

APLICAÇÃO DAS RELAÇÕES INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA PARA RETROANÁLISE E MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DE CHUVAS INTENSAS NO MUNICÍPIO DE BAURU/SP

João Félix de Luca Lino¹; Jaqueline Aparecida Jorge Papini²; Enos Nobuo Sato³ & Diego Oliveira de Souza⁴

ABSTRACT – Urban flash floods are becoming increasingly frequent in Brazilian cities, rapidly developing with devastating effects on the environment, high material and financial losses and risk of human losses, mainly due to increased vulnerability caused by the disorderly occupation of improper areas. From this scenario, the better understanding of the factors that can cause urban flash floods has fundamental importance. In this article, the main factor considered was meteorological, expressed by rainfall intensity-duration-frequency (IDF) relationships. Considering that IDF relations are extremely used for planning and design of urban drainage systems, the aim of this paper was to elaborate an analysis of the application of IDF relations to identify events with potential for the development of hydrological disasters in the city of Bauru/SP, that often suffers from these events. A platform for historical data analysis and real-time monitoring (IDFAdmin) was developed to validate the proposed methodology. Together with other hydrological factors, the results showed that this methodology allows identifying adverse situations in the studied city, either in scenarios of heavy rainfall with low recurrence and high return periods, or in those with high recurrence and low return periods. This methodology also introduces a proposal for the differentiation of problems in urban drainage infrastructure regarding natural disasters. The efficiency of the applied methodology provides subsidies and motivates its expansion to other Brazilian cities, including in order assisting cities in the adequacy of their urban drainage systems.

Palavras-Chave – Chuvas intensas. Relação intensidade-duração-frequência (IDF). Monitoramento em tempo real.

¹) Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), Estrada Doutor Altino Bondensan, 500, Distrito de Eugênio de Melo, São José dos Campos/SP, joao.lino@cemaden.gov.br, joaofelixdelucalino@gmail.com, (12) 3205-0124.

²) Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), Estrada Doutor Altino Bondensan, 500, Distrito de Eugênio de Melo, São José dos Campos/SP, jaqueline.soares@cemaden.gov.br, (12) 3205-0164.

³) Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), Estrada Doutor Altino Bondensan, 500, Distrito de Eugênio de Melo, São José dos Campos/SP, enos.sato@cemaden.gov.br, (12) 3205-0125.

⁴) Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), Estrada Doutor Altino Bondensan, 500, Distrito de Eugênio de Melo, São José dos Campos/SP, diego.souza@cemaden.gov.br, (12) 3205-0128.

1 - INTRODUÇÃO

Os desastres naturais têm se tornado um tema cada vez mais presente no cotidiano das pessoas e das cidades (Bertone e Marinho, 2013). No Brasil, a ocorrência e a intensidade dos desastres naturais dependem mais do grau de vulnerabilidade das comunidades afetadas do que da magnitude dos eventos adversos. Nas últimas décadas, houve um aumento na frequência, na intensidade e nos impactos gerados causando danos e prejuízos cada vez maiores (UFSC/CEPED, 2013). A Figura 1a mostra o número de registros de desastres entre os anos de 1991 e 2012, enquanto que a Figura 1b mostra a frequência anual de enxurradas no Brasil no mesmo período.

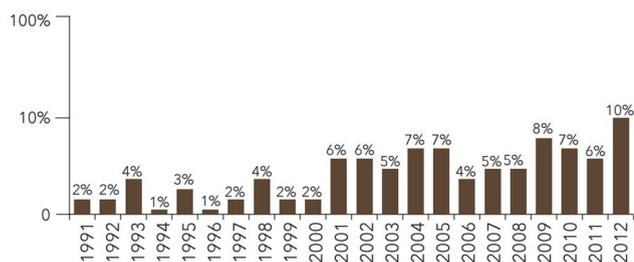


Figura 1a – Distribuição da porcentagem anual da ocorrência de desastres naturais entre 1991 e 2012 (UFSC/CEPED, 2013).

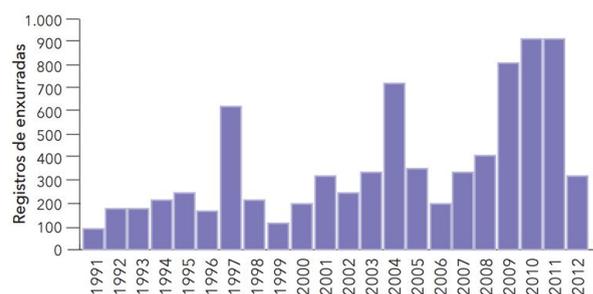


Figura 1b – Frequência anual de enxurradas entre 1991 e 2012 (UFSC/CEPED, 2013).

