



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica



ESTUDO HIDROLÓGICO DE VAZÕES MÁXIMAS NA BACIA DO RIO MACAÉ

Arthur Prado Barboza

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientadores:

Maria Clara Rodrigues Xavier

Paulo Renato Diniz Junqueira Barbosa

Rio de Janeiro

Agosto – 2014

ESTUDO HIDROLÓGICO DE VAZÕES MÁXIMAS NA BACIA DO RIO MACAÉ

Arthur Prado Barboza

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Examinado por:

Eng. Maria Clara Rodrigues Xavier, M. Sc.

Prof. Paulo Renato Diniz Junqueira Barbosa, M. Sc.

Prof. Teophilo Benedicto Ottoni Filho, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

AGOSTO DE 2014

Barboza, Arthur Prado

Estudo Hidrológico de Vazões Máximas na Bacia do Rio Macaé / Arthur Prado Barboza – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2014.

xiv, 97 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Maria Clara Rodrigues Xavier

Co-orientador: Paulo Renato Diniz Junqueira Barbosa

Projeto de Graduação - UFRJ / POLI / Curso de Engenharia Ambiental, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 98-101.

1. Vazões Máximas. 2. Hidrograma Unitário Triangular. 3. Rio Macaé.

I. Xavier, Maria Clara Rodrigues; II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental; III. Estudo Hidrológico de Vazões Máximas na Bacia do Rio Macaé.

Rio eu

(por Arthur Prado Barboza)

deitado na pedra

no barro

na areia

correndo atrás de talvegues

pro mar,

tem sereias

pomar cá na beira

sem me distrair

virar cachoeira

chegar mais depressa

ou mais devagar

mas quem nunca brincou de correr até o mar?

a olhar, sorrio

a olhar, só

rio

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, não poderia deixar de agradecer aos meus pais, Cláudio e Vanda, responsáveis pela minha existência neste planeta neste momento.

Agradeço também a toda minha família, de pai e de mãe, que ao transmitir carinho e amor, sem esperar nada em troca, me deu o maior tesouro que alguém poderia ter recebido. Devo o que sou a vocês.

A meu amor, Carol, por me incentivar incondicionalmente nos momentos que precisei e pelas alegrias que me fizeram chegar até aqui e seguir adiante.

Ao professor Márcio d'Agosto e à Cristiane Ribeiro, pesquisadores do LTC/COPPE, por me acolherem tão gentilmente neste e por me ensinarem não somente a relação entre Transporte e Meio Ambiente, mas, principalmente, valores pessoais e profissionais que mantereí eternamente.

A toda equipe da Hicon Engenharia, em especial ao Rodrigo e à Maria Clara, por me darem a oportunidade de aprender com os melhores. Certamente a minha formação como engenheiro estaria incompleta se não fosse o prazeroso período de trabalho com vocês.

A UTE Norte Fluminense, pela gentileza de fornecer todos os dados imprescindíveis para a elaboração deste trabalho.

Ao professor Paulo Renato por me orientar nesta última jornada na graduação, transmitindo seus conhecimentos sempre com alegria. Sua dedicação para com os cursos de graduação é exemplo para alunos e mestres.

Aos meus amigos, que dentre tantas outras pessoas, me escolheram para confiar segredos e dores, mas, principalmente, boas histórias e muitas risadas. Encaro este trabalho como mais um brinde que damos à existência!

Aos colegas da UFRJ que caminharam juntos em diferentes momentos desta graduação. Nas provas e trabalhos mais cabeludos ou nos momentos de pura descontração, sei que estive muito bem acompanhado durante todo esse período. Mesmo indiretamente, este trabalho também tem um pedacinho de todos vocês.

Finalmente, mas igualmente importante, agradeço a todas aquelas pessoas que cruzam meu caminho diariamente, deixando e levando um pouquinho de si. O aprendizado diário que estas me possibilitam, sem dúvida, é minha maior fonte de inspiração.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Estudo hidrológico de vazões máximas na bacia do rio Macaé

Arthur Prado Barboza

Agosto/2014

Orientadores: Maria Clara Rodrigues Xavier / Paulo Renato Diniz Junqueira Barbosa

Curso: Engenharia Ambiental

O rio Macaé cumpre papel fundamental para parte da população do estado do Rio de Janeiro ao servir de manancial para captações de água para abastecimento, irrigação e, entre outros usos, até mesmo geração termoelétrica. Por outro lado, os fenômenos cíclicos de chuvas e vazões extremas vêm tendo seus efeitos agravados devido a crescente e desordenada urbanização do núcleo urbano, gerando, cada vez mais, prejuízos materiais e imateriais, por vezes irreparáveis. Assim, torna-se relevante quantificar as vazões máximas ao longo da bacia.

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dados hidrológicos do Sistema de Alerta de Cheias do INEA, da ANA (Hidroweb), medições de descarga líquida e equações de chuvas intensas (CPRM, IDF e Otto Pfafstetter). Utilizou-se o método do Hidrograma Unitário Triangular, do SCS, para quantificação das vazões máximas instantâneas nas estações fluviométricas e também na foz do rio Macaé. Para as estações com longas séries de dados diários foram também calculadas vazões máximas por ajuste de distribuição estatística.

Os resultados obtidos neste trabalho foram comparados com outros estudos de vazões máximas na bacia, apontando características específicas das sub-bacias e do método hidrológico utilizado. Espera-se que este trabalho contribua para a gestão de recursos hídricos na bacia e ao Sistema de Alerta de Cheias.

Palavras-chave: Vazões Máximas, Enchentes, Hidrograma Unitário Triangular, Rio Macaé.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Environmental Engineer.

Hydrological study of peak flows in Macaé river basin

Arthur Prado Barboza

August/2014

Advisors: Maria Clara Rodrigues Xavier / Paulo Renato Diniz Junqueira Barbosa

Course: Environmental Engineering

Macaé River plays a central role to a part of Rio de Janeiro state population, serving as the source to public water supply, irrigation and, among other uses, thermoelectric generation. On the other hand, the cyclical phenomena of extreme rainfall and river flow have had their effects exacerbated by growing and discorded urbanization of Macaé city which causes, increasingly, material and immaterial losses, sometimes irreparable. Thus, it is necessary to quantify maximum flows along the river basin.

For the development of this study were used data from INEA Flood Warning System, ANA (Hidroweb), liquid discharge measurements and intense precipitation equations from different studies. The Triangular Unit Hydrograph has been used to determine the peak hydrograph in river stations and also in the mouth of Macaé River. In the stations with long series of daily data, maximum flows were also calculated by adjusting of statistical distribution.

The results of this study were compared with others studies of maximum flows in the river basin, highlighting specific details of each sub basin and the hydrological model adopted. It's expected that this study can truly contribute to the management of water resources in the basin and the INEA Flood Warning System.

Keywords: Maximum Flows, Floods, Unitary Triangle Hydrograph, Macaé River.

ÍNDICE

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
I. 1 – Motivação	1
I. 2 – Objetivos	2
CAPÍTULO II – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
II. 1 – Ciclo hidrológico	4
II. 2 – Vazões Máximas e Enchentes	4
II. 3 – Estudos hidrológicos de vazões máximas	6
II. 3.1 – Métodos Probabilísticos	8
II. 3.2 – Método Racional	9
II. 3.3 – Método do Hidrograma Unitário Triangular	10
CAPÍTULO III – ÁREA DE ESTUDO.....	12
III. 1 – A bacia do rio Macaé	12
III. 2 – Clima e Pluviometria.....	15
III. 3 – Tipos de solo	22
III. 4 – Uso e cobertura do solo	24
III. 5 – Monitoramento hidrológico na bacia	26
III. 6 – Estudos Anteriores de Vazões Máximas na bacia do rio Macaé.....	33
CAPÍTULO IV – MATERIAIS E MÉTODOS	39
IV. 1 – Dados Hidrológicos	39
IV. 1.1 – Dados Fluviométricos	39
IV. 1.2 – Dados Pluviométricos	47
IV. 2 – Ajuste de Distribuição Estatística	53
IV. 3 – Método do Hidrograma Unitário Triangular.....	53
IV. 3.1 – Delimitação da Área de Drenagem	53
IV. 3.2 - Cálculo da Declividade	56
IV. 3.3 – Cálculo do Tempo de Concentração.....	57
IV. 3.4 – Definição do valor de CN médio da bacia.....	58

IV. 3.5 – Cálculo da intensidade de chuva	62
IV. 3.6 – Hidrogramas de cheia.....	67
CAPÍTULO V – RESULTADOS	69
V. 1 – Vazões Máximas obtidas por Ajuste Estatístico	69
V. 1.1 - Macaé de Cima	70
V. 1.2 - Galdinópolis	71
V. 1.3 - Piller	72
V. 1.4 - Síntese dos resultados por distribuição estatística	73
V. 2 – Vazões máximas obtidas pelo método HUT.....	75
V. 2.1 - Macaé de Cima	75
V. 2.2 - Galdinópolis	76
V. 2.3 - Piller	76
V. 2.4 - São Romão	77
V. 2.5 - Barra do Sana	78
V. 2.6 - Ponte do Baião.....	78
V. 2.7 - Fazenda Airis	79
V. 2.8 - Jusante BR-101.....	80
V. 2.9 - Glicério.....	80
V. 2.10 - São Pedro	81
V. 2.11 - Foz do rio Macaé.....	82
V. 3 – Comparação entre estudos de vazões máximas disponíveis	82
V. 3.1 - Macaé de Cima	83
V. 3.2 - Galdinópolis	85
V. 3.3 - Piller	86
V. 3.4 - São Romão	87
V. 3.5 - Barra do Sana	88
V. 3.6 - Ponte do Baião.....	89
V. 3.7 - Fazenda Airis	90

V. 3.8 - Jusante BR-101.....	91
V. 3.9 - Glicério.....	93
V. 3.10 - São Pedro	93
V. 3.11 - Foz do rio Macaé.....	94
CAPÍTULO VI – CONCLUSÃO	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
ANEXO I - DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS	104
ANEXO II - HIDROGRAMAS CALCULADOS	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tempos de retorno exigidos para diferentes projetos hidráulicos.	6
Tabela 2: Normais climatológicas 61-90 - Estação INMET Macaé	16
Tabela 3: Normais climatológicas 61-90 - Estação INMET Nova Friburgo	16
Tabela 4: Estações pluviométricas ANA/Hidroweb na bacia do rio Macaé	19
Tabela 5: Dados pluviométricos de Fazenda Oratório, 1967-2014.....	20
Tabela 6: Dados pluviométricos de Galdinópolis, 1950-2014.....	20
Tabela 7: Dados pluviométricos de Piller, 1950-2014	21
Tabela 8: Dados pluviométricos de Fazenda São João, 1967-2014.....	21
Tabela 9: Estações pluviométricas ativas na bacia do rio Macaé.....	26
Tabela 10: Estações fluviométricas ativas na bacia do rio Macaé.....	29
Tabela 11: Índices fluviomorfológicos das estações fluviométricas do rio Macaé.....	32
Tabela 12: Distribuição de frequência de vazões de cheia (CPRM, 2002)	34
Tabela 13: Vazões máximas calculadas por FGV (2004).....	36
Tabela 14: Vazões Máximas Mensais em Macaé de Cima	41
Tabela 15: Vazões Máximas Mensais em Galdinópolis	42
Tabela 16: Vazões Máximas Mensais em Piller	44
Tabela 17: Vazões Máximas por Ano Hidrológico.....	45
Tabela 18: Estações de chuvas intensas selecionadas para a bacia do rio Macaé.....	48
Tabela 19: Parâmetros de Equações de Chuvas Intensas.....	49
Tabela 20: Parâmetros de Regionalização de Chuvas Intensas	50
Tabela 21: Precipitação Anual Média nas estações CPRM.....	51
Tabela 22: Valores de <i>CN</i> para o Estado do Rio de Janeiro.	59
Tabela 23: Seleção dos postos de chuva para cada estação fluviométrica.....	63
Tabela 24: Reordenamento da distribuição de chuvas.....	66
Tabela 25: Vazões máximas ajustadas em Macaé de Cima	70
Tabela 26: Vazões máximas ajustadas em Galdinópolis	71
Tabela 27: Vazões máximas ajustadas em Piller	72

Tabela 28: Vazões máximas diárias e instantâneas ajustadas	74
Tabela 29: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica Macaé de Cima.....	75
Tabela 30: Vazões máximas na estação fluviométrica Macaé de Cima	75
Tabela 31: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica Galdinópolis	76
Tabela 32: Vazões máximas na estação fluviométrica Galdinópolis	76
Tabela 33: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica Piller.....	76
Tabela 34: Vazões máximas na estação fluviométrica Piller	77
Tabela 35: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica São Romão.....	77
Tabela 36: Vazões máximas na estação fluviométrica São Romão	77
Tabela 37: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica Barra do Sana.....	78
Tabela 38: Vazões máximas na estação fluviométrica Barra do Sana	78
Tabela 39: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica Ponte do Baião	78
Tabela 40: Vazões máximas na estação fluviométrica Ponte do Baião.....	79
Tabela 41: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica Fazenda Airis.....	79
Tabela 42: Vazões máximas na estação fluviométrica Fazenda Airis	79
Tabela 43: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica Jusante BR-101	80
Tabela 44: Vazões máximas na estação fluviométrica Jusante BR-101.....	80
Tabela 45: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica Glicério.....	80
Tabela 46: Vazões máximas na estação fluviométrica Glicério	81
Tabela 47: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica São Pedro.....	81

Tabela 48: Vazões máximas na estação fluviométrica São Pedro	81
Tabela 49: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na foz do rio Macaé.....	82
Tabela 50: Vazões máximas na foz do rio Macaé.....	82
Tabela 51: Comparação entre os resultados obtidos para a estação Macaé de Cima	83
Tabela 52: Comparação entre os resultados obtidos para a estação Galdinópolis	85
Tabela 53: Comparação entre os resultados obtidos para a estação Piller	86
Tabela 54: Comparação entre os resultados obtidos para a estação São Romão	88
Tabela 55: Comparação entre os resultados obtidos para a estação Barra do Sana ..	89
Tabela 56: Comparação entre os resultados obtidos para a estação Ponte do Baião.	89
Tabela 57: Comparação entre os resultados obtidos para a estação Fazenda Airis ...	91
Tabela 58: Comparação entre os resultados obtidos para a estação Jusante BR-101	92
Tabela 59: Comparação entre os resultados obtidos para a estação Glicério	93
Tabela 60: Comparação entre os resultados obtidos para a estação São Pedro	94
Tabela 61: Comparação entre os resultados obtidos para a foz do rio Macaé	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da bacia do rio Macaé na região Norte Fluminense.....	14
Figura 2: Distribuição de temperatura média nas estações meteorológicas.....	17
Figura 3: Distribuição de umidade relativa média nas estações meteorológicas.....	18
Figura 4: Precipitação média mensal nas estações meteorológicas.....	18
Figura 5: Pedologia da bacia do rio Macaé. Baseado em EMBRAPA (2009)......	23
Figura 6: Mapa de Uso do Solo da bacia do rio Macaé. Baseado em ZEE (2008)......	25
Figura 7: Mapa de estações pluviométricas ativas na bacia do rio Macaé.....	28
Figura 8: Mapa de estações fluviométricas telemétricas na bacia do rio Macaé.....	30
Figura 9: Curva-chave em Macaé de Cima.....	40
Figura 10: Curva-chave em Galdinópolis.....	40
Figura 11: Curva-chave em Piller.....	41
Figura 12: Regiões Homogêneas na bacia do rio Macaé.....	52
Figura 13: Delimitação das Áreas de Drenagem das estações fluviométricas.....	55
Figura 14: Declividades média e equivalente para o rio Sana, em Barra do Sana.....	56
Figura 15: Processo de sobreposição de camadas.....	59
Figura 16: Mapa de <i>CN</i> para a bacia do rio Macaé.....	61
Figura 17: Extrapolação da precipitação para durações superiores a 24 horas.....	65
Figura 18: Hidrograma Unitário Triangular do SCS.....	67
Figura 19: Sobreposição de hidrogramas triangulares.....	68
Figura 20: Vazões máximas ajustadas em Macaé de Cima.....	70
Figura 21: Vazões máximas ajustadas em Galdinópolis.....	71
Figura 22: Vazões máximas ajustadas em Piller.....	72
Figura 23: Comparação entre as vazões calculadas para a estação Macaé de Cima pelo método HUT e por ajuste estatístico.....	84
Figura 24: Comparação entre as vazões calculadas para a estação Galdinópolis.....	85
Figura 25: Comparação entre as vazões calculadas para a estação Piller.....	87

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

I. 1 – Motivação

A água é um recurso natural de uso comum, findável e indispensável à manutenção da vida (BRASIL, 1997). No entanto, o crescimento populacional acelerado e a crescente degradação da qualidade dos recursos hídricos trazem insegurança quanto a sua disponibilidade (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2008). Por outro lado, não somente a carência, mas também a ocorrência de excessos de água torna-se preocupante (SANTOS, 2010).

É considerada enchente a ocorrência de vazões relativamente grandes e que, normalmente, resultam em inundações das planícies fluviais ao extravasar a calha do rio. Ou seja, vazões elevadas e consequentes enchentes são processos naturais, com magnitudes definidas por tempo de retornos, sob uma ótica estocástica.

Os eventos extremos, de chuva e vazão, causam, respectivamente, deslizamentos e inundações. Estes, por sua vez, podem causar danos materiais e imateriais por vezes irreparáveis. Segundo Tucci (2004), a estimativa de vazões máximas possui importância fundamental na determinação dos custos e da segurança dos projetos de engenharia.

A urbanização desordenada agrava o problema das enchentes, uma vez que intensifica o desmatamento e aumenta as áreas impermeáveis. A supressão da vegetação reduz a interceptação da água, fazendo-a cair diretamente no solo, que sem a cobertura vegetal, acentua parcela de escoamento superficial e, conseqüentemente, os picos de vazões (TUCCI e CLARKE, 1997; SANTOS, 2010).

A partir de 1974, com a descoberta de petróleo na região de Macaé e a conseqüente chegada da empresa Petrobras, a cidade passou a viver um novo momento econômico, marcado fundamentalmente pelo elevado crescimento demográfico, que se observa até os dias de hoje (TCE RJ, 2012). Esse crescimento, devido à ausência de planejamento urbano, é muitas vezes desordenado, de tal modo que áreas de risco de enchentes são ocupadas, geralmente, pela população de mais baixa renda.

Segundo TCE RJ (2012), de 1991 a 2010 a cidade de Macaé registrou nove ocorrências de inundações bruscas, sendo uma no ano 2006, três no ano 2007, três no ano 2008 e mais duas no ano 2009. Estes nove eventos afetaram diretamente 447,5 mil habitantes no total. Além destes eventos, o estudo de TCE RJ (2012) aponta ainda para uma ocorrência de inundação gradual no ano de 2005.

Em pesquisa em portais de notícias, identificaram-se, além dos eventos supracitados, mais três eventos de cheia de grandes proporções na cidade de Macaé. O primeiro, ocorrido em fevereiro de 1998, manteve 15 mil pessoas ilhadas em treze diferentes bairros, além do rompimento de um dique (FOLHA, 1998). Outro, em novembro de 2010, inundou dez bairros e quinze famílias precisaram deixar suas casas (GLOBO, 2010). Por último, em novembro de 2011 houve extravasamento tanto do rio Macaé quanto do rio São Pedro, além de diversos deslizamentos de terra que ocasionaram interdição de estradas (GLOBO, 2011).

Por estes motivos, faz-se necessária uma maior compreensão sobre os fenômenos de cheias na bacia do rio Macaé, em especial a quantificação das vazões máximas, que por sua vez contribuem para subsidiar projetos de engenharia e oferecer suporte à gestão de recursos hídricos e ambiental no sentido de minimizar impactos decorrentes das cheias (SANTOS, 2010).

Atualmente, a bacia do rio Macaé é amplamente monitorada por estações pertencentes ao Sistema de Alerta de Cheias, do INEA. Entretanto, a maior parte destas estações ainda possui histórico de observação muito curto. Por isso, faz-se necessária a utilização de um modelo chuva-vazão para a quantificação das vazões máximas nestas estações.

O Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé-Ostras, em seu apêndice de Disponibilidade Hídrica, apresenta um estudo de vazões máximas para diversos pontos de interesse na bacia (INEA, 2013). Além deste, outros estudos de vazões máximas na bacia do rio Macaé serão apresentados e utilizados como base de comparação para os resultados obtidos neste trabalho.

I. 2 – Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é determinar vazões instantâneas de pico para diversos tempos de recorrência nas estações fluviométricas distribuídas na bacia do rio Macaé e também para a foz do rio, onde se situa o núcleo urbano da cidade de Macaé. Para tal, será aplicado o Método do Hidrograma Unitário Triangular do U.S. Soil Conservation Service. Para as estações com longas séries de dados fluviométricos serão feitos, também, ajustes estatísticos para determinação destas vazões de referência, que servirão de comparação.

Por fim, os resultados encontrados serão comparados com outros estudos de vazões máximas realizados na bacia para análise da aplicação do método em bacias com ausência ou baixa disponibilidade de dados fluviométricos.

Como objetivos específicos, este trabalho se propõe a:

- Caracterização da bacia do rio Macaé;
- Identificação de estudos de vazões máximas na bacia;
- Tratamento de dados hidrológicos do Hidroweb;
- Determinação de vazões máximas para diferentes tempos de retorno através do ajuste de distribuições estatísticas para as estações com longas séries de dados;
- Identificação e escolha de estações pluviométricas de referência, dotadas de Equações de Chuvas Intensas definidas;
- Cálculo de parâmetro *CN* médio para os locais de interesse;
- Determinação de vazões máximas instantâneas para diferentes tempos de recorrência, através do método do Hidrograma Unitário Triangular;
- Comparação dos resultados obtidos com demais estudos hidrológicos de vazões extremas realizados na bacia.

CAPÍTULO II – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

II. 1 – Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico compreende os processos de formação, transferência e acúmulo de água. Nestes está envolvida a precipitação, que é formada a partir do resfriamento do ar e da condensação do vapor na forma de gotas, que aumentam de tamanho por coalescência e aderência até se precipitarem na forma de chuva. O termo precipitação abrange toda a água que cai sobre a superfície da Terra, seja na forma de chuva, neve, granizo ou orvalho.

A chuva que atinge o solo pode escoar na superfície, gerando o chamado escoamento superficial, formando rios, córregos e lagos até atingir o mar ou, então, infiltrar no solo, abastecendo os lençóis e os corpos d'água superficiais durante os períodos secos.

Os fenômenos que levam de volta a água da superfície para a atmosfera são a evaporação e a transpiração, muitas vezes condensados num único termo: evapotranspiração. A evaporação ocorre quando, dadas certas condições de temperatura e umidade do ar, as moléculas de água na superfície em fase líquida se desprendem e evaporam em fase gasosa. Já a transpiração ocorre por diferença de pressão e temperatura na superfície das folhas das plantas - ocasionando a abertura dos estômatos e a saída de água - e nos animais - com o intuito de equilibrar a temperatura corporal (SANTOS, 2010).

A água existente na Terra está distribuída em sua maior parte no mar, constituindo 97% do total, contrapondo os 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 (VON SPERLING, 2005). Em geral, o suprimento de água está relacionado com a distribuição de chuva na região, proporcionando o abastecimento de suas fontes - superficial ou subterrânea (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2008).

Para o adequado planejamento e gestão dos recursos hídricos, é fundamental a quantificação destes, relacionados aos principais fenômenos hidrológicos (SANTOS, 2010).

II. 2 – Vazões Máximas e Enchentes

A integração dos homens com os rios é tão antiga quanto a existência do próprio homem. Enchentes e secas tem ocorrido como eventos históricos significativos para a

população por milhares de anos. Quando a precipitação é intensa, a quantidade de água que chega simultaneamente ao rio pode ser superior à sua capacidade de drenagem, ou seja, a da sua calha normal, resultando na inundação das áreas ribeirinhas.

Sabe-se hoje que certas condições meteorológicas e hidrológicas propiciam a ocorrência de inundação. O conhecimento do comportamento meteorológico de longo prazo é muito pequeno devido ao grande número de fatores envolvidos nos fenômenos meteorológicos e à interdependência dos processos físicos a que a atmosfera terrestre está sujeita. Ainda, as condições hidrológicas que produzem a inundação podem ser naturais e artificiais (CORDERO *et al*, 1999).

A ocorrência de enchentes em períodos de chuvas intensas é um fenômeno natural e cíclico em uma bacia hidrográfica (SANTOS, 2010). Ainda assim, tais ocorrências acarretam em danos às cidades graças à ausência de planejamento urbano e ordenação da ocupação, o que acaba por permitir a ocupação de margens e áreas de inundação.

Os problemas resultantes da inundação dependem do grau de ocupação da várzea pela população e da frequência com a qual ocorrem as inundações. A ocupação da várzea pode ser para habitação, recreação, uso agrícola, comercial ou industrial. Os problemas das enchentes e das erosões são de ordem mundial (CORDERO *et al*, 1999).

Além desta relação direta, a ocupação urbana também é responsável pela alteração da cobertura natural do solo, de modo a aumentar a parcela da precipitação que esco diretamente para a calha fluvial, gerando de fato o hidrograma de cheia. Altera-se, também, o tempo de concentração da bacia, tornando a resposta à precipitação intensa também mais rápida (TUCCI e CLARKE, 1997).

Medidas para controle de cheias dividem-se em estruturais e não estruturais. As primeiras referem-se às intervenções físicas que alteram a estrutura da bacia, seja na sua extensão (medidas extensivas) ou em obras pontuais (medidas intensivas). Exemplos de medidas estruturais são: reservatórios, retificações, reflorestamento e outras. As medidas não estruturais consistem na busca da melhor convivência do homem com o fenômeno das cheias. Exemplos de medidas não estruturais são: sistemas de alerta, sistemas de resposta, mapas de inundação e outras (CORDERO *et al*, 1999)

II. 3 – Estudos hidrológicos de vazões máximas

Os estudos hidrológicos de vazões máximas são realizados visando maior entendimento do regime hidrológico de uma bacia hidrográfica. Isto é, determina-se para diversos tempos de recorrência as vazões máximas de cheia, de modo a subsidiar planos de bacias, projetos de micro e macro drenagem, sistemas de alertas, barragens e outros projetos afins (TUCCI, 2004; SANTOS, 2010).

Além destas aplicações, os estudos de vazões máximas também são utilizados para delimitação de Faixas Marginais de Proteção, conforme proposto em Carvalho Júnior (2013).

Santos (2010) sintetiza os períodos de retorno exigidos para diferentes obras hidráulicas, apresentados na Tabela 1 abaixo. É possível perceber que o tempo de recorrência requerido para uma obra ou um projeto está diretamente ligado à sua relevância, ao nível de segurança das estruturas e, também, aos custos envolvidos.

Tabela 1: Tempos de retorno exigidos para diferentes projetos hidráulicos.

Obra Hidráulica	Período de retorno (anos)
Bueiros	2 a 10
Galeria de águas pluviais	5 a 20
Pequenas barragens de concreto para abastecimento de água	50 a 100
Canalização a céu aberto trapezoidal	50
Canalização a céu aberto retangular	100
Travessias: pontes, bueiros e estruturas afins.	100
Barragem de concreto	500
Extravasador de uma barragem de terra	1.000
Vertedor de grandes barragens	10.000

Fonte: Santos, 2010

Em geral, a escolha do método a ser utilizado na definição das vazões máximas de projeto depende, principalmente, dos seguintes critérios:

- Disponibilidade de Dados; e
- Área de Drenagem.

Em locais onde existam postos fluviométricos, com dados de vazão ou, ainda, com dados de leitura de régua e resumo de descarga, a vazão de projeto poderá ser calculada através da utilização de métodos estocásticos. Atualmente, a teoria estatística de valores extremos é um ramo importante e ativo da matemática, com desdobramentos práticos relevantes, principalmente, para as áreas de economia e engenharia (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

Os métodos estatísticos determinam a frequência de cheias futuras a partir do registro de cheias passadas. Recomenda-se a aplicação de métodos probabilísticos na presença de dados fluviométricos adequados, de série histórica considerável, pois, neste caso, o hidrólogo não incorre ao erro da transformação de chuva em vazão. Na aplicação de modelos probabilísticos, quanto maior é a série, maior a segurança do modelo, uma vez que os eventos extremos, como as grandes vazões estão diretamente relacionados ao período de retorno (SANTOS, 2010).

Diferentes distribuições probabilísticas se adaptam às estimativas de vazões máximas. Dentre elas, Santos (2010) destaca:

- Distribuição Log-Normal Tipo II;
- Distribuição Log-Normal Tipo III;
- Distribuição Pearson Tipo III;
- Distribuição Log-Pearson Tipo III;
- Distribuição de Gumbel;

As distribuições Tipo II são definidas a partir de dois parâmetros, enquanto as distribuições Tipo III são definidas a partir de três parâmetros. A Distribuição de Gumbel é considerada uma distribuição do Tipo II por ser definida também por dois parâmetros.

Não sendo possível a utilização de dados provenientes de postos fluviométricos, devem ser utilizados modelos hidrológicos de chuva-vazão para o cálculo das vazões de projeto. Estes modelos no geral se apropriam de valores de chuva de referência para diferentes tempos de recorrência para definir o escoamento superficial correspondente a essa chuva e então qual definir a vazão máxima de projeto.

Dentre estes modelos, destacam-se os métodos Racional e Hidrograma Unitário. A escolha entre estes dois métodos se dá pela área de drenagem do local em estudo. Carvalho Júnior (2013) e SUDERHSA (2002) recomendam a utilização do primeiro

apenas para bacias com áreas de drenagem muito pequenas, inferiores a 2 km², enquanto a aplicação do método do Hidrograma Unitário Triangular não é limitada em função da área de drenagem.

SUDERHSA (2002) aponta ainda que os valores obtidos nestes modelos são sempre aproximados, devido às incertezas hidrológicas, às simplificações dos métodos e aos critérios adotados. Portanto, quanto mais meticolosos e sistemáticos forem os procedimentos adotados, menor será a probabilidade de ocorrência de erros comprometedores.

Nos subitens seguintes serão descritos três métodos para estimativas de vazões máximas em seções fluviais. O primeiro, Métodos Probabilísticos, é somente aplicado a bacias com longa e consistida série de dados fluviométricos disponíveis. Serão apresentados pontos relevantes à aplicação destes. O segundo subitem discorrerá exclusivamente sobre o Método Racional, apontando suas aplicações e suas limitações. O terceiro subitem discorrerá brevemente sobre o método do Hidrograma Unitário Triangular, suas aplicações e limitações. A descrição detalhada deste último será apresentada no Capítulo IV deste trabalho (Materiais e Métodos).

II. 3.1 – Métodos Probabilísticos

Os métodos probabilísticos são aplicados às estações com longa série de dados fluviométricos consistidos (SANTOS, 2010). Carvalho Júnior (2013) aponta que para a utilização destes métodos, a série histórica deve possuir, ao mínimo, dez anos hidrológicos completos.

A partir da série histórica a nível diário, deve-se definir a vazão máxima para cada ano hidrológico. A análise por ano hidrológico, e não por ano civil, se deve ao fato de garantir que cada ano hidrológico possuirá a sua própria maior vazão de cheia. No caso da análise por ano civil, pode ocorrer de duas grandes cheias ocorrerem no mesmo ano e então uma delas (a segunda maior) não entrar para as séries anuais, o que poderia vir a comprometer o ajuste da distribuição estatística.

Determinadas as séries de vazões máximas anuais por ano hidrológico, normalmente se ajustam diferentes distribuições probabilísticas à série amostrada e então, em função de parâmetros como Assimetria e o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (K-S), descrito em (NAGHETTINI e PINTO, 2007), escolhe-se a distribuição que vai representar o comportamento das vazões extremas no local de estudo. Geralmente,

em áreas com mais de um local com elevada disponibilidade de dados fluviométricos, adota-se a mesma distribuição estatística para todas as séries de dados disponíveis.

Vale ressaltar que, como os postos fluviométricos com séries antigas não possuem registradores contínuos de nível d'água e as leituras de régua ocorrem apenas uma ou duas vezes ao dia, os valores obtidos para as vazões máximas diárias devem ser convertidos em valores máximos instantâneos, através do coeficiente de majoração da expressão empírica de Fuller, obtido através da equação:

$$K = 1 + \frac{2,66}{A^{0,3}}$$

Onde K é o coeficiente de majoração de Fuller (adimensional) e A é a área de drenagem (em km²) da seção fluvial em análise.

Para a obtenção da vazão máxima instantânea, utiliza-se a equação:

$$Q_{inst} = Q_{dia} \cdot K$$

Onde Q_{inst} é a vazão máxima instantânea e Q_{dia} é a vazão máxima em escala diária.

II. 3.2 – Método Racional

O Método Racional consiste no cálculo da descarga máxima de uma enchente de projeto por uma expressão bem simples, relacionando o valor da descarga máxima com a área da bacia de contribuição e a intensidade da precipitação (DNIT, 2005).

O Método Racional é usualmente utilizado para estimar a vazão de pico durante uma cheia extrema em locais com áreas de drenagem iguais ou inferiores a 2 km² (CARVALHO JUNIOR, 2013). Portanto, esse é o método utilizado em cabeceiras de rios e em pequenos afluentes, onde geralmente não há monitoramento hidrológico.

DNIT (2005) afirma ainda que, pela sua extrema simplicidade, o Método Racional é amplamente utilizado em projetos de drenagem, não só no Brasil, mas em todo o mundo, principalmente em bacias de pequeno porte e áreas urbanas.

Segundo Santos (2010), os resultados deste método são geralmente satisfatórios, desde que seja utilizado dentro dos seus limites de validade.

O Método Racional é expresso pela equação:

$$Q = 0,278 \cdot C \cdot i \cdot A$$

Onde Q é a vazão de pico (em m³/s), C é o coeficiente de escoamento (adimensional), i é a intensidade máxima média de precipitação (em mm/h) e A é a área da bacia (em

km²). O coeficiente 0,278 é uma constante para adequação das unidades utilizadas. Este valor pode variar em função das unidades adotadas no cálculo.

Delimitada a área de contribuição e adotada uma intensidade de precipitação para o local, o coeficiente de escoamento *C*, também chamado de coeficiente de *runoff*, é um valor adimensional definido como a razão entre o volume de água escoado superficialmente e o volume de água precipitado. O valor de *C* depende fundamentalmente das características fisiográficas da bacia (declividade, tipo e uso de solo) e é geralmente obtido a partir da média ponderada dos valores de *C* de cada superfície pelas suas respectivas áreas no interior da bacia em estudo (DNIT, 2005).

O conceito básico deste método é que a contribuição máxima ocorrerá quando toda a bacia estiver contribuindo para a seção fluvial de interesse. O deflúvio é uma parcela da precipitação média na área com duração igual ao tempo de concentração da bacia (DNIT, 2005).

Uma restrição deste método é que ele não leva em consideração que as condições de permeabilidade do terreno variam durante a precipitação no sentido de aumentar o escoamento superficial. Este método também não considera o retardamento natural do escoamento cujo fenômeno acarreta alteração no pico de cheia, sendo esta a principal razão da limitação da aplicação deste método para bacias maiores.

Outra restrição deste método é que ele considera a intensidade de chuva constante em todos os pontos da bacia durante o tempo de concentração calculado. Ainda assim, estas simplificações não impedem sua aplicação em bacias pequenas, já que as alterações devido a estas simplificações se tornam desprezíveis (CARVALHO JÚNIOR, 2013).

De qualquer forma, o Método Racional define apenas a descarga máxima de projeto, e não a forma completa do hidrograma, requerida em alguns casos (DNIT, 2005).

II. 3.3 – Método do Hidrograma Unitário Triangular

O Método do Hidrograma Unitário Triangular (HUT) é utilizado para definição de hidrograma de cheia geralmente em áreas onde normalmente não se dispõe de registros fluviométricos adequados ou estes se encontram ainda em baixa disponibilidade.

Assim como o Método Racional, o Método do HUT consiste primeiramente na divisão da precipitação em duas parcelas: uma que infiltra no solo ou se acumula na bacia por outras formas e outra que vai gerar escoamento superficial direto. A parcela da

precipitação que escoar diretamente para a calha fluvial e gera o hidrograma de cheia é chamada de precipitação efetiva.

A precipitação efetiva depende do complexo solo-cobertura vegetal da bacia e das condições de umidade que antecedem a chuva. Seu valor é definido em função do *CN* médio da bacia de contribuição.

O *CN*, Curva-Número, representa indiretamente o tipo e o uso de solo da bacia. O valor de *CN* varia de 0 a 100. Para áreas completamente impermeáveis considera-se $CN = 100$. Através dele, calcula-se uma infiltração potencial de modo que o escoamento superficial só ocorre quando a precipitação passa a superar uma abstração inicial que é função deste valor.

O cálculo do *CN* médio se dá pela média ponderada pela área dos valores de *CN* presentes ao longo da bacia de contribuição.

A precipitação efetiva se propaga pela superfície da bacia até atingir os cursos d'água, através dos quais é conduzida para jusante. O método do HUT assume que uma dada precipitação efetiva P_e , de duração t , transforma-se, neste processo de propagação, em um hidrograma de forma triangular, cujas dimensões (vazão de pico, tempo de ascensão e recessão) são estimadas a partir das características fisiográficas da bacia.

No método do SCS (1985), o hidrograma de projeto caracteriza-se por uma altura pluviométrica total, associada a uma duração e a um dado tempo de recorrência, e, ainda, por um padrão específico de distribuição espacial e temporal. A distribuição espacial na verdade é uma correção da chuva de projeto, que assume que esta não é homogênea para toda a área estudada. Enquanto isso, a distribuição temporal da chuva é realizada pelo método de blocos alternados, que, segundo SUDERHSA (2002), é bastante severa e garante que as vazões máximas não serão subestimadas.

Uma limitação da aplicação do método é que ele demanda um mapeamento detalhado do *CN* na bacia em estudo. Para isto, requerem-se mapeamentos de tipos e usos e coberturas de solo, nem sempre facilmente disponíveis para áreas muito grandes. Por outro lado, como o *CN* representa o uso do solo na bacia, é possível elaborar cenários de diferentes usos do solo e avaliar como as mudanças interferem no mapa de *CN* e, conseqüentemente, no hidrograma de cheias.

O Método do Hidrograma Unitário Triangular, do SCS, utilizado para o cálculo de vazões máximas neste trabalho, terá suas etapas de cálculo e metodologia específica minuciosamente detalhadas no Capítulo IV.

CAPÍTULO III – ÁREA DE ESTUDO

III. 1 – A bacia do rio Macaé

O rio Macaé nasce na Serra de Macaé de Cima, no município de Nova Friburgo, região serrana do Rio de Janeiro, a cerca de 1600 metros de altitude. Desenvolve-se no sentido leste, até a confluência com o rio São Pedro, e apenas em seu trecho final se desenvolve no sentido sudeste até seu desemboque diretamente no Oceano Atlântico.

Geomorfologicamente, a transição do domínio de Escarpas Serranas para Planícies Fluviais gera uma heterogeneidade de ambientes que permite que se estabeleçam, ao longo da bacia, diferentes tipos de canais, com padrões de escoamento e descarga de sedimentos diversificados (LIMA e MARÇAL, 2013).

Entre as décadas de 1940 e 1980 diversas planícies de inundação de importantes bacias hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro foram submetidas a transformações nas suas seções fluviais, e assim foi com o rio Macaé - a partir da década de 60. O rio Macaé teve aproximadamente 60 km do seu baixo curso retificado, além de outros afluentes da parte baixa, como o rio São Pedro, rio D'Antas e o Canal Jurumirim. A retificação minimizou problemas relacionados a saneamento, porém muitos impactos ambientais decorreram desta intervenção, tais como: modificação no padrão de drenagem, alteração no padrão de escoamento e no regime de descargas, aumento da carga de sedimentos, assoreamento e outros (MARÇAL e ASSUMPÇÃO, 2012).

A bacia hidrográfica do rio Macaé limita-se ao norte com as bacias dos rios Grande (afluente do rio Paraíba do Sul) e Macabu, e ao sul com as bacias dos rios Macacu (contribuinte da Baía da Guanabara) e São João.

Com aproximadamente 1.765 km² de área total, a bacia do Macaé tem como principal sub-bacia a do rio São Pedro, afluente da margem esquerda, que drena 479 km², o que equivale a 27% da área total da bacia. Os outros três principais afluentes são, pela margem direita, o rio Bonito e, pela margem esquerda, os rios Sana e d'Antas, que drenam áreas inferiores a 7% da bacia, cada um.

Em relação à codificação de gestão dos recursos hídricos do Instituto Estadual do Ambiente – INEA, a bacia do rio Macaé compõe a Região Hidrográfica VIII - Macaé e das Ostras, com área total de 1.978 km², que abrange também a bacia do rio das Ostras (157 km²) e da lagoa de Imboassica (56 km²).

Segundo a codificação da Agência Nacional de Águas - ANA, a bacia do rio Macaé faz parte da Sub-bacia Litorânea do Rio de Janeiro (código 59), com cerca de 20.370 km²

de área total. Com exceção das parcelas fluminenses das bacias dos rios Paraíba do Sul e Itabapoana, que abrangem também outros estados, todo o território do Estado do Rio de Janeiro é drenado por pequenas e médias bacias hidrográficas que nascem na Serra do Mar e desembocam diretamente no Oceano Atlântico, denominadas bacias litorâneas.

Considerando toda a sua diversidade, a bacia do rio Macaé é bastante representativa de outras bacias litorâneas do Estado, não apenas em termos hidrossedimentológicos, mas de maneira geral nos aspectos físicos, bióticos e também socioeconômicos, que serão abordados a seguir.

A Figura 1, abaixo, situa a bacia do rio Macaé no contexto da região norte do estado do Rio de Janeiro.

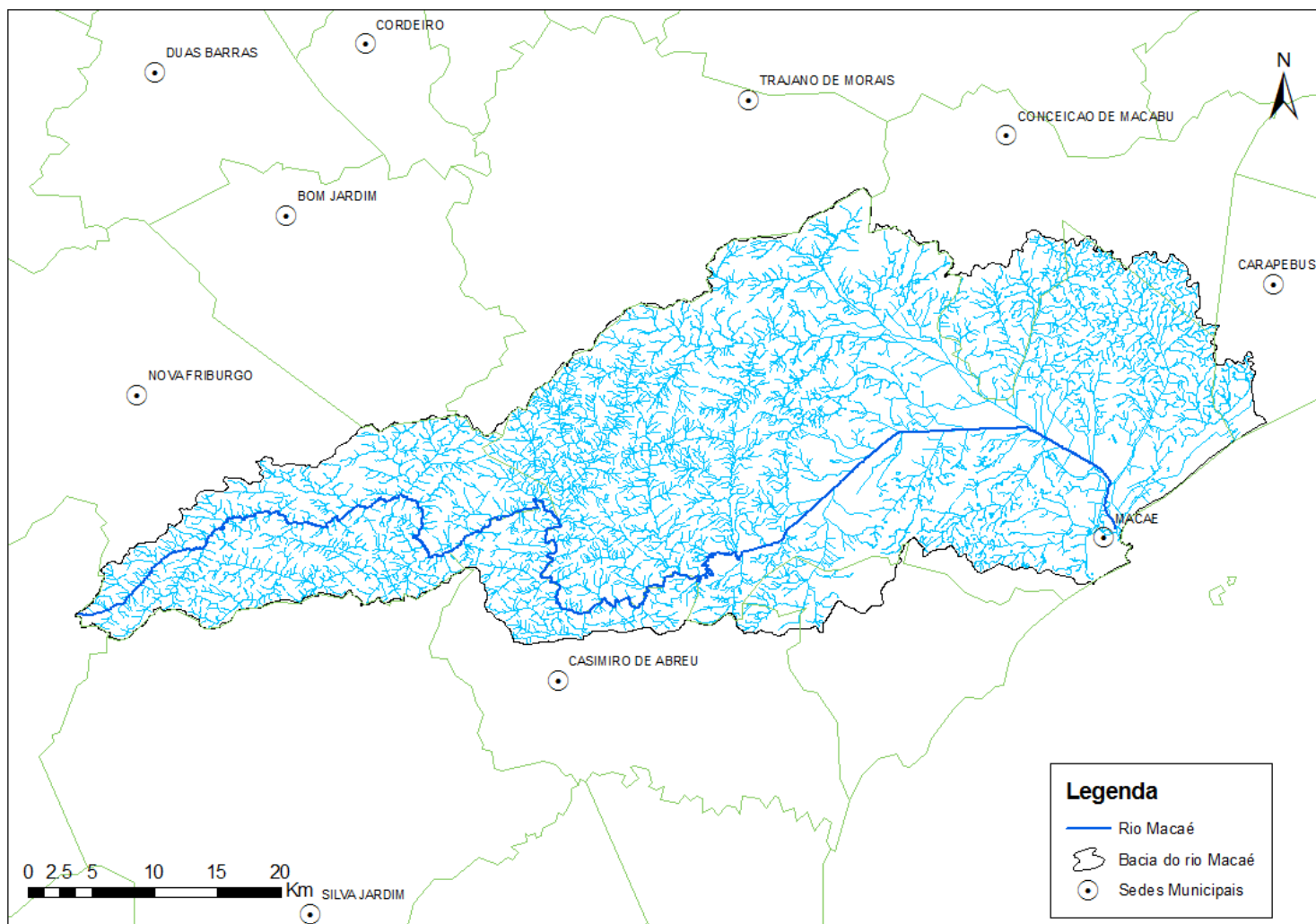


Figura 1: Localização da bacia do rio Macaé na região Norte Fluminense

III. 2 – Clima e Pluviometria

A Região Sudeste do Brasil, onde está situada a bacia do rio Macaé, recebe influência tanto de sistemas tropicais como de sistemas provenientes de latitudes médias, apresentando uma estação menos chuvosa no inverno e mais chuvosa no verão (CAL, 2006).

