 3) O dado não pode constituir um *outlier*, para que se obtenha um bom ajuste à distribuição de Gumbel.

Para a verificação da ocorrência de *outliers*, os valores pluviométricos máximos anuais foram dispostos em ordem crescente, sendo calculados a média (\bar{X}), a mediana, o desvio padrão amostral (S) e o coeficiente de variação (CV), identificados o menor e o maior valor da série, e calculados os quartis Q_1 e Q_3 , o intervalo interquartil (IQR) pela diferença entre os quartis Q_3 e Q_1 , e o limite de *outlier* (L_0), dado pela equação

$$L_0 = IQR * 1,5 \quad (1)$$

Os índices pluviométricos inferiores a ($Q_1 - L_0$) e superiores a ($Q_3 + L_0$) foram considerados *outliers* e descartados. Após a exclusão dos *outliers*, os parâmetros estatísticos foram recalculados, mas os eventuais novos dados discrepantes, resultantes do recálculo, foram mantidos nas séries de dados.

Os dados pluviométricos aptos ao ajuste à distribuição de Gumbel foram dispostos em ordem crescente, e calcularam-se a probabilidade de não excedência (p) e o período de retorno equivalente (T_R) a partir das equações

$$p = \frac{m}{N+1} \quad (2)$$

$$T_R = \frac{1}{p} \quad (3)$$

onde: m é o número de ordem do dado pluviométrico, sendo $m = 1$ para o menor índice pluviométrico; $m = N$ para o maior índice pluviométrico; e N o número de anos da série (DAEE-

CETESB, 1980). Os valores de K de Gumbel correspondentes a todos os anos das séries temporais foram determinados pela equação proposta por Subramanya (2013),

$$K = \frac{-\left\{\ln\left[\ln\left(\frac{T_R}{T_R-1}\right)\right]\right\} - y_n}{\sigma_n} \quad (4)$$

onde: y_n e σ_n são a média reduzida e o desvio padrão reduzido, respectivamente, da distribuição de Gumbel, tabelados em função do tamanho da série de dados (SUBRAMANYA, 2013; BRITO; KELLNER, 2016).

Tendo sido obtidas as constantes K dos dados pluviométricos, calcularam-se as precipitações máximas de Gumbel (P_T) conforme a equação:

$$P_T = P + K * \sigma_x \quad (5)$$

onde: P é a média; σ_x é o do desvio padrão da série temporal de dados pluviométricos máximos diários anuais.

A aderência das séries de dados ao modelo de Gumbel foi verificada por meio de três métodos e testes:

- Elaboração do gráfico da precipitação máxima anual observada em função da precipitação máxima de Gumbel (P_T), e cálculo do coeficiente de determinação (R^2) e da equação da reta, cuja inclinação deve ser o mais próximo possível de 45° . Para tal, calculou-se o arco tangente do coeficiente linear da equação da reta pela função “ATAN” do Excel, e converteu-se o resultado de radiano para grau pela função “GRAUS”;
- Teste de Kolmogorov-Smirnov (KS): realizado aos níveis de significância de 1 % ($\alpha = 0,01$) e 5 % ($\alpha = 0,05$), com a hipótese nula (H_0) de que a frequência acumulada de não excedência de valores máximos de precipitação (F empírica), calculada pela equação 2, pode ser estimada pela distribuição de probabilidades de Gumbel (F teórica).

A função cumulativa de probabilidades de Gumbel (FCP ou F teórica) é dada por

$$FCP = P(X \geq x) = \exp\{-\exp[-\alpha (x - \mu)]\} \quad (6)$$

Os parâmetros α e μ são determinados pelo método dos momentos, de acordo com as expressões

$$\alpha = \frac{1,2826}{S} \quad (7)$$

$$\mu = \bar{X} - 0,451 * S \quad (8)$$

onde: \bar{X} e S correspondem, respectivamente, à média e ao desvio padrão da série histórica (MELLO; SILVA; BESKOW, 2020).

A estatística D do teste KS é a máxima diferença absoluta entre as funções de probabilidade acumuladas empírica e teórica das variáveis aleatórias contínuas. O valor D calculado é comparado ao valor crítico tabelado, baseado no nível de significância e no tamanho da amostra (N). Se D calculado for menor ou igual ao D crítico tabelado, aceita-se a hipótese H_0 , indicando que a série de dados pode ser representada pela distribuição de Gumbel (NAGHETTINI; PORTELA, 2011).

- Teste de Anderson-Darling (AD^2): também realizado aos níveis de significância de 1 % ($\alpha = 0,01$) e 5 % ($\alpha = 0,05$), com a hipótese nula (H_0) de que as séries temporais de precipitações máximas diárias anuais se ajustam à distribuição de probabilidades de Gumbel (F teórica), calculada pela equação 6. A estatística do teste AD^2 é dada por

$$AD^2 = -N - \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{(2i-1)[\ln(p_1) + \ln(1-p_2)]}{N} \right\} \quad (9)$$

onde: N é o tamanho da amostra; i é a posição de cada um dos dados da série em ordem crescente; p_1 é a probabilidade de não excedência da precipitação (F teórica de Gumbel), obtida com dados em ordem crescente; e $(1 - p_2)$ é a probabilidade de excedência calculada a partir dos dados pluviométricos em ordem decrescente (MELLO; SILVA; BESKOW, 2020).

Os valores críticos da estatística AD^2 da distribuição de Gumbel para máximos são de 0,757 para o nível de significância $\alpha = 0,05$ e de 1,038 para $\alpha = 0,01$. Aplica-se à estatística AD^2 , antes da comparação com os valores críticos, o fator de correção para a distribuição Gumbel, dado por: $(1 + 0,2/\sqrt{N})$ (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Após a verificação da aderência dos dados à distribuição de Gumbel, calcularam-se as alturas precipitadas P_T nos períodos de retorno T_R de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100 e $N/5$ anos e utilizando-se as durações das chuvas de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 120, 240, 360, 480, 600, 720 e 1.440 minutos. Para a obtenção dos índices pluviométricos relativos às diferentes durações, utilizou-se o método de desagregação de chuvas desenvolvido pelo DAEE-CETESB (1980), no qual os índices pluviométricos máximos diários P_T calculados pela equação 5 foram convertidos em chuvas de 1.440 minutos (24 horas) de duração e, em seguida, desagregados em chuvas de durações menores pela multiplicação pelos coeficientes definidos na Tabela 1. Os índices pluviométricos resultantes foram transformados em intensidade ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) com a divisão pelas durações das chuvas.

Tabela 1. Coeficientes de desagregação de chuvas diárias

Duração	Coeficiente de desagregação	de Duração	Coeficiente de desagregação
24 h / 1 dia	1,14	1 h / 24 h	0,42
12 h / 24 h	0,85	30 min / 1 h	0,74
10 h / 24 h	0,82	25 min / 30 min	0,91
8 h / 24 h	0,78	20 min / 30 min	0,81
6 h / 24 h	0,72	15 min / 30 min	0,70
4 h / 24 h	0,63	10 min / 30 min	0,54
2 h / 24 h	0,52	5 min / 30 min	0,34

Fonte: DAEE-CETESB (1980).

A equação que relaciona Intensidade, Duração e Frequência (IDF) é dada pela relação

$$I = \frac{a * T_R^b}{(t+c)^d} \quad (10)$$

onde: I a intensidade da chuva (mm.min⁻¹); T_R o período de retorno (anos), ou frequência de ocorrência das chuvas; t a duração (min) e “a”, “b”, “c” e “d” as constantes a serem ajustadas (BERTONI; TUCCI, 2007).

O parâmetro A, que representa o numerador da equação IDF, é dado por

$$A = a * T_R^b \quad (11)$$

Ao ser substituído na equação IDF, obtém-se

$$I = \frac{A}{(t+c)^d} \quad (12)$$

Para a determinação da constante “c” da equação IDF, fixou-se o período de retorno calculado pelo método de Fair-Greyer (WILKEN, 1978), que pressupõe a ocorrência de um evento chuvoso a cada N/5 anos, sendo N o número de elementos da série de dados.