De acordo com a definição do COBRADE (2012), as enxurradas fazem parte do grupo hidrológico de desastres naturais. As enxurradas se desenvolvem rapidamente com efeitos devastadores para o meio ambiente e alto risco de perdas humanas (Younis, J. *et al.*, 2008).

Os resultados apresentados no Atlas do CEPED mostram que a frequência anual de enxurradas, no geral, cresceu juntamente com a frequência anual de desastres naturais, fato este que pode ser justificado pelo aumento da vulnerabilidade informado pela UFSC/CEPED (2013).

Apesar da vulnerabilidade, as enxurradas somente puderam ser deflagradas quando da ação dos fenômenos naturais, principalmente por chuvas intensas. Porém, estes fenômenos são de grande complexidade, pois geralmente estão relacionados com eventos meteorológicos de baixa previsibilidade, dificultando estudos para sua compreensão.

Neste contexto, o principal objetivo deste trabalho foi elaborar uma análise da aplicação de relações de intensidade-duração-frequência (IDF) para identificação de eventos de enxurradas e inundações no município de Bauru, contribuindo com o aumento desta compreensão, para este município, a partir da medição e transformação de acumulados em intensidades de precipitação.

2 - CHUVAS INTENSAS

As chuvas intensas ou precipitações máximas são retratadas pontualmente pelas curvas IDF e através da Precipitação Máxima Provável (PMP). Este último método é mais utilizado para

grandes obras, onde o risco de rompimento deve ser mínimo. Já as curvas IDF relacionam a duração, a intensidade e o risco da precipitação ser igualada ou superada em um determinado período. Segundo Tucci (2013), por mais que estes métodos caracterizem a precipitação máxima pontual, as características de sua distribuição temporal e espacial são importantes para a caracterização da vazão em uma bacia hidrográfica.

2.1 - Relações Intensidade-Duração-Frequência (IDF)

A precipitação máxima pontual pode ser caracterizada através das relações intensidade-duração-frequência. A determinação da relação entre estas três variáveis deve ser deduzida das observações das chuvas intensas durante um período de tempo suficientemente longo e representativo dos eventos extremos do local (Tucci, 2013). Essas curvas podem ser expressas por equações genéricas que têm a seguinte forma:

$$i_{t,TR} = K \cdot \frac{TR^m}{(t+t_0)^n} \quad (1)$$

sendo i a intensidade média da chuva, em milímetros por minuto (mm/min); t a duração da chuva, em minutos (min); TR o período de recorrência (ou de retorno), em anos; e ainda, m , n , t_0 e K são parâmetros relativos ao ajuste da equação.

3 - ÁREA DE ESTUDO

O município de Bauru encontra-se na região central do Estado de São Paulo. Possui uma área de 667,684 km² e população estimada, para o ano de 2017, de 371.690 pessoas, conforme dados do IBGE (2018). Praticamente quase todo o seu perímetro urbano encontra-se dentro da bacia hidrográfica do rio Bauru (Bauru, 2014), conforme mostrado na Figura 2.

Segundo Bauru (2017), o município se caracteriza por estar em uma região com estações seca e úmida bem definidas, sendo a estação mais úmida ocorrendo nos meses de verão/outono (de outubro a março) e a estação seca se iniciando no outono até o fim do inverno/primavera (de abril a setembro), sendo essa uma conformação típica de clima subtropical. A precipitação média anual é de 1490 mm ao ano, considerando o período de dados entre 1981 e 2015. Segundo Cardoso e Iwabe (2015), os sistemas frontais são os principais fenômenos meteorológicos relacionados com chuvas extremas na cidade de Bauru.

Segundo levantamento e estudo realizado por Bauru (2016), o sistema de drenagem urbana existente apresenta riscos bastante elevados, dado seu subdimensionamento, o que pode ser observado pelos inúmeros eventos anuais de cheia na bacia. Quanto aos desastres já ocorridos no município, o Plano Municipal de Saneamento Básico – PMSB (Bauru, 2017) catalogou as ocorrências para cada tipo de desastre, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Ocorrências cadastradas para cada tipo de desastre em Bauru (Bauru, 2017).

