

ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE PADRÕES DE CHUVA DE PROJETO A PORTO ALEGRE

Daniela da Costa Bemfica, Joel A. Goldenfum e André L. L. da Silveira

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Caixa Postal 15029 – CEP 91501-970 Porto Alegre, RS
bemfica@conex.com.br, jag@if.ufrgs.br, silveira@if.ufrgs.br*

RESUMO

As chuvas (ou hietogramas) de projeto são metodologias de representação simplificada da distribuição temporal da precipitação, utilizadas basicamente como entrada em modelos de simulação chuva-vazão, para dimensionamento de estruturas hidráulicas.

O objetivo do presente trabalho é analisar a aplicabilidade de metodologias tradicionais de obtenção de hietogramas de projeto, desenvolvidas em outros países, às características da cidade de Porto Alegre. Nessa análise, procurou-se empregar as condições usualmente adotadas em projetos de engenharia.

Para tanto, foram obtidas chuvas de projeto, através da aplicação de diferentes métodos, a partir dos dados de duas estações pluviográficas em funcionamento na cidade. A seguir, foram simuladas vazões, com base nas chuvas de projeto determinadas e nos maiores eventos chuvosos reais registrados nas estações em análise. Foi ajustada uma distribuição estatística às séries de descargas máximas assim determinadas. As vazões máximas geradas pelas diferentes chuvas de projeto foram, então, comparadas com as vazões de pico obtidas, a partir do ajuste estatístico, visando, com isso, avaliar a aplicabilidade dos padrões de chuva de projeto estudados às características pluviográficas da cidade de Porto Alegre.

Em ambos os postos pluviográficos, verificou-se, para as menores durações, pequenas superestimações e até, em alguns casos, subestimações das vazões geradas por todas as chuvas de projeto empregadas, confirmando a prática de uso, para pequenas áreas, do Método Racional. Para as durações mais longas, ao contrário, os valores de vazões de pico obtidos, a partir das chuvas de projeto, foram bastante superiores aos determinados pelo ajuste estatístico. Tal superestimação já era esperada, tendo em vista que o objetivo básico, das metodologias de obtenção de chuvas de projeto, é gerar eventos que tenham efeitos máximos no escoamento.

INTRODUÇÃO

Estruturas hidráulicas são freqüentemente dimensionadas a partir de uma vazão ou de um hidrograma de projeto, com determinado risco de ocorrência. Como séries longas de descargas observadas são escassas, os hidrogramas de projeto são usualmente determinados através de modelos de transformação chuva-vazão, tendo em vista que, em geral, há disponibilidade de registros mais longos de precipitação. Além disso, as séries de vazões, quando existem, estão mais sujeitas a alterações antrópicas, que produzem não-estacionariedade.

Os modelos chuva-vazão têm como entrada dados de precipitação. O conhecimento da distribuição temporal da intensidade da chuva durante as tormentas assume, então, grande importância, pois condiciona o volume infiltrado e a forma do hidrograma de escoamento superficial direto originado pela chuva excedente.

O “hietograma” é uma forma gráfica que mostra a intensidade da chuva ao longo de sua duração. As “chuvas de projeto” são metodologias de representação simplificada da distribuição temporal da precipitação, utilizadas basicamente como entrada em modelos de simulação chuva-vazão.

De acordo com Voorhees & Wenzel (1984), uma chuva de projeto, com determinado período de retorno, pode ser completamente definida por três elementos básicos. São eles:

- a. a altura precipitada ou a intensidade média para a duração e o período de retorno considerados;
- b. a duração do evento;
- c. a distribuição temporal (ou hietograma) da chuva.

Também devem ser levadas em consideração, no caso de bacias hidrográficas com áreas permeáveis, as condições antecedentes de umidade do solo.

Segundo o trabalho, apresentado por Aron & Adl (1992), a utilização de chuvas de projeto, em

hidrologia urbana, tem como principal vantagem sua grande simplicidade de obtenção. Como sua aplicação depende de poucos dados, esses procedimentos podem ser utilizados em bacias que não apresentem um bom monitoramento e, em projetos que não disponham de fundos, ou tempo para obtenção de registros detalhados de precipitação. Os mesmos autores apresentam, como uma grande desvantagem dessas metodologias, a associação implícita entre os tempos de retorno da chuva e da vazão, baseada na suposição da linearidade do sistema. A bacia hidrográfica é, contrariamente a essa suposição, um sistema não-linear. Desbordes (1982) salientou ainda que, nos casos das chuvas de projeto derivadas de curvas IDF, há uma superestimação das vazões de pico e dos volumes escoados, pois todos os elementos do hietograma têm individualmente a probabilidade da curva de onde foram retirados. As curvas IDF representam uma combinação de valores obtidos de diferentes tormentas e, dificilmente, representam um único evento crítico.

Os atuais modelos computacionais são capazes de simulações contínuas de escoamento, a partir de longas séries de registros de precipitação, o que dispensaria o uso de simplificações, como as chuvas de projeto. Entretanto, as chuvas de projeto ainda têm considerável popularidade devido à sua simplicidade, à pequena quantidade de informação necessária para a sua obtenção, ao alto custo, e tempo envolvidos na simulação contínua de escoamento.

Diversas metodologias para a obtenção de chuvas de projeto têm sido desenvolvidas e, em sua grande maioria, não visam à reprodução de eventos reais, mas sim de situações com efeitos críticos ao escoamento. Tais procedimentos são obtidos, a partir da análise de dados observados de precipitação da região, em estudo e devem ser aplicados em projetos dessa mesma região. Esses métodos poderiam ser utilizados em outras áreas, mesmo que com características climáticas semelhantes às da região do trabalho original, somente após a verificação de sua validade local.

Isso, entretanto, não é o que geralmente ocorre. Poucos estudos foram realizados sobre a distribuição temporal das precipitações na cidade de Porto Alegre. Nos projetos desenvolvidos na cidade, quando há necessidade de um hietograma de projeto, acabam sendo usadas, por falta de opções, metodologias obtidas em outros países e que podem não ser aplicáveis às características das tormentas locais. A aplicação de uma chuva de projeto obtida por procedimentos que se adaptem às características climáticas da região, ou mesmo desenvolvida especificamente para essa área,

certamente otimizaria os projetos locais de drenagem urbana, possibilitando inclusive uma redução de custos.

O objetivo do presente trabalho foi analisar a aplicabilidade de diferentes padrões de chuvas de projeto, nenhum deles desenvolvidos em nosso país, às características pluviográficas da cidade de Porto Alegre, utilizando as condições usualmente adotadas em projetos de engenharia.

