

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**QUANTIFICAÇÃO DE VAZÃO EM PEQUENAS BACIAS
COM CARÊNCIA DE DADOS FLUVIOMÉTRICOS**

GERALDO LOPES DA SILVEIRA

*Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do
Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia*

Porto Alegre, outubro de 1997

Aos meus pais

Ruy e Yolanda

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Prof. Dr. Carlos Eduardo Morelli Tucci da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e, com o auxílio financeiro da Coordenadora de Aperfeiçoamento do Pessoal de Ensino Superior - CAPES e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul - FAPERGS.

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Carlos E. M. Tucci, pela inestimável orientação.

Ao prof. André L. L. da Silveira, pela valorosa colaboração.

À prof. Jussara Cabral Cruz pelo constante apoio a execução deste trabalho.

Às doutoras Maria Amélia Torres de Souza e Lúcia Beatriz Lopes Mardini, da Secretaria Estadual de Saúde e Meio-Ambiente, coordenadoras do Programa Estadual de Controle de Simulídeos, pela disponibilização da infra-estrutura necessária ao desenvolvimento da pesquisa.

Ao prof. Antônio Eduardo Leão Lanna, pelo apoio e incentivo a estruturação inicial desta pesquisa.

Ao prof. Robin T. Clarke, pelo apoio a avaliação inicial da pesquisa.

À FAPERGS, pelo financiamento da pesquisa.

À CAPES, pelo fornecimento de bolsa de estudos.

Aos demais professores do IPH, pela formação recebida e amizade demonstrada no convívio junto a instituição.

Aos funcionários do IPH, em especial às secretárias Lígia Campos, Nadir Solari e às bibliotecárias, pelo incentivo e colaboração.

À Universidade Federal de Santa Maria, em especial aos colegas do Departamento de Hidráulica e Saneamento, pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.

Aos colegas do Comitê de Energia e Sustentabilidade da UFSM (<http://www.ufsm.br/ces>), em especial ao Prof. Carlos Leite Maciel Filho e ao estagiário José Paulo Filippin.

Aos meus filhos Matheus, Carolina e Laura e a esposa Jussara, pela compreensão e apoio.

RESUMO

A estimativa de disponibilidade hídrica de bacias sem dados fluviométricos é normalmente feita com base em informações hidrológicas de bacias da mesma região. Para bacias médias e grandes geralmente esta informação está disponível e métodos hidrológicos como a regionalização e modelos chuva-vazão são utilizados.

Para pequenas bacias há uma carência maior de dados havendo pouco embasamento para utilização de métodos hidrológicos correntes, o que coloca o problema da estimativa de disponibilidade hídrica de pequenas bacias sem dados fluviométricos como um dos de maior incerteza da hidrologia.

O presente estudo visou contribuir a melhorar este quadro ao investigar, para bacias pequenas, métodos alternativos para: (i) monitoramento de baixo custo e; (ii) estimativa de vazões.

O monitoramento hidrológico implementado, de baixo custo, priorizou o registro de vazões médias e mínimas fixando a seção por meio de calhas Parshall de fundo raso, dispensando o uso de limnigrafos para a leitura diária. Os resultados obtidos com o monitoramento de 2 a 3 anos em 12 pequenas bacias (1 a 11 km²) de uma rede experimental estabelecida na região serrana do Rio Grande do Sul permitiu estimar o trecho da curva de permanência entre 20 e 100% do tempo. Esse trecho mostrou-se suficiente para estimar suas disponibilidades hídricas.

O monitoramento hidrológico de baixo custo forneceu dados para avaliação do método proposto para estimativa de disponibilidade hídrica em pequenas bacias sem dados fluviométricos. O método baseia-se na combinação de um modelo chuva-vazão simplificado com uma amostragem reduzida de vazões que constitui uma solução alternativa à necessidade da obtenção de séries contínuas de vazões, que é feita por um monitoramento convencional. O método proposto considera que uma rápida interação com o meio através de algumas medições locais conduz a uma boa avaliação da disponibilidade hídrica, por um modelo chuva-vazão com dois parâmetros. Os resultados encontrados para as 6 bacias da rede experimental com séries mais longas indicam um erro padrão para a curva de permanência da ordem de 20%.

Os resultados alcançados são promissores e sua extensão a outras regiões do Rio Grande do Sul podem diminuir a incerteza das estimativas de métodos disponíveis, mas que podem ser inadequados, como, por exemplo, a extrapolação para pequenas bacias de resultados de uma regionalização baseada em informações de bacias médias e grandes.

ABSTRACT

The estimation of water availability in basins without flow data is usually performed based on hydrologic information from basins in the same region. For medium-size and large basins this information is generally available, and hydrologic methods such as regionalization and rainfall-runoff models are used.

For small basins data are often lacking, and there is little foundation on which to base the use of current hydrologic methods, therefore the estimation of water available in small basins without flow data is one of the greatest uncertainties in hydrology. The purpose of the present study is to contribute to improving this picture by investigating, for small basins, alternative methods to (1) perform low cost monitoring and (2) establish flow estimates.

The low cost hydrologic monitoring implemented during this research prioritized the recording of mean and minimum flows fixing the cross section by the use of shallow bed Parshall flumes, not requiring limnigraphs for daily reading. The results obtained during 2 to 3 years monitoring, in 12 small basins (1 to 11km²) belonging to an experimental network established in the mountain region of Rio Grande do Sul, enabled the estimation of a segment of the flow-duration curve between 20 and 100% of the time. This segment proved sufficient to estimate water availability.

Low cost hydrologic monitoring supplied data to evaluate the method proposed in order to estimate water available in small basins without flow data. The method is based on the combination of a simplified rainfall-runoff model with reduced flow sampling that constitutes an alternate solution to the need of obtaining continuous flow series which is performed by conventional monitoring. The method proposed considers that single interaction with the physical system through local measurements leads to a good assessment of water available using a two-parameter rainfall-runoff model. The results found for the 6 basins in the experimental network with the longest series indicate a standard error for the flow-duration curve on the order of 20%.

The results achieved are promising and extending it to other regions of the state of Rio Grande do Sul could reduce the uncertainty of estimates from available methods, which might be inadequate, as, for instance, the extrapolation of results of regionalization based on information from medium-size and large basins to small basins.

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
1 - INTRODUÇÃO	01
1.1 - Justificativas	01
1.2 - Objetivo	02
1.3 - Desenvolvimento do estudo	04
2 - ESTIMATIVA DE DISPONIBILIDADE HIDRICA DE PEQUENAS BACIAS SEM DADOS FLUVIOMÉTRICOS	06
2.1 - Estimativa da curva de permanência por regionalização hidrológica	07
2.2 - Estimativa da disponibilidade hídrica por simulação chuva-vazão	12
2.3 - Contexto da avaliação de disponibilidade hídrica em pequenas bacias sem dados e nova proposta.....	22
3 - MONITORAMENTO HIDROLÓGICO DE BAIXO CUSTO EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS	24
3.1 Limitações das Redes de Coleta em Pequenas Bacias	24
3.2 Esquema de monitoramento de baixo custo proposto e antecedentes	27
3.3 Rede Experimental de Pequenas Bacias	29
3.4 Avaliação dos Dados Registrados	36
3.4.1 Representatividade do período de observação	36
3.4.2 Curva de Permanência	40
4 - ESTIMATIVA DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA DE PEQUENAS BACIAS COM DADOS ESCASSOS	52
4.1 Estrutura Metodológica	54
4.2 O Modelo precipitação-vazão	56
4.2.1 Formulação	57

4.2.2 Os macro-processos associados aos parâmetros do modelo	59
4.2.3 Ajuste dos parâmetros do modelo	61
4.2.4 Geração da série cronológica de vazões e da correspondente curva de permanência	62
4.3 Verificação da Metodologia: avaliação do erro das estimativas.	63
4.4 Resultados e Avaliação das estimativas	65
4.4.1 - Seleção dos Períodos de Estiagem	65
4.4.2 - Ajuste dos Eventos	68
4.4.3 - Intervalos de Confiança das Estimativas por Monte-Carlo....	72
4.4.4 - Variabilidade da incerteza em função do número de estiagens medidas	81
4.5 Comparação das séries geradas e a regionalização	90
4.6 Considerações Finais	98
5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	100
5.1 - Relativamente a quantificação de vazão com dados escassos	100
5.2 - Relativamente ao monitoramento hidrológico de baixo custo	103
6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
ANEXOS A, B, C e D	113

LISTA DE FIGURAS

3.1	Esquema da resposta hídrica de uma pequena bacia.....	25
3.2	Hidrograma real e observado.....	26
3.3	Erro da estimativa da vazão com mudança de leito	26
3.4	Calha tipo Parshall com fundo raso.....	27
3.5	Calha de fundo raso de Schneider 1 em Saporanga.....	28
3.6	Esquema de monitoramento	29
3.7	Localização da região das bacias nos compartimentos geomorfológicos do Rio Grande do Sul	31
3.8	Pequenas bacias de Dois Irmãos e Saporanga.....	32
3.9	Pequenas bacias de Nova Petrópolis	33
3.10	Bacia Primavera em Santa Maria	34
3.11	Situação da rede experimental na bacia do Rio Caí	39
3.12	Situação da bacia do Rio Vacacaí-Mirim	39
3.1.3	Localização no tempo das precipitações do período de monitoramento das calhas	40
3.14	Segmentos de fluviograma observado em Schneider 1	42
3.15	Curva de Permanência Observada em Schneider 1	44
3.16	Curva de Permanência Observada em Schneider 2	44
3.17	Curva de Permanência Observada em Vale Direito	45
3.18	Curva de Permanência Observada em Vale Esquerdo	45
3.19	Curva de Permanência Observada em São Jacó	46
3.20	Curva de Permanência Observada em Carpintaria	46
3.21	Curva de Permanência Observada em Linha Brasil	47
3.22	Curva de Permanência Observada em Linha Araripe	47
3.23	Curva de Permanência Observada em São José do Caí	48
3.24	Curva de Permanência Observada em Arroio Paraíso	48
3.25	Curva de Permanência Observada em Recanto do Suíço	49
3.26	Curva de Permanência Observada em Primavera	49
4.1	O hidrograma e os períodos de recessão	54
4.2	Estrutura metodológica	55
4.3	Esquema do modelo simplificado	57
4.4	Modelo simplificado de balanço hídrico	60

4.5	Esquema de estiagem simulada	62
4.6	Esquema de hipotético fluviograma gerado com a precipitação regional de longo período	63
4.7	Curvas de permanência simuladas com parâmetros amostrais das bacias de São Jacó, Schneider 1 e Schneider 2	69
4.8	Curvas de permanência simuladas com parâmetros amostrais das bacias de Vale Direito, Vale Esquerdo e Carpintaria	70
4.9	Espectro de variabilidade dos parâmetros	73
4.10	Distribuição de Frequência dos Parâmetros por Bacia	76
4.11	Curvas de permanência e intervalos de confiança de 95% centralizadas na curva média observada - bacias de São Jacó, Schneider 1 e Schneider 2	77
4.12	Curvas de permanência e intervalos de confiança de 95% centralizadas na curva média observada - bacias de Esquerdo, Direito e Carpintaria	78
4.13	Curvas de permanência e intervalos de confiança de 95% centralizadas na curva média das estimativas - bacias de São Jacó, Schneider 1 e Schneider 2	79
4.14	Curvas de permanência e intervalos de confiança de 95% centralizadas na curva média das estimativas - bacias de Esquerdo, Direito e Carpintaria	80
4.15	Intervalos de confiança 95% centralizados na curva de permanência observada (1993-94-95) considerando o conhecimento de 1, 2, 3 e 10 eventos em São Jacó, Schneider 1 e Schneider 2	82
4.16	Intervalos de confiança 95% centralizados na curva de permanência observada (1993-94-95) considerando o conhecimento de 1, 2, 3 e 10 eventos em Vale Direito, Vale Esquerdo e Carpintaria	83
4.17	Intervalos de confiança 95% centralizados na curva média das estimativas por Monte Carlo (1993-94-95) considerando o conhecimento de 1, 2, 3 e 10 eventos em São Jacó, Schneider 1 e Schneider 2	85
4.18	Intervalos de confiança 95% centralizados na curva média das estimativas por Monte Carlo (1993-94-95) considerando o conhecimento de 1, 2, 3 e 10 eventos em Vale Direito, Vale Esquerdo e Carpintaria	86
4.19	Erro Padrão da Estimativa em função da curva de permanência média das estimativas por Monte Carlo em São Jacó, Schneider 1 e Schneider 2 ...	87
4.20	Erro Padrão da Estimativa em função da curva de permanência média das estimativas por Monte Carlo em Vale Direito, Vale Esquerdo e Carpintaria	88

4.21	Curvas de permanência sintetizadas pelo modelo para o longo e o curto período de precipitação considerado, com o mesmo jogo de parâmetros Cinf e Ksub – Bacias de São Jacó, Schneider1, Schneider2.	92
4.22	Curvas de permanência sintetizadas pelo modelo para o longo e o curto período de precipitação considerado, com o mesmo jogo de parâmetros Cinf e Ksub – Bacias de Direito, Esquerdo e Carpintaria	93
4.23	Vazões específicas observadas nas bacias Sapiranga e Dois Irmãos	94
4.24	Diferenças das estimativas por regionalização	95
4.25	Limites de confiança do método proposto e a estimativa da regionalização. Bacias de São Jacó, Schneider 1 e Schneider 2	96
4.26	Limites de confiança do método proposto e a estimativa da regionalização. Bacias de V. Direito, V. Esquerdo e Carpintaria	97

LISTA DE TABELAS

3.1	Características físicas predominantes	35
3.2	Índices fisiográficos	35
3.3	Período de tempo dos dados coletados pela rede experimental	36
3.4	Estações pluviométricas da rede nacional na região das bacias.....	37
3.5	Precipitações de Sapucaia e Santa Maria no período 76-95 em mm ..	38
3.7	Características das bacias	38
4.1	Eventos selecionados e parâmetros de ajuste obtidos nas Bacias de Sapiranga	71
4.2	Eventos selecionados e parâmetros de ajuste obtidos nas Bacias de Dois Irmãos	71
4.3	Intervalo de variação dos parâmetros por bacia	72
4.4	Erro padrão das estimativas em percentuais do valor médio esperado	89

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa

A realidade brasileira contempla uma carência enorme de energia para propriedades e aglomerados rurais em pontos isolados da rede interligada de transmissão de energia elétrica, assim como para localidades próximas a perímetros urbanos e distritos agro-industriais de grande demanda energética.

Segundo as conclusões do II FOREMA (1996), Fórum de Energia e Meio-Ambiente da Região Sul, somente no estado do Rio Grande do Sul existem aproximadamente 150 mil propriedades rurais carentes de energia elétrica que, em parte, poderiam ser atendidas através de aproveitamentos hidrelétricos de pequeno porte.

Entretanto quando se parte para o estudo de viabilidade econômica e social dos aproveitamentos de pequeno porte, depara-se com a quase total ausência de dados fluviométricos de pequenos mananciais para o desenvolvimento das avaliações de potencialidades energéticas.

A atual rede hidrometeorológica do Brasil contempla praticamente as grandes bacias hidrográficas (áreas maiores que 500 km²) conforme pode-se observar no inventário das estações fluviométricas do DNAEE (1991). Esta situação é advinda da estratégia governamental estabelecida nas décadas de 60, 70 e 80 que priorizava o armazenamento de grandes volumes d'água para o aproveitamento dos recursos hídricos, principalmente para a geração de energia elétrica, e, na maioria das vezes, sem a visão do aproveitamento múltiplo. Se considerarmos como pequenas bacias aquelas com drenagens inferiores à 50 km², podemos constatar a carência de dados através do inventário da rede nacional mantido pelo DNAEE.

Atualmente os grandes aproveitamentos de recursos hídricos através da construção de grandes barragens se inserem em um cenário diverso. Anteriormente, os estudos de viabilidade econômica dos grandes aproveitamentos não contabilizavam os custos ambientais e sociais daqueles empreendimentos. Hoje, as leis e as relevantes pressões sociais obrigam a contabilização destes custos no estudo da eventual possibilidade de execução da obra, definida pelos estudos de impacto ambiental. Se

agregarmos estas dificuldades sociais e ambientais que aumentam os custos dos grandes empreendimentos às dificuldades de ordem econômico-financeiras, pode-se afirmar que os pequenos empreendimentos tornam-se relativamente mais viáveis nos dias de hoje. Os aproveitamentos de pequeno porte podem ser usualmente configurados em pequenas centrais hidrelétricas, em sistemas de abastecimento à população e à indústria e, em sistemas de irrigação.

Entretanto, quando ocorre a necessidade de estudo da disponibilidade hídrica do pequeno manancial, o profissional habilitado, deparando-se com a carência de dados fluviométricos para a avaliação pretendida, fica sujeito a grandes incertezas quanto aos resultados da quantificação de vazões. Em consequência, por avaliações incorretas pode considerar viável um aproveitamento inviável. Do modo inverso, também pode considerar inviável um aproveitamento adequado à sociedade.

No âmbito do controle ambiental, o conhecimento do escoamento é fundamental para avaliar a qualidade d'água de pequenos rios decorrente de cargas pontuais e difusas de efluências de indústrias, de cidades e do uso agrícola. Para estimar as condições ambientais sujeitas a essas cargas poluidoras é necessário, em consequência, conhecer as vazões de estiagem do rio.

Outro aspecto também relevante da quantificação de vazões refere-se ao desenvolvimento do procedimento de outorga para uso dos recursos hídricos em um processo de desenvolvimento corrente no Brasil e no Rio Grande do Sul (Brasil,1997; Rio Grande do Sul, 1994), função das atribuições definidas pelas últimas constituições Federal e Estadual. Em decorrência desta demanda, as entidades que necessitam definir a outorga do uso das águas se defrontam, por sua vez, com a falta de informações em pequenas bacias. Nesta situação há o risco de emprego de métodos inadequados e obtenção de resultados com grande incerteza associada.

Há, portanto, uma grande necessidade de estudos hidrológicos confiáveis para pequenas bacias que levem em conta a carência de dados fluviométricos da rede oficial de monitoramento.

1.2 - Objetivos

O objetivo desta tese é o de propor um método de avaliação de disponibilidade hídrica fluvial de pequenas bacias hidrográficas com carência de dados fluviométricos, de modo a proporcionar melhores possibilidades de:

- quantificação de vazões para estudos de viabilidade econômica de pequenos aproveitamentos de recursos hídricos como pequenas centrais hidrelétricas, sistemas de irrigação e de abastecimento urbano;
- estudos de avaliação dos impactos ambientais para intervenções estruturais e não estruturais em pequenas bacias hidrográficas;
- desenvolvimento dos procedimentos de outorga para uso dos recursos hídricos.

Relativamente aos estudos de viabilidade econômica pode-se considerar que o projeto de um pequeno aproveitamento de recursos hídricos passa normalmente por diferentes etapas de definição. Estas etapas poderiam se caracterizar por estudos de inventário, de viabilidade propriamente dito e de elaboração do projeto final. Em empreendimentos de maior porte, a elaboração do projeto final se divide em duas partes denominadas de projeto básico e executivo.

O método proposto é indicado para a etapa do estudo de viabilidade econômica de um empreendimento selecionado na etapa de inventário. O resultado desta etapa é a indicação ou não do local selecionado como um empreendimento viável para a sociedade, no caso de sua execução pelo governo, ou para a iniciativa privada, através de concessão do governo segundo a Lei das Concessões de 16/07/96 (BRASIL, 1995 e 1996).

O estudo de viabilidade contabiliza o custo de execução, satisfeitas todas as exigências legais, e as receitas decorrentes do funcionamento do empreendimento. Para o caso de uma pequena central hidrelétrica as receitas advém da energia gerada, consequência do engolimento de água pelas turbinas. Logo, a correta avaliação do potencial hídrico de um bacia é condição necessária ao estudo da viabilidade de qualquer aproveitamento, porque está relacionada diretamente com a receita financeira gerada pela sua exploração, definindo desta forma a real viabilidade de execução da obra ou não. As mesmas considerações valem para os demais aproveitamentos de recursos hídricos.

Relativamente à questão da preservação ambiental, quando do uso de uma pequena bacia hidrográfica para determinado tipo de aproveitamento dos seus recursos naturais, é necessário avaliar os impactos possíveis em relação às suas condições

naturais, de modo a permitir um desenvolvimento sustentado para a região. Estas condições naturais da bacia devem ser caracterizadas pelas respectivas ofertas hídricas quantificadas. Geralmente as condições de outorga de água estão vinculadas à questão ambiental.

1.3 Desenvolvimento do estudo

Este estudo, considerando o exposto anteriormente, se assenta na necessidade de quantificar vazões para aproveitamentos de recursos hídricos em pequenas bacias que estão desprovidas de dados fluviométricos.

Considerando que a pouca disponibilidade de dados em pequenas bacias caracteriza uma realidade constante no território brasileiro, este trabalho tem por objetivo identificar caminhos possíveis para estabelecer:

- 1) uma forma de monitoramento hidrológico de baixo custo
- 2) um procedimento simplificado mas suficientemente preciso para estimativa de disponibilidade hídrica em bacias carentes de dados

Esse estudo é apresentado de acordo com o seguinte:

- no **capítulo 2**, intitulado “Estimativa de vazão em pequenas bacias sem dados” abordam-se os métodos potencialmente utilizáveis em bacias sem dados: (i) a regionalização hidrológica e; (ii) a simulação chuva-vazão. Enfoca-se fundamentalmente a curva de permanência de vazões, função retratante do potencial hídrico de uma bacia, e as formas de sintetizá-la com menos incerteza para a seção fluvial de interesse.
- no **capítulo 3**, intitulado “Monitoramento hidrológico de baixo custo para pequenas bacias” dois objetivos principais se destacam:
 - a) a proposição e avaliação inicial de uma possibilidade para monitoramento hidrológico em pequenas bacias, caracterizando-o como uma metodologia alternativa de baixo custo ao monitoramento convencional e;

- b) a aquisição de dados para a verificação inicial de metodologia proposta (objeto do capítulo 4), de estimativa de vazões em pequenas bacias carentes de dados fluviométricos.
- no **capítulo 4**, “Estimativa de disponibilidade hídrica de pequenas bacias com dados escassos” propõe-se um método de avaliação que procura dar uma vinculação local aos procedimentos usuais de cálculo de escritório. O método busca dar encaixe metodológico a algumas medições de vazões efetuadas na seção fluvial de interesse. Avalia-se a magnitude das vazões medidas a campo e o seu decaimento no tempo em conjunto com o período antecedente sem chuvas que provocou a estiagem. No passo seguinte procura-se quantificar a massa hídrica escoada pela bacia por simulação chuva-vazão através da precipitação do longo período com o uso de um modelo simplificado. A proposição da simulação chuva-vazão de forma simplificada é motivada pela circunstância da pouca disponibilidade de vazões na seção de interesse e do objetivo de explicar principalmente a ocorrência das vazões medianas e mínimas escoadas pela bacia.
 - no **capítulo 5**, intitulado “Conclusões e Recomendações” sintetizam-se as conclusões a respeito dos capítulos 3 e 4 e apresentam-se perspectivas relativamente a continuidade das pesquisa na área e à extensão dos resultados obtidos até o momento.

2. ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DE PEQUENAS BACIAS SEM DADOS FLUVIOMÉTRICOS

A estimativa do comportamento hidrológico de uma bacia sem dados fluviométricos é uma tarefa freqüente em projetos de aproveitamento dos recursos hídricos porque os locais destes geralmente não coincidem com os locais das redes permanentes de fluviometria.

Para realizar esta estimativa duas alternativas científicas estão freqüentemente disponíveis : i) a regionalização hidrológica, que se vale de informações fluviométricas e climatológicas de postos com dados e informações fisiográficas de bacias da região para sintetizar uma informação hidrológica em locais sem monitoramento; e ii) a simulação chuva-vazão da bacia sem dados de vazão (mas com dados climatológicos) com parâmetros transferidos de modelos chuva-vazão ajustados em bacias próximas.

Como os estudos hidrológicos podem ter diversos objetivos são extremamente variados os resultados que se podem obter com a regionalização e a modelagem chuva-vazão. Por isso convém definir aqui o domínio de interesse de acordo com os objetivos do presente trabalho. Vão interessar as vazões determinantes no aproveitamento dos recursos hídricos, ou seja, aquelas vazões que poderiam ser denominadas de *vazões de consumo*, utilizáveis para atender diferentes necessidades como, por exemplo, a geração de energia elétrica, o abastecimento urbano e rural, a irrigação, a navegação e a preservação ambiental. Fogem ao escopo do trabalho aquelas vazões extremas, associadas a um período de retorno que poderiam ser denominadas de *vazões de segurança*, como, por exemplo, vazões máximas para projeto de descarregadores de cheias e vazões mínimas para garantia de ecossistemas.

A utilidade da regionalização hidrológica com respeito a vazões de consumo numa bacia sem dados resume-se basicamente na síntese da curva de permanência de vazões, uma expressão concisa da disponibilidade hídrica, embora não considere a seqüência cronológica das vazões, que só é dada pelo hidrograma. Por outro lado, a alternativa de modelagem chuva-vazão é capaz de gerar o hidrograma e, conseqüentemente, também a curva de permanência. De acordo com este quadro serão desenvolvidos os itens a seguir.

2.1 - Estimativa da curva de permanência por regionalização hidrológica

A curva de permanência representa a relação entre a magnitude e a frequência de vazões diárias, semanais, mensais (ou de qualquer outra duração) de uma determinada bacia hidrográfica, fornecendo a porcentagem de tempo que uma dada vazão é igualada ou superada num período histórico definido (Vogel e Fennessey, 1994). Considerando seu uso freqüente em engenharia há relativamente pouca pesquisa sobre seu desenvolvimento em bacias sem dados (Murdock e Gulliver, 1993). Os trabalhos mais frequentemente citados na literatura internacional são os de Dingman (1978), Quimpo et al (1983), Mimikou e Kaemaki (1985) e Fennessey e Vogel (1990). No Brasil destacam-se os trabalhos de Kavisky e Fior (1985) e Tucci (1991). Um roteiro prático para o cálculo da curva de permanência é encontrado em Tucci (1993).

A regionalização hidrológica, em geral, caracteriza uma variedade de métodos que utilizam informações regionais para sintetizar dados de vazão. Estas informações podem ser características fisiográficas e hidrometeorológicas da bacia e parâmetros estatísticos calculados a partir das séries de vazões de postos da região. São exemplos típicos de métodos de regionalização aqueles que fazem ajuste de uma distribuição estatística a uma variável (ou a um parâmetro ou a uma função hidrológica), combinando-a com a regressão desta mesma variável com características físicas das bacias (a área contribuinte quase sempre é uma delas) e características hidrometeorológicas (pluviometria média anual, freqüentemente). Fica claro, assim, que, entre várias regionalizações usuais (vazões máximas, médias e mínimas), a regionalização da curva de permanência é apenas um entre vários estudos possíveis.

Na regionalização da curva de permanência podem ser adotados dois procedimentos (Tucci, 1991):

- um baseado na *parametrização* da curva, relacionando os parâmetros com características fisiográficas e climatológicas da bacia;
- e outro que faz a *interpolação*, gráfica ou analítica, de uma curva passando por vazões com permanências pré-definidas e estimadas a partir das referidas características da bacia.

Os modelos de regionalização que definem a curva de permanência na forma parametrizada podem provocar erros nas estimativas do ramo inferior da curva, o dos

escoamentos menores, embora possa apresentar um bom ajuste global. O uso de modelos do tipo interpolativos minimizam este erro pela estimativa ponto a ponto da curva no trecho de interesse.

O estudo de Dingman (1978) para New Hampshire (EUA), com dados diários de 24 estações fluviométricas com mais de 10 anos de observação (bacias de 7 a 8000 km², mediana de 260 km²), é tipicamente do tipo interpolativo, definindo as vazões nas permanências de 2, 5, 30 e 95%. As três primeiras como uma proporção constante da vazão média, cujo valor por unidade de área é função linear da altitude média da bacia, e a última também tomada por unidade de área é uma função polinomial de segunda ordem da altitude média da bacia. O autor apresenta intervalos de 95% de confiança empíricos com base na variabilidade das vazões adimensionais (para as permanências de 2, 5 e 30%) e na variabilidade da altitude média das bacias (considerada em todas as quatro vazões). Para as variabilidades citadas foram assumidas distribuições normais.

