



**PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO**

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

**SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS**

EMITENTE

**SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS**

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H06	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de “I-PAI-WU”	30/06/99

**DP-H06**

**DIRETRIZES DE PROJETO PARA**

**ESTUDOS HIDROLÓGICOS**

**MÉTODO DE “I-PAI-WU”**



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H06	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de "I-Pai-Wu"	30/06/99

## ÍNDICE

PÁG.

1.	OBJETIVO.....	108
2.	ASPECTOS GERAIS.....	108
3.	MÉTODO DE "I-PAI-WU" .....	108



## PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H06	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de "I-Pai-Wu"	30/06/99

### 1. OBJETIVO

Esta diretriz tem por objetivo a apresentação do método de "I-PAI-WU" para a determinação da vazão de projeto, bem como suas diretrizes e condições de aplicação nos projetos desenvolvidos para a SVP/PMSP.

### 2. ASPECTOS GERAIS

Entre as metodologias sintéticas para cálculo de vazões máximas, o Departamento de Águas e Energia Elétrica da Secretaria de Recursos Hídricos Saneamento e Obras do Governo do Estado de São Paulo recomenda em sua publicação de 1994: "Manual de Cálculo das Vazões Máximas, Médias e Mínimas nas Bacias Hidrográficas do Estado de São Paulo" - o Método de "I-PAI-WU", conforme transcrito a seguir:

Deve ser destacado que o método não leva em conta o efeito da redução do tempo de concentração devido à canalização dos cursos d'água da bacia. Como no método Ven Te Chow, é recomendável uma verificação pelo método "Soil Conservation Service" para os casos onde esse efeito é significativo.

### 3. MÉTODO DE "I-PAI-WU"

Este método constitui-se num aprimoramento do Método Racional (vide Estudos Hidrológicos – Métodos Racional - DP-H03 da SVP/PMSP), podendo ser aplicado para bacias com áreas de drenagem de até 200 km<sup>2</sup>.

A fórmula racional, apesar de não se constituir na metodologia de cálculo mais recomendável em projetos de moderna engenharia, permite, entretanto, um aperfeiçoamento



## PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H06	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de “I-Pai-Wu”	30/06/99

através de uma análise e ajuste dos diversos fatores intervenientes. Os fatores adicionais a serem considerados na fórmula Racional referem-se ao armazenamento na bacia, à distribuição da chuva e à forma da bacia. Sua aplicação torna-se adequada na medida em que se exerce um julgamento criterioso das inúmeras variáveis em jogo no desenvolvimento de uma cheia.

A expressão-base para aplicação do método advém no método racional, qual seja:

$$Q = 0,278 C i A^{0,9} K \dots\dots\dots(3.1)$$

Onde:

- Q = vazão de cheia [Q] = m<sup>3</sup>/s;
- C = coeficiente de escoamento superficial;
- i = intensidade da chuva crítica; [i] = mm/h;
- A = área da bacia de contribuição; [A] = km<sup>2</sup>;
- K = coeficiente de distribuição espacial da chuva.

Os principais fatores intervenientes, que deverão ser avaliados em cada bacia, são os seguintes:

- a) Forma, área e declividade da bacia hidrográfica;
- b) Intensidade e distribuição da chuva crítica;
- c) Características da superfície da bacia hidrográfica envolvendo:
  - Provável utilização futura dos terrenos;
  - Grau de impermeabilização do solo;



## PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H06	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de "I-Pai-Wu"	30/06/99

- Existência de depressões ou bacias de acumulação que diminuam os picos de cheias;
- Grau de saturação do solo devido a chuvas antecedentes.

d) Tempo de escoamento superficial ( $t_s$ );

e) Tempo de concentração ( $t_c$ );

f) Tempo de pico ( $t_p$ ).

No Método Racional admite-se que a chuva crítica, numa dada bacia hidrográfica, tenha uma duração igual ao tempo de concentração. Entretanto, em bacias de forma alongada, no sentido do talvegue, o tempo de concentração poderá ser superior ao tempo de pico. Isto corresponde a dizer que a chuva que cai na parte mais remota da bacia chegará tarde demais à seção estudada para contribuir para a vazão máxima. Assim, o efeito da forma da bacia pode ser considerado através do coeficiente de forma ( $C1$ ).

$$C1 = t_p / t_c \dots\dots\dots (3.2)$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração;

$t_p$  = tempo de pico.