DETERMINAÇÃO DE RELAÇÕES IDF PARA PORTO ALEGRE

No presente trabalho, foram utilizados dados de dois postos pluviográficos localizados em Porto Alegre. A estação Aeroporto, situada em uma zona urbanizada da cidade, é a mais antiga em funcionamento na cidade, porém sua série de dados apresenta falhas. Foram obtidos dados dos períodos de novembro de 1962 a setembro de 1964 e janeiro de 1968 a dezembro de 1987, num total de 21 anos e 11 meses de registros. A discretização temporal máxima obtida foi em intervalos de 10 minutos, apesar de o pluviógrafo ter autonomia de 1 dia, pois a qualidade da impressão dos gráficos era bastante baixa. Como critério de separação de eventos, adotou-se que um período seco (sem chuva) maior ou igual a 4 horas caracterizaria um novo evento de chuva. Tal critério foi escolhido a fim de tentar garantir a independência entre os eventos.

O posto 8ª Distrito de Meteorologia (8º DISME) tem registros a partir de setembro de 1974 e, até o presente, não há falhas. Os pluviogramas desses 23 anos e 8 meses (setembro de 1974 a abril de 1998) foram digitalizados, com uma discretização temporal de 5 minutos. O critério adotado para separação de eventos foi o mesmo utilizado na série do posto Aeroporto, isto é, períodos de chuva separados por 4 horas ou mais, sem precipitação, caracterizam eventos distintos.

No presente trabalho, levando em consideração o tamanho das séries de registros pluviográficos disponíveis para cada posto em estudo, foi utilizada a técnica das séries anuais, que consiste em, para cada duração de interesse, obter-se a maior intensidade de chuva em cada ano de registros, independentemente de seu valor.

Foram obtidas, para cada um dos postos analisados, séries de máximos anuais. A essas séries foi ajustada uma distribuição estatística de Gumbel, com parâmetros determinados pelo método dos momentos. As expressões matemáticas abaixo foram ajustadas às intensidades fornecidas,

pelo ajuste Gumbel, para os postos Aeroporto e 8° DISME, respectivamente.

$$i_{m\acute{a}x} = \frac{826,806 \times Tr^{0,143}}{(td + 13,326)^{0,793}} \quad (1)$$

$$i_{m\acute{a}x} = \frac{1297,9 \times Tr^{0,171}}{(td + 11,619)^{0,85}} \quad (2)$$

onde $i_{m\acute{a}x}$ é a intensidade máxima, em mm/h; Tr o período de retorno, em anos e td a duração da chuva, em minutos.

A Expressão (1) foi comparada com a curva IDF determinada por Goldenfum et al. (1991). A Expressão (2) foi comparada com as curvas IDF determinadas por Goldenfum et al. (1991) e por Silveira (1996). As Tabelas 1 e 2 apresentam essas comparações, para diferentes durações e período de retorno de 5 anos. Nas Figuras 1 e 2, são apresentadas as curvas IDF calculadas pelas diferentes formulações, para o mesmo tempo de retorno. Para os ajustes obtidos no presente trabalho, são também fornecidos os intervalos de confiança de 90%.

Pela análise das Tabelas 1 e 2, percebe-se uma boa aproximação entre os valores obtidos pelas diferentes formulações. Para as durações mais longas, a nova expressão fornece valores ligeiramente mais altos do que os obtidos por Goldenfum et al. (1991), para ambos os postos pluviográficos. Tendo em vista que a expressão do estudo de Goldenfum et al. (1991) foi determinada, com base em séries de durações até 180 minutos, os baixos valores obtidos encontram-se em seu ramo extrapolado (e de menor confiabilidade).

Para o posto 8° DISME, observa-se que a IDF de Silveira (1996), subestima os valores para as menores durações. Sua representatividade, contudo, é menor devido ao curto período de dados utilizado.

Com base nas comparações acima descritas e considerando que, no presente estudo, foram utilizadas séries de dados de precipitação consideravelmente mais longas do que nos trabalhos anteriores, as Expressões (1) e (2) foram adotadas, quando necessário, nas etapas posteriores desse trabalho.

DETERMINAÇÃO DE CHUVAS DE PROJETO PARA PORTO ALEGRE

Para a avaliação da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto, à cidade de Porto Ale-

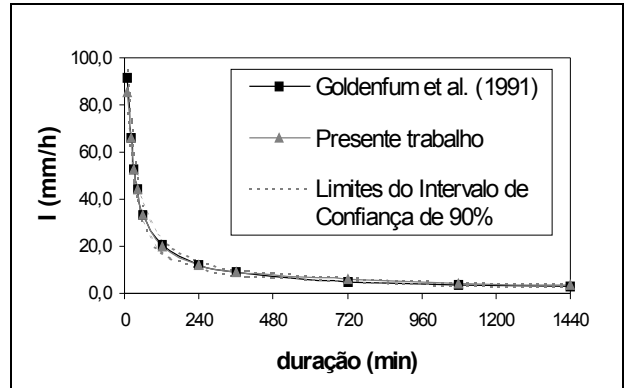


Figura 1. Comparação de diferentes formulações IDF, $Tr = 5$ anos (aeroporto).

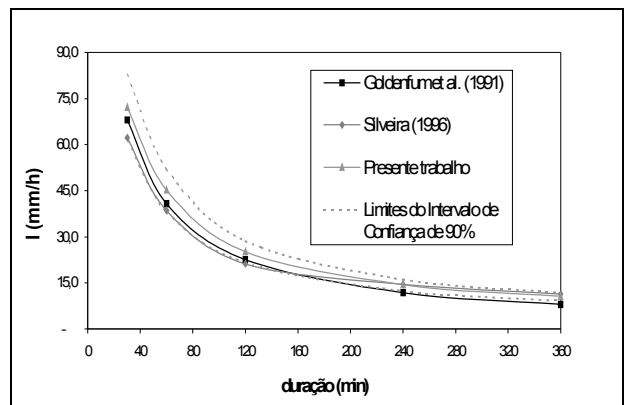


Figura 2. Comparação de diferentes formulações IDF, $Tr = 5$ anos (8° DISME).

Tabela 1. Intensidades (mm/h) obtidas por diferentes formulações IDF, para $Tr = 5$ anos (aeroporto).

	30'	60'	120'	240'	360'
Goldenfum et al. (1991)	52,6	33,6	20,4	12,1	8,8
Presente trabalho	52,4	34,5	21,5	12,9	9,5

Tabela 2. Intensidades (mm/h) obtidas por diferentes formulações IDF, para $Tr = 5$ anos (8° DISME).