A partir do gráfico bilogarítmico das durações (min) em função das intensidades de chuva (mm.min⁻¹), para o período de retorno de N/5 com valor arredondado, determinaram-se as intensidades I₃ e duração t₃ a partir dos pontos inicial (I₁, t₁) e final (I₂, t₂) da curva, correspondentes aos T_R de 2 e 100 anos, respectivamente. O ponto (I₃, t₃) é dado por

$$I_3 = \sqrt{I_1 * I_2} \quad (13)$$

A duração t₃ foi calculada pela equação potencial derivada do gráfico bilogarítmico, a partir da intensidade pluviométrica I₃. Ao substituir os valores de intensidade da equação 12 na equação 13, obteve-se

$$\frac{A}{(t_3+c)^d} = \sqrt{\frac{A}{(t_1+c)^d} * \frac{A}{(t_2+c)^d}} \quad (14)$$

Em que a variável “c” da equação IDF, isolada, equivale a

$$c = \frac{t_3^2 - t_1 * t_2}{t_1 + t_2 - 2 * t_3} \quad (15)$$

Para determinação do coeficiente “d”, plotaram-se gráficos bilogaritmos de intensidade da chuva em função da duração deslocada (t+c, I), com T_R de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100 e N/5 anos. Espera-se que os pontos resultantes se aproximem de uma reta.

Os gráficos acima referidos possuem coeficiente linear igual a “log(A)” e coeficiente angular igual a “-d”, sendo este valor idêntico nos modelos ajustados de todos os períodos de retorno. Essa conclusão resulta da aplicação de logaritmo aos dois membros da equação 12, que dá origem à relação

$$\log I = \log A - d * \log(t + c) \quad (16)$$

O melhor ajuste do programa Excel é um ajuste de potência. Portanto, a correlação do ajuste com os coeficientes A e d pode ser reescrita em

$$I = A * (t + c)^{-d} \quad (17)$$

Da mesma forma, as constantes “a” e “b” foram determinadas aplicando logaritmo aos dois membros da equação 11, originando a equação

$$\log A = \log a + b * \log(T_R) \quad (18)$$

Os valores de A foram obtidos nos gráficos bilogaritmos de intensidade da chuva em função da duração deslocada (t+c, I) elaborados anteriormente. Com a plotagem de um novo gráfico bilogaritmo dos parâmetros A em função dos T_R correspondentes, ajustou-se uma equação potencial pelo método dos mínimos quadrados, cujos parâmetros “a” e “b” da equação potencial 11 equivalem às respectivas variáveis da equação IDF.

Tendo sido ajustados os coeficientes da equação IDF dos postos pluviométricos da área de estudo, realizaram-se as estimativas das intensidades pluviométricas com as durações de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 120, 240, 360, 480, 600, 720 e 1.440 minutos e períodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100, 200 e

N/5 anos, e a determinação dos índices pluviométricos totais (mm), com a multiplicação pelas respectivas durações.

Esses índices permitiram a construção das curvas IDF, ou seja, gráficos de intensidades pluviométricas ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$) em função da duração (min) e do período de retorno. Também, foram utilizados na avaliação da qualidade do ajuste das equações IDF em comparação com as P_T de Gumbel, desagregadas em chuvas de menores durações.

Os parâmetros utilizados na avaliação da qualidade das equações IDF foram:

- Coeficiente de correlação linear de Pearson (r): obtido pela função “CORREL” do Excel, que avalia a intensidade da associação e a dependência entre duas variáveis contínuas (FERREIRA, 2014), ou seja, entre as intensidades de precipitação estimadas pela equação IDF e as determinadas pela distribuição de probabilidades de Gumbel;
- Coeficiente de determinação (R^2): calculado pela função “RQUAD” do Excel, que indica a proporção da associação entre duas variáveis explicada pelo modelo de regressão linear (FERREIRA, 2014);
- Índice de concordância de Willmott (d): mede a exatidão do método de ajuste das equações IDF e avalia o grau de afastamento entre os valores estimados e observados, variando entre 0 e 1 (PEREIRA; DUARTE; SARMENTO, 2017; WILLMOTT, 1981), conforme a equação

$$d = 1 - \left[\frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(|P_i - O| + |O_i - O|^2)} \right] \quad (19)$$

onde: P_i é a intensidade da precipitação estimada pela equação IDF ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$); O_i é a intensidade da precipitação observada, derivada da precipitação teórica de Gumbel ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$); e O é a média dos valores observados de intensidade da precipitação ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$);

- Coeficiente de confiança (I_c): proposto por Camargo e Sentelhas (1997), é o produto do coeficiente de correlação de Pearson (r) e do índice de concordância de Willmott (d), com valores entre 0 e 1.

Para compreender a distribuição espacial das chuvas do baixo curso da bacia do Rio Pardo, realizou-se a interpolação dos mapas dos índices pluviométricos totais derivados das intensidades pluviométricas determinadas pelas equações IDF dos postos pluviométricos analisados. Utilizou-se para tal o SIG ArcGIS Pro 3.1.0 (ESRI, 2023), licença educacional pertencente à Unesp. Duas combinações de duração e frequência das chuvas foram mapeadas: chuva de 30 minutos de duração, característica de chuvas convectivas, com período de retorno de 100 anos; e chuva de 1.440 minutos (1 dia) de duração, representando uma chuva frontal intensa, e período de retorno de 200 anos.

Os índices pluviométricos foram calculados na tabela de atributos do arquivo vetorial de localização dos postos, com o uso da ferramenta “Calculate Field”, e interpolados pelo método IDW (*Inverse Distance Weighted*), com o expoente da distância igual a 3. Esse método apresentou os menores índices de erro entre os interpoladores analisados por Farias, Francisco e Senna (2017) no mapeamento da precipitação anual na região hidrográfica da baía da Ilha Grande, litoral sul fluminense. Nesse estudo, foi utilizado o expoente da distância 4, para que os postos pluviométricos mais distantes tivessem menor influência na estimativa dos valores desconhecidos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para representar e discutir os procedimentos de ajuste das equações IDF de 22 postos pluviométricos da bacia do baixo curso do Rio Pardo e áreas adjacentes, escolheu-se o posto “Ourinhos”, por possuir a maior série de dados anuais. A série de dados possui 72 registros de chuvas máximas diárias anuais, de 1938 a 2019, desconsiderados os anos com mais de 10 falhas de dados ou com ausência de dados no período chuvoso. Após a verificação da ocorrência de *outliers*, foi descartado o maior valor (211,4 mm), por ser discrepante. Os resultados da nova análise exploratória de dados e verificação da existência de *outliers* na série de 71 dados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Análise exploratória dos dados pluviométricos máximos diários anuais do posto “Ourinhos”

Estatística	Valor	Estatística	Valor
Média	81,35 mm	Quartil Q1	67 mm
Mediana	80 mm	Quartil Q3	92,1 mm
Desvio padrão amostral	18,88 mm	Interquartil (IQR)	25,1 mm
Coefficiente de variação	23,21%	Limite de outlier (L0)	37,65 mm
Menor valor	41 mm	Q1 - L0	29,35 mm
Maior valor	130,3 mm	Q3 + L0	129,75 mm

Elaboração: dos autores (2023).