Quimpo et al (1983), por sua vez, propuseram para as Filipinas, um modelo regional parametrizado para as curvas de permanência, voltado para o aproveitamento hidroenergético. Basearam-se em 35 estações com dados diários de vazão e séries de 8 a 21 anos (bacias de 29 a 4150 km², mediana de 190 km²). De cada curva de permanência observada foram retiradas 13 pares vazão-permanência (vazão por unidade de área) correspondentes aos percentis 1, 5, 95, 99 e de 10 a 90, de 10 em 10. Para cada estação, aos 13 pares foi ajustada por mínimos quadrados a equação :

$$q = q_A e^{-cD}$$

onde q é a vazão por unidade de área, D é a permanência (%) e q_A e c são os parâmetros.

O parâmetro c foi regionalizado por intermédio de isolinhas no mapa das Filipinas seguindo tendências climáticas e o parâmetro q_A foi relacionado com a área da bacia por:

$$q_A = p A^{-m}$$

onde A é a área da bacia (km²) e p e m são parâmetros, que foram ajustados com base apenas nas 12 bacias com área maior que 100 km² em razão de problemas amostrais nas pequenas bacias.

O estudo de Quimpo et al (1983) não aborda o problema da incerteza nos resultados.

A regionalização da curva de permanência apresentada por Mimikou e Kaemaki (1985) para as regiões oeste e noroeste da Grécia seguiu também um modelo parametrizado. Foram utilizados dados mensais de vazão de 13 postos (bacias de 86 a 5005 km², mediana de 700 km²), sendo 11 para o desenvolvimento e 2 para a validação do estudo. De cada curva de permanência observada foram retirados 25 pares vazão-permanência correspondentes aos percentis de 4 a 100%, de 4 em 4, cujos valores foram ajustados por mínimos quadrados ao polinômio :

$$Q = a - bD + cD^2 - dD^3$$

onde Q é a vazão, D é a permanência (%), e a,b,c e d são parâmetros, que foram correlacionados com a precipitação média anual P, a área da bacia A, o desnível máximo da bacia H e o comprimento do rio principal L pela expressão :

$$p = b_0 P^{b_1} A^{b_2} H^{b_3} L^{b_4}$$

onde p representa os parâmetros a,b,c e d, e b₀, b₁, b₂, b₃ e b₄ são os parâmetros da regressão.

Um efetivo de apenas 11 realizações e 5 parâmetros (portanto apenas 6 graus de liberdade) fragilizam as regressões de Mimikou e Kaemaki (1985). Como medida de validação reservaram duas curvas de permanência que não participaram do estudo, mas os autores satisfizeram-se apenas em apresentar o erro médio quadrático porcentual entre as curvas de permanência observadas e calculadas. Estes erros foram de 3% para uma bacia de 86 km² e de 10% para a outra bacia com 1481 km².

Fennessey e Vogel (1990) utilizaram dados de vazões diárias de 26 estações (bacias de 4 a 390 km², mediana de 52 km²) para também estabelecer um modelo paramétrico de regionalização da curva de permanência em Massachusetts (EUA). Distingue-se dos modelos paramétricos acima porque ajusta uma função (no caso a lognormal) diretamente às vazões diárias observadas e suas permanências (previamente as vazões foram ordenadas de forma decrescente e as correspondentes probabilidades de excedência, as permanências, calculadas pela fórmula de Weibull). O ajuste realizado para 23 estações (3 foram guardadas para validação) restringiu-se ao trecho entre as permanências de 50 e 99%. A estimativa dos parâmetros, a saber a média, μ , e a

variança σ^2 dos logaritmos neperianos das vazões, foi feita por minimização do erro médio quadrático porcentual (como a curva de permanência engloba vazões correlacionadas temporalmente, logo não independentes, a estimativa dos parâmetros pelo método estatístico da máxima verossimilhança era inaplicável). As estimativas de μ foram correlacionadas com as áreas e as estimativas de σ^2 com os desníveis máximos das bacias. Foram calculados intervalos de 95% de confiança de acordo com a teoria estatística (com uso da estatística de Student) onde foi deduzida uma expressão para a variança da estimativa do logaritmo da vazão função da área contribuinte e do desnível máximo. A validação com as 3 curvas de permanência que não participaram do estudo mostraram o bom desempenho do modelo.

Kavisky e Fior (1985) compararam o desempenho de vários modelos paramétricos na regionalização da curva de permanência no Estado do Paraná (Exponencial, Pareto, Lomax, Weibull, Log-logística, Log-gumbel, Log-normal). Foram utilizadas as vazões diárias de 63 bacias com áreas entre 54 e 5000 km² (mediana de 900 km²). Os parâmetros regionalizados foram os momentos de primeira e segunda ordem para os quais foram feitos mapas de isolinhas. Também foi regionalizada a vazão média de longo período por unidade de área na forma de um mapa de isolinhas. Os melhores resultados foram obtidos com a lei Lomax. Para a construção dos intervalos de confiança os autores se basearam na distribuição estatística da vazão média de longo período.

Tucci (1991) apresentou, por sua vez, um estudo da curva de permanência para o estado do Rio Grande do Sul, dividido em seis regiões, pelo método interpolativo. Foram utilizados dados de vazões médias diárias de 105 postos com áreas de contribuição entre 41 e 189.300 km² (mediana de 2058 km² e média de 8292 km²). Foi feita uma comparação entre as alternativas de considerar a curva de permanência na sua forma empírica ou representada por uma função lognormal com parâmetros ajustados pelo método dos momentos. Esta última, que caracterizaria um modelo paramétrico, foi descartada pelos seus resultados julgados imprecisos (o critério de análise foi a verificação do ajuste para as vazões com permanências de 50 e 95%, que notaremos por Q_{50} e Q_{95} , respectivamente). Assim, foi adotado um modelo interpolativo exponencial que passa por Q_{50} e Q_{95} :

$$Q = e^{aD+b}$$

onde Q é a vazão, D é a permanência (%) e a e b são dados por :

$$a = - (\ln (Q_{50}/Q_{95}))/0,45$$

$$b = \ln Q_{50} - 0,50 a$$

A regionalização se deu pela regressão de Q_{50} e Q_{95} com a área da bacia através de uma equação de potência do tipo:

$$Q_{50} \text{ ou } Q_{95} = cA^d$$

onde A é a área da bacia e c e d são parâmetros.

Mesmo não presentes no estudo, intervalos de confiança para Q_{50} e Q_{95} poderiam ter sido estabelecidos conforme indicado em Fennessey e Vogel (1990). Por outro lado foi apresentada uma análise de sensibilidade para avaliar o impacto da consideração ou não de dados da década de 40, uma década de vazões mais baixas, na curva de permanência. Em alguns postos as diferenças foram importantes, sobretudo para a Q_{95} .

Os estudos acima mostraram que há uma variedade de abordagens, tanto para modelos paramétricos como para interpolativos, para a regionalização da curva de permanência, sem que nenhuma possa ditar sua superioridade sobre a outra. Ressalte-se a adequabilidade da regionalização da curva de permanência para uma ampla gama de variação de áreas de bacias em diferentes regiões do mundo. Por outro lado, ficou evidente pelo conteúdo dos trabalhos analisados que faltam ainda serem desenvolvidos critérios de validação dos modelos análogos aos que Klemes (1986) preconiza para os modelos chuva-vazão. Também sentiu-se a necessidade de que análises de incerteza sejam incorporadas de ofício nos estudos para uma correta avaliação dos erros envolvidos no uso dos modelos. Alguns estudos são mais claros que os outros com respeito às hipóteses básicas adotadas, como por exemplo a hipótese de estacionaridade que é geralmente feita em estudos deste tipo.

A simples observação dos intervalos de áreas abrangidas nos estudos acima, todos com bons resultados, permite avaliar sua aplicabilidade para pequenas bacias. Metade das bacias estudadas por Dingman (1978) têm entre 7 e 260 km², as de Quimpo et al (1983) têm entre 29 e 190 km², as de Mimikou e Kaemaki (1985) têm entre 86 e 700 km² e as de Fennessey e Vogel (1990) têm entre 4 e 52 km². Fica evidente que bacias pequenas foram consideradas nesses estudos. O fato de que elas possuem um

regime hidrológico diferenciado em relação às grandes bacias não impede aparentemente que a regionalização da curva de permanência produza bons resultados.

Entretanto nada é garantido quando se extrapola o uso de um estudo para áreas menores que aquelas efetivamente analisadas. O uso do estudo de Tucci (1991) para bacias com a ordem de grandeza das utilizadas nesta tese (bacias com áreas entre 1 e 11 km² no Rio Grande do Sul) seria inadequado, podendo conduzir a erros significativos na síntese da curva de permanência. A ausência de dados suficientes de pequenas bacias que impediu a abrangência maior do estudo de Tucci (1991) foi um dos fatores motivadores do desenvolvimento da metodologia apresentada nesta tese.

2.2 Estimativa da disponibilidade hídrica por simulação chuva-vazão

Um modelo hidrológico é definido por Haan (1989) como um conjunto de leis físicas e empíricas expressas de forma matemática que são combinadas de forma a produzir uma resposta (saída) em função de condições conhecidas e/ou assumidas (entrada). Parâmetros são utilizados na representação dos diversos processos e os modelos chuva-vazão são normalmente paramétricos.

A simulação chuva-vazão numa bacia é feita por um modelo hidrológico que representa a fase terrestre dos processos hidrológicos (Moore e Clarke, 1981). Muitas vezes o modelo hidrológico se resume em transformar séries de chuva (e de evapotranspiração potencial) em séries de vazões (e de evapotranspirações reais).

Dentre os vários usos dos modelos chuva-vazão, podem ser destacadas as seguinte aplicações:

- geração de séries sintéticas de vazões em seções fluviais monitoradas, com parâmetros estimados a partir das séries fluviométricas observadas;
- geração de séries sintéticas de vazões em seções não monitoradas, com estimativa de parâmetros a partir de valores de outras bacias.

Estas duas aplicações dos modelos chuva-vazão para gerar vazões em bacias sem dados fluviométricos desdobram-se em quatro situações : i) quando a bacia não dispõe de dados fluviométricos em determinados períodos, mas dispõe de vazões observadas em outros; ii) quando a bacia tem um período de observações e se deseja gerar uma série de vazões maior com base em precipitações geradas estocasticamente;

iii) quando a bacia nunca foi monitorada mas procura-se calcular as vazões decorrentes de uma série observada de precipitações e iv) quando a bacia nunca foi monitorada e se necessita de uma série extensa de vazões que só pode circunstancialmente ser gerada a partir de uma série estocástica de precipitações.

Evidentemente geram vazões menos imprecisas as situações i) e iii) porque as precipitações são reais.

É praticamente impossível enumerar todas as aplicações de modelos chuva-vazão relatadas na literatura científica. Entretanto alguns modelos podem ser citados por sua expressão mundial ou local. O modelo STANFORD IV (Crawford e Linsley, 1966) dos Estados Unidos é um referência obrigatória pelo desenvolvimento de abordagens de modelagem hidrológica utilizadas até os dias de hoje. Mais recentemente a Europa produziu o S.H.E (Abbott et al, 1986) buscando integrar as melhores formulações conhecidas em hidrologia em cada processo para representar toda bacia. Estes são exemplos de modelos completos, no sentido de que tentam representar um grande número de processos hidrológicos. Existe, de fato, uma variedade de modelos mais simples pela liberdade que seus autores tem na escolha dos processos preponderantes a modelar, na combinação de algoritmos existentes na representação dos processos e na formulação de novos algoritmos.

A variedade de modelos é, por um lado, uma prova indiscutível de sua utilidade no estudo da hidrologia de bacias hidrográficas onde estão incluídos evidentemente os estudos de disponibilidade hídrica, mas por outro lado coloca a questão de como julgar que um modelo é melhor que o outro. As dificuldades encontradas neste tipo de comparação decorre do grande número de fatores que envolve a transformação de precipitação em vazão na bacia (Tucci, 1997). Por exemplo, a variabilidade temporal e espacial da precipitação pode embutir erros superiores a qualquer refinamento de metodologia que simule os processos hidrológicos numa bacia.

Normalmente os modelos chuva-vazão não são distinguidos também pela aplicabilidade em pequenas ou grandes bacias. A modelagem chuva-vazão é aplicável desde as micro-bacias rurais (menos de 1 km²) até as bacias expressivas (1000-5000 km²). Um mesmo modelo pode ser aplicado para uma vasta gama de áreas. Por exemplo, Tucci et al (1981) aplicaram o modelo IPH-II para bacias entre 2,6 e 810 km².

Assim, no contexto atual, a tendência parece direcionar para a avaliação dos modelos não de forma individual, mas sim classificados em categorias de acordo com a sua natureza. A importância que vem adquirindo no correr dos anos vários modelos tidos como fisicamente baseados, obriga a uma análise objetiva do desempenho das diversas classes de modelos, para que o argumento de que um modelo é melhor que outro não se restrinja à contabilização de quantos processos hidrológicos tiveram uma formulação mais física. Sempre é bom lembrar que, muitas vezes, as representações físicas envolvem na verdade relações empíricas com parâmetros ou coeficientes físicos só no nome.

Na classificação dos modelos geralmente são introduzidas dualidades de conceitos tais como (Tucci,1987):

- Modelos *conceituais* ou *empíricos* - os modelos conceituais levam em conta os processos físicos na sua elaboração enquanto os modelos empíricos ou *caixas-preta* usam funções empíricas sem base física.
- Modelos *determinísticos* ou *estocásticos* - os modelos determinísticos não admitem variáveis aleatórias na sua formulação; se admitisse seria estocástico.
- Modelos *concentrados* ou *distribuídos* - os modelos concentrados utilizam valores médios espaciais para as variáveis e parâmetros enquanto que nos modelos distribuídos é considerada a sua variabilidade espacial.

De autor para autor pode haver alguma diferença de interpretação nos termos acima. Não é difícil encontrar na literatura científica recente o conceito de modelo *baseado fisicamente* com a definição acima de modelo conceitual. Neste caso o modelo *conceitual* passa a denominar aqueles modelos com representação fenomenológica dos processos hidrológicos, feita com pouca ou nenhuma base física. Um exemplo de representação fenomenológica é considerar a existência de um reservatório subterrâneo alimentado pela infiltração profunda e que gera escoamento de base no curso d'água principal através de uma propagação feita com algum método da teoria dos sistemas lineares (por exemplo, isto é feito no modelo IPH II, Tucci et al, 1981). Tucci (1997) avalia atualmente que os modelos conceituais retratam condições médias das variáveis (capacidade de infiltração, estado de umidade do solo, vazão, nível dos aquíferos, evapotranspiração) numa ótica global (mesmo nas sub-áreas de uma representação distribuída. Os fenômenos são, em consequência, descritos por formulações e

parâmetros empíricos que guardam uma relação apenas qualitativa com a realidade física da bacia.

Haan (1989) afirma que, se um modelo empírico é aquele que contém alguma relação empírica, todos os modelos chuva-vazão seriam empíricos (afinal modelos empíricos são todos aqueles baseados nas observações, como sempre é o caso de um modelo hidrológico). Além disso, prossegue este autor, como o modelo concentrado descreve os processos numa escala maior que a pontual, todos os modelos seriam, na prática, concentrados, no que concorda com a idéia de Beven (1989) de que geralmente os chamados modelos distribuídos com base física aplicam modelos conceituais concentrados em cada unidade espacial de divisão da bacia.

Troutman (1985) também sustenta que qualquer modelo chuva-vazão pode ser considerado conceitual, além de paramétrico, pois de um lado os modelos determinísticos com base física tem seus parâmetros normalmente obtidos por calibração e, de outro, os parâmetros de modelos estatísticos (regressões) e caixas-preta geralmente tem algum significado físico.

Visto a variedade de interpretações que pode haver neste assunto, a classificação utilizada por Refsgaard e Knudsen (1996) parece bastante interessante:

- Modelo conceitual concentrado (todo modelo concentrado seria conceitual);
- Modelo físico-distribuído (todo modelo com base física seria distribuído);
- Modelo conceitual-distribuído (seria um conjunto de modelos conceituais-concentrados aplicados aos elementos espaciais em que a bacia foi dividida, para aproveitar informações espaciais disponíveis de chuva, topografia, solos, vegetação, etc.).

Independente da classificação dos modelos chuva-vazão seu uso eficiente para calcular vazões em bacias sem dados está condicionado à sua validação. Neste campo Klemes (1986) propõe os seguintes testes hierarquizados :

1. Teste com amostra dividida (*split-sample test*) : consiste na calibração dos parâmetros do modelo com base em 3 a 5 anos de dados (primeira parte da amostra) com posterior validação num período similar (segunda parte da amostra);

2. Teste com amostra dividida não estacionária (*differential split-sample test*) : envolve a calibração do modelo num período anterior a modificações na bacia ou no clima (primeira parte da amostra) e subsequente validação com os dados após estas modificações (segunda parte da amostra, não estacionária em relação à primeira). Antes desta validação os parâmetros do modelo devem estar definidos, incorporando eventualmente uma evolução lógica dos seus valores em função do impacto esperado das modificações nos processos hidrológicos simulados.

3. Teste com amostras de bacias próximas (*proxy basin test*) : baseia-se na calibração do modelo em uma bacia próxima com dados e validação em outra bacia da vizinhança (com dados) com regime hidrológico semelhante. Evidentemente que para a simulação de validação os parâmetros são eventualmente adaptados para refletir as condições da bacia (por exemplo, um parâmetro que é dependente da área da bacia). Adaptações similares são feitas nos parâmetros quando da aplicação do modelo aprovado numa bacia sem dados fluviométricos da região;

4. Teste com amostras não estacionárias de bacias próximas (*proxy basin differential split-sample test*) : a calibração do modelo é feita em uma bacia próxima com dados, que não sofreu modificações, e a validação em outra bacia com dados da vizinhança, mas com o regime hidrológico original que era semelhante ao da bacia de calibração alterado por causa de variações no clima ou pela ocupação do solo. Diferencia-se do teste anterior porque exige uma estipulação prévia dos parâmetros para a bacia de validação em função das alterações que ela sofreu em relação à bacia de calibração. Num posterior uso do modelo aprovado em uma bacia da região sem dados fluviométricos, conforme seja sua situação (modificada ou não), um dos dois jogos de parâmetros seria aplicável. O jogo de parâmetros compatível eventualmente sofre adaptações para se adequar à bacia simulada (por exemplo, maior ou menor presença de determinado tipo de solo).

Em resumo, para os modelos chuva-vazão, o teste 1 de Klemes (1986) trata da validação de um modelo com vazões observadas na própria bacia, o teste 2 refere-se à validação do modelo em uma bacia sob condições não estacionárias, o teste 3 qualifica um modelo para gerar vazões em bacias não monitoradas com condições semelhantes às bacias vizinhas de calibração e validação e, por fim, o teste 4 avalia a capacidade do

modelo também para gerar vazões em bacias sem dados, mas abrangendo situações de mudança (climáticas ou de ocupação do solo) captadas no processo de calibração e validação em bacias vizinhas (bacia de validação com condições alteradas em relação à bacia de calibração).

Refsgaard e Knudsen (1996) aplicaram os testes acima para comparar o desempenho de três modelos correspondentes às categorias em que acreditam poderem ser classificados os modelos hidrológicos : i) um conceitual concentrado ; ii) outro com base física distribuído e iii) um terceiro conceitual distribuído, pois usa informações distribuídas de natureza meteorológica, topográfica, pedológica e de ocupação do solo, mas calcula as respostas hidrológicas em cada unidade espacial de forma conceitual e não fisicamente baseada. A comparação feita com dados de três bacias do Zimbawe (áreas de 254, 1040 e 1090 km²) resultou no seguinte :

- Os três modelos apresentaram resultados similares para o teste 1, com todos apresentando hidrogramas calculados concordando bem com os hidrogramas observados no período de validação.
- O teste 2 considerou uma amostra com alguns anos chuvosos seguidos por outros mais secos, caracterizando uma não estacionaridade climática. Os modelos conceitual concentrado e fisicamente baseado distribuído tiveram desempenho melhor, calculando hidrogramas semelhantes aos observados no período de validação, enquanto que o modelo conceitual distribuído superestimava os picos.
- No teste 3 os três modelos reproduziram bem os hidrogramas da bacia de validação com boa avaliação do balanço hídrico. Entretanto há maior subjetividade na adequação prévia dos parâmetros do modelo conceitual concentrado e foi avaliado que isto produziu o dobro da incerteza dos modelos distribuídos no cálculo do balanço hídrico anual. Uma variante do teste 3 foi realizada, considerando a existência de um ano de dados na bacia de validação para a calibração dos modelos, para avaliar sua melhora de desempenho. Esta melhora foi bem significativa para o modelo conceitual concentrado. Para o modelo conceitual distribuído, que já tivera o melhor desempenho antes, os resultados não puderam ser melhorados. Quanto ao modelo com base física distribuído, que ficou em terceiro lugar no teste 3 original, ele não melhorou seu desempenho e isto foi creditado a uma possível má qualidade dos dados, sendo ele um modelo muito sensível a isso, tornando-o mais sujeito a calibrações errôneas.

- O teste 4, assim como o teste 2, também considerou amostras com anos chuvosos para calibração e com anos mais secos para validação, caracterizando uma situação similar a uma não estacionaridade climática. O modelo conceitual distribuído reproduziu muito bem os hidrogramas na bacia de validação. O pior desempenho foi o do modelo com base física distribuído e a razão para isto foi uma inadequada avaliação de um parâmetro de drenagem que resultou em escoamentos de base excessivos. O cálculo do balanço hídrico anual revelou uma incerteza maior do modelo conceitual concentrado em relação aos modelos distribuídos, dos quais o melhor foi o com base física, apesar da sua má reprodução geral das vazões diárias. Uma variante do teste 4, a exemplo do que foi feito para o teste 3, avaliou a possível melhora do desempenho dos modelos se um ano (chuvoso) de dados estivesse disponível para calibração na bacia de validação. Os resultados demonstraram que esse ano de calibração permitiu que todos os modelos pudessem fornecer uma excelente representação do escoamento em todo período (com anos secos e chuvosos).

Algumas conclusões segundo Refsgaard e Knudsen (1996) destacam-se dos resultados acima:

1. Alguns poucos anos de dados (1-3 anos) parecem ser suficientes para calibrar um modelo chuva-vazão para simular o comportamento hidrológico de uma bacia mesmo sob condições climáticas não estacionárias. E o uso de um modelo conceitual concentrado seria tão adequado quanto um mais sofisticado de natureza distribuída.

2. Para bacias sem dados fluviométricos, entretanto, os modelos distribuídos parecem dar melhores resultados que um modelo concentrado, desde que informações apropriadas sobre as características da bacia possam ser obtidas.

Com respeito aos modelos distribuídos convém reproduzir aqui as quatro áreas que, segundo Beven (1985), Sá (1995) oferecem grande potencial para aplicação deste tipo de modelo :

1. Previsão dos efeitos e mudanças do uso do solo ;
2. Previsão dos efeitos de variabilidade espacial de entradas e saídas ;
3. Previsão do movimento de poluentes e sedimentos ; e

4. Previsão da resposta hidrológica de bacias sem dados para calibração de um modelo concentrado.

O cotejo entre estas aplicações e as características de um estudo de disponibilidade hídrica indica que a modelagem do tipo distribuída pode não ser necessária nesta tarefa pelas seguintes razões :

- Na avaliação da disponibilidade hídrica no exutório de uma bacia normalmente não é feita a hipótese de uma mudança significativa do uso do solo no futuro ;
- Ao se interessar basicamente pela resposta integrada espacial da bacia (vazões no exutório) o estudo da disponibilidade hídrica pode prescindir do conhecimento dos caminhos dos fluxos de água no interior da bacia.

Neste contexto, a necessidade de uma modelagem distribuída seria julgada em função da presença ou não de dados que possibilitem a calibração de um modelo mais simples concentrado, conforme a quarta idéia de Beven (1985).

Esta idéia e as conclusões de Refsgaard e Knudsen (1996) permitem especular que, se houvesse alguma informação fluviométrica medida na bacia, mesmo esporádica, existiria a possibilidade de se ajustar um modelo chuva-vazão simples do tipo concentrado com resultados realistas. Esta possibilidade é explorada na presente tese para bacias pequenas com áreas entre 3 e 11 km².

Independente do tipo de modelo aplicado é preciso avaliar os erros embutidos nos seus resultados. A fonte desses erros é a incerteza (Haan, 1989) e ela pode ter origem:

1. Nos dados de entrada e saída ;
2. Na estrutura do modelo ;
3. Nos parâmetros.

Os dados de entrada englobam variáveis meteorológicas, de escoamento e de características da bacia. Esses dados estão sujeitos a erros de medição. E aqueles de natureza aleatória têm uma incerteza estatística inerente associada às suas leis probabilísticas.

A incerteza decorrente da estrutura do modelo é causada pelo fato de que não se pode estar seguro de que um determinado processo hidrológico está sendo corretamente modelado. Sempre há aproximações dos fenômenos reais e isto gera incerteza nos resultados.

A incerteza dos parâmetros é resultado de inadequações nas técnicas para sua estimação, da representatividade limitada dos dados e de imperfeições na estrutura do modelo. Quando determinado processo hidrológico não é representado, ou é modelado de forma simplificada, outros componentes do modelo e seus parâmetros são forçados a compensar isso para o modelo dar bons resultados. O mesmo problema acontece em função de erros nos dados.

Portanto, os problemas envolvidos na estimativa dos parâmetros podem refletir toda incerteza envolvida no processo de modelagem.

A década de 80 marca a passagem de uma abordagem puramente matemática para uma abordagem estatística dos erros nos modelos hidrológicos (Sorooshian, 1983, Troutman, 1985, Kuczera, 1983). A abordagem matemática enfoca o ajuste dos parâmetros como um método *ad hoc*, isto é, aplica geralmente a minimização de uma função objetivo sem se preocupar com a análise estatística dos erros e sem se questionar sobre a estrutura do modelo. A abordagem estatística por sua vez argumenta que a estrutura dos modelos hidrológicos guardam uma semelhança muito grande com os modelos de regressão estatística, sendo que as variáveis hidrológicas envolvidas podem ser consideradas em grande parte de natureza aleatória. Isto autoriza o uso de técnicas estatísticas para a estimativa dos parâmetros e avaliação da sua incerteza.

No contexto estatístico os modelos chuva-vazão podem ser representados como uma regressão, notada por Troutman (1985) como:

$$Y_i = P(X_i, \beta) + \varepsilon_i$$

onde Y_i é a vazão observada no intervalo de tempo i , $P(\)$ é o modelo, X_i são as variáveis de entrada (precipitação e condições climáticas, por exemplo), β representa o conjunto dos parâmetros e ε_i é o erro. $P(X_i, \beta)$ é a vazão calculada intervalo de tempo i .

Os parâmetros β reais (populacionais no sentido estatístico) são, segundo uma definição operacional de Troutman (1985), aqueles que geram erros ε_i : i) independentes da magnitude das vazões; ii) independentes entre si; iii) com valor esperado nulo e variância finita e; iv) com distribuição normal.

Se não houver obediência a estas quatro condições (a primeira e a terceira são freqüentemente violadas nos modelos hidrológicos) ainda é possível imaginar uma hipotética definição 'calibrativa' para os parâmetros reais β : seriam os valores que minimizassem algum critério de erro médio ou alguma função objetivo. A definição é hipotética, portanto, porque haveria necessidade de conhecimento de toda a população de dados para realizar a calibração.

Na impossibilidade de acesso aos parâmetros populacionais é preciso lançar mão de estimadores de β , variáveis aleatórias b . Pode ser demonstrado que, se os erros obedecem às quatro condições acima, a estimativa dos parâmetros por mínimos quadrados ($\min \Sigma (Y_i - P(X_i, b))^2$) é igual à estimativa pelo método da máxima verossimilhança (uma técnica estatística que calcula estimadores com mínima variância). Os estimadores b , neste caso, tendem a ter uma distribuição normal (e esta tendência permanece valendo mesmo se os erros não seguem a distribuição normal).