	30'	60'	120'	240'	360'
Goldenfum et al. (1991)	68,1	40,8	22,5	11,8	8,0
Silveira (1996)	62,2	38,6	21,2	14,6	11,4
Presente trabalho	71,8	45,3	27,0	15,6	11,2

gre, foram analisadas quatro metodologias de obtenção desses padrões. Os procedimentos selecionados foram:

- método de Chicago (Keifer & Chu, 1957), por ser um modelo bastante difundido e aplicado;
- método dos Blocos Alternados (citado por Zahed & Marcellini, 1995), por ser bastante aplicado na prática de projetos de engenharia;
- hietograma Triangular (Yen & Chow, 1980), por sua extrema simplicidade e facilidade de utilização;
- método de Pilgrim & Cordery (1975), por fornecer padrões de chuva bastante diversos dos citados acima e mais similares aos de eventos reais.

Método de Chicago

Esse método parte da premissa de que o volume de chuva, que cai durante o período de máxima intensidade, pode ser obtido a partir da curva intensidade-duração para uma dada frequência, selecionada por critérios de projeto. É gerado, então, um hietograma sintético, representando uma precipitação “completamente adiantada”, ou seja, cujo pico se encontra no início da chuva. Para a localização do pico de intensidade da chuva, é introduzido um coeficiente r , que é uma medida do adiantamento do padrão de chuva. Segundo Keifer & Chu (1957), tal coeficiente pode ser determinado de duas formas. Uma delas é a análise da posição do pico em eventos chuvosos históricos críticos. A outra é através da determinação da precipitação antecedente ao pico nesses mesmos eventos históricos.

No presente trabalho, as duas formas de determinação do coeficiente r foram empregadas. Para ambos os postos pluviográficos estudados, os valores obtidos por cada um dos procedimentos foram bastante distintos, o que levantou a dúvida sobre a validade do segundo deles. Na obtenção do valor de r , com base na chuva antecedente a cada duração, supõe-se que as precipitações do local em estudo sigam a forma proposta por Keifer & Chu (1957), pois se empregam formulações do método. Essa suposição não é necessariamente verdadeira, o que pode ser percebido pela observação de registros históricos de precipitação. As equações propostas foram aplicadas para cada evento individualmente, e obtiveram-se valores superiores à unidade, o que é fisicamente ilógico. Todos esses problemas encontrados podem ser uma evidência de que o Método de Chicago não se adapta às características pluviográficas da cidade de Porto Alegre.

Já a determinação do coeficiente através da análise da posição do pico em eventos reais, além de não trabalhar com nenhuma equação específica do Método de Chicago, forneceu valores do coeficiente r mais similares aos obtidos para outras regiões.

Levando-se em consideração essas observações, optou-se por aplicar, na obtenção dos hietogramas de projeto para o presente trabalho, o valor de r determinado pela análise da posição do pico em tormentas históricas (0,373 para o posto Aeroporto e 0,270 para o posto 8° DISME). No cálculo desses valores não foram utilizadas formulações referentes ao Método de Chicago, o que viabiliza, inclusive, sua aplicação em outras metodologias de obtenção de chuvas de projeto.

Método dos blocos alternados

Por esse procedimento, após a definição da duração total da chuva a ser obtida e de seu tempo de retorno, são calculadas, com base nas relações IDF, as intensidades médias para as diversas durações até a duração total. Essas intensidades são, então, transformadas em alturas de chuva e representam os valores acumulados até o último intervalo. Os incrementos entre um valor acumulado e outro são calculados e rearranjados, de forma que o maior valor se localize no centro da duração total da chuva, e os demais sejam dispostos em ordem decrescente, sempre um à direita e outro à esquerda do bloco central, alternadamente.

Hietograma triangular

O método proposto por Yen & Chow (1980) baseia-se numa análise estatística dos momentos que descrevem a geometria (estrutura interna) do hietograma. Os autores sugerem a utilização apenas do primeiro momento, que gera uma distribuição triangular da intensidade da chuva. É obtida, então, uma chuva de projeto de forma triangular, na qual a posição do pico é dada por um coeficiente r , determinado a partir da análise de eventos históricos reais, e cuja altura é dada por:

$$H = \frac{2P}{td} \quad (3)$$

onde H é a altura do triângulo e P o total da precipitação.

O coeficiente r utilizado foi o mesmo já calculado para uso no Método de Chicago (0,373 para o posto Aeroporto e 0,270 para o posto 8° DISME).

Seu procedimento de cálculo levou em conta apenas observações da posição do pico em eventos históricos críticos.

Método de Pilgrim & Cordery

Esse método considera que as chuvas de projeto desenvolvidas, a partir de curvas IDF, não representam as tormentas inteiras, mas sim períodos intensos dentro das tormentas, podendo haver ocorrência de chuva antes ou depois desse período de pico.

Para obtenção dos hietogramas de projeto, são selecionados eventos históricos críticos do local em estudo, para cada uma das durações de interesse. Tais eventos são ordenados de acordo com o total precipitado e suas durações divididas em um número igual de intervalos. Esse número é escolhido segundo as necessidades práticas da estimativa de vazões, o que pode resultar em um número diferente de intervalos para cada duração. Para cada evento, os totais precipitados em cada intervalo são então obtidos, e lhes é atribuído um índice, que corresponde à posição do total precipitado no período, quando colocados em ordem decrescente. Quando ocorrem valores iguais de precipitação em mais de um período, o índice atribuído é uma média dos índices individuais. A seguir é determinada a porcentagem da chuva total que ocorre em cada período.

Esse procedimento é utilizado para determinar a ordem cronológica, mais usual, do período mais intenso de chuva. Para cada duração, a distribuição temporal da chuva é, então, obtida pela média das porcentagens de chuva para cada período. A distribuição temporal assim proposta leva em conta a variabilidade média da chuva intensa, em contraste à média simples assumida por outros métodos.

Através da aplicação das quatro metodologias, acima expostas, foram determinados hietogramas de projeto para as durações de 30, 60, 120 e 240 minutos e períodos de retorno de 2 e 5 anos (usualmente utilizados para projetos de microdrenagem). As Figuras 3 a 10 apresentam as chuvas de projeto obtidas para 2 anos de tempo de retorno e duração de 240 minutos.

Para ambos os postos pluviográficos, os hietogramas de pequena duração apresentaram um padrão razoavelmente semelhante entre si, já sendo delineada uma tendência, que se acentuou nas demais durações, de maiores picos de intensidade nos gráficos, obtidos pelos métodos de Chicago e dos Blocos Alternados.

Para a duração de 60 minutos, novamente se observou a tendência de maiores picos nos

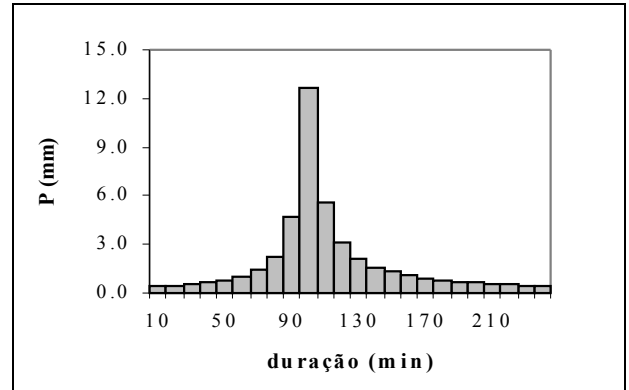


Figura 3. Hietograma de projeto, método de Chicago, $t_d = 240$ minutos e $T_r = 2$ anos (aeroporto).