A diversidade climatológica fluminense é decorrente, portanto, da combinação de uma série de fatores físicos e atmosféricos locais. As escarpas de blocos falhados separam superfícies altas e montanhosas, que mergulham para o interior, de outras planas e suavemente onduladas, que se espraiam ao longo da costa do Estado do Rio de Janeiro, constituindo as baixadas litorâneas (CAL, 2006).

De acordo com a classificação de Köppen, a baixada campista é caracterizada pelo clima Tropical Úmido (Ao), com chuvas no verão ou outono, temperaturas elevadas e inverno seco. Abrange parte do litoral e a região norte/noroeste do Rio de Janeiro, litoral capixaba, oeste paulista e parte de Minas Gerais. Já a região Serrana é classificada como Clima Tropical de Altitude (Aw), onde os meses mais chuvosos ocorrem durante a primavera e o verão (setembro a março) e os de estiagem, com o outono e inverno (abril a setembro). Nesse tipo de clima, a precipitação média é maior, pois o relevo condiciona a ocorrência de chuvas convectivas, apresentando médias de 1.500 e 2.000 mm/ano.

Na bacia do rio Macaé existe uma estação meteorológica em operação e de responsabilidade do INMET, na cidade de Macaé, mas como seus dados históricos não estão disponíveis, apenas algumas informações dessa estação, relativas a normais climatológicas no período 1961-1990, foram extraídas de um trabalho acadêmico (CARVALHO e CAVALCANTI, 2004) e são apresentadas na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2: Normais climatológicas 61-90 - Estação INMET Macaé

Estação Macaé - código INMET 83749			
MÊS	Temperatura Média (°C)	Precipitação Total (mm)	Umidade Relativa (%)
JAN	25,6	156,9	81,0
FEV	26,2	93,3	80,0
MAR	25,8	100,1	81,0
ABR	24,3	100,5	81,0
MAI	22,8	56,9	80,0
JUN	21,2	53,9	80,0
JUL	20,7	60,5	80,0
AGO	21,2	38,2	80,0
SET	21,8	74,0	82,0
OUT	22,7	102,4	82,0
NOV	24,1	159,3	81,0
DEZ	25,0	181,6	81,0
ANUAL	23,5	1177,6	80,8

A outra estação meteorológica, com dados disponíveis, fica no município de Nova Friburgo, que, apesar de estar na vertente da bacia do rio Paraíba do Sul, fica próxima do divisor de águas com a bacia do rio Macaé. Admitiu-se, no presente estudo, que os valores apresentados por INMET (1992) para a estação Nova Friburgo, situada a 857 metros de altitude, podem ser utilizados para caracterizar o comportamento meteorológico da parte serrana da bacia do rio Macaé. Os dados são expostos na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3: Normais climatológicas 61-90 - Estação INMET Nova Friburgo

Estação Nova Friburgo - código INMET 83745					
MÊS	Temperatura Média (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Precipitação Total (mm)	Umidade Relativa (%)
JAN	21,2	17,1	27,0	208,6	77,0
FEV	21,4	17,1	27,6	167,2	78,0
MAR	20,9	16,8	26,9	151,0	78,0
ABR	18,7	14,8	24,8	72,3	82,0
MAI	16,2	11,9	22,9	45,6	82,0
JUN	14,7	10,1	21,6	26,6	83,0
JUL	14,0	9,5	21,1	19,7	83,0
AGO	15,2	10,3	22,5	22,9	81,0
SET	16,6	12,3	22,9	41,3	80,0
OUT	18,3	14,3	23,9	83,4	81,0
NOV	19,5	15,5	24,8	169,2	80,0
DEZ	20,3	16,3	25,5	238,7	80,0
ANUAL	18,1	13,8	24,3	1246,5	80,4

Em Nova Friburgo, a temperatura média anual é de 18,1 °C, sendo que as temperaturas médias mensais oscilam entre 21,4 °C, em fevereiro, e 14,0 °C, em julho. Já em Macaé, a temperatura média anual é 23,5 °C, enquanto as temperaturas médias mensais oscilam entre 26,2 °C, em fevereiro, e 20,7 °C, em julho.

Em função da diferença de altitude entre as duas cidades, verifica-se uma significativa diferença nas temperaturas. Pode-se observar que a média anual em Nova Friburgo é 5,4 °C inferior a Macaé, e no inverno, a temperatura média do mês de julho nos dois lugares tem uma diferença, de 6,7 °C.

A Figura 2 abaixo mostra as temperaturas médias ao longo do ano na bacia do rio Macaé, representada pelas estações de Nova Friburgo e Macaé. Apesar de Nova Friburgo ser mais frio, o comportamento sazonal da temperatura média é semelhante.

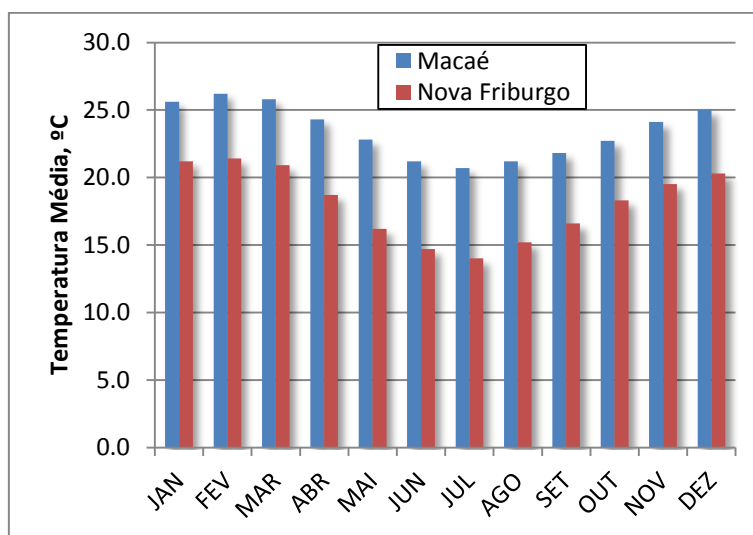


Figura 2: Distribuição de temperatura média nas estações meteorológicas

Em Nova Friburgo, os meses mais frios são junho e julho, quando a temperatura mínima atinge 9,5 °C. Os meses mais quentes são janeiro e fevereiro, época de maior insolação na região, quando a temperatura máxima atinge os 27,6 °C. Esses dados não estão disponíveis para a estação de Macaé.

A umidade relativa média anual em Nova Friburgo é 80,8%, variando entre o valor mensal mínimo de 77,0%, em janeiro, e o mensal máximo de 83,0%, em junho. Em Macaé, a umidade relativa média anual é 80,8%, variando entre o valor mensal mínimo de 80,0%, nos meses de fevereiro, maio, junho, julho e agosto, e o mensal máximo de 82,0%, nos meses de setembro e outubro, conforme ilustrado na Figura 3 abaixo.

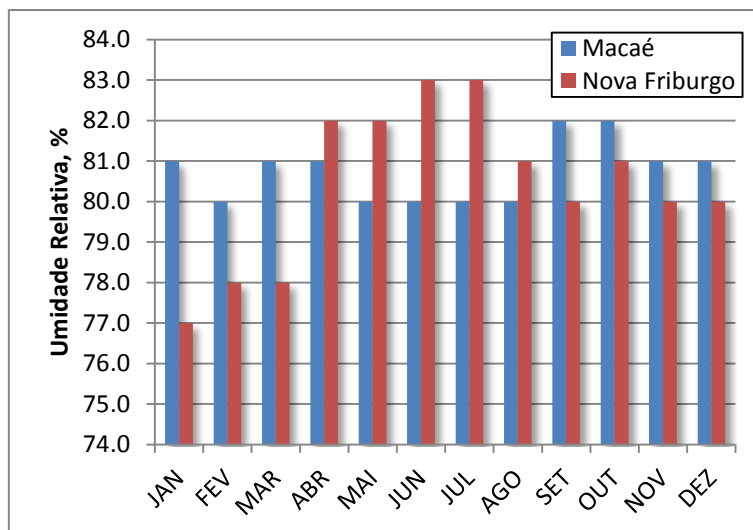


Figura 3: Distribuição de umidade relativa média nas estações meteorológicas

No período 1961-1990, as estações meteorológicas de Nova Friburgo e Macaé, apresentadas anteriormente, tiveram uma precipitação anual de 1.247 e 1.178mm, respectivamente. Essa diferença de 6% é pequena, se comparada com a diferença na temperatura média anual, de 30%. A distribuição da chuva ao longo do ano, porém, é diferenciada. Em Nova Friburgo, a estação seca é muito mais pronunciada, com um inverno sem chuvas, enquanto em Macaé, a precipitação mensal é superior a 50 mm praticamente durante o ano inteiro. A Figura 4 a seguir ilustra essas informações.

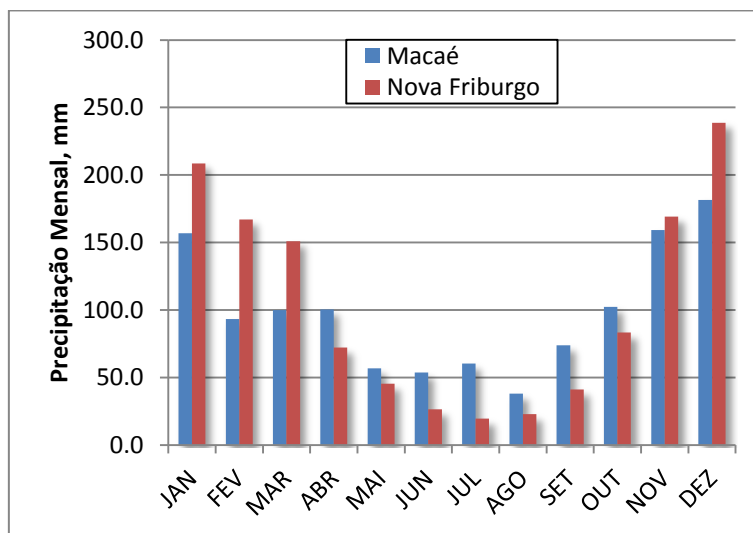


Figura 4: Precipitação média mensal nas estações meteorológicas

Além das estações meteorológicas do INMET, segundo o inventário de estações pluviométricas da ANA, existem registros diários em treze postos na bacia do rio Macaé, listados na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4: Estações pluviométricas ANA/Hidroweb na bacia do rio Macaé

CÓDIGO	ESTAÇÃO	OBSERVAÇÃO	
		INÍCIO	FIM
2241004	FAZENDA ORATÓRIO	jun/67	
2241013	FAZENDA SEVERINA	dez/73	mar/78
2241014	FAZENDA BELO MONTE	set/35	mar/83
2241016	MACAÉ	jan/35	jul/78
2241020	MACAÉ	jan/61	mai/90
2241029	MACAÉ (PESAGRO)	jul/79	dez/96
2242003	PILLER	ago/50	
2242004	GALDINÓPOLIS	ago/50	
2242005	FAZENDA SÃO JOÃO	mai/67	
2242060	GLICÉRIO (CRUBIXAIS)	nov/35	set/67
2242063	ROCHA LEÃO (EFL)	jan/60	dez/63
2242080	PONTE DO BAIÃO	dez/73	mar/78
2242099	CACHOEIRA DE MACAÉ	jun/36	dez/63

Para aprofundar a caracterização do comportamento da precipitação na bacia do rio Macaé foram selecionadas as quatro estações da ANA que ainda continuam em operação no interior da bacia: Fazenda Oratório, Piller Galdinópolis e Fazenda São João. Estas estações possuem séries históricas de dados com extensão superior a 40 anos. A primeira se situa na parte mais baixa da bacia, já em área de baixada, enquanto as três últimas se situam na região de serra, ainda a montante da confluência do rio Bonito com o rio Macaé.

Os dados abaixo apresentados ratificam a influência da topografia no regime pluvial. As estações localizadas na parte mais alta da bacia possuem totais pluviométricos anuais médios pelo menos 20% maiores que os registrados na estação Fazenda Oratório. O número de dias chuvosos também é consideravelmente maior nas estações localizadas na região serrana.

Na estação Fazenda Oratório, a precipitação média mensal oscila entre 43,6 mm, em junho, e 241,8 mm, em dezembro. A precipitação média anual é de 1.628,9 mm. A Tabela 5 abaixo apresenta as estatísticas mensais para a estação.

Tabela 5: Dados pluviométricos de Fazenda Oratório, 1967-2014

Estação Fazenda Oratório (ANA 02241004)			
MÊS	Precipitação Total (mm)	Altura Máxima em 24 horas (mm)	Número de Dias Chuvosos
JAN	236,9	143	13
FEV	146,3	150	10
MAR	183,2	147	12
ABR	138,1	164	10
MAI	66,8	110	7
JUN	43,6	84	5
JUL	50,4	111	6
AGO	46,7	85	6
SET	99,5	126	10
OUT	136,7	80	12
NOV	238,7	176	15
DEZ	241,8	101	16
ANUAL	1628,7	176	122

Na estação de Galdinópolis, os valores normais mensais oscilam entre 44,9 mm, em junho, e 337,9 mm, em dezembro. A precipitação média anual é de 1.960,3 mm. A Tabela 6 abaixo apresenta as estatísticas mensais para a estação.

Tabela 6: Dados pluviométricos de Galdinópolis, 1950-2014

Estação Galdinópolis (ANA 02242004)			
MÊS	Precipitação Total (mm)	Altura Máxima em 24 horas (mm)	Número de Dias Chuvosos
JAN	329,7	152	19
FEV	216,9	154	14
MAR	241,2	113	16
ABR	153,3	125	14
MAI	77,9	64	10
JUN	44,9	63	7
JUL	51,2	115	8
AGO	45,3	95	7
SET	83,9	71	11
OUT	126,8	75	14
NOV	251,1	134	17
DEZ	337,9	164	20
ANUAL	1960,3	164	157

Na estação Piller, os valores normais mensais oscilam entre 69,3 mm, em junho, e 356,9 mm, em dezembro. Os valores totais anuais variam em torno de 2.360,6 mm,

sendo esta a estação mais chuvosa da bacia. A Tabela 7 abaixo apresenta as estatísticas mensais para a estação.

Tabela 7: Dados pluviométricos de Piller, 1950-2014

Estação Piller (ANA 02242003)			
MÊS	Precipitação Total (mm)	Altura Máxima em 24 horas (mm)	Número de Dias Chuvosos
JAN	338,6	153	18
FEV	239,5	213	14
MAR	289,7	241	15
ABR	199,1	150	14
MAI	116,9	100	10
JUN	69,3	88	7
JUL	78,3	80	8
AGO	75,8	154	8
SET	124,1	96	11
OUT	168,9	94	14
NOV	303,6	180	17
DEZ	356,9	196	19
ANUAL	2360,6	241	155

Na estação Fazenda São João, os valores mensais oscilam entre 48,8 mm, em agosto, e 371,2 mm, em janeiro. A precipitação média anual é de 2.108,9 mm. A Tabela 8 abaixo apresenta as estatísticas mensais para a estação.

Tabela 8: Dados pluviométricos de Fazenda São João, 1967-2014

Estação Fazenda São João (ANA 02242005)			
MÊS	Precipitação Total (mm)	Altura Máxima em 24 horas (mm)	Número de Dias Chuvosos
JAN	371,2	144	18
FEV	231,7	138	13
MAR	252,6	177	15
ABR	147,6	141	12
MAI	84,6	76	10
JUN	53,6	54	7
JUL	58,4	99	8
AGO	48,8	75	7
SET	94,1	72	12
OUT	139,9	94	13
NOV	277,6	149	16
DEZ	349,1	148	19
ANUAL	2108,9	177	150

III. 3 – Tipos de solo

A caracterização da bacia quanto aos tipos de solo é fundamental para compreensão dos fenômenos de cheia. Solos profundos e drenantes permitem maior e mais rápida infiltração, de modo a atenuar o escoamento superficial, enquanto solos rasos ou mais impermeáveis propiciam maior escoamento superficial direto (SARTORI *et al*, 2005).

Para caracterização da pedologia da bacia do rio Macaé, é apresentado, na Figura 5 a seguir, o mapa da EMBRAPA (2009) para os solos do estado do Rio de Janeiro, elaborado em escala 1:100.000. O mapa, cujo levantamento foi feito em escala estadual, foi recortado visando apenas a bacia hidrográfica em estudo.

Através da imagem, é possível verificar a predominância de três tipos de solos na bacia: Latossolos Vermelho/Amarelo e Argilossolos, na porção mais baixa da bacia, e Cambissolo Háplico, nas cabeceiras. Os dois primeiros são solos mais drenantes, que permitem maior infiltração de água, enquanto o último, mais raso, favorece o maior escoamento superficial.

O mapa de tipos de solo é de fundamental importância para a aplicação do método do Hidrograma Unitário Triangular. Como será visto nos itens seguintes, o parâmetro *CN* é definido pelo uso e cobertura do solo e também pelo grupo hidrológico do solo, por sua vez definido pelo tipo de solo, segundo metodologia discutida em Sartori *et al* (2005).

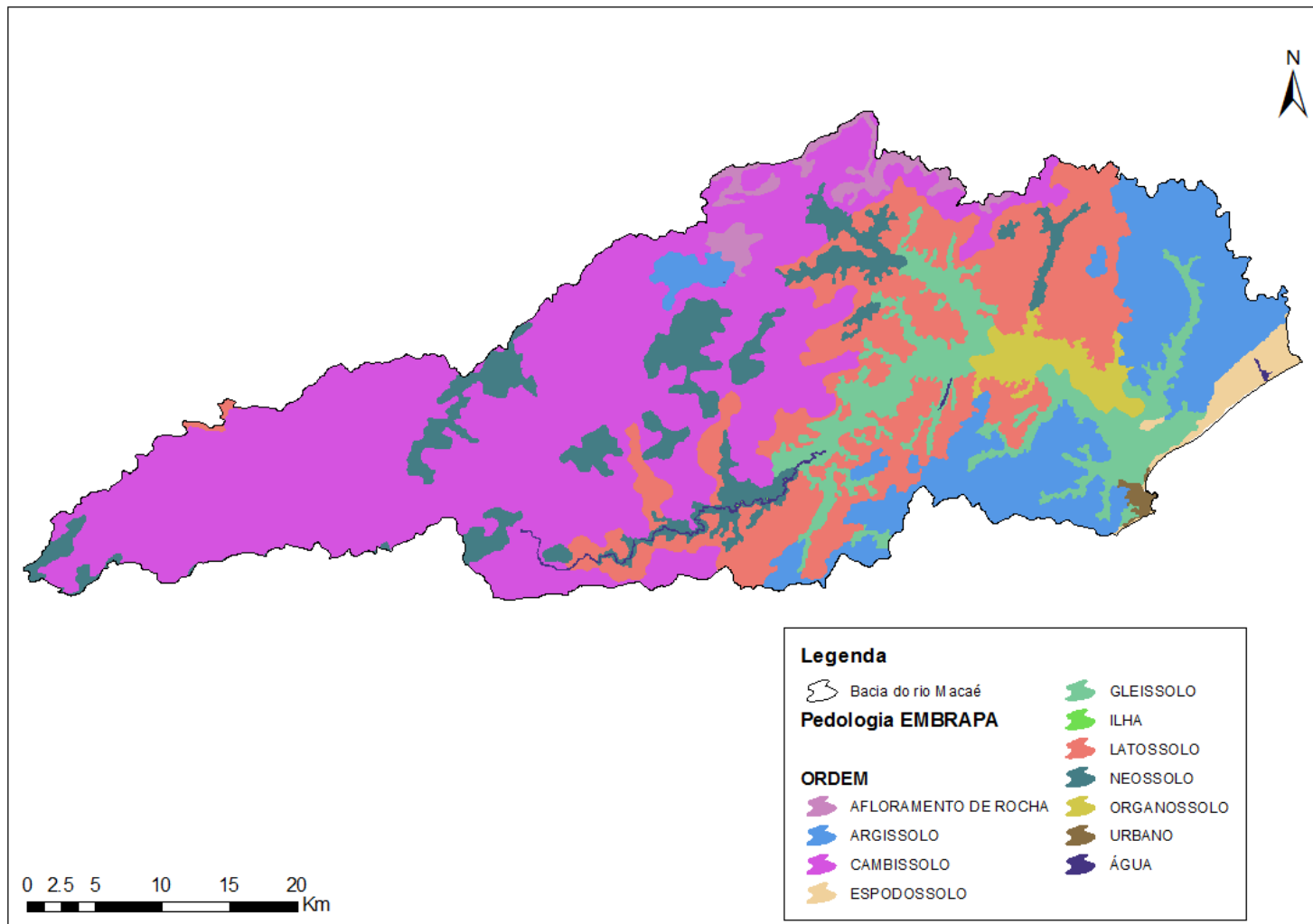


Figura 5: Pedologia da bacia do rio Macaé. Baseado em EMBRAPA (2009).

III. 4 – Uso e cobertura do solo

Para caracterização da cobertura e uso do solo da bacia do rio Macaé, é apresentado o mapa do Zoneamento Ecológico Econômico, elaborado em escala 1:100.000 no ano de 2008.

Através da imagem é possível verificar a predominância de campos de pastagem em várzea ao longo de quase todo o eixo do rio principal. Destaca-se também a predominância de floresta apenas nas partes mais altas da bacia e a vegetação secundária em estágio inicial em grande parte da área de baixada.

A ocupação urbana se dá majoritariamente nas proximidades da foz do rio Macaé, onde se situa o núcleo urbano da cidade de Macaé. Alguns aglomerados urbanos são representados no mapa, como é o caso dos distritos de Lumiar e São Pedro da Serra - no município de Nova Friburgo - e Sana e Frade - no município de Macaé. Outras localidades, por conta do reduzido tamanho ou baixa taxa de urbanização, não são representadas: Cascata (município de Nova Friburgo), Cachoeiros, Bicuda Grande, Areia Branca e Iriri (município de Macaé).

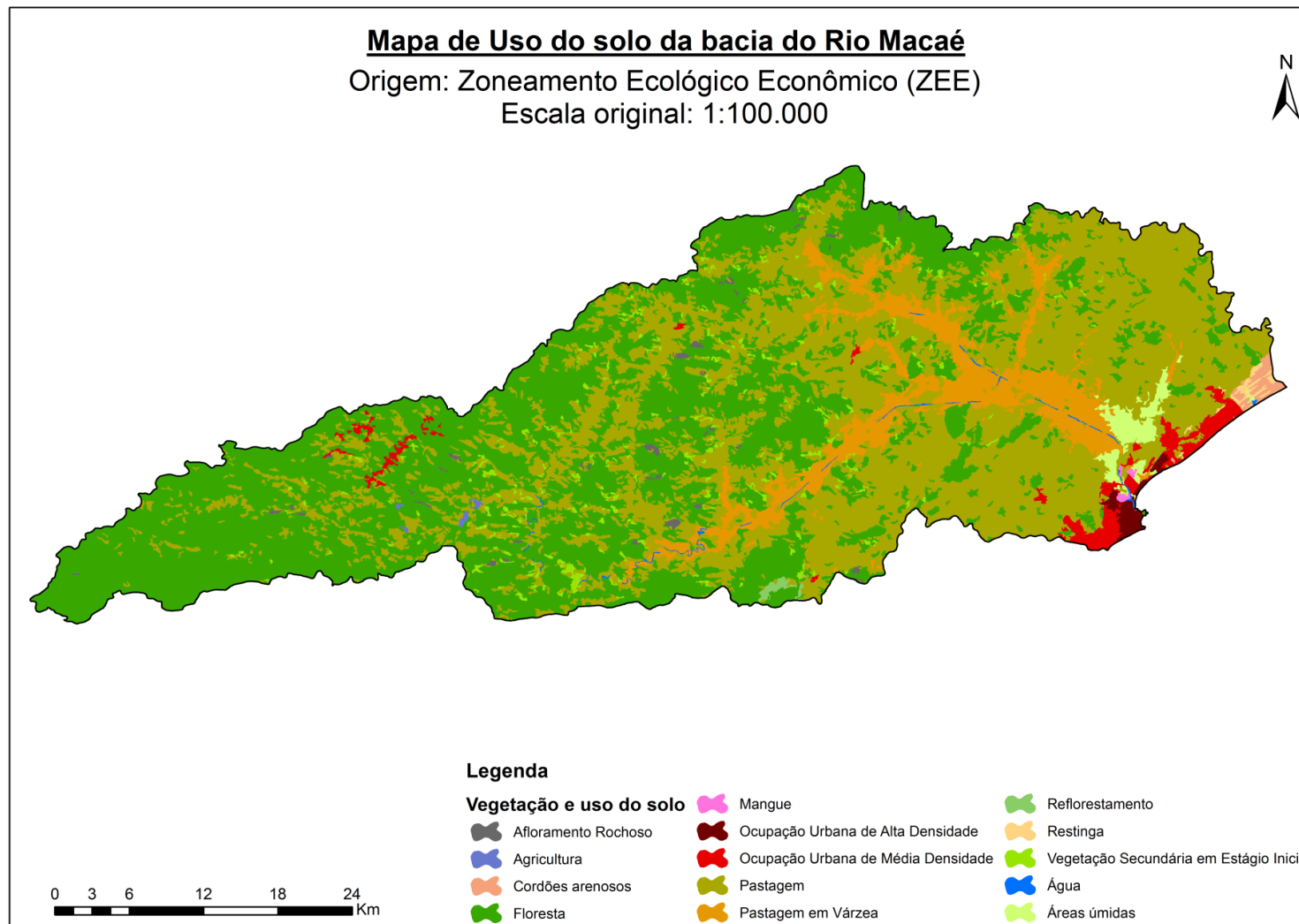


Figura 6: Mapa de Uso do Solo da bacia do rio Macaé. Baseado em ZEE (2008).

III. 5 – Monitoramento hidrológico na bacia

Atualmente, a bacia do rio Macaé conta com uma rede de monitoramento pluviométrico que inclui 12 estações de diversas entidades. Destas, duas, de responsabilidade da ANA, ainda não possuem monitoramento telemétrico: Fazenda São João e Fazenda Oratório. Próximo à foz do rio Macaé encontra-se a estação automática, de responsabilidade do INMET, denominada Macaé e, distribuídas ao longo da bacia, estão outras oito estações que compõe o Sistema de Alerta de Cheias do INEA, além da estação Jusante BR-101 (Severina) de responsabilidade da UTE Norte Fluminense.

As estações que compõe o Sistema de Alerta de Cheias do INEA são equipadas com sensor telemétrico que fornece os dados em intervalos de 15 minutos. Das oito, cinco estações - Barra do Sana, Fazenda Airis, Ponte do Baião, São Pedro e Galdinópolis - foram implantadas pela Hicon Engenharia no contexto do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento mantido pela UTENF na bacia do rio Macaé (ECOLOGUS, HICON, UTENF, 2011). As estações Piller, Macaé de Cima e Glicério tiveram os sistemas telemétricos instalados em 2012, num segundo projeto P&D, também mantido pela UTENF e realizado pelas empresas Hicon Engenharia e Ecologus (ECOLOGUS, HICON, UTENF, 2013).

A Tabela 9 abaixo apresenta as estações com dados disponíveis, suas respectivas datas de início de operação e a altitude de referência.

Tabela 9: Estações pluviométricas ativas na bacia do rio Macaé

ESTAÇÃO	OBSERVAÇÃO		
	INSTALAÇÃO	TELEMETRIA	ALTITUDE (m)
BARRA DO SANA	jan/2010	jan/2010	200
FAZENDA AIRIS	jan/2010	jan/2010	20
FAZENDA ORATÓRIO	jun/1967	-	50
FAZENDA SÃO JOÃO	mai/1967	-	1010
GALDINÓPOLIS	ago/1950	jan/2010	740
GLICÉRIO	-	fev/2012	-
JUSANTE BR-101 (SEVERINA)	out/2002	out/2008	10
MACAÉ	jan/1961	set/2006	24
PILLER	ago/1950	abr/2012	670
PONTE BAIÃO	jan/2010	jan/2010	30
SÃO PEDRO MONTANTE BR101	jan/2010	jan/2010	12
MACAÉ DE CIMA	-	abr/2012	870

A Figura 7 abaixo localiza as estações supracitadas ao longo da bacia do rio Macaé. Na imagem, a estação na cor verde-claro é a de responsabilidade do INMET, a vermelha é de responsabilidade da UTENF, as de cor verde-escuro são de responsabilidade da ANA e, por último, as azuis são de responsabilidade do INEA.

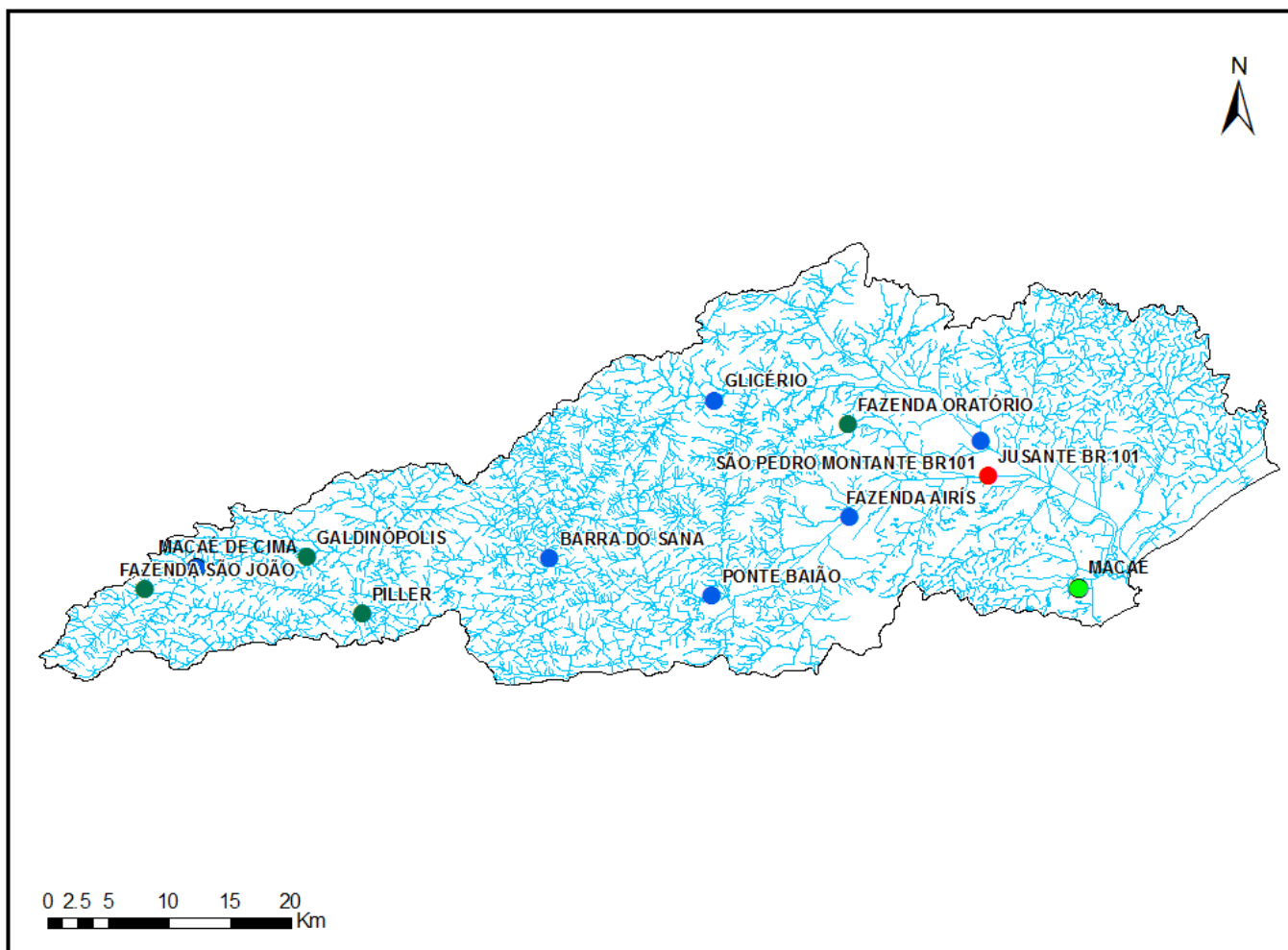


Figura 7: Mapa de estações pluviométricas ativas na bacia do rio Macaé

Quanto ao monitoramento fluviométrico, atualmente a bacia do rio Macaé conta com uma rede de monitoramento em operação com 10 estações fluviométricas, que inclui a estação Jusante BR-101 (Severina), de responsabilidade da UTENF; as estações Galdinópolis, Piller e Macaé de Cima, de responsabilidade da ANA; e seis estações instaladas entre 2010 e 2012, para compor o Sistema de Alerta de Cheias do INEA na bacia. Assim como as estações pluviométricas, as estações fluviométricas também foram implantadas ou foram equipadas com sensor telemétrico pela Hicon Engenharia no contexto do projeto P&D mantido pela UTENF na bacia.

A Tabela 10 abaixo apresenta as estações com dados disponíveis até hoje e suas respectivas datas de início de operação.

Tabela 10: Estações fluviométricas ativas na bacia do rio Macaé

ESTAÇÃO	RIO MONITORADO	INÍCIO DA OBSERVAÇÃO	
		INSTALAÇÃO	TELEMETRIA
BARRA DO SANA	Rio Sana	jan/2010	jan/2010
FAZENDA AIRIS	Rio Macaé	jan/2010	jan/2010
GALDINÓPOLIS	Rio Macaé	ago/1950	jan/2010
GLICÉRIO	Rio São Pedro	fev/2012	fev/2012
JUSANTE BR-101 (SEVERINA)	Rio Macaé	out/2002	out/2008
MACAÉ DE CIMA	Rio Macaé	jan/1961	abr/2012
PILLER	Rio Bonito	ago/1950	abr/2012
PONTE BAIÃO	Rio Macaé	jan/2010	jan/2010
SÃO PEDRO MONTANTE BR-101	Rio São Pedro	jan/2010	jan/2010
SÃO ROMÃO	Rio Macaé	jan/2010	jan/2010

Todas as estações tem equipamento de telemetria com transmissão de nível d'água a cada 15 minutos, instalados no âmbito do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento que a UTENF realiza na bacia, através da empresa Hicon Engenharia. Além disso, estão sendo realizadas medições de descargas líquida e sólida em oito dessas estações, com exceção apenas de Macaé de Cima. A UTENF realiza medições frequentes de descarga líquida e sólida na estação Jusante BR-101 (Severina) desde sua instalação, possuindo um total superior a 400 medições nesta estação. A Figura 8 abaixo ilustra a bacia do rio Macaé com as estações fluviométricas supracitadas.

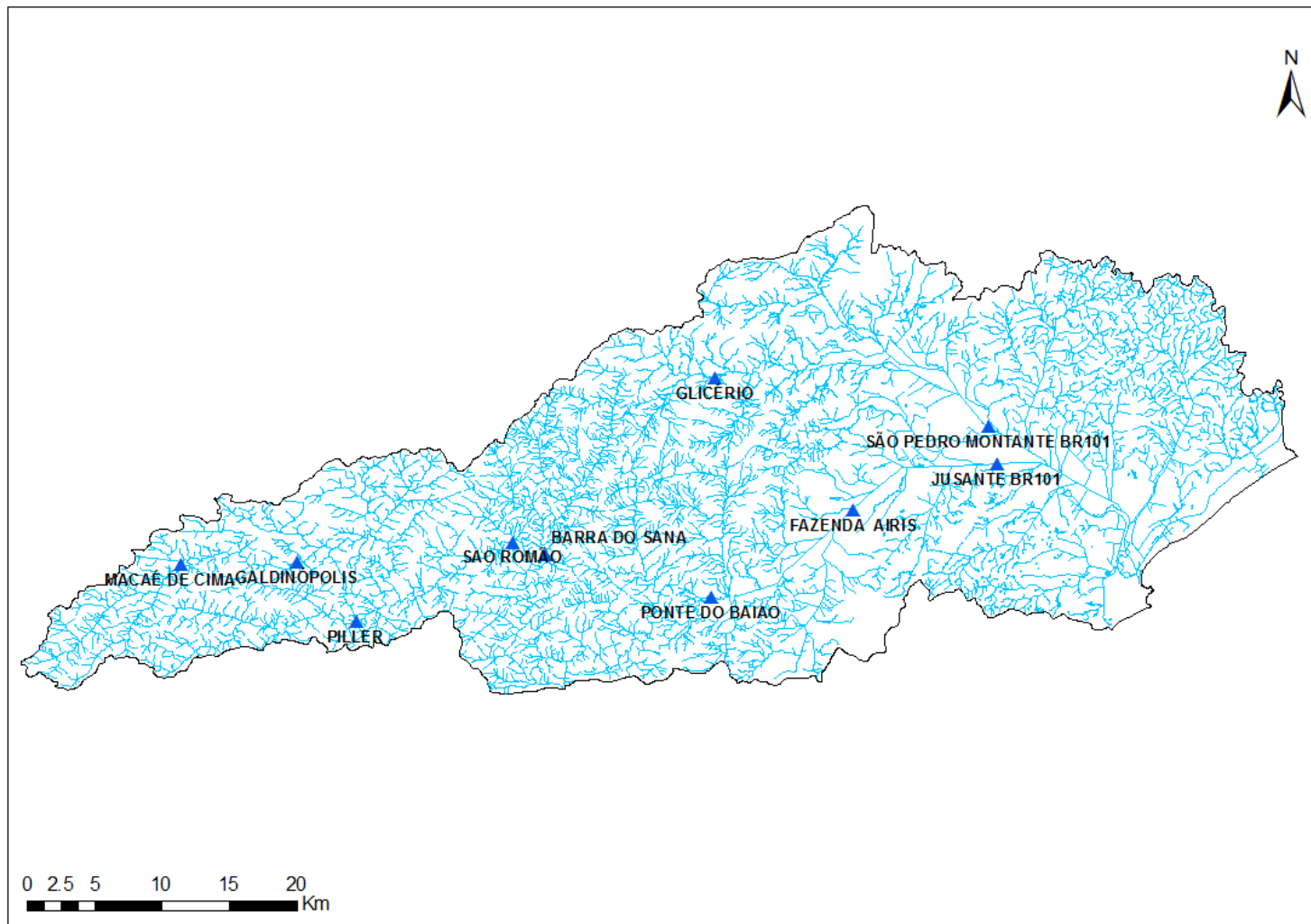


Figura 8: Mapa de estações fluviométricas telemétricas na bacia do rio Macaé

Para maior detalhamento da caracterização da bacia a partir das suas estações fluviométricas, são apresentados os índices fluviomorfológicos de cada uma, além da foz do rio Macaé, de modo a abranger a bacia como um todo.

Os índices fluviomorfológicos são relações numéricas obtidas a partir de dimensões características da bacia hidrográfica com a finalidade de permitir comparações com outras bacias. Estes índices são particularmente úteis quando a bacia em estudo não dispõe de observações hidrológicas, pois permitem avaliar a qualidade dos resultados obtidos nas avaliações hidrológicas feitas por métodos indiretos (correlações, modelos chuva-deflúvio e outros). Admite-se que bacias que possuem índices fluviomorfológicos semelhantes apresentam comportamento hidrológico similar, principalmente diante de precipitações intensas.

A Tabela 11, a seguir, apresenta os resultados obtidos para os índices fluviomorfológicos na bacia do rio Macaé para as diversas estações fluviométricas com dados disponíveis. Foram incluídas na tabela também as informações relativas à bacia como um todo, caracterizada pela foz do rio como ponto de exutório.

Tabela 11: Índices fluviomorfológicos das estações fluviométricas do rio Macaé

Curso d'Água	Rio Macaé							Rio Bonito	Rio Sana	Rio São Pedro	
	Macaé de Cima	Galdinópolis	São Romão	Ponte do Baião	Fazenda Airis	Jusante BR101	Foz	Piller	Barra do Sana	Glicério	São Pedro
Área de Drenagem (km ²)	59,3	101,0	337,8	655,3	854,8	952,0	1765,0	69,8	108,0	49,9	309,4
Comprimento do Rio Principal (km)	16,8	28,0	54,7	91,2	110,4	125,7	147,5	20,6	21,6	11,8	44,9
Perímetro da Bacia (km)	60,0	82,0	112,0	166,0	198,0	212,0	289,0	67,0	51,0	39,6	103,0
Desnível do Rio Principal (m)	691,0	823,0	1351,0	1545,0	1550,0	1554,0	1560,0	442,0	1136,0	1025,9	1251,0
Fator de Forma	0,21	0,13	0,11	0,08	0,07	0,06	0,08	0,16	0,23	0,36	0,15
Índice de Compacidade	2,20	2,30	1,70	1,80	1,90	1,90	1,92	2,30	1,40	1,57	1,60
Declividade Média do Rio Principal (m/km)	41,2	29,4	24,7	16,9	14,0	12,4	10,6	21,5	52,7	87,3	27,9
Tempo de Concentração (h)	5,1	8,6	16,4	28,4	32,9	36,6	44,7	6,3	6,3	3,3	11,2

III. 6 – Estudos Anteriores de Vazões Máximas na bacia do rio Macaé

Foram identificados, através de pesquisa bibliográfica, três estudos anteriores de vazões máximas na bacia do rio Macaé, que serão descritos a seguir e servirão como base de comparação para os resultados obtidos neste trabalho.

O primeiro estudo, realizado pela CPRM (2002), é de regionalização de vazões na sub-bacia 59, que abrange, dentre outras, a bacia hidrográfica do rio Macaé. O estudo analisa não somente vazões máximas por ano hidrológico, mas também vazões médias e mínimas.

Para a elaboração da equação de regionalização de vazões máximas, o estudo analisou a série de vazões de 12 estações fluviométricas com dados disponíveis no sistema *Hidroweb*, da ANA, a saber:

- 59120000 - Macaé de Cima
- 59125000 - Galdinópolis
- 59135000 - Piller
- 59180000 - Correntezas
- 59235000 - Cachoeiras de Macacu
- 59240000 - Parque Ribeira
- 59245000 - Quizanga
- 59245100 - Orindi
- 59355000 - Faz. Garrafas
- 59360000 - Faz. da Posse
- 53700000 - Faz. Fortaleza
- 59380000 - Parati

Os dados das estações Macaé de Cima, Correntezas, Quizanga e Orindi foram considerados não confiáveis e, portanto, excluídos do procedimento de regionalização das vazões máximas. No entanto, considerou-se no estudo que, como as sub-bacias destas estações fazem parte da região homogênea identificada, a equação de regionalização de vazões é válida também para estas estações.

A partir das séries de vazões diárias das estações remanescentes, então, foram elaboradas séries de vazões máximas por ano hidrológico. E a partir destas, para cada ano foi feita uma adimensionalização da vazão máxima pela vazão média de cheia (Q/Q_{MC}) e essas foram associadas à variável reduzida y , sendo:

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

Com P dado pelo cálculo da posição de plotagem de Blom:

$$P[X \leq x] = (m - 3/8)/(n - 1/4)$$

Sendo m o número de ordem de Q/Q_{MC} e n o número total de anos de dados.

Dadas as estações analisadas, identificou-se uma tendência para as curvas adimensionais das distribuições empíricas, sintetizada na Tabela 12 abaixo.