Tipo de Evento Extremo	Ocorrências Registradas
Alagamentos, Enxurradas	75
Inundações Graduais	90
Movimentos de Massa	04



Figura 2 – Bacias hidrográficas dos rios Bauru e Batalha, e perímetro urbano do município (Bauru, 2014).

4 - MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 - Eventos Selecionados

Previamente à obtenção dos dados pluviométricos, foi necessária a identificação dos eventos de enxurradas e inundações urbanas no município de Bauru. Para tanto, foi utilizado o banco de dados de eventos de desastres do Cemaden. Posteriormente, foram identificados todos os eventos cadastrados para o município entre os anos de 2014 e 2017, e selecionados apenas os eventos de enxurradas mais significativos, seja este com ou sem ocorrência cadastrada.

4.2 - Equação IDF para Bauru

A equação IDF adotada como uma das bases para este trabalho foi a equação elaborada por Martinez e Magni para o município de Bauru/SP (DAEE, 1999), disponível no website do Departamento de Águas e Energia Elétrica, órgão pertencente ao Governo do Estado de São Paulo, como segue:

$$i_{t,TR} = \{35,4487.(t+20)^{-0,8894} + 8,9664.(t+20)^{-0,7749} \cdot [-0,4772 - 0,9010.Ln.Ln(\frac{TR}{TR-1})]\} \times 60 \quad (2)$$

sendo i a intensidade da chuva, correspondente à duração t e tempo de retorno TR , em mm/min; t a duração da chuva em minutos (min); TR o tempo de retorno em anos.

Conforme DAEE (1999), a estação utilizada para elaborar a equação IDF para o município de Bauru foi a D6-036R, com coordenadas geográficas 22°19'S e 49°02'W, e altitude de 540 metros. Os períodos de dados históricos considerados foram de 1971 a 1973 e de 1975 a 1995, ou seja,

com duração total de 24 anos de dados históricos. Segundo os autores, esta equação é válida somente para durações de chuvas entre 10 e 1440 minutos .

4.3 - Metodologia de Aplicação

A metodologia proposta para aplicação da curva IDF é baseada em um método de cálculo para as intensidades máximas das precipitações acumuladas (referenciadas neste trabalho por $I_{MÁX}$) em intervalos de dez minutos, durante o período de um dia, o que propicia a plotagem do que denominou-se como curva $I_{MÁX}$. O principal objetivo dessa abordagem é analisar a curva $I_{MÁX}$ de uma determinada estação frente às curvas de tempo de retorno geradas pela equação IDF considerada.

De forma a validar a metodologia proposta, foi desenvolvida uma plataforma para a aplicação das curvas IDF em um ambiente operacional, denominada IDFAdmin (Papini *et al.*, 2017), a qual utiliza informações pluviométricas em tempo real, bem como informações históricas para retroanálise dos eventos. A plataforma funciona em ambiente Web e possibilita o cadastro dinâmico de equações IDF já existentes.

4.4 - Dados e Estações Pluviométricas

Para o cálculo da curva $I_{MÁX}$ foram utilizados somente os dados disponíveis das estações (PCDs) pluviométricas do Cemaden localizadas dentro da bacia hidrográfica do rio Bauru (Figura 3), visto que estas possuem discretização temporal de 10 minutos e são atualizadas em tempo real (Tabela 2).

Tabela 2 –Localização geográfica das PCDs pluviométricas utilizadas.

Estação	Latitude (S)	Longitude (W)
Vila Maracy	22°20'02"	49°03'25"
Bauru	22°18'39"	49°03'46"
Jardim Ferraz	22°21'25"	49°05'38"
Vila Pacífico	22°19'40"	49°06'07"
São Geraldo	22°17'46"	49°04'20"



Figura 3 – Localização espacial das PCDs pluviométricas na bacia hidrográfica do rio Bauru (delimitada pela linha azul).

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - Eventos Hidrológicos Selecionados

A partir da listagem dos eventos de enxurradas e inundações urbanas cadastradas pelo Cemaden e posterior averiguação no banco de dados do IPMEt/Unesp, foram identificados todos os eventos hidrológicos entre os anos de 2014 e 2017, e selecionados somente os significativos e que possuíam dados pluviométricos disponíveis (Tabela 3).

Tabela 3 – Eventos hidrológicos selecionados.