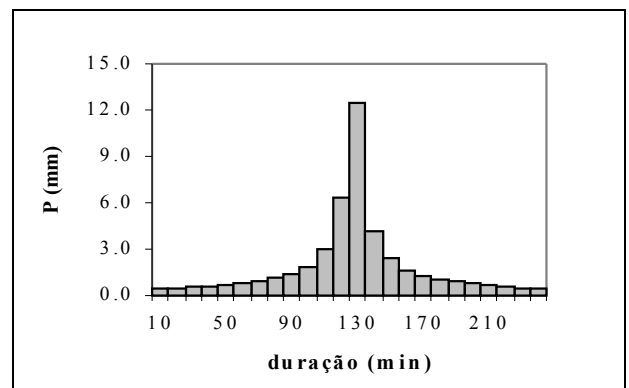


Figura 4. Hietograma de projeto, método dos blocos alternados, $t_d = 240$ minutos e $T_r = 2$ anos (aeroporto).

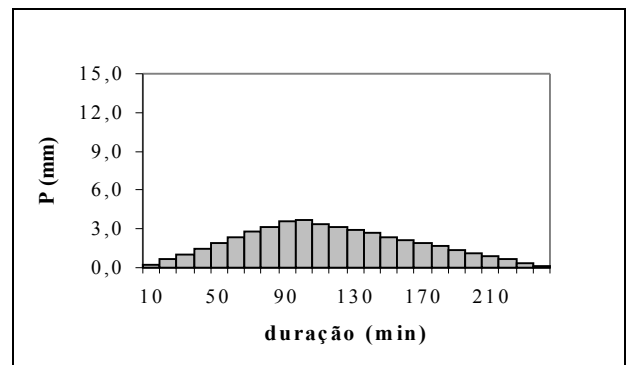


Figura 5. Hietograma de projeto, método de Yen & Chow (Triangular), $t_d = 240$ minutos e $T_r = 2$ anos (aeroporto).

hietogramas de Chicago e dos Blocos Alternados. Basicamente, esses hietogramas diferenciam-se pela posição em que esse pico ocorre. Enquanto, no método dos Blocos Alternados, o intervalo de

máxima é sempre fixado na metade da duração da chuva, no método de Keifer & Chu (1957), ele depende do valor de r obtido para cada região. Para essa duração, a chuva de projeto de Pilgrim & Cordery (1975) já começou a apresentar padrões distintos das demais.

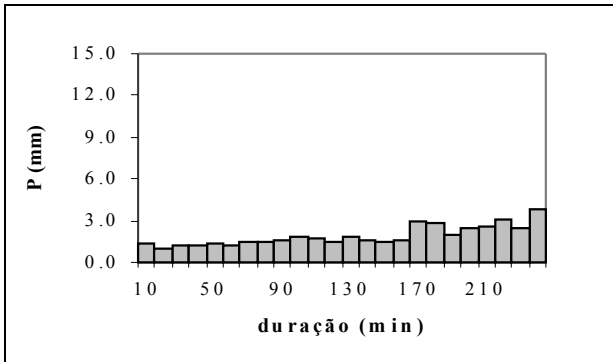


Figura 6. Hietograma de projeto, método de Pilgrim & Cordery, $t_d = 240$ minutos e $T_r = 2$ anos (aeroporto).

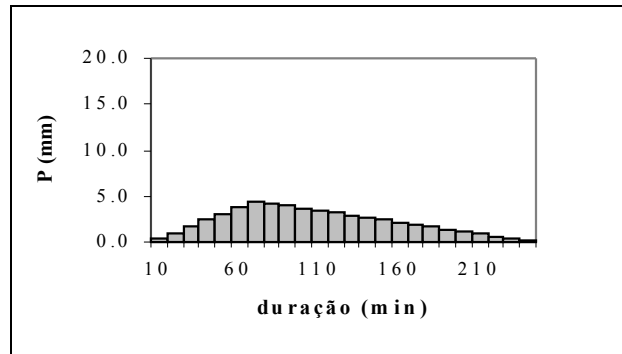


Figura 9. Hietograma de projeto, método de Yen & Chow (Triangular), $t_d = 240$ minutos e $T_r = 2$ anos (8° DISME).

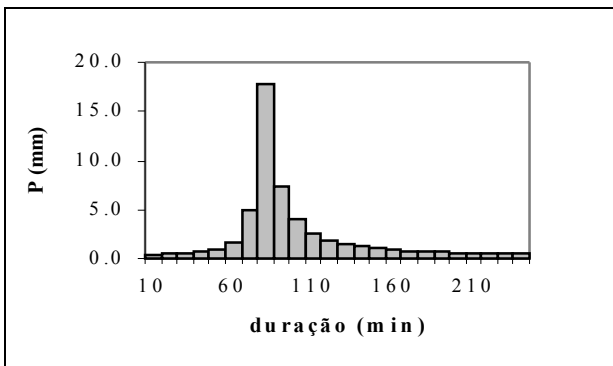


Figura 7. Hietograma de projeto, método de Chicago, $t_d = 240$ minutos e $T_r = 2$ anos (8° DISME).

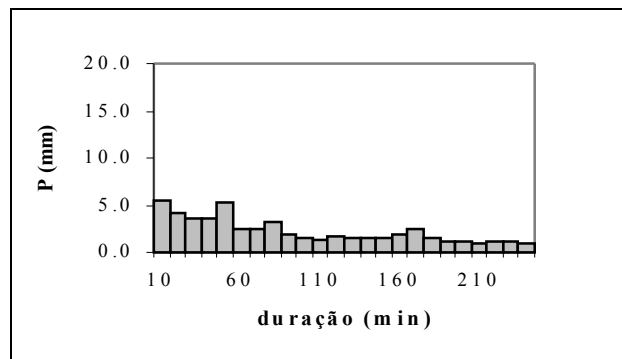


Figura 10. Hietograma de projeto, método de Pilgrim & Cordery, $t_d = 240$ minutos e $T_r = 2$ anos (8° DISME).

