

DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS PARA A CIDADE DE CARAGUATATUBA – SP

Daniela Martins^{1}; Nadiane Smaha Kruk² e Gabriele Vanessa Tschöke³*

Resumo – As equações de chuvas intensas são amplamente utilizadas no dimensionamento da drenagem urbana. Estas equações são geradas a partir de séries históricas do passado. Atualmente a cidade de Caraguatatuba (litoral norte do estado de São Paulo) não possui uma equação de chuva intensa. Devido aos inúmeros casos de inundação, inclusive o mais recente em março de 2013, foi proposta neste trabalho a equação de chuva para a localidade a partir de uma série histórica de 11 anos, utilizando séries anuais. A equação encontrada difere bastante da atualmente utilizada para a região, que é a de Ubatuba.

Palavras-Chave – Equação de chuvas intensas, Caraguatatuba, drenagem.

DETERMINATION OF THE INTENSE RAINFALL EQUATION FOR THE CITY OF CARAGUATATUBA - SP

Abstract – The equations of intense rainfall are widely used in the design of urban drainage. These equations are generated from historical series from the past. Currently the city of Caraguatatuba (northern coast of São Paulo state) does not have an equation of intense rainfall. Due to the numerous cases of flooding, including the most recent in March 2013, it was proposed in this paper the intense rainfall equation to the city from a historical series of 11 years using annual series. The equation found is quite different from currently used for the region, which is the Ubatuba.

Keywords – Intense rainfall equation, Caraguatatuba, drainage.

INTRODUÇÃO

As equações de chuvas intensas são essenciais para o dimensionamento dos sistemas de drenagem, desde os mais simples (microdrenagem) aos mais complexos (macrodrenagem). Para a cidade de Caraguatatuba não existe nenhum estudo publicado em relação às curvas intensidade-duração-frequência e o dimensionamento na localidade é feito através da equação de chuvas de Ubatuba. Surge aí a relevância deste estudo em divulgar uma equação específica de chuva intensa para esta localidade e complementar com um estudo de caso para ilustrar a diferença entre a equação utilizada atualmente (Ubatuba) com a equação proposta neste trabalho.

Um estudo relevante foi apresentado por Martinez e Magni (1999) onde os autores publicam diversas chuvas intensas para várias cidades do estado de São Paulo, mas não foi realizado para a cidade de Caraguatatuba.

O posto pluviográfico cujos dados serão utilizados para a obtenção da equação de chuvas intensas fica localizado na Bacia do Rio Juqueriquerê. A região tem importância estratégica para o Estado de São Paulo devido à localização do Porto de São Sebastião e pela duplicação de uma das vias de acesso, a Rodovia dos Tamoios.

¹ Doutoranda em Infra-Estrutura Aeroportuária no Instituto Tecnológico de Aeronáutica, danielamartins1977@yahoo.com.br

² Professora Adjunta do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, nadiane@ita.br.

³ Mestranda em Infra-Estrutura Aeroportuária no Instituto Tecnológico de Aeronáutica, gabrieletschoke@gmail.com

* Autor Correspondente.

A região é frequentemente atingida por eventos de precipitação intensa que causam prejuízos à população. Em 1967, o município de Caraguatatuba foi alvo de um desastre natural com registro de mais de 400 mortos, devido a uma chuva intensa que ocasionou deslizamento de terras. De acordo com o posto da Fazenda dos Ingleses, o índice pluviométrico registrou 851 mm, sendo 420 mm somente no dia 18, não acusando índice maior devido à saturação do pluviômetro (CRUZ, 1974).

Em 2013, uma inundação atingiu sete bairros de Caraguatatuba, no dia 19/3/2013 e de acordo com a Prefeitura Municipal de Caraguatatuba <<http://www.caraguatatuba.sp.gov.br>> 170 pessoas ficaram desabrigadas, devido à elevação de nível do Rio Juqueriquerê, somado às fortes chuvas nos dias anteriores. A área mais atingida foi a do morro do algodão.

O objetivo deste artigo é propor uma equação de chuvas intensas para Caraguatatuba e comparar com a atualmente usada para a região, que é a equação de chuvas de Ubatuba. Além disso, será verificado o impacto no dimensionamento de um sistema de drenagem.