Ano	Evento	Processo	Data (Evento)	Houve ocorrências?
2017	1	EX/IN	21/05/2017	Sim
	2	EX	05/05/2017	Não
	3	-	05/02/2017	Sim
	4	EX	02/02/2017	Sim
	5	EX	18/01/2017	Sim
	6	EX	11/01/2017	Sim
	7	EX	09/01/2017	Sim
2016	8	EX/IN	06/02/2016	Não
	9	EX/IN	13/01/2016	Sim
2015	10	EX/IN	23/11/2015	Sim
	11	EX/IN	09/02/2015	Sim

5.2 - Curvas $I_{MÁX}$ dos Eventos

A partir da obtenção dos dados pluviométricos das cinco estações localizadas na área urbana de Bauru/SP (Tabela 2) para todos os eventos previamente selecionados (Tabela 3), foram calculadas as curvas $I_{MÁX}$ e comparadas com as curvas IDF do município. Foram selecionados apenas os gráficos mais significativos do ponto de vista comparativo entre as curvas $I_{MÁX}$ e a ocorrência (ou não) de eventos de enxurrada: a) Sem ocorrência: Evento 2 (Figura 4); b) Com ocorrência: Eventos 6 (Figura 5) e 9 (Figura 6).

Observa-se nas Figuras 5, 6 e 7 que as curvas $I_{MÁX}$ foram satisfatoriamente criadas para os eventos preliminarmente selecionados, evidenciando que o algoritmo de cálculo está ajustado aos objetivos da criação da curva $I_{MÁX}$.

Analisando as curvas $I_{MÁX}$ percebe-se também que, para o evento 2 (Figura 4), as curvas das estações Vila Maracy (VM), Bauru (B) e São Geraldo (SG) ultrapassaram o tempo de retorno de 1 ano (TR 1) e, ainda assim, não houve ocorrências de enxurradas no município. Por outro lado, nos eventos com ocorrências de desastres hidrológicos, no evento 6 (Figura 5) não houve intensidades maiores que o tempo de retorno de 1 ano e, no evento 9 (Figura 6), todas as curvas ultrapassaram o tempo de retorno de 1 ano, sendo que quatro delas ultrapassaram o tempo de retorno de 2

anos e uma delas (estação Bauru) oscilou praticamente em toda a curva relativa ao tempo de retorno de 10 anos.

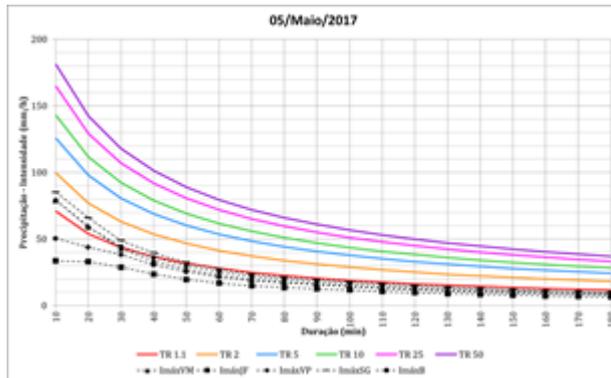


Figura 4 – Curvas I_{MAX} para evento sem ocorrência: Evento 2 (05/05/2017).

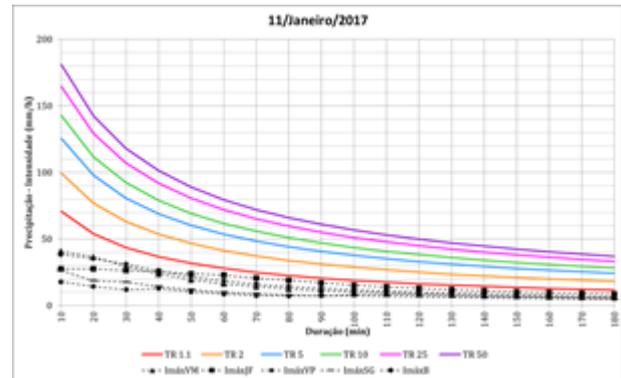


Figura 5 – Curvas I_{MAX} para evento com ocorrência: Evento 6 (11/01/2017).

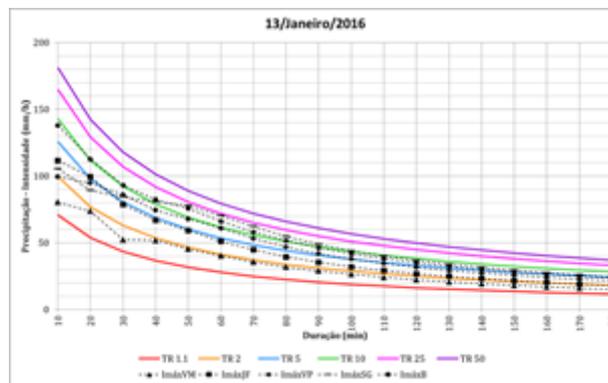


Figura 6 – Curvas I_{MAX} para evento com ocorrência: Evento 9 (13/01/2016).