A estimativa dos parâmetros por mínimos quadrados fica nessas condições embasada estatisticamente. Nesta técnica um maior peso é dado às observações com maior incerteza, geralmente as vazões mais altas. Troutman (1985) recomenda nesses casos o uso de uma função objetivo com a logaritmização das vazões para enquadrar os erros nas condições que aproximem a estimativa dos parâmetros por mínimos quadrados daquela estimada por máxima verossimilhança.

Se o objetivo é a minimização de uma função objetivo, pouca diferença há entre a calibração automática (por um método de otimização qualquer) e a manual. Entretanto a automática é mais objetiva, só que, muitas vezes, nos casos de mau ajuste por calibração automática, pode haver boa representação geral das vazões calculadas em relação às observadas por um efeito de defasagem no tempo. Na prática o ajuste de um modelo não dispensa a comparação gráfica dos fluviogramas observados e calculados.

A aplicação de uma técnica de estimativa dos parâmetros requer a avaliação prévia da correlação entre eles, o que pode ser feito através da matriz de covariância. A dependência ou correlação entre os parâmetros aumenta a variância individual dos seus

estimadores. Por isso deve-se evitar o uso de parâmetros correlacionados, o que, dependendo do caso, pode forçar até a revisão da estrutura do modelo e conseqüentemente conduzir a reparametrização. Uma forma preventiva de evitar correlação é a utilização de poucos parâmetros no processo de modelação (princípio da parcimônia).

Explorando o caráter aleatório dos estimadores dos parâmetros é possível avaliar a incerteza nos resultados do modelo. O comportamento probabilístico das vazões calculadas depende do comportamento probabilístico dos estimadores dos parâmetros (Haan, 1989).

Dado que se conheça a distribuição de probabilidades dos estimadores dos parâmetros, uma amostra de cada um pode ser gerada aleatoriamente (método de Monte Carlo) para rodar o modelo e produzir respostas variadas para a mesma condição de entrada.

No caso da curva de permanência, por exemplo, as amostras aleatórias dos parâmetros vão gerar amostras de mesmo tamanho para cada percentil (por exemplo, a vazão com 95% de permanência). Conseqüentemente intervalos de confiança, com qualquer nível de significância, podem ser estabelecidos como medida da incerteza dos resultados.

2.3 Contexto da avaliação de disponibilidade hídrica em pequenas bacias sem dados e nova proposta

A regionalização da curva de permanência de vazões e a simulação chuva-vazão, conforme avaliado nos itens 2.1 e 2.2, constituem alternativas viáveis para a estimativa de vazões em pequenas bacias. Entretanto estas duas alternativas de avaliação são dependentes do mesmo requisito: necessidade de dados de vazão suficientes em pequenas bacias da região que possibilitem a síntese hidrológica no local de interesse.

A disponibilidade de dados de pequenas bacias é ínfima para o Estado e para o Brasil, conforme avalia-se pelo boletim das estações fluviométricas do DNAEE(1991). Quando da necessidade de uma avaliação, esta carência de dados provoca o aumento das incertezas nas estimativas de vazões, sejam elas por regionalização ou por simulação precipitação-vazão. A rigor, numa situação de carência de dados como esta,

deveria-se considerar inadequada a aplicação destas duas formas de estimativa em pequenas bacias, porque seria temerário extrapolar parâmetros obtidos com bacias maiores. Por outro lado, não se pode conviver com esta situação perante a existência de demandas sociais para o aproveitamento dos recursos hídricos, como uma pequena central hidrelétrica, ou um sistema de abastecimento urbano ou rural.

Na situação corrente de carência de dados, a proposta do presente estudo consiste de apresentar uma alternativa que caracterize uma solução intermediária entre dois limites: (i) um limite inferior, associado ao uso inadequado dos métodos correntes e; (ii) um limite superior, que estabelece como condição para a obtenção de resultados a necessidade de instalação de uma estação fluviométrica convencional no local de interesse por um período de tempo razoável.

Como consequência do exposto esta tese quantificou vazões em pequenas bacias com carência de dados baseada em dois pontos:

1. na estipulação de uma forma para monitoramento hidrológico de baixo custo em pequenas bacias (objeto do capítulo 3) que proporcione condições para o estabelecimento de uma base de dados necessária ao desenvolvimento de estudos de regionalização hidrológica e de simulação chuva-vazão e;
2. na elaboração de um método de estimativas de disponibilidade hídrica de pequenas bacias a partir de algumas medições de vazão *in loco* (objeto do capítulo 4), caracterizando uma situação intermediária entre a indisponibilidade de dados e a necessidade de monitoramento convencional durante um período mínimo de anos.

3. MONITORAMENTO HIDROLÓGICO DE BAIXO CUSTO EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

3.1 Limitações das Redes de Coleta em Pequenas Bacias

A primeira dúvida que pode surgir quando propõe-se um esquema de monitoramento hidrológico alternativo para uma pequena bacia é a seguinte:

Existe uma metodologia para monitoramento de pequenas bacias hidrográficas?

A resposta seria a seguinte: Sim, existe, mas é muito cara devido ao **paradigma**. O paradigma seria :“...*como a resposta hidrológica de uma pequena bacia é muito rápida aos estímulos de precipitação, necessitamos de intervalos de tempo pequenos (p. ex., 1 hora ou até menos) para o monitoramento hidrológico*”.

Desta forma o estabelecimento de um serviço de monitoramento hidrológico implica na necessidade de uso de limnígrafos, pluviógrafos, manutenção especial (já que o leito se altera com frequência), operação especializada e seguro contra depredações entre outras condições. Uma estimativa preliminar de custos iniciais, somente para instalação da estação hidrométrica, conduz a valores superiores a R\$ 18.000,00 (limnígrafo + pluviógrafos + instalação) sem contar com os custos de operação e manutenção ao longo do tempo e, os riscos de depredação. Exemplos de estudos anteriores que envolveram o monitoramento convencional de pequenas bacias, particularmente para o Rio Grande do Sul, podem ser encontrados nos trabalhos de Bordas et al (1981, 1990), Canali(1981), Silveira(1982) e Chevallier(1988).

A resposta de uma pequena bacia hidrográfica ao estímulo de precipitação pode ser observado no esquema da figura 3.1. O processo é rápido, conforme constatam os trabalhos citados no parágrafo anterior, o que confirma a avaliação de fórmulas usuais de cálculo de tempo de concentração para pequenas bacias como a de Kirpich (Porto, 1995). Para bacias com áreas de drenagens inferiores a 50km² estes tempos variam, normalmente, de alguns minutos a poucas horas.

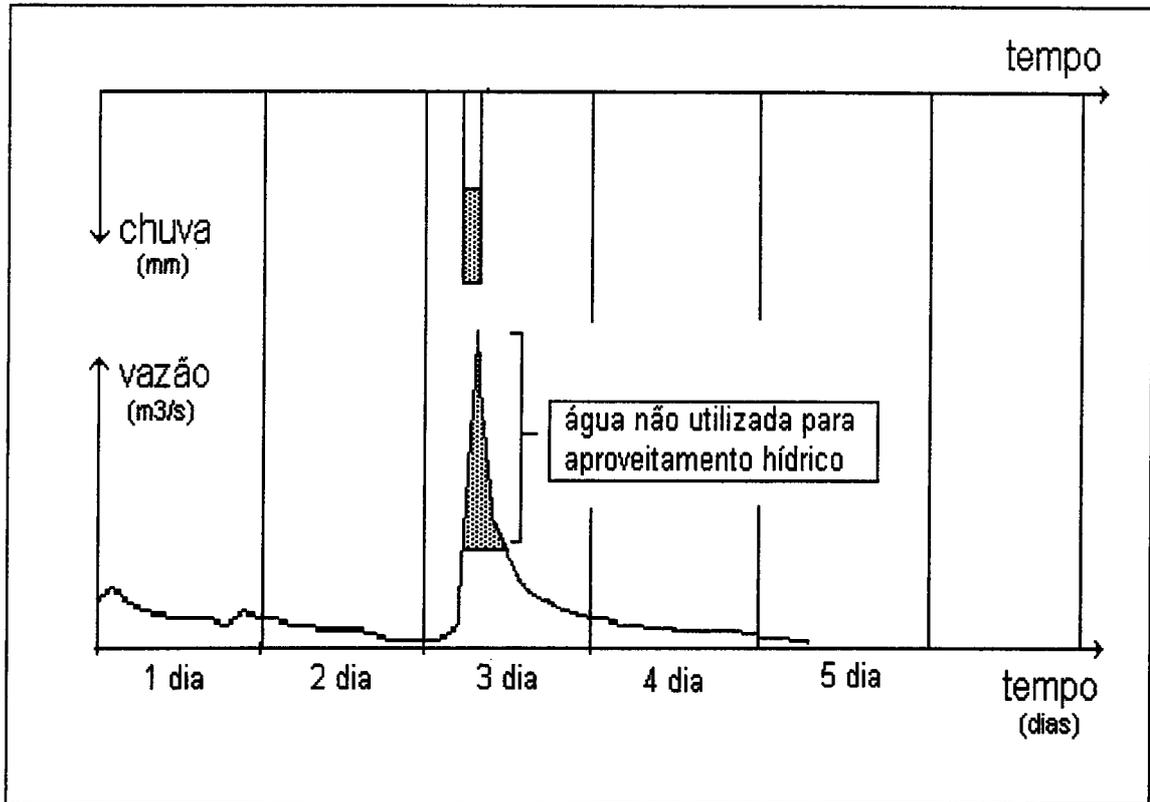


Figura 3.1 - Esquema da resposta hídrica de uma pequena bacia

A outra alternativa de monitoramento consiste no estabelecimento de uma estação fluviométrica convencional para uma pequena bacia com medições convencionais em régua de níveis, na seção de interesse do manancial. Entretanto este procedimento dificilmente permitiria uma estimativa aceitável do seu comportamento hidrológico devido ao seguinte:

I – a falta de representatividade do linigrama observado devido a variabilidade do escoamento **de cheias**. Sendo assim o hidrograma é representado de forma tendenciosa (figura 3.2). Como o volume do escoamento é subestimado, as vazões médias e máximas apresentam as maiores incertezas.

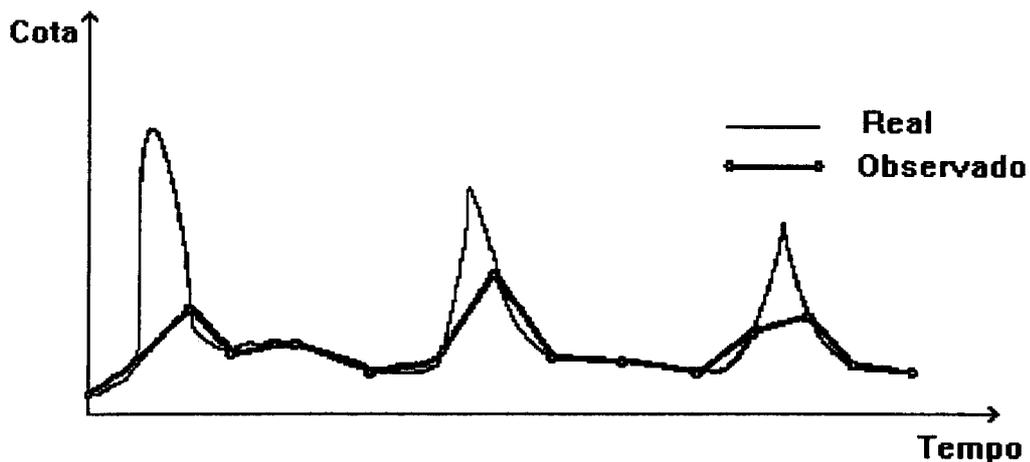


Figura 3.2 - Hidrograma real e observado

II - nas bacias pequenas, muitas vezes, o leito do rio tende a ser móvel, fazendo com que a relação cota-vazão se altere. A parcela da curva-chave mais sensível a esta variação das seções corresponde ao segmento das vazões mínimas (figura 3.3).

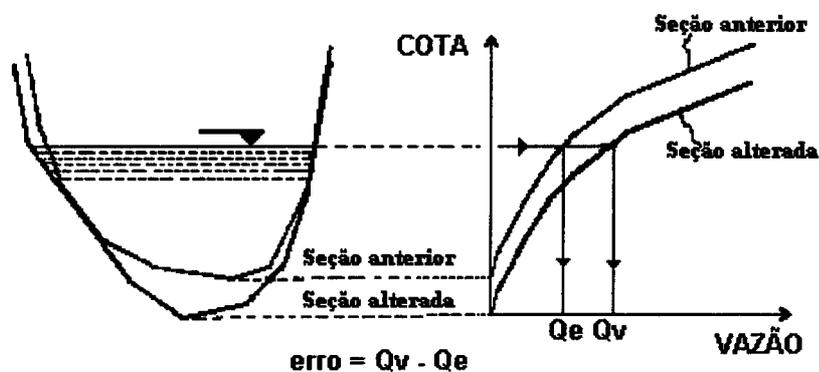


Figura 3.3 - Erro da estimativa da vazão com mudança de leito

Como se observa, uma bacia monitorada sem registradores e com leito móvel não teria utilidade. Por outro lado, a implementação de uma rede de informações desejável é quase uma utopia, considerando-se a realidade de investimentos públicos em infra-estrutura e o tamanho do território nacional.

3.2 – Esquema de monitoramento proposto e antecedentes

O IPH (Silveira et al,1985) para a avaliação de vazões em pequenas bacias com outro objetivo, desenvolveu um dispositivo para a Secretaria de Saúde e Meio-Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul que ambicionava fazer o controle biológico do inseto Simulídeo através da dosificação do *Bacillus thuringiensis var. israelensis* (Bti, produto de controle biológico) nos córregos encachoeirados da região da Serra Gaúcha (Souza et al, 1994). Para a correta dosagem do produto de controle era necessário o conhecimento da vazão escoada no instante de sua aplicação. Para tanto, havia a necessidade de se estabelecer um processo de avaliação de vazão que fosse preciso, rápido e prático. Esta avaliação de vazão deveria também possuir como pré-requisito, a possibilidade de que pudesse ser efetuada sem a necessidade de profissionais especialistas no assunto, visto que se caracterizaria por um trabalho de rotina e bastante amplo dentro do programa estadual de controle. Assim a escolha recaiu sobre estruturas do tipo calha Parshall com fundo raso (Alfaro et al, 1974), segundo esquema que pode ser visualizado na figura 3.4, proposição de Silveira et al (1985). Atualmente existem mais de 250 calhas construídas no Estado pelo referido programa.

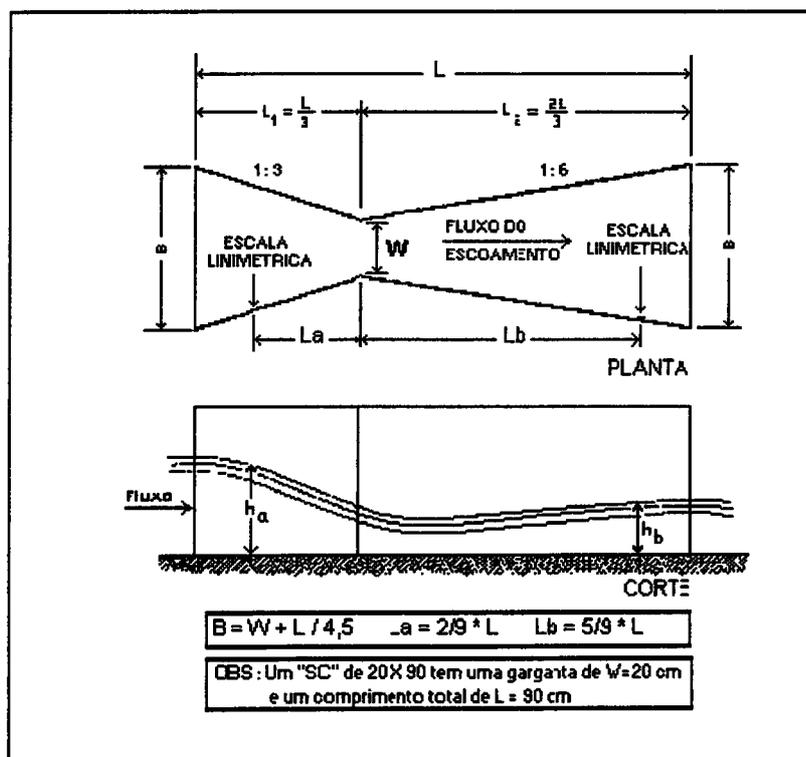


Figura 3.4 - Calha tipo Parshall com fundo raso

Embora as calhas tivessem sido construídas e dimensionadas com outro objetivo - controle biológico de Simulídeos - considerou-se a sua utilização, a nível experimental, para monitoramento hidrológico (Silveira, 1992 e 1995). O argumento para tal experiência seria a possibilidade de monitorar-se o segmento de fluviograma que permitisse o conhecimento das vazões medianas (Q50%) e mínimas (Q95%) escoadas pela pequena bacia. A idéia era monitorar o fluviograma ocorrido ao longo do tempo sem entretanto conseguir-se registrar os segmentos que contivessem os picos das enchentes devido ao extravasamento das calhas. Partindo destas considerações, em 1992, a nível experimental, solicitou-se e obteve-se financiamento para pesquisar a possibilidade de uso destas calhas para o monitoramento hidrológico. Esse tipo de calha (figura 3.5), normalmente é utilizada para avaliar as afluências a sistemas de irrigação (Carlesso, 1988), (Boss et al, 1987) e a sistemas de esgotos sanitários, (Jordão e Pessoa, 1995) possuindo capacidade de monitorar um intervalo restrito de vazões.



Figura 3.5 - Calha de fundo raso de Schneider 1 em Sapiiranga

O monitoramento através das calhas com leito fixo (figura 3.5) foi então, pela pesquisa proposta por Silveira (1992), avaliada como uma alternativa para minimizar as dificuldades de: (i) alto custo da aparelhagem de monitoramento contínuo e; (ii) a inadequação de uso das régua limnimétricas por meio de uma estação convencional.

Esta alternativa visa buscar sempre a maior quantidade de informações hidrológicas com a maior viabilidade econômica-administrativa. O custo médio de construção de uma calha, segundo Mardini(1997), avalia-se em torno de 250 reais, sem

contabilizar-se os custos de localização do ponto de instalação, para efeito de transporte do material e deslocamento de pessoal. O *baixo custo* do monitoramento proposto é, portanto, relativo ao *alto custo* da aparelhagem de monitoramento contínuo.

Aproveitando-se a experiência do projeto “Borrachudo” e as calhas existentes da Secretaria da Saúde e Meio-Ambiente do Estado, o procedimento constou de postar um observador na vizinhança da calha, normalmente o funcionário da prefeitura encarregado de dosar o Bti nos arroios ou, um morador próximo. O mesmo faz uma leitura mais ou menos periódica, anotando a data e horário da observação e o valor do nível d’água na calha. A observação não fica amarrada a um intervalo de tempo definido, o que elimina algumas incertezas das leituras convencionais, já que o observador dificilmente efetua a leitura sempre no mesmo horário. No anexo B apresenta-se a planilha do custo médio de monitoramento das calhas.

A primeira questão que deve ocorrer ao hidrólogo é que este tipo de posto hidrológico não atende a primeira limitação (I), o que é real. As informações desses postos não permitem avaliar corretamente o volume dos hidrogramas de enchentes e os picos, já que não possui registrador e, em conseqüência, a vazão média e máxima. Quanto à segunda limitação (II), relativa a mobilidade do leito, esse tipo de posto a evita através da pequena estrutura hidráulica.

Pode-se, portanto, questionar o seguinte: *qual o benefício de se obter apenas uma parte das vazões de uma bacia?*

Em resposta ao questionamento pode-se dizer que as vazões consumidas, provenientes da oferta hídrica fluvial, estão relacionadas mais diretamente às vazões medianas e mínimas que ocorrem em uma bacia hidrográfica, ou seja, as vazões com alta permanência no tempo, exatamente aquelas registradas pelas calhas. Na figura 3.6 de modo geral é apresentado o hidrograma e a curva de permanência resultante da alternativa de monitoramento proposto.

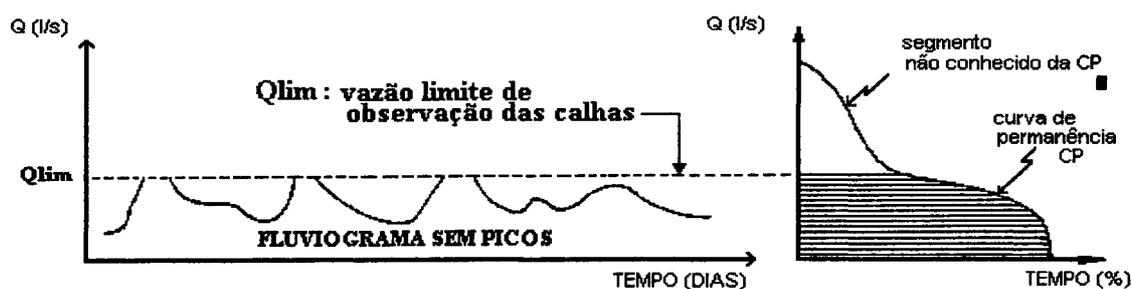
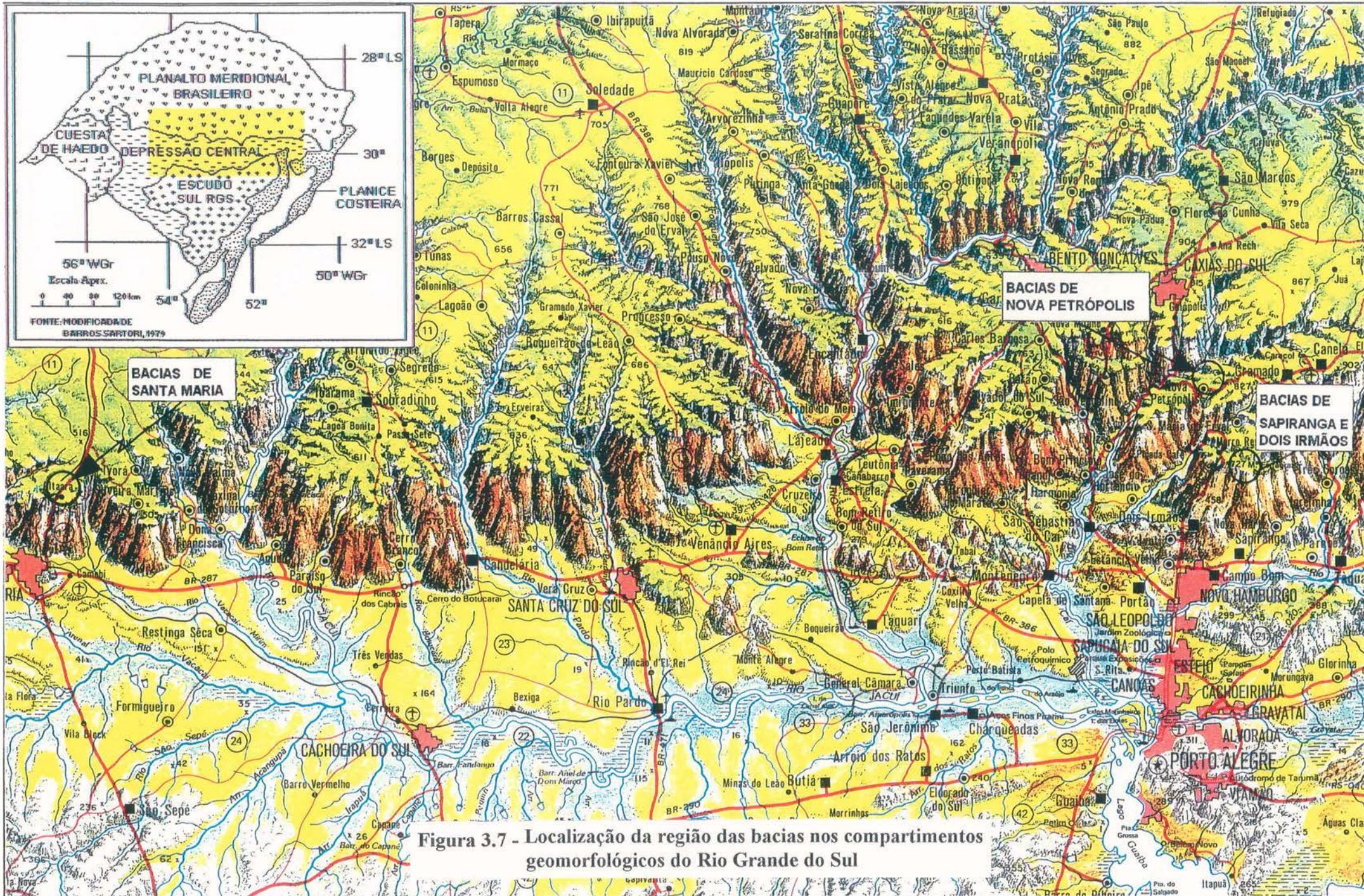