SÉRIE DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBSERVADA

O registro de dados climatológicos no Brasil, de forma geral, é bastante escasso e, quando existe, tem seu acesso dificultado por diversas razões. Entre elas, por se tratar de informações que devem ser coletadas por décadas seguidas e por ter condições de conservação e armazenamento muitas vezes precárias (Barbassa et al., 2009).

Conforme TUCCI et al., (2009) a análise estatística dos dados de chuva podem possuir dois enfoques, como séries parciais ou séries anuais. De acordo com CETESB (1986) a metodologia fica intimamente correlacionada com o número de anos de dados, ou seja, acima de 10 anos, pode-se trabalhar com séries anuais, que é o caso deste trabalho. Nesta metodologia estão previstas as maiores intensidades anuais de precipitação para as determinadas durações (10, 20, 30, 60 minutos e 2, 3, 6, 12, 18 e 24 horas).

Tabela 1 – Intensidades máximas anuais (mm/min) da estação E2-046 localizada em Caraguatatuba.

Fonte: SigRH <<http://www.sigrh.sp.gov.br>>.

INTENSIDADES MÁXIMAS ANUAIS (mm/min)										
Ano	Duração (min)									
	10	20	30	60	120	180	360	720	1080	1440
1974	1,640	1,030	0,826	0,465	0,433	0,375	0,280	0,169	0,130	0,098
1975	2,050	2,040	1,800	1,616	1,010	0,721	0,368	0,204	0,136	0,103
1976	1,920	1,790	1,686	1,576	1,279	1,021	0,572	0,325	0,223	0,184
1977	1,510	1,080	0,743	0,376	0,188	0,206	0,108	0,041	0,000	0,000
1978	0,910	0,855	0,720	0,565	0,462	0,456	0,341	0,184	0,130	0,107
1979	1,920	1,470	1,206	1,005	0,537	0,387	0,286	0,157	0,113	0,000
1980	1,340	1,285	1,050	0,600	0,414	0,351	0,155	0,079	0,052	0,057
1981	2,160	1,865	1,593	1,195	0,804	0,613	0,386	0,207	0,156	0,118
1982	1,000	0,935	0,813	0,550	0,390	0,312	0,196	0,132	0,091	0,069
1983	1,600	1,285	1,256	1,043	0,614	0,444	0,231	0,129	0,086	0,071
1984	1,250	1,070	1,043	0,765	0,395	0,266	0,186	0,052	0,041	0,032

Para a obtenção da série histórica na região de estudo foi encontrado um posto com registro de pluviógrafo, com o prefixo ANA 02345051 ou prefixo SigRH E2-046. O nome deste posto é Caraguatatuba e a entidade que o mantém é o FCTH/DAEE. O posto situa-se no município de Caraguatatuba e fica inserido na bacia do Juqueriquerê com altitude de 20m, latitude 23°38'00" e longitude 45°26'00". O início da sua operação é de 01/02/1970 e ainda está ativo. Porém, os registros de pluviógrafo têm início em janeiro de 1974.

Junto ao SigRH (Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo) a série histórica do pluviograma da estação E2-046 que data de janeiro de 1974 à dezembro de 1984, totaliza 11 anos de dados (Tabela 1).

ANÁLISE DE FREQUÊNCIA: SÉRIE ANUAL

A partir dos dados obtidos (Tabela 1), adotou-se a distribuição estatística do Tipo I, também conhecida como distribuição de Gumbel, Fisher-Tippet tipo I ou dupla exponencial. Esta distribuição é muito utilizada na análise de frequência de eventos hidrológicos inclusive com inúmeras aplicações na determinação de relações intensidade-duração-frequência de precipitações intensas e estudos de vazões de enchentes (Naghettini e Pinto, 2007).

