UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO

FERNANDO EMANUEL LAGASSI CANAL

ESTIMATIVA DE VAZÕES DE ENCHENTE EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ESPÍRITO SANTO COM O USO DO MODELO HEC-HMS

VITÓRIA 2011

FERNANDO EMANUEL LAGASSI CANAL

ESTIMATIVA DE VAZÕES DE ENCHENTE EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ESPÍRITO SANTO COM O USO DO MODELO HEC-HMS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado Departamento de ao Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Tosta dos Reis

VITÓRIA 2011

FERNANDO EMANUEL LAGASSI CANAL

ESTIMATIVA DE VAZÕES DE ENCHENTE EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ESPÍRITO SANTO COM O USO DO MODELO HEC-HMS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental do Centro tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Aprovado em 09 de Dezembro de 2011.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. José Antônio Tosta dos Reis - Orientador Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Prof. Dr. Antônio Sérgio Ferreira Mendonça - Examinador Interno Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Msc. Kátia Muniz Côco - Examinador Externo Gerente de Regulação do Saneamento Básico - Agência Reguladora de Saneamento Básico e Infraestrutura Viária do Espírito Santo

DECLARAÇÃO DO AUTOR

Declaro, para fins de pesquisa acadêmica, didática e técnico-científica, que o presente Trabalho de Conclusão de Curso pode ser parcial ou totalmente utilizado desde que se faça referência à fonte e aos autores.

Vitória, 09 de Dezembro de 2011.

Fernando Emanuel Lagassi Canal

AGRADECIMENTOS

A minha vontade é de fazer uma lista enorme e cheia de nomes para agradecer. Agradecer a cada pessoa que passou pela minha vida e deixou uma memória, guardada no coração. Algumas deixam coisas boas, outras coisas ruins, mas as pessoas que levo comigo são aquelas que mudaram a minha vida, que me fizeram dar um sorriso, que me fizeram esquecer uma tristeza, que me ensinaram algo valioso, que me ajudaram nos momentos difíceis, que não fugiram em nenhum segundo, nem nos felizes, nem nos tristes. Muito obrigado a todos vocês!

Aproveitando a oportunidade, agradeço especialmente:

À minha mãe, Izolina de Fátima Lagassi Canal, por ser a base e o principal pilar de tudo que sou, pela educação que recebi e pelo amor incontestável;

Ao orientador desse trabalho, José Antônio Tosta do Reis, pela paciência, pelas horas de discussão, por ter sido tão prestativo e por ser mais que um orientador acadêmico na minha vida. Obrigado, Zé!

À Luciana Santos, pelo fornecimento dos dados fisiográficos e mapas das bacias hidrográficas aqui estudadas;

À professora americana, Sue Niezgoda, pelos ensinamentos que tornaram possível essa pesquisa e por ter se colocado a disposição na execução deste trabalho;

A todos os meus amigos de verdade, pois as coisas mais importantes que podemos ter na vida são as que duram pra sempre, que podemos sempre levar conosco, e acho que nenhuma delas é mais forte que uma amizade sincera. Agradeço àqueles que ficaram marcados pra sempre no meu coração, e mesmo que não nos falemos por muito tempo sempre vou lembrar-me deles, pois eles fizeram uma grande diferença na minha vida! Quem são eles? Não importa, pois sei que se eles lerem isso vão ter certeza que me lembrei deles quando escrevi isso.

"Jamais se desespere em meio às sombrias aflições de sua vida, pois das nuvens mais negras cai água límpida e fecunda."

(Provérbio Chinês)

RESUMO

Chuvas intensas são fenômenos meteorológicos que, em geral, são caracterizados por forte precipitação contínua e curta duração, podendo causar enchentes, principalmente em locais onde as características fisiográficas são favoráveis ao aumento do escoamento superficial. Além das características fisiográficas, as variáveis meteorológicas são necessárias para estudos climáticos e hidrológicos, dentre as quais a precipitação é a que apresenta a maior variabilidade espaçotemporal. O Hydrologic Modeling System, desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC-HMS), é um modelo computacional do tipo chuva-vazão e foi desenvolvido para simular os processos de precipitação-escoamento em bacias hidrográficas. O presente trabalho teve por objetivo geral analisar o comportamento de vazões de enchente em bacias que apresentam diferentes padrões de uso e ocupação do solo, considerando diferentes alternativas para estimativa de chuvas intensas. Foram utilizadas as bacias hidrográficas definidas pelas estações fluviométricas de Matilde, Afonso Cláudio - Montante e Inconha - Montante. Para a definição de equações de chuvas intensas foram empregados os métodos de Chow-Gumbel e de Bell e o programa computacional Plúvio. As durações de chuvas de projeto foram consideradas equivalentes aos tempos de concentração das bacias, conforme calculado pela fórmula de Johnstone. O método utilizado para distribuição temporal das chuvas intensas foi o dos blocos alternados. Para a geração dos hidrogramas foi empregado a metodologia do Soil Conservation Service, com o uso do Hydrologic Modeling System. Para a maior parte das condições estimadas, as equações de chuvas intensas produzidas pelo programa computacional Plúvio superestimaram os valores de intensidades pluviométricas associadas à durações inferiores a 200 minutos. Nas simulações realizadas observou-se forte dependência dos picos de vazão e volumes de escoamento superficial com o *curve number*.

Palavras-chave: Hidrogramas, HEC-HMS, Bell, Chow-Gumbel e programa computacional Plúvio.

ABSTRACT

Rainstorms are meteorological phenomena generally characterized by continuous heavy rainfall and short duration that may cause floods in places where the watershed physiographic characteristics are favorable to increased runoff. In addition to the physiographic, meteorological characteristics are required for weather and hydrological studies. Among these meteorological variables precipitation presents the highest spatial and temporal variability. The HEC-HMS is a computational precipitation-runoff model that was developed to simulate the rainfallrunoff processes in watersheds. HEC-HMS model may simulate rivers flow in urban This study aims to analysis flood flows behavior in or natural watersheds. watersheds presenting different land use, considering different alternatives for rainstorms evaluation. There were considered watersheds defined by the gauging stations (located in Espírito Santo state, Brazil) Matilde, Claudio Afonso - Montante and Iconha - Montante. programa computacional Plúvio, Chow-Gumbel and Bell methods were applied for intensity-duration-frequency curves equations. Rainstorm durations were considered equal to concentration time estimated by the Johnstone method. Temporal distribution of the rainstorms was the alternate blocks method. For generation of hydrographs it was applied the Soil Conservation Service method, by the application of the Hydrologic Modeling System. For most conditions projected, the rainstorm equations produced by software Plúvio overestimated the intensities values associated with durations less than 200 minutes. All simulations showed a strong dependence of peak flow and runoff volumes with the curve number.

Keywords: Hydrograph, HEC-HMS, Bell, Chow-Gumbel, software Plúvio.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo de valores de CN em função da cobertura e do tipo hidrológico
do solo (condição II de umidade) proposto por SCS
Tabela 2 - Valores do coeficiente de deflúvio, C 39
Tabela 3 - Ordenadas do Hidrograma Unitário Sintético Adimensional do método SCS
Tabela 4 - Características das estações fluviométricas
Tabela 5 – Características das estações pluviométricas58
Tabela 6 - Características fisiográficas das bacias 58
Tabela 7 - Relação entre as alturas pluviométricas (mm) das chuvas máximas emSão Paulo
Tabela 8 - Relação entre as alturas pluviométricas – Valores médios propostos peloDepartamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS)61
Tabela 9 - Tempos de concentração (minutos) estimados pelos métodos deJonhstone, Bransby-Williams e Dooge
 Tabela 10 - Precipitações máximas (em mm) associadas a diferentes períodos de retorno e durações estimadas com auxílio do método de Chow-Gumbel - Resultados referentes à estação pluviométrica de Afonso Cláudio Montante70
Tabela 11 - Intensidades (mm/hora) associadas a diferentes períodos de retorno e durações, estimadas com auxílio do método de Chow-Gumbel - Resultados referentes à estação pluviométrica de Afonso Cláudio Montante
Tabela 12 - Valores de <i>hdia</i> , 2 e <i>h</i> 60, 2 para as estações pluviométricas estudadas

- Tabela 14 Intensidades (mm/hora) associadas a diferentes períodos de retorno e durações, estimadas com auxílio do método do programa computacional Plúvio
 Resultados referentes à estação pluviométrica de Afonso Cláudio Montante .73

- Tabela 18 Precipitações máximas (em mm) associadas a diferentes períodos de retorno e durações estimadas com auxílio do método de Chow-Gumbel -Resultados referentes à estação pluviométrica de Iconha Montante.......95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo dos componentes do ciclo hidrológico24
Figura 2 - Tipos de chuvas26
Figura 3 – Fontes de escoamento em cursos de água – seção transversal
Figura 4 - Esquema representativo da infiltração conforme modelo de Green-Ampt 35
Figura 5 - Subdivisão de uma bacia a partir das isócronas40
Figura 6 - Hidrograma Unitário Adimensional empregado pelo método SCS44
Figura 7 - Bacia hidrográfica delimitada para a seção transversal da estação fluviométrica de Afonso Cláudio – Montante
Figura 8 - Bacia hidrográfica delimitada para a seção transversal da estação fluviométrica de
Figura 9 - Bacia hidrográfica delimitada para a seção transversal da estação fluviométrica de Iconha
Figura 10 - Ambiente de trabalho do programa computacional Plúvio64
Figura 11 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 2 anos para a estação pluviométrica de Afonso Cláudio Montante
Figura 12 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 25 anos para a estação pluviométrica de Afonso Cláudio Montante74
Figura 13 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 100 anos para a estação pluviométrica de Afonso Cláudio Montante
Figura 14 - Hietograma produzido a partir das diferentes equações de chuvas

Figura 14 - Hietograma produzido a partir das diferentes equações de chuvas intensas empregando-se a duração equivalente ao tempo de concentração para

- Figura 19 Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de Chow-Gumbel considerando período de retorno de 02 anos – Resultados referentes a seção de Afonso Cláudio Montante......81

- Figura 23 Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 2 anos para a estação pluviométrica de Matilde......104

Figura 24 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 5 anos para a estação pluviométrica de Matilde
1
Figura 25 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 10
anos para a estação pluviométrica de Matilde
Figura 26 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 25
apos para a ostação pluviomátrica do Matildo
allos para a estação proviometrica de Matilde
Figura 27 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 50
apos para a estação pluviométrica de Matildo
allos para a estação pluviometrica de Matilde
Figura 28 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 100
anos para a estação pluviométrica de Matilde
Figura 29 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 2 anos
nara a estação pluviométrica de Iconha Montante
Figura 30 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 5 anos
nara a estação pluviométrica de Iconha Montante
Figura 31 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 10
anos para a estação pluviométrica de Iconha Montante
Figura 32 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 25
anos para a estação pluviométrica de Iconha Montante 109
Figura 33 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 50
anos para a estação pluviométrica de Iconha Montante 109
Figura 34 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 100
anos para a estação pluviométrica de Iconha Montante 110
Figura 35 - Hietograma produzido a partir das diferentes equações de chuvas
intensas empregando-se a duração equivalente ao tempo de concentração para

o período de retorno de 02 anos – Resultados para a Bacia de Matilde......112

- Figura 37 Hietograma produzido a partir das diferentes equações de chuvas intensas empregando-se a duração equivalente ao tempo de concentração para o período de retorno de 100 anos – Resultados para a Bacia de Matilde.......113

- Figura 43 Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de programa computacional Plúvio considerando

- Figura 50 Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de programa computacional Plúvio considerando período de retorno de 02 anos – Resultados referentes a seção de Matilde ... 119
- Figura 51 Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de programa computacional Plúvio considerando período de retorno de 25 anos – Resultados referentes a seção de Matilde ... 119

- Figura 52 Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de programa computacional Plúvio considerando período de retorno de 100 anos – Resultados referentes a seção de Matilde 119

- Figura 60 Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método do programa computacional Plúvio considerando

- Figura 61 Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de Chow-Gumbel considerando período de retorno de 25 anos Resultados referentes a seção de Afonso Cláudio Montante...122
- Figura 62 Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de Chow-Gumbel considerando período de retorno de 100 anos Resultados referentes a seção de Afonso Cláudio Montante.123

1	INTRODUÇÃO	20
2	OBJETIVOS	22
2.1	GERAL	
2.2	ESPECÍFICOS	22
3	REVISÃO DE LITERATURA	23
3.1	CICLO HIDROLÓGICO	23
3.2	FORMAÇÃO DAS CHUVAS E SEUS TIPOS	25
3.3	INTERCEPTAÇÃO, EMPOÇAMENTO E INFILTRAÇÃO	27
3.3.	1 Interceptação	27
3.3.	2 Empoçamento	
3.3.	3 Infiltração	
3.4	ESCOAMENTO SUPERFICIAL	29
3.5	MODELOS ASSOCIADOS COM A AVALIAÇÃO DO	ESCOAMENTO
SUF	PERFICIAL	
3.5.	1 Modelos de infiltração	31
3.5.	1.1 Inicial e Constante	
3.5.	1.2 Déficit e constante	
3.5.	1.3 Método de Horton (Exponencial)	
3.5.	1.4 Green and Ampt	
3.5.	1.5 SCS Curve Number	
3.5.	2 Modelos chuva-vazão	
3.5.	2.1 Método Racional	
3.5.	2.2 Método das isócronas	
3.5.	2.3 Hidrograma unitário de Clark	41
3.5.	2.4 Hidrograma unitário do Soil Conservation Service	43
3.5.	2.5 Hidrograma unitário de Snyder	46
3.5.	3 Tempo de concentração	47
3.5.	4 Chuvas intensas	49
3.5.	5 Modelos de evapotranspiração	50
4	MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.1	ÁREA DE ESTUDO	51
4.1.	1 Bacia do rio Doce	51

SUMÁRIO

4.1.	.2 Bacia do rio Benevente	53
4.1.	.3 Bacia do rio Novo	55
4.2	INFORMAÇÕES HIDROLÓGICAS E FISIOGRÁFICAS	57
4.3	EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS	59
4.3.	.1 Método de Chow-Gumbel	59
4.3.	.2 Método de Bell	62
4.3.	.3 Programa Computacional Plúvio	63
4.3.	.4 Distribuição temporal das chuvas	64
4.4	MODELO CHUVA-VAZÃO	66
4.5	TEMPO DE CONCENTRAÇÃO	68
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.1	AVALIAÇÃO DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO	69
5.2	ESTABELECIMENTO DAS EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS	70
5.3	GERAÇÃO DE HIETOGRAMAS	77
5.4	GERAÇÃO DE HIDRÓGRAFAS	80
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	84
REF	FERÊNCIAS	86
APÉ	ÊNDICE A	93
APÉ	ÊNDICE B	98
APÉ	ÊNDICE C	102
APÉ	ÊNDICE D	111
APÉ	ÊNDICE E	115

1 INTRODUÇÃO

Chuvas intensas são fenômenos meteorológicos que, em geral, são caracterizados por forte precipitação contínua e curta duração. Tais fenômenos podem ocasionar enchentes ou cheias, principalmente em áreas mais ocupadas quando, de uma forma geral, os sistemas de drenagem passam a ter menor eficiência em função da redução da infiltração da água no solo, aumentando o escoamento superficial. As enchentes podem ter impactos negativos, pois podem provocar perdas econômicas, danos ao desenvolvimento e perdas de vidas humanas.

Uma vez que a infiltração e o escoamento superficial são interdependentes, os fatores que influenciam a infiltração de água no solo interferem também no escoamento superficial resultante. Pode-se dizer que, sob uma intensidade constante de chuva, a infiltração e o escoamento superficial são processos antagônicos. Isso porque à medida que a infiltração diminui o escoamento superficial aumenta.

Segundo AKAN e HOUGHTALEN (2003), a cobertura e os tipos de uso do solo, além de seus efeitos sobre as condições de infiltração da água no solo, exercem importante influência na interceptação da água advinda da chuva. Quanto maior a porcentagem de cobertura vegetal, a rugosidade da superfície do solo e a evapotranspiração das plantas, maiores serão as taxas de infiltração de água no solo quando ocorrer uma chuva e, conseqüentemente, menor será o escoamento superficial.

A inclinação do terreno é outro fator que influencia fortemente as perdas de solo e de água por erosão hídrica, pois, à medida que ela aumenta, maiores serão o volume e a velocidade do escoamento superficial e menor será a infiltração de água no solo. Com isso, aumenta a capacidade de transporte das partículas de solo pela enxurrada, assim como a própria capacidade desta de desagregar solo por ação de cisalhamento, principalmente quando concentrada nos sulcos direcionados no sentido do caimento do terreno (COGO *et al*, 2003).

Outro fator importante no processo de determinação da relação chuva-vazão é o empoçamento da água nas depressões existentes na superfície do solo, que só

começa a ocorrer quando a intensidade de precipitação excede a taxa de infiltração ou quando a capacidade de armazenamento de água no solo for ultrapassada (SILVA *et al,* 2006).

A previsão de vazões resultante de enxurradas causadas por chuvas intensas, usualmente, é realizada por meio de dois tipos de modelos: os modelos determinísticos chuva-vazão e modelos estocásticos. Os primeiros procuram representar os processos físicos de transformação de chuva em vazão, enquanto que os modelos estocásticos baseiam-se na análise da estrutura de dependência temporal das séries de afluências (LUCAS *et al*, 2009).