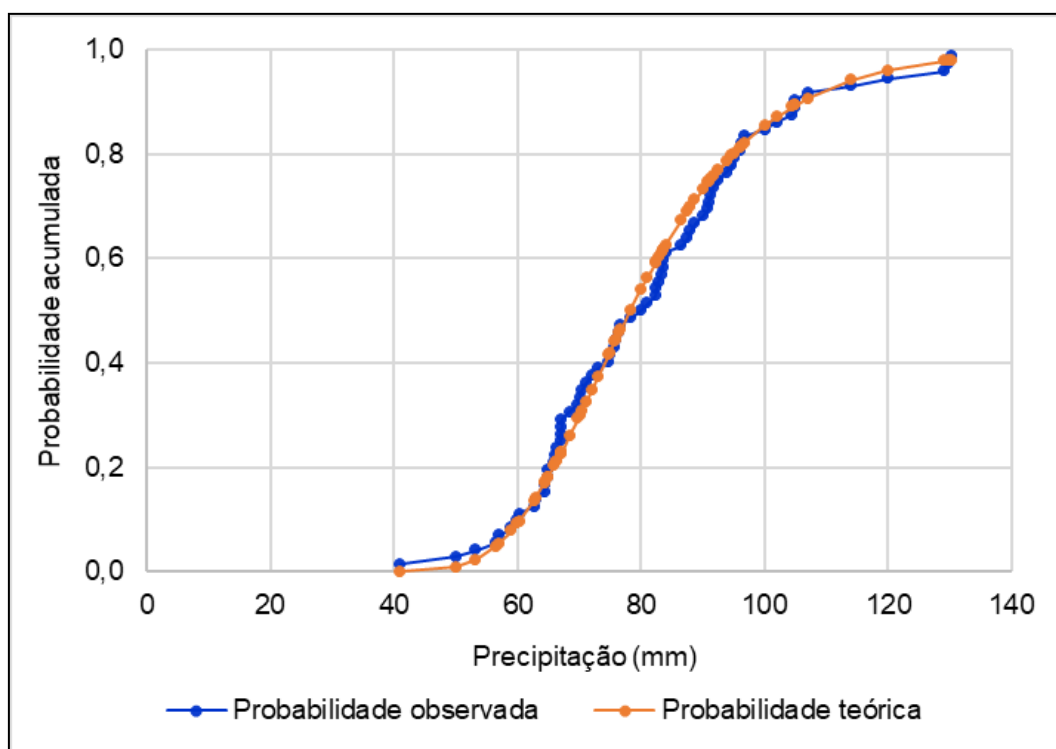
A segunda análise de outliers identificou dois dados acima de $Q3+L0$, ou seja, 129,8 mm e 130,3 mm. Esses dados, entretanto, foram mantidos na série de dados. Na sequência, com os dados dispostos em ordem crescente, foram calculadas as probabilidades de não excedência (p) e os períodos de retorno (T_R) equivalentes, com as equações 2 e 3. Para o cálculo dos valores K de Gumbel com a equação 4, utilizaram-se $y_n = 0,555$ e $\sigma_n = 1,1863$, correspondentes à série de 71 dados.

O coeficiente de determinação $R^2 = 0,9858$, próximo de 1, e o coeficiente angular de 0,9859, que representa a tangente do ângulo de $44,5932^\circ$, próximo à inclinação esperada de 45° , confirmam a boa aderência da série de dados pluviométricos à distribuição de Gumbel. A pior qualidade do ajuste dos

dados dos postos pluviométricos do presente estudo foi observada no posto “Espírito Santo do Turvo”, com $R^2 = 0,8785$, coeficiente angular de 0,9197 e ângulo de $42,604^\circ$.

Os coeficientes α e μ utilizados no cálculo da função cumulativa de probabilidades de Gumbel para a realização do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov foram de 72,84 e 0,068, respectivamente. A Figura 3 apresenta as probabilidades acumuladas de não excedência de precipitação observada, calculada pela equação 2, e teórica de Gumbel, obtida pela equação 6.

Figura 3. Probabilidades observada e teórica de Gumbel de não excedência da precipitação do posto pluviométrico “Ourinhos”



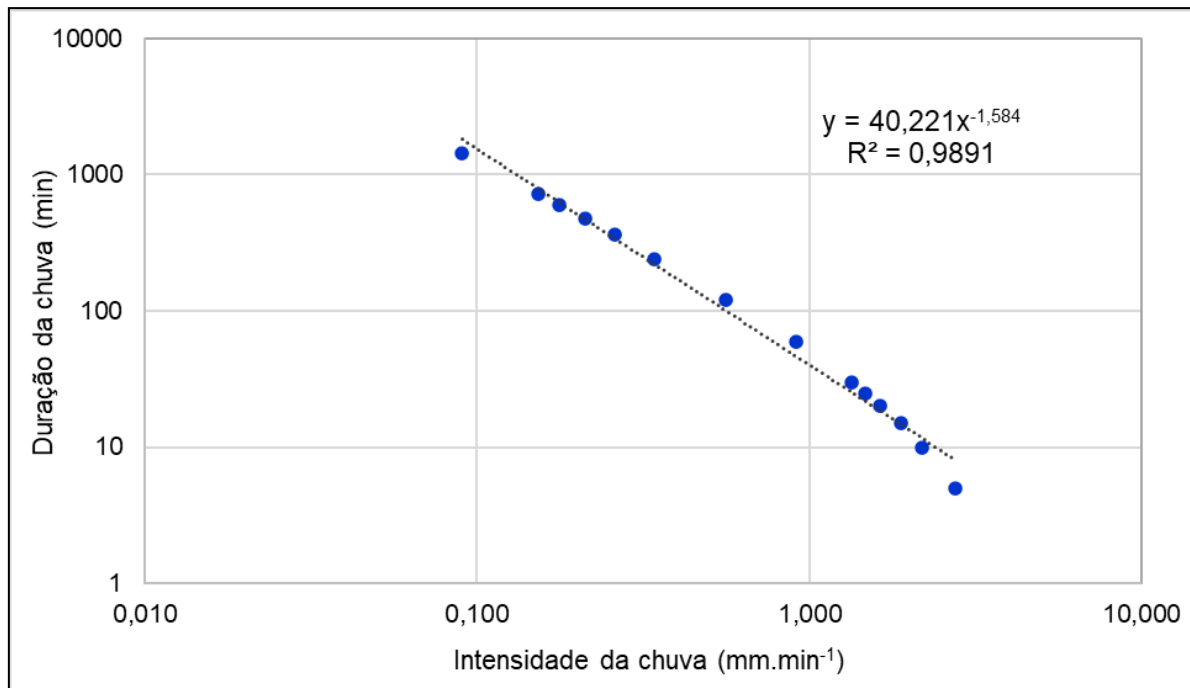
Elaboração: dos autores (2023).

Para o teste de Kolmogorov-Smirnov, o valor de D observado foi de 0,063. Para a série de $N = 71$ dados e o nível de significância $\alpha = 0,01$, obteve-se o valor crítico $D_{N,\alpha} = 0,193$ (NAGHETTINI; PORTELA, 2011). Como $D < D_{N,\alpha}$, aceita-se a hipótese nula de que a distribuição de Gumbel pode ser utilizada para representar o comportamento da série de dados de precipitação máxima diária anual do posto pluviométrico “Ourinhos”. Os dados também se ajustam à distribuição de Gumbel com nível de significância $\alpha = 0,05$, cujo valor crítico $D_{N,\alpha}$ é de 0,161. As curvas da Figura 3 também evidenciam a boa qualidade do ajuste da série de dados à referida distribuição de probabilidades.

No teste de aderência de Anderson-Darling, obteve-se $AD^2 = 0,346$, o que possibilita a aceitação da hipótese nula de que os dados se ajustam à distribuição de Gumbel para valores extremos nos níveis de

significância de 1 % e 5 %. O período de retorno utilizado na determinação do coeficiente “c” da equação IDF foi de 14 anos ($71 \text{ dados} / 5 = 14,2$). O gráfico bilogaritmo da duração das chuvas em função da intensidade, é apresentado na Figura 4.