A função de probabilidades acumuladas da distribuição de Gumbel é dada por (Naghettini e Pinto, 2007):

$$F_Y(y) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{y-\beta}{\alpha}\right)\right] \text{ para } -\infty < y < \infty < \beta < \infty, \alpha > 0 \quad (1)$$

Onde α representa o parâmetro de escala e β o parâmetro de posição que também é a moda de Y. A função densidade de probabilidade é dada por:

$$f_Y(y) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{y-\beta}{\alpha} - \exp\left(-\frac{y-\beta}{\alpha}\right)\right] \quad (2)$$

O valor esperado, a variância e o coeficiente de assimetria de Y são:

$$E[Y] = \beta + 0,5772\alpha \quad (3)$$

$$Var[Y] = \sigma_Y^2 = \frac{\pi^2\alpha^2}{6} \quad (4)$$

$$\gamma = 1,1396 \quad (5)$$

Isso denota que a função de Gumbel possui uma assimetria, sendo positiva e constante, para valores específicos de α e β .

A função inversa da função acumulada de probabilidade de Gumbel é expressa por (6):

$$y(T) = \beta - \alpha \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (6)$$

Onde T é o período de retorno e F representa a probabilidade anual do valor não ser superado.

De (6) estimando os parâmetros da distribuição pelo método dos momentos, obtêm-se:

$$\beta = \bar{X} - 0,45s_x \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{s_x}{1,283} \quad (8)$$

Onde: \bar{X} e s_x denotam a média e o desvio padrão amostrais.

Substituindo (7) e (8) em (6) e fazendo algumas simplificações, temos:

$$x(T) = \bar{X} + \left[-0,45 - \frac{1}{1,283} \ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right] s_x \quad (9)$$

Comparando as equações (9) e (10) que é a equação geral para análise de frequência hidrológica (Chow, 1958); o fator de frequência das distribuições de Gumbel pode ser expresso pela equação (11):

$$x(T) = \bar{X} + K_T \cdot \sigma_Y \quad (10)$$

$$k_T = - \left[0,45 + \frac{1}{1,283} \ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right] \quad (11)$$

Onde k_t é o fator de frequência em função do tamanho da amostra.

De acordo com Wilken (1978) a expressão teórica de k (Equação (11)), se aproxima da relação obtida experimentalmente para n=100 anos. Ele observou também que quando se dispõe de um número menor de anos de observação, o valor de k é um pouco menor, cometendo erros de k quando T=10 anos em 19%, de 10% quando T=35 anos, caindo para 7% quando T=50 anos e insignificantes quando os períodos são maiores que 50 anos.

Em função do exposto, o valor de k adotado foi obtido através da interpolação de dados do Gráfico 1 considerando n=10 anos já que os dados observados totalizam 11 anos de série histórica.

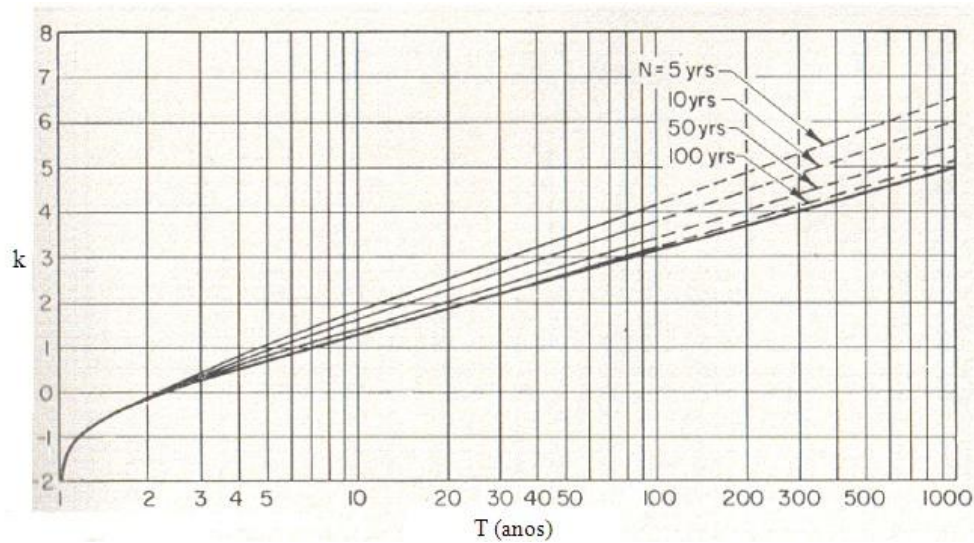


Gráfico 1: Curva $k \times T$ para a distribuição de frequência do Tipo I. Fonte: Chow, 1958.