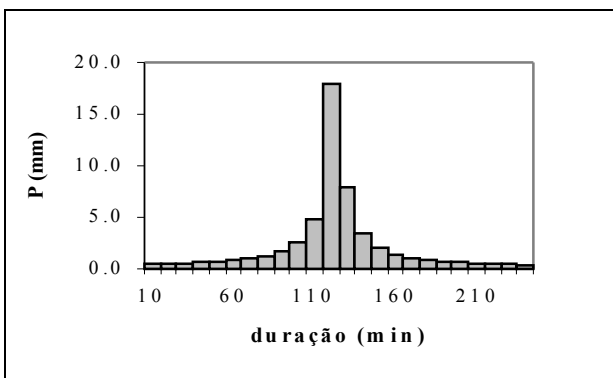


Figura 8. Hietograma de projeto, método dos blocos alternados, $t_d = 240$ minutos e $T_r = 2$ anos (8° DISME).

duração de 120 minutos apresentou as maiores intensidades em seus intervalos iniciais; já na chuva de projeto de duração de 240 minutos, os picos de intensidades ocorreram, ao contrário, no final do período chuvoso. Na análise dos resultados da estação 8° DISME observou-se, para a duração de 240 minutos, que o padrão de chuva de Pilgrim & Cordery não se assemelha ao obtido para o posto Aeroporto, apresentando maiores intensidades no início da duração da chuva. Pode-se perceber que, com a ocorrência desses múltiplos picos, os hietogramas de Pilgrim & Cordery passam a ter um aspecto mais condizente com a distribuição temporal de eventos reais.

COMPARAÇÃO ENTRE VAZÕES SIMULADAS A PARTIR DE DIFERENTES CHUVAS DE PROJETO

Como o interesse central do presente estudo é a análise do efeito de padrões de chuva de projeto, e não de diferentes modelos de transformação chuva-vazão, optou-se pela utilização de um modelo hidrológico bastante simples. A escolha recaiu no modelo apresentado pelo Soil Conservation Service (SCS, 1957; apud Tucci, 1993), que propõe a separação do escoamento com o uso do parâmetro CN e a modelação do escoamento superficial através do hidrograma unitário triangular. Justamente devido à sua simplicidade, esse é um modelo de uso amplamente difundido.

Partindo da premissa de que a duração da chuva de projeto a ser empregada é igual ao tempo de concentração da área contribuinte, optou-se por trabalhar com quatro bacias hidrográficas de formato retangular, com declividades da ordem de 1%, tempos de concentração de 30, 60, 120 e 240 minutos (durações dos hietogramas de projeto determinados no capítulo anterior) e áreas de uma ordem de grandeza compatível com essas características. Na Tabela 3 são fornecidas as descrições das bacias hidrográficas hipotéticas assim definidas, utilizadas nas simulações chuva-vazão. Adotou-se para o coeficiente CN, que busca retratar as condições de cobertura e o tipo de solo, um valor de 90, a fim de representar bacias urbanizadas.

Foram, portanto, simuladas vazões, pelo modelo do SCS, para as quatro bacias acima descritas. Foram utilizados os hietogramas de projeto anteriormente determinados, para as durações de 30, 60, 120 e 240 minutos e tempos de retorno de 2 e 5 anos, usualmente utilizados no dimensionamento de redes primárias de drenagem urbana.

As Tabelas 4 a 7 mostram um resumo dos resultados obtidos nas simulações realizadas, fornecendo as vazões de pico e os volumes totais escoados, para os tempos de retorno de 2 e 5 anos, bem como a diferença percentual entre as vazões e volumes máximos e mínimos obtidos, para todas as bacias em estudo. As Figuras 11 a 14 mostram os hidrogramas gerados a partir das diferentes chuvas de projeto, para as durações de chuva de 30 e 240 minutos e o período de retorno de 5 anos.

Observando as Tabelas 4 a 7 e as Figuras 11 a 14, pode-se notar que os hidrogramas calculados, a partir dos diversos hietogramas de projeto, têm volumes bastante similares para todas as durações estudadas. As diferenças entre os volumes máximos e mínimos dos hidrogramas obtidos são

Tabela 3. Características das bacias hidrográficas hipotéticas adotadas.

Bacia	Área (km ²)	tc (min)
B1	1,5	30
B2	5,0	60
B3	20,0	120
B4	80,0	240

bastante pequenas, variando entre 0,2 e 1,7%, para o posto Aeroporto, e 0,3 e 2,5%, para o posto 8° DISME. Isso deve-se ao alto valor do coeficiente CN das bacias hipotéticas utilizadas, que caracterizam superfícies urbanizadas, nas quais a infiltração não é significativa.

As vazões máximas simuladas, ao contrário, apresentam uma faixa de variação bem mais ampla, com as diferenças crescendo com o aumento da duração da chuva de projeto. Na estação Aeroporto, as maiores diferenças foram verificadas nos hidrogramas gerados a partir dos hietogramas de projeto de duração 60 minutos. A diferença entre as vazões máximas calculadas pelo modelo SCS chega, para essa duração, a até 13,5%. Variações consideravelmente superiores foram observadas nos resultados do posto 8° DISME chegando, para a duração de 240 minutos, a até 24%. Percebe-se também que, à exceção da duração de 30 minutos, para a qual todas as vazões de pico simuladas foram bastante semelhantes, nas demais simulações realizadas a maior vazão de pico foi obtida com o uso da chuva de projeto do método dos Blocos Alternados, enquanto a menor vazão se originou do uso das chuvas de projeto do método de Pilgrim & Cordery. Esse resultado já era, até certo ponto esperado, visto que esse método, ao contrário dos demais, procura a obtenção de hietogramas de projeto que tenham relação com os padrões de precipitação do local em estudo, gerando, assim, hidrogramas com menores vazões máximas.

COMPARAÇÃO ENTRE VAZÕES SIMULADAS A PARTIR DE CHUVAS DE PROJETO E DE EVENTOS HISTÓRICOS

Os resultados dessas simulações foram comparados com as vazões calculadas a partir dos maiores eventos chuvosos anuais de cada estação pluviográfica. Foram utilizadas as mesmas bacias hipotéticas já descritas. Para cada duração, obte-

Tabela 4. Volumes e vazões de pico simulados pelo modelo SCS, Tr = 2 anos (aeroporto).

Bacia	Chicago		Blocos alternados		Triangular		Pilgrim & Cordery		Variação máxima	
	Pico (m ³ /s)	Volume (mm)	Pico (m ³ /s)	Volume (mm)	Pico (m ³ /s)	Volume (mm)	Pico (m ³ /s)	Volume (mm)	Pico (%)	Volume (%)
B1	4,5	6,4	4,5	6,4	4,5	6,5	4,5	6,5	0,7	0,9
B2	14,5	11,5	14,5	11,4	14,6	11,5	13,9	11,4	5,2	0,6
B3	45,9	16,9	46,6	16,9	45,9	17,0	41,6	17,0	11,9	0,9
B4	128,3	23,0	134,7	23,1	128,2	23,2	127,7	23,2	5,5	0,9

Tabela 5. Volumes e vazões de pico simulados pelo modelo SCS, Tr = 5 anos (aeroporto).