Tabela 12: Distribuição de frequência de vazões de cheia (CPRM, 2002)

TR (anos)	y	(Q/Q _{MC})
1,01	-1,5293	0,2886
1,5	-0,0940	0,7481
2	0,3665	0,9119
3	0,9027	1,1125
4	1,2459	1,2466
5	1,4999	1,3487
7	1,8698	1,5017
8	2,0134	1,5624
10	2,2504	1,6644
15	2,6738	1,8517
25	3,1985	2,0933
40	3,6762	2,3222
50	3,9019	2,4332
75	4,3108	2,6393
100	4,6001	2,7890

O modelo sugerido para regionalização de vazões máximas na região é:

$$Q_{MC} = 0,3865 A^{1,0259}$$

Onde Q_{MC} é a vazão média de cheia (em m³/s) e A é a área de drenagem da seção em análise (em km²).

Ou seja, para o cálculo da vazão máxima em uma seção fluvial com uma dada área de drenagem e um determinado tempo de recorrência, calcula-se primeiramente a vazão média de cheia (Q_{MC}) para aquela área, e então multiplica-se o coeficiente equivalente do tempo de recorrência, apresentado na Tabela 12 acima.

O estudo apresenta algumas restrições para a utilização do modelo, a saber:

- A equação deve ser utilizada para áreas entre 22 e 597 km², equivalentes às áreas de drenagem mínima e máxima das estações Faz. Garrafas e Faz. Fortaleza, respectivamente;

- Não deve ser utilizada para as bacias do rio Macabu e do rio Guandu devido à transposição de vazões existentes nestas duas bacias, que alteram significativamente o regime hidrológico destas bacias hidrográficas;
- Para as sub-bacias das estações Orindi, Quizanga, Macaé de Cima e São João o modelo deve ser utilizado com cautela, vide que estas estações não entraram na modelagem devido a suspeita de inconsistências das séries fluviométricas.

De maneira geral, para as demais bacias estudadas, as estimativas com regionalização de vazões máximas deverão ser utilizadas com restrições e de forma criteriosa, nunca para finalidades que requeiram precisão (CPRM, 2002).

O segundo estudo identificado, realizado pela FGV (2004) em convênio com a SEMADUR, a SERLA e a UTE Norte Fluminense, é o Plano Preliminar de Recursos Hídricos da bacia do rio Macaé. Neste contexto, o estudo aborda não só as vazões extremas, mas também, e principalmente, as vazões mínimas, disponibilidade hídrica, demandas hídricas, vazões outorgadas e outros aspectos relevantes à gestão de recursos hídricos em uma bacia hidrográfica.

Especificamente sobre as vazões máximas, o estudo da FGV (2004) realizou o cálculo para diversos pontos de interesse na bacia do rio Macaé a partir do método do Hidrograma Unitário Triangular. Foram calculadas vazões de referência para os locais: Foz do rio Jurumirim, Foz do rio São Pedro, Rio Macaé (BR-101, Montante do rio São Pedro, Jusante do Rio São Pedro, Montante do rio Jurumirim, Foz e no local de uma barragem proposta no estudo). A Tabela 13 abaixo resume os resultados encontrados.

Tabela 13: Vazões máximas calculadas por FGV (2004)

Rio	Local	Vazão máxima de projeto ($m^3.s^{-1}$)				
		2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos
Jurumirim	Foz	26	40	48	57	ND
São Pedro	Foz	107	160	195	229	ND
Macaé	BR 101	196	293	357	418	ND
Macaé	Montante do rio São Pedro	199	298	363	426	ND
Macaé	Jusante do rio São Pedro	271	406	495	580	ND
Macaé	Montante Jurumirim	284	425	519	608	ND
Macaé	Foz	309	462	563	661	ND
Macaé	Local da barragem proposta	ND	ND	ND	297	397

Não foi possível identificar quais estações de chuvas intensas foram utilizadas como referência para cada local, tampouco qual mapa de *CN* foi utilizado para caracterização do complexo solo-cobertura, fundamentais para aplicação do método do Hidrograma Unitário Triangular.

O estudo indica medidas estruturais para controle de cheias na cidade de Macaé, a saber: dragagem do leito do rio próximo à foz, construção de diques em torno de áreas baixas habitadas e construção de uma barragem no rio Macaé a montante da confluência do rio São Pedro, formando um reservatório de controle de cheias.

O terceiro estudo identificado, e o mais consolidado, é o Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé-Ostras. Em seu Apêndice do Estudo de Disponibilidade Hídrica publicado recentemente (INEA, 2013) também é realizado um estudo de recorrência de vazões máximas para toda a bacia do rio Macaé.

O Plano faz uso da modelagem hidrológica MGB-IPH para determinar vazões em todos os trechos da hidrografia da bacia a partir da interpolação de chuvas das estações pluviométricas de responsabilidade da ANA localizadas no interior e no entorno da bacia do rio Macaé. Foi utilizada para calibração e validação do modelo a estação fluviométrica Galdinópolis, situada na cabeceira do rio Macaé pouco a montante da confluência do rio Bonito, por possuir a série mais longa de dados diários consistidos (período compreendido entre os anos 1950 e 2011).

Determinada a série de vazões diárias simuladas em pontos estratégicos da bacia, geraram-se as séries de vazões máximas anuais. Após determinação destas séries, realizou-se um ajuste estatístico da distribuição de frequências de vazões máximas pela distribuição de Gumbel e calcularam-se as vazões máximas de referência para os pontos de interesse na bacia.

A utilização de modelagem hidrológica pode ser bastante útil para determinação de séries em locais com ausência ou baixa disponibilidade de dados fluviométricos (CAMERON *et al*, 1999), porém algumas considerações podem ser feitas ao estudo de vazões máximas apresentado no Plano, realizado pelo próprio idealizador do modelo, e são pontuadas a seguir:

- O modelo MGB-IPH é um modelo hidrológico distribuído aplicável a grandes bacias, com área de drenagem superior a 10.000 km² (COLLISCHONN, 2001) e foi aplicado a uma bacia de 1.765 km² - sem contar as sub-bacias que possuem áreas de contribuição ainda inferiores a 1.000 km²;
- A calibração do modelo foi realizada baseando-se na estação fluviométrica Galdinópolis, que possui área de drenagem de apenas 101 km² com características diferentes do médio e baixo curso do rio Macaé. Da nascente a estação de Galdinópolis, o fundo do rio Macaé é predominantemente rochoso, com calhas notadamente bem encaixadas e declividades da ordem de 10 m.km⁻¹, enquanto o baixo curso é uma grande área de planície com canais secundários, fundo predominantemente arenoso e declividade inferior a 1 m.km⁻¹ (INEA, 2013);
- Ainda, a calibração do modelo foi feita privilegiando-se as vazões mínimas (INEA, 2013) - mais relevantes para estudo de disponibilidade hídrica - de modo que as estimativas de picos de vazões máximas podem estar sujeitas a maiores desvios;
- Por fim, o modelo MGB-IPH realiza os cálculos com passo de tempo diário e, como visto, o tempo de concentração para a grande maioria das estações da bacia do rio Macaé é inferior a um dia. Portanto, para determinação das vazões extremas, as vazões apresentadas no Plano devem ainda ser convertidas da escala diária para valores instantâneos.

Apesar das considerações realizadas, as vazões máximas de referências definidas no Plano podem ser consideradas como as mais consistentes e serão também utilizadas como base de comparação para este trabalho.

Por último, além dos três estudos acima apresentados, considerou-se importante destacar a dissertação de Amaral (2003), que apresenta uma modelagem bidimensional do estuário do rio Macaé até a montante da confluência do rio São Pedro, este incluído também no estudo. O trabalho de Amaral tem como objetivo avaliar a influência da oscilação de maré no nível d'água no rio Macaé, especialmente no núcleo urbano da cidade, situado próximo à foz do rio.

Observou-se, no estudo, que a montante da confluência com o rio São Pedro todos os cenários estudados (estiagem e cheias) não apresentaram inversão de corrente. Isto é, o escoamento permaneceu estritamente fluvial. Entretanto, para a porção mais baixa do curso fluvial, próximo à foz e no interior do núcleo urbano, a variação de maré pode causar flutuações de até 1,5 m nos níveis d'água, comprovando então a importância não somente dos eventos de cheias, mas também das marés no gerenciamento das enchentes que porventura assolam a cidade de Macaé.

O trabalho de Amaral (2003) reforça o fato de que a gestão de recursos hídricos em áreas costeiras deve abraçar não somente os fenômenos precipitação, evapotranspiração e vazão, mas também o estudo e o monitoramento hidrossedimentológico da costa.

CAPÍTULO IV – MATERIAIS E MÉTODOS

IV. 1 – Dados Hidrológicos

Neste item serão apresentados os dados hidrológicos necessários para os cálculos das vazões máximas de referência para as estações fluviométricas distribuídas na bacia do rio Macaé. O item IV.1.1 descreverá os dados fluviométricos (leituras de régua e vazão) dos postos antigos da ANA com dados disponíveis no sistema Hidroweb, enquanto o item IV.1.2 descreverá os dados pluviométricos, referentes às estações com Equações de Chuvas Intensas definidas, utilizadas na aplicação do Método do Hidrograma Unitário Triangular.

IV. 1.1 – Dados Fluviométricos

Conforme apontado no item III. 5, a bacia do rio Macaé é monitorada atualmente por 10 estações fluviométricas, que inclui a estação Jusante BR-101 (Severina), de responsabilidade da UTENF; as estações Galdinópolis, Piller e Macaé de Cima, de responsabilidade da ANA; e seis estações instaladas entre 2010 e 2012, para compor o Sistema de Alerta de Cheias do INEA na bacia a partir dos projetos P&D mantidos na bacia pela UTENF.

Para as estações com longa série de dados diários de leitura de régua - estações de responsabilidade da ANA - serão calculadas vazões de referência por ajuste de distribuição estatística através da série de vazões máximas anuais. Para elaboração destas séries, foi preciso realizar a conversão dos dados diários de Leitura de Régua em Descarga Líquida. Esta transformação foi realizada pelas curvas-chave definidas através das medições de descarga líquida disponíveis no Hidroweb. Nas estações Galdinópolis e Piller foram também utilizadas medições de descarga fornecidas pela UTENF no Relatório de Monitoramento do atual Projeto P&D denominado Sistema para Previsão de Vazões e Elaboração de Prognósticos sobre Disponibilidade Hídrica e Assoreamento na Bacia do Rio Macaé (ECOLOGUS, HICON, UTENF, 2013).

As curvas-chave - com extrapolação para vazões máximas - das estações Macaé de Cima, Galdinópolis e Piller são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 9, 10 e 11 a seguir.

CURVA CHAVE EM MACAÉ DE CIMA - RIO MACAÉ DE CIMA - 59120000

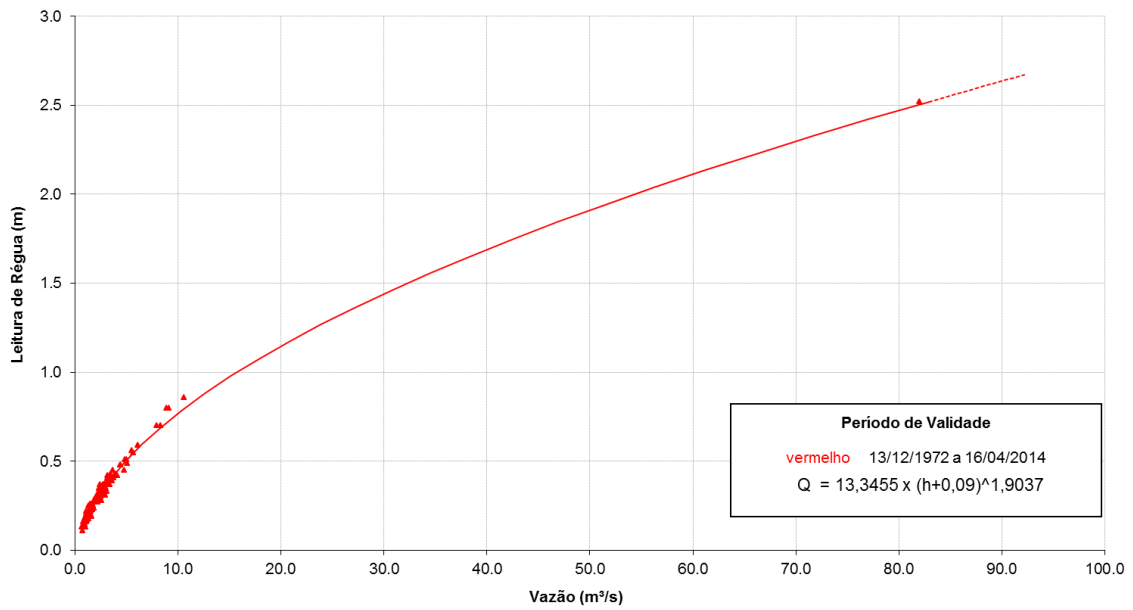


Figura 9: Curva-chave em Macaé de Cima

Curva-chave do Rio Macaé em Galdinópolis

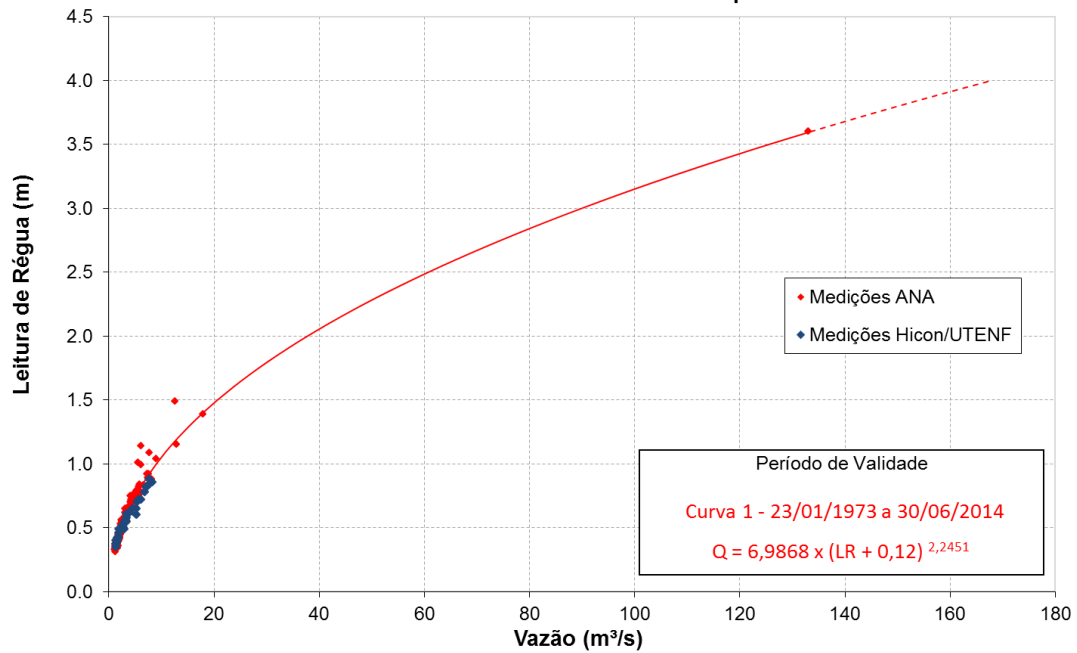


Figura 10: Curva-chave em Galdinópolis

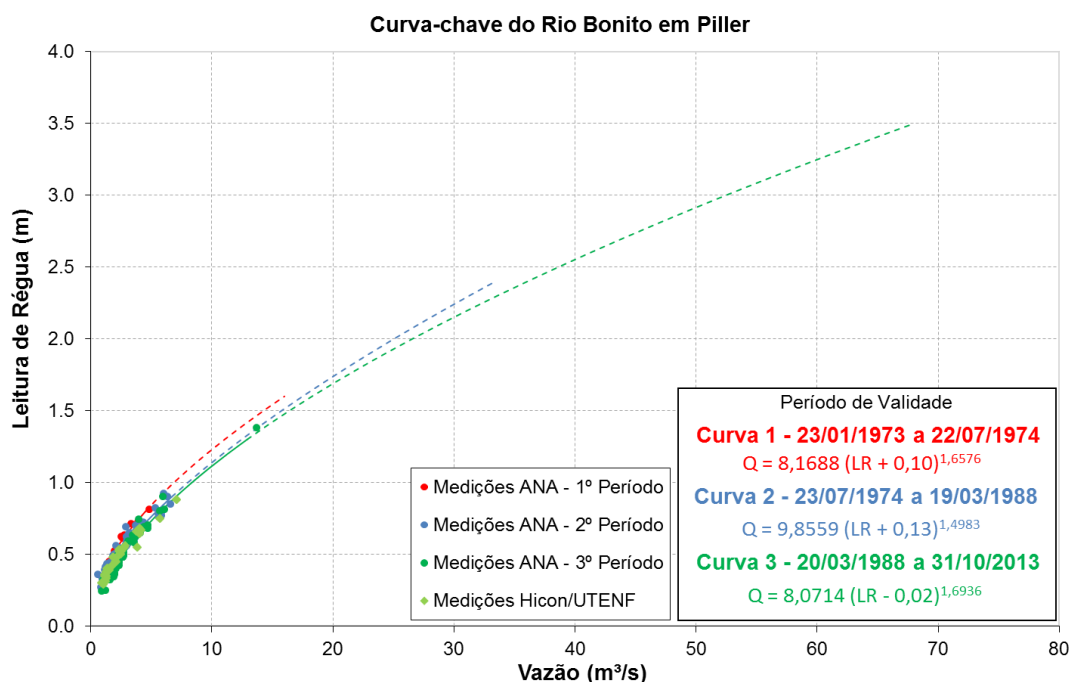


Figura 11: Curva-chave em Piller

Através das curvas-chave apresentadas foi possível elaborar, para estas três estações, séries de vazões médias diárias. Para o período anterior ao início de validade das curvas-chave elaboradas, optou-se por utilizar as vazões diárias diretamente disponíveis no Hidroweb, quando estas constavam como consistidas. As séries de vazões diárias, então, foram convertidas em séries de vazões máximas mensais, cujos valores são apresentados nas Tabelas 14, 15 e 16, abaixo.

Tabela 14: Vazões Máximas Mensais em Macaé de Cima

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1967						5,2	13,8	3,3	2,4	2,5	5,5	46,9
1968	11,2	36,0	27,2	7,4	4,8	3,2	3,6	5,3	5,5	2,7	14,1	11,7
1969	14,5	9,0	16,9	8,6	2,6	4,4	2,2	5,5	1,5	3,8	17,3	13,0
1970	45,7	2,7	4,2	2,2	1,4	1,4	3,1	1,7	3,1	3,4	7,3	8,5
1971									5,2	5,5	15,0	22,5
1972	7,8	12,0	18,9	7,0	2,9	2,9	2,8	3,0	9,1	5,4	4,9	9,1
1973	8,2	25,7	6,8	6,3	6,0	2,0	5,0	1,5	3,3	10,7	13,8	9,5
1974	16,7	5,2	44,6	7,3	2,8	2,0	1,4	1,5	2,1	8,2	2,9	4,9
1975	26,6	14,2	4,5	7,5	12,9	2,4	2,3	1,1	2,1	7,8	5,3	20,8
1976	9,9	28,4	7,3	3,0	2,2	2,1	2,8	8,4	5,9	11,0	18,9	15,0
1977	14,0	5,7	2,1	13,8	3,4	1,6	1,7	1,4	1,2	3,4	26,6	32,7
1978	25,1	23,1	9,9	4,7	5,3	2,1	2,2	3,8	1,9	4,2	19,4	41,9
1979	18,6	20,8	23,4	7,5	3,7	2,3	13,1	5,2	4,1	3,2	13,1	12,2
1980	17,2	6,3	3,4	4,9	2,1	1,2	4,1	6,3	4,3	17,2	12,2	36,8

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1981	49,8	26,3	13,1	40,4	3,4	1,9	5,4	1,9	1,0	6,5	3,9	37,9
1982	11,8	40,1	11,8	31,0	3,7	2,1	4,1	14,2	4,2	6,3	12,9	12,0
1983	18,9	16,2	10,1	6,0	11,0	5,0	2,4	2,3	6,2	6,5	12,0	9,5
1984	5,3	3,2	13,1	9,7	4,5	1,9	3,3	7,8	1,7	1,4	8,4	16,0
1985	22,5	10,5	41,2	7,0	6,3	2,5	1,5	3,3	3,4	2,2	9,9	4,2
1986	9,0	4,9	6,0	12,9	2,8	1,7	2,2	1,5	3,2	2,0	3,2	11,6
1987	7,3	18,6	5,0	3,3	3,0	4,1	1,9	1,7	1,6	2,2	6,2	6,5
1988	2,9	35,7	3,6	4,1	6,2	2,5	1,6	1,7	1,1	2,4	9,6	5,5
1989	22,8	5,6	12,4	8,5	5,2	3,0	6,2	1,4	2,9	1,6	5,4	16,5
1990	3,6	2,4	12,1	39,3	7,1	1,7	2,3	1,3	9,8	1,5	4,1	21,5
1991	28,1	45,9			6,9	2,5	2,2	2,0	2,0	5,9	2,1	5,4
1992	10,8	3,2	2,2	3,0	1,6	0,9	1,7	0,9	15,7	4,6	15,9	30,9
1993	7,1	4,5	8,0	3,7	3,2	3,4	1,6	1,7	4,6	1,7	2,3	9,6
1994	6,5	4,1	9,6	11,4	6,2	2,5	2,7	1,9	1,6	4,8	9,0	7,1
1995	5,2	8,3	4,3	2,6	4,2	3,8	1,9	2,0	10,2	5,7	4,5	4,6
1996	6,2	4,6	8,6	7,0	4,3	2,7	2,2	2,4	4,3	2,1	11,8	11,4
1997	12,1	8,3	7,2	2,6	5,5	3,2	1,4	4,0	1,7	3,8	5,1	6,3
1998	11,6	10,8	7,4	10,6	5,7	2,5	2,5	2,9	4,9	6,3	21,5	12,3
1999	15,9	7,5	9,8	6,8	2,9	3,8	1,6	2,7	2,7	5,1	6,0	12,3
2000	14,7	7,9	26,3	20,2	2,7	1,8	2,9	4,8	11,4	3,4	7,7	18,5
2001	8,7	6,2	5,8	4,6	3,6	1,5	1,3	1,0	2,4	1,2	2,8	11,8
2002	6,5	14,2	5,2	2,9	3,7	1,6	1,4	0,9	3,3	1,4	8,8	16,5
2003	7,4	4,5	7,4	3,0	5,5	2,2	1,6	2,9	2,2	3,8	7,9	19,5
2004	32,6	11,1	4,1	10,0	2,7	2,9	3,0	2,7	1,2	3,2	37,0	17,1
2005	20,4	17,0	18,2	7,6	5,9	4,1	5,2	1,3	5,1	1,4	12,3	28,5
2006	3,8	4,6	5,5	19,7	5,1	2,3	2,4	2,2	2,6	2,6	18,1	15,5
2007	27,1	8,2	3,2	6,5	6,5	3,4	4,4	1,0	1,0	2,5	5,2	18,6
2008	20,8	11,5	12,3	7,9	4,3	3,4	1,3	1,3	1,8	4,4	13,7	13,0
2009	72,4	12,2	5,7	10,4	5,7	3,1	1,8	5,4	2,7	19,6		30,2
2010	6,5	10,0	38,8	11,5	3,2	5,1	6,6	1,5	1,8	5,4	14,1	7,0
2011	5,6	4,7	9,5	10,0	7,8	2,6	2,0	1,5	1,5	3,4	8,3	8,3
2012	21,5	7,4	4,4	4,2	4,0	3,5	3,2	1,5	7,9	2,1	6,6	2,7
2013	7,2	7,6	57,6	11,1	8,6	2,9	4,6	2,6	3,0	2,1	4,4	11,9
2014	2,8	3,9	3,2	9,1	5,7	3,8						

Tabela 15: Vazões Máximas Mensais em Galdinópolis

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1950									3,0	4,8	8,0	12,5
1951	12,2	17,5	41,7	16,4	6,0	6,0	4,8	2,7	1,7	2,4	4,2	21,4
1952	20,0	104,0	28,5	29,3	6,7	5,5	6,9	10,5	8,0	5,4	52,5	26,5
1953	9,0	14,5	6,1	8,6	6,3	3,4	3,2	3,7	5,1	3,4	30,5	20,6
1954	5,2	3,1	9,1	9,7	7,2	4,5	8,8	11,2	3,3	2,3	2,7	17,8
1955	61,0	4,9	13,2	8,4	3,8	5,8	1,9	1,6	3,0	2,5	32,9	21,7
1956	18,9	5,4	15,9	7,2	9,3	3,7	4,5	6,9	2,7	4,2	18,0	24,3
1957	16,1	12,2	30,5	64,0	10,3	6,1	4,2	2,1	5,1	4,0	19,4	48,1
1958	10,9	9,0	28,1	13,7	14,8	5,4	3,7	2,4	4,9	10,1	49,7	28,5
1959	18,0	8,2	14,8	8,4	6,9	7,4	2,5	13,7	2,0	4,5	6,7	9,0
1960	13,0	19,2	23,2	9,5	4,8	3,2	14,0	39,3	4,1	11,6	25,4	36,1
1961	36,9	42,5	22,2	15,9	12,0	4,3	8,0	2,7	1,9	1,7	5,1	10,7

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1962	23,2	42,5	15,0	17,5	7,1	3,2	3,6	2,2	3,6	10,9	11,2	21,4
1963	17,2	28,1	7,4	6,1	3,3	3,8	2,0	1,7	1,5	2,5	6,5	5,0
1964	13,7	41,2	19,1	12,7	6,4	4,1	9,6	2,7	3,6	4,7	28,4	36,8
1965	30,8	29,6	10,4	15,2	7,8	4,4	3,9	4,0	2,8	7,6	8,4	14,2
1966	69,0	6,7	59,0	41,2	10,4	3,5	4,3	3,6	3,6	7,0	12,0	20,3
1967	54,0	40,4	32,8	11,2	6,0	5,1	28,8	2,6	2,7	2,6	5,6	45,6
1968	41,6	52,5	32,8	18,0	6,5	6,5	3,9	8,4	7,4	3,1	14,2	12,2
1969	21,5	13,2	26,2	11,5	5,1	5,1	6,0	4,7	1,7	6,5	12,5	20,9
1970	53,5	5,3	5,6	4,1	2,9	2,6	4,6	3,1	3,5	5,0	9,8	8,4
1971	5,7	54,0	32,0					5,3	9,8	8,6	28,0	46,0
1972	8,3	13,6	25,3	8,2	3,8	3,5	2,8	2,6	7,5	7,7	6,0	11,5
1973	14,9	26,9	10,2	8,7	14,7	3,4	4,2	2,7	3,3	9,3	28,2	15,6
1974	19,9	4,9	11,5	14,9	3,8	4,4	2,3	2,7	2,6	6,8	4,0	8,5
1975	19,4	6,5	10,0	7,8	9,1	3,9	3,3	1,9	2,8	7,3	5,4	13,1
1976	6,1	8,3	9,3	3,8	4,8	2,3	3,2	6,4	4,6	7,8	7,5	23,3
1977	35,3	6,2	4,4	31,3	4,6	2,6	3,1	2,3	3,0	3,8	23,6	29,2
1978	64,8	15,2	8,0	12,6	6,5	4,5	2,6	3,4	1,8	2,8	11,3	7,7
1979	43,7	44,6	20,5	15,6	6,0	3,8	6,4	3,8	4,5	4,0	15,9	25,0
1980	33,1	23,0	4,9	8,9	3,2	3,0	2,1	3,9	4,9	20,2	18,2	26,6
1981	34,9	23,6	24,4	56,8	6,8	4,9	6,4	2,4	2,0	3,0	5,8	45,1
1982	26,3	22,4	21,0	23,6	7,5	4,6	5,4	20,5	6,4	12,9	9,5	12,9
1983	25,6	8,2	14,5	7,2	7,5	19,2	3,9	2,8	9,1	6,8	10,0	15,9
1984	18,7	10,4	12,2	15,2	5,3	2,8	4,2	4,7	2,1	4,9	11,5	9,5
1985	26,9	17,0	17,5	15,9	8,7	4,4	2,7	4,6	3,1	3,0	13,1	11,7
1986	30,2	18,9	10,2	12,4	3,8	3,2	4,8	2,2	4,7	2,3	7,8	11,7
1987	22,7	16,3	10,2	7,5	4,7	3,8	2,6	2,1	2,3	2,0	4,4	15,9
1988	5,7	24,7	6,0	8,9	5,3	5,3	5,4	2,8	2,2	6,8	10,9	8,7
1989	18,9	6,4	12,4	15,9	6,7	9,8	6,2	2,6	3,4	3,6	5,3	27,2
1990	6,5	4,4	9,3	32,7	7,2	3,2	3,8	4,1	5,4	3,8	10,9	5,4
1991	50,8	50,3	12,6	20,2	6,8	4,9	2,7	2,1	7,2	9,3	3,8	9,6
1992	20,2	5,7	3,8	8,0	3,5	1,9	3,0	1,8	5,5	11,3	11,5	43,7
1993	6,8	4,4	7,3	5,0	3,3	2,8	2,2	1,8	5,4	8,2	2,6	6,2
1994	33,8	5,4	33,5	42,0	7,0	3,7	2,7	2,1	2,1	3,7	6,0	49,9
1995	6,8	8,9	4,1	3,3	6,2	2,3	2,2	2,3	5,7	6,4	7,8	8,7
1996	7,7	6,2	9,3	7,5	3,4	3,4	2,2	2,8	8,7	2,9	36,4	14,9
1997	24,7	8,0	9,1	5,7	4,4	3,5	2,2	4,9	1,9	4,1	9,3	15,9
1998	19,9	22,1	6,4	11,3	5,7	3,1	2,6	2,3	2,5	5,3	13,3	13,1
1999	12,6	6,1	14,2	9,5	3,9	5,4	2,6	4,1	2,1	3,4	6,7	9,3
2000	29,6	7,5	44,6	15,7	3,6	2,4	3,0	12,1	12,4	5,0	15,8	26,4
2001	25,9	7,8	6,1	5,6	4,9	2,5	3,5	1,7	3,0	2,8	3,8	13,3
2002	8,5	18,0	15,4	4,2	6,2	2,8	2,5	1,9	5,7	4,8	14,0	35,0
2003	16,8	7,2	16,0	5,9	4,8	3,8	3,1	5,4	3,8	5,3	16,5	44,4
2004	37,3	25,9	6,7	9,4	5,0	4,8	6,6	4,6	2,4	5,2	35,0	28,7
2005	24,0	33,9	38,5	8,8	7,7	5,7	5,2	2,4	4,8	3,1	22,3	21,9
2006	7,8	8,8	12,4	27,9	5,6	3,9	2,6	3,5	2,7	4,6	24,1	28,7
2007	41,7	16,5	6,3	15,5	5,6	4,4	3,8	2,2	1,7	3,5	7,4	25,6
2008	25,9	22,8	21,6	13,3	7,4	5,0	2,5	2,6	3,4	6,3	8,5	17,1
2009	73,6	22,0	11,6	14,9	10,3	4,2	3,3	3,0	4,4	11,8	22,9	44,0
2010	8,4	19,1	24,7	15,9	5,7	6,9	6,8	2,8	2,1	7,5	20,0	14,9
2011	25,5	6,2	12,4	12,5	5,0	3,6	3,1	2,5	1,9	5,0	6,9	10,2
2012	29,9	18,0	7,7	6,1	9,0	3,9	3,7	2,0	6,1	2,6	11,5	2,9

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2013	19,9	9,2	57,9	10,9	8,6	3,2	2,2	2,7	3,2	2,8	5,4	12,1
2014	4,3	5,4	3,7	9,9	5,9	4,0						

Tabela 16: Vazões Máximas Mensais em Piller

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1950									2,1	5,2	8,8	7,8
1951	8,8	14,0	22,3	7,6	4,5	3,5	5,3	2,1	1,4	4,4	5,8	20,9
1952	13,0	53,0	12,3	10,1	4,5	3,0	7,9	6,4	5,8	6,8	21,5	18,6
1953	6,1	23,6	5,4	7,0	6,7	3,9	2,1	3,1	4,2	2,6	15,8	11,9
1954	4,8	2,9	4,9	4,7	7,0	4,2	7,3	12,1	4,9	5,3	3,5	7,3
1955	30,6	5,7	7,2	11,9	3,8	5,3	2,4	3,6	3,8	3,4	18,2	11,3
1956	7,0	6,0	5,4	10,2	7,0	3,7	2,3	6,9	2,0	3,0	11,0	11,3
1957	14,0	9,7	21,4	33,6	5,3	5,2	7,8	1,6	5,3	5,8	5,8	24,7
1958	6,1	13,6	12,3	14,7	6,4	9,8	3,0	3,6	3,3	4,8	16,3	25,0
1959	11,9	7,6	13,6	6,6	6,3	4,9	2,3	4,5	4,7	6,3	10,0	16,8
1960	8,1	10,4	9,8	6,6	4,1	4,5	13,6	24,2	3,2	7,9	7,8	43,5
1961	24,2	22,2	20,3	13,6	7,8	4,7	8,4	2,6	3,9	1,4	3,4	9,0
1962	30,0	26,5	27,1	10,4	5,8	4,8	4,2	2,0	4,8	8,6	7,9	14,7
1963	13,0	10,2	4,7	4,2	4,1	3,1	1,6	1,5	0,9	2,4	6,4	8,2
1964	11,9	19,9	13,6	10,8	5,1	3,4	6,9	3,7	3,7	5,9	7,8	51,4
1965	44,4	13,6	14,0	10,0	9,2	3,9	4,2	5,0	4,8	15,8	11,0	40,6
1966	22,6	4,6	53,6	15,3	5,8	3,1	5,7	5,1	7,1	6,3	21,5	27,0
1967	61,8	21,2	16,5	11,3	5,8	13,4	15,3	2,9	6,6	3,0	4,9	24,2
1968	13,4	39,0	53,4	11,7	4,8	4,1	3,2	4,7	5,7	3,7	20,0	10,4
1969	9,5	4,5	14,0	10,0	4,2	5,7	3,3	8,3	1,6	4,9	18,5	16,1
1970	25,6	4,4	3,8	3,4	2,1	2,9	9,7	2,0	3,9	7,0	14,9	7,8
1971	3,4	38,2						13,4	6,5	9,7	20,4	23,4
1972	8,5	14,6	12,3	6,5	7,1	3,5	2,3	3,5	9,9	7,2	14,4	8,5
1973	7,7	18,4	10,2	5,5	8,2	2,7	2,5	2,7	3,9	5,8	15,8	13,6
1974	12,5	4,8	6,1	6,3	3,0	2,8	1,7	1,6	2,7	4,1	5,5	11,0
1975	13,6	7,5	9,3	7,3	15,4	5,3	2,8	1,9	4,8	12,6	8,6	7,1
1976	5,3	7,2	7,2	3,9	3,9	3,2	4,8	6,4	3,6	19,0	6,1	20,8
1977	12,1	4,8	9,1	30,9	3,5	2,3	3,9	3,2	4,2	3,1	17,7	17,7
1978	17,5	22,6	4,9	9,9	5,9	2,7	2,3	3,9	1,1	2,7	10,6	8,1
1979	33,1	13,7	14,0	7,5	3,9	3,8	10,4	4,0	4,2	3,2	11,8	18,2
1980	26,8	17,7	4,0	6,5	2,6	2,0	1,8	4,8	2,3	16,1	8,2	11,2
1981	13,2	9,2	11,5	7,9	4,4	3,4	4,1	2,8	1,9	2,4	11,6	21,7
1982	12,3	10,9	16,4	8,8	4,5	3,6	2,7	14,4	9,9	6,6	4,1	6,5
1983	11,2	7,3	12,7	6,0	12,1	7,5	2,8	2,2	8,4	9,4	6,2	10,2
1984	13,4	5,1	14,5	8,8	8,1	2,4	4,9	1,8	1,4	3,3	5,6	9,5
1985	14,5	19,2	18,6	9,4	8,9	2,8	1,8	3,1	12,3	2,3	11,0	19,3
1986	14,5	7,3	8,6	7,4	3,8	2,6	6,1	2,6	4,8	3,1	6,5	19,9
1987	17,0	6,2	6,1	5,8	3,6	4,3	1,9	1,8	2,4	3,2	3,7	6,6
1988	3,7	9,9	8,9	8,2	4,3	5,4	2,3	2,1	2,8	5,8	18,2	8,5
1989	22,5	5,0	9,1	9,3	7,0	8,2	5,4	3,6	4,6	4,1	4,7	17,3
1990	3,5	5,9	6,8	19,7	8,1	3,1	4,4	6,5	7,5	8,6	10,0	4,7
1991	19,2	6,8	8,6	12,7	7,2	5,2	3,2	2,6	7,5	4,7	4,2	8,2
1992	14,7	4,5	3,0	4,8	2,7	2,9	2,5	3,5	10,6	11,8	15,9	19,2
1993	9,6	5,2	6,4	4,8	4,2	5,3	2,1	1,6	5,7	5,3	3,9	8,5
1994	17,0	5,4	17,5	23,5	6,8	10,4	2,8	2,1	5,7	5,7	6,4	7,5

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1995	6,8	7,2	3,7	3,1	7,5	4,6	2,5	2,6	10,7	7,5	6,2	10,9
1996	7,2	5,4	9,1	9,9	5,4	4,4	2,3	3,6	6,1	3,5	15,9	7,5
1997	18,8	14,2	7,4	4,8	4,8	3,1	1,8	2,3	1,8	2,7	5,2	6,3
1998	12,9	11,5	9,8	10,6	4,3	2,9	2,0	4,5	3,3	7,0	9,0	6,2
1999	8,4	5,5	7,7	8,4	4,8	3,6	3,4	2,2	6,8	4,3	10,6	11,5
2000	8,6	6,3	11,7	8,2	3,2	2,0	4,0	3,3	9,0	3,2	7,9	11,9
2001	14,0	5,6	4,1	9,2	4,4	2,3	1,8	1,3	6,2	7,7	4,2	6,1
2002	8,3	11,4	7,0	4,7	3,8	2,9	2,1	1,5	3,9	6,0	12,9	14,5
2003	10,4	5,2	7,0	4,8	5,1	2,7	2,9	8,3	5,1	6,9	12,5	37,9
2004	17,9	7,1	6,2	6,9	4,3	4,8	7,0	3,2	2,8	4,8	24,9	8,4
2005	25,8	27,4	15,0	9,5	6,7	4,3	6,3	2,1	4,7	2,9	20,4	17,7
2006	6,6	5,3	8,4	14,0	8,2	4,2	2,9	3,3	3,1	7,2	20,0	16,3
2007	10,0	9,2	4,4	6,4	4,3	3,1	3,1	1,5	2,4	1,8	7,5	14,7
2008	19,3	10,3	9,8	9,0	6,1	3,8	2,7	2,1	3,5	9,1	9,8	8,3
2009	28,5	11,8	8,0	10,9	8,9	3,8	2,6	4,7	3,6	13,3	11,9	15,4
2010	5,3	10,4	14,0	7,7	4,3	4,0	3,6	2,9	1,8	4,7	14,6	14,2
2011	7,4	4,1	11,7	9,3	4,6	4,5	7,9	5,4	2,0	8,0	7,1	10,3
2012	20,0	8,2	4,5	5,3	5,2	5,3	3,7	1,8	3,2	4,3	11,6	4,0
2013	17,8	7,5	41,0	9,3	12,6	4,9	9,5	3,6	4,7			15,9
2014	5,1	5,2	4,7	9,4	7,0	5,5						

Dadas as séries de vazões máximas mensais nestas três estações, elaboraram-se as séries de vazões máximas anuais por ano hidrológico - de outubro a setembro - cujos resultados são sintetizados na Tabela 17 abaixo.

Tabela 17: Vazões Máximas por Ano Hidrológico

ANO HIDROLÓGICO	Macaé de Cima	Galdinópolis	Piller
1950		33,1	18,9
1951		100,6	37,3
1952		44,0	20,9
1953		23,6	15,3
1954		52,7	25,6
1955		25,5	17,1
1956		55,6	27,5
1957		39,4	21,6
1958		23,0	21,8
1959		30,9	21,2
1960		33,9	33,7
1961		33,9	25,1
1962		22,4	14,4
1963		35,0	19,7
1964		30,9	40,3
1965		61,8	41,6

ANO HIDROLÓGICO	Macaé de Cima	Galdinópolis	Piller
1966		47,1	46,4
1967	46,9	45,8	39,6
1968	19,3	22,1	18,4
1969	54,1	46,7	22,2
1970		47,1	30,4
1971	25,9	39,8	22,2
1972	30,2	28,8	18,5
1973	43,9	30,2	16,5
1974	26,5	20,6	17,6
1975	28,4	13,7	15,3
1976	19,0	37,8	28,5
1977	32,5	79,3	24,4
1978	54,7	47,6	38,7
1979	17,4	35,4	32,3
1980	48,8	60,7	21,1
1981	39,6	48,0	27,0
1982	19,0	27,5	17,4
1983	13,4	19,8	19,4
1984	40,7	28,8	24,4
1985	13,1	32,4	24,6
1986	18,7	24,2	25,2
1987	46,2	26,5	14,3
1988	28,5	20,1	22,9
1989	51,3	35,0	20,0
1990	60,8	54,2	19,4
1991	22,3	21,5	14,8
1992	39,6	46,7	19,4
1993	13,4	44,9	23,9
1994	10,4	53,2	10,7
1995	8,4	9,9	10,8
1996	11,8	39,0	19,0
1997	11,4	23,6	12,9
1998	21,4	14,9	8,9
1999	26,2	47,6	11,9
2000	8,5	26,0	14,4
2001	13,9	17,8	11,1
2002	20,1	34,6	14,4
2003	42,1	44,2	39,9
2004	48,1	38,2	28,8
2005	36,2	27,5	21,2
2006	34,4	41,4	20,8
2007	25,8	25,5	20,0

ANO HIDROLÓGICO	Macaé de Cima	Galdinópolis	Piller
2008	72,3	75,1	29,6
2009	45,7	43,8	15,4
2010	15,0	35,4	13,8
2011	23,8	30,2	18,9
2012	58,1	58,2	42,9
Média	30,8	37,5	22,7
Máximo	72,3	100,6	46,4
Mínima	8,4	9,9	8,9
Variância	0,527	0,435	0,388
Assimetria	0,545	1,281	0,926

Pela Tabela 17 apresentada percebe-se que a média das vazões máximas anuais é menor em Piller do que em Macaé de Cima, mesmo com Piller controlando maior área de drenagem. Tal fato pode estar associado à ausência de medições de vazões altas nesta estação, que torna a conversão de leitura de régua em vazão menos exata para níveis altos.

IV. 1.2 – Dados Pluviométricos

Conforme mencionado no item II. 3.3, para a quantificação de vazões máximas através do método do Hidrograma Unitário Triangular é necessário escolher uma entrada de chuva, geralmente tomando-se como referência alguma estação com equação de chuva intensa definida.

Carvalho Júnior (2013), através de pesquisa bibliográfica, identificou Equações de Chuvas Intensas definidas para diversas estações pluviométricas no Estado do Rio de Janeiro, oriundas de diferentes estudos. Os estudos de chuvas intensas disponíveis estão listados a seguir:

- Chuvas Intensas no Brasil. Otto Pfafstetter. DNOS. 2ª ed. Rio de Janeiro, 1982;
- Características Fundamentais da Chuva no Brasil. J.L. Denardin e P.L. Freitas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 17, n. 10, p. 1409-16. Brasília, 1962;
- Estudo de Chuvas Intensas do Estado do Rio de Janeiro. Departamento de Estradas e Rodagem - DER-RJ. 1989;
- Estimativa e Espacialização dos Parâmetros da Equação de Intensidade-Duração-Frequência da Precipitação para o Rio de Janeiro e o Espírito Santo.

D.D. Silva, F.R.L. Pinto, F.F. Pruski, F.A. Pinto. Engenharia Agrícola, v. 18, n. 3, p. 11-21. Jaboticabal, 1999;

- Projeto Equações I-D-F de Chuvas Intensas. Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro - Fundação Rio Águas; e
- Estudo de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro. CPRM, 2001.

A partir do levantamento de Carvalho Júnior (2013), realizou-se um apanhado geral das estações pluviométricas disponíveis nos estudos supracitados. Então, optou-se por realizar uma seleção das estações restritas à localização no interior e nas proximidades da bacia do rio Macaé. Foram identificadas, desta maneira, seis estações oriundas de três diferentes estudos. A Tabela 18, abaixo, sintetiza as informações acerca destas estações.