Figura 4. Gráfico bilogaritmo da duração da chuva (min) em função da intensidade pluviométrica ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$), com $T_R = 14$ anos



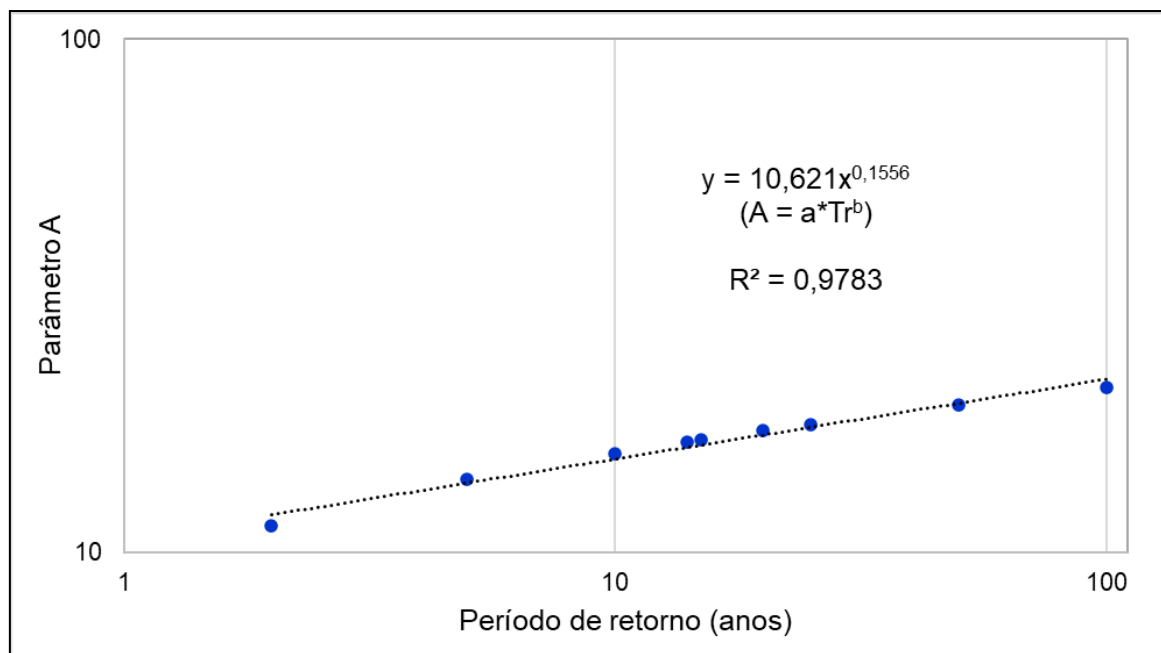
Elaboração: dos autores (2023).

Com as intensidades pluviométricas equivalentes ao período de retorno de 14 anos e durações de $t_1 = 5$ e $t_2 = 1.440$ minutos, calculou-se a intensidade $I_3 = 0,498 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. A duração t_3 , de 121,5 min, foi calculada pela equação potencial ajustada no gráfico da Figura 4, e o coeficiente “c” da equação IDF, obtido pela equação 15, foi de 6,2907.

Os gráficos bilogaritmos de intensidade da chuva em função da duração deslocada ($I, t+6,2907$) em diferentes períodos de retorno, e as equações potenciais derivadas, possibilitaram a determinação do coeficiente “d” da equação IDF, igual a 0,705, representado pelo coeficiente angular da equação 16 e do expoente da equação 17.

Os parâmetros A dos gráficos bilogaritmos ($I, t+6,2907$) com diferentes períodos de retorno, que representam o numerador da equação IDF (equações 11 e 12), foram plotados em gráfico bilogaritmo do parâmetro A em função do período de retorno, conforme a Figura 5.

Figura 5. Gráfico bilogaritmo do parâmetro A em função do período de retorno (Tr)

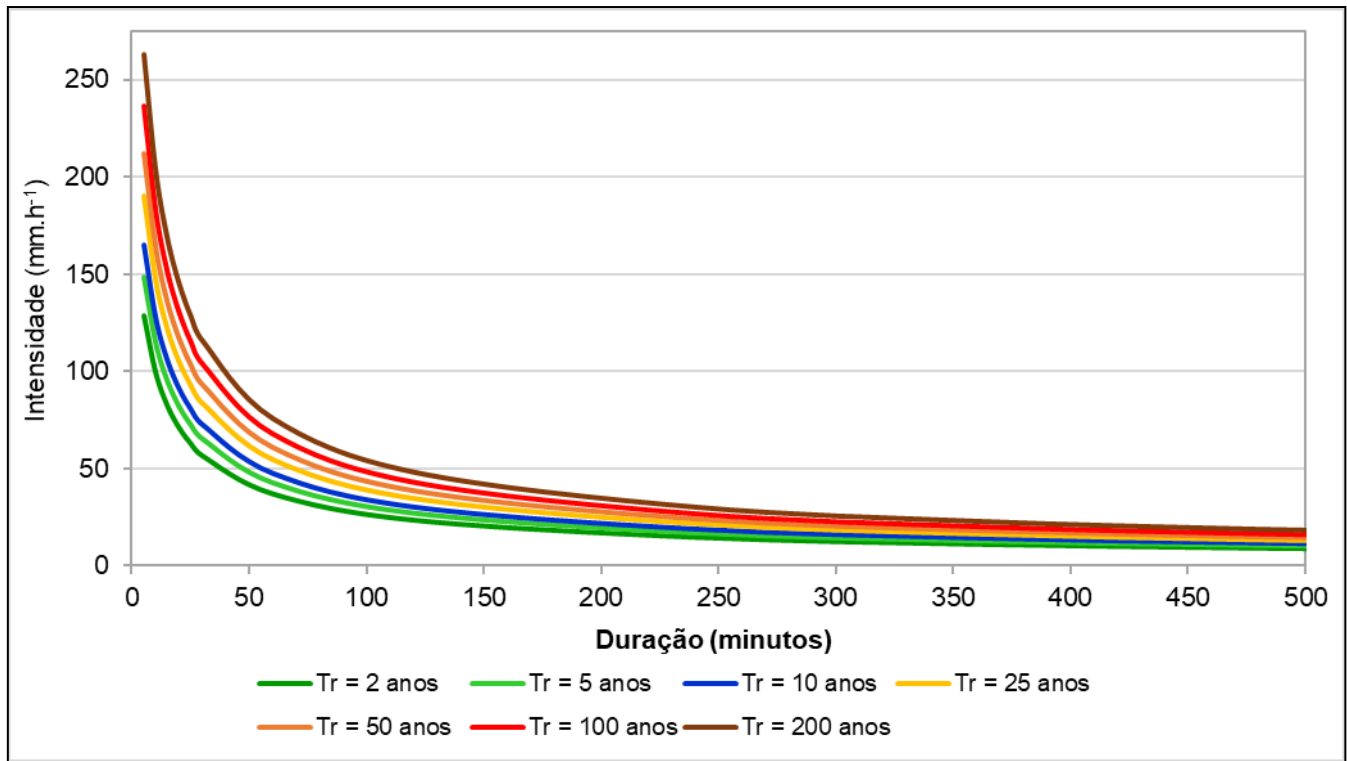


Elaboração: dos autores (2023).

A equação potencial ajustada para o gráfico bilogaritmo, comparada à equação 11, originou os coeficientes “a” e “b” da equação IDF do posto pluviométrico “Ourinhos”, iguais a 10,621 e 0,1556, respectivamente, com poder explicativo do modelo de 97,83 %.

A Figura 6 apresenta as curvas de intensidade das chuvas em função da duração e do período de retorno, estimadas pela equação IDF do posto “Ourinhos”. A representação da duração foi limitada a 500 minutos para facilitar a visualização das curvas. A Tabela 4 apresenta as precipitações totais (mm) estimados pela referida equação.

Figura 6. Curvas IDF do posto pluviométrico “Ourinhos”



Elaboração: dos autores (2023).

Tabela 4. Precipitações totais (mm) estimadas pela equação IDF do posto “Ourinhos”

Duração (min)	Período de retorno (anos)								
	2	5	10	15	20	25	50	100	200
5	10,71	12,35	13,76	14,65	15,33	15,87	17,67	19,69	21,93
10	16,54	19,08	21,25	22,63	23,67	24,51	27,30	30,41	33,87
15	20,55	23,69	26,39	28,11	29,40	30,44	33,90	37,76	42,07
20	23,61	27,23	30,33	32,30	33,78	34,97	38,96	43,39	48,34
25	26,10	30,10	33,53	35,71	37,35	38,67	43,07	47,98	53,44
30	28,21	32,54	36,24	38,60	40,37	41,80	46,56	51,86	57,77
60	36,90	42,56	47,40	50,49	52,80	54,67	60,89	67,83	75,55
120	46,85	54,03	60,18	64,10	67,04	69,41	77,31	86,12	95,92
240	58,51	67,48	75,16	80,06	83,72	86,68	96,55	107,55	119,80
360	66,35	76,51	85,23	90,78	94,93	98,29	109,48	121,95	135,83
480	72,44	83,54	93,06	99,12	103,65	107,32	119,54	133,15	148,32
600	77,51	89,39	99,57	106,05	110,91	114,83	127,90	142,47	158,70
720	81,89	94,44	105,20	112,05	117,18	121,32	135,14	150,53	167,67
1440	100,78	116,23	129,46	137,89	144,21	149,30	166,31	185,25	206,34

Elaboração: dos autores (2023).