Bacia	Chicago		Blocos alternados		Triangular		Pilgrim & Cordery		Variação máxima	
	Pico (m ³ /s)	Volume (mm)	Pico (m ³ /s)	Volume (mm)	Pico (m ³ /s)	Volume (mm)	Pico (m ³ /s)	Volume (mm)	Pico (%)	Volume (%)
B1	5,8	8,4	6,0	8,5	5,9	8,5	5,8	8,5	2,1	1,7
B2	18,4	14,5	18,6	14,5	18,6	14,6	17,7	14,6	5,0	0,2
B3	57,6	21,2	58,6	21,2	57,0	21,2	51,7	21,2	13,5	0,4
B4	160,0	28,7	166,7	28,5	157,3	28,5	155,7	28,5	7,1	0,7

Tabela 6. Volumes e vazões de pico simulados pelo modelo SCS, Tr = 2 anos (8° DISME).

Bacia	Chicago		Blocos alternados		Triangular		Pilgrim & Cordery		Variação máxima	
	Pico (m ³ /s)	Volume (mm)	Pico (m ³ /s)	Volume (mm)	Pico (m ³ /s)	Volume (mm)	Pico (m ³ /s)	Volume (mm)	Pico (%)	Volume (%)
B1	8,8	11,6	9,0	11,8	9,0	11,8	8,8	11,8	2,1	1,9
B2	23,1	18,0	24,6	18,0	23,8	17,9	21,9	17,7	12,3	1,3
B3	65,1	24,0	70,1	24,1	65,4	24,1	60,3	24,0	16,2	0,3
B4	164,0	29,7	177,3	29,9	162,1	29,8	145,2	30,0	22,1	0,9

Tabela 7. Volumes e vazões de pico simulados pelo modelo SCS, Tr = 5 anos (8° DISME).

Bacia	Chicago		Blocos alternados		Triangular		Pilgrim & Cordery		Variação máxima	
	Pico (m ³ /s)	Volume (mm)	Pico (m ³ /s)	Volume (mm)	Pico (m ³ /s)	Volume (mm)	Pico (m ³ /s)	Volume (mm)	Pico (%)	Volume (%)
B1	11,5	15,3	11,9	15,7	11,9	15,7	11,5	15,6	3,7	2,5
B2	29,6	23,0	31,8	23,1	30,7	23,1	28,5	23,1	11,6	0,4
B3	82,6	30,4	88,6	30,4	82,4	30,3	77,0	30,9	15,1	1,7
B4	210,2	38,0	225,2	37,9	204,0	37,7	181,5	37,7	24,1	0,7

ve-se uma série de vazões de pico geradas pelos maiores eventos chuvosos históricos.

Uma análise de frequência foi realizada para cada uma das séries assim obtidas, a fim de determinar os períodos de retorno correspondentes aos hidrogramas calculados. Os valores de vazões máximas, obtidos através do ajuste da lei estatística de Gumbel, encontram-se na Tabelas 8 e 9.

A seguir, procedeu-se à comparação entre hidrogramas de mesmo período de retorno, obtidos com o uso das diversas metodologias de chuva de projeto e a partir da função estatística ajustada. Assumiu-se que os hidrogramas obtidos, a partir das chuvas de projeto, têm o mesmo tempo de recorrência das chuvas que os geraram. A diferença percentual, entre as vazões de pico dos diferen-

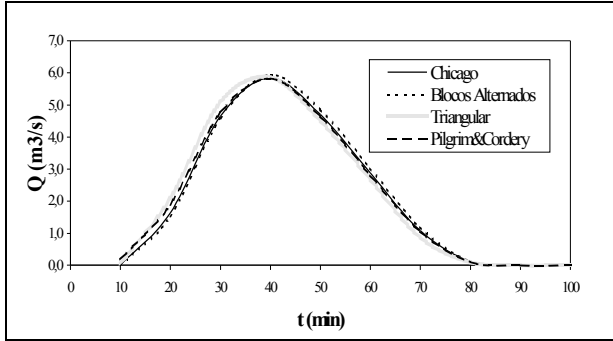


Figura 11. Hidrogramas simulados pelo modelo SCS, para diferentes chuvas de projeto, td = 30 min, Tr = 5 anos (aeroporto).

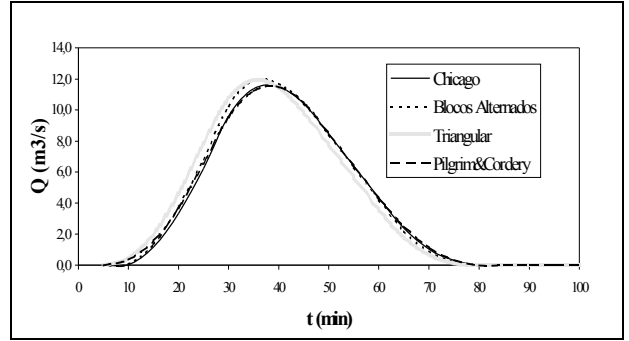


Figura 13. Hidrogramas simulados pelo modelo SCS, para diferentes chuvas de projeto, td = 30 min, Tr = 5 anos (8º DISME).

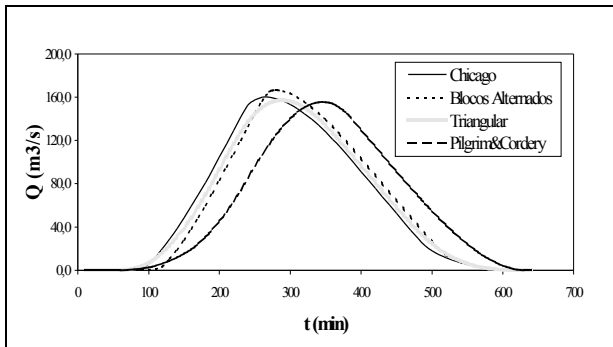


Figura 12. Hidrogramas simulados pelo modelo SCS, para diferentes chuvas de projeto, td = 240 min, Tr = 5 anos (aeroporto).