O Hydrologic Modeling System, desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC-HMS), é um modelo computacional do tipo chuva-vazão utilizado para simular os processos de precipitação-escoamento de bacias hidrográficas, podendo ser aplicado a uma ampla gama de áreas geográficas para resolver o maior número possível de problemas. Dentre tais problemas, incluem-se simulação de escoamento em rios e enxurradas em bacias urbanas ou naturais (SCHARFFENBERG e FLEMING, 2010).

As relações de vazão em função do tempo (mais conhecidas como Hidrograma ou Hidrógrafa) produzidas pelo programa são utilizadas diretamente para previsão de vazão e de impactos provocados pela urbanização numa Bacia, de modificações causadas por projetos de vertedouros de reservatórios, de cálculos para redução de dano de inundação e da determinação da planície de inundação e áreas de risco (SCHARFFENBERG e FLEMING, 2010).

Dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo analisar estimativas de vazões de enchente para algumas bacias hidrográficas do Estado do Espírito Santo, considerando diferentes alternativas definição de curvas de intensidade-duração-frequência e diferentes parâmetros relativos ao uso e ocupação do solo.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Analisar a influência da adoção de diferentes alternativas de definição de curvas de intensidade-duração-frequência e diferentes parâmetros relativos ao uso e ocupação do solo em estimativas de vazões de enchente em bacias hidrográficas do Estado do Espírito, com o uso do *Hydrologic Modeling System*.

2.2 ESPECÍFICOS

Para a consecução do trabalho proposto foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Selecionar e sistematizar registros pluviométricos e fisiográficos referentes às bacias hidrográficas estudadas;
- Estabelecer, para as bacias hidrográficas estudadas, equações de intensidade-duração-frequência a partir da aplicação dos métodos de Bell e Chow-Gumbel e do programa computacional Plúvio;
- Estimar, com auxílio do Hydrologic Modeling System, hidrogramas associados a diferentes eventos pluviométricos e diferentes possíveis padrões de uso e ocupação do solo das bacias hidrográficas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 CICLO HIDROLÓGICO

O Ciclo hidrológico pode ser definido como o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera (região denominada Hidrosfera), impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre e compreende todos os processos de formação, transferência e acúmulo de água na Hidrosfera (SILVEIRA, 2002).

A importância do ciclo da água (ou ciclo hidrológico) está relacionado ao movimento e à troca de água nos seus diferentes estados físicos entre os oceanos, as calotas de gelo, as águas superficiais, as águas subterrâneas e a atmosfera.

Esse ciclo é mantido pelo Sol, que fornece a energia para elevar a água da superfície terrestre para a atmosfera (evaporação), e pela gravidade, que faz com que a água condensada caia e que, uma vez na superfície, circule através de linhas de água que se reúnem em rios até atingir os oceanos ou se infiltre nos solos e nas rochas, através dos seus poros, fissuras e fraturas. A água uma vez em ambiente subterrâneo pode ser retirada pelas raízes das plantas e novamente ser coloca da atmosfera pelo processo de transpiração. Desta forma, nem toda a água precipitada alcança a superfície terrestre, já que uma parte, na sua queda, pode ser interceptada pela vegetação e volta a evaporar-se (PINHEIRO e KURY, 2008). Uma representação esquemática do ciclo é apresentada pela Figura 1.

A água existente na Terra está distribuída em sua maior parte no mar, constituindo 97% do total, contrapondo aos valores de água doce presente em maior parte nas geleiras (cerca de 2,2%), enquanto que apenas 0,8% está disponível nos rios e córregos. Destes 0,8%, 97% da água é subterrânea e apenas 3% superficial (SPERLING, 2005).



Figura 1 - Esquema representativo dos componentes do ciclo hidrológico Fonte: ZANETTI (2007)

3.2 FORMAÇÃO DAS CHUVAS E SEUS TIPOS

Além da umidade atmosférica, que é fundamental para a formação das chuvas, também são necessários outros fatores, dentre os quais estão mecanismos de resfriamento do ar, a presença de núcleos higroscópicos e um mecanismo que produza o aumento das gotas (VILLELA e MATTOS, 1975).

O mecanismo de resfriamento é normalmente a ascensão do ar quente e úmido, que se resfria por diferença de pressão até atingir seu ponto de saturação. Com a presença dos núcleos higroscópicos e com a ocorrência da condensação do vapor, constituindo minúsculas gotas ao redor dos referidos núcleos. Nesse momento as gotas formadas ainda não possuem massa o suficiente para cair sobre a superfície da terra, permanecendo em suspensão devido à resultante das forças de atrito e empuxo que atuam sobre elas. Em um dado momento, devido a um processo que culmine no crescimento das gotas, ocorre a precipitação (VILLELA e MATTOS, 1975).

A absorção de uma gotícula por outra através de choques diretos (processo chamado de coalescência direta) e o crescimento por condensação de vapor d'água sobre as gotículas são os principais fenômenos que contribuem para o aumento do tamanho das gostas (GARCEZ e ALVAREZ, 1988). Essa última é responsável pelo desencadeamento das chuvas, enquanto a coalescência é responsável pela aceleração do fenômeno.

VILLELA e MATTOS (1975) e AYOADE (1988) classificam a precipitação líquida em três tipos de chuva: a orográfica convectiva e a ciclônica.

A chuva orográfica por definição é aquela gerada por movimento vertical forçado do ar sobre uma área em elevação. Essa forma de precipitação usualmente ocorre em direção às montanhas e pode se apresentar a partir de nuvens tipo *cumulus*, com duração e quantidade muito variáveis, logo, de intensidade não bem definida de uma forma geral (VILLELA e MATTOS, 1975; AYOADE, 1988)

A chuva convectiva está ligada aos movimentos verticais da atmosfera causados por aquecimento diferencial na região envolvida. É associada a nuvens do tipo *cumulus*

e *cumulonimbus*. Esse tipo de chuva costuma ocorrer isoladamente nos fins de tarde do verão, sendo a intensidade de sua precipitação elevada (VILLELA e MATTOS, 1975; AYOADE, 1988)

O tipo frontal é decorrente dos movimentos atmosféricos horizontais de grande escala (sinóticos) associados ao choque entre sistemas de alta e baixa pressão. Apresenta intensidade moderada e contínua de chuva, com duração de horas a dias, podendo ser generalizada por vastas áreas por onde a depressão se desloca (VILLELA e MATTOS, 1975; AYOADE, 1988)

A Figura 2 apresenta uma representação esquemática dos tipos de chuvas brevemente apontados.



Figura 2 - Tipos de chuvas Fonte: COLLISCHONN e TASSI (2007)

3.3 INTERCEPTAÇÃO, EMPOÇAMENTO E INFILTRAÇÃO

A chuva possui várias destinações dentro de uma bacia hidrográfica. Parte da chuva é interceptada pela vegetação, outra parte fica empoçada em depressões superficiais do relevo e/ou infiltrar no solo e outra pequena parte poderá evaporar antes mesmo de atingir o solo. O que sobrar dessa dinâmica tornar-se-á escoamento superficial (AKAN E HOUGHTALEN, 2003).

Abstrações ou perdas referente à quantidade de chuva precipitada é entendido como a fração da chuva que não vem a contribuir com o escoamento superficial. De forma geral, as abstrações incluem interceptação, empoçamento, evaporação, transpiração e infiltração. Em alguns casos, como para a determinação de hidrogramas, a evaporação e a transpiração podem ser desconsideradas (AKAN E HOUGHTALEN, 2003).

3.3.1 Interceptação

O ciclo hidrológico tem diversas componentes, porém uma delas é desprezada em alguns estudos, a interceptação da precipitação pela vegetação. A interceptação tem grande importância no balanço hídrico, principalmente em áreas com florestas de grande porte. A influência da vegetação no recebimento e redistribuição das chuvas é significativa dentro do contexto do balanço hídrico de um determinado local (OLIVEIRA *et al*, 2008).

A interceptação pode ser entendida como a parte da precipitação que em contato com a vegetação se acumula nas folhas e ramos, ou seja é interceptada pelas árvores, plantas e qualquer outro tipo de vegetação antes que a chuva atinja o solo. Essa quantidade de água permanece aderida aos galhos, folhas e demais superfícies da planta e eventualmente evaporará de volta a atmosfera. A interceptação ocorre principalmente durante a parte inicial da chuva, já que as folhas e galhos irão atingir a sua capacidade de armazenamento rapidamente. A quantidade de chuva interceptada dependerá do tipo e densidade da vegetação e, também, da quantidade de chuva (AKAN E HOUGHTALEN, 2003; OLIVEIRA *et al*, 2008).

3.3.2 Empoçamento

O empoçamento refere-se àquela parte de chuva que não chega a se tornar escoamento superficial por ser retida em pequenas poças e depressões na superfície do solo. Vale destacar que isso pode ocorrer tanto em superfícies impermeabilizadas como em permeáveis. A água retida em superfícies impermeáveis irá eventualmente evaporar de volta a atmosfera (AKAN E HOUGHTALEN, 2003).

Em superfícies permeáveis, a chuva irá encher as pequenas poças e depressões após o solo se tornar saturado e a infiltração ser reduzida muito consideravelmente. Boa parte dessa água irá evaporar de volta para a atmosfera, enquanto uma porção irá infiltrar no solo com o tempo (GUERRA, SILVA E BOTELHO, 2005).

3.3.3 Infiltração

Infiltração é o processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo e que depende, fundamentalmente, da carga hidráulica disponível na superfície do solo, da textura e estrutura do solo, da massa específica, da condutividade hidráulica e da umidade do solo, quando do início do processo. É um fenômeno físico de grande importância a prática no estudo hidrológico, na conservação de água e solo e em projetos de irrigação e drenagem (MELLO, 2003).

A taxa na qual a água penetra no solo é variável e expressa em termos de lâmina d'água por unidade de tempo. Inicia-se com taxas altas e progressivamente vai diminuindo até atingir valores constantes. A taxa de infiltração da água no solo é um dos fatores que mais influencia o escoamento superficial, o qual é responsável por processos como a erosão e as inundações que ocorrem, quando da incidência de chuvas intensas. A formação de crosta decorrente do impacto das gotas da chuva é um dos fatores que pode reduzir acentuadamente a infiltração e, conseqüentemente, aumentar o escoamento superficial, contribuindo para a erosão do solo (BRANDÃO *et al*, 2003).

A estimativa da taxa de infiltração de água no solo é condicionante para determinar a repartição da precipitação em lâmina infiltrada e escoada superficialmente, permitindo a previsão das vazões de enchente dos cursos d'água (MELLO, 2003).

3.4 ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Denomina-se escoamento superficial o segmento do ciclo hidrológico que estuda o deslocamento das águas na superfície terrestre. Considera o movimento da água, a partir da menor porção de chuva que, caindo sobre um solo saturado de umidade ou impermeável, escoa pela superfície, formando, sucessivamente, as enxurradas ou torrentes, córregos, ribeirões, rios e lagos ou reservatórios de acumulação (CURITIBA, 2006).

Dessa forma, o excesso de chuva ou escoamento superficial é calculado pelo total precipitado menos as abstrações. Sendo assim, o escoamento superficial é definido como a altura de excesso de chuva produzido por unidade de tempo. Isso pode ser calculado como a taxa de chuva menos a taxa de perdas. Normalmente assume-se que o excesso de chuva é o único causador de escoamento superficial em bacias urbanas. Dessa forma, o volume total de excesso de chuva é igual ao volume total de escoamento superficial produzido (AKAN E HOUGHTALEN, 2003).

O escoamento superficial ocorre através de uma seqüência de diferentes formas de escoamento, iniciando com uma película laminar de pequena espessura que escoa sobre as superfícies do terreno, formando a seguir as chamadas "águas livres" nestas superfícies (CURITIBA, 2006).

CURITIBA (2006) aponta, conforme mostrado na Figura 3, que a água das chuvas atinge o leito do curso de água através de quatro caminhos distintos, a saber: o Escoamento Superficial, o Escoamento Sub-superficial (ou hipodérmico); o Escoamento Subterrâneo; e a Precipitação direta sobre o curso de água.



Os seguintes fatores são determinantes para a magnitude e ocorrência temporal do escoamento superficial: Área da bacia de contribuição; Topografia da bacia; Condições da superfície do solo e geologia do subsolo; e Obras de controle ou usos a montante. (CURITIBA, 2006).

3.5 MODELOS ASSOCIADOS COM A AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

3.5.1 Modelos de infiltração

A infiltração é definida como a entrada de água no solo através da interface soloatmosfera. O termo taxa de infiltração refere-se à quantidade de água que atravessa a unidade de área da superfície do solo por unidade de tempo (PANACHUKI, 2003).

O processo de infiltração é de importância prática, pois, muitas vezes, determina o balanço de água na zona das raízes e o deflúvio superficial em relação a quantidade de chuva precipitada.

Segundo POTT e DE MARIA (2003), vários fatores condicionam o movimento de água no solo, os quais têm sido relatados por diversos autores: a porosidade (PERROUX e WHITE, 1988), a densidade do solo (SALES *et al.*, 1999), a cobertura do solo (SIDIRAS e ROTH, 1987), a textura e o grau de agregação do solo (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990), o selamento superficial (CHAVES *et al.*, 1993), a umidade inicial (ARAÚJO FILHO e RIBEIRO, 1996), a matéria orgânica, a estrutura e a variabilidade espacial do terreno (KLAR, 1984).

Desta forma, a infiltração é um processo físico complexo, de difícil caracterização devido, principalmente, à anisotropia e heterogeneidade comumente encontradas nos solos (CHOWDARY *et al*, 2006). Entretanto, devido à importância deste processo, diversos modelos foram desenvolvidos na tentativa de simulá-lo (ZONTA, 2010).

A taxa de infiltração (i) é definida como a variação da infiltração acumulada (dI) ao longo da variação do tempo (dt) (PANACHUKI, 2003), sendo representada pela equação 3.1.

$$i = \frac{dI}{dt} \tag{3.1}$$

Assim, a partir de dados de lâmina de água infiltrada em intervalos de tempos conhecidos, determinados no campo para as condições desejadas podem-se construir modelos de *I* em função de *t* (PANACHUKI, 2003).

Existem diversos modelos e formas de cálculo da infiltração no solo. Na sequência, alguns desses modelos são sumariamente apresentados.

3.5.1.1 Inicial e Constante

O conceito básico do método inicial e constante para infiltração é que a máxima taxa potencial de infiltração é constante durante o evento. Dessa forma, a expressão para o cálculo do escoamento superficial para o método Inicial e Constante pode ser escrita de acordo com a equação 3.2.

$$p_{e_{i}} = \begin{cases} p_{t} - f_{c} & se \ p_{t} > f_{c} \\ 0 & se \ p_{t} \le f_{c} \end{cases}$$
(3.2)

Na equação anterior:

- *p_t*: precipitação média ocorrida numa dada área considerada durante um incremento de tempo *t* + Δ*t* (mm);
- p_{e_i} : altura de escoamento superficial num intervalo *i* que considera um incremento de tempo $t + \Delta t$ (mm);
- f_c : infiltração constante durante um incremento de tempo $t + \Delta t$.

FELDMAN (2000) destaca que uma quantidade de chuva deve ser considerada pelo modelo para representar a interceptação, conseqüência da absorção pela cobertura superficial (incluindo plantas), e o empoçamento, conseqüência de depressões e irregularidades no terreno, onde a água permanece e eventualmente evapora ou é infiltrada posteriormente. Vale dizer que esses processos ocorrem antes de se iniciar a formação do escoamento superficial e são chamados de perdas iniciais.

Nesse caso, a quantidade total de chuva pode ser escrita pela equação 3.3.

$$p_{e_{t}} = \begin{cases} 0 & se \sum p_{e_{i}} < I_{a} \\ p_{t} - f_{c} & se \sum p_{e_{i}} > I_{a} & e & p_{t} > f_{c} \\ 0 & se & \sum p_{e_{i}} > I_{a} & e & se & p_{t} \le f_{c} \end{cases}$$
(3.3)

Onde:

- p_{e_t} : é a altura milimétrica total de escoamento superficial (mm)
- *I_a*: Perdas iniciais (mm)

3.5.1.2 Déficit e constante

Esse modelo é diferente do modelo de infiltração Inicial e Constante porque as perdas iniciais podem ser consideradas novamente depois de longos períodos de tempo; neste caso o modelo funcionava como se o solo se "recuperasse" da saturação.

Para usar esse modelo, as perdas iniciais e a taxa constante de infiltração devem ser especificadas. O déficit é calculado continuamente, computado como os volumes de perdas iniciais menos os volumes de precipitação somados aos volumes de recuperação durante períodos sem ocorrência de precipitação. A taxa de recuperação pode ser estimada como a soma da taxa de evaporação e da taxa de infiltração, ou como alguma fração dela (FELDMAN, 2000).