A equação IDF estimou, para chuvas de 30 minutos de duração, precipitações localizadas comuns no verão no sudeste do Brasil causadas pelo excesso de radiação solar e evapotranspiração, que chuvas de

28,21 mm são recorrentes a cada dois anos, e que chuvas de 57,77 mm em 30 minutos têm probabilidade de ocorrência a cada 200 anos.

Os coeficientes das equações IDF dos 22 postos pluviométricos localizados no baixo curso da bacia do Rio Pardo ou nas áreas adjacentes são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Coeficientes das equações IDF dos postos pluviométricos do baixo curso da bacia do Rio Pardo e áreas adjacentes

Posto pluviométrico	a	b	c	d
Águas de Santa Bárbara	10,943	0,1899	6,2905	0,705
Caporanga	10,16	0,151	6,2923	0,705
Cerqueira César	9,954	0,1775	6,291	0,705
Domélia	11,211	0,1825	6,2915	0,705
Espírito Santo do Turvo	8,6156	0,1618	6,2928	0,705
Fazenda Flora	10,804	0,1678	6,2909	0,705
Fazenda Lajeado	10,453	0,154	6,2916	0,705
Fazenda Marcondinha	10,824	0,1346	6,291	0,705
Fazenda Nova Niágara	10,629	0,1705	6,2905	0,705
Fazenda Palmeiras	11,059	0,1743	6,2902	0,705
Fazenda Rio Pardo	10,87	0,1316	6,2919	0,705
Fazenda São Luiz	11,48	0,1689	6,2925	0,705
Macuco	11,056	0,1619	6,2914	0,705
Ourinhos	10,621	0,1556	6,2907	0,705
Porto Ermidão	10,9	0,1613	6,2906	0,705
Porto Jaú	10,425	0,1647	6,2912	0,705
Ribeirão do Sul	9,9281	0,1561	6,2914	0,705
Santa Cruz do Rio Pardo	10,875	0,172	6,2906	0,705
São Pedro do Turvo	10,594	0,1551	6,2917	0,705
Sodrélia	10,279	0,1754	6,2912	0,705
Turvinho	9,4109	0,1621	6,2921	0,705
Usina Salto Grande (LNG)	10,362	0,1275	6,2925	0,705

Elaboração: dos autores (2023).

Os testes de aderência dos dados dos postos pluviométricos à distribuição de probabilidade de Gumbel para extremos máximos de precipitação evidenciaram níveis diferentes de ajuste e diferenças de resultados entre os testes.

O ângulo de inclinação da reta do gráfico da precipitação máxima anual observada em função da P_T de Gumbel, que deve se aproximar de 45° , variou entre $42,6^\circ$ na série de dados do posto “Espírito Santo do Turvo”, pior ajuste, e a série de dados do posto “Ourinhos”, com $44,59^\circ$, melhor ajuste. O posto “Ourinhos” tem o maior número de dados de precipitação máxima diária anual, e as três séries de dados

com melhor ajuste apresentam, respectivamente, 71, 45 e 68 dados. Já os postos pluviométricos cujas inclinações das retas dos gráficos mais se distanciaram dos 45° apresentaram, em ordem crescente de qualidade do ajuste, 27, 22 e 26 dados na série temporal. Essa relação entre o número de dados das séries temporais e a qualidade do ajuste à distribuição de Gumbel, entretanto, não é linear. O posto pluviométrico “Ribeirão do Sul”, por exemplo, apresenta a terceira maior série de dados (65), e o quarto menor ângulo ($43,92^\circ$).

A maior diferença angular de inclinação da reta em relação aos 45° , no entanto, foi de $2,4^\circ$, o que permite inferir que as séries de dados se aproximaram do ajuste à distribuição de Gumbel. Os dados dos 22 postos pluviométricos analisados neste estudo também se ajustaram à distribuição de Gumbel, segundo o teste de Kolmogorov-Smirnov. O posto de menor qualidade do ajuste foi “Espírito Santo do Turvo”, que apresentou $D = 0,187$ e $DN, \alpha = 0,305$ para o nível de significância $\alpha = 0,01$ e amostra de 27 dados. O melhor ajuste foi observado no posto “Santa Cruz do Rio Pardo”, com diferença D entre as distribuições de probabilidade acumuladas empírica e teórica de 0,053.

O teste de aderência de Anderson-Darling demonstrou que as séries de dados dos postos pluviométricos “Espírito Santo do Turvo” e “Ribeirão do Sul” não se ajustaram à distribuição de Gumbel nos níveis de significância $\alpha = 0,01$ e $0,05$. Já os dados dos postos “Fazenda Nova Niágara”, “Fazenda Rio Pardo” e “Fazenda São Luiz” tiveram evidência de ajuste à referida distribuição apenas ao nível de significância $\alpha = 0,01$, cujo valor AD^2 crítico é maior que no teste com $\alpha = 0,05$. O uso de $\alpha = 0,01$, porém, aumenta a chance de ocorrência do erro tipo II no teste, ou seja, de não rejeição da hipótese H_0 de que os dados se ajustam à distribuição de Gumbel, quando na realidade eles não se ajustam.

O teste de Anderson-Darling procura ponderar mais fortemente as caudas inferior e superior das distribuições de probabilidade, locais que possuem menor número de observações amostrais e maiores erros de observação por constituírem valores extremos, e que podem afetar a qualidade do ajuste (NAGHETTINI; PINTO, 2007). O teste de Kolmogorov-Smirnov, ao observar apenas as máximas diferenças entre as frequências empírica e teórica e a comparação com a tabela de valores críticos, revela-se conservador na conclusão sobre a adequação dos dados a uma distribuição de probabilidades e tem caráter qualitativo, sem embasamento suficiente para a conclusão sobre a precisão e a comparação entre diferentes distribuições (MELLO; SILVA; BESKOW, 2020).

Essas características dos testes de aderência foram evidenciadas por Caminha, Souza e Oliveira (2020), que analisaram a aderência à distribuição de Gumbel das séries de dados de 28 postos pluviométricos do estado de Minas Gerais, desagregados em chuvas de menor duração, e verificaram que as séries de todos os postos se ajustaram à referida distribuição pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, mas quatro deles não se ajustaram pelo teste de Anderson-Darling, ambos ao nível de significância de 5 %, revelando ser este teste mais criterioso. Os gráficos de precipitação máxima diária anual observada em

função da P_T de Gumbel do baixo curso da bacia do Rio Pardo mostraram, nos postos pluviométricos que não tiveram evidência estatística de ajuste pelo teste de Anderson-Darling, um maior distanciamento dos valores extremos mínimos e máximos à relação linear, sobretudo dos valores máximos.

A avaliação da qualidade do ajuste das equações IDF, realizada a partir das intensidades pluviométricas obtidas pelas equações em comparação às P_T de Gumbel, desagregadas em intensidades pluviométricas de menor duração, evidenciou uma forte correlação linear entre ambas as séries de dados, com os valores mínimos de $r = 0,9959$ e de poder explicativo do modelo de regressão (R^2) igual a $0,9919$, observados no posto pluviométrico “Águas de Santa Bárbara”. A exatidão do ajuste das equações IDF, medida pelo Índice de concordância de Willmott (d), teve o menor valor de $0,9963$, e o pior desempenho entre as equações IDF na estimativa das intensidades pluviométricas, determinado pelo Coeficiente de confiança (I_c), foi de $0,9922$, classificado como “ótimo” (CAMARGO; SENTELHAS, 1997), ambos observados no mesmo posto pluviométrico.