O coeficiente de forma também é dado pela expressão:

$$C1 = \frac{4}{(2 + F)} \dots\dots\dots (3.3)$$



## PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H06	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de "I-Pai-Wu"	30/06/99

Onde ( $F$ ), é o fator de forma da bacia, que relaciona a forma da bacia com um círculo de mesma área, ou seja, ele mede a taxa de alongamento da bacia. Assim se uma bacia fosse exatamente circular  $F = 1$ .

Levando-se em conta apenas o formato das bacias,  $C1$  deverá ser menor que 1 para bacias alongadas. No Método Racional admite-se  $C1 = 1$ .

Adotando-se a nomenclatura utilizada nos estudos de I-PAI-WU, 1963, demonstra-se que o coeficiente de escoamento da fórmula racional pode ser calculado por:

$$C = f \frac{C2}{C1} \dots\dots\dots (3.4)$$

Onde:

$$f = \frac{2V1}{V} \dots\dots\dots (3.5)$$

O parâmetro ( $f$ ) é a relação entre o volume de escoamento da parte ascendente do hidrograma ( $V1$ ), admitindo este com forma triangular, e o volume total do escoamento superficial ( $VT$ ), Figura 3.1.



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

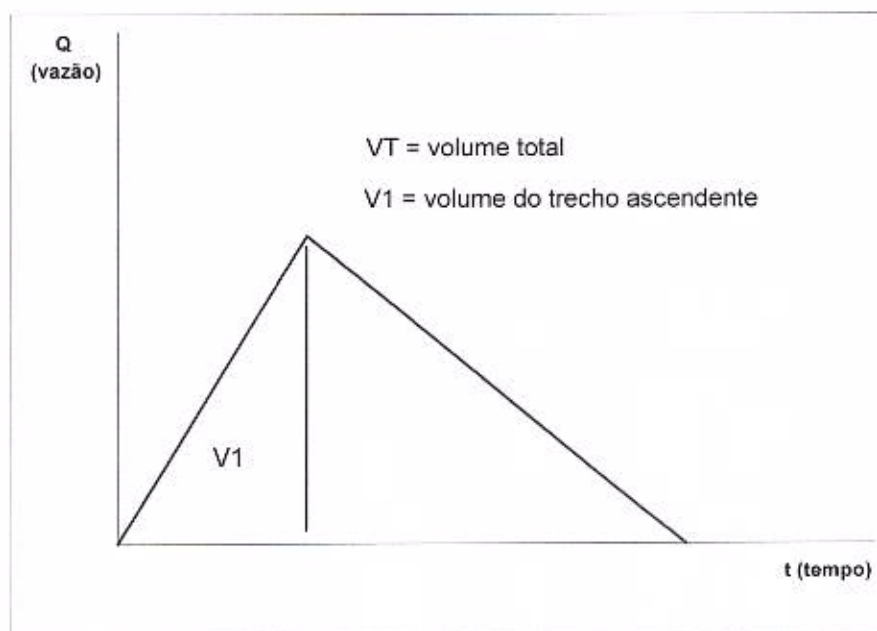
DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM	DATA
DP-H06	Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de “I-Pai-Wu”		30/06/99



**Figura 3.1**  
**Hidrograma admitido no método de I-PAI-WU**

O coeficiente  $C2$ , que é o coeficiente volumétrico de escoamento, é definido pela seguinte equação:

$$C2 = \frac{VT}{le.A} \dots\dots\dots (3.6)$$



## PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H06	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de "I-Pai-Wu"	30/06/99

Onde:

$I_e$  = representa a quantidade de chuva efetiva que passa pela seção estudada, ou seja, são descontadas as perdas durante a ocorrência da chuva de projeto.