3.5.1.3 Método de Horton (Exponencial)

A partir de experimentos de campo, Horton (1940) estabeleceu, para o caso de um solo submetido a uma precipitação com intensidade superior à capacidade de infiltração, uma relação empírica para representar o decaimento da infiltração com o tempo, que pode ser escrita na forma da equação 3.4.

$$f = f_{min} + (f_0 - f_f)e^{-kt}$$
(3.4)

Na expressão 3.4:

- *f*: capacidade de infiltração (igual à taxa real de infiltração) em um instante *t* qualquer;
- f_0 : capacidade de infiltração no tempo t = 0;
- *f_f*: capacidade final de infiltração;
- *f_{min}*: capacidade de infiltração mínima, ou taxa mínima de infiltração, que é um valor assintótico (valor final de equilíbrio) avaliado em um tempo *t* suficientemente grande;
- k: constante característica do solo (constante de Horton), com dimensão de tempo;
- *t*: tempo.

É relevante observar que a equação 3.4 é dimensionalmente homogênea. A constante *k* deve ter o inverso da unidade do tempo, os parâmetros *f*, f_0 e f_c são emiricos e determinados pelo encaixe da equação 3.4 a dados experimentais de infiltração medidos em campo. Segundo AKAN E HOUGHTALEN (2003) não existem tabelas largamente aceitas com valores para os parâmetros empíricos de acordo com as diferentes características do uso do solo.

3.5.1.4 Green and Ampt

O modelo teórico de Green e Ampt, proposto originalmente em 1911, se baseia numa análise física do processo, exprimindo a infiltração em função de parâmetros físicos do solo. Segundo AKAN E HOUGHTALEN (2003) todos os parâmetros envolvidos nesse método possuem raízes físicas e podem ser estimados ou determinados para vários tipos de solos.

A equação 3.5 constitui a expressão proposta por Green e Ampt¹

$$T_i = K_s \left[1 + \psi_f \frac{(\theta_s - \theta_i)}{l} \right]$$
(3.5)

¹ 1911 *apud* AKAN e HOUGHTALEN (2003)

Na expressão 3.5:

- *T_i*: Taxa de infiltração de água no solo, mm/H;
- K_s: Condutividade hidráulica do solo saturado, mm/H;
- ψ_f : Potencial matricial do solo na frente de umedecimento, mm;
- θ_s : Umidade do solo saturado, %
- θ_i: Umidade do solo no início do processo de infiltração, %
- *I*: Infiltração acumulada, mm.

AKAN E HOUGHTALEN (2003), MELLO (2003), ZANETTI (2007) e MELLO (2008) explicam que o modelo de Green-Ampt foi derivado da equação de Darcy e considera a processo de infiltração em um ambiente com o solo homogêneo.

Observando-se a Figura 4, pode-se perceber que este modelo considera que, durante o processo de infiltração, existe uma carga hidráulica (H_0) constante na superfície do solo e uma frente de umedecimento bem nítida, acima da qual o solo se encontra uniformemente saturado, com condutividade hidráulica K_s , e que o potencial matricial (ψ_f) nesta frente permanece igual ao valor do potencial matricial (resultado do efeito combinado de dois mecanismos, capilaridade e adsorção) antes da infiltração. Foi também assumido pelo modelo que a água penetra no solo abruptamente, o que resulta na formação de duas regiões bem definidas, sendo a primeira com umidade equivalente ao solo saturado (θ_s) e a segunda com umidade igual à que possuía antes do início do processo (θ_i), o que caracteriza o denominado movimento tipo pistão (ZANETTI, 2007).



Figura 4 - Esquema representativo da infiltração conforme modelo de Green-Ampt (Fonte: ZANETTI, 2007).
No entanto, segundo o modelo de Green-Ampt, o volume acumulado por infiltração é uma função implícita do tempo, sendo portanto o seu cálculo um processo iterativo, moroso e pouco expedito (MELLO, 2008).

3.5.1.5 SCS Curve Number

Esse método é empírico e foi desenvolvido pelo departamento americano de agricultura, *Soil Convervation Service* (SCS, 1986), para estimar o escoamento superficial resultante de um evento de chuva intensa e pode ser chamado de *runoff curve number method*. É importante registrar que esse é um método combinado, onde Interceptação, empoçamento, evaporação e infiltração são todos considerados para o cálculo das abstrações de chuva (AKAN E HOUGHTALEN, 2003).

O SCS considera o solo de acordo com o grupo hidrológico, conforme apontado por TUCCI (1998), FELDMAN (2000) e BRASIL (2005) e NUNES e FIORI (2007) da seguinte maneira:

- Grupo A solos com baixo potencial de deflúvio. Inclui areias em camadas profundas, com muito pouco silte ou argila, inferior a 8%.
- Grupo B solos arenosos com camadas menos profundas que as do tipo A e com maior teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. Este grupo de solo em seu todo, tem uma capacidade de infiltração acima da média.
- Grupo C solos argilosos com teor total de argila de 20% a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras, até a profundidade de 1,2 m. No caso das Terras Roxas, esses dois limites máximos podem ser de 40% e 1,5 m. Os solos do grupo C possuem baixa taxa de infiltração quando completamente úmidos.
- Grupo D solos argilosos, com 30% a 40% de argila total, com camada densificada a uns 50 cm de profundidade e quase impermeável. São solos com elevado potencial de escoamento e baixa taxa de infiltração.

O *curve number* (CN) é uma característica da bacia e pode variar de 0 a 100. O valor do CN depende do grupo hidrológico do solo, do tipo de cobertura do solo e de suas condições, da porcentagem de áreas impermeáveis na bacia e das condições inicias de umidade do solo. Alguns valores de CN são apresentados na Tabela 1, que reúne os valores para condições médias de umidade inicial (condições II de umidade).

	Gru	po			
Tipo de uso do solo/ Trata	mento/	Hid	rológ	ico	
Condições hidrológicas		А	В	С	D
Uso Residencial,	%				
Tamanho médio do lote	Impermeável				
até 500 m^2	65	77	85	90	92
1000 m^2	38	61	75	83	87
1500 m^2	30	57	72	81	86
Estacionamentos pavimentados, telhados		98	98	98	98
Ruas e estradas:					
Pavimentadas, com guias e drenagem		98	98	98	98
com cascalho		76	85	89	91
de terra		72	82	87	89
Áreas comerciais	(85% de				
impermeabilização)			92	94	95
Distritos industriais (72% impermeável)		81	88	91	93
Espaços abertos, parques,					
boas condições, cobertura grama > 75%		39	61	74	80
condições médias, cobertura grama >		49	69	79	84
50%	-				

Tabela 1 - Exemplo de valores de CN em função da cobertura e do tipo hidrológico do solo (condição II de umidade) proposto por SCS.

A expressão para o cálculo de escoamento superficial é dada pela equação 3.6.

$$R = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S_D}$$
(3.6)

Onde:

- *R*: Escoamento superficial (mm);
- P: Precipitação (mm);
- *I_a*: Abstrações iniciais (mm);
- S_D : armazenamento potencial do solo no instante que o escoamento se inicia.

O cálculo do valor de S_D é dado pela equação 3.7.

$$S_D = \frac{25400 - 254CN}{CN}$$
(3.7)

Fonte: TUCCI (1998)

Normalmente assume-se que $I_a = 0,2S_D$. Assim, a equação 3.6 pode ser escrita como mostrado na equação 3.8.

$$R = \frac{(P - 0.2S_D)^2}{P + 0.8S_D} \tag{3.8}$$

Deve-se perceber que essa equação só é valida se a quantidade de precipitação for maior que as abstrações iniciais, caso contrário R = 0.

3.5.2 Modelos chuva-vazão

Vários modelos foram desenvolvidos na tentativa de se prever a relação chuvavazão em uma dada bacia hidrográfica. Alguns desses modelos serão brevemente descritos a seguir.

3.5.2.1 Método Racional

O método racional deve ser usado apenas em bacia consideradas pequenas, com áreas menores que 2 km² (DER, 2009).

Para esses casos aplicáveis, RIGHETTO (1998) observa que após um período de estabilização do processo de transformação da chuva em deflúvio, a vazão no exutório da bacia será constante e igual à equação 3.9.

$$Q = iA \tag{3.9}$$

Na expressão 3.9:

- Q: Vazão no exutório da bacia (m³/s);
- *i*: Intensidade do evento de precipitação (m/s);
- *A*: Área de drenagem da bacia (m²).

Como visto anteriormente, geralmente ocorrem perdas de chuva devido a interceptação, ao empoçamento e a infiltração. Dessa forma, devem ser consideradas as perdas do volume de água precipitado em relação ao escoado.

Neste sentido, define o coeficiente de deflúvio (denotado por *C*), que corresponde à relação entre o volume escoado e o volume precipitado. Com isso, a fórmula do método Racional expressa por meio da equação 3.9 passa a ser representada pela equação 3.10 (RIGHETTO, 1998)

$$Q = CiA \tag{3.10}$$

A Tabela 2 apresenta alguns valores de *C* relativos a tipos de ocupação de solo.

Tabela 2 - Valores do coeficiente de deflúvio, C			
	Coeficiente		
Tipo de ocupação	С		
Áreas com edificação; Grau de			
adensamento:			
Muito grande	0,70 a 0,95		
Grande	0,60 a 0,70		
Médio	0,40 a 0,60		
Pequeno	0,20 a 0,40		
Áreas livres: matas, parques, campos	0,05 a 0,20		
Pavimentos	0,70 a 0,95		
Solos com vegetação:			
Arenoso	0,05 a 0,15		
Argiloso	0,15 a 0,35		
Forston DICULTTO (4000)			

Fonte: RIGHETTO (1998)

3.5.2.2 Método das isócronas

O valor total do volume de escoamento superficial pode ser considerado advindo de várias subáreas dentro de uma dada bacia. Podem ser chamadas de isócronas aquelas subáreas associadas a um determinado tempo t, correspondendo aos pontos da bacia onde o tempo de percurso da água, desses locais, até o exutório, é igual a t (RiGHETTO, 1998). A Figura 5 ilustra uma bacia subdividida em subáreas após o traçado das isócronas.



Figura 5 - Subdivisão de uma bacia a partir das isócronas Fonte: Adaptado de AKAN E HOUGHTALEN (2003)

RIGHETTO (1998) indica que o traçado das isócronas é feito por meio da estimava dos valores de velocidade do escoamento superficial nos vários trechos de percurso d'água numa bacia. Dessa forma, define-se um intervalo de tempo Δt , as isócronas são traçadas para os tempos $1\Delta t$, $2\Delta t$, ..., $n\Delta t$ (Figura 5).

Pode-se dizer que a contribuição de vazão de cada subárea é independente uma da outra, tanto no seu traslado até o exutório da bacia quanto na sua magnitude (RIGHETTO, 1988).

Seja *i* (*t*) a intensidade de uma chuva que ocorre uniformemente sobre a bacia e i_j a intensidade da chuva no tempo $t = j \Delta t$. Segundo o método das isócronas, as vazões previstas no exutório da bacia são expressas pela equação 3.11.

$$Q_n = C_n A_n i_1 + C_{n-1} A_{n-1} i_2 + \dots + C_1 A_1 i_n$$
(3.11)

Onde:

- C_n: Coeficiente de deflúvio da subárea n
- A_n: área da região n
- *Q_n*: Vazão total

Para tempos $t = k \cdot \Delta t > n \cdot \Delta t$, obtêm-se a equação 3.12.

$$Q_k = C_n A_n i_{k-n+1} + \dots + C_1 A_1 i_k \tag{3.12}$$

Em bacias maiores, com chuvas mais demoradas, ou em casos em que se deseja, além da vazão máxima, o volume das cheias, é necessário o emprego de modelos baseados no hidrograma unitário (COLLISCHONN, 2009).

No caso da inexistência de dados históricos para elaboração do hidrograma unitário especifico de uma dada bacia, pode-se utilizar um hidrograma unitário (HU) sintético.

Os hidrogramas unitários (HUs) sintéticos foram estabelecidos com base em dados de algumas bacias e são utilizados quando não existem dados que permitam estabelecer o HU. Os métodos de determinação do HU baseiam-se na determinação do valor de algumas características do hidrograma, como o tempo de concentração, o tempo de pico, o tempo de base e a vazão de pico.

Alguns métodos que utilizam o hidrograma unitário sintético serão brevemente apresentados nos itens subseqüentes.

3.5.2.3 Hidrograma unitário de Clark

O modelo de Clark não é inteiramente sintético, já que pelo menos uma observação de um hidrograma do escoamento superficial deve ser feita. Este método é formado por duas partes: a primeira consiste em dividir a bacia em subáreas com posterior translação destas para que todas as subáreas contribuam na vazão; a segunda corresponde a simulação de um reservatório linear para considerar a contribuição devido à diminuição da lâmina d'àgua quando cessada a chuva. O método é descrito por FELDMAN (2000).

FELDMAN (2000) a ponta que o curto tempo de armazenamento da água na bacia (no solo, na superfície e nos canais) tem um importante papel na transformação do excesso de chuva em escoamento superficial. O modelo de reservatório linear é uma representação comum dos efeitos desse armazenamento. Essa modelagem começa com a equação 3.13.

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \tag{3.13}$$

Onde:

- $\frac{dS}{dt}$: taxa de transferência de água do armazenamento no tempo t;
- *I_t*: escoamento médio afluente ao armazenamento no tempo *t*;
- O_t : escoamento médio efluente ao armazenamento no tempo t.

Como o armazenamento é linear, o armazenamento no tempo *t* pode ser estimado pela equação 3.14.

$$S_t = R_{arm} O_t \tag{3.14}$$

Na expressão anterior, R_{arm} representa a constante linear do armazenamento. Combinando as equações 3.13 e 3.14 e resolvendo usando as aproximações das diferenças finitas obtêm-se a equação 3.15.

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} (3.15)$$

Na equação 3.15 C_A e C_B são coeficientes de direcionamento, sendo calculados por meio das equações 3.16 e 3.17.

$$C_A = \frac{\Delta t}{R_{arm} + 0.5\Delta t} \tag{3.16}$$

$$C_B = 1 - C_A \tag{3.17}$$

O valor médio da vazão de saída durante o período t é dado pela equação 3.18.

$$\overline{O_t} = \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \tag{3.18}$$

Com modelo de Clark, o armazenamento linear representa o somatório dos efeitos de todo armazenamento da bacia sobre o escoamento superficial. Dessa forma, conceitualmente, o armazenamento pode ser considerado como se estivesse no exutório da bacia (FELDMAN, 2000).

O modelo de Clark considera, adicionalmente, o tempo necessário para que o excesso de chuva desloque-se para o exutório da bacia, considerando um modelo de canal linear de escoamento, onde o escoamento é guiada de pontos remotos para os reservatórios lineares localizados no exutório do bacia, considerando-se o atraso (translação), mas sem atenuação. Esse atraso é representado implicitamente com o histograma de tempo-área, que especifica que a área da bacia contribui para a vazão no exutório em função no tempo. Se a área for multiplicada pela altura unitária e dividida pelo intervalo Δt , o resultado é o afluente do reservatório linear localizado no exutório (I_t) (FELDMAN, 2000).

Resolvendo-se as equações 3.15 e 3.18 recursivamente, com o afluente já calculado, obtem-se o resultado de $\overline{O_t}$. Porém, se a ordenada afluente na equação 3.14 é o escoamento superficial gerado pela altura unitária de excesso, o efluente desse reservatório é, na verdade, U_t , o hidrograma unitário (FELDMAN, 2000).

As aplicações envolvendo o modelo unitário de Clark requerem: (i) propriedades do histograma área-tempo e (ii) o coeficiente de armazenamento, *R*.

O coeficiente de armazenamento da bacia (R_{arm}) é dado em função do armazenamento temporário do excesso de precipitação na bacia hidrográfica que vai para o exutório. Este também pode ser estimado por meio de calibração se dados de chuva e vazão estiverem disponíveis. Como R_{arm} possui unidades de tempo, existe apenas um significado qualitativo para isso no sentido físico. Clark (1945) indicou que R_{arm} pode ser calculado como a vazão no ponto de inflexão da hidrógrafa dividido pela derivada temporal do fluxo.

3.5.2.4 Hidrograma unitário do Soil Conservation Service

O U.S. Natural resources Conservation Service (antigo Soil Conservation Service ou SCS) recomenda o uso de um hidrograma unitário sintético que foi desenvolvido por Victor Mockus (SCS, 1986). O referido hidrograma pode ser visualizado por meio da Figura 6 e suas ordenadas são tabuladas na Tabela 3.



Figura 6 - Hidrograma Unitário Adimensional empregado pelo método SCS

t/t _p	Q_u/Q_{up}	t/t _p	Q_u/Q_{up}
0	0	2,2	0,207
0,2	0,1	2,4	0,147
0,4	0,31	2,6	0,107
0,6	0,66	2,8	0,077
0,8	0,93	3	0,055
1	1	3,4	0,029
1,2	0,93	3,8	0,015
1,4	0,78	4,2	0,01
1,6	0,56	4,6	0,003
1,8	0,39	5	0
2	0,28		
	Fonte: AK	AN (1993)	

Tabela 3 - Ordenadas do Hidrograma Unitário Sintético Adimensional do método SCS

Na Tabela 3:

- Q_u = vazão causada por milímetro de excesso de chuva (m³/s/mm);
- Q_{up} = pico de vazão por milímetro de excesso de chuva (m³/s/mm);
- *t* = tempo (hora);
- t_p= tempo de ocorrência do pico de vazão (hora).

O formato estabelecido pelo hidrograma unitário sintético do modelo SCS representa a média do formato de um grande número de hidrogramas unitários obtidos de bacias hidrográficas com diferentes características (AKAN E HOUGHTALEN, 2003).