CURVAS E EQUAÇÃO IDF PARA CARAGUATATUBA

As curvas IDF foram geradas a partir dos dados obtidos na Tabela 1 e com a teoria apresentada no tópico anterior e estão ilustrados no Gráfico 2 e na Tabela 2.

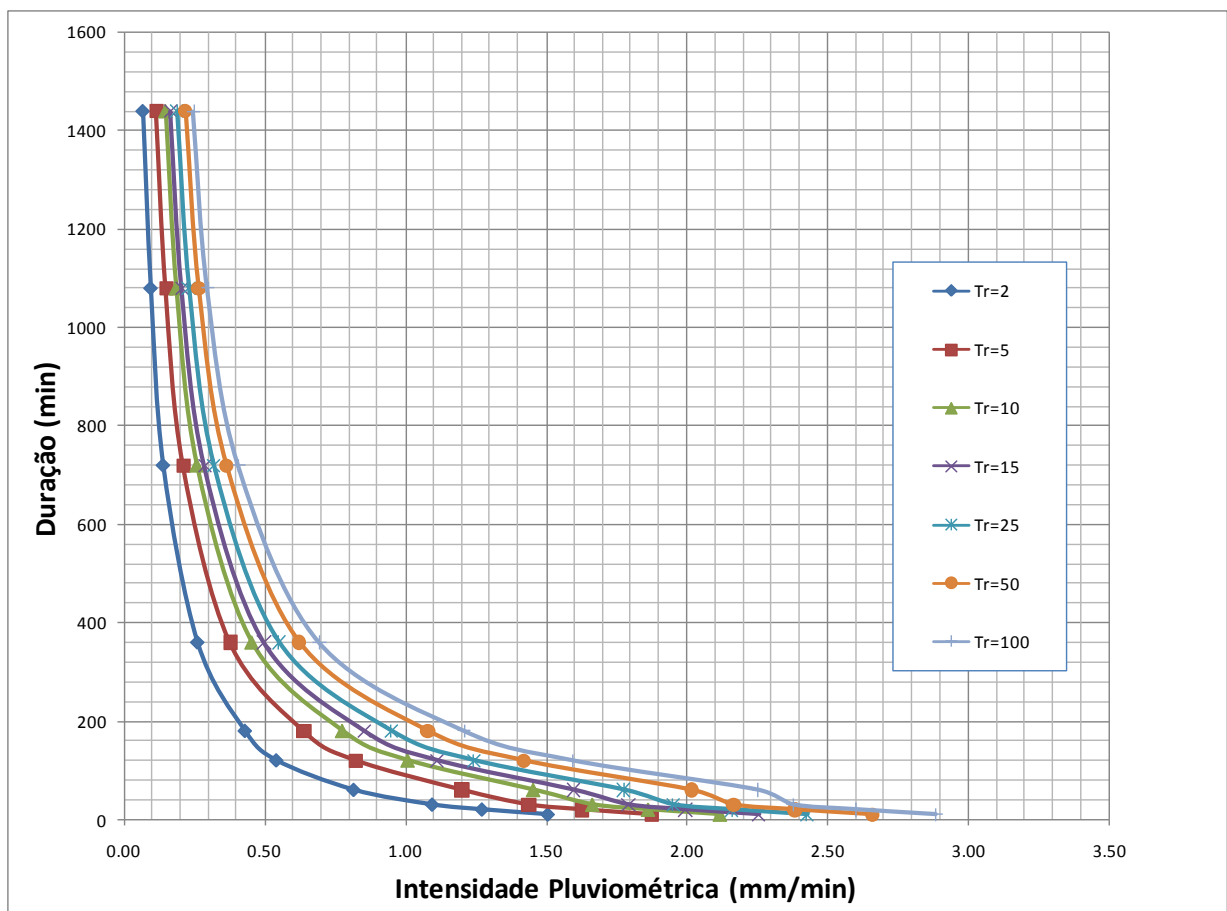


Gráfico 2: Intensidade Pluviométrica \times Duração com Períodos de Retorno variando de 2 a 100 anos para a cidade de Caraguatatuba de acordo com a Tabela 1.