Figura 3.6 - Esquema de monitoramento



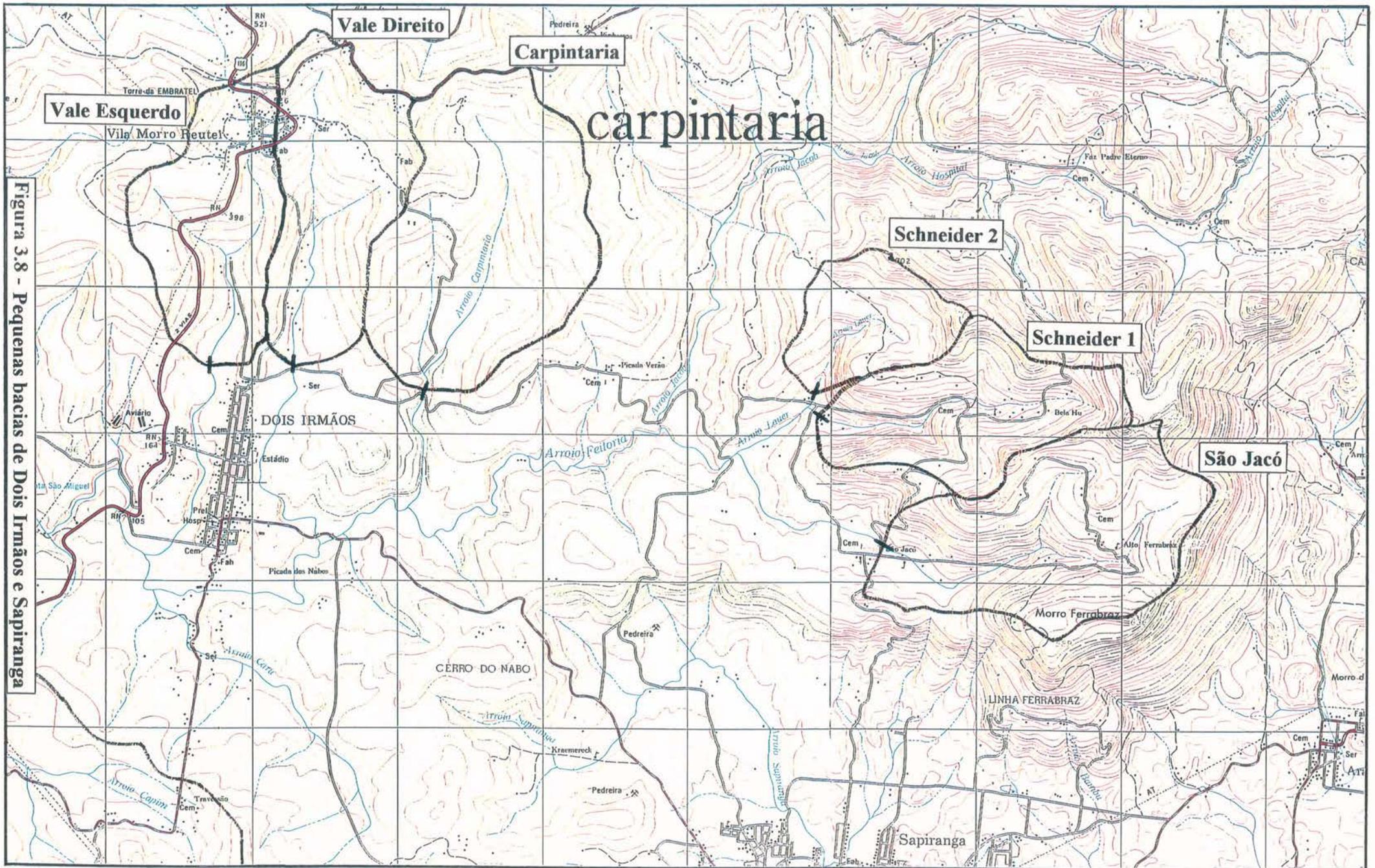


Figura 3.8 - Pequenas bacias de Dois Irmãos e Sapiranga

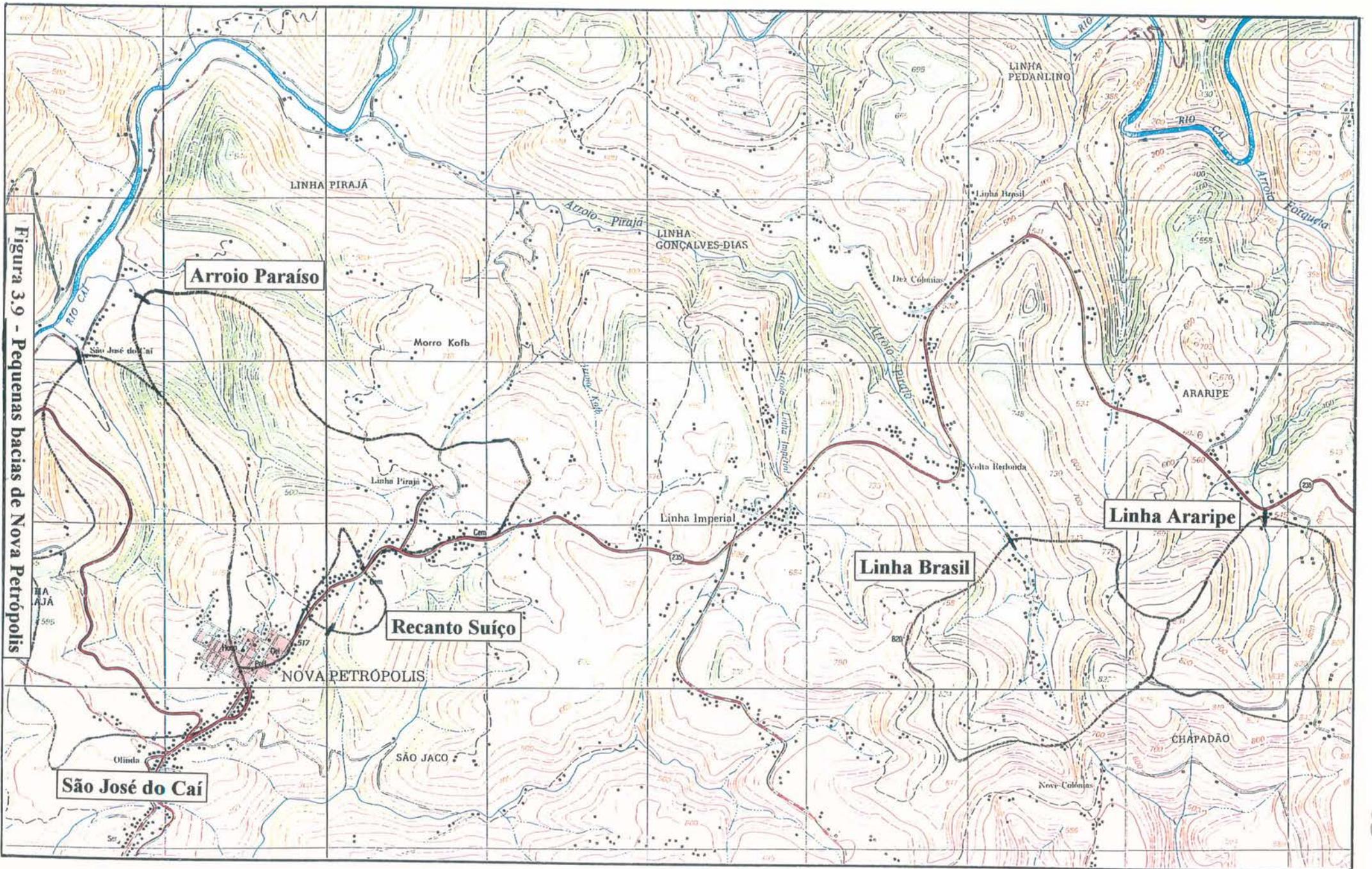


Figura 3.9 - Pequenas bacias de Nova Petrópolis

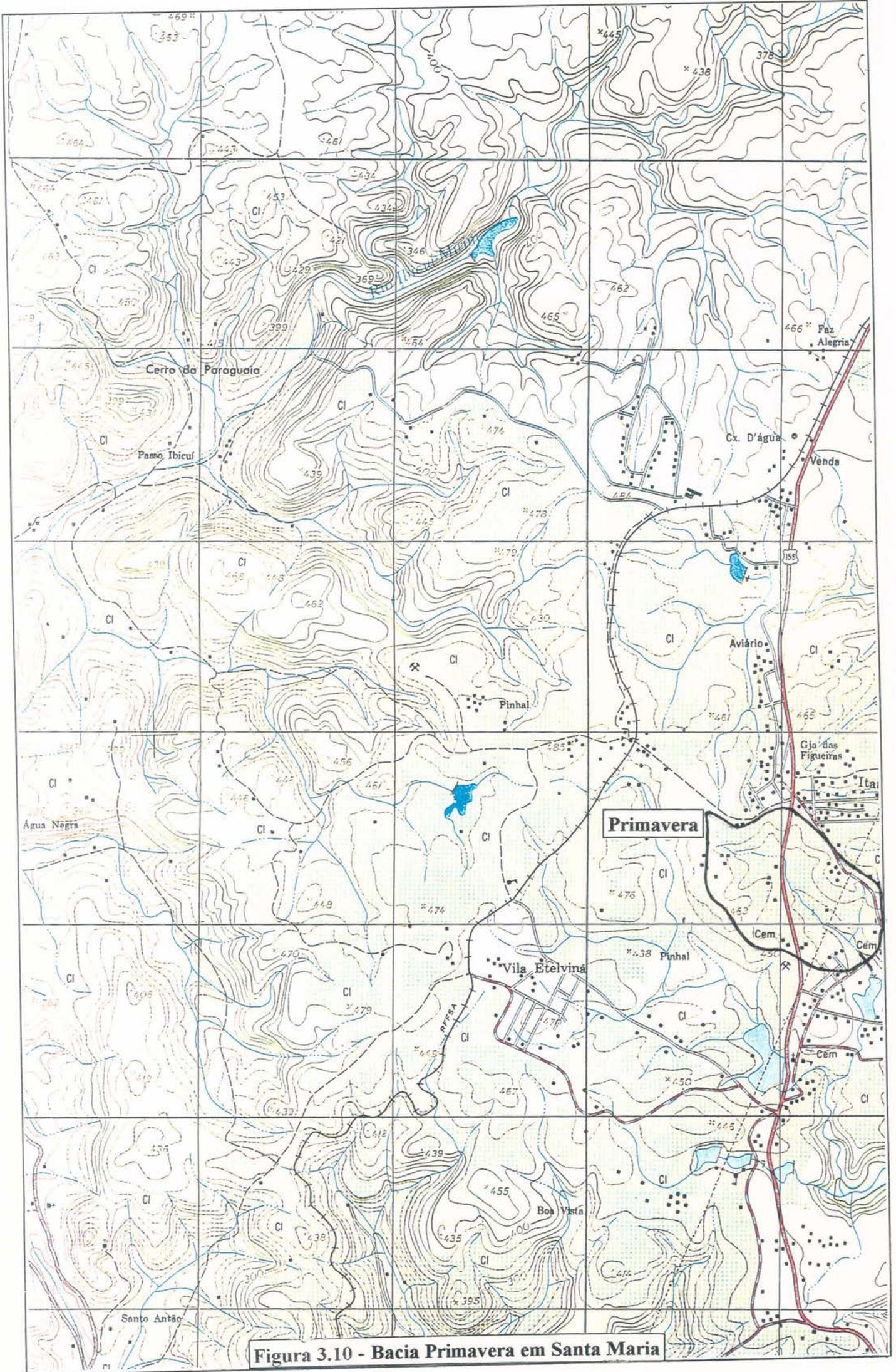


Figura 3.10 - Bacia Primavera em Santa Maria

3.3 Rede Experimental de Pequenas Bacias

As bacias da rede experimental localizam-se junto a três regiões (figura 3.7):

- I. Rio Cai: em seu curso superior em bacias de cabeceira no município de Nova Petrópolis;
- II. Rio Cai: em seu curso médio em vertentes da bacia do arroio Feitoria nos Municípios de Nova Petrópolis e Dois Irmãos;
- III. Rio Vacacaí-Mirim: junto ao Município de Santa Maria (atual município de Itaara) em nascentes do Rio Vacacaí-Mirim.

O rio Vacacaí-Mirim e o rio Cai desembocam no rio Jacuí.

Na figura 3.7 situam-se as pequenas bacias junto ao esquema geomorfológico do Estado. As pequenas bacias monitoradas localizam-se junto a unidade geomorfológica do Planalto Meridional, mais especificamente no seu rebordo ou próximo a ele. O Planalto Meridional Brasileiro teve sua origem na superposição dos sucessivos derrames vulcânicos na Bacia Geológica do Rio Paraná no Mesozóico.

Nas figuras 3.8, 3.9 e 3.10 são localizadas as pequenas bacias em cartas do Serviço Geográfico do Exército na escala de 1:50.000 em reduções convenientes de modo a que pudessem ser visualizadas em conjunto nos respectivos municípios de origem. No município de *Sapiranga* foram monitoradas as bacias de Schneider I, Schneider II e São Jacó; no de *Dois Irmãos*, as bacias de Carpintaria, Vale Direito e Vale Esquerdo; no de *Nova Petrópolis*, as bacias de Cai, Recanto Suíço, Paraíso, Linha Araripe e Linha Brasil ; e, no de *Santa Maria*, a bacia de Primavera. No anexo A consta uma descrição física das bacias com a respectiva documentação fotográfica das calhas e de paisagens das bacias. Uma síntese desta descrição física consta das tabelas 3.1 e 3.2.

A justificativa para a seleção destas bacias, na época do início da pesquisa, (Silveira, 1992), deveu-se ao requisito de obter-se junto às prefeituras, proprietárias das obras, o apoio necessário para o uso das mesmas assim como a disponibilização de funcionário ou outro esquema que permitisse a observação local. Isto deve-se ao fato de que, na época, não se tinha o argumento da eficácia do procedimento cuja viabilidade se queria pesquisar. De modo geral a “quase” totalidade das calhas implantadas estão localizadas no rebordo do planalto ou junto a ele. Souza et al (1994) apresentam os municípios onde as calhas se localizam.

Tabela 3.1 - Características físicas predominantes

BACIA (calha)	MUNICÍPIO	ROCHA	SOLO PREDOMINANTE	RELEVO	VEGETAÇÃO			
SÃO JACÓ	SAPIRANGA	basalto	terra rocha estruturada	patamares da serra geral	REGIÃO DA FLORESTA ESTACIONAL SEMI-DEC. agricultura cíclica			
SCHNEIDER II								
SCHNEIDER I								
CARPINTA	DOIS IRMÃOS				basalto	terra rocha estruturada	patamares da serra geral	REGIÃO DA FLORESTA ESTACIONAL DECIDUAL agricultura
V. DIREITO								
V.ESQUERDO								
L. BRASIL	PETRÓPOLIS	riolito e riodacito	brunizem avermelhado	serra				REGIÃO DA FLORESTA OMBRÓFILA MISTA agricultura
L. ARARIPE			terra bruna	geral				
R. SUÍÇO			estruturado intermed.	planalto dos				
CAÍ superior			para podzólico bruno	campo				
PARAÍSO sup		acinzentado	gerais					
CAÍ inferior		basalto	solos	serra	REGIÃO DA FLORESTA ESTACIONAL DECIDUAL			
PARAÍSO		litólicos	geral					
PRIMAVERA	SANTA MARIA	riolito e riodacito	podzólico bruno acinzentado	planalto dos campos gerais	REGIÃO DA SAVANA GRAMÍNEO-LENHOSA C/FLORESTA DE GALERIA			

Tabela 3.2 - Índices fisiográficos

BACIA	MUNICÍPIO	A(km ²)	P(km)	L(km)	cmd (m)	SV(%)	SS(%)	DD	KGR	IC
SÃO JACÓ	SAPIRANGA	8,98	13,00	4,75	542	24	5,30	0,70	1,21	0,33
SCHNEIDER II		3,23	7,31	1,96	530	32	11,50	0,61	1,14	0,38
SCHNEIDER I		6,13	11,50	4,00	535	31	8,70	0,65	1,30	0,31
CARPINTA	DOIS IRMÃOS	10,78	13,70	4,00	445	29	8,20	0,59	1,17	0,49
V. DIREITO		6,88	12,27	4,18	415	25	8,40	0,77	1,31	0,29
V.ESQUERDO		5,92	11,14	4,06	395	24	8,30	0,93	1,28	0,31
L. BRASIL	PETRÓPOLIS	5,94	10,68	2,95	680	29	7,60	1,19	1,23	0,54
L. ARARIPE		3,80	7,80	2,66	735	29	10,20	1,15	1,12	0,43
R. SUÍÇO		0,70	3,20	0,50	520	21	14,00	0,71	1,07	1,43
S.J. DO CAÍ		9,76	14,00	5,50	495	38	8,70	0,90	1,25	0,29
PARAÍSO		9,58	17,00	5,50	515	34	8,80	1,30	1,54	0,29
PRIMAVERA	SANTA MARIA	2,29	5,50	2,00	447	16	3,00	1,96	1,02	0,50

A representa a área da bacia; *P*, o perímetro; *L*, o comprimento do curso d'água principal; *CMD*, altitude mediana da bacia; *SV*, declividade média das vertentes; *SS*, declividade simples do curso d'água principal; *DD*, densidade de drenagem; *KGR*, índice de compacidade e *IC*, índice de conformação.

3.4 - Avaliação dos Dados Registrados

O monitoramento das vazões exercido através da rede experimental visou fundamentalmente avaliar a seguinte questão:

foram registradas vazões em um período maior que 50% do tempo ?

3.4.1 – Representatividade do período de observação

O período de observação das calhas para as 12 pequenas bacias hidrográficas da rede experimental compreendeu o período de tempo apresentado na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Período de tempo dos dados coletados pela rede experimental

CALHA	MUNICÍPIO	A (km ²)	92 2.sem	93 1.sem	93 2.sem	94 1.sem	94 2.sem	95 1.sem	95 2.sem
SÃO JACÓ	SAPIRANGA	8,98		X	X	X	X	X	X
SCHNEIDER I		6,13		X	X	X	X	X	X
SCHNEIDER II		3,23		X	X	X	X	X	X
CARPINTA	DOIS IRMÃOS	10,78		X	X	X	X	X	X
V. DIREITO		6,88		X	X	X	X	X	X
V.ESQUERDO		5,92		X	X	X	X	X	X
L. BRASIL	PETRÓPOLIS	5,94	X	X	X	X			
L. ARARIPE		3,80	X	X	X	X			
R. SUÍÇO		0,70	X	X	X	X			
S.J. DO CAÍ		9,76	X	X	X	X			
PARAÍSO		9,58	X	X	X	X			
PRIMAVERA	SANTA MARIA	2,29		X	X	X	X		

O início do período de observação das calhas tiveram datas diferenciadas em função dos contatos estabelecidos com os municípios e, do trabalho necessário a implantação do monitoramento, como inspeção inicial do local, treinamento do observador disponibilizado pela prefeitura ou, na impossibilidade, do morador próximo ao local. O tempo de encerramento das observações devem-se ao término de financiamento da pesquisa, inicialmente previsto para dois anos. Algumas calhas tiveram observações de até três anos função do maior interesse das prefeituras em dar continuidade as observações.

O objetivo principal da rede foi responder a questão fundamental deste capítulo (item 3.4) uma vez que, confirmada a possibilidade de monitoramento à baixo custo, a mesma pudesse se caracterizar em um serviço de rotina por parte do Estado e

das instituições de pesquisa, de modo a minimizar o problema da carência de dados para pequenas bacias.

Preliminarmente pode-se considerar que numa escala temporal mais ampla não existe uma tendência de mudanças climáticas que produzam modificações na precipitação média anual para o Rio Grande do Sul, segundo Berlato e Fontana(1993).

Para verificar a representatividade do período de observação com relação a um eventual período crítico, procurou-se estudar séries históricas de precipitação com períodos longos, das estações pluviométricas mais próximas às bacias estudadas.

Para a bacia Primavera do município de Santa Maria considerou-se como referência a estação pluviométrica de “Santa Maria” e, para as bacias dos demais municípios, a estação pluviométrica de “Sapucaia”. Ainda, em conjunto com estas estações (mais próximas das regiões das bacias), selecionaram-se outras, para efeito comparativo, que também possuísem um período mínimo de dados próximo a 20 anos. A identificação destes postos consta da tabela 3.4 e, as respectivas localizações no espaço regional, nas figuras 3.11 e 3.12.

Tabela 3.4 - Estações pluviométricas da rede nacional na região das bacias

Estação	Município	Tipo	Código DNAEE	Período de dados	Média 76-95
Sapucaia	Sapucaia	PLU	02951028	1966-1995	1500.08
Taquari	Taquari	PLU	02951030	1965-1995	1638.05
Santa Maria	Santra Maria	PLU	02953034	1967-1995	1774.54
Quevedos	Júlio Castilhos	PLU	02954019	1976-1995	1786.85

Através da dados da tabela 3.5, comparando-se a média das precipitações do período de monitoramento das calha, basicamente 93, 94 e 95, observa-se que o mesmo apresenta uma superioridade média de 7% em relação a precipitação média dos anos de 76-95, podendo-se caracterizar o período como não associado a épocas secas.

Portanto, sendo a precipitação do período de monitoramento ligeiramente superior a do longo período, pode-se, em função disto, considerar temporalmente significativo o período monitorado, para efeito de validação do procedimento. Esta validação baseia-se no seguinte: sendo a média da precipitação do período de monitoramento superior à média de longo período, pode-se concluir que a chance de extravasamento das calhas é maior, em função do maior volume precipitado. Portanto, se a chuva ocorrida fosse menor no período (mais próxima da média ou inferior), teríamos a possibilidade de aumentar o percentual de tempo no qual as calhas

conseguiriam registrar o fluviograma ocorrido, melhorando o resultado da performance do esquema de monitoramento.

Tabela 3.5 – Precipitações de Sapucaia e Santa Maria no período 76-95, em mm.

ANO	SAPUCAIA	SANTA MARIA
1976	1676.6	1625.00
1977	1494.5	2047.41
1978	1171.0	1207.20
1979	1294.0	1654.30
1980	1371.5	1308.00
1981	1539.3	1394.80
1982	1724.5	2313.80
1983	1729.0	1728.48
1984	1683.3	2496.90
1985	1454.0	1847.80
1986	1480.6	2130.25
1987	1897.3	2117.50
1988	1256.2	1525.20
1989	1352.0	1442.30
1990	1613.5	1820.20
1991	1125.0	1379.50
1992	1309.4	1713.50
1993	1627.6	1951.20
1994	1802.4	2343.00
1995	1399.8	1444.50
MÉDIA	1500.08	1774.54

Se, por exemplo, o período de monitoramento das calhas tivesse ocorrido nos anos de 78, 79 e 80, com precipitações abaixo da média (figura 3.13), a avaliação dos percentuais de tempo monitorado pelas calhas (sem o extravasamento) estaria superestimada, o que prejudicaria estas conclusões, sobre a validação do esquema de monitoramento, de uma forma tão imediata.

Como o período de monitoramento das calhas é muito curto – 2 a 3 anos – não desenvolveu-se a aplicação de testes estatísticos mais pormenorizados porque não trariam contribuição efetiva a esta avaliação específica, visto que o período não se caracterizou por anos secos.

Entretanto, esta análise está vinculada a validação do esquema de monitoramento e não a representatividade do período em termos de produção hídrica, que pode ser avaliada pela curva de permanência. No caso, a pequena superioridade das precipitações pode proporcionar um correspondente pequeno aumento da oferta hídrica em relação ao longo período, conforme avaliado mais adiante, no item 4.5, por simulação chuva-vazão.



Figura 3.11 - Situação da rede experimental na bacia do Rio Caí

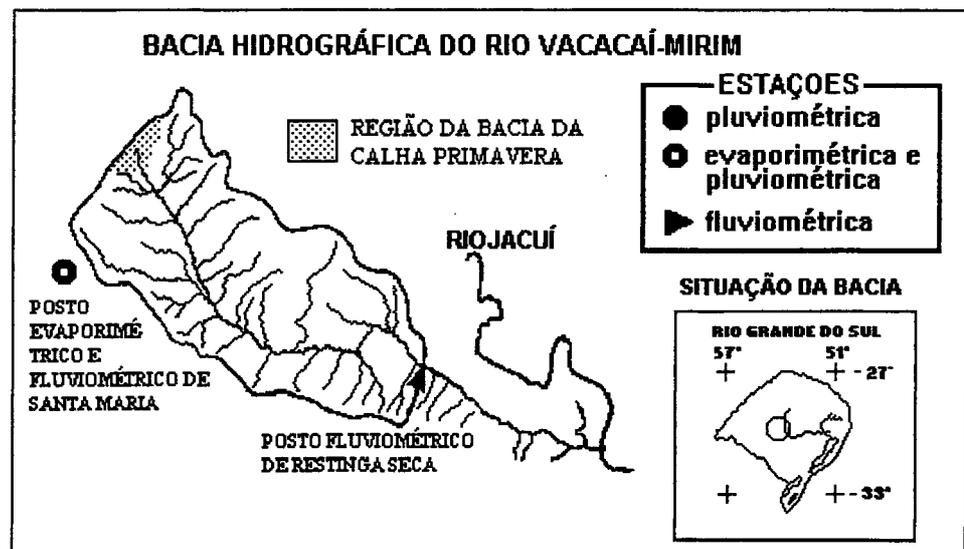


Figura 3.12 - Situação da bacia Primavera na bacia do Rio Vacacaí-Mirim

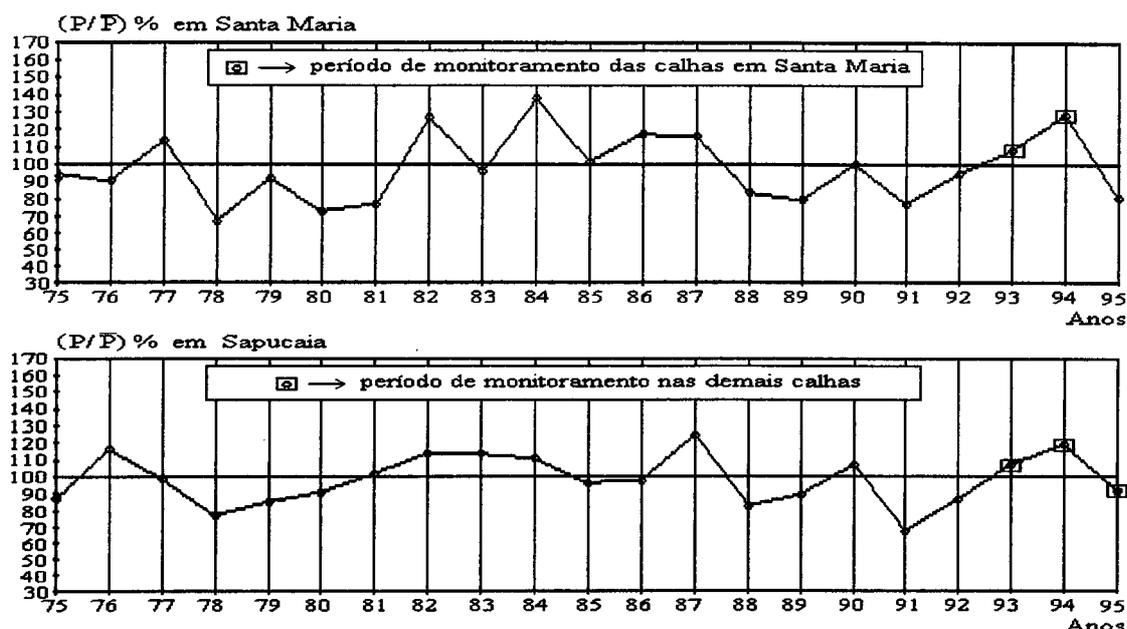


Figura 3.13 – Localização no tempo das precipitações do período de monitoramento das calhas

3.4.2 – Curva de Permanência

A análise hidrológica a ser desenvolvida para efeito de validação do esquema de monitoramento busca responder as seguintes perguntas:

- Qual o percentual de tempo em que a calha conseguiu monitorar as vazões?
- O percentual de tempo monitorado é suficiente para desenvolver a avaliação de disponibilidade hídrica para aproveitamentos como pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) ?
- Quais as dificuldades de ordem operacional encontradas para a manutenção da rede, e quais as perspectivas de uso do esquema?
- O tamanho das calhas implantadas variaram com base em que critério?
- As vazões limites de observação das calhas dependem de que fatores?

Para começar a discutir as questões, inicialmente é dado como exemplo os segmentos do hidrograma registrado no ano de 1993 no posto de Schneider I (figura 3.14). O hidrograma, como era de se esperar, é interrompido em determinados trechos, quando extravasa o limite de observação das calhas.

Pela observação da figura 3.14, pode-se considerar que as descontinuidades, decorrentes do extravasamentos das calhas ocorrem nos momentos de elevação e de recessão dos escoamento. Entretanto, o início da elevação dos escoamentos, muitas vezes, não ficam caracterizados nos segmentos do fluviograma observados pelas calhas. A explicação para tais ocorrências pode ser creditada a dois fatores:

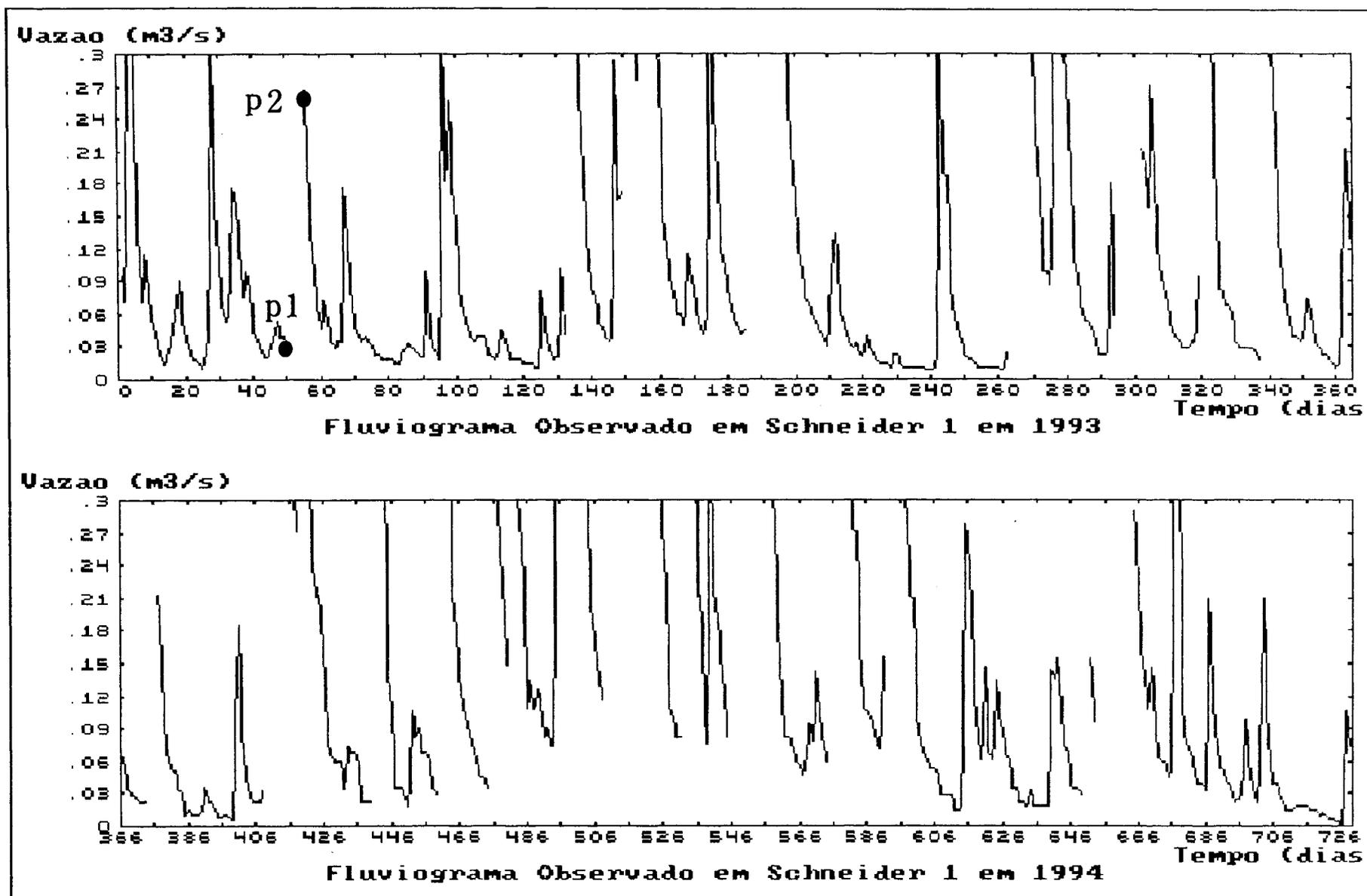
1. ao intervalo de tempo de observações nas calhas
2. a rapidez de ocorrência da elevação dos escoamentos

Observando o ponto 1, assinalado na figura 3.14, verifica-se que a descontinuidade de registro do fluviograma para a elevação de vazões ocorre em um trecho de recessão de escoamentos, fato este, que pode ser explicado devido a ocorrência de uma chuva intensa ocorrida dentro do intervalo diário de monitoramento adotado.