FELDMAN (2000) observa que para se determinar os valores de Q_{up} , t_p e t_L são empregadas as equações 3.19, 3.20 e 3.21, respectivamente.

$$Q_{up} = \frac{2,08A}{t_p}$$
(3.19)

$$t_p = \frac{t_R}{2} + t_L \tag{3.20}$$

$$t_L = 0,6t_c \tag{3.21}$$

Nas três últimas expressões:

- A = área da bacia hidrográfica (km²)
- *t_R*= Duração do excesso de chuva (hr)
- *t_L*= tempo de retardo da bacia hidrografia
- *t_c*= tempo de concentração

O tempo de retardo da bacia pode ser definido como o tempo entre o centro de massa da precipitação efetiva (escoamento superficial direto) e o pico do hidrograma.

Dessa forma, pode-se converter o hidrograma unitário adimensional para o hidrograma unitário de uma dada bacia após a determinação dos valores de Q_{up} e t_p . Para tal, deve-se multiplicar os valores da ordenada da Tabela 3 por Q_{up} e os valores da abscissa por t_p (AKAN E HOUGHTALEN, 2003).

É importante destacar que, a rigor, o hidrograma unitário SCS deve apenas ser usado onde $t_R = 0.2t_p$ ou $t_R = 0.133t_c$. Na prática, entretanto, admite-se um intervalo para o uso do método estabelecido por, $t_R \le 0.25t_p$ ou $t_R \le 0.17t_c$ (US ARMY CORPS OF ENGINEERS².

²1987 *apud* AKAN e HOUGHTALEN (2003)

3.5.2.5 Hidrograma unitário de Snyder

Snyder selecionou o tempo de retardo, o tempo de pico máximo de vazão e o tempo base como sendo as características críticas para a obtenção de um hidrograma unitário, definindo então um padrão onde a equação 3.22 é aplicável (FELDMAN, 2000)

$$t_L = 5,5t_r \tag{3.22}$$

- t_r = Duração da chuva
- t_L = tempo de retardamento da bacia

Dessa forma, se a duração da chuva é conhecida, pode-se determinar o tempo de retardo e, por conseqüência, o tempo de pico da hidrograma unitário do padrão de Snyder. Se a duração do hidrograma unitário desejado para a bacia hidrográfica de interesse é significantemente diferente dos valores gerados pela equação 3.22, a equação 3.23 pode ser usada para definir a relação do tempo para alcance do pico de vazão do hidrograma unitário e a duração do hidrograma (FELDMAN, 2000).

$$t_{pR} = t_L - \frac{t_r - t_R}{4} \tag{3.23}$$

Na expressão 3.23:

- *t_R*= Duração do hidrograma unitário
- t_{pR} = tempo de retardo

Para estimar o valor do tempo de retardo com os parâmetros dentro do sistema internacional de unidades, usa-se a equação 3.24.

$$t_p = 0.75C_t (LL_c)^{0.3} \tag{3.24}$$

Na equação 3.24:

- C_t = Coeficiente da bacia
- L = Comprimento do curso d'água principal do exultorio até o divisor;
- L_c= Comprimento do curso d'água do exultório até o centróide

O parâmetro C_t da equação 3.24 é encontrado por meio de calibração, uma vez que não é parâmetros com princípio físico. Os valores de C_t normalmente variam entre 1,8 e 2,2, entretanto valores fora desse intervalo podem ser encontrados (FELDMAN, 2000).

3.5.3 Tempo de concentração

As vazões máximas geradas por um evento de chuva intensa são obtidas no momento em que o tempo de chuva iguala-se ao tempo de concentração da bacia. O intervalo entre o fim da precipitação e o ponto do hidrograma na seção de controle que indica o fim do escoamento superficial, pode ser considerado como o tempo de concentração (TUCCI, 2002),

AKAN E HOUGHTALEN (2003) definem o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica como sendo o tempo necessário para que, mantida uma precipitação constante e uniforme, com intensidade superior a capacidade de infiltração, toda a área da bacia passe a contribuir para a seção de controle.

Pode ser entendido também como o tempo necessário para o percurso de um pulso de escoamento, desde o ponto mais afastado, no divisor, até a seção estudada da bacia (RAUDKIVI, 1979 *apud* FRANCO 2004).

O Quadro 1 relaciona diferentes métodos disponíveis para a apropriação do tempo de concentração. Tais informações foram retiradas de AKAN E HOUGHTALEN (2003), SANTOS (2010) e, principalmente, FRANCO (2004).

Método	Fórmula	Limitação	Comentários
Cinemático	$t_c = \frac{1}{60} \sum \frac{L_i}{V_i}$		<i>L_i</i> : comprimento de cada trecho homogêneo (em metros); <i>V_i</i> : velocidade de escoamento no trecho " <i>i</i> ", (m/s).
Kirpich	$t_c = \frac{3,989 \text{L}^{0,77}}{\text{S}^{0,385}}$	Bacias com declividades de 3% a 10% e áreas de, no máximo 0,50 km².	Reduzir o tempo de concentração em 40% no caso de bacias urbanas. <i>L</i> : comprimento do talvegue, km; <i>S</i> : declividade do talvegue, m/m.
ex-DNOS	$t_c = \frac{10A^{0,3}L^{0,2}}{Ki^{0,4}}$		 <i>i</i> = declividade do talvegue, %; <i>L</i> = comprimento do talvegue, m; <i>A</i> = área da bacia, ha; <i>K</i> = coeficiente adimensional
Onda Cinemática	$t_c = 447(nL)^{0,60}S^{-0,3}I^{-0,4}$	É adequada para bacias muito pequenas em que o escoamento de superfícies seja predominante.	L: comprimento do talvegue, km; S: declividade do talvegue, m/m; I: intensidade da chuva, em mm/h; n: coeficiente de Manning.
Soil Conservation Service – SCS (E.U.A.)	$t_{c} = 342L^{0,8} \left[\left(\frac{1000}{CN} \right) - 90,7S - 0,5 \right]$	Áreas de drenagem de até 8 km².	 L = comprimento do talvegue, km; S = declividade do talvegue, m/m; CN = número da curva, pelo método do SCS.
Dooge	$t_c = 21,88 \frac{A^{0,41}}{S^{0,17}}$	Bacias rurais de 140 a 930 km .	S = declividade do talvegue, m/m; A = área da bacia, km ² .
Johnstone	$t_c = 20,17 \left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0,5}$	Áreas de 65 a 4200 km ²	S = declividade do talvegue, em m/m; L = comprimento do talvegue, em km.
Califórnia Culverts Practice	$t_c = 57 \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0,385}$	Mesmas que Kirpich.	E a mesma fórmula de Kirpich, substituindo S por L/H. H: desnível total do talvegue, metros.
Federal Aviation Agency	$t_c = 22,73(1,1 - CL0,50S - 0,33)$	Válida para escoamento em superfície de áreas muito pequenas	C: coeficiente de escoamento superficial; L: comprimento do talvegue, km; S: declividade do talvegue, m/m.

Quadro 1 - Diferentes métodos de cálculo para o tempo de Concentração

(Continua)

(Método	Fórmula	Limitação	Comentários
Bransby- Williams	$t_c = 14,6LA^{-0,1}S^{-0,2}$		L = Comprimento do talvegue; A = área da bacia; S = declividade média do talvegue;
Arnell	$t_c = 1,67.10^{-3} \left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0,7}$	Para bacias naturais, com 0,50≤ C≤ 0,70:	S = declividade do talvegue, m/km; L = comprimento do talvegue,
	$t_c = 2, 4.10^{-4} \left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0,7}$	Para bacias urbanas, com 0,7≤ C≤ 0,9:	C = coeficiente de escoamento superficial
Tauahiya	$t_c = 0.83 \frac{L}{S^{0.6}}$	áreas não urbanizadas de 0,10 a 20 ha.	S = declividade do talvegue, m/m;
i suciliya	$t_c = 0.36 \frac{L}{S^{0.5}}$	áreas urbanizadas de 0,10 a 20 ha.	L = comprimento do talvegue, km;

Quadro 1 - Diferentes métodos de cálculo para o tempo de Concentração (Continuação)

Fonte: Adaptado de Franco (2004).

Segundo SCS (1986), WALESH (1989), AKAN (1993) e PORTO (1995) a forma teórica mais correta de se calcular o tempo de concentração é o uso do método cinemático.

3.5.4 Chuvas intensas

A aplicação dos métodos de geração de hidrograma brevemente descritos na seção 3.5.2 normalmente requerem o conhecimento de dados de chuva com durações inferiores a 24 horas.

Para a caracterização das precipitações, é necessário o conhecimento da sua duração, intensidade e freqüência de ocorrência ou período de retorno. Essa relação é comumente denominada de curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF) sendo uma ferramenta utilizada nos processos de transformação chuva-vazão (DAMÉ *et al*, 2008).

Existem diversas metodologias para se transformar séries históricas em tabelas ou equações com durações de chuvas menores que 24 horas (ou até mesmo maiores), em função do período de retorno. Algumas delas são descritas por, BELL (1969), CHEN (1983), CETESB (1986), GARCEZ (1988), BELTRAME *et al.* (1991), ROBAINA e PEITER (1992), DAMÉ, (2001), e UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA (2006).

Utilizando série de dados de precipitação diária de Pelotas - RS, referente ao período de 1982-1998, Damé (2008) compara algumas dessas diferentes metodologias. Segundo o referido autor o método que melhor representou as intensidades máximas de precipitação, nos períodos de retorno de 2 e 10 anos, foi o Método das Relações proposto por CETESB (1986).

3.5.5 Modelos de evapotranspiração

Evaporação inclui a água que passa para o estado de vapor a partir do solo e da superfície das plantas. A transpiração, por sua vez, ocorre como resultado da ação fisiológica das plantas. O valor da evaporação e da transpiração é combinado, passando a se chamar evapotranspiração (FELDMAN, 2000).

TUCCI e BELTRAME (2001) apontam os métodos normalmente utilizados para a determinação da evaporação como: transferência de massa, balanço de energia, equações empíricas, balanço hídrico e evaporímetros. Cada um deles com suas particularidades, vantagens e desvantagens. No caso de se monitorar a evapotranspiração, os procedimentos usualmente utilizados são as medidas diretas, métodos baseados na temperatura, métodos baseados na radiação e balanço hídrico.

Diversos fatores afetam a evapotranspiração entre os quais se destacam a radiação solar, a temperatura, a velocidade do vento e o teor de água. Esses fatores interagem entre si determinando que resultados medidos por qualquer processo, consequentemente, sejam diferentes de uma observação para outra (ABUMANSSUR, 2006).

FELDMAN (2000) observa que, em aplicações comuns, a modelagem de evapotranspiração pode ser omitida, uma vez que ela é insignificante durante um evento de chuva e/ou uma inundação. Dessa forma, em casos de eventos de chuvas de curta duração, os valores de evapotranspiração podem ser omitidos. Entretanto, durante períodos sem chuva, o estado de umidade da bacia continua sendo alterado, enquanto a água move ou é armazenada. Nesses casos, a evapotranspiração deve ser considerada como um componente crítico nessa dinâmica.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

O Estado do Espírito Santo conta com 78 municípios e população de 2,9 milhões de habitantes. A maior parte do território localiza-se na Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste e uma pequena parte na Região do Atlântico Leste. Todas as sedes são abastecidas por mananciais superficiais, sendo que a utilização de água subterrânea ocorre apenas de forma complementar, na região metropolitana e norte do Estado (SANTOS, 2010).

Porções de três diferentes bacias hidrográficas, total ou parcialmente pertencentes ao estado do Espírito Santo e em regiões com diferentes condições climatológicas e fisiográficas, constituíram a área de estudo do presente trabalho: porções das bacias dos rios Novo, Benevente e Doce. Estas bacias serão brevemente apresentadas nos itens subseqüentes. Adicionalmente, serão indicadas as seções fluviométricas no interior de cada bacia hidrográfica para as quais foram estabelecidos os hidrogramas de enchentes, bem como as estações pluviométricas que, em cada bacia, constituíram referência para a avaliação das chuvas intensas.

4.1.1 Bacia do rio Doce

A bacia hidrográfica do rio Doce está situada na região Sudeste, entre os paralelos 18°45' e 21°15' de latitude sul e os meridianos 39° 55' e 43°45' de longitude oeste, compreendendo uma área de drenagem de cerca de 83.400 km², dos quais 14% pertencem ao Estado do Espírito Santo. Limita-se ao sul com a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, a oeste com a bacia do rio São Francisco, e, em pequena extensão, com a do rio Grande. Ao norte, limita-se com a bacia dos rios Jequitinhonha e Mucuri e a noroeste com a bacia do rio São Mateus. Abrange, total ou parcialmente, áreas de 228 municípios, sendo 202 em Minas Gerais e 26 no Espírito Santo e possui uma população total da ordem de 3,1milhões de habitantes.

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2001), a economia da bacia está baseada principalmente nas seguintes atividades:

- Agricultura: pecuária de leite e corte, suinocultura, café, cana-de-açúcar, hortifrutigranjeiros e cacau;
- Indústria: siderurgia, metalurgia, mecânica, química, alimentícia, álcool, têxtil, curtume, papel e celulose;
- Mineração: ferro, ouro, bauxita, manganês, rochas calcáreas e pedras preciosas.

A bacia abriga o maior complexo siderúrgico da América Latina. Três das cinco maiores empresas de Minas Gerais no ano de 2000 - a Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, a ACESITA e a USIMINAS - operam na bacia. Além disso, se encontra na bacia a maior mineradora a céu aberto do mundo, a Companhia Vale do Rio Doce. Tais empreendimentos industriais, que apresentam níveis de qualidade e produtividade industrial que estão entre os maiores do mundo, desempenham papel significativo nas exportações brasileiras de minério de ferro, aços e celulose. Além deles, a bacia contribui na geração de divisas pelas exportações de café (MG e ES) e polpa de frutas (ES) (ANA, 2001)

A precipitação média anual na bacia varia de 1.500 mm, nas nascentes localizadas nas serras da Mantiqueira e do Espinhaço, a 900 mm, na região da cidade de Aimorés, MG, voltando a crescer em direção ao litoral (ANA, 2001).

Na bacia do rio Doce, a estação fluviométrica para a qual foram estabelecidos hidrogramas de cheia foi a estação de Afonso-Claudio Montante, instalada e em operação na calha do rio Guandu e com área de drenagem de aproximadamente 466 Km². A Figura 7 representa a hidrografia da Bacia hidrográfica delimitada para a seção transversal da estação fluviométrica de Afonso Cláudio – Montante.



Figura 7 - Bacia hidrográfica delimitada para a seção transversal da estação fluviométrica de Afonso Cláudio – Montante

Fonte: SANTOS (2010)

4.1.2 Bacia do rio Benevente

A Bacia do rio Benevente drena os municípios de Anchieta, Alfredo Chaves, Iconha, Guarapari e Piúma. Tem uma área de drenagem de cerca de 1.190 km², constituindo uma importante fonte de abastecimento de água das cidades que integram a grande Vitória (SAMARCO, 2006).

Dentre os afluentes mais importantes destacam-se: na margem direita, os rios Pongal, Joéba, São Joaquim, Maravilha e Crubixá e, na margem esquerda, os rios Salinas, Grande Corindiba, Caco de Pote e Batatal. O rio Benevente percorre uma extensão aproximada de 34 km da sua nascente, na Serra do Tamanco, entre os municípios de Alfredo Chaves e Vargem Alta, até a foz, no Oceano Atlântico. (SAMARCO, 2006).

Sua foz está localizada na cidade de Anchieta, onde se situa um dos maiores manguezais do Espírito Santo, com cerca de 6,5 km de extensão e uma área aproximada de 4,6 km², sendo considerado o sétimo maior do litoral capixaba (VALE e FERREIRA, 1998).

Nas áreas do entorno do manguezal, com destaque para a parte superior do estuário com maior influencia de água doce, vê-se claramente a mudança da paisagem na transição para outros ecossistemas, resquícios de restinga e mata atlântica. Contudo, grande parte da área de restinga/mata atlântica é ocupada pelas atividades econômicas de pastagens para pecuária (criação de gado) e silvicultura (eucalipto) para produção de madeira (SAMARCO, 2006).

Na bacia do rio Benevente, a estação fluviométrica para a qual foram estabelecidos hidrogramas de cheia foi a estação de Matilde, instalada e em operação na calha do rio Benevente e com área de drenagem de 210 Km². A Figura 8 representa a hidrografia da Bacia hidrográfica delimitada para a seção transversal da estação fluviométrica de Matilde.



Figura 8 - Bacia hidrográfica delimitada para a seção transversal da estação fluviométrica de Matilde Fonte: SANTOS (2010)

4.1.3 Bacia do rio Novo

O rio Novo nasce na localidade de Alto Richmond, em Vargem Alta. Ele passa a ser chamado de rio Piúma quando a ele se junta o rio Iconha. Deságua no mar no município de Piúma, e tem uma área de drenagem de 732 Km². Fazem parte da bacia os municípios de Iconha, Benevente, Piúma, Rio Novo do Sul e Vargem Alta (SANTOS 2010).