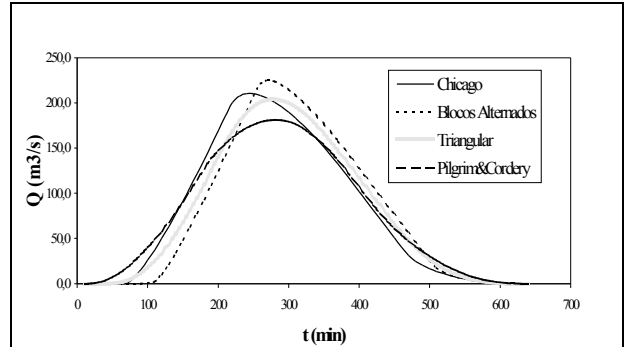


Figura 14. Hidrogramas simulados pelo modelo SCS, para diferentes chuvas de projeto, td = 240 min, Tr = 5 anos (8º DISME).

tes hidrogramas, foi determinada através da Equação (4). Tais comparações são apresentadas nas Tabelas 10 e 11.

$$\Delta q = \frac{q_{proj} - q_{hist}}{q_{hist}} \times 100\% \quad (4)$$

onde Δq é a diferença percentual entre a vazão de pico simulada através de chuvas de projeto e ajustada, a partir da série de vazões simuladas, com base em eventos históricos; q_{proj} a vazão de pico simulada através de chuvas de projeto e q_{hist} a vazão de pico ajustada, a partir da série de vazões simuladas, com base em eventos históricos.

Analisando os resultados referentes ao posto Aeroporto, observa-se que as diferenças encontradas variam entre -4% e +33%, isto é, a vazão de pico obtida a partir das chuvas de projeto de Pilgrim & Cordery, para a bacia hipotética B1 e o período de retorno de 5 anos, mostrou-se 4% inferior à calculada pelo ajuste Gumbel, enquanto a vazão determinada, com base no método dos Blocos Alternados, para a bacia B4 e o tempo de re-

Tabela 8. Vazões de pico (m³/s) obtidas pelo ajuste Gumbel (aeroporto).

Tr (anos)	30'	60'	120'	240'
2	4,1	12,2	35,3	101,5
5	6,1	18,2	52,0	142,4

Tabela 9. Vazões de pico (m³/s) obtidas pelo ajuste Gumbel (8º DISME).

Tr (anos)	30'	60'	120'	240'
2	7,2	18,9	48,2	119,6
5	11,7	28,8	73,1	173,2

torno de 2 anos, revelou-se 33% superior à obtida pelo ajuste estatístico. Já para a estação 8º DISME, as diferenças encontradas situam-se entre -1% (chuvas de projeto de Chicago e de Pilgrim & Cordery, bacia hipotética B1 e período de retorno de 5 anos) e +48% (Blocos Alternados, bacia B4 e tempo de retorno de 2 anos). Essas

Tabela 10. Diferença percentual entre vazões máximas simuladas a partir de chuvas de projeto e eventos históricos, em % (aeroporto).

Bacia	Chicago		Blocos alternados		Triangular		Pilgrim & Cordery	
	Tr = 2 anos	Tr = 5 anos	Tr = 2 anos	Tr = 5 anos	Tr = 2 anos	Tr = 5 anos	Tr = 2 anos	Tr = 5 anos
B1	9,3	-3,7	9,6	-1,9	9,1	-3,4	8,9	-3,9
B2	18,6	0,9	19,2	2,0	20,2	2,3	14,3	-2,6
B3	30,0	10,8	32,0	12,8	30,1	9,7	17,9	-0,6
B4	26,4	12,3	32,7	17,1	26,3	10,5	25,8	9,3

Tabela 11. Diferença percentual entre vazões máximas simuladas a partir de chuvas de projeto e eventos históricos, em % (8° DISME).

Bacia	Chicago		Blocos alternados		Triangular		Pilgrim & Cordery	
	Tr = 2 anos	Tr = 5 anos	Tr = 2 anos	Tr = 5 anos	Tr = 2 anos	Tr = 5 anos	Tr = 2 anos	Tr = 5 anos
B1	21,8	-1,4	24,3	2,0	24,2	2,3	22,0	-1,4
B2	21,7	2,7	30,0	10,4	25,3	6,3	15,7	-1,1
B3	35,0	12,9	45,4	21,2	35,7	12,7	25,1	5,3
B4	37,1	21,4	48,3	30,1	35,6	17,8	21,5	4,8

variações são função da chuva de projeto aplicada, de sua duração e de seu período de retorno.

Observando os valores citados nessas tabelas, pode-se perceber que as diferenças entre as vazões calculadas através das chuvas de projeto e, a partir de eventos históricos, é maior para o tempo de retorno de 2 anos. Isso pode ser decorrência de problemas nos ajustes estatísticos efetuados, pois a qualidade do ajuste de distribuições estatísticas tende a ser menor para frequências extremas. Também se nota que, para durações pequenas, as vazões obtidas, a partir das chuvas de projeto, apresentam menor diferença percentual com relação às vazões determinadas com base nos eventos históricos, sendo, em alguns casos, até inferiores a essas. Isso foi observado nos resultados obtidos a partir de todas as chuvas de projeto, visto que, para pequenas durações, todos os hietogramas estudados seguem padrões semelhantes. Esse fato pode confirmar a prática usual em projetos de drenagem, que é o uso, para pequenas áreas, do Método Racional, que tende a fornecer valores superestimados de vazão.

Verifica-se ainda que, para maiores durações, ocorre uma grande superestimação das vazões oriundas dos hietogramas de projeto com relação às originárias das precipitações históricas. Essa característica mostrou-se menos acentuada no método proposto por Pilgrim & Cordery (1975), que, para as maiores durações, originou valores de vazões mais próximos aos calculados pelos even-

tos históricos. Isso pode-se dever ao fato de que o hietograma proposto por esses autores não apresenta um único pico, mas sim flutuações no decorrer do tempo, com o aparecimento de diversos valores máximos. Esse padrão se assemelha ao verificado nas chuvas observadas em Porto Alegre: as precipitações reais não seguem uma forma constante, apresentando diversos picos de intensidade no decorrer de sua duração total. Em contrapartida, nota-se que os hietogramas de Chicago, dos Blocos Alternados e Triangular, geraram vazões máximas até 48% maiores do que as precipitações históricas. Tal diferença é explicada pelo fato de que essas metodologias não buscam representar padrões reais de chuva, mas sim criar situações críticas de escoamento. Portanto, o uso das chuvas de projeto de Chicago, dos Blocos Alternados e Triangular em projetos de drenagem urbana, para bacias acima de 20 km², tende a gerar resultados conservadores, se comparados à aplicação de eventos pluviográficos observados ou, até mesmo, do método de Pilgrim & Cordery (que busca recriar tais eventos).

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho apresentou uma análise da aplicação de diferentes padrões de chuvas de projeto à cidade de Porto Alegre. As curvas IDF das estações pluviográficas Aeroporto e 8° DISME

foram atualizadas e foram determinados hietogramas de projeto, pelos métodos de Chicago (Keifer & Chu, 1957), Blocos Alternados (citado por Zahed & Marcellini, 1995), Triangular (Yen & Chow, 1980) e Pilgrim & Cordery (1975), para diferentes durações e períodos de retorno. Foram realizadas simulações chuva-vazão, através do método do Soil Conservation Service (McCuen, 1957; apud Tucci, 1993), para quatro bacias hidrográficas hipotéticas, com diferentes áreas e tempos de concentração, visando comparar os hidrogramas provocados pelas diferentes chuvas de projeto com escoamentos causados por chuvas reais observadas nos respectivos postos.