Observando o ponto 2, assinalado também na figura 3.14, verifica-se que o mesmo ocorre *sempre* em uma magnitude superior a do ponto 1. Este fato, permite concluir, como seria teoricamente aceitável, que, sendo a recessão dos escoamentos mais lenta que a elevação, consegue-se registrar através da calha o decaimento das vazões a partir de um nível mais elevado. A elevação dos escoamentos sendo mais rápida não permite o seu registro para o intervalo de tempo adotado para o monitoramento.

Considerando-se o monitoramento com o intervalo de tempo diário, verifica-se que o mesmo possui um resultado diferenciado com relação ao caracterizado na figura 3.6, mostrando uma diferença entre a abstração inicial e a realidade.

Figura 3.14 - Segmentos de fluviograma observado em Schneider 1



Uma vez obtidos os fluviogramas com o monitoramento das calhas (figura 3.14 e Anexo A), para todas as bacias da rede experimental, partiu-se para a avaliar a questão mencionada no início desta seção:

Qual o percentual de tempo em que a calha conseguiu monitorar as vazões?

Uma vez que o fluviograma monitorado não registra as vazões altas pelo extravasamento das calhas, a curva de permanência pode ser construída para o seu ramo inferior, que não possui falhas e que corresponde aos interesses da avaliação da disponibilidade hídrica. Restaria saber se a magnitude do ramo não monitorado não afetaria as avaliações pretendidas, ou melhor, se conseguiria registrar o segmentos de curva de permanência conhecendo-se no mínimo a vazão mediana escoada (Q50%).

Desta forma, a curva de permanência foi calculada atribuindo-se às vazões não registradas pelas calhas, valores superiores ao valor de vazão que provoca o seu extravasamento. Como estes valores de vazões são indefinidos, a curva de permanência fica indefinida para os valores altos de vazões aos quais são associados uma baixa permanência do tempo. Por exemplo, para a bacia de Schneider I, a qual pertence o fluviograma da figura 3.14 corresponde a curva de permanência da figura 3.15.

Com a curva calculada (figura 3.15) pode-se avaliar que a permanência da vazão limite de observação da calha corresponde a 14% do tempo e um valor de $0,638\text{m}^3\text{s}^{-1}$. Assim, a curva de permanência fica definida para o intervalo de 14 a 100% do tempo de registro. Com este percentual pode-se avaliar a disponibilidade hídrica da bacia. Nas figuras de números 3.16 à 3.26 apresenta-se os resultados para as demais bacias da rede experimental.