Tabela 18: Estações de chuvas intensas selecionadas para a bacia do rio Macaé

ESTAÇÃO	PERÍODO DE OBSERVAÇÃO	ALTITUDE (m)	REFERÊNCIA
NOVA FRIBURGO	26 anos*	-	Otto Pfafstetter, 1982
CACHOEIRA DE MACACU	1942-80	150	DER-RJ, 1989
FAZENDA MENDES	1949-81	550	DER-RJ, 1989
FAZENDA ORATÓRIO	1937-39; 50-63;	100	DER-RJ, 1989
PILLER	1951-80	800	DER-RJ, 1989
MACAÉ	1974-86; 88-89	2,8	Pruski <i>et al</i> , 1999

*Otto Pfafstetter (1982) não apresenta os anos de início de término da observação, apenas a duração.

As estações oriundas do estudo de Pfafstetter (1989) têm suas equações de chuvas intensas definidas pela equação:

$$P = T^{(\alpha + \frac{\beta}{T^{0,25}})} \cdot [a \cdot t + b \cdot \log(1 + c \cdot t)]$$

Onde P é a precipitação máxima (em mm), T é o tempo de recorrência escolhido (em anos), t é a duração da precipitação (em horas) e α , β e c são parâmetros definidos para cada estação. Para a estação Nova Friburgo, única do estudo de Pfafstetter localizada próximo à bacia do rio Macaé, estes valores são de 0,4, 28 e 20, respectivamente.

O trabalho de DER-RJ (1989) se apropria de outra equação para o cálculo da chuva de projeto:

$$P = \frac{a \cdot TR^b}{(t \cdot 60 + c)^d} \cdot t$$

Onde P é a precipitação (em mm), TR é o tempo de recorrência definido (em anos) e t é a duração da precipitação (em horas). a, b, c e d são parâmetros definidos para cada estação pluviométrica estudada. Esta mesma metodologia é aplicada para as estações do estudo de Pruski *et al* (1999).

O cálculo da precipitação intensa pela equação de DER-RJ só é válido para chuvas com durações iguais ou superiores a 24 horas.

Os valores dos parâmetros a, b, c e d para as estações selecionadas para este estudo são apresentadas na Tabela 19 abaixo:

Tabela 19: Parâmetros de Equações de Chuvas Intensas

ESTAÇÃO	a	b	c	d
Cachoeira de Macacu	726,00	0,264	9,00	0,732
Fazenda Mendes	544,00	0,149	10,00	0,681
Fazenda Oratório	1494,00	0,211	15,00	0,814
Macaé	444,26	0,263	6,27	0,655
Piller	979,00	0,238	12,00	0,729

Fonte: DER-RJ, 1989; Pruski *et al*, 1999

O estudo da CPRM (2001) não define equação de chuvas intensas para as próprias estações em si, mas apresenta uma metodologia de regionalização da chuva a partir do conceito de regiões homogêneas - definido através da análise de dados de 50 estações pluviométricas distribuídas ao longo do Estado do Rio de Janeiro. Deste modo, para as estações da CPRM a intensidade pluviométrica é calculada através de quantis de frequência - tabelados em função da região homogênea - e da precipitação anual média da estação.

Duas variáveis são necessárias para o cálculo da intensidade de chuva, através da metodologia de CPRM (2001). A primeira, d, representa a duração da chuva (em minutos), que será igual ao tempo de concentração da bacia. A segunda, P,

representa a precipitação média anual (em mm) da estação escolhida. Portanto, o cálculo da intensidade de precipitação de projeto se dá pela equação:

$$i_{T,d,j} = i_d \cdot \mu_{T,d}$$

Onde $\mu_{T,d}$ é tabelado em função da região homogênea e i_d é calculado pela equação:

$$i_d = B \cdot d^\gamma \cdot P^\delta$$

A Tabela 20 abaixo apresenta os valores de B , γ e δ em função da região homogênea.

Tabela 20: Parâmetros de Regionalização de Chuvas Intensas

REGIÃO	Para 5 min. $\leq d < 1$ hora			Para 1 hora $\leq d \leq 24$ horas		
	$i_d = A \cdot d^\alpha \cdot P^\beta$			$i_d = B \cdot d^\gamma \cdot P^\delta$		
	A	α	β	B	γ	δ
1 e 4	44,888	-0,385	0,244	81,432	-0,771	0,371
2	39,445	-0,339	0,234	16,204	-0,761	0,564
3	36,301	-0,392	0,276	85,264	-0,789	0,367

Fonte: CPRM, 2001

Embora as regiões homogêneas 1 e 4 possuam os mesmos parâmetros para a obtenção de i_d , os valores de $\mu_{T,d}$ são diferentes para estas duas regiões, de modo que os valores calculados de chuva são diferentes.

Então, recorreu-se ao sistema *Hidroweb*, da ANA, para identificação de estações pluviométricas localizadas no interior ou próximas a bacia do rio Macaé. Desta maneira, além das seis estações identificadas anteriormente, outras treze estações com longas séries de dados pluviométricos diários consistidos foram selecionadas para o presente estudo.

A partir dos dados de precipitação diários do Sistema *Hidroweb* foram elaboradas séries de precipitações totais anuais para as estações da CPRM selecionadas para este estudo. A Tabela 21 abaixo sintetiza os valores de precipitação total anual média para estas estações.

Tabela 21: Precipitação Anual Média nas estações CPRM

CÓDIGO	ESTAÇÃO	ANOS DE DADOS	PRECIPITAÇÃO ANUAL (mm)
2241003	Macabuzinho	75	1264,7
2241004	Fazenda Oratório	48	1628,7
2241016	Macaé	42	1164,5
2242002	Maria Mendonça	52	1671,8
2242003	Piller	69	2360,6
2242004	Galdinópolis	69	1944,9
2242005	Fazenda São João	51	2108,9
2242006	Rio Dourado	45	2065,5
2242007	Quarteis	51	2305,8
2242016	Fazenda São Joaquim	48	2522,3
2242018	Barra Alegre	50	1355,9
2242019	Vargem Alta	48	1620,3
2242025	Cascatinha do Conego	49	2258,9

Observa-se que das dezenove estações de chuvas intensas selecionadas, a maior parte - onze - se encontra na região homogênea 2, cujas características estão associadas ao regime pluviométrico de altitude da Região Serrana do Rio de Janeiro. As estações denominadas Fazenda Oratório (CPRM, 2001 e DER-RJ, 1989), Maria Mendonça, Barra Alegre e Vargem Alta se encontram na região homogênea 3, enquanto as estações denominadas Macaé (dos mesmos estudos) e Macabuzinho se encontram na região homogênea 1 e estão situadas em altitudes bem próximas ao nível do mar, no núcleo urbano da cidade de Macaé. A Figura 12 abaixo ilustra o comentado. Na imagem, os pontos de cor rosa representam as estações cuja operação é realizada pela CPRM, o ponto vermelho representa a estação do estudo de Pfafstetter (1989) e os pontos de cor verde representam as estações dos estudos de Pruski *et al* (1999) e DER-RJ (1989), que utilizam a mesma equação para o cálculo da chuva de projeto.

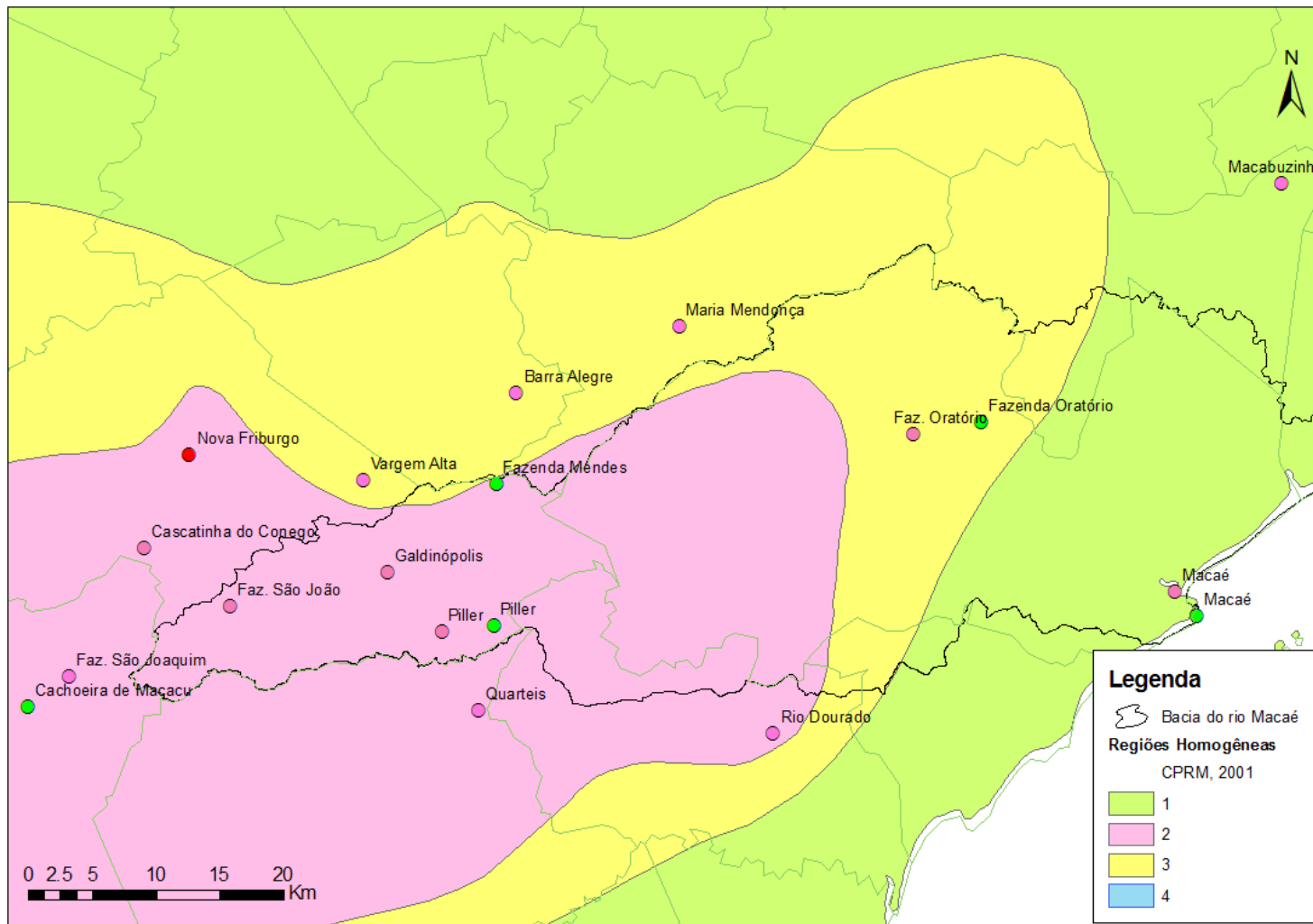


Figura 12: Regiões Homogêneas na bacia do rio Macaé

IV. 2 – Ajuste de Distribuição Estatística

Para o ajuste de distribuição estatística das vazões máximas nas estações com longa série de dados observados foi utilizado o programa ALEA - Análise de Frequência Local de Eventos Anuais, elaborado no Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais sob a coordenação do professor Mauro Naghettini. A escolha por este programa foi realizada devido ao conceituado grupo de pesquisa responsável pela sua elaboração, além de sua simplicidade de uso e por ser um *software* livre, disponível em <http://www.ehr.ufmg.br/downloads/> (UFMG, 2014).

A entrada do programa é a própria série de vazões máximas discretizada por ano hidrológico e a saída são os valores de vazão máxima calculados para diferentes tempos de recorrência e diferentes distribuições estatística pré-definidas pelo programa.

Foram selecionadas, para este estudo, as cinco distribuições estatísticas apresentadas e explicitadas no item II. 3.1, destacadas no trabalho de Santos (2010). Suas formulações são apresentadas no Anexo I deste trabalho, com descrições baseadas em Naghettini e Pinto (2007) e Santos (2010).

Como visto no item II. 3, para a maior parte dos projetos de macrodrenagem o tempo de recorrência utilizado no projeto é igual ou inferior a 100 anos. Por este motivo, as distribuições estatísticas apresentarão resultados de vazões máximas para os TRs de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos. Estes mesmos tempos de recorrência serão utilizados para o cálculo das vazões pelo método do Hidrograma Unitário Triangular.

IV. 3 – Método do Hidrograma Unitário Triangular

Os aspectos gerais do método do Hidrograma Unitário Triangular do SCS foram contemplados anteriormente no item II. 3.3. Então, a seguir serão apresentados todos os passos para a determinação do hidrograma de cheia a partir do método.

IV. 3.1 – Delimitação da Área de Drenagem

Para esta etapa, foi elaborada uma base gráfica em *AutoCAD* contendo cartas topográficas do IBGE em escala 1:50.000, a hidrografia da bacia e os locais das estações fluviométricas apresentadas no item III. 5 deste trabalho.

A delimitação das áreas de drenagem das bacias hidrográficas das estações fluviométricas foi realizada com uso da ferramenta *polyline*, do *AutoCad*, segundo método tradicional, no qual são identificados os divisores de águas e traçadas as delimitações seguindo as linhas de cumeada de acordo com as curvas de nível das cartas topográficas do IBGE. Após a delimitação, foram calculadas as áreas de contribuição das bacias hidrográficas e as feições geradas foram transferidas para o ambiente SIG, para posteriores manipulações de geoprocessamento.

Os resultados de área, assim como os de perímetro das bacias de interesse já foram apresentados na Tabela 11, de índices fluviomorfológicos.

A Figura 14 abaixo ilustra as áreas de contribuição de cada posto fluviométrico na bacia do rio Macaé.

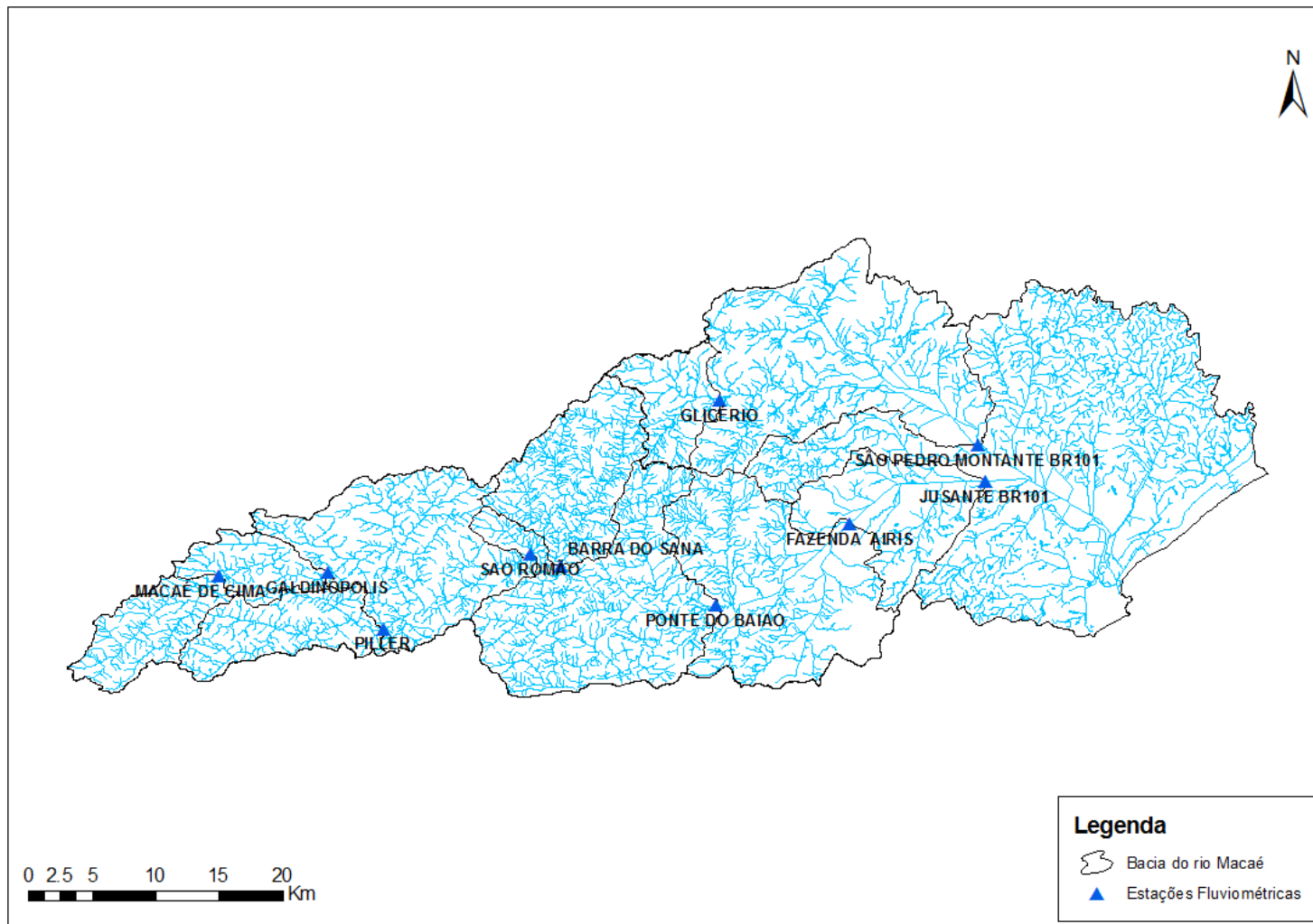


Figura 13: Delimitação das Áreas de Drenagem das estações fluviométricas

IV. 3.2 - Cálculo da Declividade

Para o cálculo do tempo de concentração da bacia, a ser mais bem detalhado no subitem seguinte, faz-se necessário definir a declividade média do curso d'água, da nascente até o local de interesse.

Geralmente, em estudos hidrológicos, determina-se a declividade baseada nos extremos. Esta declividade é definida pela razão entre a diferença total de elevação do leito fluvial pela extensão horizontal entre esses dois pontos. Este valor superestima a declividade média do curso d'água e, conseqüentemente, a velocidade do curso d'água e o pico de cheia. Essa superestimava será tão maior quanto maior o número de quedas no rio.

Alternativamente a esta, existe o conceito de declividade ponderada - ou declividade equivalente. Nesta, traça-se no gráfico do perfil longitudinal do rio uma reta tal que a área, compreendida entre ela e a abcissa, seja igual a área compreendida entre a linha do perfil e o eixo das abcissas.

A Figura 15 abaixo, referente ao perfil longitudinal da estação Barra do Sana, ilustra a diferença entre os dois tipos de declividades calculadas.

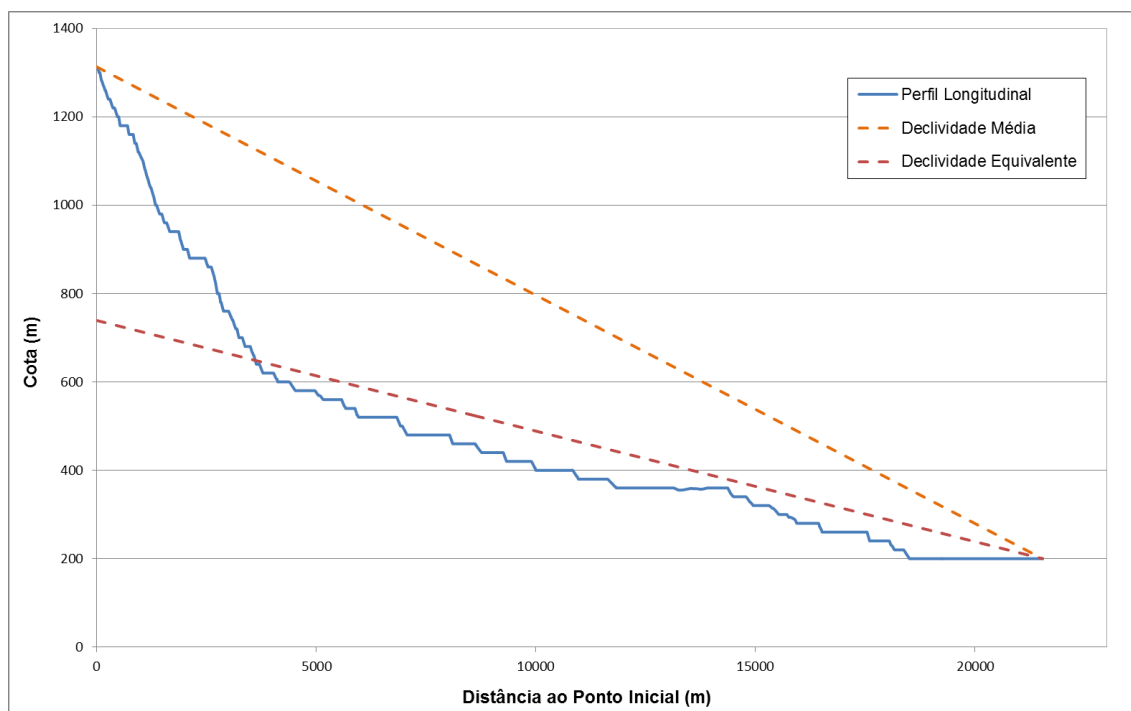


Figura 14: Declividades média e equivalente para o rio Sana, em Barra do Sana.

Neste trabalho, optou-se por utilizar o valor da declividade equivalente, por ser a utilizada pelo INEA em estudos de recursos hídricos no estado do Rio de Janeiro, e

por representar melhor a declividade do rio Macaé, especialmente nos locais de transição entre a região serrana e a planície costeira.

A obtenção dos dados de distância e cota, necessários ao cálculo da declividade, foram obtidos a partir da base gráfica elaborada em *AutoCAD* para este trabalho.

IV. 3.3 – Cálculo do Tempo de Concentração

O tempo de concentração de uma bacia hidrográfica é definido como o tempo que leva até que toda a bacia esteja contribuindo com o escoamento na seção analisada. Esse tempo caracteriza a forma do hidrograma unitário calculado.

A avaliação do tempo de concentração de uma bacia é bastante complexa, devido aos inúmeros condicionantes envolvidos, existindo uma grande variedade de expressões de cálculo, merecendo, por isso, grande atenção na sua determinação, pois influencia significativamente no resultado da descarga de projeto. De uma forma geral, para uma mesma bacia hidrográfica a descarga máxima calculada é proporcional ao inverso do tempo de concentração para ela considerado (DNIT, 2005).

Existem numerosas fórmulas empíricas para calcular o tempo de concentração em função do comprimento do canal principal, do desnível geométrico e, eventualmente, da área de drenagem e de outros parâmetros escolhidos. A maioria destas fórmulas é restrita a áreas pequenas (DNIT, 2005).

Silveira (2005) e Farias Júnior e Botelho (2011) sintetizam diversas fórmulas empíricas e semiempíricas para o cálculo do tempo de concentração de bacias hidrográficas.

Segundo Farias Júnior (2010), a formulação de George Ribeiro ainda é muito encontrada na literatura nacional e é a mais adotada pelo INEA. Ainda, segundo DNIT (2005), esta formulação apresentou bons resultados para bacias estudadas com áreas de drenagem variando de 0,03 km² a 1.293 km², aplicada a todos os tipos de bacia.

Por estes motivos, optou-se, neste trabalho, pela utilização da formulação de George Ribeiro, definida na equação abaixo:

$$t_c = \frac{16 \cdot L}{(1,05 - 0,2p)(100 \cdot I)^{0,04}}$$

Onde t_c é obtido em minutos, L é o comprimento do curso d'água (em km), I é a declividade (em m/m) e p é o parâmetro correspondente ao percentual da área da bacia coberta por vegetação.

IV. 3.4 – Definição do valor de CN médio da bacia

O trabalho de Sartori *et al* (2005) adapta a classificação de solos realizada pelo SCS através da classificação proposta em trabalho de Lombardi Neto *et al* (1989) e classifica os diferentes tipos de solos brasileiros em função do potencial de escoamento, função direta de parâmetros como diâmetro médio das partículas, compactação e textura. São definidos quatro grupos hidrológicos, com potenciais de escoamento crescente de A a D, a saber:

- Grupo A: Solos com baixo potencial de escoamento e alta taxa de infiltração, sendo profundos (100 a 200 cm) ou muito profundos (profundidade > 200 cm), de textura média e bem, ou excessivamente, drenados. Nesta categoria se enquadram os Latossolos Vermelhos, Amarelos e Vermelhos/Amarelos de textura argilosa com alta macroporosidade e os Latossolos Amarelos e Vermelhos/Amarelos de textura média mas com horizonte superficial não arenoso;
- Grupo B: Solos com moderada taxa de infiltração, sendo profundos e apresentando textura arenosa ao longo do perfil ou textura média com horizonte superficial arenoso. Nesta categoria se enquadram os Latossolos Amarelos e Vermelhos/Amarelos de textura média e horizonte superficial de textura arenosa, os Latossolos Brunos, os Nitossolos Vermelhos, os Neossolos Quartzênicos e os Argissolos Vermelhos ou Vermelhos/Amarelos que não apresentem mudança textural abrupta;
- Grupo C: Solos com baixa taxa de infiltração, profundos ou pouco profundos (50 a 100 cm), apresentando camadas que dificultam o movimento da água no eixo vertical e mudanças texturais abruptas. Nesta categoria se enquadram os Argilossolos pouco profundos que não apresentem mudança textural abrupta, Argilossolos Vermelhos, Amarelos e Vermelhos/Amarelos, Cambissolos de textura média, Cambissolos Húmicos e Háplicos que apresentem características de Latossolos, Espodossolos Ferrocárbicos e Neossolos Flúvicos;
- Grupo D: Solos com alta taxa de escoamento, essencialmente rasos (prof. < 50 cm) e associados a mudanças texturais abruptas. Nesta categoria se enquadram os Neossolos Litólicos, Organossolos, Gleissolos, Chernossolos, Planossolos, Vertissolos, Alissolos, Luvisolos, Plintossolos, Solos de Manguê, Afloramentos de Rocha, demais Cambissolos que não se enquadrem no Grupo C e Argissolos Amarelos e Vermelhos/Amarelos pouco profundos associados a mudanças texturais abruptas.

A partir desta classificação, definiram-se os grupos hidrológicos para toda a pedologia da bacia do rio Macaé, anteriormente apresentada no item III. 3.

Como mencionado no item II. 3.3, o parâmetro *CN* mede indiretamente a taxa de infiltração de água no solo. Por isso, ele é função da pedologia e do uso e cobertura do solo. Assim, para um mesmo grupo hidrológico de solo, o valor de *CN* varia de acordo com o uso do solo e, da mesma forma, para uma mesma classe de uso e cobertura do solo, o valor de *CN* varia de acordo com o grupo hidrológico.

Neste sentido, foi realizada a sobreposição das camadas supracitadas em ambiente SIG, de modo que as feições de uso do solo e grupo hidrológico se unissem em um só plano de informações. Neste novo plano definiu-se o valor de *CN* para cada feição gerada. A Figura 16 ilustra o processo descrito, também chamado de *overlay*.

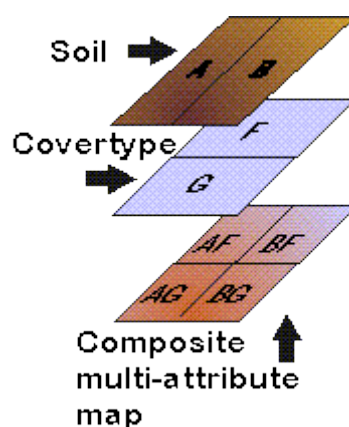


Figura 15: Processo de sobreposição de camadas

Fonte: <http://maps.unomaha.edu/Peterson/gis/notes/overrt4.gif>

A atribuição do valor de *CN* para cada feição gerada no processo de *overlay* foi realizada com base no trabalho de Carvalho Júnior (2013). O trabalho citado apresenta os valores de *CN* para diferentes usos do solo definidos no Zoneamento Econômico Ecológico em diferentes grupos hidrológicos do solo após vasta pesquisa bibliográfica. A Tabela 22, abaixo, sintetiza os valores de *CN* a partir do trabalho de Carvalho Júnior (2013).

Tabela 22: Valores de *CN* para o Estado do Rio de Janeiro.

Usos do Solo (ZEE)	Grupo Hidrológico				Origem do Valor da Curva Número
	A	B	C	D	
Água	100	100	100	100	SCS, National Engineering Book, Section 4, Hydrology, Chapter 9
Afloramento Rochoso	98	98	98	98	SCS, National Engineering Book, Section 4, Hydrology, Chapter 9
Ocupação Urbana de Alta Densidade	89	92	94	95	NRCS, TR-55 Urban Hydrology for Small Watersheds

Usos do Solo (ZEE)	Grupo Hidrológico				Origem do Valor da Curva Número
	A	B	C	D	
Ocupação Urbana de Média Densidade	77	85	90	92	NRCS, TR-55 Urban Hydrology for Small Watersheds
Ocupação Urbana de Baixa Densidade	61	75	83	87	NRCS, TR-55 Urban Hydrology for Small Watersheds
Solo exposto	77	86	91	94	SCS, National Engineering Book, Section 4, Hydrology, Chapter 9
Pastagem - terreno montanhoso, escarpado e forte ondulado	68	79	86	89	SCS, National Engineering Book, Section 4, Hydrology, Chapter 9
Pastagem - terreno ondulado	49	69	79	84	SCS, National Engineering Book, Section 4, Hydrology, Chapter 9
Pastagem - suave ondulado e plano	39	61	74	80	SCS, National Engineering Book, Section 4, Hydrology, Chapter 9
Comunidade relíquia	37	51	68	70	SCS, National Engineering Book, Section 4, Hydrology, Chapter 10
Pastagem em Várzea	37	51	68	70	SCS, National Engineering Book, Section 4, Hydrology, Chapter 11
Áreas Úmidas	37	51	68	70	SCS, National Engineering Book, Section 4, Hydrology, Chapter 12
Agricultura (café)	49	69	79	84	SCS, National Engineering Book, Section 4, Hydrology, Chapter 13
Agricultura	49	69	79	84	SCS, National Engineering Book, Section 4, Hydrology, Chapter 14
Agricultura (cana)	49	69	79	84	SCS, National Engineering Book, Section 4, Hydrology, Chapter 9
Agricultura (cítricos-coco)	41	55	69	71	SCS, National Engineering Book, Section 4, Hydrology, Chapter 9
Reflorestamento	56	75	86	91	Handbook of Applied Hydrology (Ven te Chow, 1964), Table 22-9
Vegetação Secundária em Estágio inicial	51	72	82	88	Média entre Reflorestamento e Floresta Caducifólia
Floresta - Caducifólia	46	68	78	84	Handbook of Applied Hydrology (Ven te Chow, 1964), Table 22-9
Floresta - Subcaducifólia	36	60	70	76	Handbook of Applied Hydrology (Ven te Chow, 1964), Table 22-9
Floresta - Subperenifólia	26	52	62	69	Handbook of Applied Hydrology (Ven te Chow, 1964), Table 22-9
Floresta - Perenifólia	15	44	54	61	Handbook of Applied Hydrology (Ven te Chow, 1964), Table 22-9
Cordões Arenosos	12	35	43	49	80% do CN da Floresta Perenifólia
Dunas	12	35	43	49	80% do CN da Floresta Perenifólia
Restinga	12	35	43	49	80% do CN da Floresta Perenifólia
Salinas	0	0	0	0	
Mangue	0	0	0	0	

Fonte: Carvalho Júnior, 2013

O mapa elaborado de CN para toda a bacia do rio Macaé é apresentado na Figura 17 a seguir.

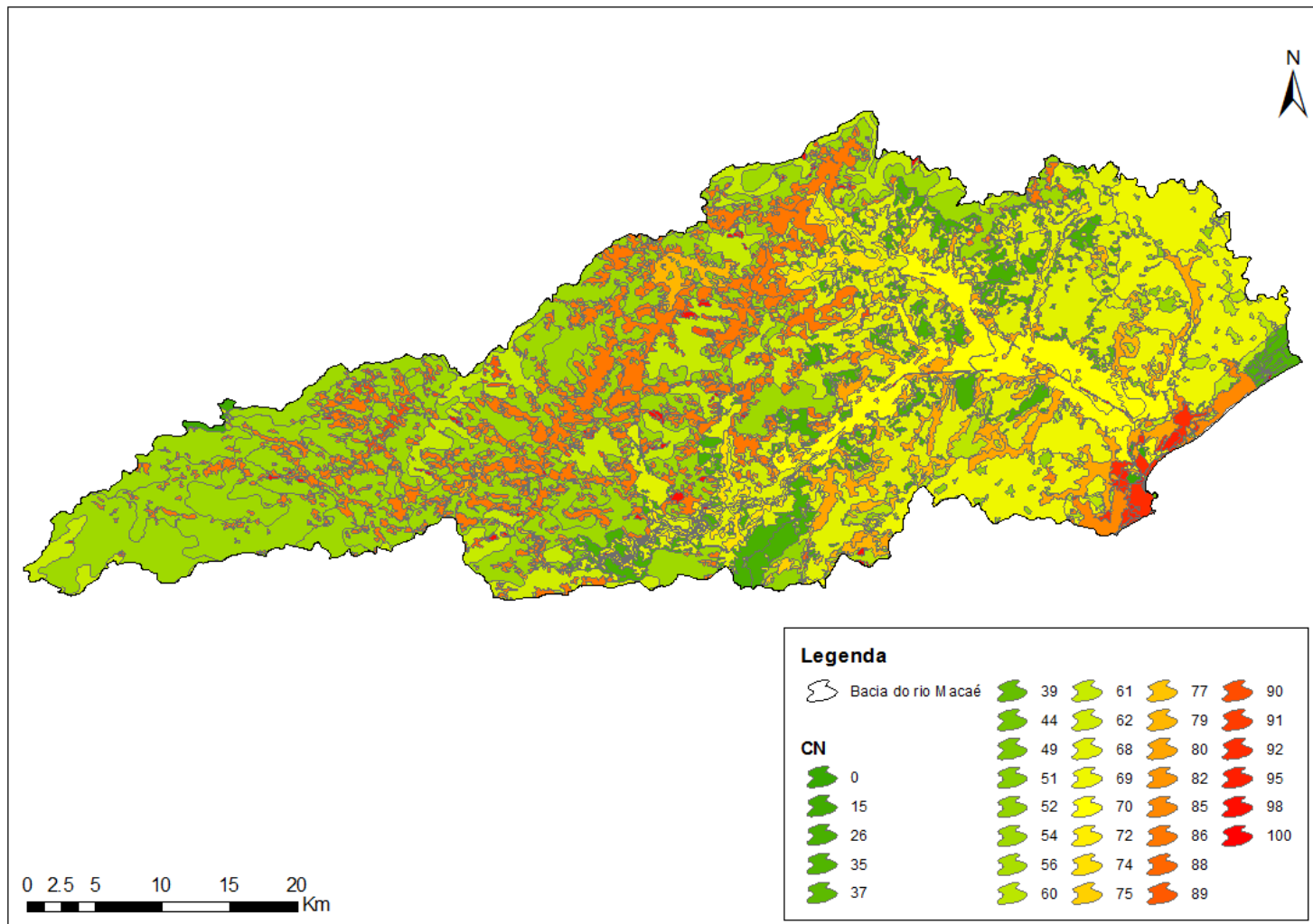


Figura 16: Mapa de CN para a bacia do rio Macaé

IV. 3.5 – Cálculo da intensidade de chuva

A precipitação é uma das variáveis hidrológicas mais importantes para os estudos hidrometeorológicos de qualquer região. Nos estudos de vazões máximas, assim como na aplicação do Método do Hidrograma Unitário Triangular, o excedente de chuva é a variável mais importante, pois o formato do hidrograma de cheia - incluindo seu pico - vai ser definido, dentre outros fatores, pelo volume de água que de fato gerou o escoamento superficial direto.

Chuvas intensas são aquelas que registram um grande volume de água precipitado em um curto espaço de tempo. Essas chuvas, frequentemente, causam prejuízos materiais e humanos consideráveis e são as grandes responsáveis pelas grandes cheias observadas na calha fluvial de um rio (SANTOS, 2010). A intensidade da chuva, compreendida como a razão entre a altura de lâmina d'água precipitada e o tempo, é geralmente expressa em mm/h e pode ser medida em pluviógrafos manuais ou telemétricos (CARVALHO JÚNIOR, 2013), como é o caso das estações do Sistema de Alerta de Cheias do INEA, presente na bacia do rio Macaé.

O Método do Hidrograma Unitário Triangular se utiliza de Equações de Chuvas Intensas para determinação do hietograma de projeto. Isto é, para as estações pluviométricas que possuem equações definidas, é definida a duração total da chuva com base no tempo de concentração da bacia, e calculadas as precipitações correspondentes às durações unitárias.

Para o cálculo das vazões máximas nas estações fluviométricas da bacia do Macaé foi realizada, para cada estação, a escolha de uma ou duas estações pluviométricas de chuvas intensas para definição do hietograma de projeto. Nesse sentido, optou-se, primeiramente, pelas estações localizadas no interior das bacias de contribuição. Quando não foi possível, o cálculo da precipitação foi realizado com base na estação mais próxima ao centro da bacia, observando-se, ainda, a região homogênea que prevalecia nesta e nas respectivas estações pluviométricas. Nas estações fluviométricas de maior área de drenagem - Ponte do Baião, Fazenda Airis e Jusante BR-101 - e também para a foz do rio Macaé, buscou-se escolher duas estações localizadas em regiões homogêneas distintas, de modo a balancear o volume de precipitação, sem privilegiar o regime de chuvas de altitude ou da planície.

Como a formulação apresentada em DER-RJ (1989) é aplicada somente a precipitações com duração superior a 24 horas e para a grande maioria das estações fluviométricas da bacia do rio Macaé o tempo de concentração é inferior a este limite, optou-se por não utilizar as estações deste estudo e de Pruski *et al* (1999). A única

equação de chuva intensa do estudo de Pfafstetter (1982) - Nova Friburgo -, conforme apresentado, se situa na outra vertente do divisor de águas. Embora, ainda assim, ela esteja situada bem próxima à cabeceira da bacia do rio Macaé, privilegiou-se, neste estudo, as estações da CPRM.

Nos casos em que foram selecionadas duas estações de chuvas intensas, o cálculo do hietograma de projeto considerou a precipitação média entre as duas estações para cada intervalo de tempo (denominado Duração Unitária).

A Tabela 23, apresentada abaixo, resume as estações de chuva utilizadas para cálculo da cheia nas diferentes estações fluviométricas distribuídas na bacia do rio Macaé.

Tabela 23: Seleção dos postos de chuva para cada estação fluviométrica

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA	ÁREA (km²)	ESTAÇÃO DE CHUVA 1	ESTAÇÃO DE CHUVA 2
Macaé de Cima	59,3	Faz. São João	
Galdinópolis	101,0	Galdinópolis	Faz. São João
Piller	69,8	Piller	Faz. São João
São Romão	337,8	Galdinópolis	Faz. São João
Barra do Sana	108,0	Maria Mendonça	Galdinópolis
Ponte do Baião	655,3	Faz. Oratório	Faz. São João
Fazenda Airis	854,8	Faz. Oratório	Faz. São João
Jusante BR101	952,0	Faz. Oratório	Faz. São João
Glicério	49,9	Maria Mendonça	
São Pedro	309,4	Maria Mendonça	Faz. Oratório

Além da escolha da estação pluviométrica de referência, o método do Hidrograma Unitário Triangular também propõe correção da entrada de chuva a partir da distribuição temporal e espacial, abordadas nos subitens a seguir.

IV. 3.5.1 - Distribuição Temporal da Chuva

No Método do Hidrograma Unitário Triangular, a distribuição temporal da chuva é realizada com base no cálculo da Duração Unitária, calculada pela equação:

$$Du = \frac{2}{15} \cdot Dt$$

Onde Du é a Duração Unitária e Dt é a duração total do evento chuvoso - igual ao tempo de concentração estabelecido para a bacia em questão.

Como a fração 2/15 representa a partição da precipitação total em 7,5 intervalos, a distribuição de tempo para o cálculo da chuva é feita em 8 intervalos inteiros. Desta forma, cada intervalo de tempo é um múltiplo - de 1 a 8 - da duração unitária e o último intervalo representa uma duração um pouco maior que o tempo de concentração da bacia.

Utilizando-se a distribuição temporal descrita acima, a chuva correspondente a cada intervalo é calculada pela diferença entre a precipitação acumulada no intervalo em questão e a precipitação acumulada no intervalo anterior, conforme explicitado na equação abaixo:

$$dP_i = P_i - P_{i-1}$$

Onde dP_i é a precipitação do intervalo i , P_i é a precipitação acumulada até o intervalo i e P_{i-1} é a precipitação acumulada até o intervalo $i-1$.

Para as estações localizadas no baixo curso do rio Macaé - Ponte do Baião, Fazenda Airis e Jusante BR101 - e para a foz, o tempo de concentração calculado pela formulação de George Ribeiro resultou em valores superiores a 24 horas. Deste modo, a precipitação de projeto, baseada na metodologia de CPRM (2002), não pôde ser calculada para os intervalos de tempo que ultrapassaram este limite.

Para contornar este empecilho, realizou-se, para estas estações, uma extrapolação do valor da precipitação em função do tempo até às 24 horas de duração. Plotou-se em gráfico os valores da precipitação em função do tempo e então elaborou-se uma curva de tendência do tipo Potencial, no *software* MS Excel. A partir da equação potencial definida, calcularam-se as precipitações nos intervalos subsequentes. A Figura 18 abaixo, referente ao cálculo da chuva na estação pluviométrica Fazenda Oratório ilustra a extrapolação da precipitação total, onde os quadrados azuis são calculados pela metodologia da CPRM e os losangos vermelhos são obtidos pela extrapolação, cuja equação também é apresentada no gráfico.

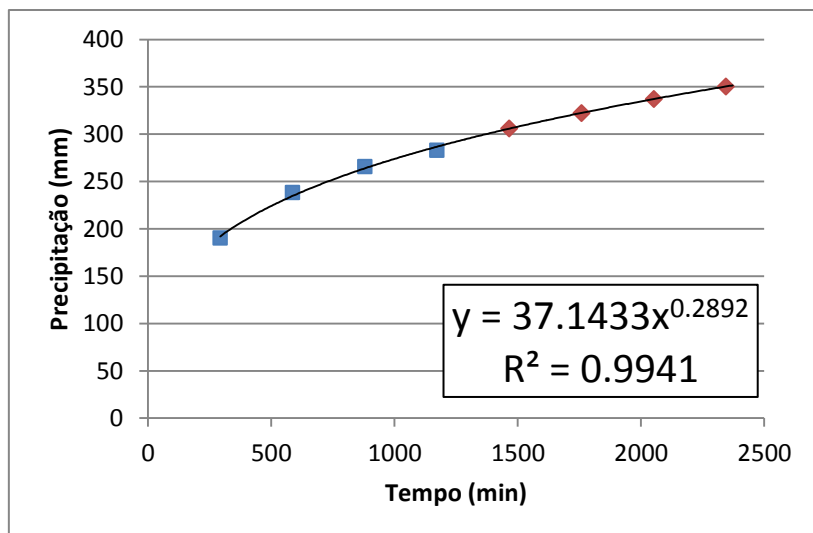


Figura 17: Extrapolação da precipitação para durações superiores a 24 horas.

IV.3.5.2 - Distribuição Espacial da Chuva

Os valores de intensidade de chuva fornecidos por equações de chuvas intensas representam a chuva em um único ponto, já que se baseiam em medições pontuais de um pluviógrafo. Sabe-se, entretanto, que a precipitação em um ponto não será homogênea ao longo das bacias em estudo.

Por esse motivo, foi utilizado um coeficiente redutor para considerar a redução da chuva de um ponto para a área de drenagem considerada. Este coeficiente representa a correção do valor de precipitação máxima em função da área da bacia hidrográfica, de forma a considerar a não uniformidade da precipitação sobre a mesma.

Esta correção é feita através da seguinte equação (DNIT, 2005):

$$P_{\text{área}} = P_{\text{ponto}} \cdot \left(1 - 0,1 \cdot \log\left(\frac{A}{25}\right)\right)$$

Onde A é a área de drenagem, em km^2 .

Destaca-se que a equação de correção apresentada é válida somente para áreas de drenagem superiores a 25 km^2 . Para áreas de drenagem inferiores a 25 km^2 , considera-se a precipitação homogênea em toda área, igual à calculada na estação pluviométrica de referência.

Após a aplicação da distribuição temporal e da correção da chuva em função da distribuição espacial e da duração, é feito o reordenamento das mesmas, de acordo com o método dos blocos alternados, em ordem proposta pelo SCS. O reordenamento consiste em duas etapas:

- *Identificação da ordem real*: cada dP_i é ordenado do maior para o menor valor, de 1 a 8;
- *Reordenamento*: seguindo a metodologia do SCS, altera-se a ordem real conforme a Tabela 24, apresentada abaixo.