Dentre as principais atividades econômicas desenvolvidas na região estão o cultivo de cana-de-açúcar nas áreas mais baixas e de banana nas áreas altas. Dentre as principais atividades degradantes da bacia do rio Novo estão a extração de mármore, a falta de proteção nas nascentes e de mata ciliar ao longo dos córregos e rios, a falta de tratamento dos esgotos domésticos em cidades da região e o uso intensivo de agrotóxicos nos canaviais da Usina Paineiras (COIMBRA, 2001).

Na bacia do rio Novo, a estação fluviométrica para a qual foram estabelecidos hidrogramas de cheia foi a estação de Iconha Montante, instalada e em operação na calha do rio Iconha e com área de drenagem de aproximadamente 148 Km². A Figura 9 representa a hidrografia da Bacia hidrográfica delimitada para a seção transversal da estação fluviométrica de Iconha - Montante





Fonte: SANTOS (2010)

4.2 INFORMAÇÕES HIDROLÓGICAS E FISIOGRÁFICAS

As informações hidrológicas necessárias à condução do presente trabalho foram obtidas a partir da base de dados hidrológicos a Agência Nacional de Águas (ANA). Para a manipulação dos registros pluviométricos e fluviométricos foi utilizado o programa computacional Hidro, de domínio público, produzido e disponibilizado pela ANA. A Tabela 4 e a Tabela 5 respectivamente apresentam as características das estações fluviométricas e pluviométricas analisadas.

As características fisiográficas das bacias hidrográficas consideradas no presente estudo, obtidas a partir do trabalho desenvolvido por Santos (2010), estão reunidas na Tabela 6.

Nome	Iconha - Montante	Matilde	Afonso Cláudio - Montante				
Código	57320000	57250000	56990990				
Rio	Rio Iconha	Rio Benevente	Rio Guandú				
Município	Iconha	Alfredo Chaves	Afonso Cláudio				
Responsável	ANA	ANA	ANA				
Operadora	CPRM	CPRM	CPRM				
Latitude	-20°47'10"	-20°32'34"	-20°4'39"				
Longitude	-40°49'33"	-40:49:41	-41°07'27"				
Altitude (m)	25	525	350				

Tabela 4 - Características das estações fluviométricas

Tabela 5 – Características das estações pluviométricas						
Nome	Iconha - Montante	Matilde (DNOS)	Afonso Cláudio - Montante			
Código	2040005	2040011	2041023			
Rio	-	-	-			
Município	Iconha	Alfredo Chaves	Afonso Cláudio			
Responsável	ANA	ANA	ANA			
Operadora	CPRM	CPRM	CPRM			
Latitude	-20°47'10"	-20°33'24"	-20°04'43"			
Longitude	-40°49'33"	-40°48'41"	-41°07'17"			
Altitude (m)	25	515	300			

Tabela 6 - Características fisiográficas das bacias

Dados Utilizados	Estações fluviométricas utilizadas na delimitação das Bacias				
	Afonso Cláudio - Montante	Matilde	Iconha - Montante		
Área da Bacia (km²)	466	210	148		
Altitude Máxima (m)	1237,28	1256,26	793,45		
Altitude Mínima (m)	360	520	22,66		
Comprimento do Curso d'água principal (km)	49,08	33,15	19,87		
Declividade Média (m/m)	0,018	0,022	0,039		

Fonte: SANTOS, 2010

4.3 EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS

Para a determinação das equações de chuvas intensas foram empregados os métodos de Chow-Gumbel e de Bell e o programa computacional Plúvio. Estas alternativas para a apropriação de equações de chuvas intensas são sumariamente descritos nas seções subseqüentes.

4.3.1 Método de Chow-Gumbel

O procedimento empregado para o ajuste da distribuição de Gumbel reproduz o apresentado por VILLELA e MATTOS (1975).

A partir das séries históricas de totais diários precipitados de cada estação pluviométrica analisada, foram selecionadas as precipitações máximas de cada ano. Estabelecidas as séries de precipitações máximas anuais, foram determinados os correspondentes valores de média aritmética (\bar{x}) e desvio padrão (S_x).

Na sequência, a cada precipitação máxima anual foi associada uma probabilidade de ocorrência. Esta etapa do trabalho, precedida do ordenamento das precipitações máximas anuais, foi conduzida com o auxílio da equação 4.1.

$$P = \frac{m}{n+1} \tag{4.1}$$

Na expressão anterior, m representa o número de ordem e n a extensão da série histórica.

Em seguida, as precipitações máximas anuais foram ajustadas à distribuição do tipo I de Fisher-Tippet, também conhecida por distribuição de Gumbel (equação 4.2).

$$p = 1 - e^{-e^{-y}} \tag{4.2}$$

Na expressão 4.2:

- p probabilidade de um valor extremo da série ser maior ou igual a x (intensidades extremas), e
- *y* variável reduzida de Gumbel.

Da equação 4.2 pode-se explicitar a variável reduzida y. Desta forma:

$$y = -\ln(-\ln(1-P))$$
 (4.3)

A partir dos valores da variável reduzida estimados com auxílio da expressão 4.3 foram determinados os correspondentes valores de média (\bar{y}) e desvio padrão (S_y). Na sequência, com emprego da equação 4.4, determinou-se a variável auxiliar *K*.

$$K = \frac{(y - \bar{y})}{s_y} \tag{4.4}$$

Interpolando-se os valores de *K* linearmente para obtenção dos períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos, foram obtidos, com auxílio da expressão 4.5, os correspondentes valores de chuvas com duração de 1 dia.

$$P = \bar{x} + KS_x \tag{4.5}$$

A partir dos valores de chuva de 1 dia para cada período de retorno, foi possível determinar a precipitação para 24 horas e para menores durações a partir dos coeficientes de conversão constantes nas Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7 - Relação entre as alturas pluviométricas (mm) das chuvas máximas em São Paulo

	Período de retorno					
Relação entre alturas pluviométricas das	5	10	25	50	75	100
chuvas máximas de 24h e de 1 dia	1,13	1,13	1,14	1,15	1,14	1,15
Fonte: CETESB (1986)						

Relação entre as alturas pluviométricas	Valores obtidos do estudo do DNOS (médios)
5 min / 30 min	0,34
10 min / 30 min	0,54
15 min / 3 min	0,7
20min / 30 min	0,81
25 min / 30 min	0,91
30 min / 1 h	0,74
1h / 24h	0,42
6h / 24h	0,72
8h / 24h	0,78
10h / 24h	0,82
12h / 24h	0,85

Tabela 8 - Relação entre as alturas pluviométricas – Valores médios propostos pelo Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS)

Fonte: Adaptado de CETESB (1986).

Utilizaram-se os valores apresentados na Tabela 7 uma vez que não foram encontrados dados específicos para as regiões estudadas. Vale destacar que REBOUÇAS (2008) utilizou dos mesmos dados para obtenção de equações de chuvas intensas para localidades na bacia do rio Doce.

Os valores de intensidade média (i_m) foram obtidos dividindo-se cada altura pluviométrica obtida pela duração, em cada período de retorno. Na sequência, com auxílio de análises de regressão, foram estabelecidas equações no formato da expressão 4.6, usualmente empregada em hidrologia para discutir a variação da intensidade pluviométrica.

$$i_m = \frac{k.T^m}{(t+t_0)^n}$$
(4.6)

Na equação anterior:

- *i_m* intensidade pluviométrica, mm/h;
- T período de retorno, anos;
- t duração da precipitação, min; e
- k; m; n; t₀ parâmetros relativos à localidade, estimados com auxílio da análise de regressão.

A determinação das equações de chuvas intensas pelo método de Chow-Gumbel foi realizada com auxílio da planilha eletrônica Microsoft Excel ® (MICROSOFT, 2007).

4.3.2 Método de Bell

BELL³ associa a altura pluviométrica de uma chuva intensa para um determinado tempo de duração e período de retorno à chuva intensa, padrão, com duração de 60 minutos de duração, e dois anos de período de retorno (equação 4.7).

$$h_{(t;TR)} = (\alpha \ln TR + \beta_1)(\beta_2 t^{\gamma} - \beta_3)h_{(60;2)}$$
(4.7)

Na expressão anterior:

- *h*_(*t*;*TR*)- altura pluviométrica (mm) de chuva intensa de duração t e período de retorno TR;
- *h*_(60;2)- altura pluviométrica (mm) de chuva intensa, padrão de 60 minutos de duração, e dois anos; e
- α; β₁; β₂; β₃; γ parâmetros regionais ajustados pelo método dos mínimos quadrados.

Para a utilização do método, é necessário estimar $h_{(60;2)}$, o que pode ser feito com uma série histórica curta de dados pluviográficos. Inexistindo observações pluviográficas, porém dispondo-se de dados de precipitações máximas anuais com duração diária, pode-se estimar $h_{(60;2)}$ recorrendo à relação empírica estabelecida pela equação 4.8.

$$h_{(60;2)} = Kh_{(dia;2)}$$
(4.8)

Na expressão anterior *K* constitui relação regional entre a precipitação pluvial de 60 minutos e um dia de duração para um período de retorno de dois anos. RIGHETTO (1998), após avaliar o regime de chuvas intensas em diferentes regiões do país, sugeriu que K vale aproximadamente 0,51.

Para esse trabalho, o valor de $h_{(dia;2)}$ foi obtida a partir da distribuição probabilística de Gumbel.

4.3.3 Programa Computacional Plúvio

O programa computacional Plúvio, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recurso Hídricos da Universidade Federal de Viçosa (UFV, 2006), possibilita a obtenção da equação de chuvas intensas, para qualquer localidade dos Estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Bahia e Tocantins. Para os demais estados, permite sua obtenção apenas para as localidades onde já existem as equações.

Tendo em vista o fato da caracterização da equação de intensidade-duraçãofreqüência depender exclusivamente dos quatro parâmetros utilizados na equação 4.6 (parâmetros k; m; n; t_0), e de os seus valores em diversas localidades já terem determinados em diferentes trabalhos de pesquisa (DERNADIN e FREITAS, 1982; FENDRICH, 1998; FREITAS *et al*, 2001; PINTO, 1999; SILVA *et al*, 1999; SILVA *et al*, 2002; SILVA *et al*, 2003), o Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa desenvolveu metodologia para a obtenção das equações de chuvas intensas em locais em que essa não é conhecida (UFV, 2006). Essa metodologia está fundamentada no uso de interpolador que permite obter cada um dos parâmetros da equação chuvas intensas da precipitação a partir das informações disponíveis para as localidades de cada Estado.

Para obtenção das equações do programa computacional Plúvio manipulam-se apenas os dados de latitude e longitude da estação desejada e os parâmetros da equação de chuvas intensas são então calculados. A interpolação é realizada independentemente para cada um dos parâmetros da equação empregada pelo programa. O fator de ponderação utilizado para cada localidade corresponde ao inverso da quinta potência da distância entre a localidade para o qual a equação é pretendida e as localidades em que o parâmetro é conhecido.

A Figura 10 apresenta o ambiente de trabalho do programa computacional Plúvio.



Figura 10 - Ambiente de trabalho do programa computacional Plúvio

4.3.4 Distribuição temporal das chuvas

Com os métodos de determinação de equação de chuvas intensas, obtém-se a intensidade média e/ou a precipitação total do evento de chuva intensa, dado o período de retorno e a duração.

De forma simplificada, pode-se usar a idéia de que a chuva não varia com o tempo, ou seja, tem distribuição temporal uniforme. Entretanto, para chuvas de projeto com duração maior, as que são comumente utilizadas em métodos que envolvem o hidrograma unitário, considera-se que a intensidade da chuva varia ao longo do evento de projeto. Existem vários métodos para criar uma distribuição temporal para chuvas de projeto. Um método freqüentemente utilizado quando disponível a equação de intensidade-duração-frequência é conhecido como método dos blocos alternados (CHOW *et al.*, 1988).

O método das blocos alternados, empregado neste trabalho para o estabelecimento da distribuição temporal das chuvas intensas, é descrito por PORTELA, MARQUES e CARVALHO (2000) e MENEZES FILHO e COSTA (2007).

A forma do hietograma a partir de uma equação IDF gerada por meio do método dos blocos alternados especifica a altura de precipitação que ocorre em vários intervalos de tempo sucessivos de mesma duração.

A aplicação do Método dos Blocos Alternados envolveu as seguintes etapas:

- Seleção do período de retorno de projeto, utilizando-se da curva de chuvas intensas para obter a intensidade média para cada período de duração em incrementos fixados;
- determinação o valor das alturas de precipitação, obtendo-se o valor de precipitação para cada incremento de tempo fixado;
- Determinação da diferença entre alturas sucessivas de precipitação no projeto.
- Ordenação das alturas de precipitação encontradas em forma alternada no gráfico.

Para esse trabalho, adotou-se o bloco com maior precipitação no centro do hietograma e distribuiu-se o restante ao seu redor. Uma representação numérica para o processo com dez diferentes alturas pluviométricas (1-2-3-4-5-6-7-8-9-10), onde 1 é o maior valor de altura precipitada e 10 é o menor; com a aplicação do método dos blocos alternados, a distribuição de alturas precipitadas assumiria a representação 9-7-5-3-1-2-4-6-8-10.

4.4 MODELO CHUVA-VAZÃO

O Hydrologic Modeling System, desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC-HMS), assume que uma bacia hidrográfica é reproduzida como um grupo interligado de áreas e que os processos hidrológicos podem ser representados pelos parâmetros que refletem as condições médias dentro da área. Se essas médias não forem apropriadas para uma sub-área, será necessário considerar sub-áreas menores, nas quais os dados médios possam ser aplicados (MILDE *et al*, 2002).

O modelo HEC-HMS possui interface gráfica e várias características que o tornam amigável. Tem a capacidade de criar gráficos a partir dos dados trabalhados. Diferentes valores de cada parâmetro podem ser testados, gerando instantaneamente novas saídas do modelo.

Uma das principais entradas do modelo é a precipitação, para a qual diversos métodos de manipulação dos dados estão disponíveis. Para esse trabalho foi utilizada a opção *Specified Hyetograph*, para a qual foram informados hietogramas gerados pelo método dos blocos alternados.

Para o presente trabalho, foi aplicado o método da curva do *Soil Conservation Service* (SCS) para a produção das hidrógrafas, que necessita dos dados de chuva e de características da bacia a ser analisada como o *curve number* (CN) médio e o tempo de retardo.

O CN é o parâmetro usado pelo modelo para estimar a retenção potencial máxima de chuva. Desta forma, o CN determina o total de excesso de chuva que se tornará escoamento direto (MILDE *et al*, 2002).

Para representar vários estágios de degradação da bacia e verificar essa influência nas hidrógrafas geradas, no presente trabalho foram utilizados valores de CN de 50, 60 e 70, com condições médias de umidade (valores previamente apresentados pela Tabela 1).

O tempo de retardo (*lag time, t*_l) é um parâmetro fundamental para o modelo e representa o intervalo entre os centros de gravidade da precipitação e da hidrógrafa,

sendo definido em função do tempo de concentração que é o tempo total para que toda a bacia contribua para o deflúvio na saída (exutório), ou o total de tempo para que a água atinja o exutório a partir do ponto mais distante da bacia. Por definição, a vazão atinge o pico no tempo de concentração (AKAN e HOUGHTALEN, 2003).

As equações que dão forma ao hidrograma foram apresentadas e sumariamente discutidas ao longo da seção 3.5.2.4.

4.5 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

Para esse trabalho, foram determinados os valores do tempo de concentração pelos métodos de Jonhstone, Bransby-Williams e Dooge, reunidas e descritas com auxílio do Quadro 1 apresentado na página 48. Esses métodos foram escolhidos em função das características fisiográficas das bacias hidrográficas, consideradas as faixas de aplicação de cada uma das expressões.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa do trabalho, onde os resultados para os diferentes métodos foram comparados uns com os outros, utilizou-se o termo "superestimou" para os resultados onde se obteve os maiores valores e "subestimou" para os resultados onde se encontrou os menores valores. É importante destacar que não houve comparação com dados pluviográficos medidos em campo.

5.1 AVALIAÇÃO DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

A Tabela 9 apresenta os valores dos tempos de concentração para as 3 bacias hidrográficas estudadas, quando da aplicação dos os métodos de Jonhstone, Bransby-Williams e Dooge.

Tabela 9 - Tempos de concentração	(minutos)	estimados pelos	métodos de .	Jonhstone,
Bransby-Williams e Dooge		-		

Bacia hidrográfica		Método	
Bacia indi ografica	Jonhstone	Bransby-Williams	Dooge
Afonso Cláudio - Montante	231,9	866,8	538,5
Iconha-Montante	121,6	337,1	295,0
Matilde	180,5	607,2	374,3

Neste trabalho foram utilizados os tempos de concentração estimados pelo método de Jonhstone. Estes tempos de concentração - os menores estimados para cada uma das bacias estudadas - produziram as maiores intensidades pluviométricas empregadas para a avaliação das vazões de enchente.

5.2 ESTABELECIMENTO DAS EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS

As alturas pluviomátricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel, para a estação de Afonso Cláudio-Montante, associadas a diferentes durações e períodos de retorno, estão resumidas na Tabela 10. As correspondentes intensidades pluviométricas estão apresentadas na Tabela 11. Tabelas semelhantes, referentes às estações de Matilde e Iconha-Montante, estão apresentadas no APÊNDICE B.