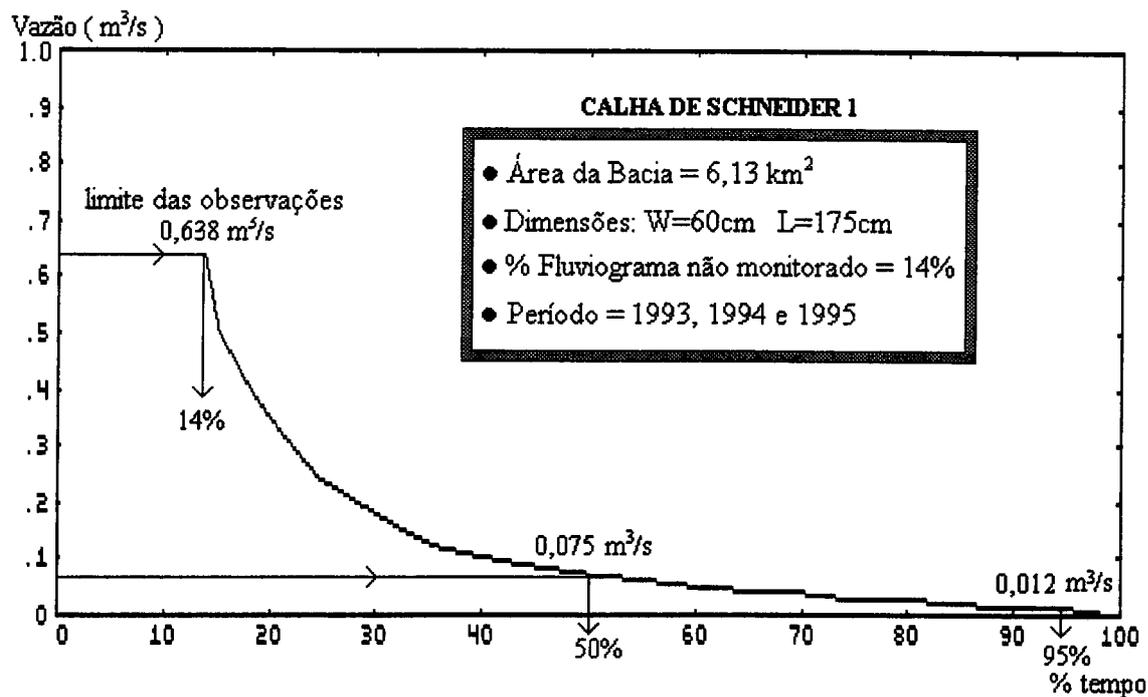


Figura 3.15: Curva de Permanência Observada em Schneider 1

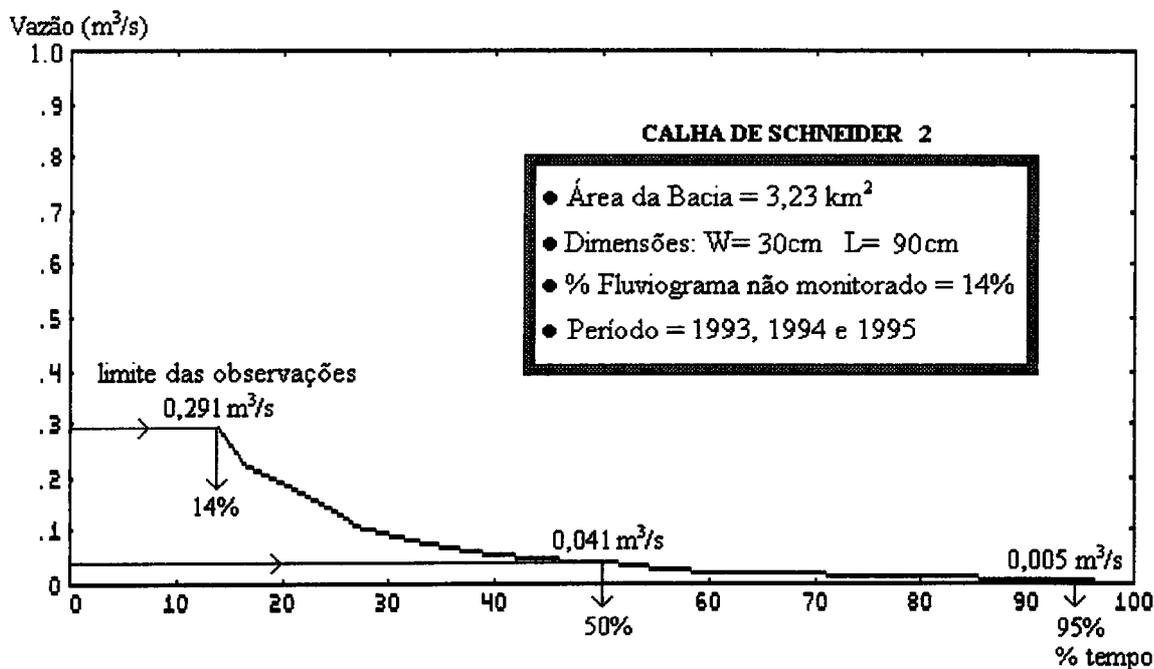


Figura 3.16: Curva de Permanência Observada em Schneider 2

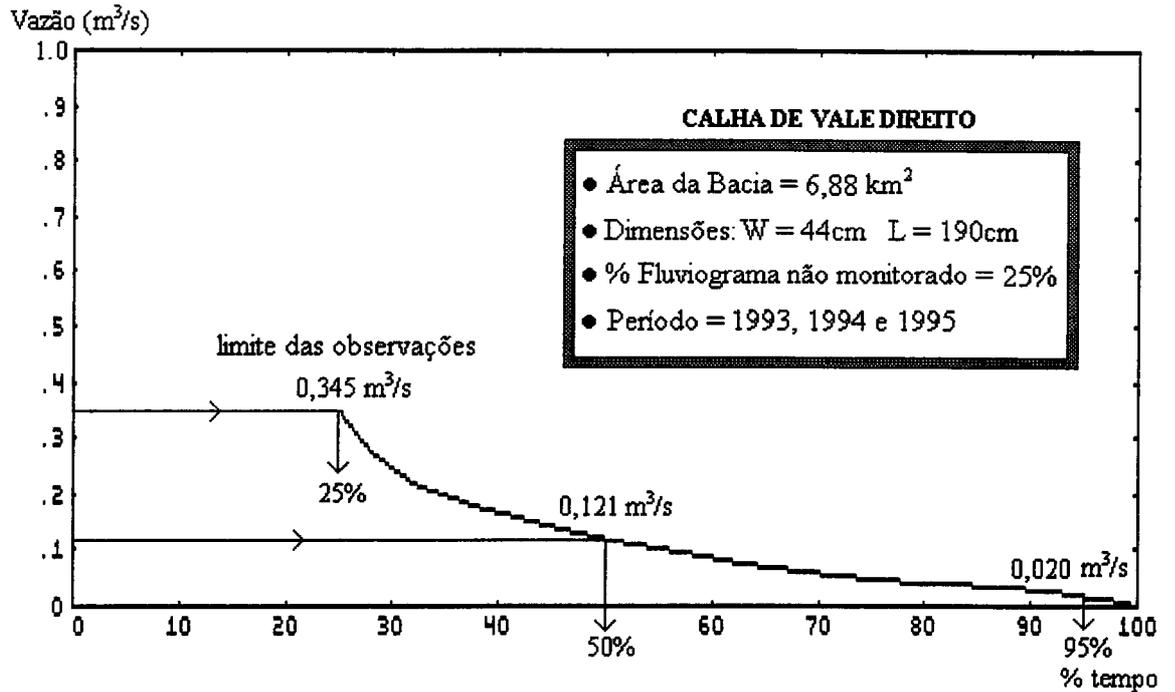


Figura 3.17: Curva de Permanência Observada em Vale Direito

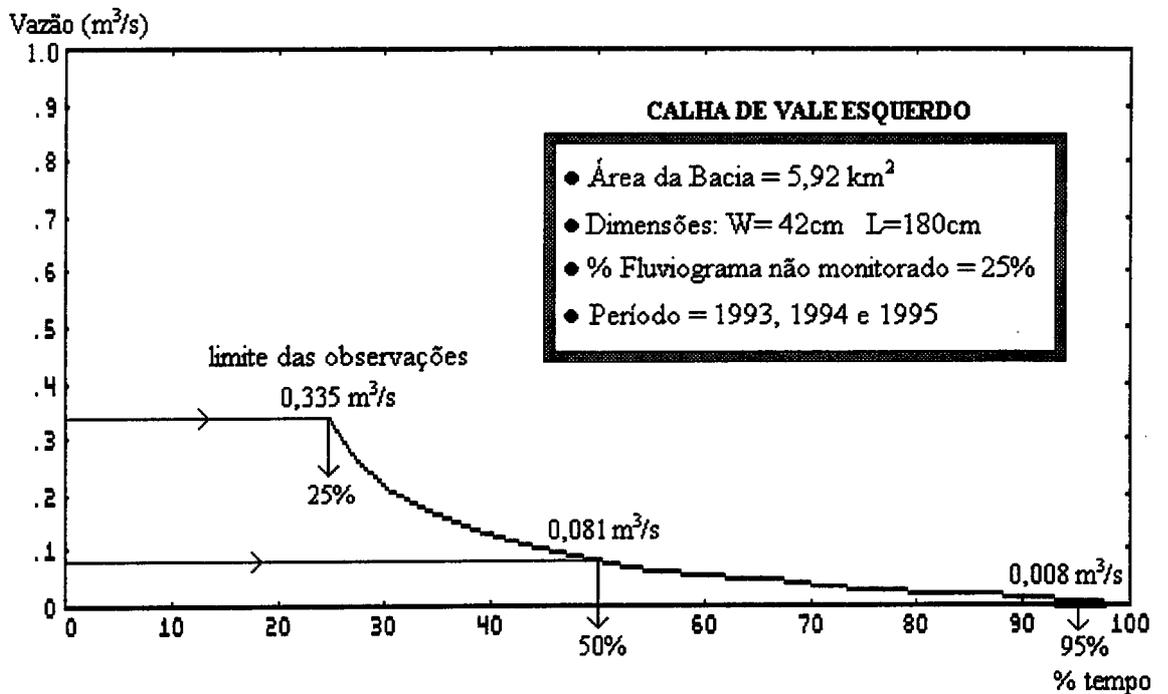


Figura 3.18: Curva de Permanência Observada em Vale Esquerdo

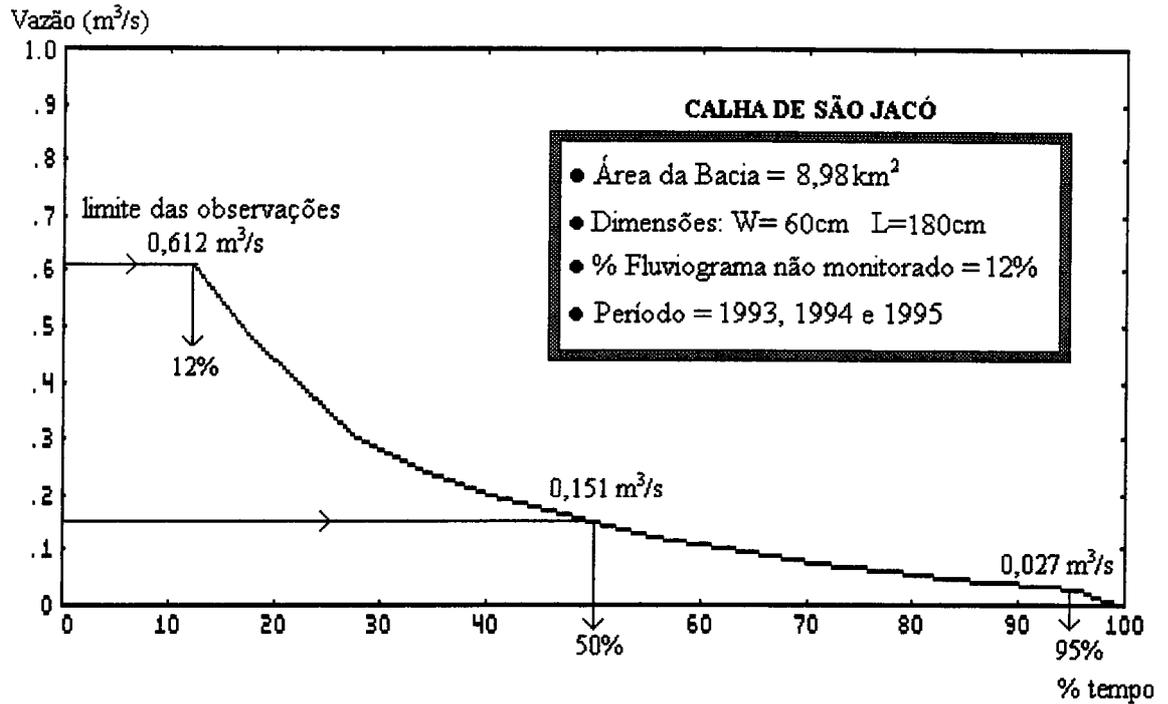


Figura 3.19: Curva de Permanência Observada em São Jacó

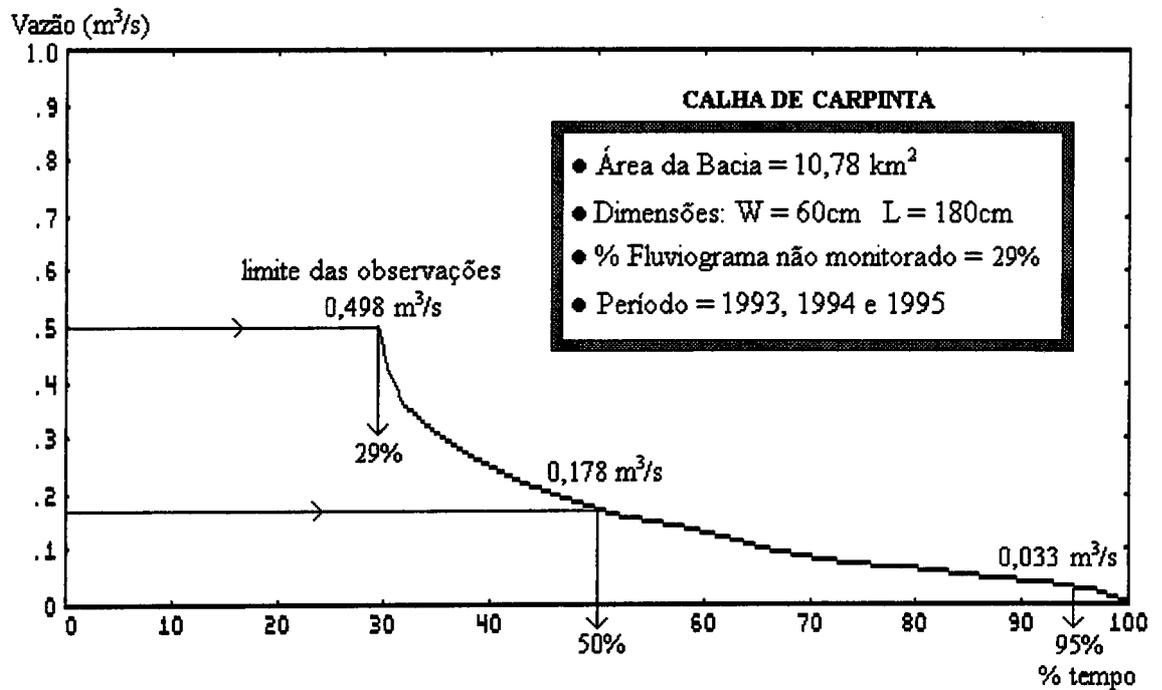


Figura 3.20: Curva de Permanência Observada em Carpintaria

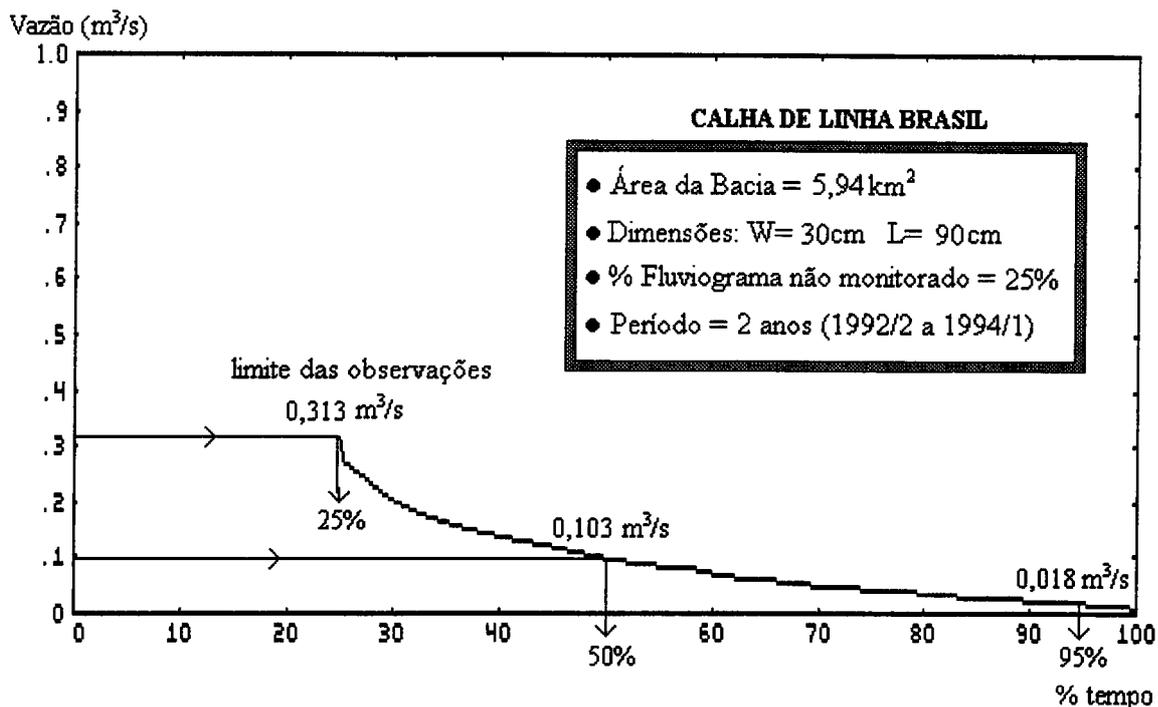


Figura 3.21: Curva de Permanência Observada em Linha Brasil

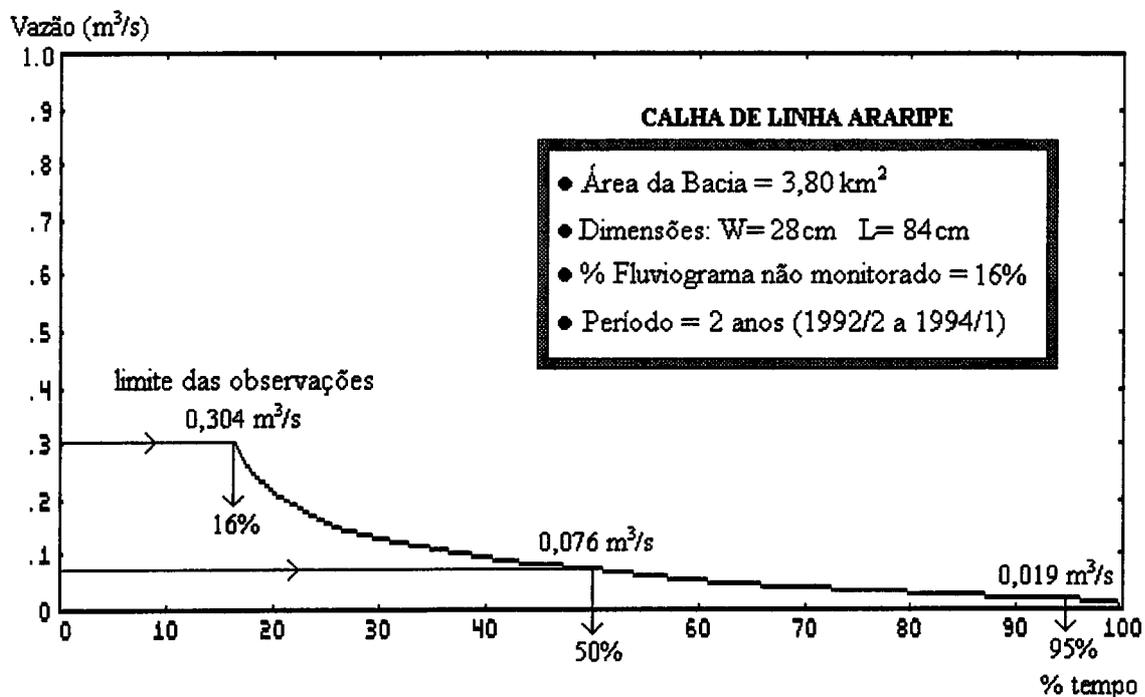


Figura 3.22: Curva de Permanência Observada em Linha Araripe

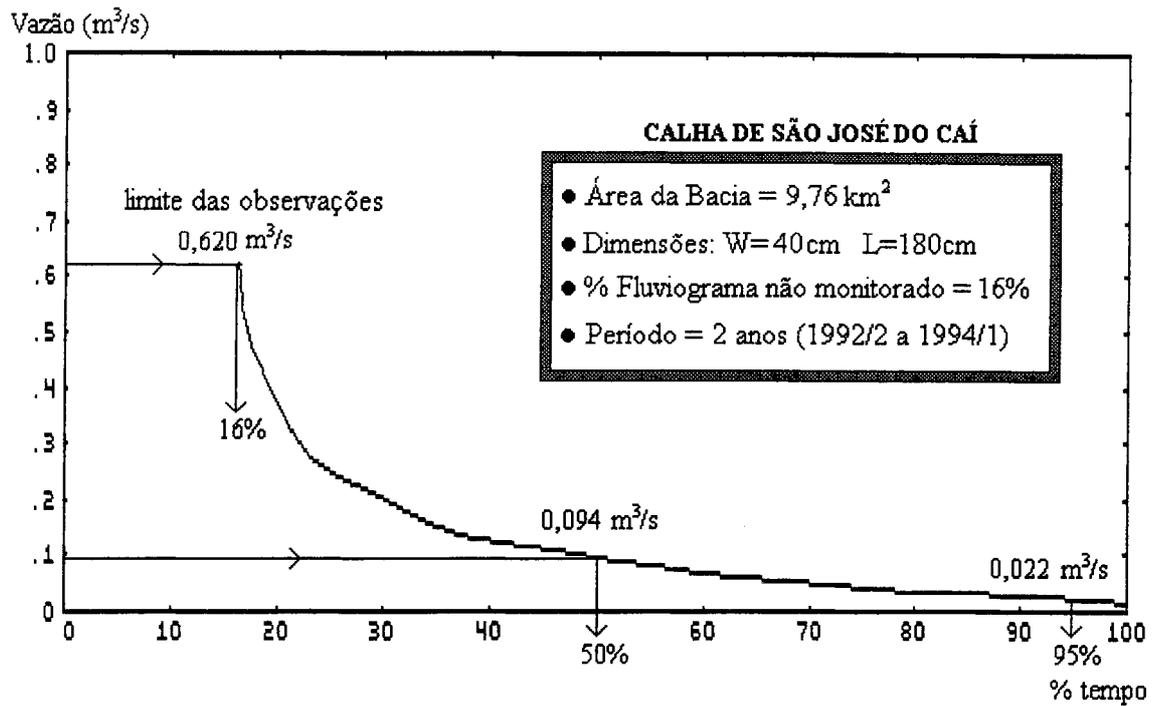


Figura 3.23: Curva de Permanência Observada em São José do Cai

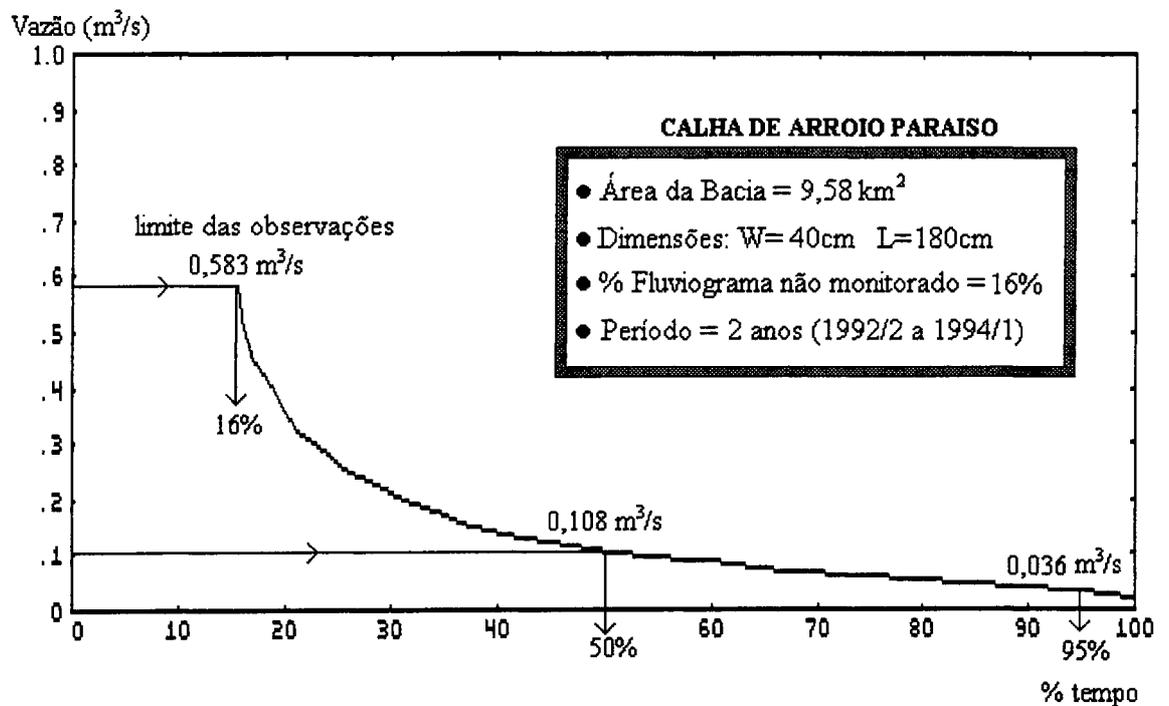


Figura 3.24: Curva de Permanência Observada em Arroio Paraíso

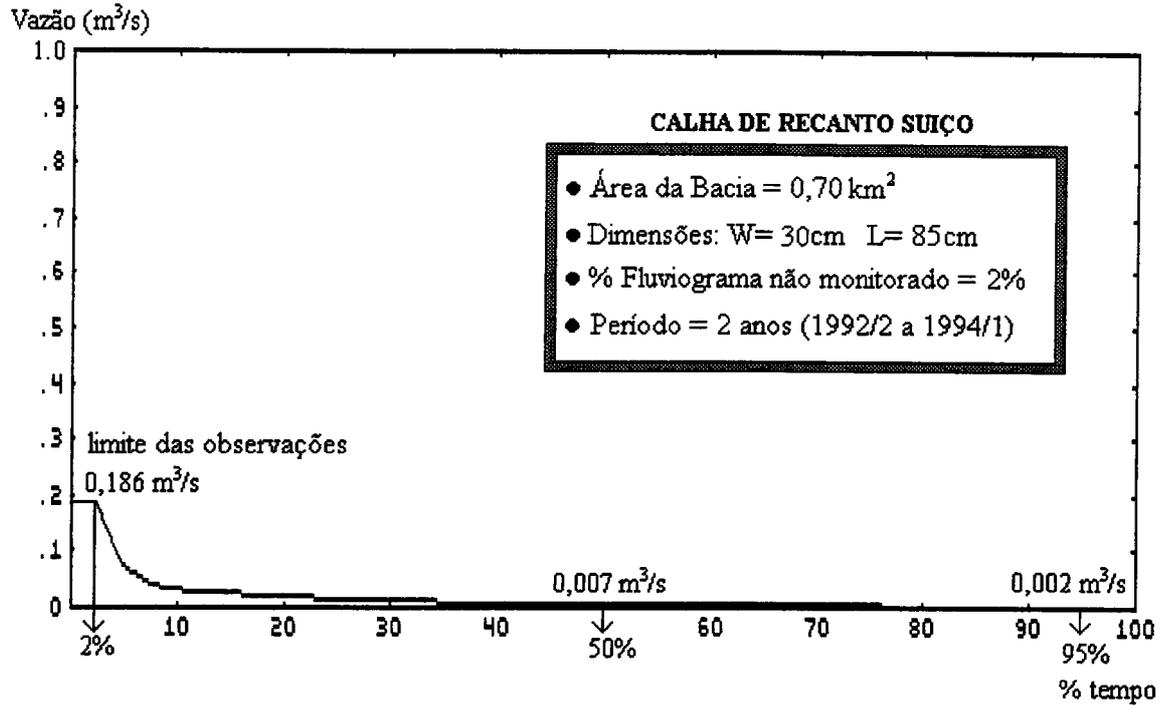


Figura 3.25: Curva de Permanência Observada em Recanto do Suiço

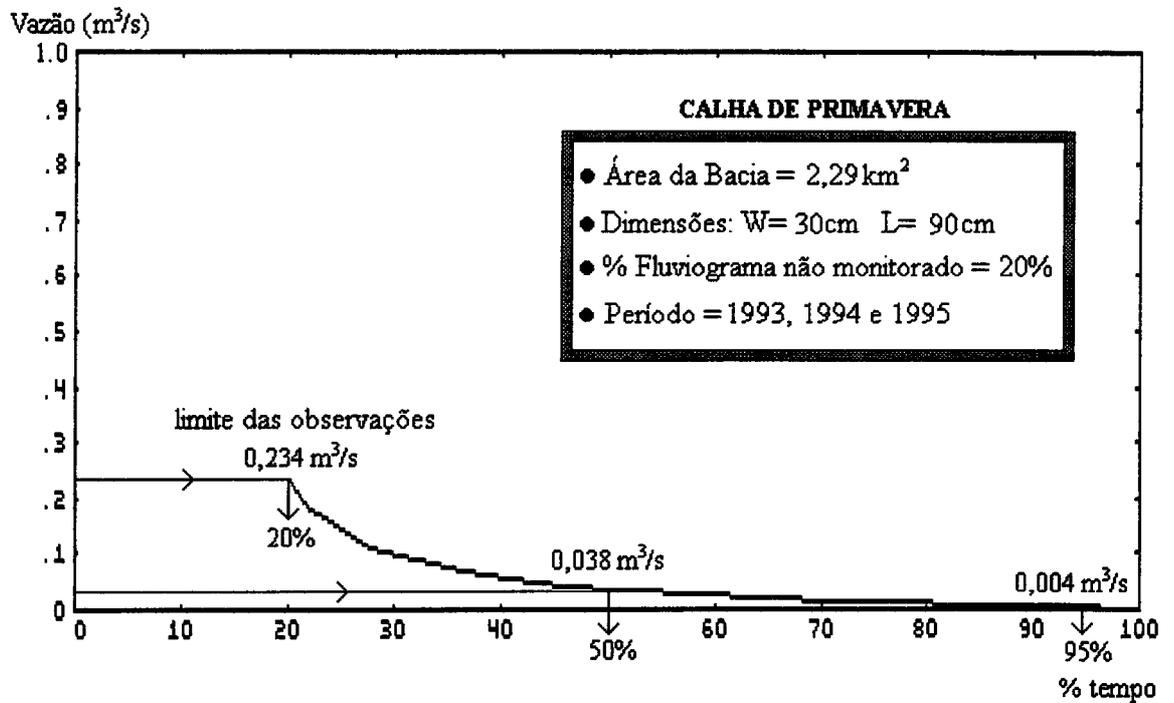


Figura 3.26: Curva de Permanência Observada em Primavera

Com a construção destas curvas (figura 3.15 a 3.26) obteve-se informações relativas:

- ao percentual do fluviograma observado,
- a vazão limite registrada em cada calha e;
- as vazões características de 50% e 95% de permanência no tempo.

Estes valores são apresentados na tabela 3.6 e, no anexo A, os segmentos de fluviogramas monitorados pelas calhas.

Tabela 3.5 – Características das bacias

CALHA	A (km ²)	W (cm)	L (cm)	T.M (%)	Q _{lim} (m ³ /s)	Q ₅₀ (m ³ /s)	Q ₉₅ (m ³ /s)	Q _{lim} (l/s/km ²)	Q ₅₀ (l/s/km ²)	Q ₉₅ (l/s/km ²)
1-SÃO JACÓ	8,98	60	180	88	0,612	0,151	0,027	68	16,8	3,0
2-SCHNEIDER II	3,23	30	90	86	0,291	0,041	0,005	90	12,7	1,5
3-SCHNEIDER I	6,13	60	175	86	0,638	0,075	0,012	104	12,2	2,0
4-CARPINTA	10,78	60	180	71	0,498	0,178	0,033	46	16,5	3,1
5-V. DIREITO	6,88	44	190	75	0,345	0,121	0,020	50	17,6	2,9
6-V.ESQUERDO	5,92	42	180	75	0,335	0,081	0,008	57	13,7	1,4
7-L. BRASIL	5,94	30	90	75	0,313	0,103	0,018	53	17,3	3,0
8-L. ARARIPE	3,80	28	84	84	0,304	0,076	0,019	80	20,0	5,0
9-R. SUÍÇO	0,70	30	85	98	0,186	0,007	0,002	266	10,0	2,8
10-S.J. DO CAÍ	9,76	40	180	84	0,620	0,094	0,022	64	9,6	2,2
11-PARAÍSO	9,58	40	180	84	0,583	0,108	0,036	61	11,3	3,8
12-PRIMAVERA	2,29	30	90	80	0,234	0,038	0,004	102	16,6	1,7

A é a área da bacia, W, a largura da garganta da calha em cm; L, o comprimento da calha em cm; T.M., o tempo monitorado pela calha em percentual do tempo total; Q_{lim}, a vazão limite observada nas calhas; e Q, as vazões para as respectivas permanências em termos absolutos e específicos.

Uma vez concluído que o monitoramento pode ser utilizado para avaliação de disponibilidade hídrica resta ainda a seguinte questão: *Os tamanhos da calhas variaram com base em que critério? A vazão limite é função do tamanho da bacia?*

Observando-se os resultados da tabela 3.5, verifica-se que existe uma grande variabilidade da vazão limite de observação da calhas, de 46 a 265 l/s/km². Esta variabilidade pode ser explicada pelo critério estabelecido pela SSMA/RS de definição do projeto de calha a ser implantada junto aos municípios que aderem ao Programa Estadual de Controle dos Simulídeos. O critério consiste de selecionar a calha de três tipos padrões previamente projetados, quais sejam, (30,90); (40,120) e (40,180) onde o primeiro número (W), do par ordenado, representa a largura da garganta da calha e; o segundo número (L), o comprimento, segundo o esquema da figura 3.3. A escolha da

calha é definida em função de uma medição de descarga efetuada em período de estiagem do arroio.

Não existe a preocupação por parte da SSMA/RS, no caso, com a vazão limite de observação das calhas, pois referem-se a vazões de magnitude maior, não consideradas para aplicação do *Bti*, devido ao grande consumo do produto que seria necessário para estabelecer a dosagem de controle. Também não seria viável para a Secretaria um dimensionamento específico para cada bacia tendo em vista o grande número de calhas implantadas, em torno de 250 (Souza et al, 1994), devido a abrangência do projeto. Assim, a escolha de calha refere-se a viabilidade real de leitura precisa do nível d'água durante a ocorrência das menores vazões.

Conforme ficou constatado pelas curvas de permanência obtidas, pode-se dizer que as estruturas permitem monitorar as vazões de maior magnitude, embora, por parte do Programa Estadual, a utilização das calhas visem apenas a avaliação as vazões mínimas.

Como as bacias têm tamanho e características físicas variadas e as calhas, dimensões padronizadas, tem-se que as vazões de limite superior são diferentes, mesmo em valores específicos, para cada bacia. Além disso, também colaboram para a variabilidade de ocorrência da vazão limite de observação das calhas, a hora de registro do nível por parte do observador associada ao tempo de resposta das bacias aos estímulos de precipitação. A resposta rápida da bacia, na maioria das vezes, não coincidia com a hora definida pelo observador para registro da vazão. Mas, considerando o tempo médio da permanência da vazão limite de observação, verifica-se que o valor encontrado não compromete os objetivos de seu uso nessa pesquisa.

Pelo período de tempo observado pelas calhas, pode-se concluir que boa parte do volume d'água originário principalmente do escoamento superficial não foi registrado, água esta, que entretanto, não seria utilizada pelos pequenos aproveitamentos de recursos hídricos com reduzida reservação. Os segmentos do fluviograma de maior interesse à avaliação de disponibilidade hídrica natural estão no trecho de curva de permanência compreendido entre 40% e 95% do tempo.

Nestas condições, o procedimento de monitoramento das pequenas bacias a baixo custo, com o uso das calhas, permite um conhecimento suficiente de suas disponibilidades hídricas assim como facilita o estabelecimento de um banco de dados para estudos de novas metodologias de avaliação hidrológica.

4. ESTIMATIVA DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA DE PEQUENAS BACIAS COM DADOS ESCASSOS

A metodologia proposta constitui-se em uma nova alternativa à estimativa de potencialidades hídricas fluviais de pequenas bacias sem dados fluviométricos.

As alternativas existentes, que não dependem do monitoramento contínuo ao longo do tempo são as seguintes: (i) estudos de regionalização da curva de permanência de vazões e; (ii) o procedimento “prático” de medição expedita de uma vazão em período de estiagem no local de interesse, conforme Eletrobrás (1983). Esta vazão é utilizada diretamente ou como referência no dimensionamento do pequeno aproveitamento.

Para a realidade brasileira, os estudos de regionalização hidrológica, por serem definidos a partir de uma base de dados proveniente de bacias maiores (área > 500 km²) não devem, por consequência, serem aplicados fora dos limites estabelecidos pelas equações regionais e principalmente para as bacias consideradas pequenas (área < 50 km²). Estas limitações se devem principalmente devido aos seguintes fatores:

1. pelas diferenças nas escalas espaciais e temporais dos mecanismos de transformação chuva-vazão nas pequenas e grandes bacias.
2. pelas dificuldades de caracterização de regiões hidrologicamente homogêneas devido às especificidades locais do meio-físico. Quando a área da bacia diminui, baixa a escala de detalhamento, e mais difícil fica a caracterização de regiões homogêneas, ou seja, a heterogeneidade das pequenas bacias é muito grande.
3. devido à dificuldade de obtenção de dados confiáveis convencionais para as vazões mínimas. Muitas vezes ao priorizar vazões as máximas e médias, os segmentos inferiores das curvas-chave dos postos fluviométricos deixam a desejar. A mobilidade do leito é uma das causas destas incertezas, conforme capítulo anterior.

Com relação ao segundo procedimento para avaliação de disponibilidade hídrica destacado acima, o mesmo fica prejudicado pelo fato de não estar associada a vazão medida a sua permanência no tempo. Esta informação é fundamental à avaliação da receita financeira a ser auferida pela exploração de qualquer aproveitamento de recursos hídricos.

Portanto, atualmente **não existe um procedimento satisfatório de avaliação, sem o monitoramento contínuo ao longo do tempo** para a estimativa do potencial hídrico de uma pequena bacia hidrográfica. Esta falta de metodologia, ou melhor, de um procedimento que apresente erros pequenos, muitas vezes leva ao uso do método “prático” sem considerar as restrições mencionadas, ou ao uso abusivo de estudos de regionalização hidrológica. O uso abusivo caracteriza-se pelo emprego das equações regionais fora das especificações técnicas para as quais foram definidas. As conseqüências dessas práticas são os aumentos dos custos devido as incertezas.

Os aproveitamentos de pequenas bacias geralmente enfocam a sua viabilidade a nível local, fortemente dependente da disponibilidade hídrica da pequena bacia. No estudo de viabilidade econômica o profissional responsável deve responder à seguinte pergunta do empreendedor:

- Construo ou não construo a obra?

Essa resposta pode ser obtida através da curva do benefício líquido anual (BLA), gerado pelo empreendimento e definida pelo cotejo entre a “receita média anual auferida” e o “custo anual de amortização do investimento somado ao custo de operação e manutenção da obra ao longo de sua vida útil”. No caso de uma PCH, pode-se utilizar a seguinte equação (Santana,1988; Martinez,1989).

$$BLA=BA -(CI.P.FRC- COM) \quad (4.1)$$

onde CI é o custo índice da PCH por unidade de potência instalada em R\$/KW, função do arranjo das obras estabelecido no projeto, P é a potência instalada do aproveitamento em KW, FRC é o fator de recuperação de capital, função do investimento e de índices econômicos, COM é o custo de operação e manutenção da PCH em R\$ e; BA, o benefício anual da exploração do aproveitamento em R\$.

Portanto, o estudo de viabilidade econômica caracteriza-se por ser uma avaliação moldada a uma seção fluvial de interesse. O benefício líquido anual, para uma dada potência instalada, depende de fatores físicos do local que determinam o melhor arranjo das obras e; a receita anual a ser auferida pelo empreendimento, depende das avaliação das séries hidrológicas e de sua representatividade no tempo. No caso do não conhecimento de séries hidrológicas, a receita financeira da exploração do empreendimento depende das estimativas de vazões para os locais sem dados e, das incertezas associadas a estas estimativas.

4.1- Estrutura Metodológica

O método aqui proposto para avaliação de disponibilidade hídrica baseia-se na estimativa do comportamento da bacia na estiagem. O deplecionamento fluvial de uma bacia é um retrato do seu comportamento (figura 4.1) após a ocorrência das precipitações. Em pequenas bacias esse processo é mais marcante devido a resposta rápida da bacia a estímulos de precipitações, função do seu pequeno tempo de concentração. Assim o escoamento superficial produzido ocorre normalmente nos próprios dias chuvosos e os períodos de recessão representam o período mais longo de tempo no fluviograma.

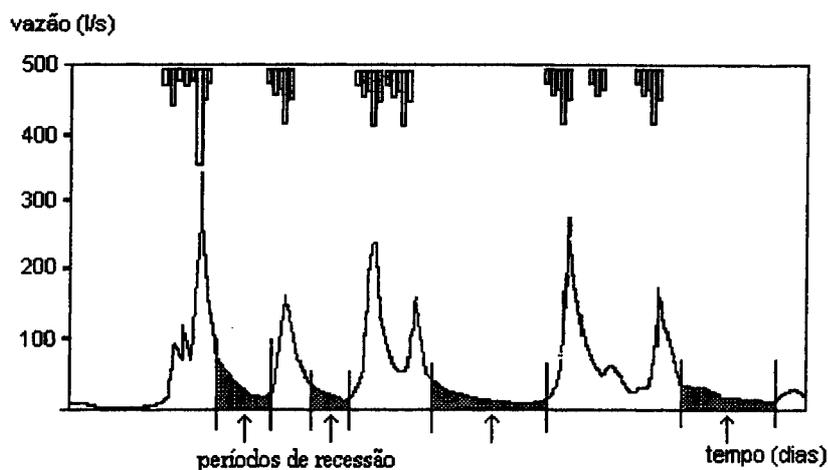


Figura 4.1 – O hidrograma e os períodos de recessão

Desta forma, obtidas algumas medições que reproduzam o comportamento da bacia nas estiagens, busca-se representar a sua resposta através da técnica da simulação por meio da transformação da precipitação em vazão. O significado da curva de depleção medida é dado por uma simulação de balanço hídrico diário que tenta reproduzi-la, a partir da cronologia de precipitações e estiagens, um tipo de dado praticamente sempre disponível em qualquer região. Reproduzindo prioritariamente os períodos de estiagem, o método proposto será melhor indicado no estudo de vazões de maior frequência

Em resumo, a metodologia consiste de duas etapas básicas (figura 4.2):

- I. **Amostragem de vazões** onde caracteriza-se o levantamento de uma amostra reduzida de vazões em período de descarga do aquífero num curto espaço de tempo (uma a duas semanas), sem necessidade de onerosas instalações tradicionais de funcionamento contínuo (linígrafos). Esta amostra é a condição inicial para a aplicação do método.

II. **Simulação de série de vazões** que envolve as seguintes etapas: (i) o ajuste de um modelo simplificado de balanço hídrico com a amostra reduzida, ou seja, com poucos valores de vazão conhecidos; (ii) a síntese de vazões diárias através da simulação chuva-vazão, a partir do histórico de precipitações e evapotranspirações regionais; e, (iii) determinação da curva de permanência.

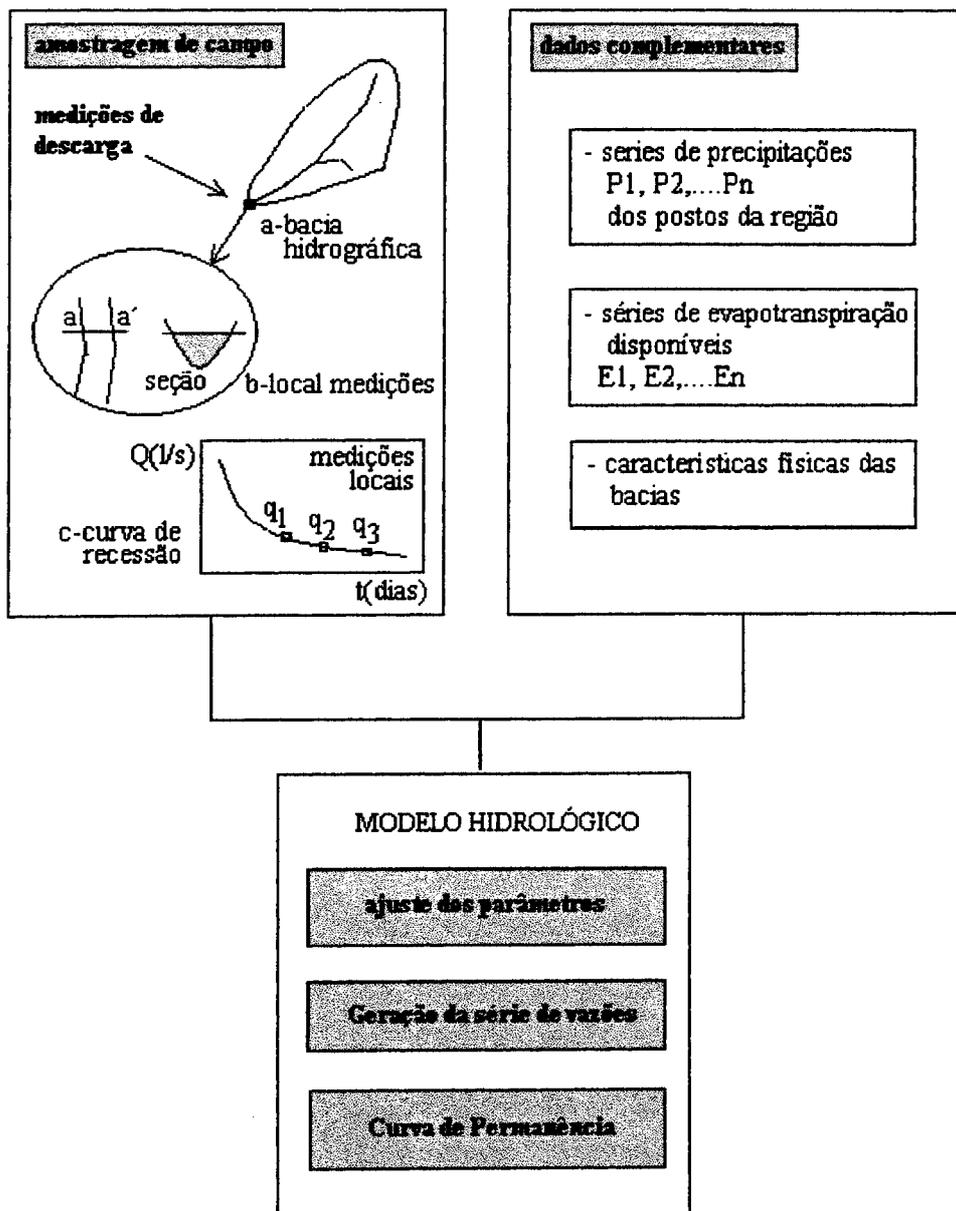


Figura 4.2 – Estrutura metodológica

A **amostragem reduzida de vazões** tem por objetivo dar uma vinculação local às estimativas, funcionando como uma ancoragem hidrológica aos procedimentos de simulação. Também tem a vantagem de ser um procedimento bastante viável de ser realizado, mesmo em condições de falta de equipamentos sofisticados.

A caracterização preliminar do deplecionamento fluvial em termos de magnitude e taxa de decaimento das vazões exige um mínimo de três medições de descargas na seção de interesse espaçadas de alguns dias, em período de estiagem, de modo a se avaliar a estabilidade do decaimento de vazões, Roche(1963).

Dentre os métodos simplificados de medição de descargas (Silveira, 1973), o mais usual é o método de áreas e velocidades com o uso de flutuadores ou micro-molinetes hidrométricos.

A **simulação chuva-vazão** através de um modelo simplificado de balanço hídrico tem por objetivo sintetizar vazões diárias para o local de interesse. O modelo deve buscar sintetizar a série de saída com mínimo de parâmetros (princípio da parcimônia) com o objetivo de representar a faixa de vazões desejada, visando superar as limitações da técnicas atuais utilizando um mínimo de dados.

4.2 - O modelo precipitação-vazão

O modelo proposto nesse estudo tem como premissa o seguinte:

- possuir o menor número de parâmetros possíveis que permita estimar a série de vazões médias diárias em uma pequena bacia hidrográfica e;
- permitir fácil uso no ajuste e na extensão de séries.

Para tanto, foram estabelecidas as seguintes simplificações principais no seu equacionamento:

1. Despreza-se o melhor ajuste da vazão quando existe escoamento superficial;
2. O armazenamento na camada superior do solo é desprezível no intervalo de tempo de análise;
3. A evapotranspiração potencial é retirada da precipitação, quando houver, em cada intervalo de tempo.

Na figura 4.3 é apresentado, de forma esquemática os principais elementos considerados na sua formulação do modelo.

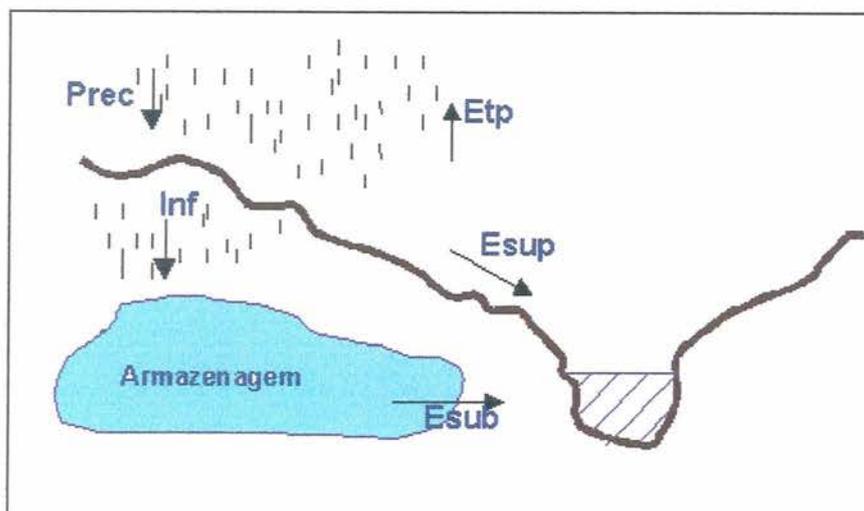


Figura 4.3 – Esquema do modelo simplificado

4.2.1 - Formulação

A estrutura do modelo é descrita a seguir :

- I. A precipitação P_t (mm) em cada intervalo de tempo (diário) é subtraída da evapotranspiração potencial E_t (mm). Quando $P_t - E_t \leq 0$, obviamente não resulta precipitação para gerar escoamento.
- II. Na situação em que $P_t - E_t > 0$, uma parcela da precipitação irá gerar escoamento superficial e outra infiltrará. Neste caso:

$$Pr_t = P_t - E_t \quad (4.2)$$

onde Pr representa a parcela da precipitação que gera escoamento na bacia, dado em mm. A precipitação efetiva é, desta forma, avaliada por:

$$P_{ef}(t) = (I - C_{inf}) \cdot Pr(t) \quad (4.3)$$

onde C_{inf} representa a proporção da precipitação que infiltra; P_{ef} , a precipitação efetiva. O volume de infiltração V_i , fica expresso por:

$$V_i = C_{inf} \cdot Pr(t) \quad (4.4)$$

onde a expressão $(I - C_{inf})$ representa o coeficiente de escoamento e C_{inf} representa o

coeficiente de infiltração ou o fator de perda, usualmente utilizado em modelos de enchentes. Neste caso $Pr(t)$ e $Vi(t)$ são dados em mm.