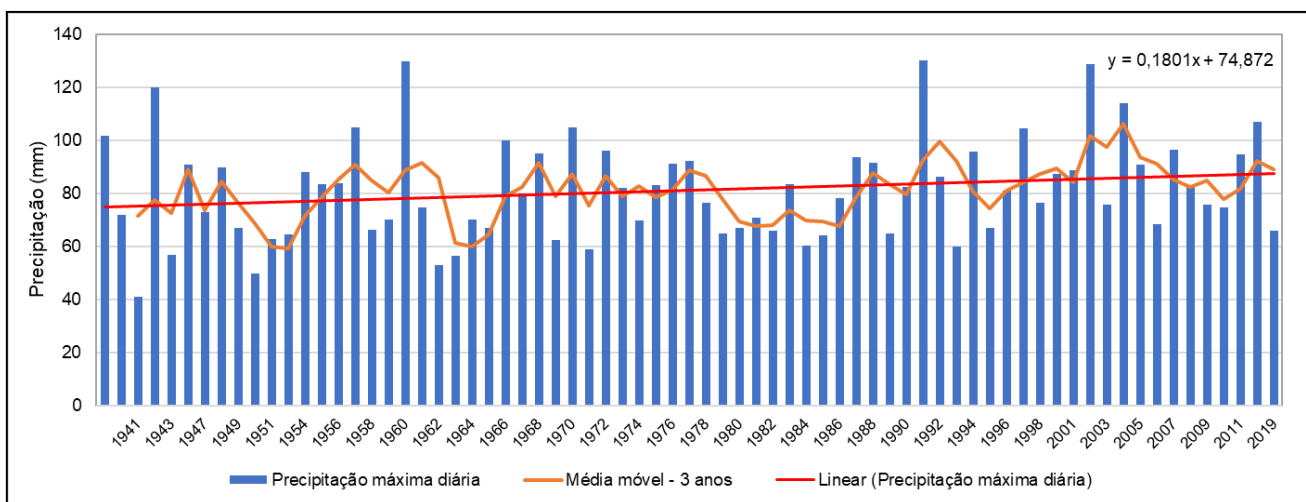
O ajuste de equações IDF em diferentes localidades por meio do método de desagregação de chuvas do DAEE-CETESB (1980) foi realizado por diversos autores, tais como Arboit, Mancuso e Fioreze (2017) no município de Iraí (RS), Oliveira *et al.* (2005) em localidades de Goiás e do Distrito Federal, e por Santos *et al.* (2009) em vários municípios do estado de Mato Grosso do Sul, entre outros, com bom ajuste dos dados e coeficientes de determinação não inferiores a 95 %, e em sua maioria superiores a 99 %.

As maiores diferenças entre as intensidades das chuvas calculadas pelas equações IDF e pela desagregação das P_T de Gumbel, observadas em todos os postos pluviométricos, ocorreram nas chuvas de menor duração e nas precipitações de maior período de retorno. As maiores divergências ocorreram, respectivamente, nas chuvas de $Tr = 200$ anos e $t = 5$ minutos; $Tr = 100$ anos e $t = 5$ minutos; e $Tr = 200$ anos e $t = 10$ minutos. Os índices pluviométricos obtidos pela equação IDF nessas condições foram maiores que os calculados pela desagregação da P_T de Gumbel. Já as menores diferenças e, portanto, o maior poder preditivo das equações IDF, foram observadas nas chuvas de $Tr = 5$ anos e $t = 600$ ou 720 minutos. Em geral, as chuvas de maior duração e de menor período de retorno tiveram estimativas mais fiéis pelas equações IDF.

Os postos pluviométricos utilizados no estudo apresentaram séries de dados de diferentes tamanhos e abrangências temporais. A quantidade variou de 22 (“Fazenda Rio Pardo”) a 71 dados (“Ourinhos”), e as séries tiveram datas de início e término desde 1932 a 1997 (“Usina Salto Grande”) até 1983 a 2021 (“Turvinho”). Essa disparidade temporal e de número de dados pode fazer com que os dados não sejam comparáveis entre si, ou com que equações IDF resultantes de séries temporais muito longas não estejam atualizadas, sobretudo em função de prováveis mudanças no padrão de precipitação e nos eventos extremos decorrentes das mudanças climáticas.

A série de precipitações máximas diárias anuais do posto “Ourinhos”, utilizada no ajuste da equação IDF, é apresentada na Figura 7.

Figura 7. Série temporal de precipitações máximas diárias do posto “Ourinhos”, média móvel de 3 anos e linha de tendência



Elaboração: dos autores (2023).

Tanto a média móvel de 3 anos quanto a linha de tendência linear apontam a tendência de aumento da precipitação máxima diária no decorrer do tempo. A equação da linha de tendência estima, no primeiro ano da série, a precipitação máxima diária de 75,05 mm e, no último ano (71°), o índice pluviométrico de 87,66 mm, um aumento de 16,8 %.

Para analisar as implicações da tendência de aumento da precipitação no ajuste das equações IDF, a série temporal do posto pluviométrico “Ourinhos” foi dividida em duas, nos períodos 1938-1977, com 36 dados, e 1978-2019, com 35 dados, e as equações IDF relativas aos dois períodos foi ajustada com a metodologia utilizada para as demais estações. As intensidades e os índices pluviométricos calculados a partir das equações geradas apontaram: em comparação à série temporal completa (1938-2019), a equação do primeiro período (1938-1977) gerou índices pluviométricos menores nos períodos de retorno de 2 e 5 anos, e superiores nos demais T_r , sendo a maior diferença na chuva de $T_r = 200$ anos e $t = 1.440$ minutos ou 24 horas, no total de +9,43 mm, aumento de 4,6 %.

A comparação entre o segundo período (1978-2019) e a série completa mostrou o aumento da precipitação no segundo período em todos os T_r e durações calculados, com os incrementos na direção do aumento da duração e da diminuição do período de retorno. A comparação das equações do primeiro e segundo períodos mostrou o aumento da chuva simulada nos períodos de retorno de 2 a 25 anos no período 1978-2019, com o aumento das diferenças à medida que a duração da chuva aumentou e o T_r