	Período de retorno					
Duração	2	5	10	25	50	100
5 min	11,0	14,2	17,3	22,3	27,0	32,7
15 min	24,0	30,9	37,5	48,4	58,6	71,1
30 min	34,9	45,0	54,6	70,4	85,3	103,4
1 h	46,9	60,5	73,3	94,6	114,7	139,0
2h	59,6	76,9	93,2	120,2	145,7	176,6
3h	67,4	86,9	105,4	135,9	164,7	199,7
6 h	81,6	105,3	127,6	164,6	199,5	241,8
12 h	97,5	125,8	152,5	196,7	238,4	289,0
24 h	115,7	149,2	180,9	233,3	282,8	342,8

Tabela 10 - Precipitações máximas (em mm) associadas a diferentes períodos de retorno e durações estimadas com auxílio do método de Chow-Gumbel - Resultados referentes à estação pluviométrica de Afonso Cláudio Montante

Tabela 11 - Intensidades (mm/hora) associadas a diferentes períodos de retorno e durações, estimadas com auxílio do método de Chow-Gumbel - Resultados referentes à estação pluviométrica de Afonso Cláudio Montante

	Período de retorno					
Duração	2	5	10	25	50	100
5 min	132,57	170,97	207,24	267,27	323,98	392,72
15 min	95,97	123,77	150,03	193,49	234,54	284,30
30 min	69,79	90,01	109,11	140,71	170,56	206,75
1 h	46,92	60,51	73,34	94,59	114,65	138,98
2h	29,81	38,44	46,60	60,09	72,84	88,30
3h	22,47	28,97	35,12	45,29	54,90	66,55
6 h	13,61	17,55	21,27	27,43	33,25	40,31
12 h	8,13	10,48	12,71	16,39	19,87	24,08
24 h	4,82	6,22	7,54	9,72	11,78	14,28

As equações de chuvas intensas estabelecidas por análises de regressão a partir das intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel estão apresentadas no Quadro 2.

Quedre Q. Envezãos de churas intensos abtidos e nortin de mátedo de Cherry Querhal

Quadro 2 - Equaç	2 - Equações de chuvas intensas obtidas a partir do metodo de chow-Gumber				
Bacia	Estação pluviométrica	Equação			
Rio Doce	Afonso Cláudio - Montante	$i_m = \frac{1037,2T^{0,2776}}{(t+14)^{0,7640}}$			
Rio Benevente	Matilde	$i_m = \frac{919,7T^{0,1955}}{(t+11)^{0,7553}}$			
Rio Novo	Iconha - Montante	$i_m = \frac{1216,6T^{0,2204}}{(t+13)^{0,7724}}$			

No Quadro 2, i_m representa a intensidade máxima média em mm/hora; T o período de retorno em anos; e t a duração da chuva em minutos.

O método de Bell requer a avaliação da altura pluviométrica (mm) associada a duração padrão de 60 minutos de duração e período de retorno de dois anos ($h_{60,2}$). Os valores de $h_{60,2}$ referentes às diferentes estações pluviométricas consideradas neste estudo estão resumidas na Tabela 12. Adicionalmente a Tabela 12, apresenta o valor da altura pluviométrica máxima diária associada ao período de retorno de dois anos ($h_{dia,2}$), da qual foi derivada $h_{60,2}$, conforme procedimento descrito na seção 4.3.2.

Bacia	Estação	h _{dia,2} (mm)	h _{60,2} (mm)
Rio Doce	Afonso Cláudio - Montante	96,51	49,22
Rio Benevente	Matilde	85,86	43,79
Rio Novo	Iconha Montante	102,00	52,02

Tabela 12 - Valores de $h_{dia,2}$ e $h_{60,2}$ para as estações pluviométricas estudadas

As equações de chuvas intensas estabelecidas a partir do método de Bell estão resumidas no Quadro 3. A Tabela 13, por sua vez, reúne as intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Bell para a estação de Afonso Cláudio – Montante. Tabelas semelhantes para as estações de Matilde e Iconha – Montante são apresentadas no APÊNDICE B.
Bacia	Estação pluviométrica	Equação
Rio Doce	Afonso Cláudio - Montante	$i_m = 5,81 \ln(T)t^{-0,69} - 5,96 \ln(T)t^{-1} + 13,09t^{-0,69} - 14,44t^{-1}$
Rio Benevente	Matilde	$i_m = 5,16 \ln(T)t^{-0,69} - 5,29 \ln(T)t^{-1} + 11,65t^{-0,69} - 11,95t^{-1}$
Rio Novo	Iconha - Montante	$i_m = 6,13 \ln(T)t^{-0,69} - 6,29 \ln(T)t^{-1} + 13,84t^{-0,69} - 14,20t^{-1}$

Quadro 3 - Equações de chuvas intensas obtidas a partir do método de Bell

No Quadro 3, i_m representa a intensidade máxima média em mm/hora; T é o período de retorno em anos; e t é a duração da chuva em minutos.

Tabela 13 - Intensidades (mm/hora) associadas a diferentes períodos de retorno e durações, estimadas com auxílio do método de Bell - Resultados referentes à estação pluviométrica de Afonso Cláudio Montante

	Período de retorno					
Duração	2	5	10	25	50	100
5 min	127,44	167,01	196,94	236,51	266,45	296,38
15 min	88,22	115,61	136,33	163,72	184,44	205,16
30 min	63,10	82,70	97,52	117,11	131,93	146,75
1 h	43,33	56,78	66,95	80,40	90,58	100,76
2h	28,96	37,95	44,75	53,74	60,55	67,35
3h	22,68	29,72	35,04	42,08	47,41	52,74
6 h	14,76	19,34	22,81	27,39	30,85	34,32
12 h	9,50	12,45	14,68	17,63	19,86	22,09
24 h	6,06	7,95	9,37	11,25	12,68	14,10

As equações estabelecidas pelo programa computacional Plúvio estão resumidas no Quadro 4.

Quadro 4 - Equações de chuvas intensas obtidas pelo método do programa cor	mputacional
Plúvio	-

Bacia	Estação pluviométrica	Equação
Rio Doce	Afonso Cláudio - Montante	$i_m = \frac{3738,87^{0,2010}}{(t+31)^{0,9660}}$
Rio Benevente	Matilde	$i_m = \frac{1036,07^{0,1760}}{(t+11)^{0,7420}}$
Rio Novo	Iconha - Montante	$i_m = \frac{1439,07^{0,1840}}{(t+15)^{0,7770}}$

Na Tabela 14 estão as intensidades pluviométricas estimadas para a estação de Afonso Cláudio - Montante pela equação definida pelo programa computacional Plúvio. Resultados semelhantes para as demais estações pluviométricas consideradas neste estudo estão resumidas no APÊNDICE B.

	Período de retorno					
Duração	2	5	10	25	50	100
5 min	135,09	162,41	186,69	224,44	258,00	296,56
15 min	106,57	128,12	147,27	177,05	203,52	233,95
30 min	81,11	97,51	112,09	134,76	154,90	178,06
1 h	55,09	66,24	76,14	91,54	105,22	120,95
2h	33,77	40,60	46,67	56,11	64,49	74,13
3h	24,44	29,38	33,78	40,61	46,68	53,65
6 h	13,47	16,19	18,61	22,37	25,72	29,56
12 h	7,17	8,62	9,91	11,91	13,69	15,74
24 h	3,74	4,50	5,17	6,22	7,15	8,22

Tabela 14 - Intensidades (mm/hora) associadas a diferentes períodos de retorno e durações, estimadas com auxílio do método do programa computacional Plúvio - Resultados referentes à estação pluviométrica de Afonso Cláudio Montante

As Figuras de 8 a 10 ilustram as respostas das diferentes equações de chuvas intensas estabelecidas para a estação de Afonso Cláudio-Montante. A Figura 8 reúne os resultados associados ao período de retorno de 2 anos. A Figura 12, por sua vez, os resultados referentes ao período de retorno de 25 anos. Já a Figura 13, resultados referentes ao período de retorno de 100 anos. Gráficos semelhantes, produzidos para os demais períodos de retorno e estações pluviométricas consideradas neste estudo, estão resumidas no APÊNDICE C.



Figura 11 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 2 anos para a estação pluviométrica de Afonso Cláudio Montante



Figura 12 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 25 anos para a estação pluviométrica de Afonso Cláudio Montante



Figura 13 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 100 anos para a estação pluviométrica de Afonso Cláudio Montante

A partir da inspeção das figuras 8 a 10, bem como daquelas constantes no APÊNDICE C, apresentam-se como relevantes as seguintes considerações:

- Nas estações de Matilde e Iconha-Montante, para durações de chuvas curtas (menores que 200 minutos), o programa computacional Plúvio superestimou os valores de intensidade pluviométrica. Para a mesma faixa de durações, o método de Bell substimou os valores de intensidade. Padrão diferenciado foi observado para a estação de Afonso Cláudio Montante, onde o método de Chow-Gumbel superestimou os valores de intensidades pluviométricas para curtas durações e períodos de retorno variando entre 25 e 100 anos.
- Para as maiores durações e períodos de retorno considerados nesse estudo os mais elevados valores de intensidade pluviométrica foram estimadas pelo método de Bell, independentemente da bacia hidrográfica considerada. É relevante observar que, para chuvas com grandes durações, uma pequena variação na intensidade pluviométrica pode gerar variações substanciais nos totais precipitados e por conseqüência, nas correspondentes vazões.

 Das estações pluviométricas consideradas neste estudo, a estação de Iconha-Montante foi aquela na qual foram observadas as menores diferenças entre as intensidades pluviométricas estimadas pelos métodos de Chow-Gumbel, Bell ou pelo programa computacional Plúvio, independentemente da duração ou período de retornos considerados.

5.3 GERAÇÃO DE HIETOGRAMAS

A geração dos hietogramas foi feita com base no método dos blocos alternados, sumariamente apresentado na seção 4.3.4.

As figuras de 11 a 13 apresentam, respectivamente para os períodos de retorno de 2, 25 e 100 anos os resultados da aplicação do método dos blocos alternados para o posto de Afonso Cláudio-Montante, utilizando-se as equações de chuvas intensas estabelecidas pelos métodos de Bell, Chow-Gumbel e do programa computacional Plúvio. Resultados semelhantes para as estações de Matilde e Iconha-Montante estão resumidos no APÊNDICE D.



Figura 14 - Hietograma produzido a partir das diferentes equações de chuvas intensas empregando-se a duração equivalente ao tempo de concentração para o período de retorno de 02 anos – Resultados para a Bacia de Afonso Cláudio - Montante



Figura 15 - Hietograma produzido a partir das diferentes equações de chuvas intensas empregando-se a duração equivalente ao tempo de concentração para o período de retorno de 25 anos – Resultados para a Bacia de Afonso Cláudio - Montante



Figura 16 - Hietograma produzido a partir das diferentes equações de chuvas intensas empregando-se a duração equivalente ao tempo de concentração para o período de retorno de 100 anos – Resultados para a Bacia de Afonso Cláudio - Montante

Os hietogramas constantes das figuras de 10 a 12, bem como seus similares constantes do Apêndice D, foram utilizados para a geração dos hidrogramas de cheia, conforme procedimento indicado na seção 4.3. É relevante registrar que os referidos hietogramas, por terem sido produzidos a partir do método dos blocos alternados, reproduzem os padrões de variações das intensidades pluviométricas associadas aos diferentes métodos empregados neste estudo.

5.4 GERAÇÃO DE HIDRÓGRAFAS

Nesta seção são resumidos e confrontados os hidrogramas estabelecidos para as diferentes estações fluviométricas consideradas no presente estudo. Os hidrogramas foram estabelecidos considerando-se a adoção de chuvas intensas nos períodos de retorno de 2, 25 e 100 anos e durações iguais ao tempo de concentração de cada bacia. Os valores de CN variaram entre 50 (equivalente a espaços abertos em condições razoáveis e com condições de umidades médias pertencentes ao solo de grupo hidrológico B) e 70 (equivalente a espaços abertos em condições razoáveis e com condições médias pertencentes ao solo de grupo hidrológico B) e 70 (equivalente a espaços abertos em condições de umidades médias pertencentes ao solo de grupo hidrológico B) e 70 (equivalente a espaços abertos em condições razoáveis e com condições de umidades médias pertencentes ao solo de grupo hidrológico B) e 70 (equivalente a espaços abertos em condições razoáveis e com condições de umidades médias pertencentes ao solo de grupo hidrológico B) e 70 (equivalente a espaços abertos em condições razoáveis e com condições de umidades médias pertencentes ao solo de grupo hidrológico B) e 70 (equivalente a espaços abertos em condições razoáveis e com condições de umidades médias pertencentes ao solo de grupo hidrológico C).

As figuras de 14 a 16 apresentam as hidrógrafas obtidas para a estação fluviométrica de Afonso Cláudio – Montante, considerando período de retorno dois anos e intensidades pluviométricas estimadas, respectivamente pelo programa computacional Plúvio e pelos métodos de Bell e Chow-Gumbel. Figuras semelhantes, produzidas para as demais bacias hidrográficas estudadas, são apresentadas no APÊNDICE E.



Figura 17 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método do programa computacional Plúvio considerando período de retorno de 02 anos – Resultados referentes a seção de Afonso Cláudio Montante



Figura 18 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de Bell considerando período de retorno de 02 anos – Resultados referentes a seção de Afonso Cláudio Montante



Figura 19 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de Chow-Gumbel considerando período de retorno de 02 anos – Resultados referentes a seção de Afonso Cláudio Montante

- Os valores de picos de vazão foram fortemente afetados pela alteração do grupo hidrológico do solo, do tipo de cobertura do solo e de suas condições, sendo tais condições representadas pelos diferentes valores de CN;
- Para o mais baixo período de retorno considerado (2 anos), a variação do valor de CN de 50 para 70 produziu picos de vazões usualmente 5 vezes maiores, independentemente do método utilizado para avaliação da intensidade pluviométrica. A maior variação de vazão associada à mudança de CN entre os limites considerados neste trabalho foi observada para a bacia hidrográfica definida pela estação fluviométrica de Iconha Montante, quando da avaliação da intensidade pluviométrica pelo método de Chow-Gumbel. Neste caso, o valor estimado para a vazão máxima foi ampliado em aproximadamente 8 vezes;
- Para o período de retorno de 100 anos, a amplitude da variação foi menor, com vazões associadas ao CN igual a 70 equivalendo normalmente ao dobro daquelas estimadas com CN igual a 50. Na bacia hidrográfica definida pela estação de Afonso Cláudio Montante, a alteração do valor de CN entre 50 e 70 produziu variação nos valores de pico do hidrograma de aproximadamente 1,8 vezes, quando consideradas as intensidades pluviométricas estimadas com auxílio do método de Chow-Gumbel;
- Os maiores picos de vazão associados às chuvas intensas com período de retorno de 2 anos e estimados para as bacias hidrográficas de Matilde e lconha Montante foram decorrentes da aplicação da equação de chuvas intensas estabelecida com auxílio do programa computacional Plúvio. Comportamento diferenciado foi observado na estação de Afonso Cláudio Montante, na qual, para o mesmo período de retorno, os picos de vazão foram produzidos com a aplicação das intensidades pluviométricas estimadas com auxílio do método de Bell. Adicionalmente, é relevante registrar a substancial variação produzida nos valores de pico de vazão em decorrência do método escolhido para a estimativa das intensidades pluviométricas e, por conseqüência, para a construção dos hietogramas utilizados nas simulações computacionais. Para o período de retorno de 2 anos, as vazões de pico dos hidrogramas apresentaram variações máximas que oscilaram entre aproximadamente 55% (diferenças registradas para a estação de Afonso

Cláudio – Montante, assumindo-se CN igual a 50) e 103% (diferenças registradas para a estação de Matilde, também quando da adoção de CN de 50);

Para o período de retorno de 100 anos, as intensidades pluviométricas estimadas com o emprego do programa Plúvio produziram os maiores picos de vazão para a estação de Afonso Cláudio – Montante. Nas bacias definidas pelas estações de Iconha – Montante e Matilde, os maiores picos de vazão também foram produzidos pelas intensidades estimadas pelos métodos de Bell e Chow-Gumbel, respectivamente. Exceção foi observada na estação de Iconha – Montante, quando da adoção de um CN igual a 50, situação na qual os valores máximos de vazão apresentaram-se associados às intensidades estimadas com o auxílio do programa Plúvio. Para o período de retorno de 100 anos foram observadas variações máximas de vazão que oscilaram entre 8% (diferenças registradas para a estação de Iconha – Montante, assumindo-se CN igual a 50) e 91% (diferenças registradas para a estação de Afonso Cláudio – Montante, assumindo-se CN igual a 50).