O volume de infiltração é considerado alimentando diretamente o aquífero, desprezando-se a variabilidade da camada superior do solo associada a períodos úmidos e geralmente de pequena profundidade na cabeceira das bacias.

O reservatório subterrâneo pode ser expresso pela equação da continuidade

$$\frac{dS}{dt} = V_i - Q_b \quad (4.5)$$

onde S é o armazenamento em mm; e Q_b , a vazão de escoamento subterrâneo em mm/dia.

Considerando que o armazenamento (mm) e a vazão de saída estão relacionados pela expressão

$$S = K_b \cdot Q_b \quad (4.6)$$

onde K_b representa o tempo de esvaziamento do reservatório em segundos.

Derivando a equação 4.6 e substituindo na equação da continuidade resulta a equação diferencial do modelo do reservatório linear simples.

$$K_b \frac{dQ_b}{dt} + Q_b = V_i \quad (4.7)$$

A solução desta equação é a seguinte

$$Q_b(t) = Q_b(t-1) \cdot e^{-\Delta t / K_b} + V(t) \cdot (1 - e^{-\Delta t / K_b}) \quad (4.8)$$

No período chuvoso em que $Pr > 0$ a vazão incorpora também a parcela de origem superficial e é dada por:

$$Q(t) = [P_{ef}(t) + Q_b(t)] \quad (4.9)$$

onde $Q(t)$ é a vazão total em mm/dia.

Quando $Pr=0$, a equação se reduz a

$$Q(t) = Q_b(t) \quad (4.10)$$

Para transformar as vazões de mm/dia para $m^3 \cdot s^{-1}$ basta multiplicá-las pela área da bacia em km^2 e, em seguida, dividir o resultado pelo fator 86,4.

O valor inicial do parâmetro K_{sub} para simulação pode ser obtido a partir das medições locais do método proposto, considerando o mínimo estipulado de três valores. Considerando a equação 4.8, na ausência de precipitação pelo modelo, o valor do parâmetro pode ser obtido da seguinte forma:

$$Q_2 = Q_1 \cdot e^{-\Delta t / K_{1sub}} \therefore Q_3 = Q_2 \cdot e^{-\Delta t / K_{2sub}} \quad (4.11)$$

Logo o valor de K estimado pelas equações são:

$$K_{1sub} = \Delta t \cdot \ln \frac{Q_1}{Q_2} \therefore K_{2sub} = \Delta t \cdot \ln \frac{Q_2}{Q_3} \quad (4.12)$$

$$\hat{K}_{sub} = \frac{K_{1sub} + K_{2sub}}{\Delta t} \quad (4.13)$$

onde Δt é o intervalo de tempo entre as medições locais em dias; \hat{K}_{sub} , a estimativa inicial para o parâmetro K_{sub} ; e, Q_1 , Q_2 e Q_3 , as três vazões inicialmente levantadas a campo.

4.2.2- Os macro-processos associados aos parâmetros do modelo

A estrutura do modelo pelo equacionamento proposto define então dois parâmetros de ajuste para o desenvolvimento do balanço hídrico:

1. o primeiro está relacionado ao armazenamento no interior da bacia, ou seja, à massa d'água que chega ao reservatório hipotético de escoamento subterrâneo e é definido por um coeficiente de infiltração C_{inf} da precipitação, descontada da evapotranspiração.

2. o segundo está relacionado ao decaimento das vazões ao longo do tempo, liberadas pelo reservatório de escoamento subterrâneo, sendo definido pelo parâmetro K_{sub} do modelo do reservatório linear simples.

Completa o modelo a vazão diária superficial Q_{esup} dada pela parcela do volume que não infiltra e que, por hipótese chega ao exutório no mesmo dia da precipitação.

Na figura 4.4 são ilustrados os fluxos de oferta hídrica pelo modelo de balanço hídrico e Anexo B, a sua codificação.

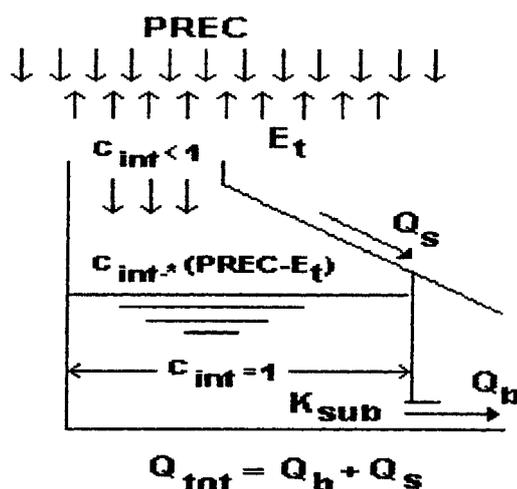


Figura 4.4 - Modelo simplificado de balanço hídrico

Considerando o denominado **coeficiente de infiltração**, C_{inf} , poder-se-ia associá-lo inicialmente a um coeficiente de escoamento subterrâneo para a bacia. Por outro lado pode-se trazer à discussão outros coeficientes de escoamento de consideração usual no trato do processo hidrológico que seriam o coeficiente de escoamento superficial e o coeficiente de escoamento da bacia.

O coeficiente de escoamento superficial é um parâmetro empírico visto que é difícil avaliar ou caracterizar o próprio escoamento superficial. A configuração do processo é complexa e a sua avaliação para efeito de macro-análise considera métodos empíricos de separação dos escoamentos, a partir da análise do fluviograma produzido pela bacia. Este coeficiente é definido teoricamente pelo quociente entre o volume d'água escoado superficialmente e o volume da precipitação bruta sobre a bacia hidrográfica. Esta precipitação bruta sobre a bacia é também fonte de grandes incertezas na avaliação do coeficiente, visto que possui variabilidade de um local à outro.

Da mesma forma, o coeficiente de escoamento subterrâneo pode ser avaliado como o complemento do coeficiente de escoamento superficial em relação ao coeficiente de escoamento da bacia, partido-se da consideração de que o escoamento sub-superficial estivesse embutido no coeficiente de escoamento superficial.

Por fim, o coeficiente de escoamento da bacia é definido pelo quociente do deflúvio total da bacia (soma dos escoamentos superficial e subterrâneo) pela precipitação bruta ocorrida.

O coeficiente de infiltração C_{inf} , parâmetro do modelo de balanço hídrico a ser utilizado nas simulações, não possui a definição de nenhum dos três coeficientes

mencionados: de escoamento total, de escoamento subterrâneo ou de escoamento superficial. Propositadamente também não é denominado de coeficiente de escoamento, porque no caso da simulação de pequenas bacias traz embutido correções de volumes escoados, devido a incorreções de avaliação das áreas das bacias, representatividade dos dados de precipitação e evapotranspiração e possibilidades de ganhos ou perdas de água subterraneamente.

Uma vez definido o volume de água a ser escoado subterraneamente por C_{inf} , o segundo parâmetro do modelo considera a propagação deste volume no meio subterrâneo até o exutório da bacia através do K_{sub} do modelo do reservatório linear simples.

O objetivo da simulação chuva-vazão com este modelo de balanço hídrico é avaliar, portanto, com maior ênfase as vazões formadas no meio subterrâneo, sem deixar de calcular as vazões superficiais que podem surgir nos dias de cheia.

Considerando estas características o uso do modelo será adequado:

1. para geração de uma curva de permanência confiável sobretudo no seu ramo inferior
2. para o estabelecimento de uma série cronológica de vazões para estudos de regularização, ressaltando-se as incertezas dos picos gerados
3. para fornecer elementos quantitativos de vazões em estudos ambientais.

O primeiro uso corresponde ao tema central da tese.

4.2.3 Ajuste dos parâmetros do modelo

O procedimento de ajuste do modelo fica mais claro na situação de sua aplicação como produto final. O profissional habilitado, quando designado para o estudo de determinado manancial, deve inicialmente proceder o mínimo de três medições de descargas na seção interesse do futuro aproveitamento. Antes desta atividade de campo, ele já deve ter levantado todas as informações disponíveis a respeito do meio-físico onde está inserido o manancial, assim como procedido o inventário das informações hidrometeorológicas junto à rede nacional ou outras fontes de informação.

Considerando-se realizado o trabalho preparatório ao desenvolvimento da simulação hidrológica, o profissional deparar-se-á diante de uma tela de computador onde aparecem as vazões medidas localadas no tempo (figura 4.5). Na etapa seguinte, considerando o histórico de precipitações e evaporações regionais assumidos para a região, ele começará a desenvolver o balanço hídrico através do modelo simplificado, mediante o ajuste manual dos parâmetros, por meio de um processo de tentativa e erro. Seria evidentemente possível o ajuste automático por mínimos quadrados mas considerando a existência de apenas três valores de vazões observadas o ajuste manual tende a ser rápido e o critério visual de ajuste não se afasta muito da função objetivo dos mínimos quadrados. Além disso, é desejável que o usuário adquira uma sensibilidade hidrológica no processo de ajuste dos parâmetros para melhor interpretar os resultados. Recomenda-se como ponto de partida, para o ajuste manual, a equação 4.13 para o valor inicial de K_{sub} e $C_{inf} = 0,5$, a metade do seu intervalo de variação.

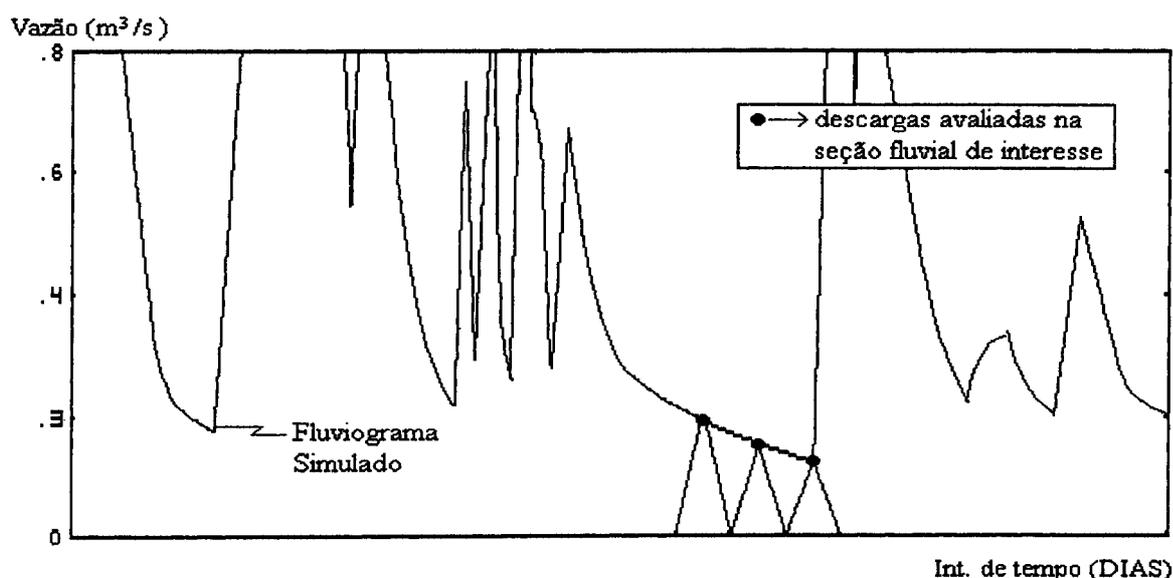


Figura 4.5 - Esquema de estiagem simulada

4.2.4 Geração da série cronológica de vazões e da correspondente curva de permanência

Realizado o ajuste do modelo à estiagem com vazões observadas, considera-se o fluviograma gerado uma aproximação da produção hídrica da bacia, a qual pode ser tabulada na forma de uma curva de permanência para a seção de interesse. O

fluviograma constitui uma série sintética de vazões e seu aspecto é ilustrado na figura 4.6. A curva de permanência resultante é obtida conforme descrito no capítulo 3.

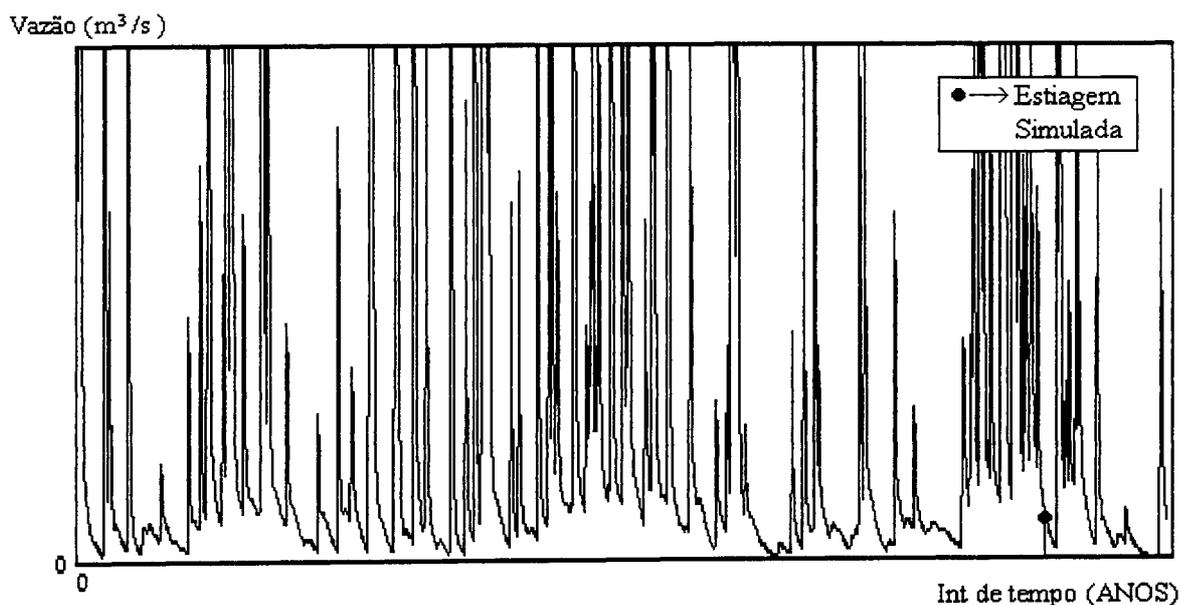


Figura 4.6 - Esquema de hipotético fluviograma gerado com a precipitação regional de longo período

4.3 Verificação da Metodologia: avaliação do erro das estimativas.

Inicialmente deve-se considerar, de acordo com a literatura (Roche, 1961; Acqua-Plan, 1977; Zecharias e Brutsaert, 1988) e conforme observado pelos dados monitorados nas pequenas bacias, que os decaimentos de vazões (as estiagens) variam devido às características de estado do complexo bacia hidrográfica e devido também à variabilidade temporal e espacial da precipitação precedente à estiagem. Portanto seriam necessários vários eventos de estiagem para se avaliar o erro estimado por cada estimativa isolada (ajuste do modelo). Do conjunto de erros encontrados poder-se-ia avaliar as incertezas dos resultados e proceder-se considerações de conotação teórico-práticas.

Para a verificação, a metodologia proposta utilizou-se das séries de vazões dos postos das pequenas bacias citadas no capítulo 3. Para tanto, foram selecionados do fluviograma monitorado nas bacias, diferentes conjuntos de três vazões, em período de estiagem.

Cada conjunto de três vazões define um evento a ser ajustado e produz como resultado um jogo de parâmetros. As incertezas associadas a simulação chuva-

vazão podem ser inferidas a partir das incertezas dos parâmetros (Haan,1989) conforme visto no capítulo 2. Isto é, a incerteza das vazões calculadas pelo modelo dependem do comportamento probabilístico dos parâmetros.

Os parâmetros C_{inf} e K_{sub} estão vinculados basicamente ao processo de geração do escoamento de base e suas estimativas procuram ajustar o modelo preferencialmente na representação das depleções. As vazões na depleção decrescem continuamente constituindo uma situação estável não sujeita a perturbações significativas que caracterizam os períodos de cheia governados pela precipitação. Logo, é razoável supor que os erros nas vazões calculadas nos períodos de estiagem sejam independentes da magnitude das vazões e tenham média nula e variância finita, as duas condições mais violadas pelos modelos hidrológicos das quatro necessárias para existência de parâmetros reais (capítulo 2). Numa depleção bem ajustada dificilmente poderá se manifestar erros proporcionais às vazões ou haver uma tendenciosidade para cima ou para baixo da real curva de depleção.

Se os erros do modelo na estiagem obedecem às condições gerais mencionadas por Troutman (1985), presentes no capítulo 2, C_{inf} e K_{sub} tem a tendência de seguir a distribuição normal.

A identificação das distribuições de probabilidades das estimativas dos parâmetros é importante na análise da incerteza porque permite o uso do método de Monte Carlo para gerar aleatoriamente um número suficiente de jogos de parâmetros e verificar o impacto de sua variabilidade nos resultados do modelo. Uma condição adicional é que os parâmetros sejam independentes entre si, porém num modelo com dois parâmetros dificilmente eles seriam dependentes. Se o resultado analisado é a curva de permanência, calcula-se, para cada jogo de parâmetros gerado por Monte Carlo, a correspondente curva de permanência calculada. O feixe de curvas configura no entorno de cada percentil (vazão com permanência de 95%, por exemplo) uma distribuição de probabilidades que pode ser usada para estabelecer intervalos de confiança.

Um intervalo de confiança de 95% pode ser construído centralizado nos percentis da curva de permanência observada (item 3.4.2):

$$\text{Intervalo } 95\% = Q_p^{obs} \pm 1,96 s_p^c \quad (4.14)$$

$$s_p^c = \sqrt{\frac{\sum_1^n (Q_p^{mc} - Q_p^{obs})^2}{n-1}} \quad (4.15)$$

onde s_p^c é o erro padrão centralizado para a permanência p , n é o número de simulações Monte Carlo, Q_p^{mc} é a vazão calculada com parâmetros gerados por Monte Carlo e, Q_p^{obs} é a vazão da curva de permanência observada. O coeficiente 1,96 vem da Normal reduzida e define o intervalo de confiança de 95%.

Outro intervalo de confiança 95% pode ser calculado no entorno da curva de permanência média estimada.

$$\text{Intervalo } 95\% = Q_p^{med} \pm 1,96 s_p^c \quad (4.16)$$

$$s_p^e = \sqrt{\frac{\sum_1^n (Q_p^{mc} - Q_p^{med})^2}{n-1}} \quad (4.17)$$

onde s_p^e é o erro padrão da estimativa para a permanência p e Q_p^{med} é o correspondente percentil da curva média de todas as curvas calculadas com parâmetros gerados por Monte Carlo.

Há diferenças de interpretação dos dois intervalos de confiança. O primeiro enfoca a curva de permanência observada como a tendência central das curvas de permanência, enquanto que o segundo admite a curva de permanência observada como sendo apenas uma realização estatística do universo de curvas de permanências possíveis, cuja tendência central seria a curva de permanência média da amostra de curvas geradas por Monte Carlo.

4.4 - Resultados e Avaliação das estimativas

4.4.1 - Seleção dos Períodos de Estiagem

A etapa inicial de avaliação da metodologia parte da seleção de eventos de estiagem junto ao fluviograma monitorado para a bacia.

A seleção dos períodos de estiagem para cada pequena bacia é função do seguinte:

- 1) a ocorrência de um período de ausência de chuvas na região
- 2) a ocorrência real de estiagens no manancial estudado

3) a boa operação da calha durante a estiagem

A identificação da estiagem pode-se iniciar através da análise visual direta do fluviograma observado em conjunto com os dados de chuva disponíveis de um ou mais postos pluviométricos tomados como referência para a bacia. Entretanto para diminuir a subjetividade da escolha e melhor caracterizar o processo foi estabelecido inicialmente como critério, que os períodos de estiagem fossem selecionados a partir de um número mínimo de 7 dias antecedentes e consecutivos sem chuva.

A condição mínima para aplicação da metodologia foi definida como sendo o conhecimento de três medições locais, avaliadas a cada dois dias. A justificativa para o estabelecimento deste intervalo de tempo pequeno entre as medições, de dois dias, refere-se a caracterização de um intervalo inicial para a aplicação do procedimento. Na simulação do caso real de aplicação pelo usuário, estas medições poderiam ser desenvolvidas no período de uma semana, como por exemplo, nos dias úteis de segunda-feira, quarta-feira e sexta-feira. No entanto, intervalos maiores entre as medições locais (5 dias, por exemplo) seriam melhores para a caracterização do deplecionamento fluvial na estiagem, em função da melhor estabilização do processo. A restrição ao aumento do intervalo de tempo entre as medições locais, refere-se a possibilidade de ocorrência de uma precipitação que descaracterize a estiagem, provocando as perdas das medições anteriores e, da mobilização de ida ao local.

Considerou-se na avaliação as pequenas bacias da rede experimental com maior número de anos de monitoramento - 3 anos - para possibilitar a seleção de um número suficiente de estiagens para uma verificação consistente da metodologia. As bacias com este período de monitoramento disponível são: Vale Direito, Vale Esquerdo, Carpintaria, Schneider I, Schneider II e São Jacó. (capítulo 3).

A consideração de uma série histórica de 3 anos de dados fluviométricos para a avaliação do procedimento, possibilitou a identificação de algumas dificuldades acerca das condições práticas de aplicação pelo usuário. Observou-se que a ausência de chuva na região é um indicador satisfatório da ocorrência real de uma estiagem na pequena bacia mesmo que os dados de chuva tomados como referência para aplicação da metodologia não estivessem inseridos nos domínios da bacia. Entretanto o critério adotado de ausência total de chuvas no período da estiagem acabou por isolar poucos eventos, em média apenas dois por ano para cada pequena bacia. A aplicação prática do método não pode se restringir a raras ocasiões no ano e além disso este pequeno

número de eventos de estiagens selecionadas seriam insuficientes para uma melhor avaliação dos resultados encontrados. Para sanar tal dificuldade o critério de seleção, inicialmente estabelecido, foi modificado.

O critério modificado, que proporcionou a seleção de um número razoável de eventos de estiagens, foi o que permitiu a ocorrência de 15 mm de chuva durante o período de tempo da estiagem selecionada. O período total de tempo da estiagem, seria constituído então pelos 7 dias antecedentes à medição de descargas mais os 5 dias nos quais as três medições seriam efetuadas, totalizando 12 dias consecutivos. Portanto, nestes 12 dias consecutivos seriam permitidos no máximo a ocorrência de 15 mm de chuva no posto pluviométrico tomado como referência para a consideração da estiagem. Entretanto, como os eventos potenciais de ocorrência de estiagens são selecionados através da precipitação regional e não local, na etapa seguinte da seleção de estiagens muitos eventos são descartados pela falta de representatividade das chuvas na pequena bacia. A partir do momento que se admitiu a ocorrência de chuvas pequenas na região já não é garantida regionalmente a ausência de chuvas em toda a área de influência assumida para os postos pluviométricos de referência. Isto implica na ocorrência de chuvas isoladas, espacial e temporalmente localizadas na região, que podem ocorrer na bacia e não na região dos postos pluviométricos ou, o contrário, de chuvas que podem ocorrer junto à região dos postos pluviométricos e não na bacia. Os eventos abandonados foram aqueles nos quais se observou o seguinte: (i) quando não existia resposta na bacia à estímulos de chuva dos postos pluviométricos de referência ou; (ii) quando existia elevação de vazões na pequena bacia com ausência de estímulo de precipitação no posto de referência.

No caso real de aplicação da metodologia estas dificuldades poderão ser minimizadas, já que o engenheiro responsável pela avaliação inspecionará *in loco* a caracterização da estiagem através de consultas a moradores locais sobre a ocorrência de chuvas localizadas na área, nos dias anteriores aos trabalhos de campo, assim como pela avaliação direta da magnitude da vazão encontrada no manancial fluvial.

Conforme o critério adotado, uma vez selecionado o período de estiagem, considerou-se como evento o conjunto de três vazões avaliadas com intervalo de tempo de dois dias. Estas três vazões avaliadas equivaleriam às medições locais a serem realizadas quando da aplicação real do procedimento proposto.

4.4.2 - Ajuste dos Eventos

Após a seleção dos eventos de estiagem, a partir do fluviograma monitorado para cada bacia, realizou-se o ajuste do modelo individualmente para cada evento.

Na simulação das pequenas bacias utilizou-se os dados mais próximos, postos de Sapucaia e Taquari, respectivamente, para precipitações diárias e evaporação do tanque classe A. Os dados de evaporação deste tanque podem ser considerados como uma boa representação da evapotranspiração potencial em bacias rurais (Dorfman, 1977).

Para iniciar o ajuste do balanço hídrico estabeleceu-se, como valor inicial para o parâmetro $C_{inf} = 0,5$, representando que a metade da precipitação, descontada das perdas por evaporação, produz escoamento de base na bacia e que a outra metade produz o escoamento superficial. Entretanto, os primeiros ajustes do balanço hídrico para a bacia de Schneider I conduziram a um coeficiente de infiltração médio com valor próximo de 0,35. Embora isso não tenha sido uma questão substancial do ajuste, passou-se a adotar, para o início das simulações, este valor para o coeficiente de infiltração. Com relação ao valor do parâmetro K_{sub} , para início da simulação, adotou-se o valor calculado pela equação 4.13 que pode ser obtido a partir das medições locais definidas pelo do método proposto.

Os resultados obtidos com as simulações são apresentados nas figuras de 4.7 e 4.8 onde aparecem os feixes de curvas amostrais, característicos da dispersão dos resultados encontrados pelo ajuste de cada evento de estiagem isoladamente. Observa-se que a dispersão das curvas ajustadas contém a curva de permanência observada. Ressalte-se que cada curva de permanência ajustada a cada evento de estiagem foi construída com a reprodução das vazões no mesmo período para o qual se dispõe de observações fluviométricas a fim de que esta curva possa ser comparada a curva de permanência construída com essas observações (a curva de permanência observada).

Nas tabelas 4.1 e 4.2 identificam-se as datas de início dos períodos de estiagem selecionados assim como os parâmetros encontrados pelo ajuste do modelo. Esses resultados não consideram ainda a análise de incertezas, apenas explicam preliminarmente a variabilidade do teste de curvas calculadas. Por isso elas foram chamadas de curvas de permanência amostrais para indicar claramente que elas são

resultados dos jogos de parâmetros ajustados à amostra das estiagens. Os valores de K_{sub} e C_{inf} nas tabelas 4.1 e 4.2 representam, na linguagem estatística, amostras dos respectivos estimadores.