Tabela 2 – Análise de Frequência por séries anuais (mm/min) da estação E2-046 localizada em Caraguatatuba.

INTENSIDADE DE CHUVA (mm/min)								
DURAÇÃO (min)	PERÍODO DE RETORNO (anos)							
	2	5	10	15	20	25	50	100
10	1,58	1,95	2,23	2,39	2,50	2,59	2,87	3,15
20	1,35	1,70	1,97	2,12	2,23	2,32	2,59	2,85
30	1,17	1,51	1,77	1,92	2,02	2,11	2,36	2,62
60	0,90	1,28	1,57	1,74	1,85	1,95	2,24	2,52
120	0,60	0,88	1,09	1,21	1,30	1,37	1,58	1,79
180	0,47	0,68	0,84	0,93	0,99	1,04	1,20	1,35
360	0,29	0,40	0,49	0,54	0,57	0,60	0,69	0,78
720	0,15	0,23	0,28	0,31	0,33	0,35	0,40	0,46
1080	0,11	0,16	0,20	0,22	0,24	0,25	0,29	0,33
1440	0,08	0,13	0,16	0,18	0,20	0,21	0,24	0,28

A equação intensidade-duração-frequência, ou seja, equação de chuvas intensas pode ter sua forma geral expressa por:

$$i = \frac{aT_r^d}{(t+c)^b} \quad (12)$$

As constantes a, b, c e d foram calculadas de acordo com as curvas encontradas no item anterior e resultou na equação de chuva intensa para Caraguatatuba (13):

$$i = \frac{67,30.T_r^{0,121}}{(t+50,03)^{0,94}} \quad (13)$$

A equação ajustada não conseguiu descrever totalmente os valores encontrados pela análise de frequência, acarretando em erros significativos para grandes durações (1440 minutos). Podemos citar como possíveis causas dessa não aderência aos dados i) o período curto de dados (11 anos), que está praticamente no limite do indicado para séries anuais. Nesse caso poderia ter sido utilizadas séries parciais, ii) o modelo da equação pode não ser o mais adequado aos dados iii) a não conformidade dos dados segundo a distribuição de frequência suposta (Tipo I, Gumbel). Nesse caso poderiam ter sido testadas outras distribuições de frequência para valores máximos, como por exemplo, Tipo II, de Fréchet.

COMPARAÇÃO DA UTILIZAÇÃO PRÁTICA ENTRE A EQUAÇÃO ENCONTRADA PARA CARAGUATATUBA E A DE UBATUBA

Para ilustrarmos a diferença que pode ocorrer entre a escolha da equação de Ubatuba (Martinez e Magni, 1999), amplamente utilizada atualmente para dimensionamento em projetos de drenagem em Caraguatatuba) e a equação obtida neste estudo, faremos uso de uma seção de um canal trapezoidal hipotético como pode-se observar na Figura 1:

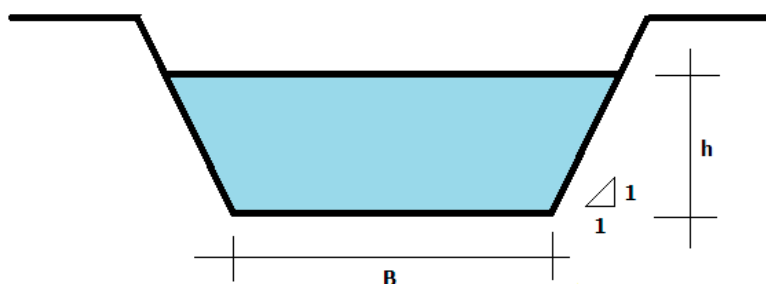


Figura 1: Seção hipotética de um canal natural na bacia de estudo.

Neste caso vamos considerar $B = 20$ m, método de dimensionamento será o racional. O coeficiente de escoamento superficial considerado será de 0,85 e a área de contribuição de 2km^2 .