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- As alternativas empregadas neste trabalho para a determinação de equações de chuvas intensas apresentaram implementação rápida. Para a aplicação dos métodos de Bell e Chow-Gumbel a demanda por informações limitou-se às séries históricas de totais diários precipitados. O programa Plúvio, por sua vez, apresentou baixos requisitos computacionais para sua instalação e operação, fornecendo, a partir de um processo de interpolação, os parâmetros que dão forma as equações de chuvas intensas;
- Para a maior parte das condições avaliadas neste trabalho, as equações de chuvas intensas produzidas pelo programa computacional Plúvio superestimaram os valores de intensidades pluviométricas associadas à durações inferiores a 200 minutos;
- O HEC-HMS apresentou-se como uma ferramenta versátil para a simulação da resposta de bacias hidrográficas à ocorrência de chuvas intensas, gerando instantaneamente hidrogramas associados a diferentes padrões de uso e ocupação do solo;
- Os resultados produzidos pelo HMS-HEC apresentaram-se fortemente dependentes do estado de degradação da bacia, retratados pelo valor assumido para o CN, e do método empregado para a avaliação das intensidades pluviométricas. Dessa forma, valores de CN que não reflitam o tipo de solo e a sua condição de uso e ocupação ou de intensidades pluviométricas que não reflitam o regime de chuvas da bacia estudada, podem conduzir a estimativas de picos de vazão substancialmente diferentes daqueles registrados nas bacias hidrográficas estudadas. Neste trabalho, em função da combinação de diferentes valores de CN e de intensidades pluviométricas, foram estimados picos de vazão que apresentaram, para uma mesma bacia, diferenças superiores a 100%;

As principais recomendações deste trabalho podem ser sumarizadas da seguinte forma:

- Previamente a aplicação de um sistema de modelagem hidrológica, como o HEC-HMS, devem ser conduzidos trabalhos de investigação que adequadamente estabeleçam o padrão de uso e ocupação do solo de uma bacia hidrográfica considerada. Para o estabelecimento de hidrogramas de cheias com aplicação do HEC-HMS, fazem-se necessários estudos específicos para estimativa do valor de CN.
- Condução de estudos que adequadamente avaliem os tempos de concentração das bacias objeto de análise deste trabalho;
- Sempre que possível as determinações de equações de chuvas intensas devem ser feitas a partir de registros pluviográficos;
- Verificação das metodologias utilizadas no presente estudo em bacias apresentando registros pluvio e fluviográficos;

REFERÊNCIAS

ABUMANSSUR, C. Estimativa da Evapotranspiração mensal no Estado do Paraná. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade do Oeste do Paraná, Cascavel, Paraná. 2006. 103 p.

AKAN, A. O. Urban Stormwater Hydrology – A guide to engineering Calculations, Technomic, Lancaster, PA. 1993.

AKAN, A. O.; HOUGHTALEN, R. J.; **Urban Hydrology, Hydraulics and Stormwater Quality**. Engineering Applications and Computer Modeling. Publisher John Wiley e Sons. 2003.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Comitê da bacia hidrográfica do Rio Doce**. 2001. Disponível em http://www.riodoce.cbh.gov.br/bacia_caracterizacao.asp. Acesso em 21 jul 2008.

AYOADE, J.O. Introdução à Climatologia para os trópicos. 2^a. ed. São Paulo: Difel, 1988.

ARAÚJO FILHO, J.C.; RIBEIRO, M.R. Infiltração de água em Cambissolos do Baixo Irecê (Ba). Revista Brasileira de Ciência do Solo, Piracicaba, v.20, p.263-370, 1996.

BRASIL. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de pesquisas Rodoviárias. **Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem**. – 2. Ed. – Rio de Janeiro, 2005.

BELL, F.G. **Generalized rainfall-duration- frequency relationships**. Journal of the Hydraulics Division, Reston, v.95, n.1, p.311-27, 1969.

BELTRAME, L.F.S.; LANNA, A.E.L.; LOUZADA, J.A.S. Chuvas intensas. Porto Alegre: IPHUFRGS, 1991. 69 p.

BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. Precipitação. In: TUCCI, C.E.M. (Org). Hidrologia – Ciência e Aplicação. 3 ed. Porto Alegre: UFRGS, 2002.

BERTONI; J. e LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo.** São Paulo: Ícone, 1990, 355p.

BRANDÃO, V. S.;SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F. Infiltração da Água no Solo. 2^a edição. UFV. Viçosa. 2003. 98 p

CETESB. **Drenagem Urbana – Manual de Projeto**. São Paulo: CETESB/ASCETESB, 1986.

CHAVES, H.M.L.; ORLOWISK, W.E; ROLOFF, G. **Previsão da infiltração sob condições dinâmicas de selamento superficial**. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, v.17, p.141-147, 1993.

CHEN, C. **Rainfall intensity-duration-frequency formulas**. Journal of Hydraulic Engineering – ASCE, Vol. 109, n. 12, p. 1603-21. 1983.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. **Applied Hydrology**. McgrawHill Book Company, New York, 572p. 1988.

CHOWDARY, V. M.; RAO, M. D.; JAISWAL, C. S. Study of infiltration process under different experimental conditions. Agricultural Water Management, v.83, p.69-78, 2006.

COIMBRA, U. Eleita diretoria provisória do pró-Comitê de Bacia do Rio Novo. 22 dez 2001. Disponível em: <http://www.seculodiario.com.br/cesan/index_22_12_2001.htm>. Acesso em: 21 jul 2011.

COLLISCHONN, W.; TÁSSI, R. Precipitação. In: **Alguns fundamentos de Hidrologia.** Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), UFRGS, 2007. Disponível em: < http://galileu.iph.ufrgs.br/collischonn/>. Acesso em: 22 jul 2011.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. Introduzindo Hidrologia. Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), UFRGS, Porto Alegre, RS. 2009.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A.. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. Rev. Bras. Ciênc. Solo, Viçosa, v. 27, n. 4, Aug. 2003.

CURITIBA. Prefeitura Municipal. Instituto Municipal de Administração Pública. Série: Desenvolvimento de competências. Drenagem urbana: Modulo 1. 2006.

DERNADIN, J., FREITAS, P.L. **Características fundamentais da chuva no Brasil**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.17, p: 1409-1416. 1982.

DER- Departamento de Estradas de Rodagem. **Instrução de Projeto – Projetos de Drenagem e Estudos Hidrológicos**. São Paulo-SP. Disponível em:<ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/IP-DE-H00-001_A.zip>. Acesso em 16 de setembro de 2009.

DAMÉ, R.C.F. **Desagregação de precipitação diária para estimativa de curvas intensidadeduração-frequência**. 2001. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

DAMÉ, R. de C. F.; Teixeira, C. F. A.; Terra, V. S. S. **Comparação de diferentes** metodologias para estimativa de curvas intensidade-duração-frequência para **Pelotas - RS**. Engenharia Agrícola, v.28, p.10-15, 2008. DOOGE, J. C. I. **A General theory of the unit hydrograph**. Journal of Geophysical Reserch, 64 (2), 241-256. 1959.

FELDMAN, A. D. **Technical reference manual**. Computer software Technical Reference Manual. Davis, CA, EUA: US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2000.

FRANCO, J. E. **Dimensionamento de bacias de detenção das águas pluviais com base no método racional**. 2004. 155 f. Dissertação (Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

FENDRICH, R. Chuvas intensas para obras de drenagem (no Estado do **Paraná)**. Curitiba, Champagnat, 1998. 99 p.

FREITAS, A. J., SILVA, D. D., PRUSKI, F.F., PINTO, F.A., PEREIRA, S.B., GOMES FILHO, R. R., TEIXEIRA, A. **Equações de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Companhia de Saneamento de Minas Gerais; Viçosa: Universidade federal de Viçosa, 2001.

GARCEZ, L.N.; ALVAREZ, G.A. **Hidrologia**. 3 ed. Revisada e atualizada. São Paulo: Edgard Blucher, 1988.

GREEN, W.H., AMPT, G.A. **Studies on soil physics-1**. The flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Science, 4(1):1-24. 1911.

GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; e BOTELHO, R.G.M. (Org). **Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações.** 2ª Ed. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil. 2005.

HORTON, R. E. An Approach toward phycal interpretation of infintration capacity. Soil Science Society Proceedings, 5:399-417. 1940.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo, Nobel, 1984. 408 p.

LUCAS, E. W. M; SOUSA, F. A.; SILVA, S. F. D. S.; LUCIO, P. S.; **Modelagem** hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingú – Pará. Revista Brasileira de Meteorologia, v.24, n.3, 308-322, 2009.

MELLO, Francisco Mercês de. Equação de green-ampt para a infiltração da água no solo aproximações numéricas para explicitação do volume infiltrado. Rev. de Ciências Agrárias, jan., vol.31, no.1, p.31-35. 2008.

MELLO, L. T. A. **Avaliação de metodologias para obtenção dos parâmetros do modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Viçosa : UFV, 2003. 77p. : il.

MENEZES FILHO, F.C.M.; COSTA, A.R. Aplicação do métodos dos clocos alternados e da convolução de hidrogramas para a determinação de escoamento superficial direto – ESD. In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro-Oeste, 2007, Cuiabá, MT. I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro-Oeste. Cuiabá, MG: ABRH, 2007. v.1.

MICROSOFT. **Microsoft Office Excel**, versão Enterprise 2007. Microsoft Corporation, 2007. Conjunto de programas: 607,00 megabites.

MILDE, L. C. E.; JORGE, M. M.; MORTATTI; J.; FERRAZ; F. F. B.; GROPPO, J. Revista de Ciência & Tecnologia: Engenharia de produção e engenharia mecânica em foco. **Modelo Espaço-temporal HEC-HMS: avaliação na Bacia de Drenagem de Analândia**. Revista Ciência e Tecnologia. Piracicaba, v. 10, n. 19, p. 61-69, 2002.

NUNES, F.G.; FIORI, A. P.; A utilização do método de Vente Chow – Soil Conservation Service (SCS) na estimativa da vazão máxima da bacia hidrográfica do rio Atubá. Revista Eletrônica Geografar, Curitiba, v.2, n.2, p.139-155, jul./dez. 2007.

OLIVEIRA, L.L.; COSTA, R. F. SAUOSA, F. A.; COSTA, A. C.L; BRAGA, A. P. **Precipitação efetiva e interceptação em Caxiuanã, na Amazônia Oriental**. Acta Amaz., Manaus, v. 38, n. 4, Dec. 2008

PANACHUKI, E. Infiltração de água no solo e erosão hídrica, sob chuva simulada, em sistema de integração agricultura-pecuária. 2003. 67 f. Dissertação (Agronomia). Programa de pós-graduação em agronomia da Universidade Federal de Mato grosso do Sul, Dourado, 2003.

PERROUX, K. M. e WHITE, I. **Designs for disc pearmeameters**. Soil Sci. Soc. Am. J., v.52, p.1205-1215, 1988.

PINHEIRO, M. R. C.; KURY, K. A. **Conservação ambiental e conceitos básicos de ecologia**. Vol. 2, 2008. Disponível em: < http://www.essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/boletim/article/viewFile/238/221>. Acesso em 28 nov. 2011.

PINTO, N. L. S. et al. Hidrologia Básica. São Paulo: Editora Edgard Blücher: 1976.

PINTO, F. R. L. Equações de intensidade-duração-frequência da precipitação para os Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo: estimativa e espacialização. Viçosa, MG: UFV, 1999. 70p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 1999.

PORTELA, M., MARQUES, P., CARVALHO, F.F. **Hietogramas de projecto para a** análise de cheias baseada no modelo do hidrograma unitário do Soil **Conservation Service (SCS)**. In: ACTAS DO CONGRESSO DA ÁGUA, 5. Lisboa, Portugal, 25 a 29 de Setembro, 2000. PORTO, R. L. Escoamento superficial direto. In: TUCCI, C. E. M. et al. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre : ABRH - Editora da Universidade - UFRGS, 1995 pp.107-164.

POTT, C. A. e DE MARIA, I.C. **Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.27, p.19-27, 2003.

RAUDKIVI, A. J. Hidrology. Oxford : Ed., Pergamon Press, 1979, 471p.

RIGHETTO, A. M. Hidrologia e Recursos Hídricos. São Calos: EESC/USP, 1998.

ROBAINA, A.D.; PEITER, M.X. **Modelo de desagregação e de geração de chuvas intensas no RS**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 21.; SIMPÓSIO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA DO CONE SUL, 1., 1992, Santa Maria. Anais... Santa Maria: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1992. p.746-53.

SALES, L.E.O.; FERREIRA, M.M.; SILVA DE OLIVEIRA, M. e CURI, N. Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.** Brasília, v.34, n.11, p.2091-2095, 1999.

SAMARCO. I Expedição científica e educativa da região do Benevente: Recursos hídricos, biodiversidade, história, cultura e turismo, fiscalização, educação ambiental e solos. Comitê-BHB-Samarco. Anchieta, ES. 2006.

SANTOS, L. C. C. **Estimativas de vazões máximas de projeto por métodos determinísticos e probabilísticos**. 172 f. Dissertação (mestrado em engenharia ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2010.

SCHARFFENBERG, W. A.; FLEMING, M. J. Hydrologic Modeling System HEC-HMS – User's Manual. Hydrologic Engineering Center, HEC. Davis, CA. 2010.

SIDIRAS, N. e ROTH, C.H. Infiltration measurements with double ring infiltrometers and a rainfall simulator under different surface conditions on an **Oxisol**. Soil e Tillage Research, Amsterdam, v.9, n.2, p.161-168, 1987.

SILVA, J. M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; CECILIO, R. A. Metodologia para obtenção do hidrograma de escoamento superficial em encostas e canais. Parte II: modelo computacional e análise de sensibilidade. Eng. Agríc., Jaboticabal, v. 26, n. 3, Dec. 2006.

SILVA, D.D., VALVERDE, A.E.L., PRUSKI, F.F., GONÇALVES, R.A.B. Estimativa e espacialização dos parâmetros da equação de intensidade-duração-frequência da precipitação para o Estado de São Paulo. Revista Engenharia na Agricultura, v.7, n.2, p:70-87. 1999.

SILVA, D.D., GOMES FILHO, R.R., PRUSKI, F.F., PEREIRA, S.B., NOVAES, L.F. **Chuvas instensas no Estado da Bahia**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.6, n.2, p.362-367, 2002.

SILVA, D.D., GOMES FILHO, R.R., PRUSKI, F.F., PEREIRA, S.B., NOVAES, L.F. **Chuvas instensas no Estado do Tocantins**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v._, n._, p.__-, 2003.

SILVEIRA, A.L.L. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). Hidrologia – Ciência e Aplicação. 3 ed. Porto Alegre. UFRGS, 2002.

SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Technical release 55, U.S. Department of agriculture, Washing DC. 1986.

SPERLING, M. V. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de **Esgotos.** Volume 1, 3 ed., Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

TUCCI, C. E. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre. Ed. UFRGS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. 669 p.

TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia, Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Ed. Universidade-UFRGS-ABRH, 2002, 939 p.

TUCCI, C. E.; BELTRAME, L. F. S. **Evaporação e evapotranspiração**. In: TUCCI, C. E. M. (org) Hidrologia: Ciências e aplicação. 2 ed. Port Alegre: Universidade/UFRGS: ABRH, 2001. p. 253-287.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA (UFV). Departamento de Engenharia Agrícola. Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos. **softwares-Plúvio**. Viçosa, 2006. Disponível em: < http://www.ufv.br/dea/gprh/softwares.htm> . Acesso em: 10 set. 2011.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. Flood Hydrograph Package, HEC-1 User's Manual, The Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. 1987.

VALE, C.C. e FERREIRA, R.D. **Os manguezais do litoral do Estado do Espírito Santo**. Pp. 88-94. In: Anais do Simpósio de Ecossistemas da Costa Brasileira. São Paulo, ACIESP, v. I. 1998

VILLELA, S.M.; MATOS, A. **Hidrologia aplicada**. 1 ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.

WALESH, S. G. Urban Surface Water Management. New York: John Wiley e Sons, Inc., 1989.

ZANETTI, S.S. Modelagem hidrológica em microbacia hidrográfica da bacia do rio Paraíba do Sul. 2007. 151 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) –

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Campos dos Goytacazes, RJ, 2007.

ZONTA, João H. et al . Adequação dos parâmetros do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson em condições de campo. Rev. bras. eng. agríc. ambient., Campina Grande, v. 14, n. 10, Oct. 2010.

APÊNDICE A

Tabelas de Precipitações Máximas estimadas pelos métodos de Chow-Gumbel, Bell e do programa computacional Plúvio.