Essas perdas na chuva de projeto são devidas à infiltração no solo, à interceptação pela cobertura vegetal e ao efeito do armazenamento de água superficial em pontos específicos na bacia.

Portanto, na aplicação deste método, inicialmente determina-se a chuva crítica, conhecida também como a de projeto. A partir desta e descontando-se as perdas mencionadas, obtém-se a chuva efetiva.

A parcela da chuva crítica que se infiltra no solo depende do grau de impermeabilização do mesmo. O grau de impermeabilização do solo é classificado a partir do conhecimento do uso do solo, do grau de urbanização, da cobertura vegetal e do tipo de solo, conforme é indicado na Tabela 3.1.





## PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H06	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de “I-Pai-Wu”	30/06/99

**Tabela 3.1**

**Grau de impermeabilização do solo em função do seu uso**

GRAU DE IMPERMEABILIZAÇÃO DO SOLO	COBERTURA OU TIPO DE SOLO	USO DO SOLO OU GRAU DE URBANIZAÇÃO
Baixo	- com vegetação rala e/ou esparsa - solo arenoso seco - terrenos cultivados	- zonas verdes não urbanizadas
Médio	- terrenos com manto fino de material poroso - solos com pouca vegetação - gramados amplos - declividades médias	- zona residencial com lotes amplos (maior que 1000 m <sup>2</sup> ) - zona residencial rarefeita
Alto	- terrenos pavimentados - solos argilosos - terrenos rochosos estêreis ondulados - vegetação quase inexistente	- zona residencial com lotes pequenos (100 a 1000 m <sup>2</sup> )

O coeficiente  $C_2$  deverá ser obtido pela ponderação dos coeficientes das áreas parciais ou sub-bacias, coeficientes estes que são classificados pelo grau de impermeabilização e que estão especificados na Tabela 3.2.



## PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H06	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de "I-Pai-Wu"	30/06/99

**Tabela 3.2**

**Coefficientes volumétricos de escoamento (c2)**

GRAU DE IMPERMEABILIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE	COEFICIENTE VOLUMÉTRICO DE ESCOAMENTO
Baixo	0,30
Médio	0,50
Alto	0,80

A desigualdade de distribuição das chuvas na bacia será levada em conta mediante a aplicação de um coeficiente redutor ( $K$ ) de distribuição de chuvas, obtido da Figura 3.2. A determinação da intensidade de precipitação se faz de modo análogo ao utilizado no Método Racional.

O efeito do armazenamento de água na bacia que ocorre em pontos localizados nos leitos de cursos de água ou mesmo em galerias e obras afins, é levado em consideração através de um expoente redutor ( $n$ ) aplicado sobre o parâmetro área de drenagem da bacia. Adota-se usualmente  $n = 0,9$ .

Sempre que a área da bacia em estudo apresentar diferentes usos do solo, costuma-se considerar um valor médio do coeficiente de escoamento, calculado através da equação:

$$C2 = \frac{(\sum C2_i \cdot A_i)}{A} \dots\dots\dots (3.7)$$

Onde a área  $A_i$ , corresponderá a  $C2_i$ , lembrando que  $A = \sum A_i$ .



## PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H06	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de “I-Pai-Wu”	30/06/99

Com esses parâmetros obtém-se o hidrograma relativo à chuva de projeto. Este hidrograma foi admitido como triangular, determinando-se então o volume total de escoamento superficial e a vazão de cheia.

Finalmente, a vazão de cheia determinada, deve ser adicionada a vazão de base, esta última admitida como sendo da ordem de 10% daquela. Assim, obtém-se a vazão máxima de projeto.

### Roteiro de Cálculo

- Determinar o divisor de águas da bacia que contribui para a seção em estudo;
- Calcular a área de drenagem correspondente ( $A$ ), usualmente através de planimetria;
- Determinar a declividade equivalente através do processo gráfico, ou através da expressão:

$$S = \left[ \frac{\sum L}{\frac{L1}{\sqrt{J1}} + \frac{L2}{\sqrt{J2}} + \dots + \frac{LN}{\sqrt{JN}}} \right]^2 \dots\dots\dots (3.8)$$

Onde:

$[L] = \text{km}$

$[J] = \text{m/m}$

$[S] = \text{m/m}$ , para transformar em m/km, deve-se multiplicar por 1000.