Os cenários apresentados nas Figuras 4, 5 e 6 são justificados pelo fato de que as análises dos eventos não devem ser pautadas apenas pela variável precipitação, mas também devem ser considerados diversos outros fatores, tais como: características físicas das bacias hidrográficas, qualidade da infraestrutura local de drenagem urbana, gestão e manejo de águas pluviais, uso e ocupação do solo, grau de urbanização, entre outros. Dessa forma, estes fatores, somados à metodologia utilizada nas análises, proporcionam melhor embasamento para o processo de envio de alertas hidrológicos.

6 - CONCLUSÕES

As análises apresentadas neste trabalho permitiram observar que, considerando os problemas já diagnosticados no município de Bauru/SP, este possui alta recorrência de eventos hidrológicos extremos, provavelmente pelo desconhecimento do balanço hídrico em uma bacia hidrográfica amplamente urbanizada e pelo alto risco adotado pela gestão de manejo de águas pluviais urbanas.

A plataforma desenvolvida e aplicada neste trabalho permite a retroanálise e o monitoramento em tempo real de eventos hidrológicos adversos. A funcionalidade de retroanálise permite o registro das características pluviométricas e também das diversas variáveis que podem ser identificadas nos eventos com potencial para deflagração de desastres naturais. A comparação das curvas $I_{MÁX}$ e IDF permitem inclusive a diferenciação, com embasamento no planejamento do município, de problemas de infraestrutura em relação a desastres naturais.

Como trabalho futuro, pretende-se a continuação deste trabalho a partir da inclusão do cálculo de uma nova curva $I_{MÁX}$ considerando ferramentas de *nowcasting* para, de fato, alertar possíveis eventos hidrológicos de curtíssima resposta, principalmente, nos casos de enxurradas urbanas em municípios nos quais não existem manejo de águas pluviais urbanos adequado, ou ainda, possuem infraestrutura, mas que atuem de forma ineficiente perante à necessidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAURU. Diagnóstico do Plano de Macrodrenagem. 2014.
- BAURU. Estudos e Projetos para Mitigação de Inundações, Requalificação de Sistema Viário e Urbanização na Bacia do córrego Água das Flores: Estudos Hidráulicos e de Viabilidade Técnica e Econômica. 2016. 81p.
- BAURU. Plano Municipal de Saneamento Básico. v.1. 2017.
- BERTONE, P.; MARINHO, C. VI Congresso CONSAD de Gestão Pública: Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais: A Visão do Planejamento. 2013. Disponível em: <http://repositorio.fjp.mg.gov.br/consad/bitstream/123456789/966/1/C6_TP_GEST%C3%83O%20DE%20RISCOS%20E%20RESPOSTA.pdf>.
- CARDOSO, A. A.; IWABE, C. M. N. . Climatologia da Duração e Intensidade da Chuva em Bauru.. In: VI Simpósio Internacional de Climatologia, 2015, Natal. VI Simpósio Internacional de Climatologia, 2015.
- Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres – CEPED/UFSC. Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012. 2a. ed. Florianópolis: CEPED/UFSC, 2013. 168p. Disponível em: <<http://150.162.127.14:8080/atlas/Brasil%20Rev%202.pdf>>.
- COBRADE - Classificação e Codificação Brasileira de Desastres Brasil. Ministério da Integração Nacional. Instrução Normativa N°1 de 24 de agosto de 2012.
- PAPINI, J. et al. (2017). “Software IDFAdmin - Sistema de previsão e monitoramento de desastres naturais”. São José dos Campos - São Paulo: MCTIC/Cemaden. (No prelo).
- SÃO PAULO. DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. Equações de Chuvas Intensas do Estado de São Paulo – Convênio DAEE-USP. São Paulo: DAEE/CTH. 1999. 124p.
- TUCCI, Carlos E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4ª ed. Porto Alegre: ABRH, 2013. 944 p.
- YOUNIS, J; ANQUETIN, S.; THIELEN, J. The Benefit of High-Resolution Operational Weather Forecasts for Flash Flood Warning. Hydrology and Earth System Sciences, 30 de julho de 2008. Vol. 12, p. 1039–1051. Disponível em: <www.hydrol-earth-syst-sci.net/12/1039/2008/>.