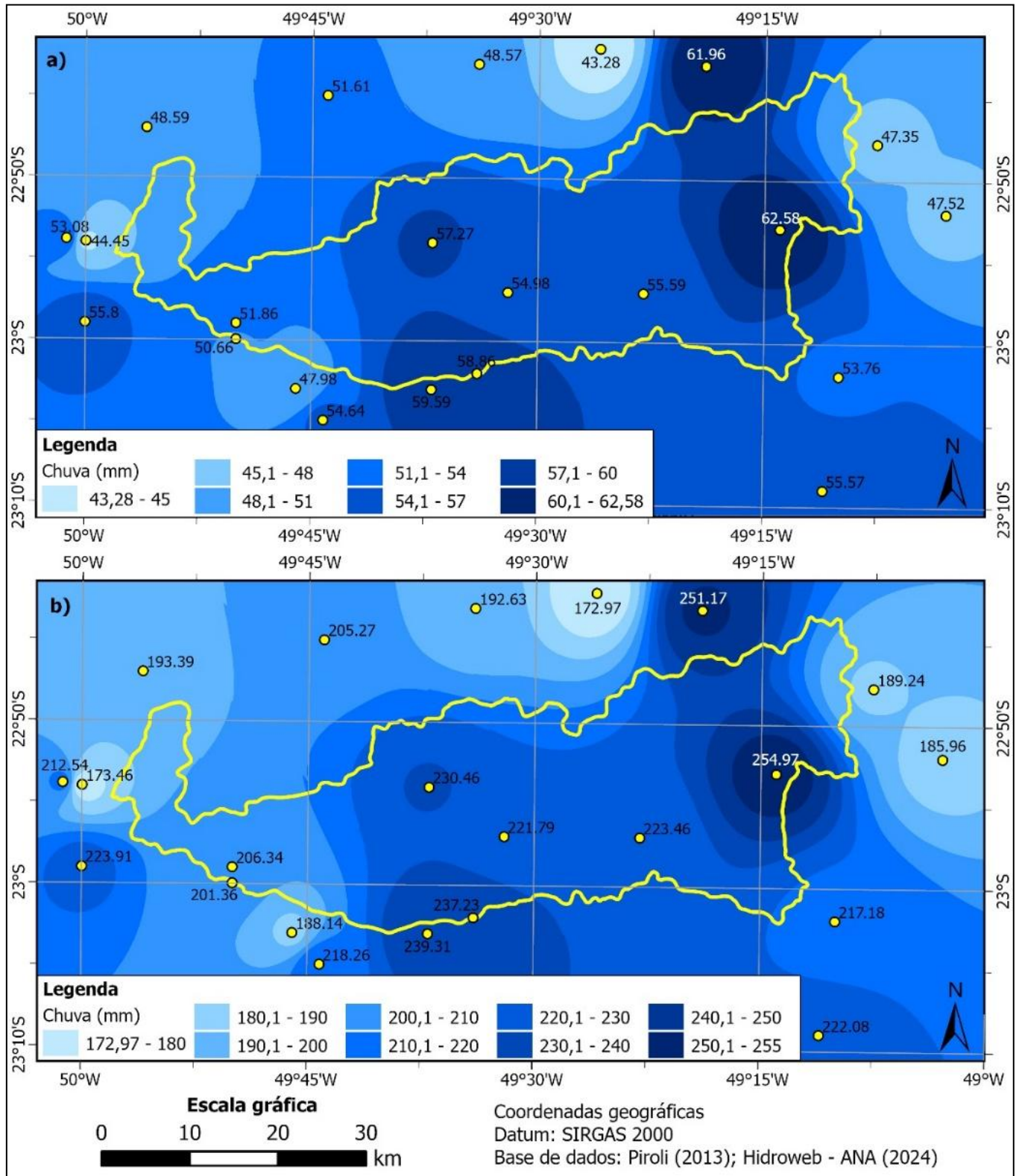
reduziu; e a redução da precipitação nos períodos de retorno de 50 a 200 anos, sendo as maiores reduções observadas com o aumento da duração e do Tr. O maior aumento, entretanto, foi de 4,7 %, e a maior redução de 3,8 %. Essas variações máximas nas precipitações estimadas pelas equações IDF são pequenas e atribuídas aos valores médios e de desvio padrão das séries temporais, das quais as P_T de Gumbel derivaram, já que essas precipitações teóricas constituíram a base para o ajuste das equações. Nesse sentido, optou-se por utilizar os modelos IDF derivados de séries temporais de diferentes tamanhos e anos de início e término na estimativa das precipitações máximas da área de estudo.

A espacialização da precipitação predita pelas equações IDF na área de estudo, em duas combinações de duração e período de retorno, é apresentada na Figura 8.

Os mapas da Figura 8 apresentam, tanto para a precipitação com características de chuva convectiva (a) quanto para a chuva com características de frontal (b), a mesma distribuição espacial dos índices pluviométricos. Áreas a leste, nordeste, centro e centro-sul apresentam os maiores totais pluviométricos nas chuvas simuladas pelas equações IDF dos postos “Águas de Santa Bárbara”, “Domélia”, “Fazenda São Luiz”, “Fazenda Palmeiras” e “Santa Cruz do Rio Pardo”, o que denota a maior probabilidade de ocorrência de chuvas extremas mais intensas. Os menores índices pluviométricos foram simulados nos postos localizados nas imediações da área de estudo.

Observa-se que os postos “Porto Jaú” e “Usina Salto Grande (LNG)”, localizados no município de Salto Grande a jusante da foz do Rio Pardo no Rio Paranapanema, apresentaram diferença considerável de chuva simulada pelas equações IDF, que chegam a 41,08 mm na Figura 8.b, mesmo estando localizadas 2,2 km de distância entre si. Essa diferença pode ser explicada pelas características das séries de dados de chuvas máximas diárias anuais utilizadas no ajuste das equações IDF. A série de dados do posto “Porto Jaú” tinha, inicialmente, 45 dados. A verificação da ocorrência de *outliers* descartou um dado (135 mm), e o maior dado da série restante foi 122 mm. O posto “Usina Salto Grande (LNG)” tinha, inicialmente, 32 dados. Após a análise de *outliers*, os dados 126,8 mm e 160,1 mm foram descartados, e o maior dado remanescente foi 111,7 mm. Embora as médias das séries utilizadas fossem similares, de 79,81 mm e 78,85 mm, respectivamente, o coeficiente de variação (CV) dos dados do posto “Porto Jaú” foi maior, de 24,5 %, sendo o CV dos dados do posto “Usina Salto Grande (LNG)” de 16,6 %, ou seja, os dados estavam menos dispersos, o que levou à eliminação dos maiores dados da série.

Figura 8. Distribuição espacial das chuvas no baixo curso da bacia do Rio Pardo: a) $t = 30$ minutos e $Tr = 100$ anos; b) $t = 1.440$ minutos (1 dia) e $Tr = 200$ anos



Elaboração: dos autores (2024).

O método IDW utilizado na interpolação dos dados pluviométricos foi também aplicado por Rabelo *et al.* (2017) na geração de mapas dos coeficientes da equação IDF na Região Metropolitana de Recife e município de Goiana, com expoente da distância 2, a partir de equações IDF de 17 postos pluviométricos. A validação dos dados evidenciou erros percentuais baixos, de 0,05 a 5,43 %. Marcuzzo, Andrade e Melo (2011), entretanto, compararam métodos de interpolação espacial para a representação de isoietas nos períodos chuvoso e seco no estado do Mato Grosso, e constataram que o método IDW tem desempenho inferior aos interpoladores Topo to Raster e Krigagem ordinária, e superior apenas ao método do Spline de tensão. Segundo os autores, o interpolador IDW produz “ilhas de dados”, que são áreas pequenas envoltas por áreas maiores de valores diferentes de precipitação. Esse fato ocorre porque, conforme a distância do ponto a ser interpolado se aproxima de zero, o peso da influência desse ponto tende a infinito e a região ao redor passa a ser influenciada praticamente apenas por ele, com influência mínima dos pontos mais distantes. As “ilhas de dados” foram também observadas nos mapas de chuvas intensas do estado do Mato Grosso do Sul, interpolados por Santos *et al.* (2009) pelo método IDW, com expoente da distância 2 e limite de abrangência de 6 postos pluviométricos. No presente trabalho, constatou-se a presença de “ilhas de dados” na Figura 7, que foram minimizadas pelo uso do expoente da distância 3.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Elaboraram-se as equações de chuvas intensas de 22 postos pluviométricos do baixo curso da bacia do Rio Pardo pelo método de desagregação de chuvas diárias medidas por pluviômetros. As séries de dados foram ajustadas à distribuição de probabilidades tipo I de Gumbel, e os coeficientes das equações IDF foram ajustados por meio da linearização dos membros das equações por funções logarítmicas.

Dada a inexistência de equações de chuvas determinadas para a sub-bacia, o aumento da pressão sobre a rede de drenagem pela ocupação urbana e agrícola, e a tendência de crescimento em número e em intensidade das chuvas extremas em razão das mudanças climáticas, as equações IDF e a distribuição espacial das chuvas intensas são fundamentais na realização de estudos hidrológicos, no dimensionamento de projetos hidráulicos e no planejamento da expansão urbana e do uso e cobertura da terra da bacia no presente e no futuro, para minimizar os impactos negativos dos eventos hidrológicos extremos sobre a população, as estruturas e as atividades econômicas.