Tabela 24: Reordenamento da distribuição de chuvas

Ordem Real	Ordem SCS
1	5
2	3
3	1
4	2
5	4
6	6
7	7
8	8

Fonte: SCS (1985)

Após o reordenamento proposto por SCS (1985), a precipitação acumulada é novamente calculada, seguindo a equação abaixo:

$$P_i = P_{i-1} + dP_i$$

Após o cálculo da precipitação acumulada para cada intervalo i , é calculada a precipitação efetiva para cada intervalo (Pe_i) através da equação:

Se $P_i > 0,2.S$, então:

$$Pe_i = \frac{(P_i - 0,2.S)^2}{P_i + 0,8.S}$$

Se não, $Pe_i = 0$

Onde S é a infiltração potencial de água no solo (em mm), definida pelo CN médio da bacia através da equação:

$$S = \frac{25400 - 254.CN}{CN}$$

O parâmetro 0,2.S é a abstração inicial considerada pelo modelo. Isto é, é a altura de chuva que deve ser vencida inicialmente pela chuva de projeto para que se inicie de fato o escoamento superficial.

Calculadas as precipitações efetivas até a duração total da chuva, calculam-se as precipitações efetivas correspondentes a cada intervalo, utilizando-se a equação:

$$dPe_i = Pe_i - Pe_{i-1}$$

O somatório de dPe_i (igual a Pe do último intervalo) corresponde a altura de chuva que de fato vai gerar o hidrograma de cheia na seção fluvial analisada.

IV. 3.6 – Hidrogramas de cheia

A precipitação efetiva se propaga pela superfície da bacia até atingir os cursos d'água, através dos quais é conduzida para jusante (CARVALHO JÚNIOR, 2013). O método do Hidrograma Unitário Triangular do SCS assume que uma dada precipitação efetiva Pe , de duração t , transforma-se, neste processo de propagação, em um hidrograma de forma triangular, cujas dimensões (pico, tempo de ascensão e recessão) são estimados a partir das características fisiográficas da bacia. A Figura 19 abaixo ilustra o hidrograma unitário triangular.

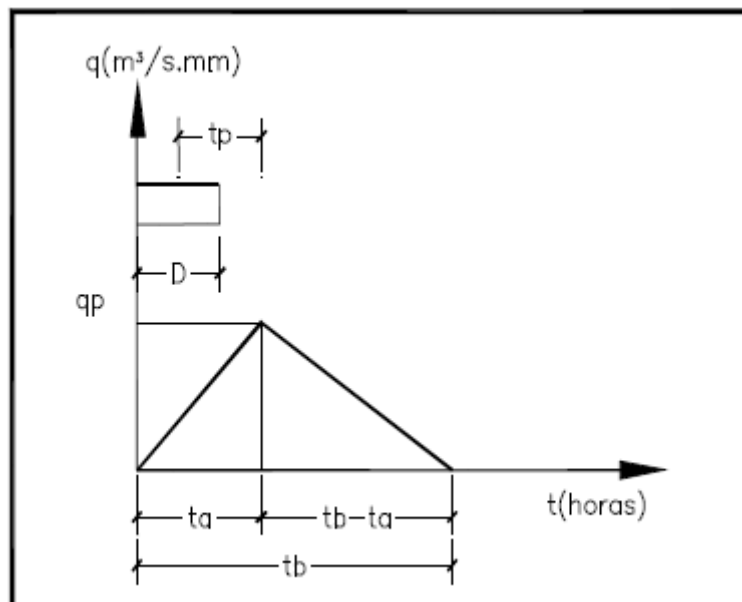


Figura 18: Hidrograma Unitário Triangular do SCS.

Fonte: Carvalho Júnior, 2013

Assim, o tempo de ascensão do hidrograma unitário é calculado pela equação:

$$T_a = \frac{Du}{2} + 0,60.T_c$$

Onde D é a Duração Unitária e T_c é o tempo de concentração da bacia (em horas), que pode ser calculado por diferentes fórmulas, conforme descrito no item IV. 3.4. Neste trabalho, utilizou-se o cálculo do tempo de concentração pela fórmula de George Ribeiro.

O tempo de recessão do hidrograma é dado pela equação:

$$T_{rec} = \frac{5}{3}.T_a$$

Finalmente, o pico de vazão (Q_p) para a precipitação unitária é calculado pela equação:

$$Q_p = \frac{A}{1,8.(T_a + T_{rec})}$$

O hidrograma é definido como vazão por altura de chuva ($m^3s^{-1}mm^{-1}$). Isto é, cada milímetro de precipitação efetiva vai gerar um hidrograma unitário. Deste modo, para cada intervalo de Duração Unitária é calculado um hidrograma de cheia com base na precipitação efetiva deste intervalo.

O somatório destes hidrogramas triangulares resulta no hidrograma de projeto, conforme ilustrado na Figura 20 abaixo. A soma é feita respeitando-se o início de cada hidrograma unitário.

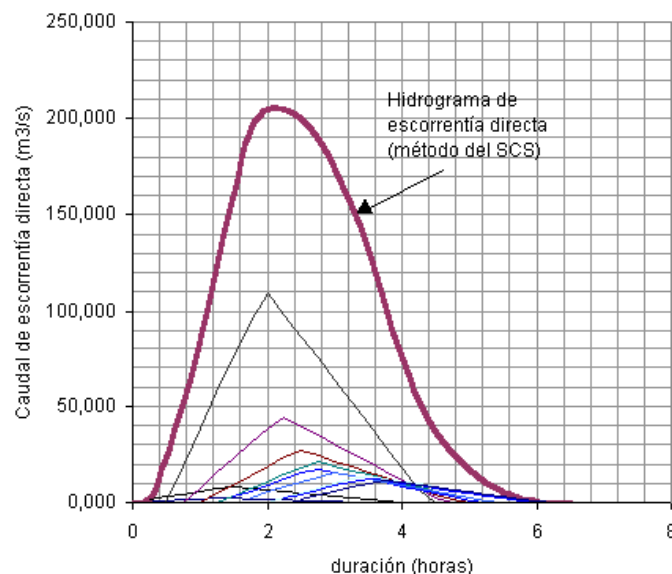


Figura 19: Sobreposição de hidrogramas triangulares.

Fonte: http://ingenieria.udea.edu.co/~jecanon/hojadevidajecb_archivos/HTML/taller%20HEC-HMS/Image46.gif

CAPÍTULO V – RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos cálculos de vazões máximas realizados ao longo deste trabalho. O item V.1 apresenta os resultados obtidos para as estações fluviométricas da parte alta da bacia, de responsabilidade da ANA, com séries históricas longas, através de ajustes estatísticos. Já o item V.2 apresenta os resultados obtidos para todas as estações fluviométricas da bacia e para a foz do rio Macaé através do Método do Hidrograma Unitário Triangular. Por fim, o item V.3 apresenta uma análise da aplicação do Método do HUT a partir da comparação dos valores obtidos pelo mesmo com os valores obtidos através de análise estatística e com outros estudos de vazões máximas realizados na bacia, descritos previamente no item III. 7.

V. 1 – Vazões Máximas obtidas por Ajuste Estatístico

A partir dos dados de vazões máximas anuais (apresentados anteriormente no item IV. 1.1), recorreu-se ao *software* ALEA para a determinação de vazões máximas de referência para diferentes tempos de retorno nas estações de responsabilidade da ANA na bacia do rio Macaé (Macaé de Cima, Galdinópolis e Piller).

Nos subitens seguintes serão apresentadas as vazões calculadas para os diferentes tempos de recorrência e o valor do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov para as diferentes distribuições estatísticas. As vazões calculadas pelas diferentes distribuições foram plotadas em gráfico junto com a distribuição empírica, como forma de também subsidiar a escolha da distribuição que melhor representará o conjunto das três estações.

Nas tabelas, a linha K-S representa o valor do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, descrito em Naghettini e Pinto (2007). As colunas LN, LN3, P3, LP3 e GU representam as vazões calculadas pelas distribuições estatísticas descritas no item II. 3.1 - Log-Normal Tipo II, Log-Normal Tipo III, Pearson Tipo III, Log-Pearson Tipo III e Gumbel, respectivamente. As formulações destas distribuições são apresentadas no Anexo I deste trabalho.

É importante ressaltar que as vazões apresentadas neste item são valores máximos diários, que ainda serão convertidos para valores máximos instantâneos, apresentados no item V. 3.

V. 1.1 - Macaé de Cima

Os resultados das vazões máximas ajustadas por distribuições estatísticas são apresentados na Tabela 25 e ilustradas na Figura 21 abaixo.

É possível perceber que o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov apresentou resultados muito próximos para as cinco distribuições probabilísticas. Entretanto, pela figura é possível perceber que as distribuições P3, LN3 e GU se mantiveram mais próximas da distribuição empírica, especialmente para tempos de retorno mais elevados.

Tabela 25: Vazões máximas ajustadas em Macaé de Cima

K-S	0,09	0,08	0,09	0,08	0,09
TR	LN	LN3	P3	LP3	GU
2	26,0	28,8	28,8	26,7	27,6
5	42,5	43,2	43,2	42,8	41,9
10	55,0	51,6	51,7	53,8	51,4
20	68,0	59,1	59,2	64,6	60,5
50	86,4	68,3	68,3	78,6	72,2
100	101,3	74,7	74,6	89,2	81,0

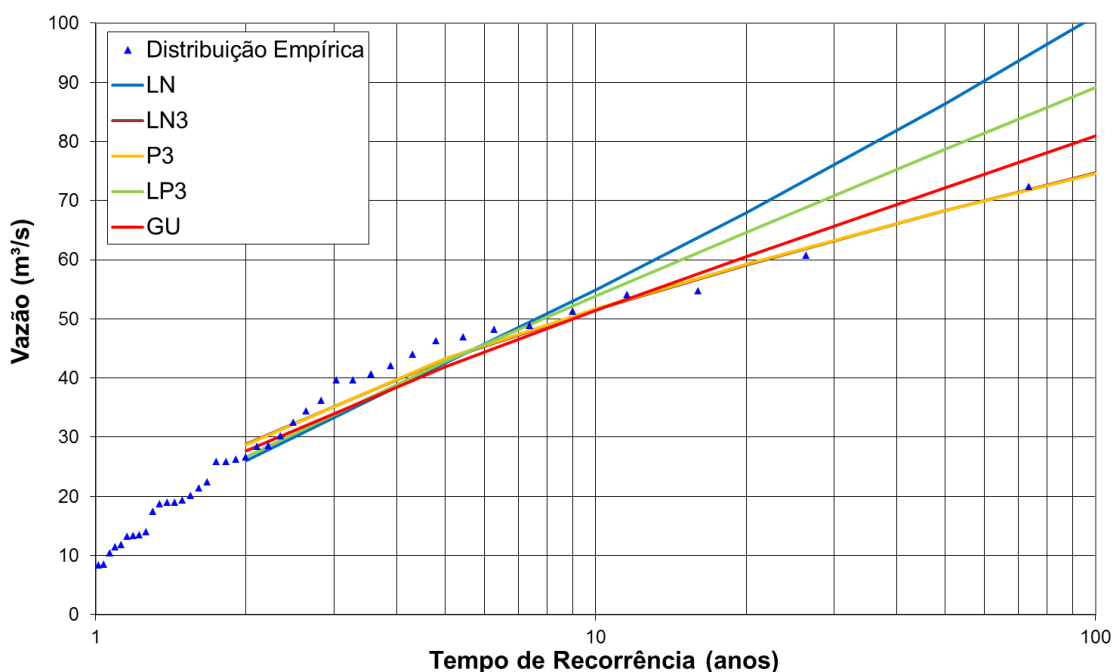


Figura 20: Vazões máximas ajustadas em Macaé de Cima

V. 1.2 - Galdinópolis

Os resultados das vazões máximas ajustadas por distribuições estatísticas são apresentados na Tabela 26 e ilustradas na Figura 22 abaixo.

É possível perceber que o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov apresentou resultados idênticos para as cinco distribuições probabilísticas. O teste K-S refletiu nitidamente o observado na figura. Mesmo para a vazão máxima de TR = 100 anos, a diferença entre o menor valor (87,8 m³/s - distribuição LP3) e o maior valor (93,3 m³/s - distribuição LN) é de apenas 5,8%.

Tabela 26: Vazões máximas ajustadas em Galdinópolis

K-S	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
TR	LN	LN3	P3	LP3	GU
2	34,4	34,6	34,2	34,8	34,9
5	49,3	49,1	49,2	49,5	49,3
10	59,6	58,8	59,3	59,0	58,9
20	69,6	68,3	68,9	68,0	68,1
50	83,0	80,6	81,1	79,4	80,0
100	93,3	90,0	90,2	87,8	88,9

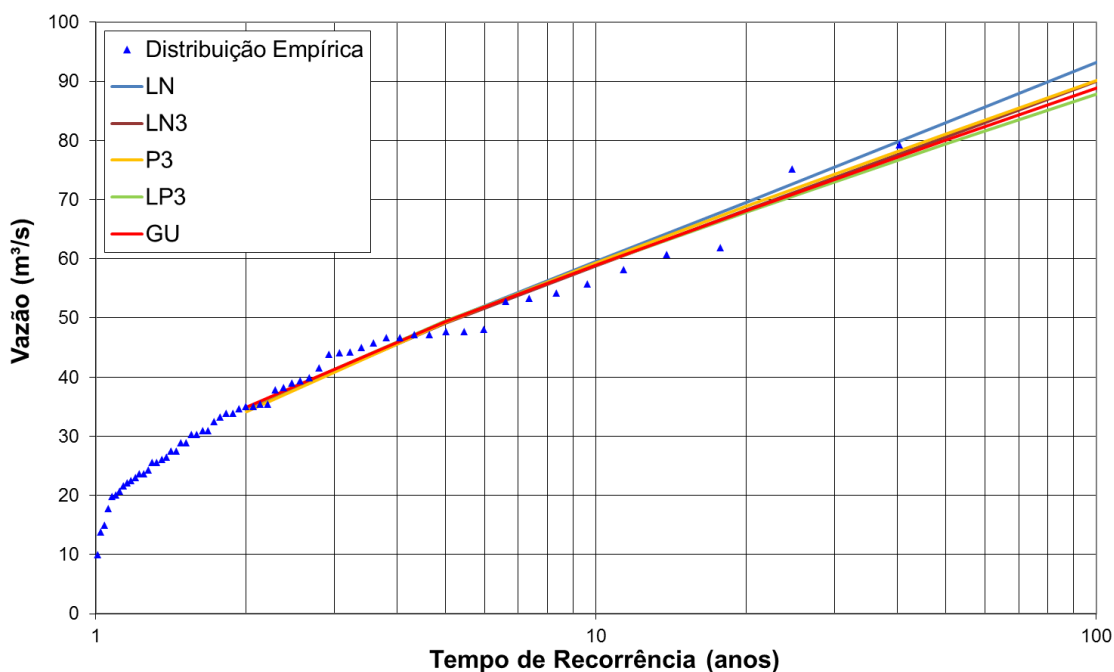


Figura 21: Vazões máximas ajustadas em Galdinópolis

V. 1.3 - Piller

Os resultados das vazões máximas ajustadas por distribuições estatísticas são apresentados na Tabela 27 e ilustradas na Figura 23 abaixo.

É possível perceber que o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov apresentou resultados muito próximos para as cinco distribuições probabilísticas. Mesmo com a ligeira diferença no valor do teste K-S, as distribuições apresentaram vazões máximas muito próximas. Para a vazão máxima de TR = 100 anos, por exemplo, a diferença entre o menor valor (49,1 m³/s - P3) e o maior valor (52,4 m³/s - LP3) é de apenas 6,3%.

Tabela 27: Vazões máximas ajustadas em Piller

K-S	0,08	0,09	0,09	0,07	0,08
TR	LN	LN3	P3	LP3	GU
2	21,2	21,5	21,4	21,0	21,3
5	29,1	29,4	29,5	29,0	29,1
10	34,3	34,4	34,5	34,5	34,3
20	39,4	39,0	39,2	39,8	39,2
50	45,9	44,9	45,0	46,9	45,7
100	50,9	49,2	49,1	52,4	50,5

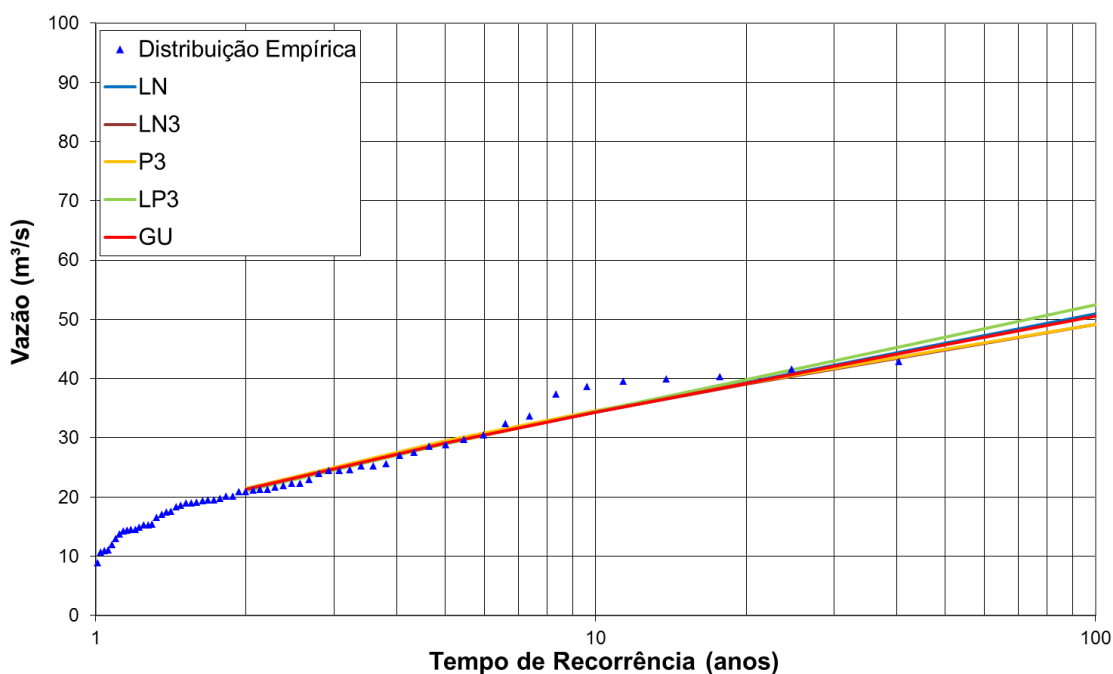


Figura 22: Vazões máximas ajustadas em Piller

V. 1.4 - Síntese dos resultados por distribuição estatística

Conforme pode ser visto nos subitens anteriores, as cinco distribuições estatísticas apontadas por Santos (2010) apresentaram bons resultados no teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov e boa correlação visual com as distribuições empíricas observadas.

Em Macaé de Cima, exclusivamente, as distribuições P3, LN3 e GU apresentaram resultados ligeiramente melhores que as demais no teste de Kolmogorov-Smirnov. Dessas três, as distribuições P3 e LN3 foram as que apresentaram menor desvio em relação às vazões máximas de TR mais elevados. Ainda, destas duas distribuições, a que apresentou menor valor no teste K-S foi a distribuição LN3.

Para as estações Galdinópolis e Piller, os valores do teste K-S permaneceram iguais para as distribuições LN3 e P3 e as vazões ajustadas foram quase iguais para estas duas distribuições. Por estes motivos, optou-se neste trabalho pela utilização da distribuição Log-Normal Tipo III para as todas as estações fluviométricas da ANA.

Conforme mencionado anteriormente, os resultados até aqui apresentados são vazões máximas em escala diária. Porém, as áreas de drenagem destas estações são pequenas (inferiores a 101 km²) e, por consequência, resultam em tempos de concentração também pequenos, inferiores a um dia. Por este motivo, faz-se necessário a correção dos resultados obtidos, convertendo as vazões diárias para vazões instantâneas de pico, através do coeficiente de Fuller, apresentado anteriormente no item II. 3.

As vazões máximas instantâneas para as estações Macaé de Cima, Galdinópolis e Piller, que serão confrontadas com as vazões calculadas pelo método do Hidrograma Unitário Triangular, são apresentadas na Tabela 28 abaixo.

Tabela 28: Vazões máximas diárias e instantâneas ajustadas

TR	Macaé de Cima	Galdinópolis	Piller
$Q_{\text{máx,dia}}$ - TR 2 anos	28,8	34,6	21,5
$Q_{\text{máx,dia}}$ - TR 5 anos	43,2	49,1	29,4
$Q_{\text{máx,dia}}$ - TR 10 anos	51,6	58,8	34,4
$Q_{\text{máx,dia}}$ - TR 20 anos	59,1	68,3	39,0
$Q_{\text{máx,dia}}$ - TR 50 anos	68,3	80,6	44,9
$Q_{\text{máx,dia}}$ - TR 100 anos	74,7	90,0	49,2
Área de Drenagem (km²)	59,3	101,0	69,8
Coeficiente de Fuller	1,78	1,67	1,74
$Q_{\text{máx,inst}}$ - TR 2 anos	51,3	57,6	37,4
$Q_{\text{máx,inst}}$ - TR 5 anos	76,9	81,8	51,3
$Q_{\text{máx,inst}}$ - TR 10 anos	91,9	98,0	60,0
$Q_{\text{máx,inst}}$ - TR 20 anos	105,4	113,7	68,1
$Q_{\text{máx,inst}}$ - TR 50 anos	121,6	134,3	78,3
$Q_{\text{máx,inst}}$ - TR 100 anos	133,1	149,9	85,8

É possível perceber que as vazões máximas em Piller são bem inferiores às ajustadas em Macaé de Cima, tendo as duas apresentado boa correlação entre a distribuição estatística e os valores empíricos. A estação Piller possui área de drenagem 17,7% maior que a estação Macaé de Cima (69,8 km² contra 59,3 km²) e, ainda, a estação pluviométrica Piller apresenta precipitação total anual superior às demais estações pluviométricas da parte alta da bacia, conforme visto no item III. 2.

Atribui-se esta diferença nas vazões máximas da estação Piller à curva-chave da mesma. No item IV.1.1 foi possível perceber que a extrapolação para níveis máximos é muito alta, cerca de 1,50 m. Ou seja, como não há medições de descarga líquida para vazões altas, este tramo da curva pode não estar sendo bem representado, de modo a subestimar as vazões máximas nesta estação.

Além disso, destaca-se que, conforme visto no item III. 6, os dados diários da estação Macaé de Cima foram considerados suspeitos de inconsistência no estudo da CPRM (2002).

Ainda assim, as vazões máximas calculadas por ajuste estatístico para estas estações serão comparadas com os resultados obtidos pelo método do Hidrograma Unitário Triangular e com outros estudos.

V. 2 – Vazões máximas obtidas pelo método HUT

Neste item serão apresentados os valores de vazão máxima calculados pelo método do Hidrograma Unitário Triangular do SCS para os mesmos tempos de recorrência do item anterior (2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos). Para cada estação serão apresentados, ainda, os valores de declividade equivalente, CN médio e percentual de área coberta por vegetação, necessários à aplicação do método proposto. Foram calculadas também as vazões máximas para a foz do rio Macaé, para comparação com os outros estudos anteriormente apresentados.

Os hidrogramas completos de cheia para as diferentes estações fluviométricas analisadas serão apresentados no Anexo II deste trabalho.

V. 2.1 - Macaé de Cima

Para a elaboração dos hidrogramas de cheia na estação fluviométrica Macaé de Cima utilizou-se, além dos índices fluviomorfológicos apresentados no item III. 5, os dados sintetizados na Tabela 29 abaixo.

Tabela 29: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica Macaé de Cima

Declividade equivalente (m/m)	0,0191
CN médio	56,3
% de vegetação	98

A Tabela 30, abaixo, sintetiza as vazões máximas instantâneas calculadas para os diferentes tempos de retorno.

Tabela 30: Vazões máximas na estação fluviométrica Macaé de Cima

Tempo de Recorrência (anos)	Vazão máxima (m³/s)
2	18,56
5	39,44
10	58,92
20	83,38
50	125,00
100	166,40

V. 2.2 - Galdinópolis

Para a elaboração dos hidrogramas de cheia na estação fluviométrica Galdinópolis utilizou-se, além dos índices fluviomorfológicos apresentados no item III. 5, os dados sintetizados na Tabela 31 abaixo.

Tabela 31: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica Galdinópolis

Declividade equivalente (m/m)	0,0149
CN médio	56,6
% de vegetação	96

A Tabela 32, abaixo, sintetiza as vazões máximas calculadas para os diferentes tempos de retorno.

Tabela 32: Vazões máximas na estação fluviométrica Galdinópolis

Tempo de Recorrência (anos)	Vazão máxima (m³/s)
2	24,68
5	51,22
10	76,71
20	109,50
50	168,11
100	228,02

V. 2.3 - Piller

Para a elaboração dos hidrogramas de cheia na estação fluviométrica Piller utilizou-se, além dos índices fluviomorfológicos apresentados no item III. 5, os dados sintetizados na Tabela 33 abaixo.

Tabela 33: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica Piller

Declividade equivalente (m/m)	0,0162
CN médio	55,9
% de vegetação	97

A Tabela 34, abaixo, sintetiza as vazões máximas calculadas para os diferentes tempos de retorno.

Tabela 34: Vazões máximas na estação fluviométrica Piller

Tempo de Recorrência (anos)	Vazão máxima (m³/s)
2	20,21
5	42,46
10	63,50
20	90,19
50	137,01
100	183,00

V. 2.4 - São Romão

Para a elaboração dos hidrogramas de cheia na estação fluviométrica São Romão utilizou-se, além dos índices fluviomorfológicos apresentados no item III. 5, os dados sintetizados na Tabela 35 abaixo.

Tabela 35: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica São Romão

Declividade equivalente (m/m)	0,0189
CN médio	59,8
% de vegetação	91

A Tabela 36, abaixo, sintetiza as vazões máximas calculadas para os diferentes tempos de retorno.

Tabela 36: Vazões máximas na estação fluviométrica São Romão

Tempo de Recorrência (anos)	Vazão máxima (m³/s)
2	75,88
5	158,45
10	204,88
20	283,60
50	420,90
100	556,88

V. 2.5 - Barra do Sana

Para a elaboração dos hidrogramas de cheia na estação fluviométrica Barra do Sana utilizou-se, além dos índices fluviomorfológicos apresentados no item III. 5, os dados sintetizados na Tabela 37 abaixo.

Tabela 37: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica Barra do Sana

Declividade equivalente (m/m)	0,0250
CN médio	65,9
% de vegetação	83

A Tabela 38, abaixo, sintetiza as vazões máximas calculadas para os diferentes tempos de retorno.

Tabela 38: Vazões máximas na estação fluviométrica Barra do Sana

Tempo de Recorrência (anos)	Vazão máxima (m³/s)
2	48,23
5	90,16
10	129,68
20	181,43
50	277,35
100	379,44

V. 2.6 - Ponte do Baião

Para a elaboração dos hidrogramas de cheia na estação fluviométrica Ponte do Baião utilizou-se, além dos índices fluviomorfológicos apresentados no item III. 5, os dados sintetizados na Tabela 39 abaixo.

Tabela 39: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica Ponte do Baião

Declividade equivalente (m/m)	0,0095
CN médio	62,1
% de vegetação	86

A Tabela 40, abaixo, sintetiza as vazões máximas calculadas para os diferentes tempos de retorno.

Tabela 40: Vazões máximas na estação fluviométrica Ponte do Baião

Tempo de Recorrência (anos)	Vazão máxima (m³/s)
2	117,48
5	248,39
10	311,58
20	439,35
50	682,25
100	943,32

V. 2.7 - Fazenda Airis

Para a elaboração dos hidrogramas de cheia na estação fluviométrica Fazenda Airis utilizou-se, além dos índices fluviomorfológicos apresentados no item III. 5, os dados sintetizados na Tabela 41 abaixo.

Tabela 41: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica Fazenda Airis

Declividade equivalente (m/m)	0,0071
CN médio	62,0
% de vegetação	83

A Tabela 42, abaixo, sintetiza as vazões máximas calculadas para os diferentes tempos de retorno.

Tabela 42: Vazões máximas na estação fluviométrica Fazenda Airis

Tempo de Recorrência (anos)	Vazão máxima (m³/s)
2	138,12
5	293,13
10	366,40
20	515,63
50	794,85
100	1.096,01

V. 2.8 - Jusante BR-101

Para a elaboração dos hidrogramas de cheia na estação fluviométrica Jusante BR-101 utilizou-se, além dos índices fluviomorfológicos apresentados no item III. 5, os dados sintetizados na Tabela 43 abaixo.

Tabela 43: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica Jusante BR-101

Declividade equivalente (m/m)	0,0058
CN médio	62,4
% de vegetação	81

A Tabela 44, abaixo, sintetiza as vazões máximas calculadas para os diferentes tempos de retorno.

Tabela 44: Vazões máximas na estação fluviométrica Jusante BR-101

Tempo de Recorrência (anos)	Vazão máxima (m³/s)
2	126,59
5	262,59
10	348,40
20	493,99
50	768,99
100	1.069,01

V. 2.9 - Glicério

Para a elaboração dos hidrogramas de cheia na estação fluviométrica Glicério utilizou-se, além dos índices fluviomorfológicos apresentados no item III. 5, os dados sintetizados na Tabela 45 abaixo.

Tabela 45: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica Glicério

Declividade equivalente (m/m)	0,0497
CN médio	71,66
% de vegetação	72

A Tabela 46, abaixo, sintetiza as vazões máximas calculadas para os diferentes tempos de retorno.

Tabela 46: Vazões máximas na estação fluviométrica Glicério

Tempo de Recorrência (anos)	Vazão máxima (m³/s)
2	45,89
5	81,94
10	116,51
20	163,17
50	253,23
100	352,12

V. 2.10 - São Pedro

Para a elaboração dos hidrogramas de cheia na estação fluviométrica São Pedro utilizou-se, além dos índices fluviomorfológicos apresentados no item III. 5, os dados sintetizados na Tabela 47 abaixo.

Tabela 47: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na estação fluviométrica São Pedro

Declividade equivalente (m/m)	0,0093
CN médio	66,7
% de vegetação	72

A Tabela 48, abaixo, sintetiza as vazões máximas calculadas para os diferentes tempos de retorno.

Tabela 48: Vazões máximas na estação fluviométrica São Pedro

Tempo de Recorrência (anos)	Vazão máxima (m³/s)
2	79,59
5	156,36
10	236,17
20	350,21
50	583,00
100	850,84

V. 2.11 - Foz do rio Macaé

Para a elaboração dos hidrogramas de cheia na foz do rio Macaé utilizou-se, além dos índices fluviomorfológicos apresentados no item III. 5, os dados sintetizados na Tabela 49 abaixo.

Tabela 49: Dados de entrada para o cálculo do hidrograma de cheia na foz do rio Macaé

Declividade equivalente (m/m)	0,0046
CN médio	64,5
% de vegetação	71

A Tabela 50, abaixo, sintetiza as vazões máximas calculadas para os diferentes tempos de retorno.

Tabela 50: Vazões máximas na foz do rio Macaé

Tempo de Recorrência (anos)	Vazão máxima (m³/s)
2	208,01
5	472,12
10	537,33
20	716,37
50	1.018,49
100	1.312,93

V. 3 – Comparação entre estudos de vazões máximas disponíveis

Neste item as vazões máximas calculadas pelo método do Hidrograma Unitário Triangular serão confrontadas com as diferentes estimativas de vazões máximas anteriormente descritas neste trabalho. Para as estações antigas, da ANA, com longas séries de dados diários, serão apresentados também os resultados do ajuste de distribuição estatística corrigidos para vazão instantânea pelo coeficiente de Fuller.

A metodologia de regionalização de vazões máximas (CPRM, 2002), limitada a áreas de drenagem entre 22 e 597 km² foi aplicada às estações: Macaé de Cima, Galdinópolis, Piller, São Romão, Barra do Sana, Glicério e São Pedro.

O estudo de cheias, realizado pela FGV (2004), por focar especificamente sobre o núcleo urbano da cidade de Macaé, apresenta vazões máximas calculadas em

diferentes pontos na parta baixa da bacia. Para este trabalho, serão comparados apenas os resultados calculados na estação Jusante BR-101 e na foz do rio Macaé.

Já o Plano de Recursos Hídricos (INEA, 2013), mais completo e abrangente, apresenta vazões máximas calculadas em diversos pontos da bacia, incluindo todas as estações fluviométricas - à exceção da estação Glicério, no rio São Pedro.

Os valores de vazões máximas calculados com base na metodologia de regionalização da CPRM e os apresentados no Plano de Recursos Hídricos foram corrigidas também com o coeficiente de Fuller para conversão da vazão máxima diária em vazão máxima instantânea e comparação com os valores calculados pelo método do Hidrograma Unitário Triangular.

V. 3.1 - Macaé de Cima

Os resultados de vazões máximas instantâneas para diferentes tempos de recorrência na estação fluviométrica Macaé de Cima são apresentados na Tabela 51 abaixo.

Destaca-se, novamente, que, como comentado no item V. 1.4, o ajuste de vazões máximas para a estação Macaé de Cima pode ser impreciso devido a suspeita de inconsistência de seus dados fluviométricos diários.

Tabela 51: Comparação entre os resultados obtidos para a estação Macaé de Cima

Tempo de Recorrência	Hidrograma Unitário Triangular	Ajuste de Distribuição Estatística	Regionalização CPRM, 2001	Plano de RH INEA, 2013
2 anos	18,56	51,30	41,35	44,50
5 anos	39,44	76,90	61,16	71,20
10 anos	58,92	91,90	75,48	89,00
20 anos	83,38	105,40	89,45	106,80
50 anos	125,00	121,60	110,34	129,94
100 anos	166,40	133,10	126,47	-

Pela tabela é possível perceber que o método do Hidrograma Unitário Triangular apresentou resultado próximo aos demais estudos para tempo de recorrência de 50 anos, apresentando desvios de +2,8%, +13,3% e -3,8% em relação ao ajuste estatístico, à regionalização de vazões (CPRM, 2001) e ao Plano de Recursos Hídricos (INEA, 2013), respectivamente.

Por outro lado, o método apresentou valores bem divergentes aos demais estudos para tempos de recorrência baixos. Os maiores desvios ocorreram para TR = 2 anos, sendo de -63,8%, -55,1% e -58,3%, respectivamente.

A Figura 24, abaixo, apresenta uma comparação direta entre as vazões calculadas pelo Hidrograma Unitário Triangular e pelo ajuste de distribuição estatística.

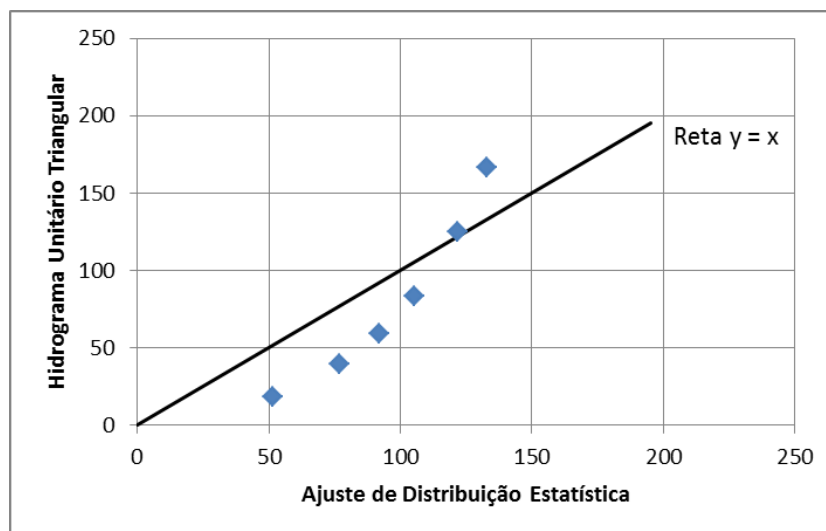


Figura 23: Comparação entre as vazões calculadas para a estação Macaé de Cima pelo método HUT e por ajuste estatístico

Observou-se ainda, nesta estação, que o pico do hidrograma de cheia ocorre 6 horas após o início da precipitação. Entretanto, o tempo de concentração da bacia, calculado pela equação de George Ribeiro, é de aproximadamente 5 horas. Ou seja, para esta bacia, houve uma subestimação do valor de CN médio, de modo que a precipitação efetiva tardou para ocorrer, subestimando a vazão de pico conforme pôde ser observado especialmente em tempos de retorno mais baixos.

Os resultados obtidos através do ajuste estatístico foram bem próximos dos calculados no Plano de Recursos Hídricos, porém apresentando valores ligeiramente mais conservadores do que estes para tempos de recorrência baixos (+15,3% para TR = 2 anos). Esta diferença pode ser justificada, além da consistência dos dados da estação Macaé de Cima, pela série de vazões anuais utilizada no plano - que foi a série de vazões calculadas pela modelagem MGB-IPH - e pela distribuição estatística utilizada.

V. 3.2 - Galdinópolis

Os resultados de vazões máximas instantâneas para diferentes tempos de recorrência na estação fluviométrica Galdinópolis são apresentados na Tabela 52 abaixo.

Tabela 52: Comparação entre os resultados obtidos para a estação Galdinópolis

Tempo de Recorrência	Hidrograma Unitário Triangular	Ajuste de Distribuição Estatística	Regionalização CPRM, 2001	Plano de RH INEA, 2013
2 anos	24,68	57,60	66,84	63,31
5 anos	51,22	81,80	98,86	98,30
10 anos	76,71	98,00	122,00	121,63
20 anos	109,50	113,70	144,58	144,96
50 anos	168,11	134,30	178,35	173,28
100 anos	228,02	149,90	204,43	-

Pela tabela é possível perceber que o método do Hidrograma Unitário Triangular apresentou resultado próximo aos demais estudos para tempo de recorrência de 50 anos, apresentando desvios de +25,2%, -5,7% e -3,0% em relação ao ajuste estatístico, à regionalização de vazões (CPRM, 2001) e ao Plano de Recursos Hídricos (INEA, 2013), respectivamente.

Por outro lado, o método apresentou valores bem divergentes aos demais estudos para tempos de recorrência baixos. Os maiores desvios ocorreram para TR = 2 anos, sendo de -57,2%, -38,5% e -35,1%, respectivamente.

A Figura 25, abaixo, apresenta uma comparação direta entre as vazões calculadas pelo Hidrograma Unitário Triangular e pelo ajuste de distribuição estatística.

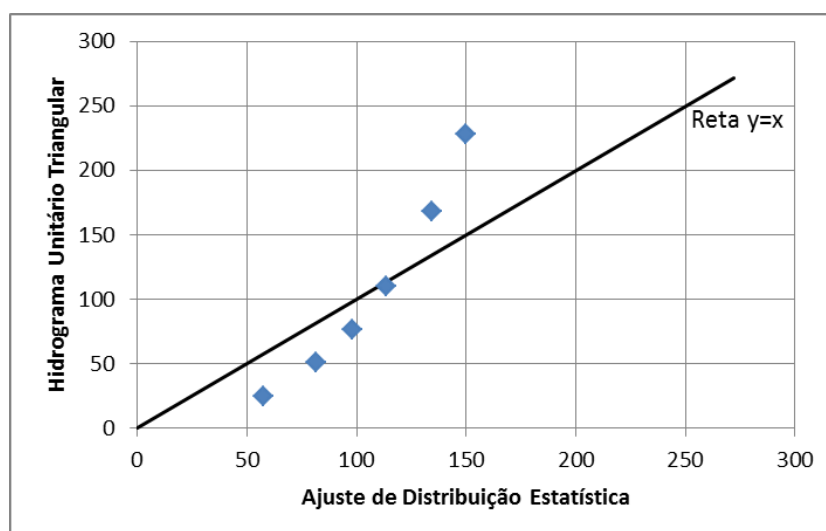


Figura 24: Comparação entre as vazões calculadas para a estação Galdinópolis

Assim como na estação Macaé de Cima, observou-se em Galdinópolis que o pico do hidrograma de cheia gerado pelo método ocorria cerca de 10 horas após o início da precipitação - 1,4 horas a mais que o tempo de concentração da bacia calculado pela formulação de George Ribeiro. Por este motivo, conclui-se que novamente houve uma subestimação do valor de *CN* médio para a bacia, de modo que a precipitação efetiva tardou para ocorrer e as vazões máximas instantâneas, especialmente para tempos de retorno mais baixos, foram subestimadas.

Os resultados obtidos através do ajuste estatístico foram inferiores aos calculados no Plano de Recursos Hídricos, apresentando desvios entre -9,0% e -22,5%. Assim como na estação Macaé de Cima, atribui-se esta diferença à série de vazões anuais utilizada no Plano - que foi calculada pela modelagem MGB-IPH - e à distribuição estatística utilizada.

V. 3.3 - Piller

Os resultados de vazões máximas instantâneas para diferentes tempos de recorrência na estação fluviométrica Piller são apresentados na Tabela 53 abaixo.

Tabela 53: Comparação entre os resultados obtidos para a estação Piller

Tempo de Recorrência	Hidrograma Unitário Triangular	Ajuste de Distribuição Estatística	Regionalização CPRM, 2001	Plano de RH INEA, 2013
2 anos	20,21	37,40	47,90	40,12
5 anos	42,46	51,30	70,84	69,77
10 anos	63,50	60,00	87,42	88,96
20 anos	90,19	68,10	103,61	108,14
50 anos	137,01	78,30	127,81	130,82
100 anos	183,00	85,80	146,49	-

Pela tabela é possível perceber que o método do Hidrograma Unitário Triangular apresentou resultado próximo aos outros estudos para TR = 50 anos, com desvios de +7,2% em relação ao estudo de CPRM (2001) e +4,7% em relação ao Plano de Recursos Hídricos (INEA, 2013). Entretanto, neste mesmo TR observou-se desvio de +75,0% em relação à vazão máxima calculada por ajuste de distribuição estatística.

A Figura 26, abaixo, apresenta uma comparação direta entre as vazões calculadas pelo Hidrograma Unitário Triangular e pelo ajuste de distribuição estatística. É possível perceber que as vazões calculadas pelo método HUT aderiram mais ao ajuste estatístico para tempos de recorrência baixos, até 10 anos.

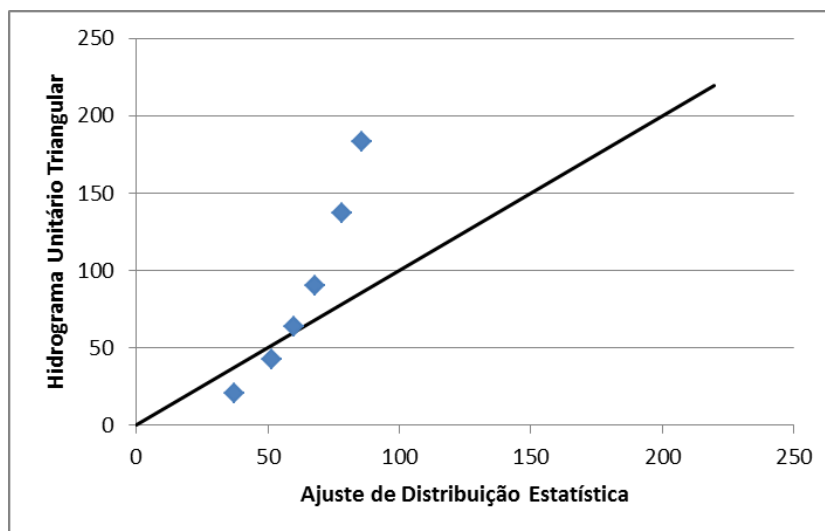


Figura 25: Comparação entre as vazões calculadas para a estação Piller

Ao contrário das estações Macaé de Cima e Galdinópolis, em Piller o pico de vazão do hidrograma de cheia se deu 3,5 horas após o início da precipitação, 2,8 horas antes do tempo de concentração da bacia calculado pela equação de George Ribeiro. Tal fato sugere que o *CN* médio desta bacia pode estar superestimado, antecipando a ocorrência da Precipitação Efetiva e do pico de vazão máxima.

Os resultados obtidos através do ajuste estatístico foram consideravelmente inferiores aos calculados no Plano de Recursos Hídricos, apresentando desvios entre -46,6% e -65,7%. Os maiores desvios podem ser justificados pela metodologia adotada na elaboração da modelagem MGB-IPH, que calibrou e validou o modelo a partir da estação de Galdinópolis, localizada em outra vertente em relação ao rio Bonito, onde se situa a estação Piller.

V. 3.4 - São Romão

Os resultados de vazões máximas instantâneas para diferentes tempos de recorrência na estação fluviométrica São Romão são apresentados na Tabela 54 abaixo.