Os hidrogramas simulados, a partir das diferentes chuvas de projeto, apresentaram volumes bastante similares, principalmente devido ao alto valor do coeficiente CN utilizado, que caracteriza uma superfície urbanizada, em que as perdas iniciais e a infiltração são bastante pequenas. Porém, as vazões de pico simuladas com estes hidrogramas apresentaram uma variação mais ampla, sendo as menores vazões máximas geradas a partir das chuvas de projeto de Pilgrim & Cordery (1975), e as maiores descargas de pico obtidas com base nos hietogramas dos métodos de Chicago e dos Blocos Alternados. Estes resultados são coerentes com as filosofias dos métodos: o de Pilgrim & Cordery (1975), busca basicamente reproduzir padrões de chuva observados, enquanto que os demais tentam obter condições críticas para o escoamento superficial.

As vazões de pico geradas pelas diferentes chuvas de projeto foram comparadas com vazões de pico de mesmo período de retorno, obtidas a partir de ajuste de distribuições de Gumbel a séries de vazões geradas com chuvas observadas. Em ambos os postos pluviográficos, para as menores durações, as vazões obtidas, a partir das chuvas de projeto, apresentam pequena diferença percentual com relação às vazões determinadas com base nos eventos históricos, sendo, em alguns casos, até inferiores a essas. Esse fato pode confirmar a prática usual em projetos de drenagem, que é o uso, para pequenas áreas, do método Racional, que fornece valores superestimados de vazão. Para as maiores durações, ao contrário, observou-se que o uso das chuvas de projeto de Chicago, dos Blocos Alternados e Triangular, em projetos de drenagem urbana, tende a gerar resultados conservadores, se comparados à aplicação de eventos pluviográficos observados ou, até mesmo, do método de Pilgrim & Cordery (que busca recriar tais eventos).

Sugere-se que os efeitos da variação de outros fatores, como a forma da bacia hidrográfica

e sua declividade, diferentes valores do parâmetro CN, além da heterogeneidade espacial da precipitação, sejam avaliados, tendo em vista que esses aspectos podem assumir considerável influência nos hidrogramas gerados a partir dos diferentes hietogramas de projeto.

Por fim, ressalta-se que o presente trabalho buscou, basicamente, analisar condições usualmente adotadas em projetos de engenharia. Foram, portanto, aceitas diversas simplificações, tendo em vista ser essa a prática corrente no dimensionamento de estruturas hidráulicas de drenagem urbana.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e aos programas RECOPE-REHIDRO (FINEP) e PRONEX, pelo apoio financeiro recebido, bem como ao Centro Tecnológico da Aeronáutica e ao 8º Distrito do Instituto Nacional de Meteorologia, pela disponibilização dos dados pluviográficos das estações Aeroporto Salgado Filho e 8º DISME, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- ARON, G.; ADL, I. (1992) Effects of Storm Patterns on Runoff Hydrographs. *Water Resources Bulletin*, vol. 28 n° 3 p. 569-75.
- DESBORDES, M. (1982) *Modelisation en Hydrologie Urbaine: Recherches et Applications*. Laboratoire d'Hydrologie Mathématique - Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
- GOLDENFUM, J. A.; CAMAÑO, B.; SILVESTRINI, J. (1991) *Análise das Chuvas Intensas em Porto Alegre*. Não publicado.
- KEIFER, C. J.; CHU, H. H. (1957) Synthetic Storm Pattern for Drainage Design. *Journal of the Hydraulics Division*, 83, HY5, p. 1332-1/1332-25.
- PILGRIM, D. H.; CORDERY, I. (1975) Rainfall Temporal Patterns for Design Floods. *Journal of the Hydraulics Division*, 101, HY1, p. 81-95.
- SILVEIRA, A. L. L. (1996) *Contribution à l'Etude Hydrologique d'un Bassin Semi-Urbanisé dans le Brésil Subtropical - Bassin de l'Arroio Dilúvio à Porto Alegre*. Thèse, Université Montpellier II.
- TUCCI, C. E. M. (1993) Escoamento Superficial. In: Tucci, C. E. M. (organizador); *Hidrologia - Ciência e Aplicação*. Editora da Universidade. ABRH.
- VOORHEES, M. L.; WENZEL, H. G. (1984) Urban Design-Storm Sensitivity and Reliability. *Journal of Hydrology*, 38, p. 39-60.
- YEN, B. C.; CHOW, V. T. (1980) Design Hyetographs for Small Drainage Structures. *Journal of the Hydraulics Division*, 106, HY6, p. 1055-76.

ZAHED F. K.; MARCELLINI, S. S. (1995) Precipitações Máximas. In: Tucci, C. E. M.; Porto, R. L.; Barros, M. T. (organizadores); *Drenagem Urbana*, Coleção ABRH de Recursos Hídricos, vol. 5, Editora da Universidade, Porto Alegre.

Analysis of the Applicability of Traditional Design-Storm Hyetographs to Porto Alegre

ABSTRACT

Design rainfall hyetographs are simplified methodologies used to represent the precipitation time distribution. They are used as input in rainfall-runoff simulation models, in order to design hydraulic structures.

The objective of this work is to analyze the applicability of traditional design rainfall hyetographs to the city of Porto Alegre, adopting usual engineering design techniques.

Data sets from two rain-gaging stations (Aeroporto and 8° DISME) were used to adjust IDF relations and four different methodologies of design rainfall hyetographs: Chicago (Keifer & Chu, 1957), SCS Type II, Triangular (Yen & Chow, 1980) and Pilgrim & Cordery (1975). Significant differences in the hyetographs were not observed for the 30 and 60 minutes durations. On the contrary, for longer durations (120 and 240 minutes), Chicago and SCS Type II hyetographs presented much higher intensities.

Runoff was simulated with the well-known SCS method, using the four different design hyetographs and also critical observed events for each selected duration. Gumbel statistical distribution was adjusted to each peak flow series. Peak discharges determined by the use of design hyetographs were then compared with discharges obtained from the statistical adjustment, for 2 and 5-year return periods. Significant differences were observed. For shorter durations, the discharges obtained from the selected design hyetographs showed a small overestimation and sometimes even an underestimation, confirming the use of the Rational Method in engineering practice. For longer durations, however, an overestimation was noted. This fact was already expected, since the purpose of the design hyetographs method is to create critical effects on runoff.