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H06	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de “I-Pai-Wu”	30/06/99

Obs.: Uma prática comum é adotar os  $L_i$  como sendo a distância entre curvas de nível consecutivas, medidas em planta.

d) Determinar o fator de forma ( $F$ ) da bacia hidrográfica através da fórmula:

$$F = \frac{L}{2(A/\pi)^{1/2}} \dots\dots\dots (3.9)$$

Onde:

$L$  = comprimento do talvegue do rio, [ $L$ ] = km;

$A$  = área da bacia de contribuição, [ $A$ ] = km<sup>2</sup>

e) Calcular o tempo de concentração através da fórmula:

$$tc = 57 \left( \frac{L^2}{S} \right)^{0,385} \dots\dots\dots (3.10)$$

Onde:

$tc$  = tempo de concentração, [ $tc$ ] = min;

$L$  = comprimento do talvegue do rio, [ $L$ ] = km;

$S$  = declividade equivalente, [ $S$ ] = m/km.

f) Calcular as porcentagens ( $P$ ) de áreas com coeficientes  $C2$  indicados, e calcular o valor ponderado de  $C2$ , através da expressão:

$$C2 = \frac{C2_1 \cdot A1 + C2_2 \cdot A2 + \dots + C2_N \cdot AN}{\sum A_i} \dots\dots\dots (3.11)$$



## PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H06	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de “I-Pai-Wu”	30/06/99

- g) Determinar a intensidade da chuva crítica, através das equações de chuva, que podem ser encontradas nas diretrizes DP-H02 – Estudos Hidrológicos – Equação de Chuvas da SVP/PMSP.
- h) Determinar o coeficiente de distribuição espacial da chuva ( $K$ ), que é função da área de drenagem (em  $\text{km}^2$ ) e do tempo de concentração (em horas) através do gráfico apresentado na Figura 3.2.
- i) Determinar o coeficiente ( $C1$ ), através do coeficiente de forma da bacia ( $F$ );

$$C1 = \frac{4}{(2 + F)} \dots\dots\dots (3.12)$$

- j) Calcular o coeficiente ( $C$ ), através da expressão:

$$C = \frac{2}{1 + F} \cdot \frac{C2}{C1} \dots\dots\dots (3.13)$$

- l) Calcular o volume total do hidrograma ( $V$ ), através da expressão:

$$V = (0,278 \cdot C2 \cdot i \cdot t_c \cdot 3600 \cdot A^{0,9} \cdot K) \cdot 1,5 \dots (3.14)$$

Onde:

- $V$  = volume total do hidrograma [ $V$ ] =  $\text{m}^3$ ;  
 $i$  = intensidade da chuva, [ $i$ ] =  $\text{mm/h}$ ;  
 $t_c$  = tempo de concentração, [ $t_c$ ] = horas;  
 $A$  = área da bacia de contribuição, [ $A$ ] =  $\text{km}^2$ ;  
 $C2$  = coeficiente volumétrico de escoamento;  
 $K$  = coeficiente de distribuição espacial da chuva.