Tabela 54: Comparação entre os resultados obtidos para a estação São Romão

Tempo de Recorrência	Hidrograma Unitário Triangular	Regionalização CPRM, 2001	Plano de RH INEA, 2013
2 anos	75,88	202,64	-
5 anos	158,45	299,70	-
10 anos	204,88	369,85	336,66
20 anos	283,60	438,31	396,68
50 anos	420,90	540,69	472,79
100 anos	556,88	619,75	-

Pela tabela é possível perceber que o método do Hidrograma Unitário Triangular apresentou resultados inferiores ao estudo de CPRM (2001) e ao Plano de Recursos Hídricos (INEA, 2013). Os desvios em relação ao Plano foram de -39,1%, -28,5% e -11,0% para tempos de retorno de 10, 20 e 50 anos, respectivamente. Já em relação ao estudo de regionalização de vazões máximas, os desvios variaram de -62,2%, para TR = 2 anos, a -10,1%, para TR = 100 anos.

É importante destacar que o estudo de regionalização da CPRM conta com uma estação fluviométrica com área de drenagem muito próxima à de São Romão (Quizanga, código ANA: 59245000, AD: 352 km²) e, no estudo, a vazão média de cheia (Q_{MC}) desta estação foi superestimada em 71,4%. Assim, já era esperado que as vazões máximas regionalizadas pela metodologia da CPRM fossem mais elevadas para locais com áreas de drenagem nesta faixa de valor.

O hidrograma de cheia em São Romão mostrou que o pico instantâneo de vazão ocorreu muito perto do tempo de concentração da bacia. O pico do hidrograma foi alcançado 17,5 horas após o início da precipitação, enquanto o tempo de concentração da bacia - calculado pela equação de George Ribeiro - é de 16,4 horas. Tal fato indica a acurácia do modelo no formato do hidrograma ascendente de cheia.

V. 3.5 - Barra do Sana

Os resultados de vazões máximas instantâneas para diferentes tempos de recorrência na estação fluviométrica Barra do Sana são apresentados na Tabela 55 abaixo.

Tabela 55: Comparação entre os resultados obtidos para a estação Barra do Sana

Tempo de Recorrência	Hidrograma Unitário Triangular	Regionalização CPRM, 2001	Plano de RH INEA, 2013
2 anos	48,23	71,03	-
5 anos	90,16	105,05	-
10 anos	129,68	129,64	109,09
20 anos	181,43	153,64	128,93
50 anos	277,35	189,52	153,72
100 anos	379,44	217,24	-

Pela tabela é possível perceber que o método do Hidrograma Unitário Triangular apresentou resultados muito próximos ao estudo de CPRM (2001) para TR = 10. Para tempos de retorno mais baixos as vazões calculadas foram menores (desvios de -32,1% e -14,2%) e para tempos de retorno mais altos as vazões calculadas pelo método foram bem superiores às calculadas pela metodologia da CPRM, apresentando desvios de +18,1% a +74,7%, referentes aos tempos de retorno de 20 e 100 anos, respectivamente.

Em comparação com as vazões máximas apresentadas no Plano de Recursos Hídricos (INEA, 2013), as vazões calculadas foram maiores e apresentaram desvios de +18,9%, +40,7% e +80,4%, referentes aos tempos de recorrência de 10, 20 e 50 anos, respectivamente.

O hidrograma de cheia em Barra do Sana mostrou que o pico instantâneo de vazão ocorreu muito perto do tempo de concentração da bacia. O pico do hidrograma foi alcançado 6,7 horas após o início da precipitação, enquanto o tempo de concentração da bacia - calculado pela equação de George Ribeiro - é de 6,3 horas.

V. 3.6 - Ponte do Baião

Os resultados de vazões máximas instantâneas para diferentes tempos de recorrência na estação fluviométrica Ponte do Baião são apresentados na Tabela 56 abaixo.

Tabela 56: Comparação entre os resultados obtidos para a estação Ponte do Baião

Tempo de Recorrência	Hidrograma Unitário Triangular	Plano de RH INEA, 2013
2 anos	117,48	-
5 anos	248,39	-

Tempo de Recorrência	Hidrograma Unitário Triangular	Plano de RH INEA, 2013
10 anos	311,58	478,91
20 anos	439,35	560,34
50 anos	682,25	665,23
100 anos	943,32	-

Pela tabela é possível perceber que, para TR = 50 anos, a vazão calculada pelo método do Hidrograma Unitário Triangular foi muito próxima da calculada no Plano de Recursos Hídricos para o mesmo tempo de retorno, apresentando desvio de apenas +2,5%. Por outro lado, os tempos de retorno menores geraram vazões menores que as calculadas no Plano, apresentando desvios de -34,9%, para TR = 10 anos, e -21,6%, para TR = 20 anos.

A análise do hidrograma de cheia gerado pelo método mostrou que o pico de vazão foi atingido 30,3 horas após o início da precipitação, quando o tempo de concentração foi calculado em 28,4 horas. Esta defasagem de +6,7% indica novamente que o método apresentou bom resultado quanto à ascensão da cheia na estação fluviométrica.

Mais uma vez, destaca-se que a modelagem realizada no Plano de Recursos Hídricos foi realizada com base na estação Galdinópolis, cuja área de drenagem é menor que um sexto da área de drenagem da estação Ponte do Baião. Ainda, a estação Galdinópolis situa-se na cabeceira da bacia do rio Macaé, onde as declividades e tipos de solo são diferentes dos observados nas porções média e baixa da bacia. Como a estação Ponte do Baião está situada numa região de transição entre as partes alta e baixa da bacia, espera-se, naturalmente, que as vazões calculadas pela modelagem neste local não sejam tão precisas quanto às calculadas nas estações situadas mais a montante.

V. 3.7 - Fazenda Airis

Os resultados de vazões máximas instantâneas para diferentes tempos de recorrência na estação fluviométrica Fazenda Airis são apresentados na Tabela 57 abaixo.

Tabela 57: Comparação entre os resultados obtidos para a estação Fazenda Airis

Tempo de Recorrência	Hidrograma Unitário Triangular	Plano de RH INEA, 2013
2 anos	138,12	-
5 anos	293,13	-
10 anos	366,40	597,15
20 anos	515,63	701,18
50 anos	794,85	833,57
100 anos	1096,01	-

Pela tabela é possível perceber que, para TR = 50 anos, a vazão calculada pelo método do Hidrograma Unitário Triangular foi muito próxima da calculada no Plano de Recursos Hídricos para o mesmo tempo de retorno, apresentando desvio de apenas -4,6%. Por outro lado, os tempos de retorno menores geraram vazões menores que as calculadas no Plano, apresentando desvios de -38,6%, para TR = 10 anos, e -26,5%, para TR = 20 anos.

A análise do hidrograma de cheia gerado pelo método mostrou que o pico de vazão ocorreu 35,1 horas após o início da precipitação, quando o tempo de concentração da bacia foi calculado em 32,9 horas. Como as estações de chuva e os valores de declividade equivalente e CN médio foram muito próximos para a estação Fazenda Airis e para a estação Ponte do Baião, esperava-se um desvio semelhante em relação ao formato do hidrograma, conforme pôde ser observado.

A estação Fazenda Airis situa-se já na área de planície onde o rio Macaé é retificado. Desta maneira, espera-se que os desvios entre as vazões máximas modeladas no Plano de Recursos Hídricos e as observadas no local sejam ainda maiores. Ainda, a geografia de planície permite extravasamentos da calha que reduzem o pico da cheia, tornando as vazões calculadas pelo Plano superestimadas (INEA, 2013).

V. 3.8 - Jusante BR-101

Os resultados de vazões máximas instantâneas para diferentes tempos de recorrência na estação fluviométrica Jusante BR-101 são apresentados na Tabela 58 abaixo.

Tabela 58: Comparação entre os resultados obtidos para a estação Jusante BR-101

Tempo de Recorrência	Hidrograma Unitário Triangular	Estudo de Cheias FGV,2004	Plano de RH INEA, 2013
2 anos	126,59	196,00	306,83
5 anos	262,59	293,00	448,85
10 anos	348,40	357,00	541,30
20 anos	493,99	418,00	631,07
50 anos	768,99	-	747,64
100 anos	1069,01	-	-

Pela tabela é possível perceber que as vazões calculadas pelo método do Hidrograma Unitário Triangular são próximas das calculadas no estudo de FGV (2004), especialmente para os tempos de recorrência de 5 e 10 anos (desvios de -10,4% e -2,4%, respectivamente). Para TR = 2 anos, a vazão calculada foi 35,4% menor que a do estudo de cheias do FGV e, para TR = 20 anos, foi 18,2% maior.

Em relação às vazões máximas modeladas no Plano de Recursos Hídricos, as vazões calculadas foram todas inferiores, com exceção da vazão máxima para TR = 50 anos. Coincidentemente, para este tempo de retorno as vazões foram as mais próximas, apresentando desvio de +2,9%. Para TRs menores, os desvios foram de -58,7% a -21,7%, referentes aos tempos de retorno de 2 e 20 anos.

Como a estação Fazenda Airis, a estação Jusante BR-101 se situa na região de planície da bacia, onde o rio Macaé já é retificado. Assim, da mesma maneira, espera-se que as vazões calculadas no Plano sejam superestimadas, por não considerar inundações da calha que amortecem a vazão de cheia. No método do Hidrograma Unitário Triangular, a utilização da declividade equivalente (mais suave que a declividade média), inclui, indiretamente, a geografia de planície no cálculo da vazão máxima, ao aumentar o tempo de concentração e, conseqüentemente, reduzir o pico de vazão máxima.

A análise do hidrograma de cheia gerado pelo método também apresentou um deslocamento de +6,7% no tempo de ocorrência do pico de vazão máxima - 39,1 horas após o início da precipitação, enquanto o tempo de concentração foi calculado em 36,6 horas.

V. 3.9 - Glicério

Os resultados de vazões máximas instantâneas para diferentes tempos de recorrência na estação fluviométrica Glicério são apresentados na Tabela 59 abaixo.

Tabela 59: Comparação entre os resultados obtidos para a estação Glicério

Tempo de Recorrência	Hidrograma Unitário Triangular	Regionalização CPRM, 2001
2 anos	45,89	35,50
5 anos	81,94	52,50
10 anos	116,51	64,79
20 anos	163,17	76,79
50 anos	253,23	94,72
100 anos	352,12	108,57

Pela tabela é possível perceber que todas as vazões calculadas pelo método do Hidrograma Unitário para a estação Glicério foram superiores em relação à metodologia de regionalização de CPRM (2001). Os desvios variaram de +29,3% a +224,3%, para os tempos de retorno de 2 e 100 anos, respectivamente.

O hidrograma de cheia desta estação mostrou que o pico de vazão ocorreu após 3,4 horas do início da precipitação, quando o tempo de concentração da bacia é de 3,3 horas, pela formulação de George Ribeiro, indicando assim uma boa acurácia do método para a ascensão do hidrograma de cheia.

Por outro lado, as vazões muito elevadas são justificadas pelo *CN* médio da bacia, que foi muito superior aos definidos para os outros locais estudados, resultando em maiores vazões máximas específicas.

V. 3.10 - São Pedro

Os resultados de vazões máximas instantâneas para diferentes tempos de recorrência na estação fluviométrica São Pedro são apresentados na Tabela 60 abaixo.

Tabela 60: Comparação entre os resultados obtidos para a estação São Pedro

Tempo de Recorrência	Hidrograma Unitário Triangular	Regionalização CPRM, 2001	Plano de RH INEA, 2013
2 anos	79,59	186,74	-
5 anos	156,36	276,19	-
10 anos	236,17	340,84	199,28
20 anos	350,21	403,94	233,23
50 anos	583,00	498,28	277,51
100 anos	850,84	571,15	-

Pela tabela é possível perceber que as vazões calculadas pelo método do Hidrograma Unitário Triangular foram superiores às apresentadas no Plano de Recursos Hídricos (INEA, 2013). Nesta comparação, os desvios variaram de +18,5% a +110,1%, para os tempos de recorrência de 10 e 50 anos, respectivamente.

Em comparação com o estudo de regionalização de vazões máximas da CPRM, o método apresentou desvios de -57,4% a +49,0% para os TRs de 2 e 100 anos, respectivamente. Os tempos de retorno de 20 e 50 anos apresentaram os menores desvios, de -13,3% e +17,0%, respectivamente.

O hidrograma de cheia desta estação mostrou que o pico de vazão ocorreu após 11,9 horas do início da precipitação, quando o tempo de concentração da bacia é de 11,2 horas, pela formulação de George Ribeiro, indicando assim uma boa acurácia do método para a ascensão do hidrograma de cheia.

V. 3.11 - Foz do rio Macaé

Finalmente, os resultados de vazões máximas instantâneas para diferentes tempos de recorrência na foz do rio Macaé são apresentados na Tabela 61 abaixo.

Tabela 61: Comparação entre os resultados obtidos para a foz do rio Macaé

Tempo de Recorrência	Hidrograma Unitário Triangular	Estudo de Cheias FGV, 2004	Plano de RH INEA, 2013
2 anos	208,01	309,00	396,26
5 anos	472,12	462,00	568,10
10 anos	537,33	563,00	682,23
20 anos	716,37	661,00	791,24
50 anos	1018,49	-	932,30
100 anos	1312,93	-	-

Pela tabela é possível perceber que as vazões calculadas pelo método do Hidrograma Unitário Triangular são próximas das calculadas no estudo de FGV (2004), especialmente para os tempos de recorrência de 5, 10 e 20 anos (desvios de +2,2%, -4,6% e +8,4%, respectivamente). Para TR = 2 anos, a vazão calculada foi 32,7% menor que a do estudo de cheias do FGV.

Em relação às vazões máximas modeladas no Plano de Recursos Hídricos, as vazões calculadas foram todas inferiores, com exceção da vazão máxima para TR = 50 anos. Coincidentemente, para este tempo de retorno as vazões foram as mais próximas, apresentando desvio de +9,2%. Para tempos de recorrência menores, os desvios foram de -47,5% a -9,5%, referentes aos tempos de retorno de 2 e 20 anos, respectivamente.

Como já comentado anteriormente nos resultados das estações Fazenda Airis e Jusante BR-101, a parte baixa da bacia do rio Macaé é uma grande área de planície de inundação, tendo ainda o canal principal retificado. Assim, da mesma maneira, espera-se que as vazões calculadas no Plano sejam superestimadas, por não considerar inundações da calha que amortecem a vazão de cheia. No método do Hidrograma Unitário Triangular, a utilização da declividade equivalente (mais suave que a bruta), inclui, indiretamente, a geografia de planície no cálculo da vazão máxima, aumentando o tempo de concentração e, conseqüentemente, reduzindo o valor da vazão máxima instantânea calculada.

CAPÍTULO VI – CONCLUSÃO

A bacia do Macaé, em especial o seu núcleo urbano - densamente habitado -, sofre frequentemente com as enchentes do seu curso d'água principal. Neste contexto, foram identificados diversos eventos de cheia com danos para os moradores da cidade, em especial na última década. Segundo Tucci (2004), a estimativa de vazões máximas possui importância fundamental na determinação dos custos e da segurança dos projetos de engenharia.

Neste sentido, procedeu-se à determinação de vazões máximas instantâneas para as estações fluviométricas ativas na bacia e também para a foz do rio Macaé. Para as estações com longas séries de dados, realizou-se, além do Hidrograma Unitário Triangular, ajuste de distribuições estatísticas para comparação dos resultados obtidos.

Especialmente para as estações fluviométricas recentes, com curta série de dados observados, estas informações são fundamentais para o planejamento de recursos hídricos em situações de cheia. Além dos próprios valores de vazão máxima, os hidrogramas completos de cheia - apresentados no Anexo II - também são importantes, aplicáveis a simulações e modelagens hidrodinâmicas que subsidiam projetos de macrodrenagem e outras estruturas de contenção ou amortização de cheias.

Embora de simples aplicação, o método não foi capaz de, para uma mesma estação ou local, apresentar resultados próximos ao ajuste estatístico para todos os tempos de retorno. Ora se apresentava melhor para TRs mais baixos ou mais altos, conforme a estação. Por este motivo, sugere-se a aplicação do método apenas em locais com ausência ou baixa disponibilidade de dados fluviométricos consistentes. Quando existentes, estes dados devem ser priorizados.

A comparação dos resultados com as vazões modeladas no Plano de Recursos Hídricos mostrou boa semelhança para TR = 50 anos, o que pode ser atribuído como um ponto positivo para o método utilizado. As maiores diferenças, observadas principalmente para vazões máximas de tempos de retorno baixos (2, 5 e 10 anos), indicam que o método, por ser simples, não caracteriza de maneira adequada a separação da precipitação, geralmente subestimando a parcela de escoamento superficial nestes tempos de retorno.

Tal fato está diretamente ligado à abstração inicial considerada pelo modelo. Isto é, considerar a abstração inicial como 20% do valor do parâmetro S pode não ser adequado para as bacias hidrográficas brasileiras, conforme sugerem Mello *et al*

(2003) e Tassi *et al* (2006). Especialmente em bacias bem florestadas, onde o *CN* médio é relativamente baixo, considerar a abstração inicial como 20% de *S* faz com que se necessite de uma chuva demasiadamente grande para gerar escoamento superficial. Para tempos de retorno mais baixos, este valor pode ter sido um grande responsável pela subestimação das vazões máximas calculadas pelo método, quando comparadas com as vazões calculadas por ajuste estatístico e demais estudos apresentados.

Para as estações da planície - Fazenda Airis e Jusante BR-101 - e também para a foz do rio Macaé, os valores calculados foram inferiores aos apresentados no Plano de Recursos Hídricos, o que pôde ser atribuído à utilização da declividade equivalente no método e à modelagem realizada no Plano, que foi realizada com base numa estação localizada bem a montante, ainda na região serrana. Conforme mencionado neste trabalho e em INEA (2013), as vazões máximas calculadas no Plano estão provavelmente superestimadas.

Sobre o método, especificamente, foi possível perceber fortemente a influência do valor de *CN*. Nas estações Glicério e São Pedro - que apresentaram maior valor de *CN* médio da bacia - as vazões calculadas foram mais elevadas que nos demais estudos, especialmente para tempos de retorno altos, de 50 e 100 anos.

Além deste parâmetro, observou-se que a utilização da declividade equivalente, como é utilizada pelo INEA, se corresponde melhor com o perfil longitudinal do curso d'água, especialmente nos locais onde há transição entre sistemas geográficos montanhosos e áreas de planície. A utilização da declividade equivalente resultou em declividades sempre menores que as médias, de modo a aumentar o tempo de concentração calculado e reduzir o pico de vazão instantânea.

Como recomendações e sugestões a futuros trabalhos nesta linha sugerem-se:

- Monitoramento contínuo dos dados telemétricos do Sistema de Alerta de Cheias do INEA: Embora já realizado pelo INEA em parceria com a Defesa Civil, o estudo criterioso destes dados em escala de 15 minutos é fundamental para maior compreensão dos fenômenos hidrológicos da bacia, em especial a determinação de parâmetros como tempo de concentração, fator de decaimento do escoamento superficial e fator de decaimento do escoamento subsuperficial;
- Refinamento do levantamento de uso e cobertura do solo: O mapa de uso e cobertura do solo data de 2008 e foi realizado em escala 1:100.000. Um refinamento desta informação é crucial para a determinação de valores de *CN*

mais fiéis ao observado em campo, tornando o método proposto mais preciso. Além, a partir deste mapa, cenários podem ser elaborados de modo a avaliar o efeito da urbanização e demais alterações da cobertura do solo nas vazões de cheia;

- Validação do método com dados telemétricos: Combinando-se os dois pontos anteriores, recomenda-se a calibração do método a partir dos dados telemétricos disponíveis para as estações do INEA. Isto é, devem ser testados diferentes parâmetros - especialmente a abstração inicial - de modo a conciliar as informações de campo com os dados observados nas estações fluviométricas para tornar o método ainda mais refinado e preciso, principalmente na separação da precipitação;
- Elaboração de um sistema de previsão de cheias: Como observado ao longo deste trabalho, o método do Hidrograma Unitário Triangular reproduz um hidrograma de cheia completo a partir de uma precipitação observada num intervalo de tempo específico. Deste modo, é possível combinar as informações de nível d'água (e correspondente vazão) observada em tempo real com o hidrograma de cheia calculado pelo modelo, de modo a antecipar o alerta emitido à população e, conseqüentemente, tornar mais eficaz este mecanismo, evitando as perdas inerentes às grandes enchentes. Trabalhos como este já foram realizados por Barbosa e Fill (2001) e Curado (2012).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, K.J., 2003, *Estuário do rio Macaé: Modelagem Computacional como Ferramenta para o Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos*. Dissertação M. Sc., COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil

BARBOSA, A.M. e FILL, H.D., 2001, “Modelo de Previsão de Vazão Baseado no Hidrograma Unitário”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Volume 6, n. 4, pp. 165-174.

BERTONI, J. e LOMBARDI NETO, F., 2008, *Conservação do Solo*, 6ª ed. Editora Ícone. São Paulo, Brasil.

BRASIL, 1997, Lei 9.433/1997 - Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasil.

CAL, 2006, *Estudo de Impacto Ambiental do Porto do Açú*. Rio de Janeiro, Brasil.

CAMERON D.S., BEVEN K.J., TAWN J., BLAZKOVA S., NADEN P., 1999, “Flood frequency estimation by continuous simulation for a gauged upland catchment (with uncertainty)”. *Journal of Hydrology*, Volume 219, n. 3, pp. 169-187.

CARVALHO JUNIOR, M.M., 2013, *Metodologia para Determinação das Áreas de Preservação Permanente das Margens de Cursos D'água: Um Estudo de Caso na Bacia do Rio Piabanha*. Dissertação M. Sc., COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.

CARVALHO, V.S.B. e CAVALCANTI, P.M.P.S., 2004, “Formação de Ozônio Troposférico na Região de Macaé-RJ”. *XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Fortaleza. Ceará. Brasil.

COLLISCHONN, W., 2001, *Simulação Hidrológica de Grandes Bacias*, Tese D. Sc., IPH-UFRGS. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

CORDERO, A., MEDEIROS, P.A. e TERAN, A.L., 1999, “Medidas de Controle de Cheias e Erosões”. Centro de Operação do Sistema de Alerta. Universidade Regional de Blumenau. Santa Catarina, Brasil. Disponível em: <http://ceops.furb.br/index.php/publicacoes/artigos/doc_details/5-metodos-controle-cheias-1999>. Acesso em 26/6/2014.

CPRM, 2001, *Estudo de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro*. Serviço Geológico do Brasil. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

CPRM, 2002, Relatório-síntese do trabalho de Regionalização de Vazões da Sub-bacia 59. Serviço Geológico do Brasil. São Paulo, Brasil.

CURADO, M.T., 2012, *Previsão de Cheia em Tempo Real baseada no Hidrograma Unitário*. Trabalho de Conclusão de Curso, Fundação Universidade Regional de Blumenau. Blumenau, Santa Catarina, Brasil.

DNIT, 2005, Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem. Publicação IPR-715. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Ministério dos Transportes. Brasil.

ECOLOGUS, HICON, UTENF, 2011, Relatório Final. Projeto P&D - Assoreamento de Cursos d'Água - Impactos à Geração Termelétrica e Medidas Mitigadoras - O Caso do Rio Macaé.

ECOLOGUS, HICON, UTENF, 2013, Relatório do Monitoramento Hidrossedimentológico. Projeto P&D - Sistema para Previsão de Vazões e Elaboração de Prognósticos sobre Disponibilidade Hídrica e Assoreamento na Bacia do Rio Macaé.

ELETROBRAS, 1987, *Guia para Cálculo de Cheia de Projeto de Vertedouro*. Centrais Elétricas do Brasil. Ministério de Minas e Energia. Brasil.

ELETROBRAS, 2003, *Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas*. Centrais Elétricas Brasileiras. Brasil.

EMBRAPA (2009) *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro, Brasil.

FARIAS JÚNIOR, J.E.F. e BOTELHO, R.G.M., 2011, "Análise Comparativa do Tempo de Concentração: Um Estudo de Caso na Bacia do rio Cônego, Município de Nova Friburgo/RJ". *XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Maceió, Alagoas, Brasil.

FARIAS JÚNIOR, J.E.F., 2010, *Análise do Comportamento do Tempo de Concentração no rio Cônego, no Município de Nova Friburgo/RJ*. Monografia - Curso de Especialização, ENCE/IBGE. Rio de Janeiro, Brasil.

FOLHA, 1998, "Macaé tem 15 mil ilhados pela enchente". Portal Folha de São Paulo. Disponível em <<http://www1.folha.uol.com.br/fsp/cotidian/ff20029842.htm>>. Acesso em 30/06/2014.

GLOBO, 2010, "Chuva causa estragos em Macaé e Rio das Ostras, no RJ". Portal G1 RJ. Disponível em <<http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2010/11/chuva-causa-estragos-em-macae-e-em-rio-das-ostras-no-rj.html>>. Acesso em: 30/06/2014.

GLOBO, 2011, “Com chuvas, Macaé, no Norte do Rio, também está em estado de alerta”. Portal G1. Disponível em <<http://g1.globo.com/rj/serra-lagos-norte/noticia/2012/11/com-chuvas-macaee-no-norte-do-rio-tambem-esta-em-estado-de-alerta.html>>. Acesso em 30/06/2014.

INEA, 2012, Relatório de Caracterização da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras RD-01, Versão Final Revisada. *Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras*. Instituto Estadual do Ambiente. Rio de Janeiro, Brasil.

INEA, 2013, Relatório do Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RD-04) – Apêndice. *Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras*. Instituto Estadual do Ambiente. Rio de Janeiro, Brasil.

INMET, 1992, Normais Climatológicas 1961-1990. Instituto Nacional de Meteorologia.

LIMA, R.N.S. e MARÇAL, M.S., 2013, “Avaliação da Condição Geomorfológica da Bacia do Rio Macaé - RJ a partir da Metodologia de Classificação dos Estilos Fluviais”. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Volume 14, n. 2, pp. 171-179.

MARÇAL, M.S. e ASSUMPÇÃO, A.P., 2012, “Retificação de Canais Fluviais e Mudanças Geomorfológicas na Planície do Rio Macaé”. *Revista de Geografia (UFPE)*, Volume 29, n. 3, pp. 19-36.

MELLO, C.R., LIMA, J.M., SILVA, A.M. e LOPES, D., 2003, “Abstração Inicial da precipitação em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero”. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Volume 7, n. 3, pp. 494-500.

MENDONÇA, F. e DANNI-OLIVEIRA, I.M., 2007, *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil*. Oficina de Textos. São Paulo, Brasil.

NAGHETTINI, M. e PINTO, E.J.A., 2007, *Hidrologia Estatística*, CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

OTTO PFAFSTETTER, 1982, *Chuvas Intensas no Brasil*, 2ª ed. DNOS - Departamento Nacional de Obras de Saneamento. Rio de Janeiro, Brasil.

RIO ÁGUAS, 2010, Instruções Técnicas para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamento Hidráulico de Sistemas de Drenagem Urbana. Subsecretaria de gestão de bacias hidrográficas – Rio Águas, Secretaria Municipal de Obras, Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.

SANTOS, L.C.C., 2010, *Estimativa de Vazões Máximas de Projeto por Modelos Determinísticos e Probabilísticos*. Dissertação M. Sc., PPGEA/UFES. Espírito Santo, Brasil.

SARTORI, A., LOMBARDI NETO, F. e GENOVEZ, A. M., 2005, “Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Volume 10, n. 4, pp. 05-18.

SCS, 1985, *National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology*. U.S. Department of Agriculture. DC, EUA.

SEA, 2008, *Análise e Qualificação Sócio-Ambiental do Estado do Rio de Janeiro (escala 1:100.000): subsídios ao ZEE - Zoneamento Ecológico Econômico*. Secretaria do Ambiente, Governo do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.

SILVEIRA, A.L.L., 2005, “Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Volume 10, n. 1, pp. 5-23.

SUDERHSA, 2002, *Estudos Hidrológicos – Metodologia e Hidrogramas Calculados. Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba*. Tomo 3.2. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Paraná, Brasil.

TASSI, R., ALLASIA, D.G., MELLER, A., MIRANDA, T.C., HOLZ, J. e SILVEIRA, A.L.L., 2006, “Determinação do Parâmetro CN para Sub-bacias Urbanas do Arroio Dilúvio - Porto Alegre/RS”. *I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste*. Curitiba, Paraná, Brasil.

TCE RJ, 2012, *Estudos Socioeconômicos dos Municípios do Estado do Rio de Janeiro - Macaé*. Secretaria-Geral de Planejamento, Tribunal de Contas do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.

TUCCI, C.E.M. e CLARKE, R.T., 1997, “Impacto das Mudanças da Cobertura Vegetal no Escoamento: Revisão”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Volume 2, n. 1, pp.135-152.

TUCCI, C.E.M., 2004, *Hidrologia: Ciência e Aplicação*, 3ª ed. UFRGS, ABRH. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

VON SPERLING, M., 2005, *Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos - Volume 1*, 3ª ed. DESA/UFMG. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

XAVIER, M.C.R., LIMA, R.N.S., CHAVES, P.H.S., MOREIRA, J.C.M. e SÁ, E.C., 2013, "Processo Erosivo afeta Disponibilidade Hídrica - O caso do rio Macaé". *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, Brasil.

ANEXO I - DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS

Distribuição Log-Normal Tipo II

Distribuição que relaciona o fator de frequência com o logaritmo da série de eventos hidrológicos, expressa pela equação:

$$K = \frac{e^{\sqrt{\ln(z^2+1)}} \cdot T - \frac{\ln(z^2 + 1)}{2} - 1}{z}$$

Onde T é o tempo de recorrência definido e z é a razão entre o desvio padrão e a média dos eventos da amostra.

Distribuição Log-Normal Tipo III

Muito similar à distribuição anterior, porém o denominador do fator de frequência é W , e não z . De modo que a equação resulta em:

$$K = \frac{e^{\sqrt{\ln(z^2+1)}} \cdot T - \frac{\ln(z^2 + 1)}{2} - 1}{W}$$

Onde $W = \frac{1-w^{3/2}}{w^{1/3}}$, sendo w o coeficiente de assimetria da amostra.

Distribuição Pearson Tipo III

Nesta distribuição o fator de frequência é calculado pela equação:

$$K = D + (D^2 - 1) \frac{\gamma}{6} + \frac{1}{3} (D - 6D) \left(\frac{\gamma}{6}\right)^2 - (D^2 - 1) \left(\frac{\gamma}{6}\right)^3 + D \left(\frac{\gamma}{6}\right)^4 + \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma}{6}\right)^5$$

Onde D é o desvio padrão padronizado, obtido pela equação:

$$D = T - \frac{2,30753 + 0,27061T}{1 + 0,99229T + 0,04481T^2}$$

Sendo T o tempo de recorrência definido e γ o coeficiente de assimetria da amostra.

Distribuição Log-Pearson Tipo III

Esta distribuição é igual a anterior, porém calculada utilizando-se o logaritmo da amostra, e não os valores da amostra em si.

Distribuição de Gumbel

A distribuição de Gumbel leva não somente a distribuição de vazões, como também a distribuição da variável reduzida de Gumbel (y), obtida a partir da série observada e dos parâmetros α e β . É realizada a série de Gumbel a partir da transformação:

$$y = \alpha(x - \beta)$$

Sendo:

$$\alpha = \frac{\sigma_x}{\sigma_y}$$

$$\beta = \mu_x - \frac{\mu_y}{\alpha}$$

Onde σ_x e μ_x correspondem, respectivamente, ao desvio padrão e à média da amostra de vazões máximas e σ_y e μ_y correspondem, respectivamente, ao desvio padrão e à média da variável reduzida y .

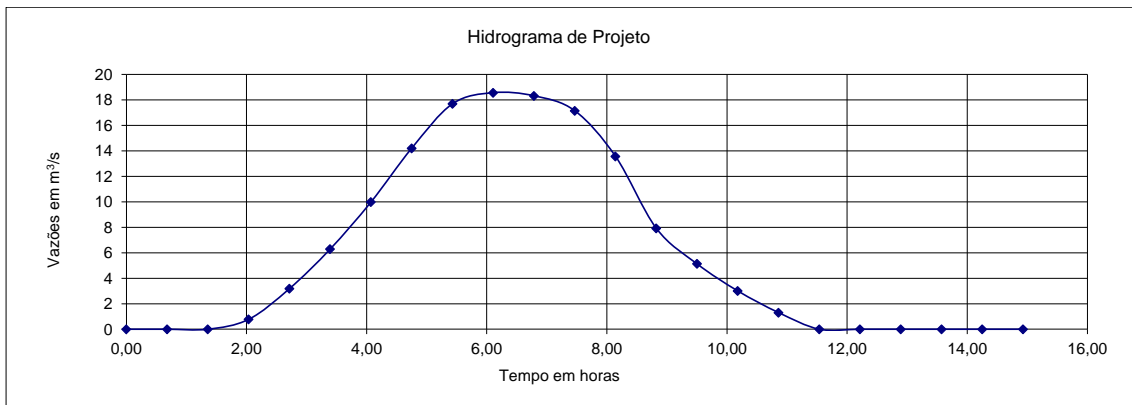
O cálculo da vazão máxima, associada a um tempo de retorno T , é realizada, finalmente, pela equação:

$$Q = \frac{1}{\alpha} \left\{ -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] + \alpha\beta \right\}$$

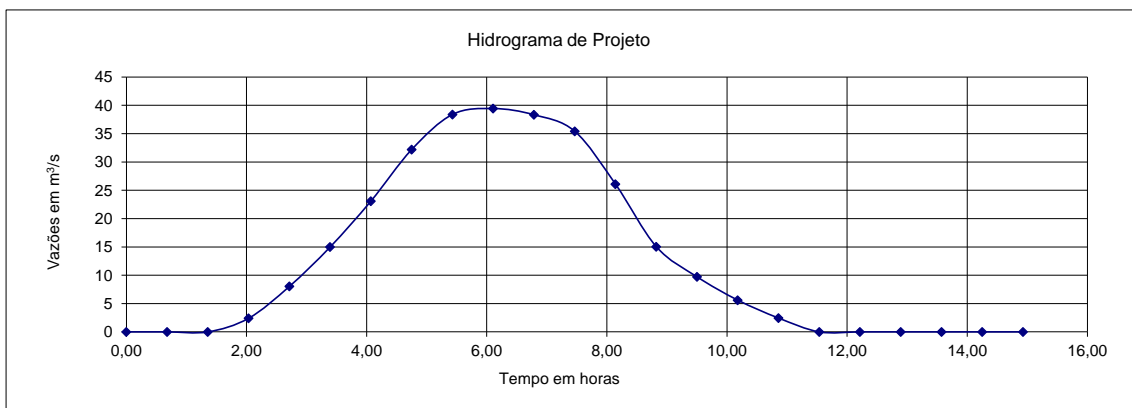
A Distribuição de Gumbel é geralmente utilizada quando o coeficiente de assimetria da amostra é inferior a 1,50 (ELETROBRAS, 1987).

ANEXO II - HIDROGRAMAS CALCULADOS

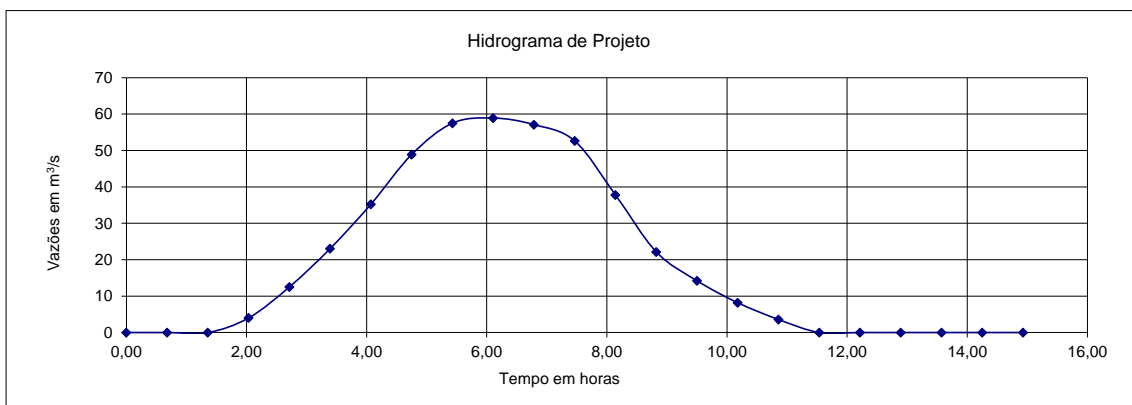
Hidrograma calculado para a estação Macaé de Cima (TR = 2 anos)



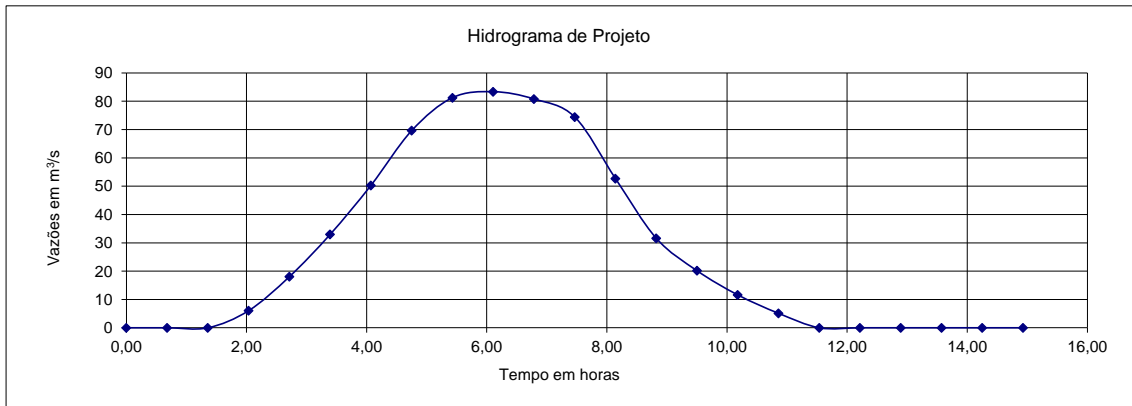
Hidrograma calculado para a estação Macaé de Cima (TR = 5 anos)



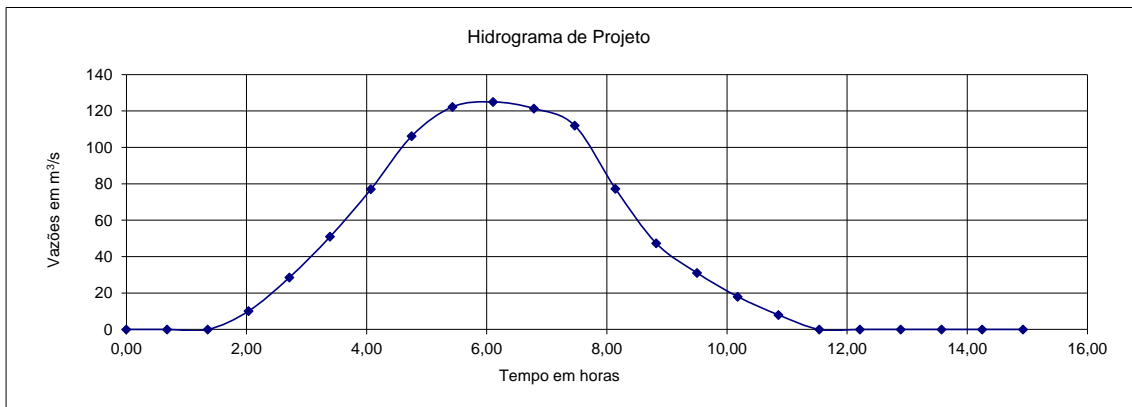
Hidrograma calculado para a estação Macaé de Cima (TR = 10 anos)



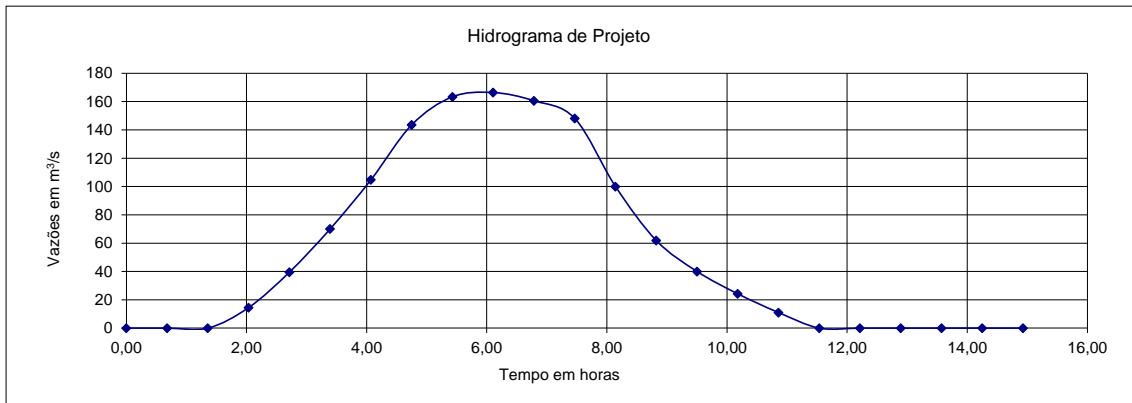
Hidrograma calculado para a estação Macaé de Cima (TR = 20 anos)



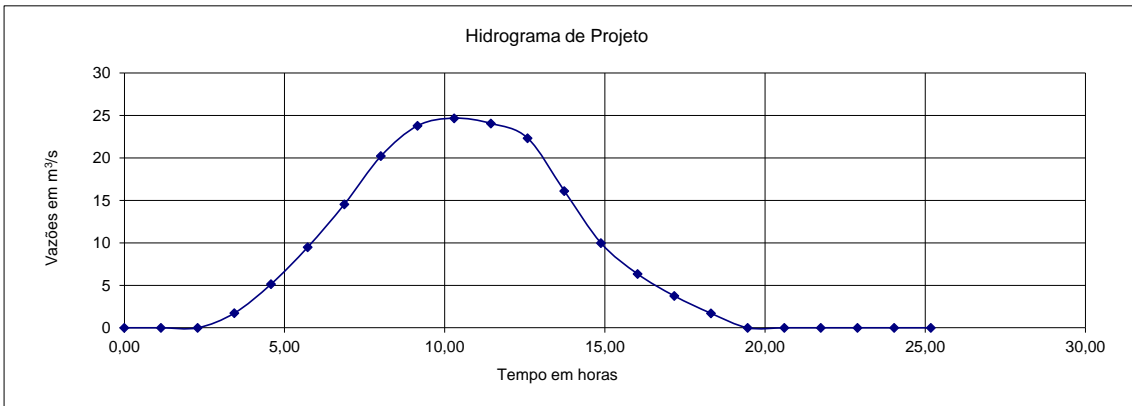
Hidrograma calculado para a estação Macaé de Cima (TR = 50 anos)



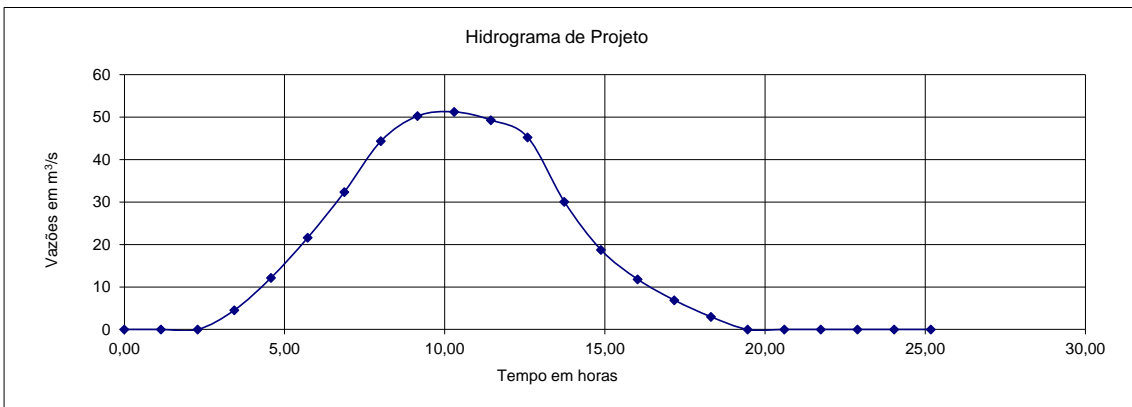
Hidrograma calculado para a estação Macaé de Cima (TR = 100 anos)