Pela equação 14 (método racional), temos que:

$$Q = C.i.A \quad (14)$$

Pela equação de chuvas intensas de Ubatuba (Martinez e Magni, 1999), encontramos uma intensidade de 2,93 mm/min, para $t=15\text{min}$ e $T=100$ anos.

$$i = 28,4495(t + 40)^{-0,7564} + 17,2878(t + 70)^{-0,8236} \left[-0,47 - 0,8637 \ln \cdot \ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \quad (15)$$

Onde i (mm/min), t (min) e T (anos). Já pela equação (13) apresentada neste trabalho, o valor obtido é de 2,33 mm/min.

Em termos de vazão, pela equação de Ubatuba teríamos uma vazão de $83\text{m}^3/\text{s}$ e pela equação proposta teríamos uma vazão de $66\text{m}^3/\text{s}$. Em termos de altura de lâmina d'água no canal, pela equação de Ubatuba encontramos uma lâmina d'água de 3,53 m, já com a equação proposta a lâmina ficou em 2,88 m. Esta diferença em cota representaria 64 cm, influenciando em cota final de uma eventual ponte projetada, refletindo em custo extra de escavação ou até mesmo de enrocamentos extras. Ou seja, neste caso, a equação de Ubatuba está majorando os cálculos.

Por esse motivo, é de fundamental importância buscar a determinação de equações de chuvas intensas para a região em que se pretende estudar e desta forma obter a equação local para o dimensionamento real das estruturas de drenagem para a região.

RESULTADOS E CONCLUSÕES

A carência de séries históricas de chuva gera problemas para as diretrizes de novos projetos de drenagem e insegurança nos projetistas da área. O dimensionamento de uma estrutura de drenagem está intrinsecamente correlacionado com dados hidrológicos locais. Em virtude dessa necessidade foi feito um estudo com os dados de intensidade de chuva para a região em questão na tentativa de gerar uma equação de chuvas intensas através da metodologia de séries anuais.

A equação ajustada para Caraguatatuba não conseguiu descrever totalmente os dados de análise de frequência apresentando erros, por exemplo, de 24% para durações de 20 minutos e períodos de retorno de 100 anos. Mas para a mesma duração e períodos de retorno menores, como 2

anos, o erro é de 0,37%, para 5 anos, 11,14% e 10 anos, 16,47%, que são períodos de retorno utilizados mais frequentemente em projetos de microdrenagem. Sugere-se fazer este estudo por séries parciais, obter um maior conjunto de dados, ou testar outras distribuições de frequência para valores de máximos, como por exemplo, a Tipo II, de Fréchet. Entretanto, a equação apresentou boa aderência para precipitação com duração de 20 minutos e período de retorno de 2 anos.

A equação encontrada diverge bastante da atualmente utilizada, que é a de Ubatuba. Um exemplo hipotético mostra um superdimensionamento do sistema de drenagem utilizando a equação de Ubatuba, em comparação com a utilização da equação encontrada.

AGRADECIMENTOS

Ao projeto Rede Litoral, intitulado "Mudanças climáticas globais e impactos na zona costeira: modelos, indicadores, obras civis e fatores de mitigação/adaptação - REDELITORAL NORTE SP", CAPES 417/2010; ao Engenheiro Nelson Magni e a Engenheira Laura do DAEE/SP.

REFERÊNCIAS

BARBASSA, A. P.; MOREIRA, J.; CHOHI, A. Z.; GUTIERREZ, L. A. R. (2009). Sistema Computacional para representação vetorial de pluviogramas impressos. In *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Campo Grande.

CBH-LN. Plano de Bacias Hidrográficas do Litoral Norte. 224p. 2009.

CETESB. *Drenagem Urbana: Manual de Projeto*. São Paulo. Ed. CETESB, 1986. 464p.

CHOW, V.T. *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill. 1958.

CRUZ, O. 1974. *A Serra do Mar e o litoral na área de Caraguatatuba - contribuição à geomorfologia tropical litorânea*. São Paulo, Instituto de Geografia - USP, Série Teses e Monografias (11), 181p

MARTINEZ JÚNIOR, F.; MAGNI, N. L. G. Equações de chuvas intensas do Estado de São Paulo. São Paulo: DAEE; EPUSP, 1999.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Ed. UFRGS/ABRH, 2009. 943p.

WILKEN, P.S. *Engenharia de Drenagem Superficial*. São Paulo. Ed. CETESB, 1978. 477p