	Período de retorno					
Duração	2	5	10	25	50	100
5 min	10,8	12,9	14,8	17,7	20,3	23,2
15 min	22,5	26,9	30,8	36,8	42,2	48,3
30 min	31,9	38,1	43,7	52,2	59,8	68,5
1 h	42,1	50,4	57,7	69,0	79,0	90,4
2h	53,0	63,4	72,6	86,9	99,5	113,9
3h	59,8	71,5	81,9	98,0	112,2	128,5
6 h	72,4	86,7	99,2	118,7	135,9	155,7
12 h	86,8	103,8	118,9	142,2	162,9	186,5
24 h	103,4	123,7	141,7	169,5	194,1	222,3

Tabela 15 - Precipitações máximas (em mm) associadas a diferentes períodos de retorno e durações estimadas com auxílio do método de Chow-Gumbel - Resultados referentes à estação pluviométrica de Matilde

Tabela 16 – Precipitações máximas (em mm) associadas a diferentes períodos de retorno e durações estimadas com auxílio do método de Plúvio - Resultados referentes à estação pluviométrica de Matilde

	Período de retorno					
Duração	2	5	10	25	50	100
5 min	12,5	14,7	16,6	19,5	22,0	24,8
15 min	26,1	30,7	34,7	40,7	46,0	52,0
30 min	37,2	43,7	49,4	58,1	65,6	74,1
1 h	49,5	58,2	65,7	77,2	87,3	98,6
2h	62,9	73,9	83,5	98,1	110,8	125,1
3h	71,3	83,8	94,6	111,2	125,6	141,9
6 h	87,1	102,3	115,6	135,9	153,5	173,4
12 h	105,3	123,7	139,8	164,3	185,6	209,7
24 h	126,6	148,8	168,1	197,5	223,2	252,1

	Período de retorno						
Duração	2	5	10	25	50	100	
5 min	9,4	12,4	14,6	17,5	19,8	22,0	
15 min	19,6	25,7	30,3	36,4	41,0	45,6	
30 min	28,1	36,8	43,4	52,1	58,7	65,3	
1 h	38,5	50,5	59,6	71,5	80,6	89,6	
2h	51,5	67,5	79,6	95,6	107,7	119,8	
3h	60,5	79,3	93,5	112,3	126,5	140,8	
6 h	78,8	103,2	121,7	146,2	164,7	183,2	
12 h	101,4	132,9	156,7	188,2	212,0	235,8	
24 h	129,5	169,7	200,1	240,3	270,7	301,1	

Tabela 17 - Precipitações máximas (em mm) associadas a diferentes períodos de retorno e durações estimadas com auxílio do método de Bell - Resultados referentes à estação pluviométrica de Matilde

Tabela 18 – Precipitações máximas (em mm) associadas a diferentes períodos de retorno e durações estimadas com auxílio do método de Chow-Gumbel - Resultados referentes à estação pluviométrica de Iconha Montante

	Período de retorno					
Duração	2	5	10	25	50	100
5 min	12,7	15,5	18,1	22,1	25,8	30,0
15 min	27,0	33,1	38,5	47,1	54,9	64,0
30 min	38,8	47,5	55,3	67,7	78,9	91,9
1 h	51,6	63,1	73,5	90,0	104,8	122,1
2h	64,9	79,4	92,5	113,2	131,9	153,6
3h	73,0	89,3	104,1	127,4	148,4	172,9
6 h	87,8	107,4	125,1	153,1	178,4	207,8
12 h	104,2	127,5	148,5	181,7	211,7	246,7
24 h	122,8	150,3	175,1	214,3	249,6	290,8

	Período de retorno						
Duração	2	5	10	25	50	100	
5 min	13,4	15,9	18,0	21,3	24,3	27,6	
15 min	29,3	34,6	39,4	46,6	52,9	60,1	
30 min	42,6	50,5	57,3	67,9	77,1	87,6	
1 h	57,2	67,7	77,0	91,1	103,5	117,6	
2h	72,4	85,7	97,4	115,3	130,9	148,7	
3h	81,6	96,6	109,7	129,9	147,5	167,6	
6 h	98,1	116,2	132,0	156,2	177,4	201,6	
12 h	116,3	137,7	156,4	185,1	210,3	238,9	
24 h	136,8	162,0	184,0	217,8	247,4	281,1	

Tabela 19 - Precipitações máximas (em mm) associadas a diferentes períodos de retorno e durações estimadas com auxílio do método de Plúvio - Resultados referentes à estação pluviométrica de Iconha Montante

Tabela 20 - Precipitações máximas (em mm) associadas a diferentes períodos de retorno e durações estimadas com auxílio do método de Bell - Resultados referentes à estação pluviométrica de Iconha Montante

	Período de retorno					
Duração	2	5	10	25	50	100
5 min	11,2	14,7	17,3	20,8	23,5	26,1
15 min	23,3	30,5	36,0	43,3	48,7	54,2
30 min	33,3	43,7	51,5	61,9	69,7	77,6
1 h	45,8	60,0	70,8	85,0	95,7	106,5
2h	61,2	80,2	94,6	113,6	128,0	142,4
3h	71,9	94,2	111,1	133,4	150,3	167,2
6 h	93,6	122,6	144,6	173,7	195,7	217,6
12 h	120,5	157,9	186,2	223,6	251,9	280,2
24 h	153,8	201,5	237,7	285,4	321,5	357,7

	Período de retorno						
Duração	2	5	10	25	50	100	
5 min	11,3	13,5	15,6	18,7	21,5	24,7	
15 min	26,6	32,0	36,8	44,3	50,9	58,5	
30 min	40,6	48,8	56,0	67,4	77,5	89,0	
1 h	55,1	66,2	76,1	91,5	105,2	120,9	
2h	67,5	81,2	93,3	112,2	129,0	148,3	
3h	73,3	88,1	101,3	121,8	140,0	161,0	
6 h	80,8	97,1	111,7	134,2	154,3	177,4	
12 h	86,0	103,4	118,9	142,9	164,3	188,8	
24 h	89,9	108,0	124,2	149,3	171,6	197,3	

Tabela 21 - Precipitações máximas (em mm) associadas a diferentes períodos de retorno e durações estimadas com auxílio do método do programa computacional Plúvio - Resultados referentes à estação pluviométrica de Afonso Cláudio

Tabela 22 - Precipitações máximas (em mm) associadas a diferentes períodos de retorno e durações estimadas com auxílio do método de Bell - Resultados referentes à estação pluviométrica de Afonso Cláudio

	Período de retorno					
Duração	2	5	10	25	50	100
5 min	10,6	13,9	16,4	19,7	22,2	24,7
15 min	22,1	28,9	34,1	40,9	46,1	51,3
30 min	31,6	41,3	48,8	58,6	66,0	73,4
1 h	43,3	56,8	67,0	80,4	90,6	100,8
2h	57,9	75,9	89,5	107,5	121,1	134,7
3h	68,0	89,2	105,1	126,3	142,2	158,2
6 h	88,5	116,0	136,8	164,3	185,1	205,9
12 h	114,0	149,4	176,1	211,5	238,3	265,1
24 h	145,5	190,7	224,9	270,0	304,2	338,4

APÊNDICE B

Tabelas de Intensidades pluviométricas estimadas pelos métodos de Chow-Gumbel, Bell e do programa computacional Plúvio.

	Período de retorno							
Duração	2	5	10	25	50	100		
5 min	129,73	155,18	177,70	212,56	243,40	278,73		
15 min	89,90	107,54	123,15	147,31	168,68	193,16		
30 min	63,73	76,24	87,30	104,43	119,58	136,94		
1 h	42,10	50,36	57,66	68,98	78,98	90,45		
2h	26,50	31,70	36,31	43,43	49,73	56,95		
3h	19,94	23,85	27,31	32,67	37,41	42,83		
6 h	12,07	14,44	16,54	19,78	22,65	25,94		
12 h	7,23	8,65	9,91	11,85	13,57	15,54		
24 h	4,31	5,16	5,90	7,06	8,09	9,26		

Tabela 23 - Intensidades (mm/hora) associadas a diferentes períodos de retorno e durações, estimadas com auxílio do método de Chow-Gumbel - Resultados referentes à estação pluviométrica de Matilde

Tabela 24 - Intensidades (mm/hora) associadas a diferentes períodos de retorno e durações, estimadas com auxílio do método do *programa computacional* Plúvio - Resultados referentes à estação pluviométrica de Matilde

	Período de retorno						
Duração	2	5	10	25	50	100	
5 min	149,77	175,98	198,81	233,60	263,91	298,15	
15 min	104,41	122,68	138,60	162,86	183,99	207,86	
30 min	74,45	87,48	98,83	116,12	131,19	148,21	
1 h	49,52	58,19	65,74	77,25	87,27	98,59	
2h	31,43	36,93	41,73	49,03	55,39	62,57	
3h	23,76	27,92	31,54	37,06	41,87	47,30	
6 h	14,52	17,06	19,27	22,64	25,58	28,90	
12 h	8,78	10,31	11,65	13,69	15,46	17,47	
24 h	5,28	6,20	7,00	8,23	9,30	10,50	

	Período de retorno						
Duração	2	5	10	25	50	100	
5 min	113,38	148,58	175,21	210,42	237,05	263,68	
15 min	78,49	102,86	121,29	145,66	164,09	182,53	
30 min	56,14	73,57	86,76	104,19	117,37	130,56	
1 h	38,54	50,51	59,56	71,53	80,58	89,64	
2h	25,76	33,76	39,82	47,81	53,87	59,92	
3h	20,17	26,44	31,18	37,44	42,18	46,92	
6 h	13,13	17,21	20,29	24,37	27,45	30,53	
12 h	8,45	11,07	13,06	15,68	17,67	19,65	
24 h	5,39	7,07	8,34	10,01	11,28	12,54	

Tabela 25 - Intensidades (mm/hora) associadas a diferentes períodos de retorno e durações, estimadas com auxílio do método de Bell - Resultados referentes à estação pluviométrica de Matilde

Tabela 26 - Intensidades (mm/hora) associadas a diferentes períodos de retorno e durações, estimadas com auxílio do método de Chow-Gumbel - Resultados referentes à estação pluviométrica de Iconha Montante

	Período de retorno						
Duração	2	5	10	25	50	100	
5 min	152,03	186,05	216,76	265,27	309,05	360,06	
15 min	108,07	132,26	154,09	188,57	219,69	255,96	
30 min	77,59	94,95	110,63	135,38	157,73	183,76	
1 h	51,55	63,09	73,51	89,96	104,80	122,10	
2h	32,44	39,70	46,25	56,60	65,94	76,82	
3h	24,33	29,77	34,69	42,45	49,46	57,62	
6 h	14,63	17,90	20,85	25,52	29,73	34,64	
12 h	8,68	10,62	12,37	15,14	17,64	20,56	
24 h	5,12	6,26	7,29	8,93	10,40	12,12	

	Período de retorno						
Duração	2	5	10	25	50	100	
5 min	160,96	190,52	216,44	256,18	291,03	330,62	
15 min	117,09	138,59	157,44	186,35	211,70	240,50	
30 min	85,26	100,92	114,65	135,70	154,16	175,13	
1 h	57,23	67,74	76,96	91,09	103,48	117,56	
2h	36,21	42,86	48,69	57,63	65,47	74,37	
3h	27,20	32,19	36,57	43,29	49,18	55,87	
6 h	16,36	19,36	21,99	26,03	29,57	33,59	
12 h	9,69	11,47	13,03	15,43	17,53	19,91	
24 h	5,70	6,75	7,67	9,07	10,31	11,71	

Tabela 27 - Intensidades (mm/hora) associadas a diferentes períodos de retorno e durações, estimadas com auxílio do método do programa computacional Plúvio - Resultados referentes à estação pluviométrica de Iconha Montante

Tabela 28 - Intensidades (mm/hora) associadas a diferentes períodos de retorno e durações, estimadas com auxílio do método de Bell - Resultados referentes à estação pluviométrica de Iconha Montante

	Período de retorno						
Duração	2	5	10	25	50	100	
5 min	134,70	176,52	208,15	249,97	281,61	313,24	
15 min	93,24	122,19	144,09	173,04	194,94	216,84	
30 min	66,69	87,40	103,07	123,77	139,44	155,10	
1 h	45,79	60,01	70,76	84,98	95,73	106,49	
2h	30,61	40,11	47,30	56,80	63,99	71,18	
3h	23,97	31,41	37,04	44,48	50,11	55,74	
6 h	15,60	20,44	24,10	28,95	32,61	36,27	
12 h	10,04	13,16	15,51	18,63	20,99	23,35	
24 h	6,41	8,40	9,90	11,89	13,40	14,90	

APÊNDICE C

Gráficos de intensidades pluviométricas produzidos a partir dos métodos de Chow-Gumbel, Bell e do programa computacional Plúvio.



Figura 20 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 5 anos para a estação pluviométrica de Afonso Cláudio Montante



Figura 21 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 10 anos para a estação pluviométrica de Afonso Cláudio Montante



Figura 22 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 50 anos para a estação pluviométrica de Afonso Cláudio Montante



Figura 23 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 2 anos para a estação pluviométrica de Matilde



Figura 24 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 5 anos para a estação pluviométrica de Matilde



Figura 25 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 10 anos para a estação pluviométrica de Matilde



Figura 26 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 25 anos para a estação pluviométrica de Matilde



Figura 27 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 50 anos para a estação pluviométrica de Matilde



Figura 28 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 100 anos para a estação pluviométrica de Matilde



Figura 29 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 2 anos para a estação pluviométrica de Iconha Montante


Figura 30 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 5 anos para a estação pluviométrica de Iconha Montante



Figura 31 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 10 anos para a estação pluviométrica de Iconha Montante



Figura 32 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 25 anos para a estação pluviométrica de Iconha Montante



Figura 33 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 50 anos para a estação pluviométrica de Iconha Montante



Figura 34 - Intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 100 anos para a estação pluviométrica de Iconha Montante

APÊNDICE D

Hietogramas produzidos aplicando-se o método dos blocos alternados utilizando as equações geradas pelos métodos de Chow-Gumbel, Bell e pelo programa computacional Plúvio



Figura 35 - Hietograma produzido a partir das diferentes equações de chuvas intensas empregando-se a duração equivalente ao tempo de concentração para o período de retorno de 02 anos – Resultados para a Bacia de Matilde



Figura 36 - Hietograma produzido a partir das diferentes equações de chuvas intensas empregando-se a duração equivalente ao tempo de concentração para o período de retorno de 25 anos – Resultados para a Bacia de Matilde



Figura 37 - Hietograma produzido a partir das diferentes equações de chuvas intensas empregando-se a duração equivalente ao tempo de concentração para o período de retorno de 100 anos – Resultados para a Bacia de Matilde



Figura 38 - Hietograma produzido a partir das diferentes equações de chuvas intensas empregando-se a duração equivalente ao tempo de concentração para o período de retorno de 02 anos – Resultados para a Bacia de Iconha - Montante



Figura 39 - Hietograma produzido a partir das diferentes equações de chuvas intensas empregando-se a duração equivalente ao tempo de concentração para o período de retorno de 25 anos – Resultados para a Bacia de Iconha - Montante



Figura 40 - Hietograma produzido a partir das diferentes equações de chuvas intensas empregando-se a duração equivalente ao tempo de concentração para o período de retorno de 100 anos – Resultados para a Bacia de Iconha - Montante

APÊNDICE E

Hidrógrafas produzidas pelas equações geradas pelos métodos de Chow-Gumbel, Bell e do programa computacional Plúvio para diferentes possíveis valores de CN



Figura 41 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de programa computacional Plúvio considerando período de retorno de 02 anos – Resultados referentes a seção de Iconha Montante



Figura 42 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de *programa computacional* Plúvio considerando período de retorno de 25 anos – Resultados referentes a seção de Iconha Montante



Figura 43 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de programa computacional Plúvio considerando período de retorno de 100 anos – Resultados referentes a seção de Iconha Montante



Figura 44 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de *Chow-Gumbel* considerando período de retorno de 02 anos – Resultados referentes a seção de Iconha Montante



Figura 45 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de *Chow-Gumbel* considerando período de retorno de 25 anos – Resultados referentes a seção de Iconha Montante



Figura 46 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de *Chow-Gumbel* considerando período de retorno de 100 anos – Resultados referentes a seção de Iconha Montante



Figura 47 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de Bell considerando período de retorno de 02 anos – Resultados referentes a seção de Iconha Montante



Figura 48 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de Bell considerando período de retorno de 25 anos – Resultados referentes a seção de Iconha Montante



Figura 49 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de Bell considerando período de retorno de 100 anos – Resultados referentes a seção de Iconha Montante



Figura 50 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de programa computacional Plúvio considerando período de retorno de 02 anos – Resultados referentes a seção de Matilde



Figura 51 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de programa computacional Plúvio considerando período de retorno de 25 anos – Resultados referentes a seção de Matilde



Figura 52 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de programa computacional Plúvio considerando período de retorno de 100 anos – Resultados referentes a seção de Matilde



Figura 53 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de Chow-Gumbel considerando período de retorno de 02 anos – Resultados referentes a seção de Matilde



Figura 54 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de Chow-Gumbel considerando período de retorno de 25 anos – Resultados referentes a seção de Matilde



Figura 55 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de Chow-Gumbel considerando período de retorno de 100 anos – Resultados referentes a seção de Matilde



Figura 56 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de Bell considerando período de retorno de 02 anos – Resultados referentes a seção de Matilde



Figura 57 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de Bell considerando período de retorno de 25 anos – Resultados referentes a seção de Matilde



Figura 58 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de Bell considerando período de retorno de 100 anos – Resultados referentes a seção de Matilde



Figura 59 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método do programa computacional Plúvio considerando período de retorno de 25 anos – Resultados referentes a seção de Afonso Cláudio - Montante



Figura 60 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método do programa computacional Plúvio considerando período de retorno de 100 anos – Resultados referentes a seção de Afonso Cláudio - Montante



Figura 61 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de Chow-Gumbel considerando período de retorno de 25 anos – Resultados referentes a seção de Afonso Cláudio - Montante



Figura 62 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de Chow-Gumbel considerando período de retorno de 100 anos – Resultados referentes a seção de Afonso Cláudio - Montante



Figura 63 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de Bell considerando período de retorno de 25 anos – Resultados referentes a seção de Afonso Cláudio - Montante



Figura 64 - Hidrógrafas produzidas a partir da equação de chuvas intensas estabelecidas pelo método de Bell considerando período de retorno de 100 anos – Resultados referentes a seção de Afonso Cláudio - Montante