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

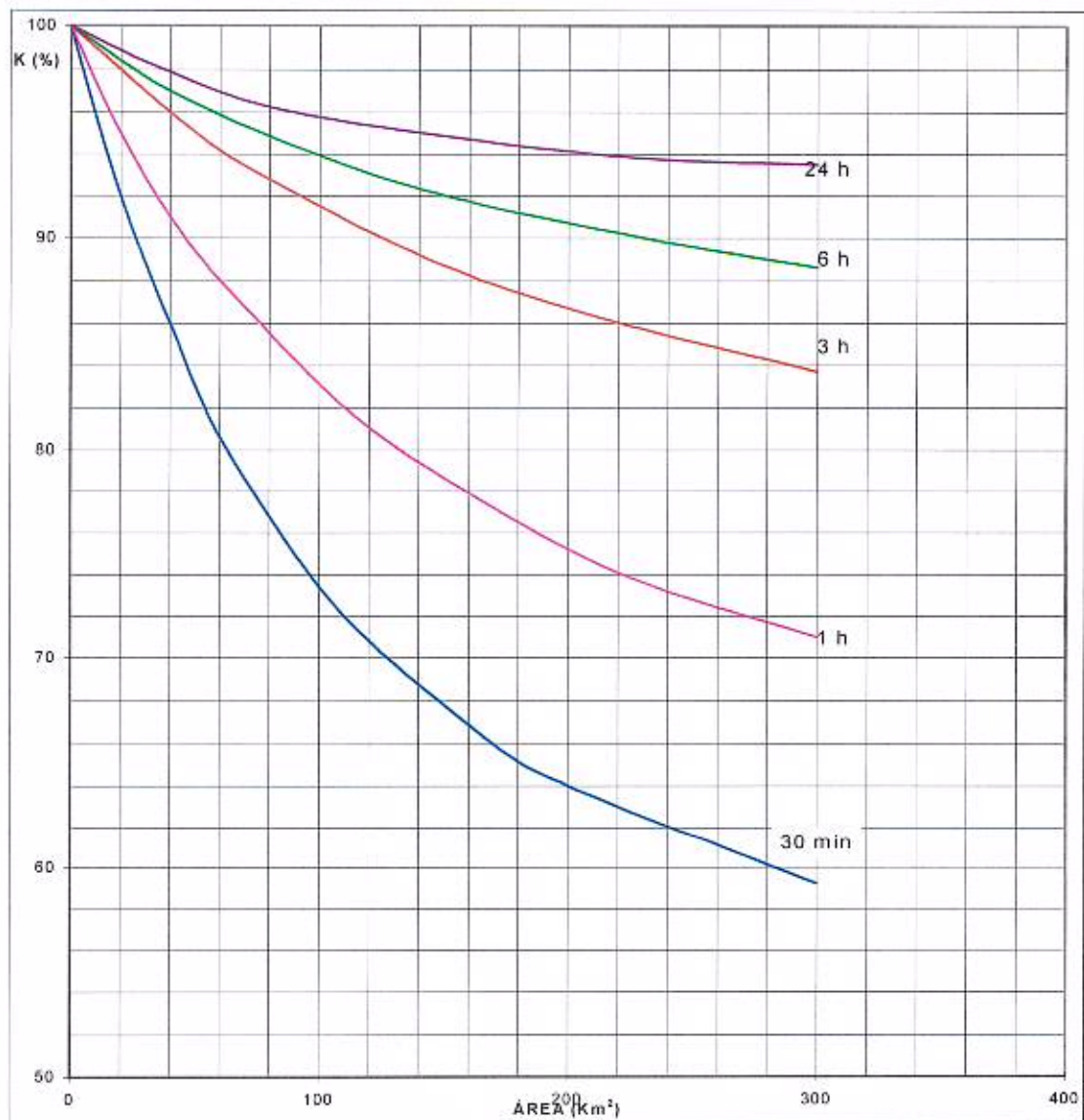
DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM	DATA
DP-H06	Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de "I-Pai-Wu"		30/06/99



**Figura 3.2**  
Coeficiente de distribuição espacial da chuva (K)



## PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H06	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de “I-Pai-Wu”	30/06/99

m) Calcular a vazão de cheia ( $Q$ ), através da expressão:

$$Q = 0,278 \cdot C \cdot i \cdot A^{0,9} \cdot K \dots\dots\dots (3.15)$$

Onde:

$Q$  = vazão de cheia, [ $Q$ ] = m<sup>3</sup>/s;

$i$  = intensidade da chuva [ $i$ ] = mm/h;

$A$  = área da bacia de contribuição, [ $A$ ] = km<sup>2</sup>.

n) Determinar a vazão máxima de projeto ( $Q_p$ ), acrescentando uma vazão de base ( $Q_b$ ), da ordem de 10% da vazão de cheia.

$$Q_b = 0,10 \cdot Q \dots\dots\dots (3.16)$$

$$Q_p = Q_b + \dots\dots\dots (3.17)$$