Os testes de aderência das séries de dados de precipitação máxima diária anual à distribuição de Gumbel demonstraram, com o teste de Kolmogorov-Smirnov, que os dados de todos os postos pluviométricos se ajustaram à referida distribuição. Já o teste de Anderson-Darling não encontrou evidência estatística de ajuste dos postos “Espírito Santo do Turvo” e “Ribeirão do Sul” à distribuição de Gumbel em nenhum nível de significância. Os maiores desvios da inclinação da reta do gráfico da chuva

máxima anual observada em função da precipitação máxima de Gumbel dos postos pluviométricos em relação aos 45° ocorreram nos postos “Espírito Santo do Turvo e “Fazenda Rio Pardo”, o que denota a menor qualidade do ajuste à distribuição de Gumbel. Já os parâmetros de avaliação da qualidade do ajuste das equações IDF em relação às precipitações teóricas de Gumbel evidenciaram ótimo ajuste, com coeficientes superiores a 0,99.

A interpolação dos índices pluviométricos simulados pelas equações IDF demonstrou a tendência de ocorrência de chuvas mais intensas nas regiões leste, nordeste, centro e centro-sul da sub-bacia estudada, e de chuvas menos intensas em seus divisores de águas e nas bacias adjacentes. O método de interpolação IDW produziu algumas “ilhas de dados”, que foram minimizadas pelo expoente da distância do interpolador utilizado.

Em estudos futuros, espera-se produzir equações de chuvas intensas na área do baixo curso da bacia do Rio Pardo a partir de dados produzidos por satélite, que cubram toda a sub-bacia hidrográfica e que permitam compreender a distribuição temporal e a intensidade da precipitação.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, Dec. 2013. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ARBOIT, N. K. S.; MANCUSO, M. A.; FIOREZE, M. Ajuste de equação IDF por desagregação de chuvas diárias para o município de Iraí, RS. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 40, n. 3, p. 248-253, set./dez. 2017. http://dx.doi.org/10.11137/2017_3_248_253
- ARTAXO, P. As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 34, n. 100, p. 53-66, dez. 2020. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2020.34100.005>
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2007. cap. 5, p. 177-241.
- BRITTO, L. N.; KELLNER, E. Procedimento para construção da Equação de Chuva a partir das máximas precipitações diárias obtidas de séries anuais: atualização da Equação de Chuva da cidade de São Carlos (SP). **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, Tupã, v. 4, n. 26, p. 45-61, jul./ago. 2016. <http://dx.doi.org/10.17271/2318847242620161343>
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, jan./jul. 1997.
- CAMINHA, A. R.; SOUZA, G. R.; OLIVEIRA, L. F. C. Desempenho do método de desagregação de chuvas para determinação das relações Intensidade-Duração-Frequência das precipitações em algumas localidades de Minas Gerais. **Sustentare**, Três Corações, v. 4, n. 2, p. 1-14, ago./dez. 2020. <http://dx.doi.org/10.5892/st.v4i2.6233>
- CRUZ, J. S. *et al.* Equações de chuvas intensas com dados CPC Morphing Technique (CMORPH) para o município de Altamira – PA. **Irriga**, Botucatu, v. 24, n. 1, p. 192-207, jan./mar. 2019. <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n1p192-207>
- DAEE - CETESB. DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL. **Drenagem urbana: manual de projeto**. São Paulo: DAEE-CETESB, 1980. 466 p.

DAEE-CTH. DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS. **Precipitações intensas no Estado de São Paulo**. São Paulo: DAEE-CTH, 2018. 246 p.

DAMÉ, R. C. F. *et al.* Analysis of the relationship intensity, duration, frequency of disaggregated daily rainfall in southern Rio Grande do Sul, Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 4, p. 660-670, jul./ago. 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000400006>

DEBORTOLI, N. S. *et al.* An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. **Natural Hazards**, Dordrecht, v. 86, p. 557-582, Jan. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2705-2>

ESRI - ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, INC. **ArcGIS Pro 3.1.0**. Redlands: ESRI, 2023. [programa de computador]

FARIAS, O. G.; FRANCISCO, C. N.; SENNA, M. C. A. Avaliação de métodos de interpolação espacial aplicados à pluviosidade em região montanhosa no litoral sul do Estado Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, ano 13, v. 21, p. 172-185, jul./dez. 2017. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v21i0.52065>

FERREIRA, M. C. Princípios básicos de Estatística para análise de dados geográficos. In: _____. **Iniciação à análise geoespacial: teorias, técnicas e exemplos para geoprocessamento**. São Paulo: Editora Unesp, 2014. cap. 2, p. 65-118.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro, 2004. Escala: 1:500.000.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sinopse do Censo Demográfico 2010**: São Paulo. 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?uf=35&dados=1>. Acesso em: 25 maio 2024.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Panorama do Censo Demográfico 2022**. 2022. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 25 maio 2024.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (São Paulo). **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1981. Escala: 1:500.000.

MARCUZZO, F. F. N.; ANDRADE, L. R.; MELO, D. C. R. Métodos de interpolação matemática no mapeamento de chuvas do Estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 4, n. 4, p. 793-804, jul./ago. 2011. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v4i4.232714>

MARTINEZ JR., F.; MAGNI, N. L. G. **Equações de chuvas intensas do Estado de São Paulo**. São Paulo: DAEE, POLI-USP, 1999. 125 p.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; BESKOW, S. **Hidrologia de superfície: princípios e aplicações**. 2.ed. Lavras: Editora UFLA, 2020. 531 p.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. Classificações climáticas: os tipos climáticos da Terra. In: _____. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. cap. 5, p. 113-138.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. Testes de hipóteses. In: _____. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. cap. 7, p. 243-292.

NAGHETTINI, M.; PORTELA, M. M. **Probabilidade e Estatística aplicadas à Hidrologia**. Lisboa: DECivil - IST, 2011. 57 p. Disponível em: http://www.civil.ist.utl.pt/~mps/HRH/2015_2016%20desactivado/Cap%C3%ADtulo%20HE%20Final%20OPT.pdf. Acesso em: 16 abr. 2024.

OLIVEIRA, L. F. C. *et al.* Intensidade-Duração-Frequência de chuvas intensas para localidades no estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 35, n. 1, p. 13-18, jan./abr. 2005. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/pat/article/view/2277/2242>. Acesso em: 13 jun. 2024.

PENNER, G. C.; LIMA, M. P. Comparação entre métodos de determinação da equação de chuvas intensas para a cidade de Ribeirão Preto. **Geociências**, São Paulo, v. 35, n. 4, p. 542-559, out./dez. 2016. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/11999/7978>. Acesso em: 14 jun. 2024.

PEREIRA, D. C.; DUARTE, L. R.; SARMENTO, A. P. Determinação da curva de intensidade, duração e frequência do município de Ipameri – Goiás. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 13, n. 2, p. 233-246, jul./dez. 2017. <https://doi.org/10.5216/reec.v13i2.43330>

PILAN, S. B.; NAKAYAMA, P. T.; MENDES, J. B. Mudanças climáticas: impacto no índice pluviométrico no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília (DF). **Anais[...]**. Porto Alegre: ABRHidro, 2015. p. 1-8. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=8928>. Acesso em: 28 jun. 2024.

PIROLI, E. L. **Geoprocessamento aplicado ao estudo do uso da terra das áreas de preservação permanente dos corpos d'água da bacia hidrográfica do Rio Pardo**. 2013. 136 f. Tese (Livre-

Docência em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento) – Câmpus Experimental de Ourinhos, Universidade Estadual Paulista, Ourinhos, 2013.

RABELO, A. E. C. G. C. *et al.* Espacialização dos parâmetros de equações de chuvas intensas para a Região Metropolitana do Recife. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 11, n. 4, p. 1542-1554, jul./ago. 2017. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v11.4.p1542-1554>

ROLIM, G. S. *et al.* Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 711-720. 2007. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052007000400022>

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: FFLCH-USP, 1997. Escala: 1:500.000.

ROSSI, M. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo**: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. 118 p. Escala: 1:750.000.

SANTOS, G. G. *et al.* Intensidade-duração-frequência de chuvas para o Estado de Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 6, p. 899-905, nov./dez. 2009. <http://doi.org/10.1590/S1415-43662009000700012>

SUBRAMANYA, K. Floods. In: _____. **Engineering Hydrology**. 3.ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2008. cap. 7, p. 245-279.

WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo: CETESB, 1978. 477 p.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Columbia, v. 2, n. 2, p. 184-194, May 1981. <http://dx.doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>