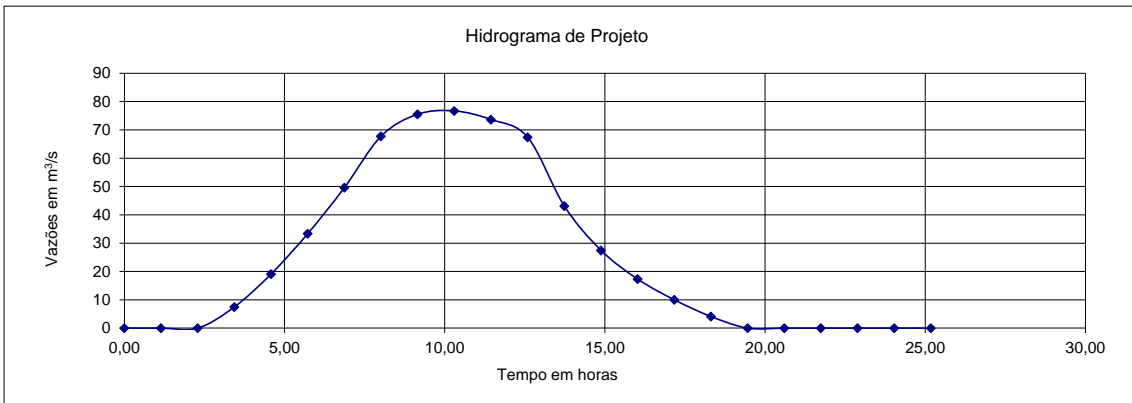
Hidrograma calculado para a estação Galdinópolis (TR = 2 anos)



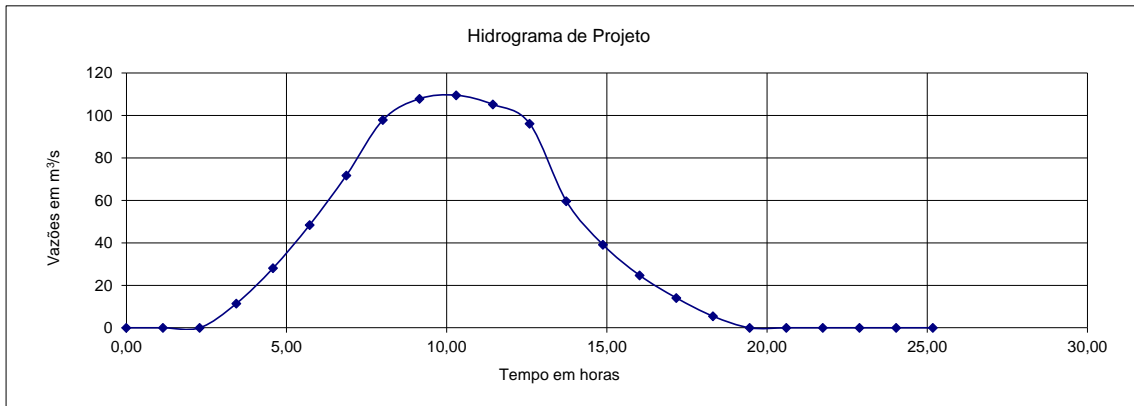
Hidrograma calculado para a estação Galdinópolis (TR = 5 anos)



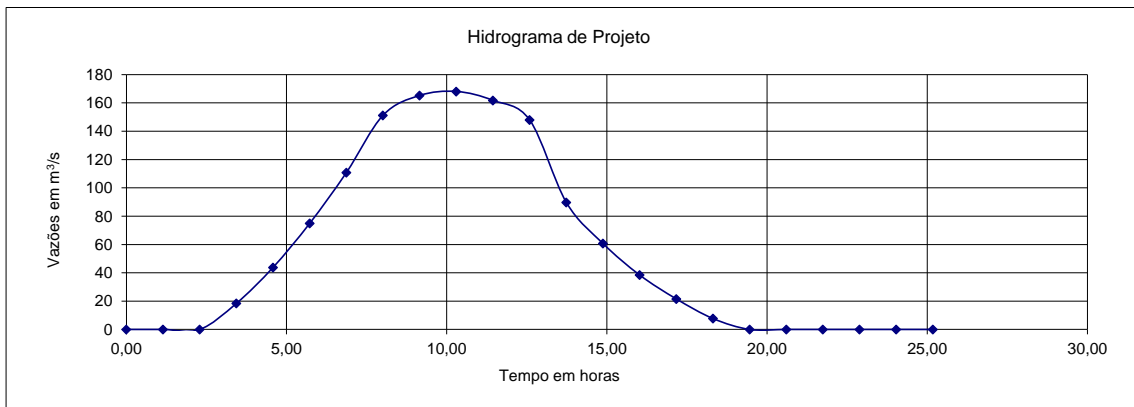
Hidrograma calculado para a estação Galdinópolis (TR = 10 anos)



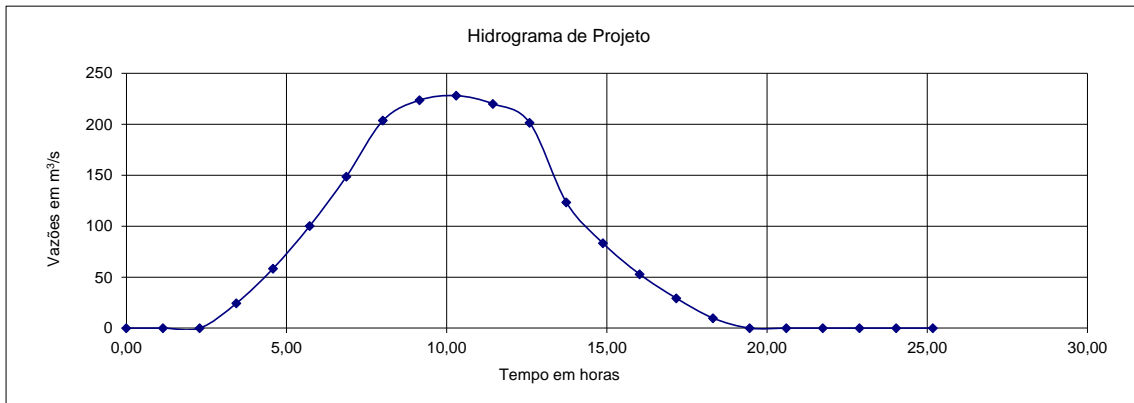
Hidrograma calculado para a estação Galdinópolis (TR = 20 anos)



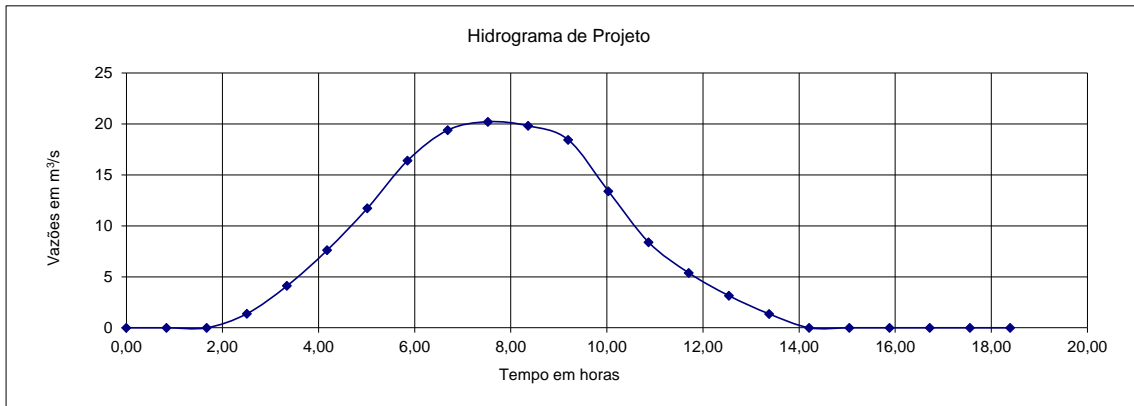
Hidrograma calculado para a estação Galdinópolis (TR = 50 anos)



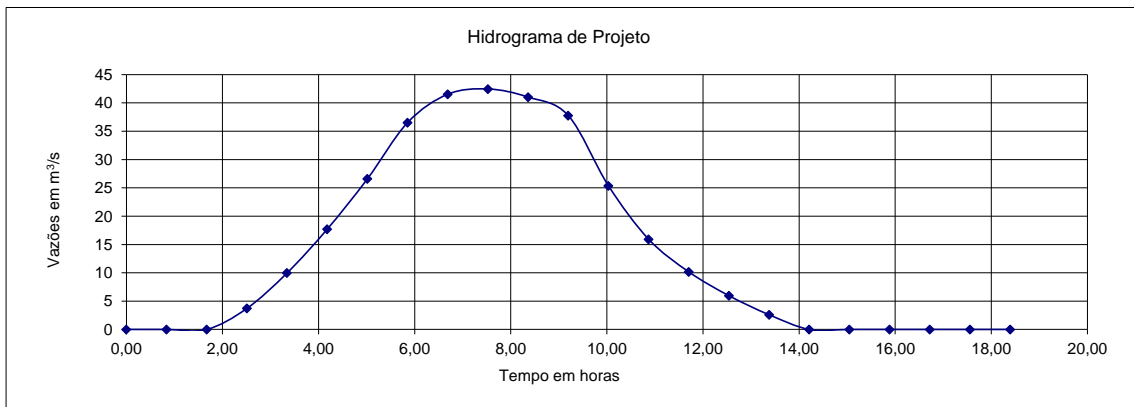
Hidrograma calculado para a estação Galdinópolis (TR = 100 anos)



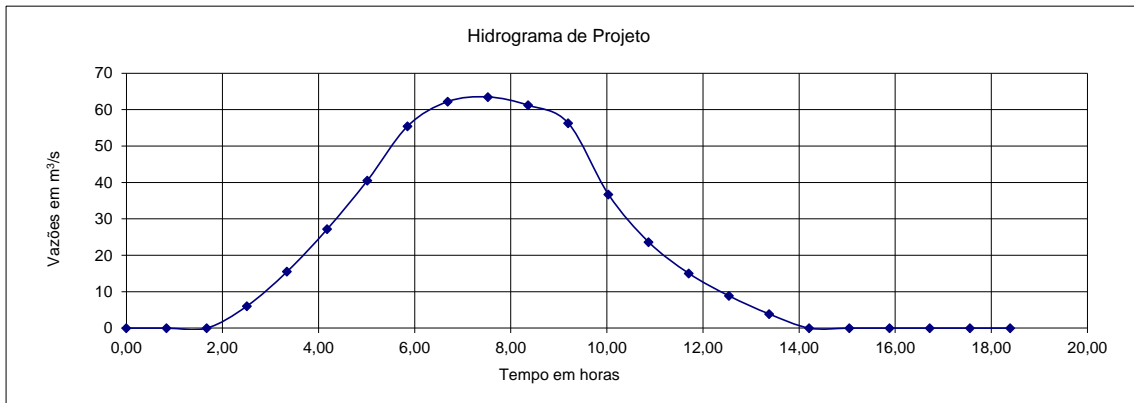
Hidrograma calculado para a estação Piller (TR = 2 anos)



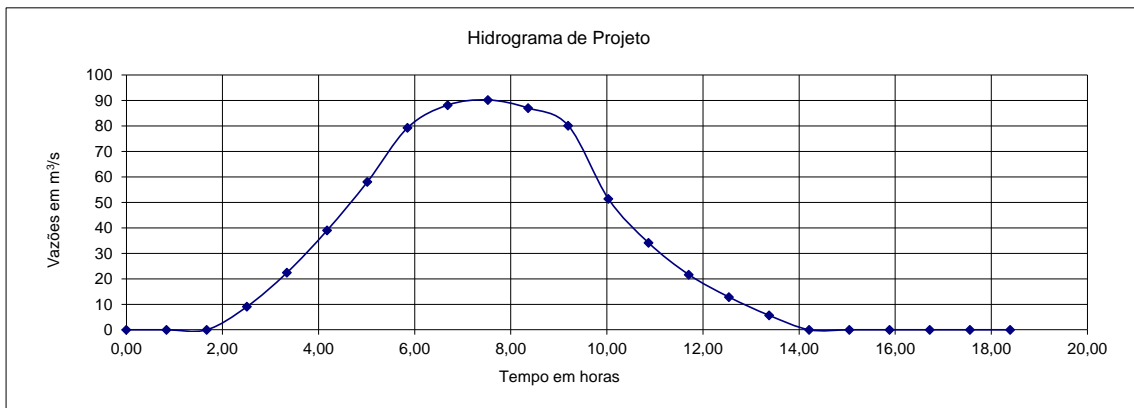
Hidrograma calculado para a estação Piller (TR = 5 anos)



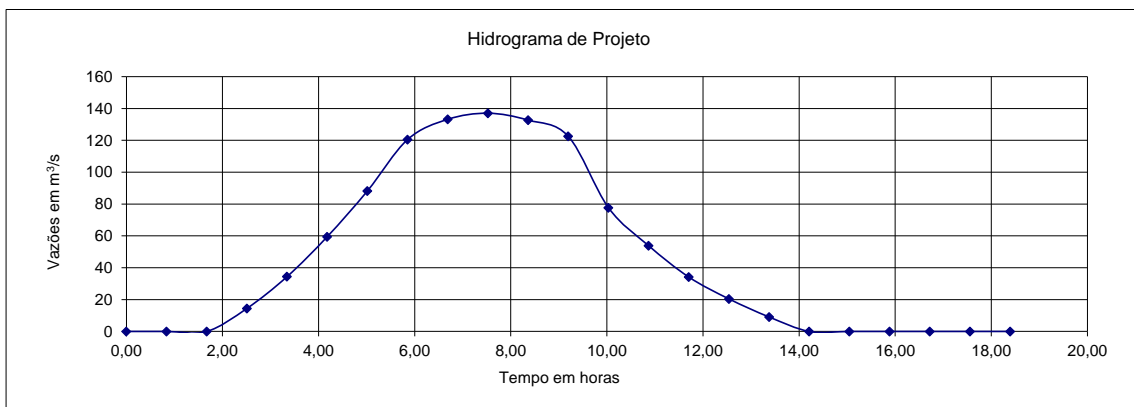
Hidrograma calculado para a estação Piller (TR = 10 anos)



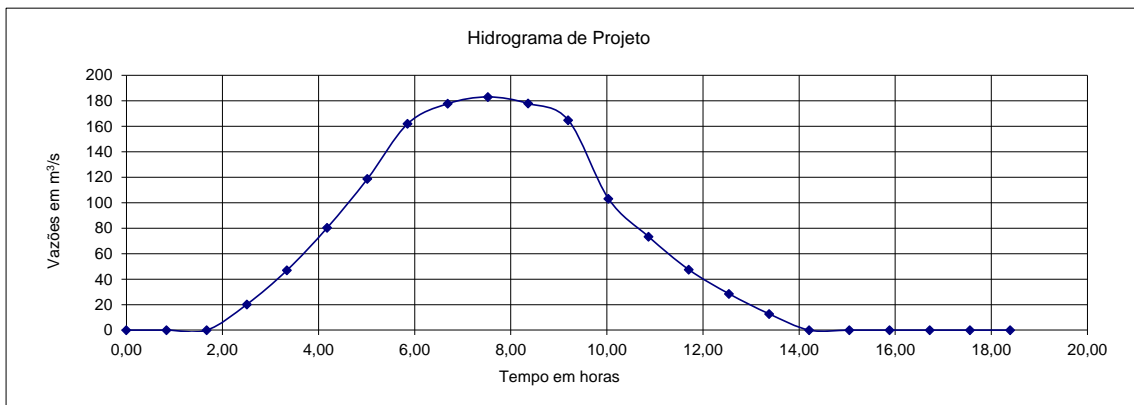
Hidrograma calculado para a estação Piller (TR = 20 anos)



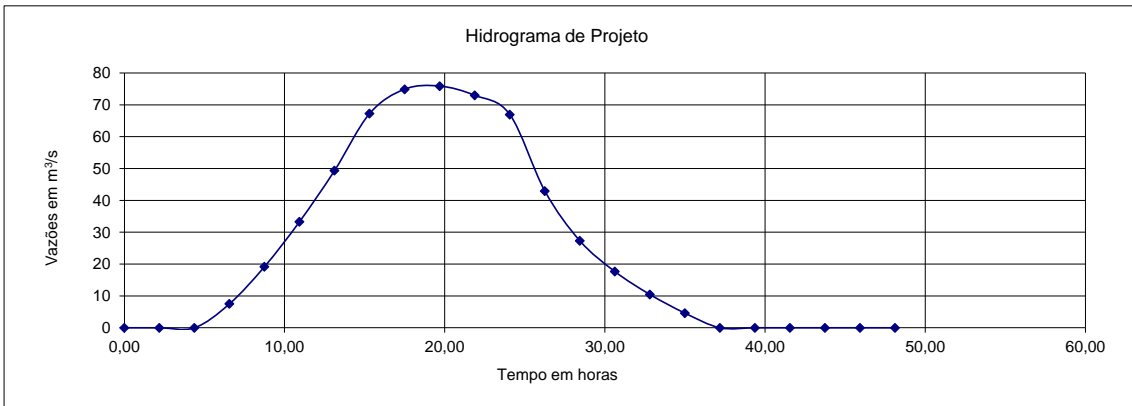
Hidrograma calculado para a estação Piller (TR = 50 anos)



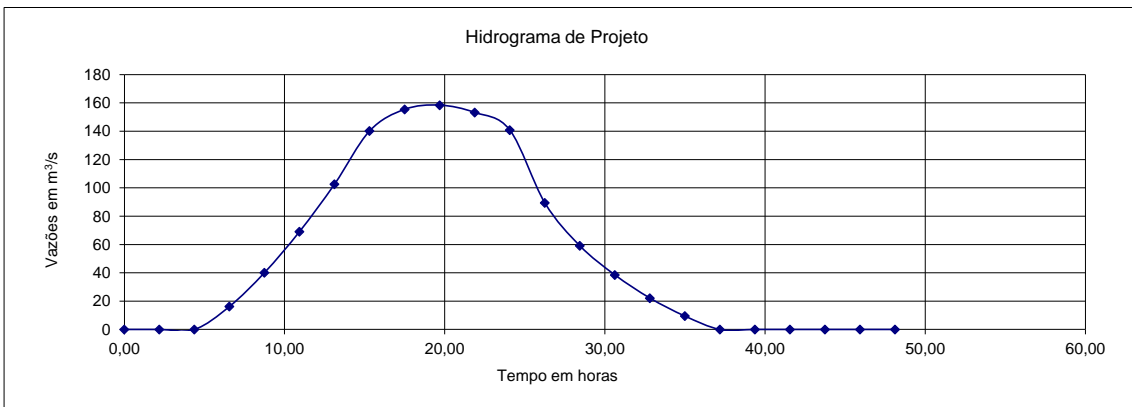
Hidrograma calculado para a estação Piller (TR = 100 anos)



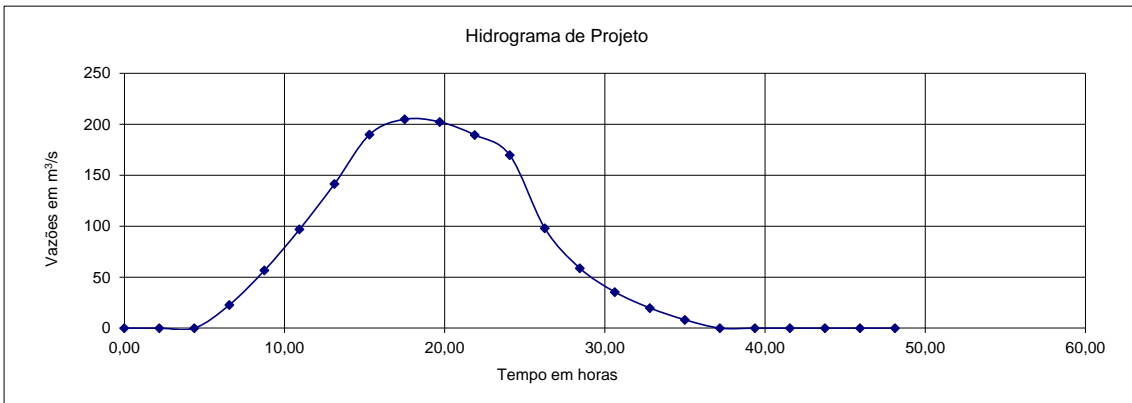
Hidrograma calculado para a estação São Romão (TR = 2 anos)



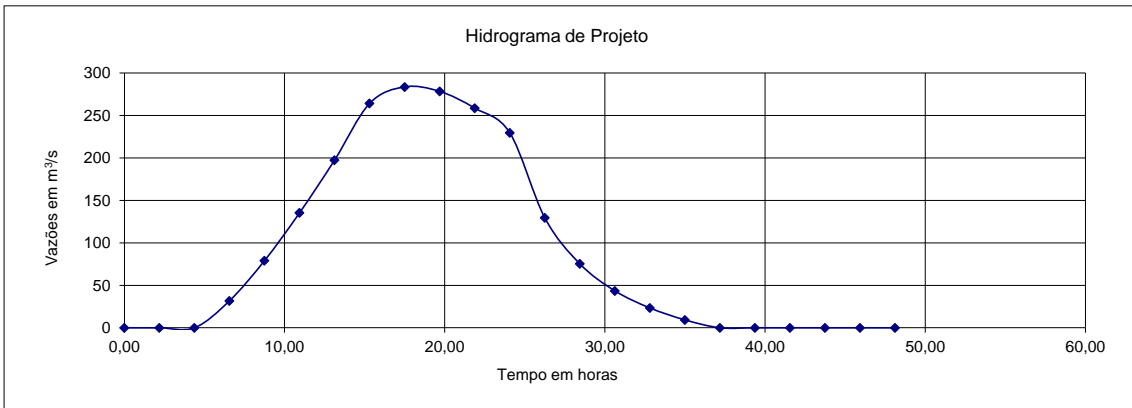
Hidrograma calculado para a estação São Romão (TR = 5 anos)



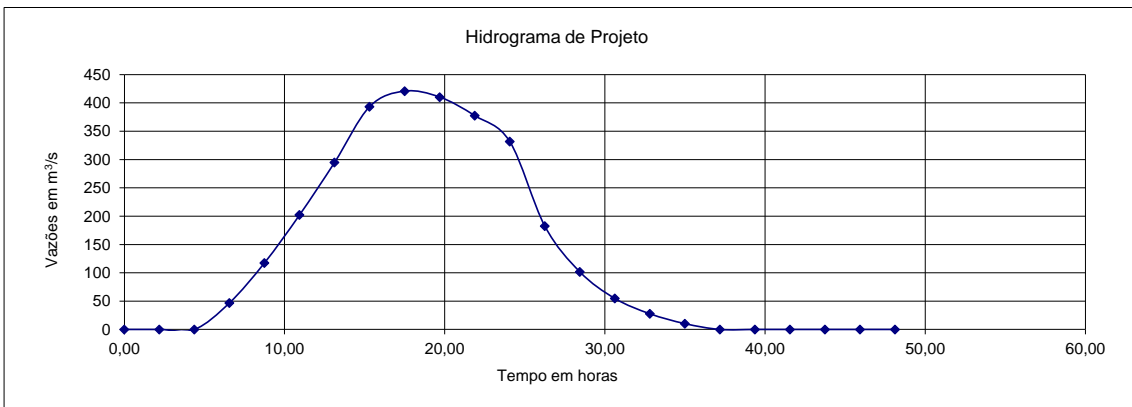
Hidrograma calculado para a estação São Romão (TR = 10 anos)



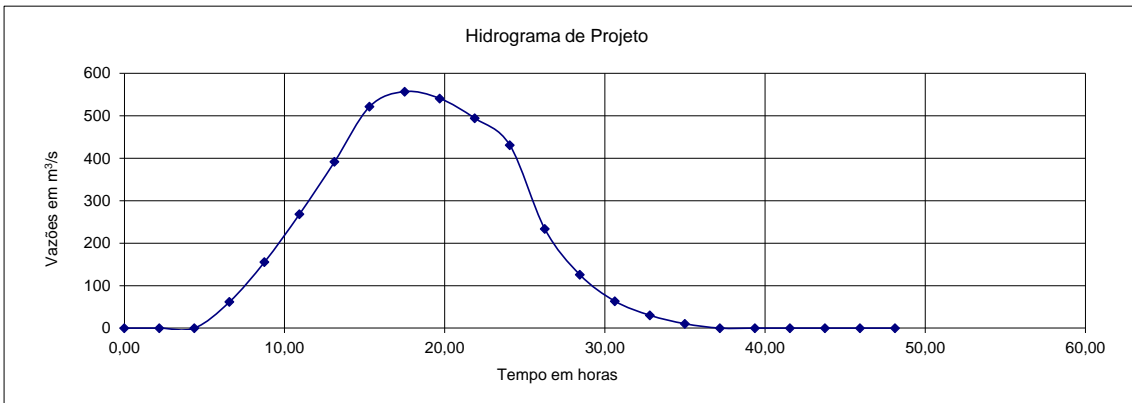
Hidrograma calculado para a estação São Romão (TR = 20 anos)



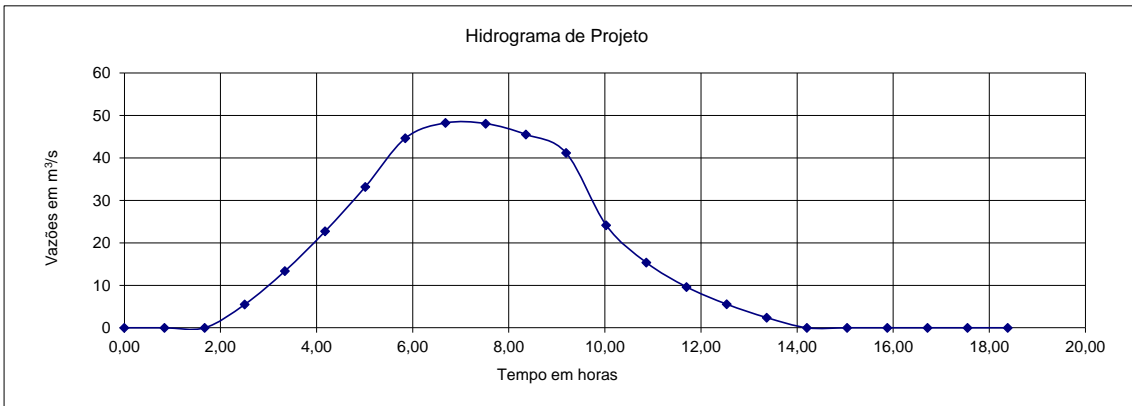
Hidrograma calculado para a estação São Romão (TR = 50 anos)



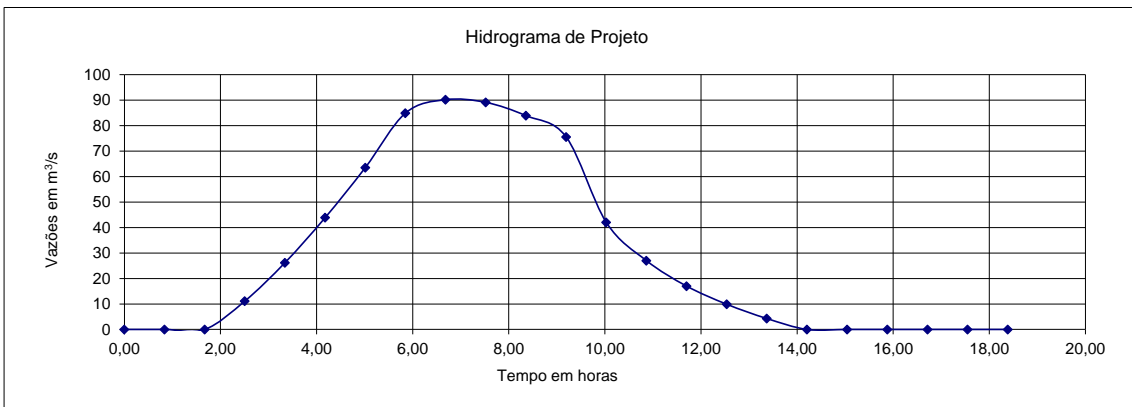
Hidrograma calculado para a estação São Romão (TR = 100 anos)



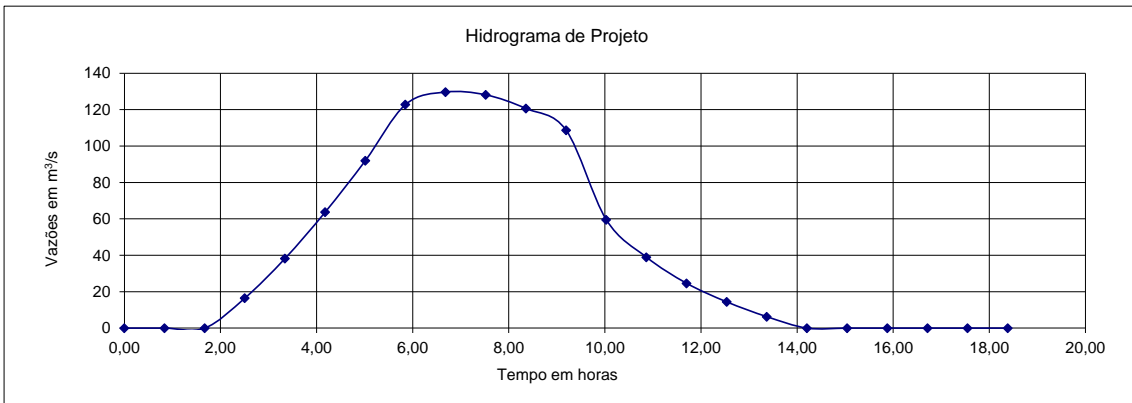
Hidrograma calculado para a estação Barra do Sana (TR = 2 anos)



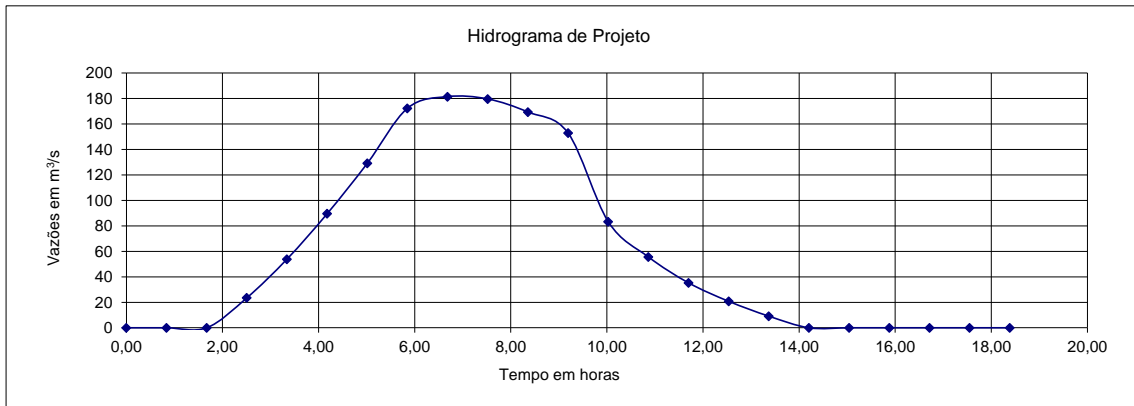
Hidrograma calculado para a estação Barra do Sana (TR = 5 anos)



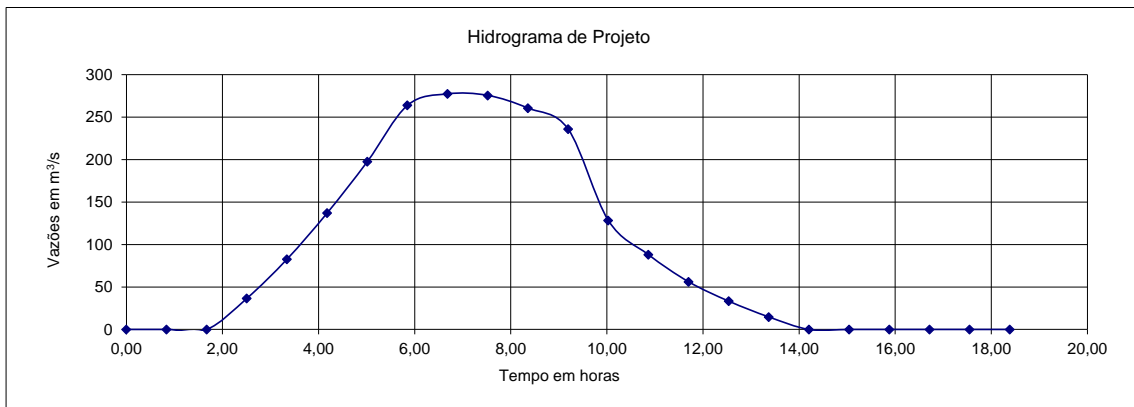
Hidrograma calculado para a estação Barra do Sana (TR = 10 anos)



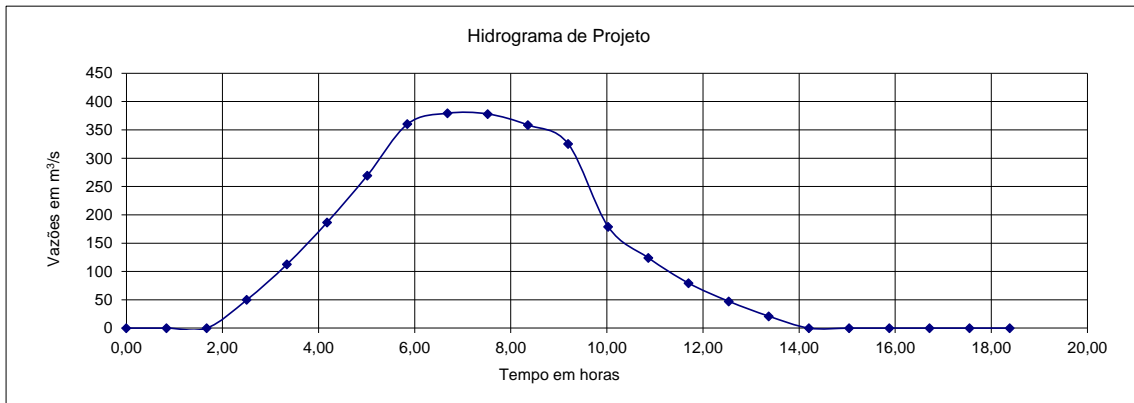
Hidrograma calculado para a estação Barra do Sana (TR = 20 anos)



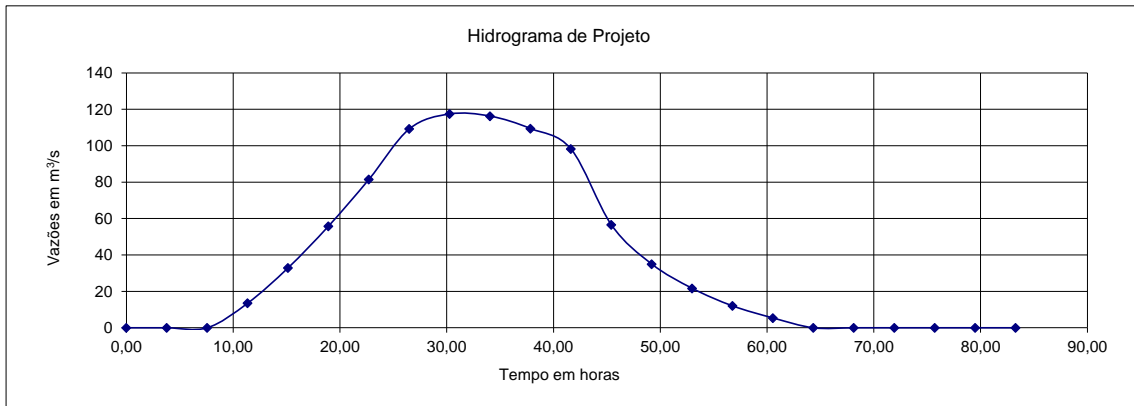
Hidrograma calculado para a estação Barra do Sana (TR = 50 anos)



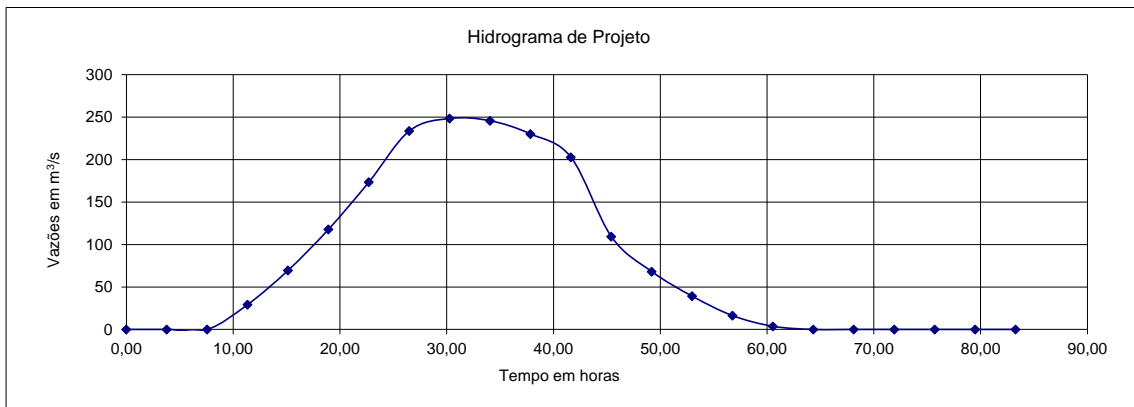
Hidrograma calculado para a estação Barra do Sana (TR = 100 anos)



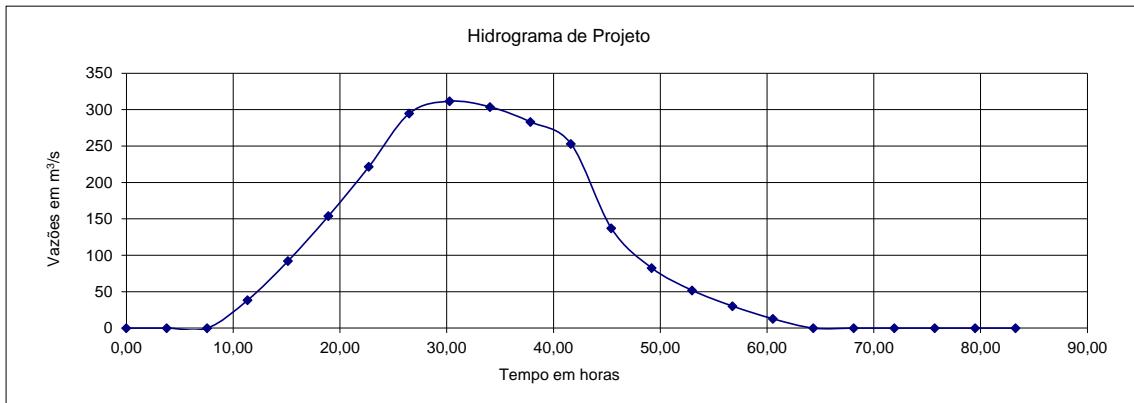
Hidrograma calculado para a estação Ponte do Baião (TR = 2 anos)



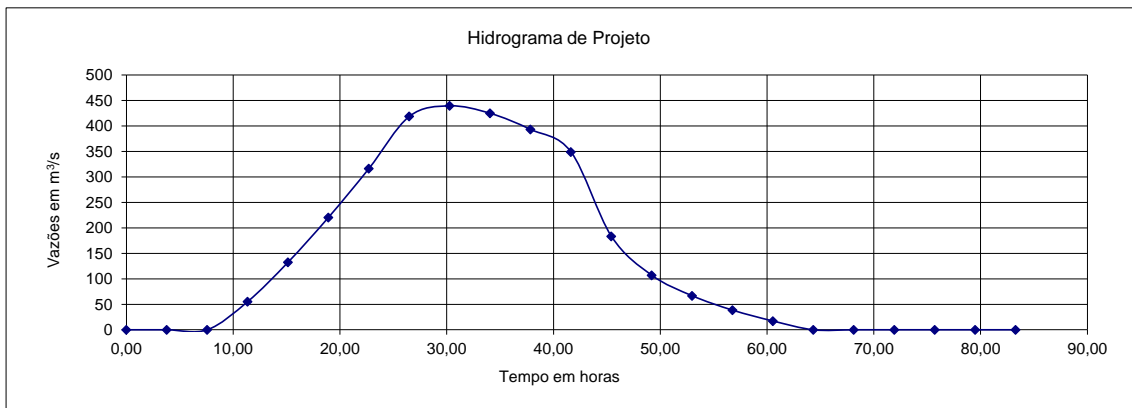
Hidrograma calculado para a estação Ponte do Baião (TR = 5 anos)



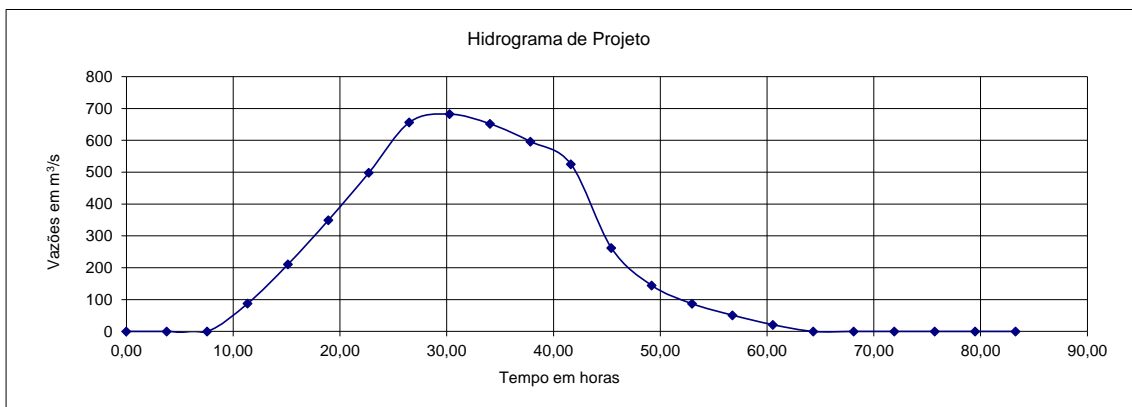
Hidrograma calculado para a estação Ponte do Baião (TR = 10 anos)



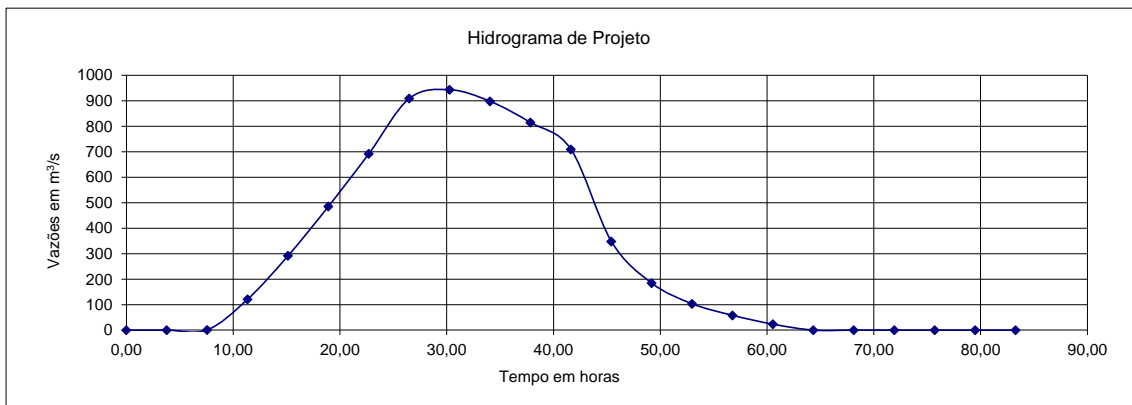
Hidrograma calculado para a estação Ponte do Baião (TR = 20 anos)



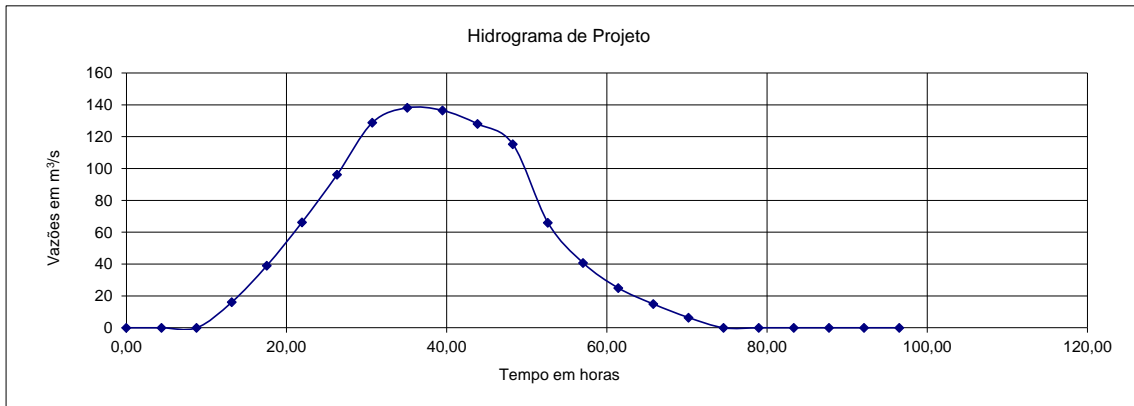
Hidrograma calculado para a estação Ponte do Baião (TR = 50 anos)



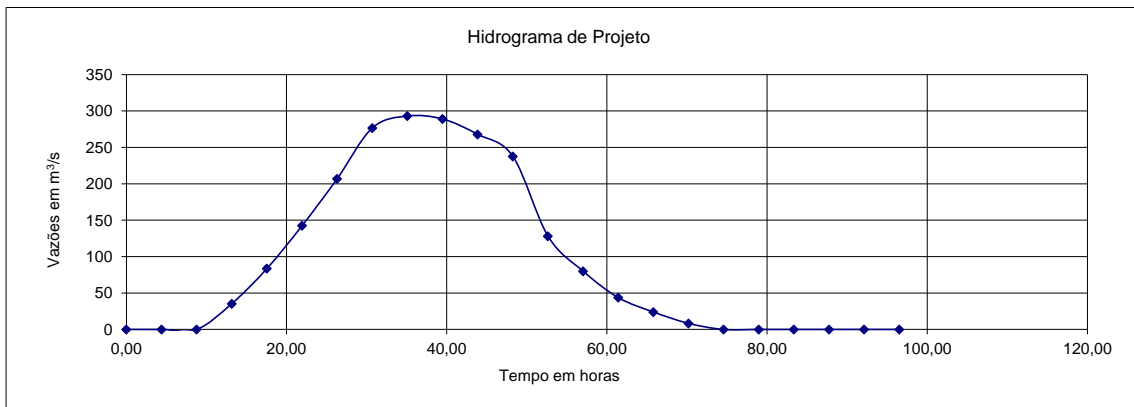
Hidrograma calculado para a estação Ponte do Baião (TR = 100 anos)



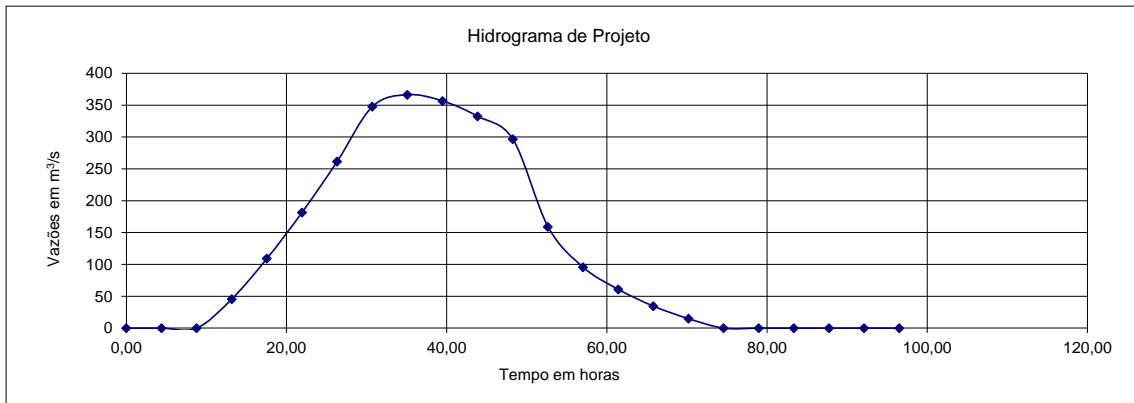
Hidrograma calculado para a estação Fazenda Airis (TR = 2 anos)



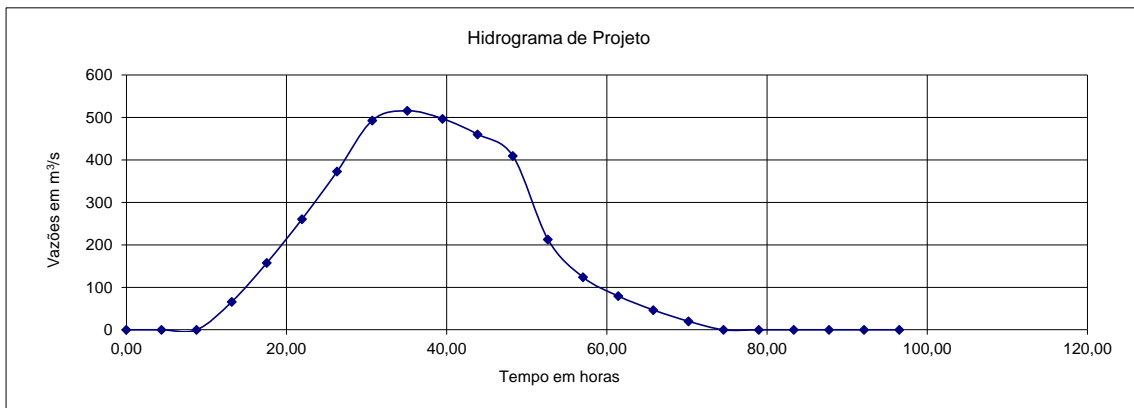
Hidrograma calculado para a estação Fazenda Airis (TR = 5 anos)



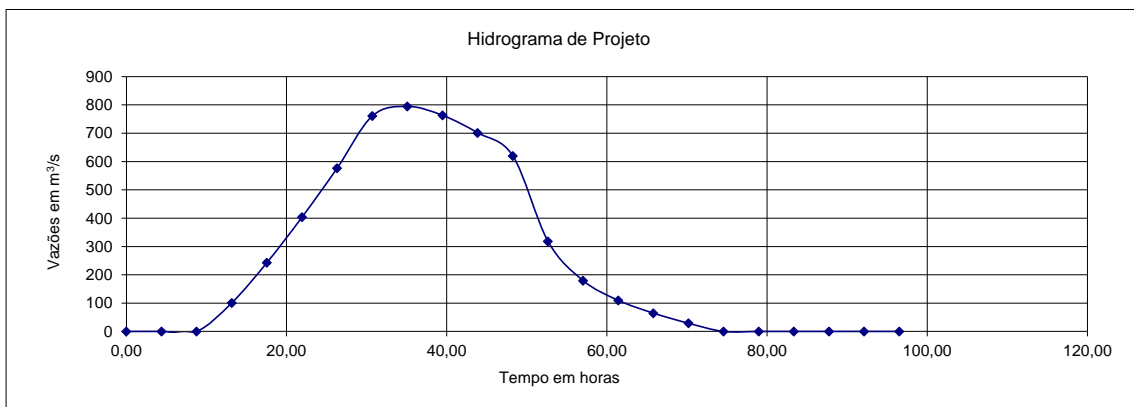
Hidrograma calculado para a estação Fazenda Airis (TR = 10 anos)



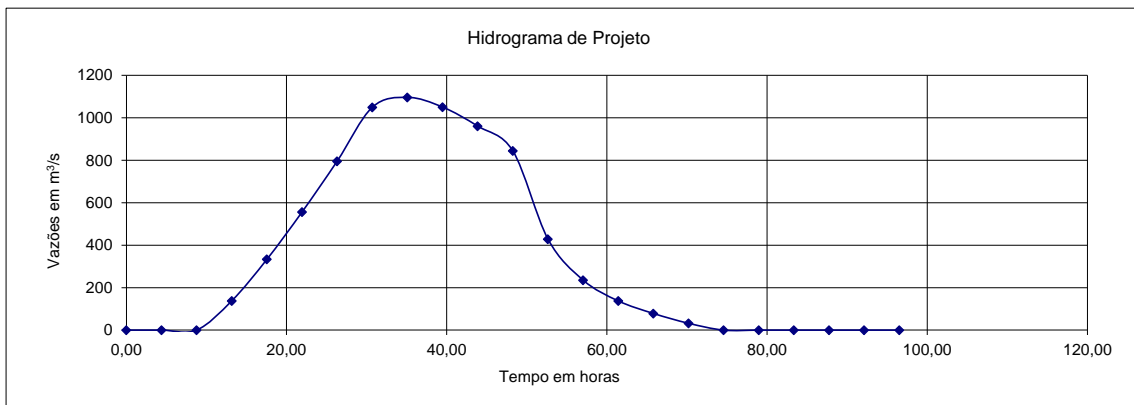
Hidrograma calculado para a estação Fazenda Airis (TR = 20 anos)



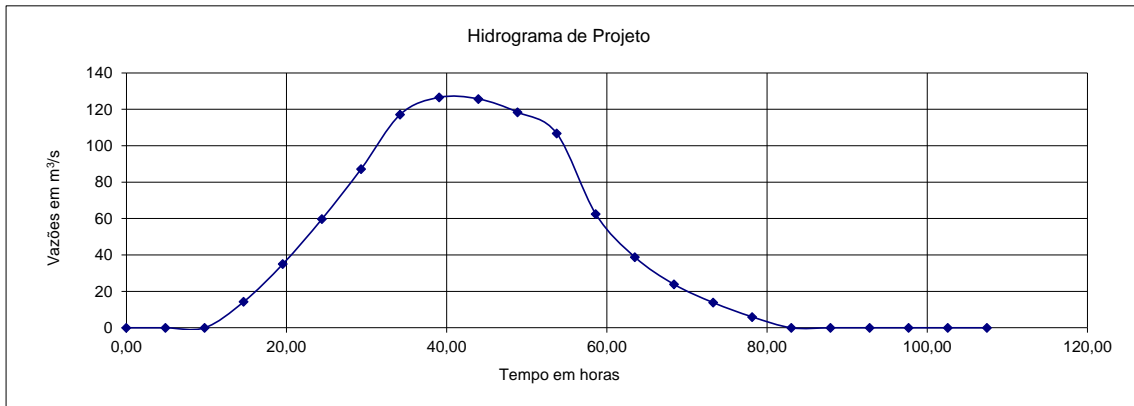
Hidrograma calculado para a estação Fazenda Airis (TR = 50 anos)



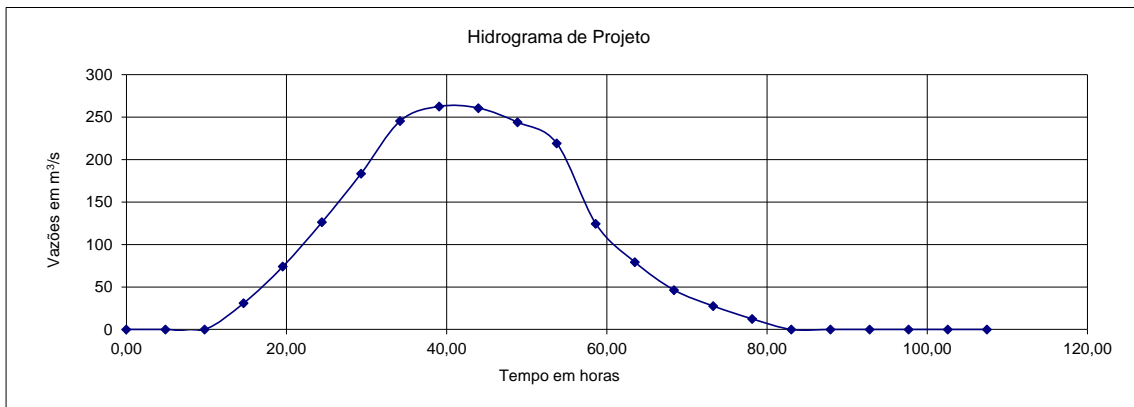
Hidrograma calculado para a estação Fazenda Airis (TR = 100 anos)



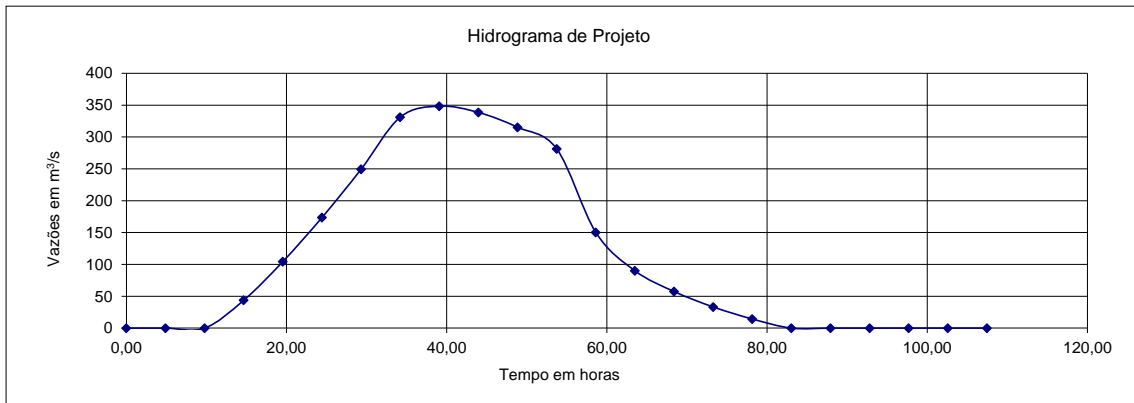
Hidrograma calculado para a estação Jusante BR-101 (TR = 2 anos)



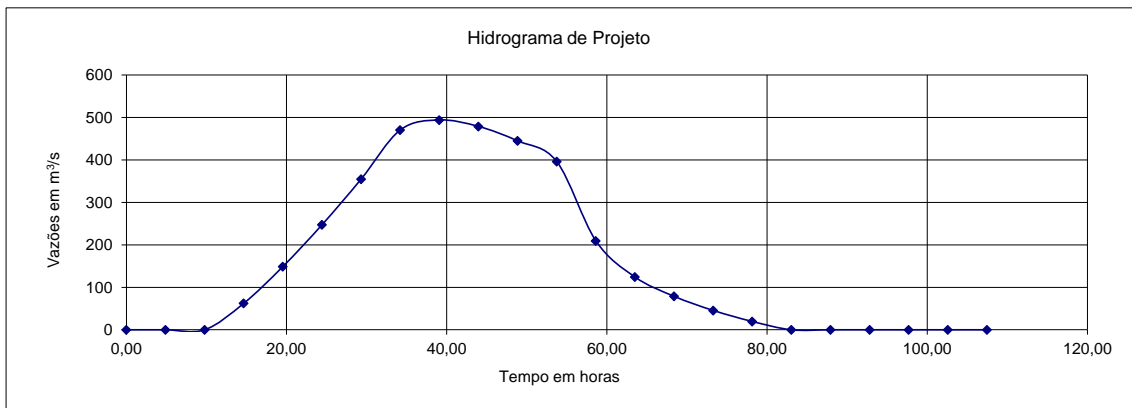
Hidrograma calculado para a estação Jusante BR-101 (TR = 5 anos)



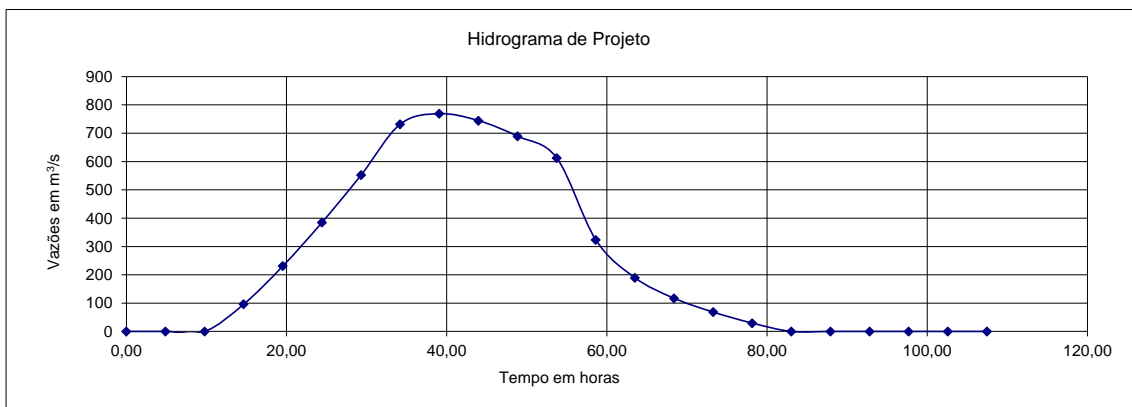
Hidrograma calculado para a estação Jusante BR-101 (TR = 10 anos)



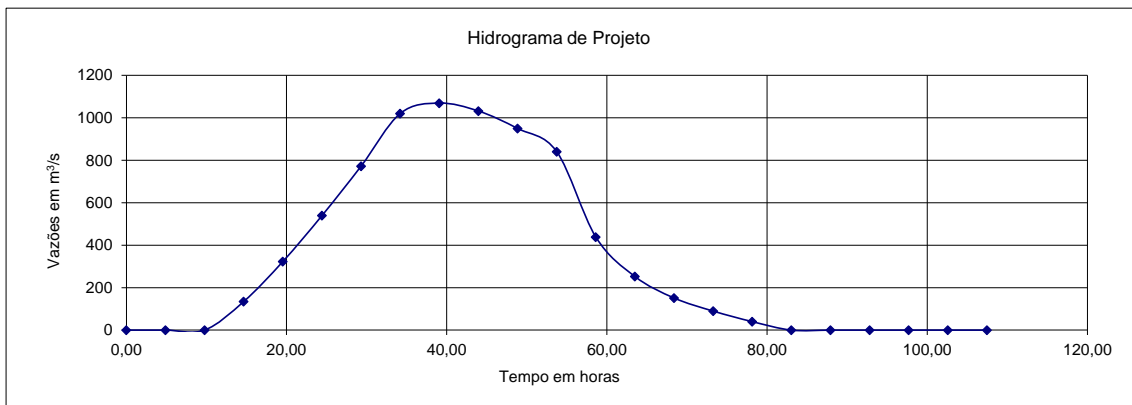
Hidrograma calculado para a estação Jusante BR-101 (TR = 20 anos)



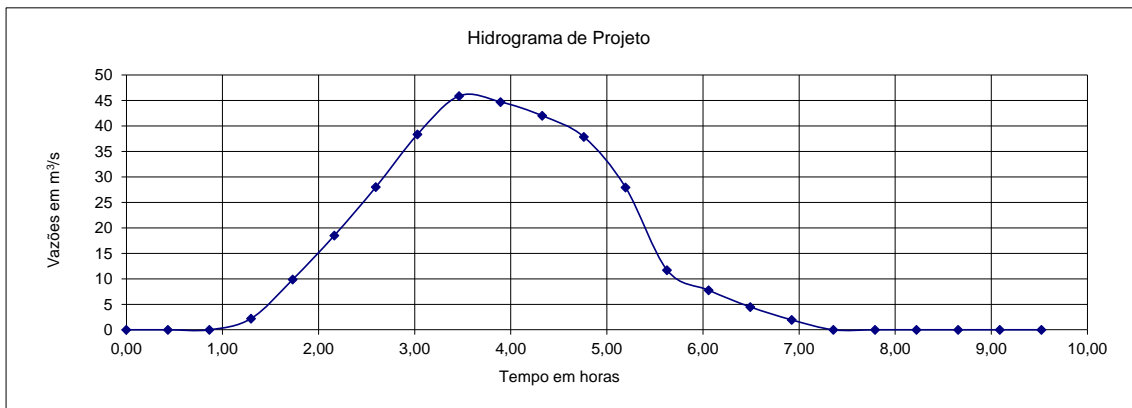
Hidrograma calculado para a estação Jusante BR-101 (TR = 50 anos)



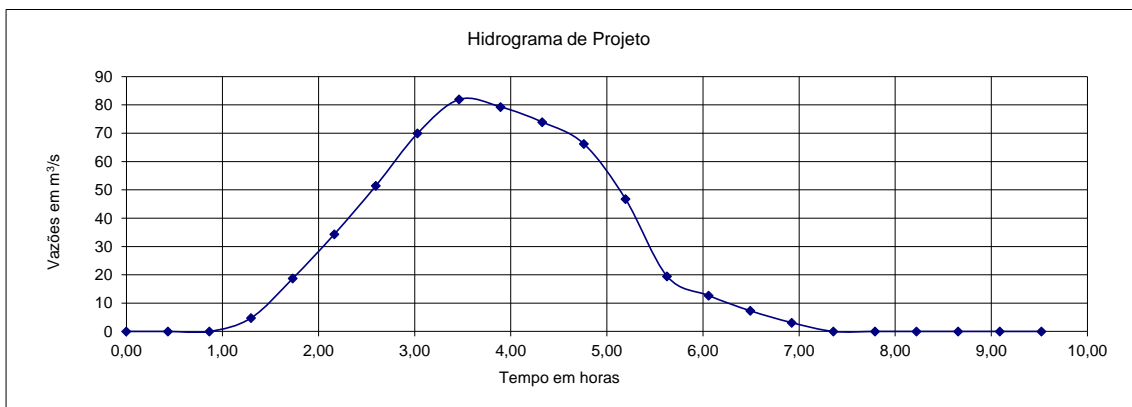
Hidrograma calculado para a estação Jusante BR-101 (TR = 100 anos)



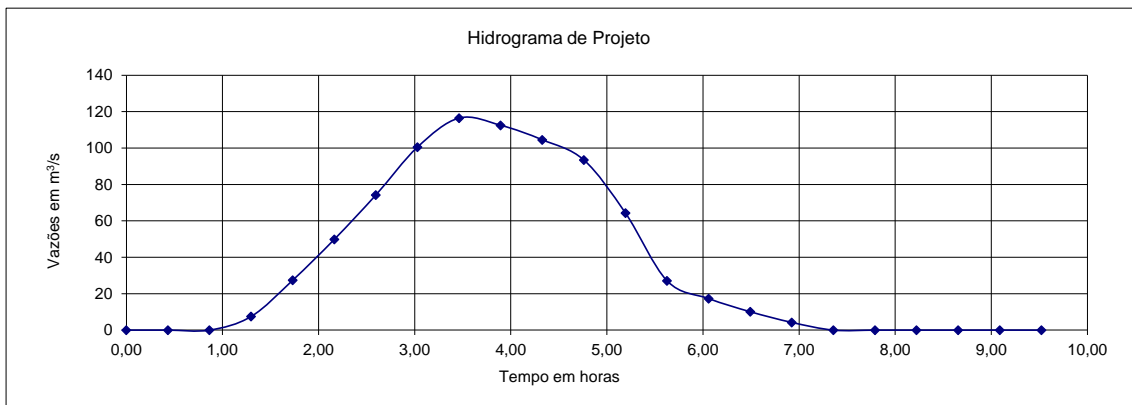
Hidrograma calculado para a estação Glicério (TR = 2 anos)



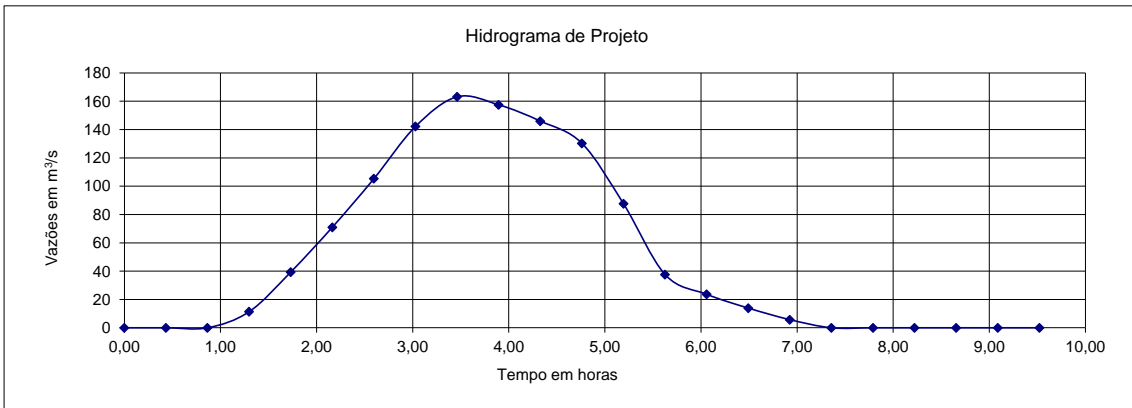
Hidrograma calculado para a estação Glicério (TR = 5 anos)



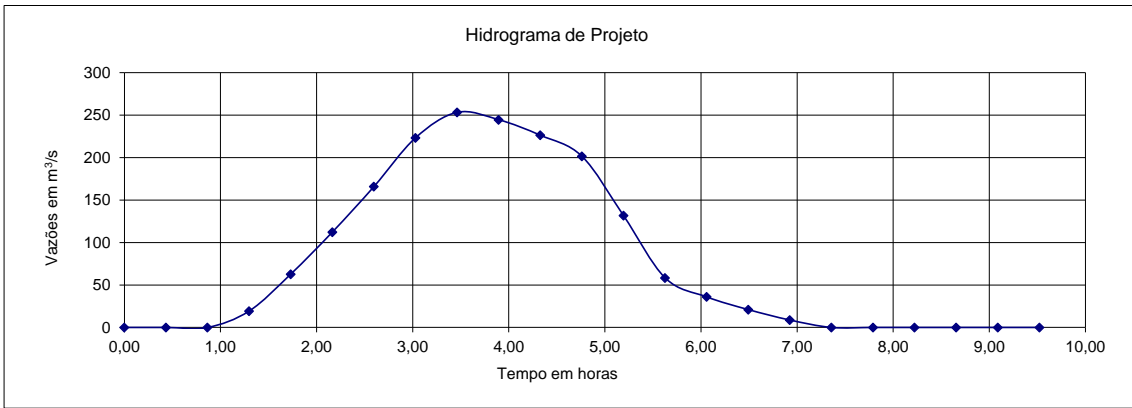
Hidrograma calculado para a estação Glicério (TR = 10 anos)



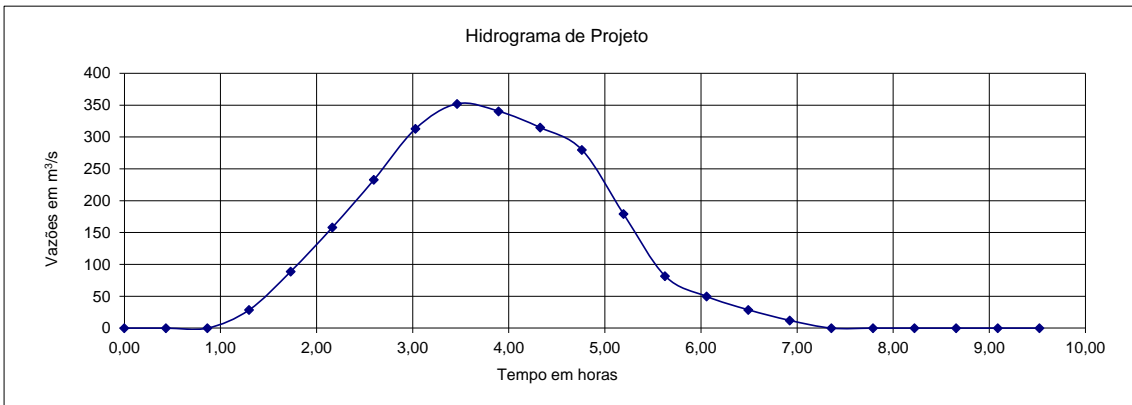
Hidrograma calculado para a estação Glicério (TR = 20 anos)



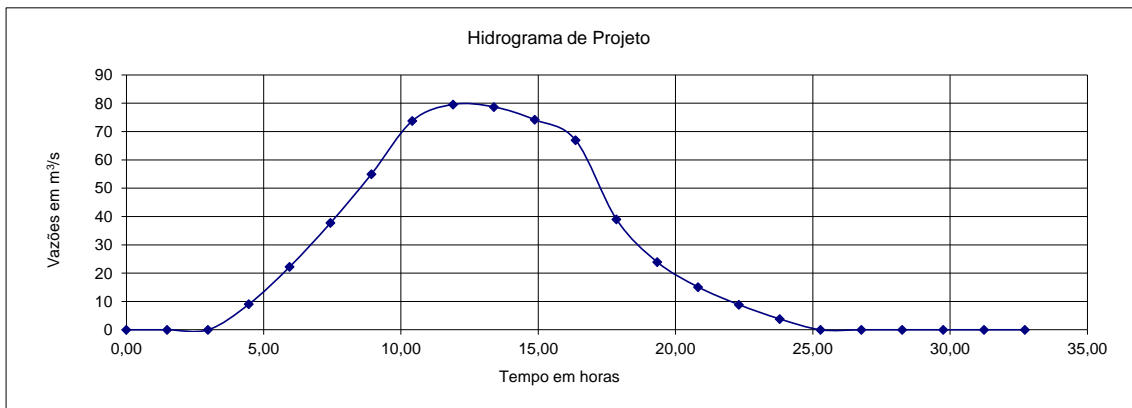
Hidrograma calculado para a estação Glicério (TR = 50 anos)



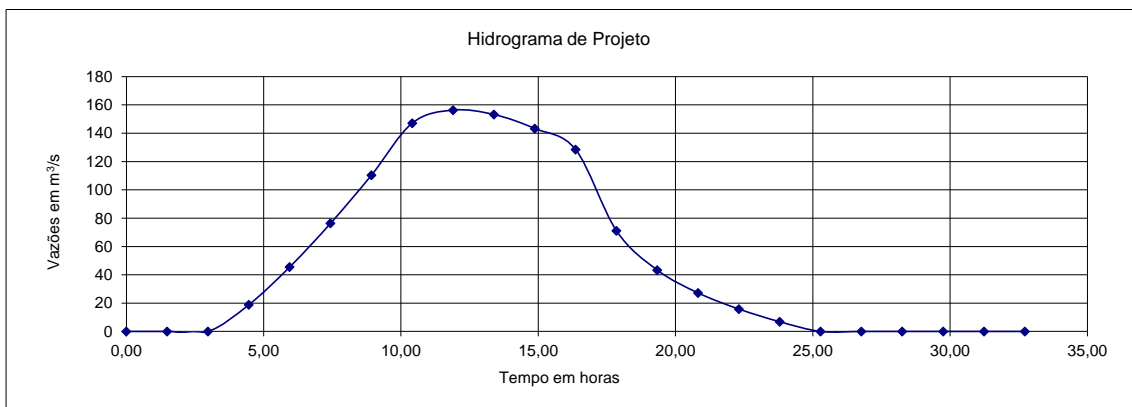
Hidrograma calculado para a estação Glicério (TR = 100 anos)



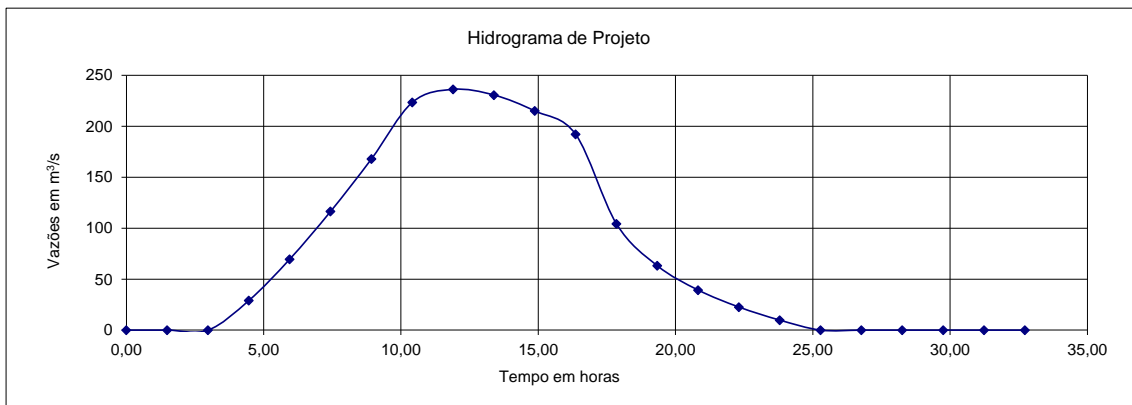
Hidrograma calculado para a estação São Pedro (TR = 2 anos)



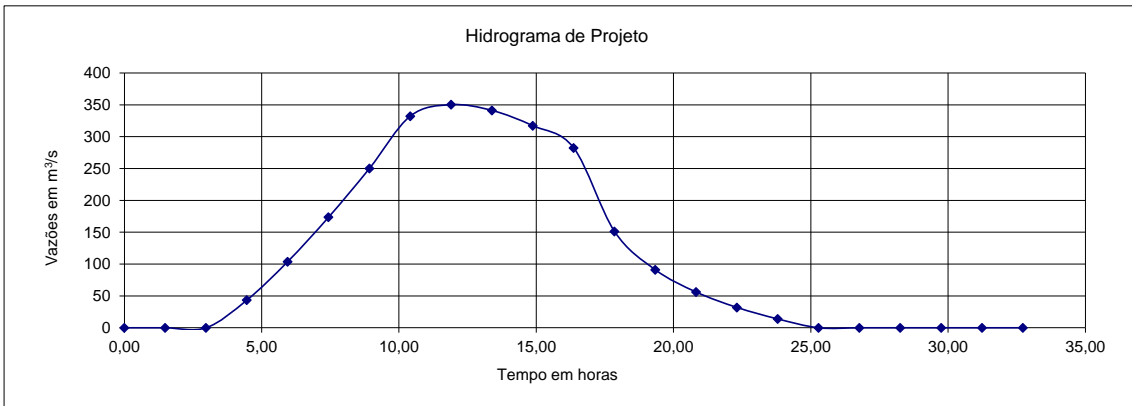
Hidrograma calculado para a estação São Pedro (TR = 5 anos)



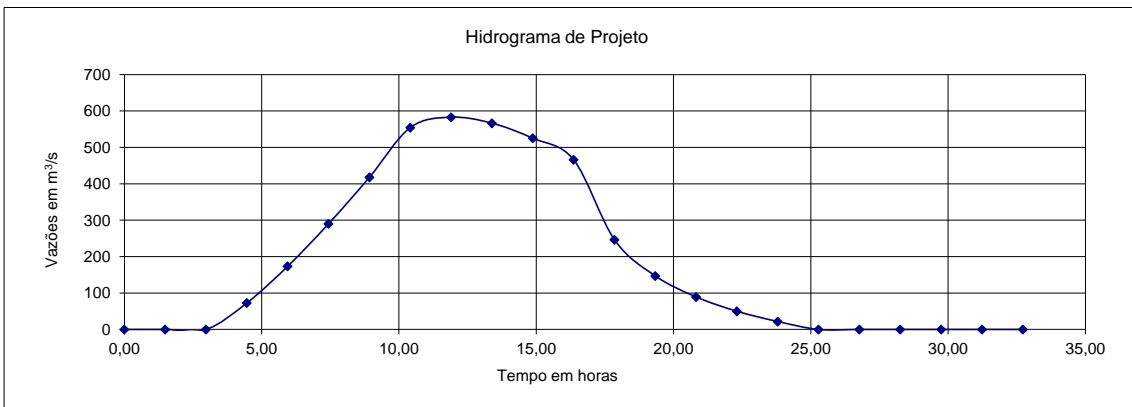
Hidrograma calculado para a estação São Pedro (TR = 10 anos)



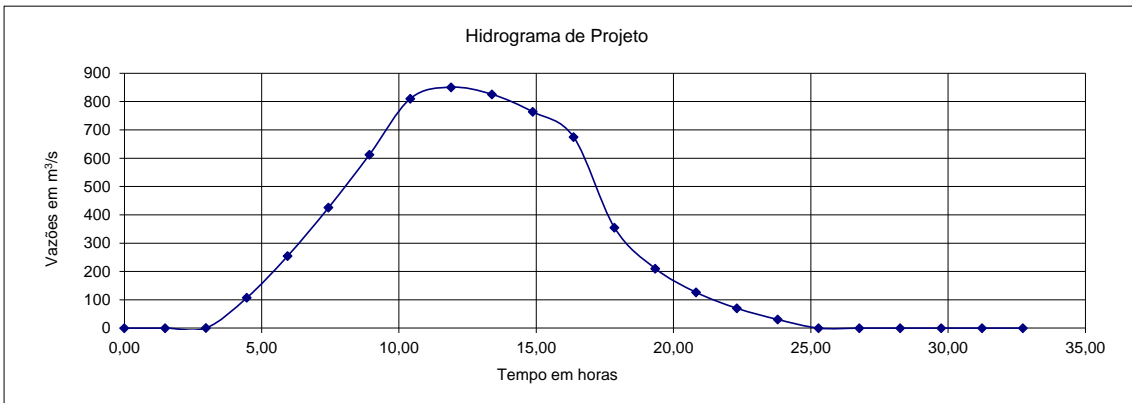
Hidrograma calculado para a estação São Pedro (TR = 20 anos)



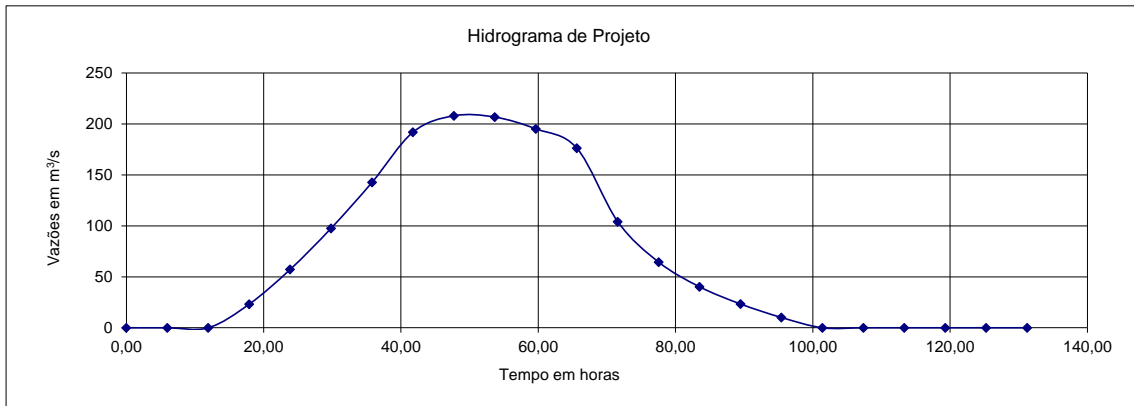
Hidrograma calculado para a estação São Pedro (TR = 50 anos)



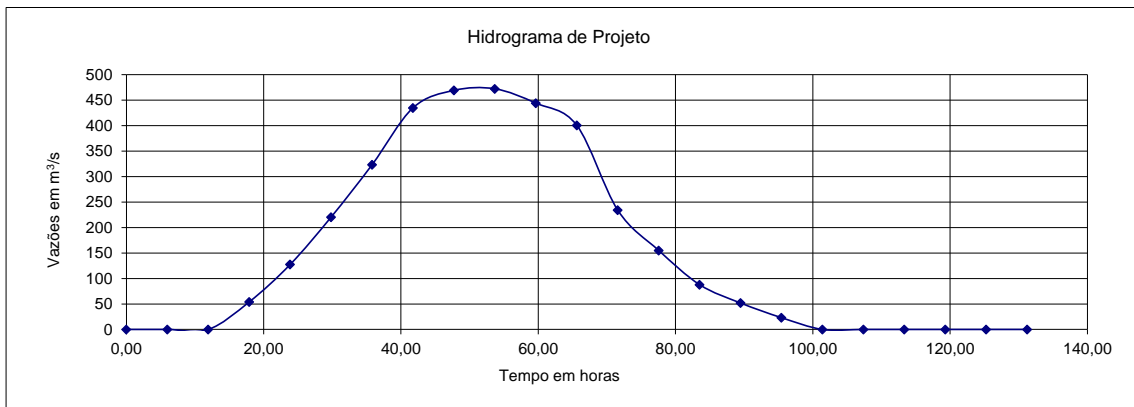
Hidrograma calculado para a estação São Pedro (TR = 100 anos)



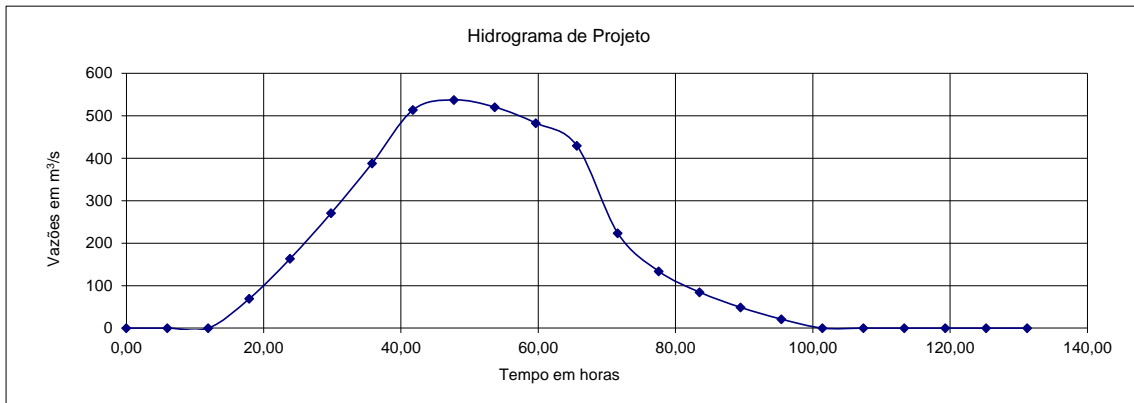
Hidrograma calculado para a foz do rio Macaé (TR = 2 anos)



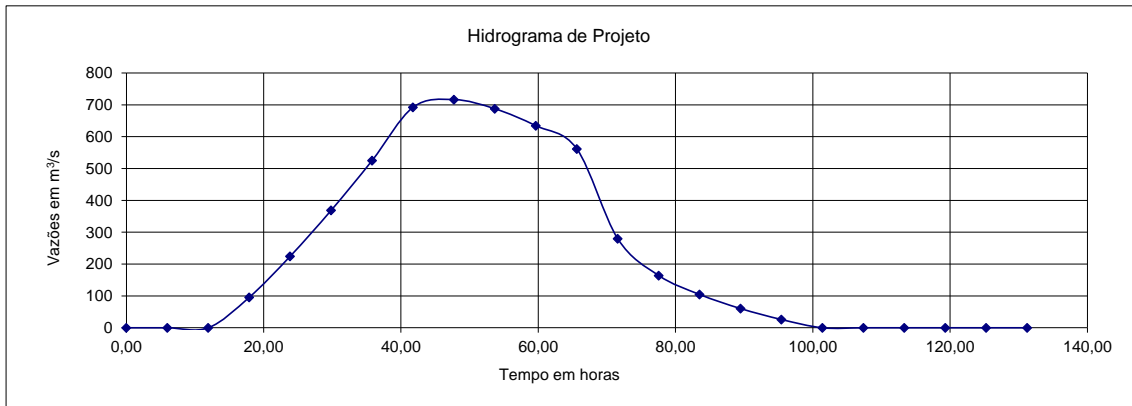
Hidrograma calculado para a foz do rio Macaé (TR = 5 anos)



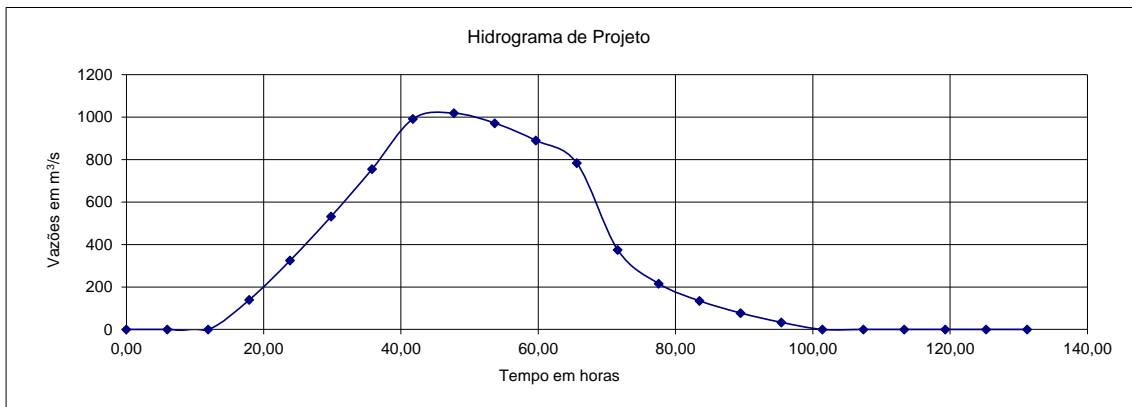
Hidrograma calculado para a foz do rio Macaé (TR = 10 anos)



Hidrograma calculado para a foz do rio Macaé (TR = 20 anos)



Hidrograma calculado para a foz do rio Macaé (TR = 50 anos)



Hidrograma calculado para a foz do rio Macaé (TR = 100 anos)