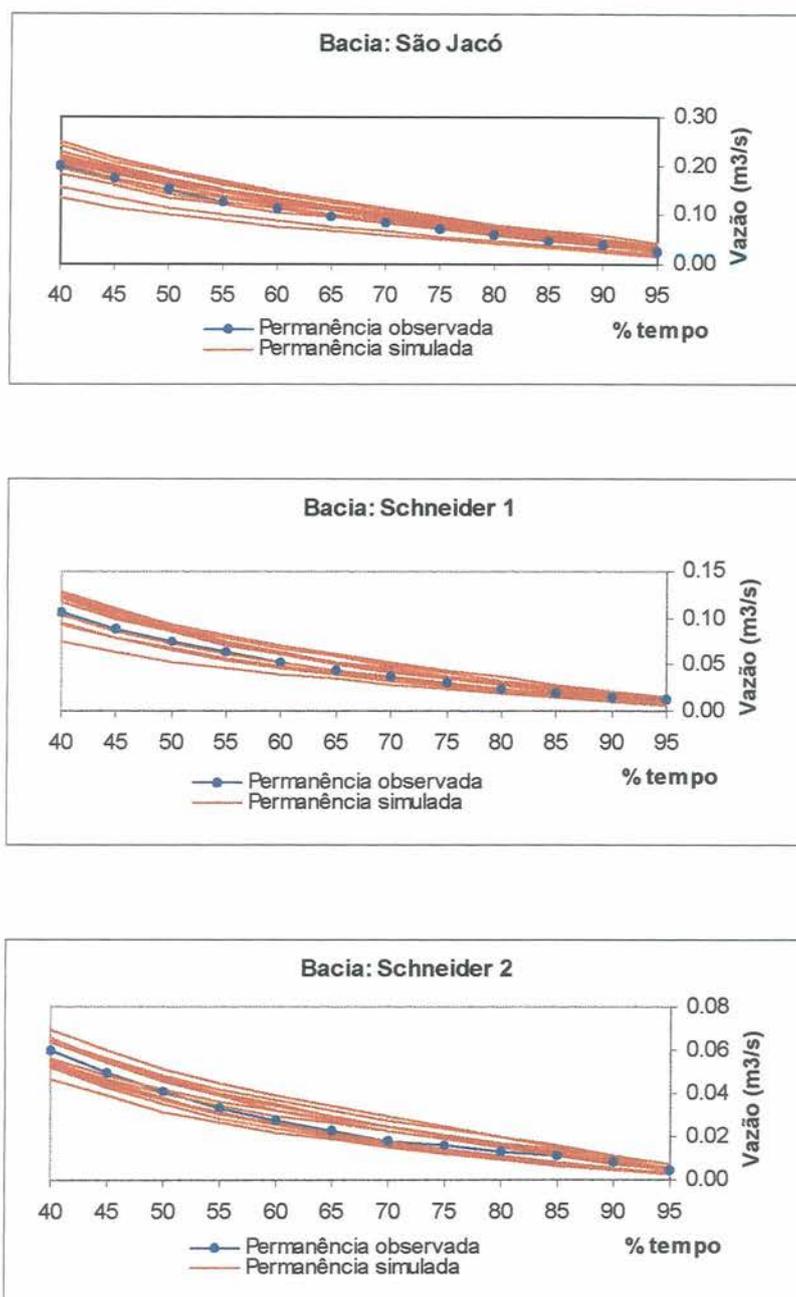


Figura 4.7 – Curvas de permanência simuladas com parâmetros amostrais das bacias de São Jacó, Schneider 1 e Schneider 2

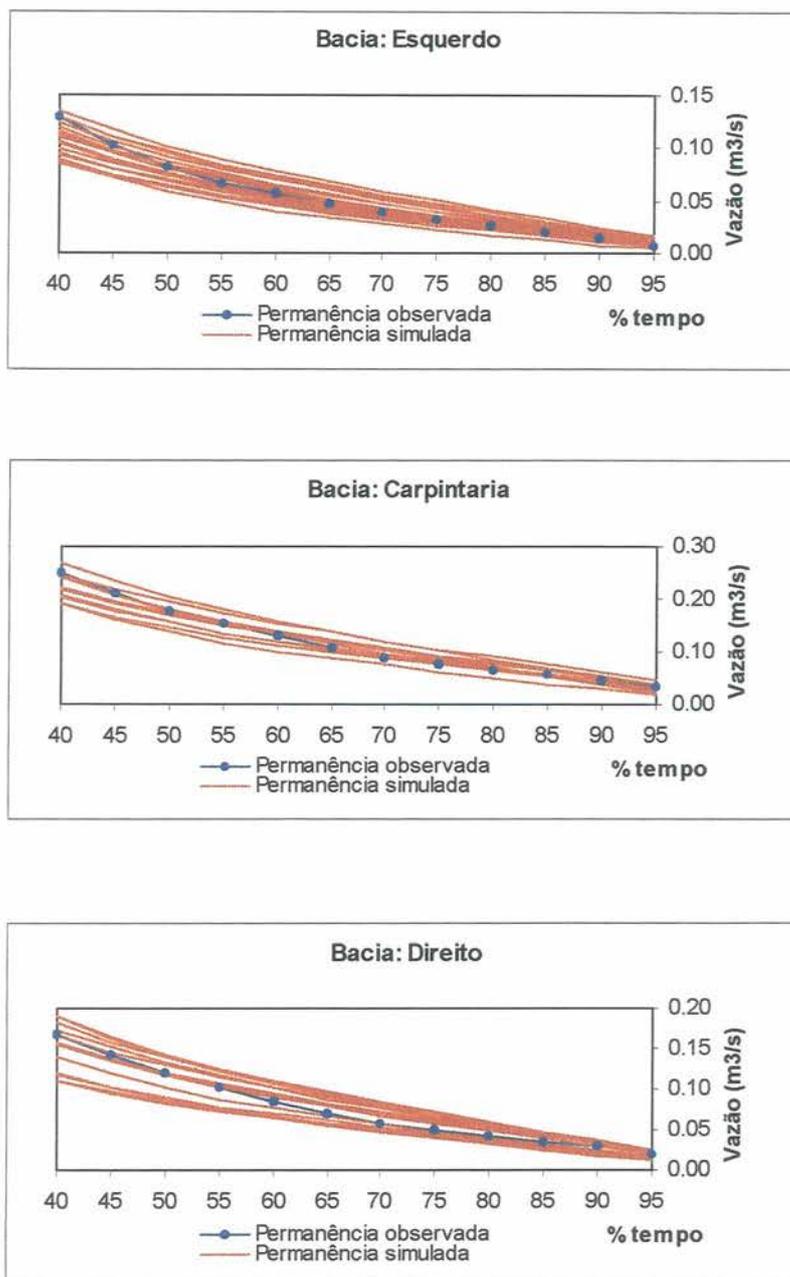


Figura 4.8 – Curvas de permanência simuladas com parâmetros amostrais das bacias de Vale Direito, Vale Esquerdo e Carpintaria

Tabela 4.1 - Eventos selecionados e parâmetros de ajuste obtidos nas Bacias de Sapiranga

Bacia de São Jacó				Bacia de Schneider 1				Bacia de Schneider 2			
N	DATA	K_{sub}	C_{inf}	N	DATA	K_{sub}	C_{inf}	N	DATA	K_{sub}	C_{inf}
1	23/02/93	10	0,35	1	24/02/93	6,00	0,35	1	22/02/93	8	0,35
2	15/05/93	9	0,38	2	24/04/93	7,00	0,25	2	15/05/93	7	0,35
3	06/06/93	8	0,30	3	15/05/93	6,00	0,33	3	06/06/93	5	0,30
4	04/08/93	11	0,42	4	06/06/93	6,00	0,25	4	31/07/93	7	0,30
5	19/08/93	11	0,43	5	03/08/93	7,00	0,32	5	02/08/93	6	0,35
6	09/09/93	14	0,40	6	11/01/94	7,00	0,20	6	09/09/93	6	0,35
7	02/11/93	9	0,41	7	26/02/94	8,00	0,34	7	11/01/94	5	0,26
8	11/01/94	9	0,25	8	22/08/94	7,00	0,32	8	06/03/95	6	0,35
9	25/02/94	9	0,45	9	17/09/94	7,00	0,32	9	23/08/95	7	0,38
10	17/08/94	8	0,50	10	02/03/95	6,00	0,34	10	23/10/95	4	0,30
11	14/09/94	9	0,50	11	24/05/95	8,00	0,34	11	24/10/95	5	0,30
12	06/03/95	9	0,43	12	30/08/95	8,00	0,34	12	29/11/95	6	0,35
13	18/05/95	9	0,48	13	10/10/95	7,00	0,34	MÉDIA		6,00	0,33
14	24/05/95	9	0,48	14	23/10/95	6,00	0,28	Desvio padrão		1,13	0,04
15	23/08/95	9	0,39	MÉDIA		6,86	0,31				
16	25/10/95	8	0,46	Desvio padrão		0,77	0,05				
17	28/11/95	9	0,25								
MÉDIA		9,41	0,40								
Desvio padrão		1,46	0,08								

Tabela 4.2 - Eventos selecionados e parâmetros de ajuste obtidos nas Bacias de Dois Irmãos

Bacia de Vale Direito				Bacia de Vale Esquerdo				Bacia de Carpintaria			
N	DATA	K_{sub}	C_{inf}	N	DATA	K_{sub}	C_{inf}	N	DATA	K_{sub}	C_{inf}
1	22/02/93	7,50	0,35	1	22/02/93	6,00	0,30	1	22/02/93	11,00	0,35
2	15/05/93	8,50	0,40	2	15/05/93	6,00	0,34	2	16/05/93	7,00	0,40
3	06/06/93	7,70	0,30	3	06/06/93	7,00	0,25	3	17/07/93	9,00	0,33
4	14/07/93	7,00	0,50	4	15/07/93	6,50	0,33	4	02/08/93	11,50	0,36
5	02/08/93	8,00	0,50	5	11/08/93	6,40	0,34	5	06/09/93	12,00	0,40
6	15/08/93	10,00	0,43	6	01/09/93	7,50	0,38	6	02/11/93	7,50	0,40
7	04/09/93	10,00	0,40	7	02/11/93	7,00	0,35	7	27/03/94	9,00	0,44
8	02/11/93	8,80	0,40	8	11/01/94	5,00	0,25	8	04/11/94	12,00	0,40
9	12/01/94	7,00	0,30	9	25/02/94	8,00	0,38	9	15/01/95	7,00	0,30
10	27/03/94	7,50	0,50	10	12/07/94	8,00	0,38	10	12/03/95	12,00	0,40
11	15/01/95	7,50	0,30	11	17/08/94	7,50	0,36	11	21/04/95	12,00	0,40
12	09/03/95	8,90	0,48	12	13/09/94	7,50	0,36	12	03/05/95	12,00	0,40
13	03/05/95	9,00	0,45	13	15/01/95	8,00	0,25	13	28/05/95	12,00	0,40
14	05/05/95	9,00	0,45	14	10/03/95	8,00	0,33	14	28/08/95	10,50	0,32
15	24/05/95	9,00	0,45	15	20/04/95	11,00	0,34	15	28/10/95	10,00	0,30
16	23/08/95	10,00	0,29	16	03/05/95	5,50	0,32	16	21/11/95	9,00	0,33
17	23/10/95	10,20	0,27	17	10/05/95	8,00	0,27	17	10/12/95	9,00	0,33
18	22/11/95	11,00	0,27	18	26/05/95	7,50	0,29	MÉDIA		10,14	0,37
19	03/12/95	11,00	0,27	19	23/08/95	7,50	0,27	Desvio padrão		1,86	0,04
MÉDIA		8,82	0,39	20	05/10/95	8,50	0,40				
Desvio padrão		1,28	0,09	21	23/10/95	6,50	0,25				
				22	24/11/95	6,70	0,25				
				MÉDIA		7,25	0,32				
				Desvio padrão		1,23	0,05				

4.4.3 – Intervalos de Confiança das Estimativas por Monte-Carlo

A determinação de intervalos de confiança para as respostas do modelo foi a alternativa escolhida para a avaliação da incerteza nas vazões calculadas e consequentemente na curva de permanência estimada.

O procedimento adotado baseou-se, para cada bacia, na geração de amostras aleatórias para os parâmetros C_{inf} e K_{sub} , de acordo com suas distribuições de probabilidades (método de Monte-Carlo). Para cada par C_{inf} - K_{sub} o modelo gera uma curva de permanência, ou seja, um elemento de amostra para cada percentil. A inferência sobre a amostra de cada percentil permite o estabelecimento de um intervalo de confiança para toda a curva de permanência.

O passo inicial para aplicação deste procedimento é a identificação da distribuição de probabilidade para os parâmetros.

Os resultados dos ajustes produziram uma variabilidade nos parâmetros (tabelas 4.1 e 4.2) que identifica estatisticamente uma realização amostral dos estimadores destes parâmetros. Na tabela 4.3 são apresentados os ajustes máximos, mínimos e médios obtidos para os parâmetros C_{inf} e K_{sub} .

Tabela 4.3 - Intervalo de variação dos parâmetros por bacia

BACIA (calha)	MUNICÍPIO	A (km ²)	K_{sub} max (dia)	K_{sub} min (dia)	K_{sub} med (dia)	C_{inf} max	C_{inf} min	C_{inf} med
SÃO JACÓ	SAPIRANGA	8,98	14,00	8,00	9,18	0,50	0,25	0,40
SCHNEIDER II	SAPIRANGA	3,23	8,00	4,00	6,00	0,38	0,26	0,33
SCHNEIDER I	SAPIRANGA	6,13	8,00	6,00	6,73	0,35	0,20	0,31
CARPINTA	DOIS IRMÃOS	10,78	12,00	7,00	10,75	0,44	0,30	0,37
V. DIREITO	DOIS IRMÃOS	6,88	11,00	7,00	9,12	0,50	0,27	0,39
V.ESQUERDO	DOIS IRMÃOS	5,92	11,00	5,00	7,18	0,40	0,25	0,32

Observa-se para cada bacia uma variação bruta do simples ao dobro nos valores dos parâmetros. Verifica-se também que a média fica aproximadamente equidistante dos extremos inferior e superior. Isto dá uma primeira indicação de uma

distribuição simétrica para os parâmetros. O ajuste à distribuição normal nestes casos é geralmente tentado.

Antes disso, entretanto, é preciso verificar se existe correlação entre os parâmetros do modelo para os ajustes obtidos em cada bacia. Na figura 4.9 são apresentados os valores obtidos mostrando uma nuvem de pontos que induz a não existência de correlação. O coeficiente de correlação obtido foi $r=0,06$.

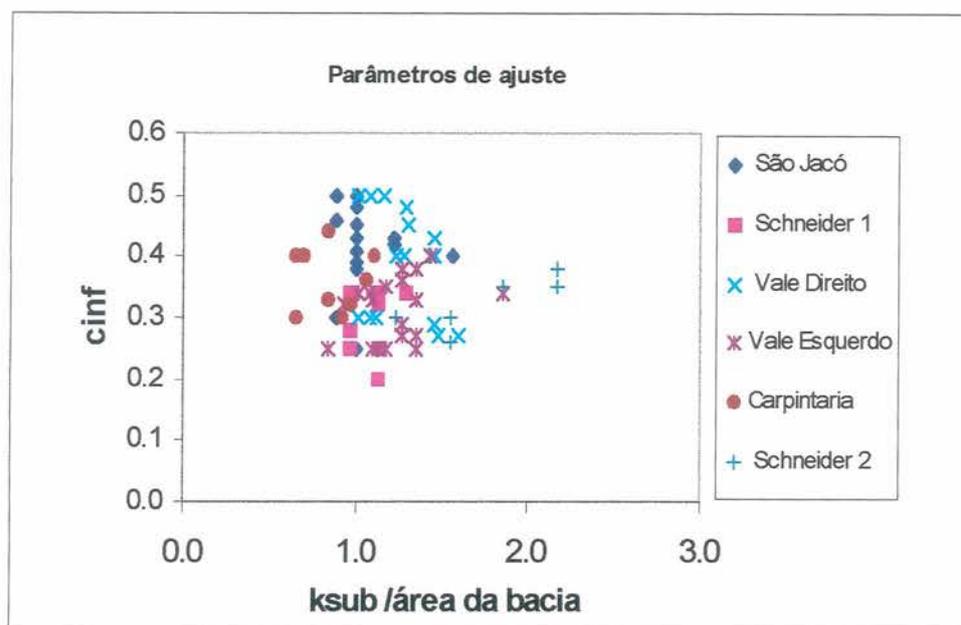


Figura 4.9 – Espectro de variabilidade dos parâmetros

A etapa seguinte consiste então no ajuste de uma distribuição estatística aos valores dos parâmetros amostrais de cada evento. Tendo em vista a aparente simetria dos parâmetros de C_{inf} e K_{sub} em todas as bacias tentou-se o ajuste delas à uma distribuição normal. O resultado mostrou-se mitigado, pois não houve em geral um ajuste muito satisfatório (figura 4.10). Apesar disso, optou-se por considerar distribuições normais para os parâmetros, como ponto de partida para avaliação da incerteza do método, tendo em vista a argumentação teórica do item 4.3 e a possibilidade de que alguma tendenciosidade introduzida pelo ajuste manual tenha afastado os valores dos parâmetros da normalidade.

Um total de 250 pares de valores C_{inf} - K_{sub} foram gerados para cada uma das seis bacias estudadas com base nas suas médias e desvios-padrão amostrais que constam

da tabela 4.1 e 4.2. Este número de amostras geradas por Monte-Carlo foi fixado em função da estabilização da média e do desvio padrão que lhe deram origem.

Em seguida o modelo chuva-vazão foi utilizado para obter os correspondentes 250 valores de cada percentil da curva de permanência. Os percentis efetivamente considerados foram as vazões com permanência de 40 a 95%, de 5 em 5%.

Os intervalos de confiança de 95% de cada percentil foram calculados primeiramente com nas expressões 4.14 e 4.15, com o erro padrão da estimativa centralizado no percentil observado.

Nas figuras 4.11 e 4.12 são apresentadas para cada bacia os intervalos de confiança de 95% obtidos. A grosso modo poderia se dizer que estes intervalos situam-se a $\pm 50\%$ do valor observado nas permanências mais elevadas. Para efeito comparativo são mostrados também as curvas médias das curvas estimadas pelo modelo. Se o intervalo de confiança de 95% é calculado, para cada bacia, no entorno de sua curva de permanência média das 250 (estimadas pelo modelo), conforme equações 4.16 e 4.17, obtém-se as bandas de confiança nas figuras 4.13 e 4.14. Nota-se que as bandas de confiança no entorno da curva média são de magnitude semelhante às anteriores e abrangem com folga as curvas de permanência observadas.

A diferença nas maneiras de calcular os intervalos de confiança é a seguinte: enquanto as figuras 4.11 e 4.12 indicam a incerteza do ponto de vista da curva de permanência observada, as figuras 4.13 e 4.14 avaliam a incerteza a partir da tendência central das 250 curvas simuladas.

Assim, conhecendo-se um evento de estiagem e valores indicativos da banda de confiança de 95% para os dois modos de cálculo abordados é possível interpretar o significado da curva de permanência gerada com a ajuda do modelo:

i) A banda de confiança 95% no entorno da curva de permanência observada significa que há 95% de chance de que a curva de permanência calculada se distancie da curva de permanência observada em no máximo meio intervalo para cima ou para baixo;

ii) A banda de confiança 95% no entorno da curva de permanência média do feixe gerado com o modelo abrangendo a curva de permanência observada, significa que há 95% de chance de que a curva de permanência calculada se

distancie em no máximo meio intervalo para cima ou para baixo da tendência média que o modelo estima para a curva de permanência.

Evidentemente, se uma visão puramente estatística predominar na análise, isto é, se a curva de permanência observada for tomada como uma mera realização do universo possível das curvas de permanência, a interpretação ii) deve ser utilizada. Se, por outro lado, houvesse uma certeza determinística de que a curva de permanência observada equivale a curva de permanência média real da bacia, a interpretação i) seria mais aconselhável. O enfoque estatístico não obriga que a curva de permanência observada seja a tendência central. Entretanto, não há garantia que a média do feixe de curvas de permanência geradas pelo modelo seja a tendência central.

Independente de sua interpretação, os intervalos de confiança das figuras 4.11 a 4.14 são indissociáveis das condições de análise estipuladas: eles correspondem à situação em que o usuário tem acesso a apenas 1 evento de estiagem (ou seja, 3 vazões em depleção) para ajustar o modelo em função do histórico disponível de precipitações e evaporações.

Isto leva a pensar que esta medida da incerteza pode variar, isto é, ela pode diminuir, se mais de um evento de estiagem pode ser obtido por medição direta na bacia.

De fato, uma análise da incerteza do método que está sendo avaliado não estaria completa sem supor situações mais favoráveis de obtenção de dados locais, como é feito no item seguinte.

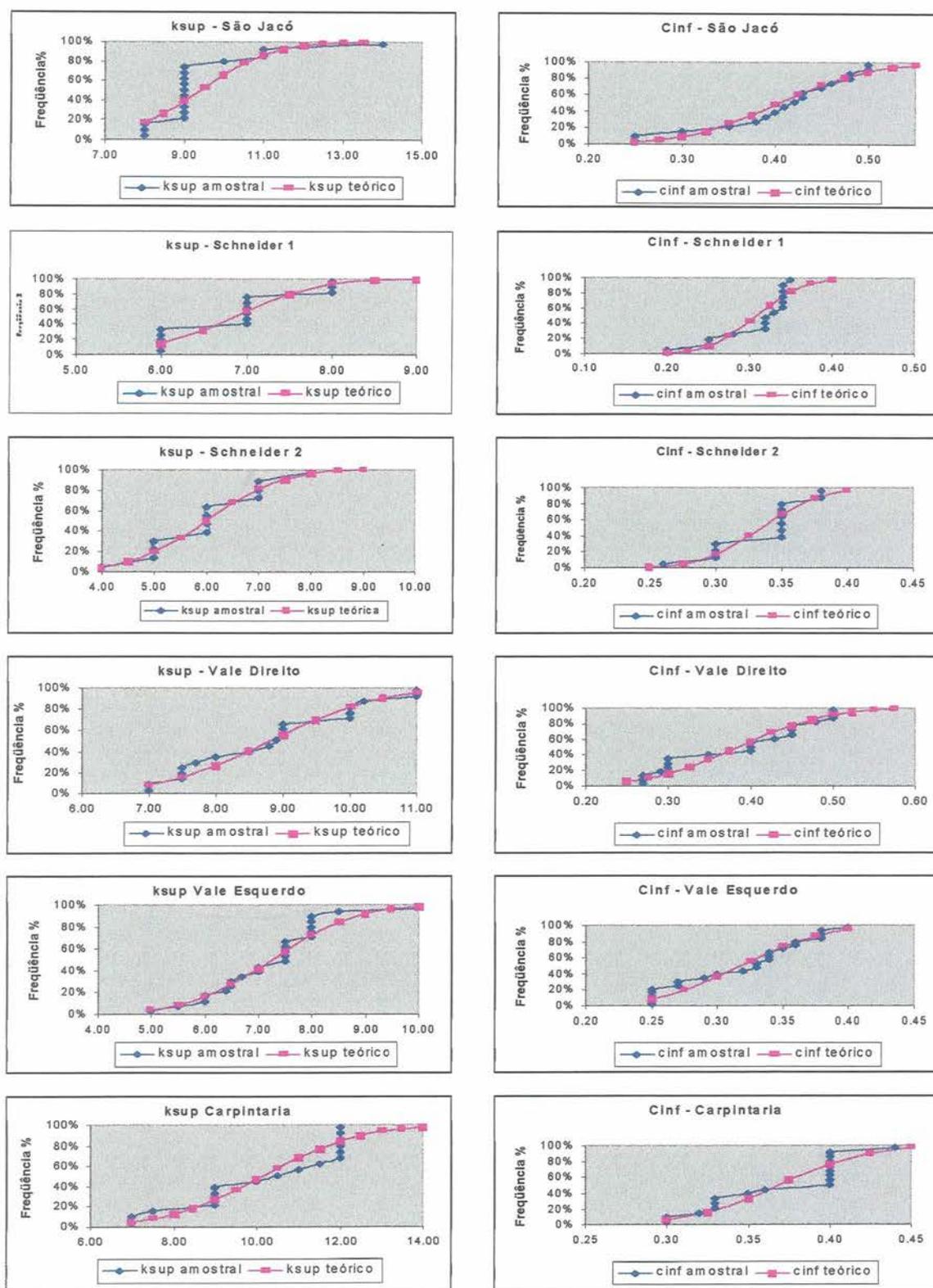


Figura 4.10 – Distribuição de Frequência dos Parâmetros por Bacia

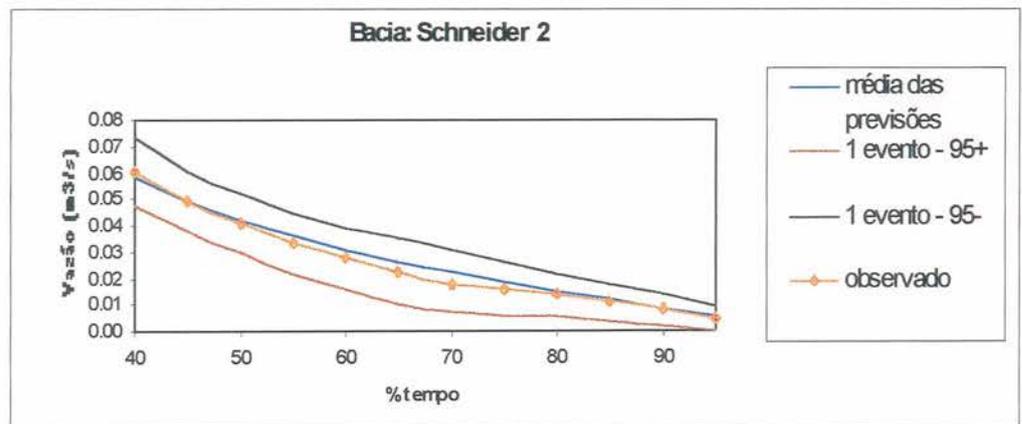
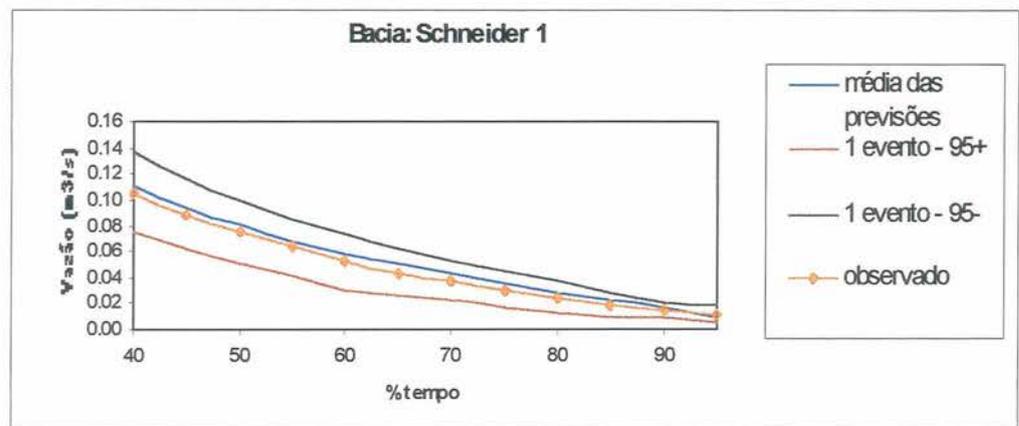
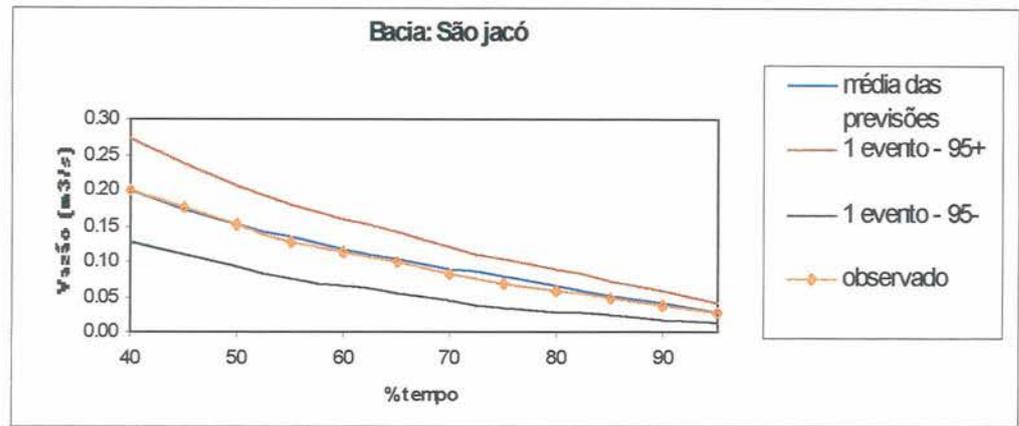


Figura 4.11 – Curvas de permanência e intervalos de confiança de 95% centralizadas na curva média observada
- bacias de São Jacó, Schneider 1 e Schneider 2

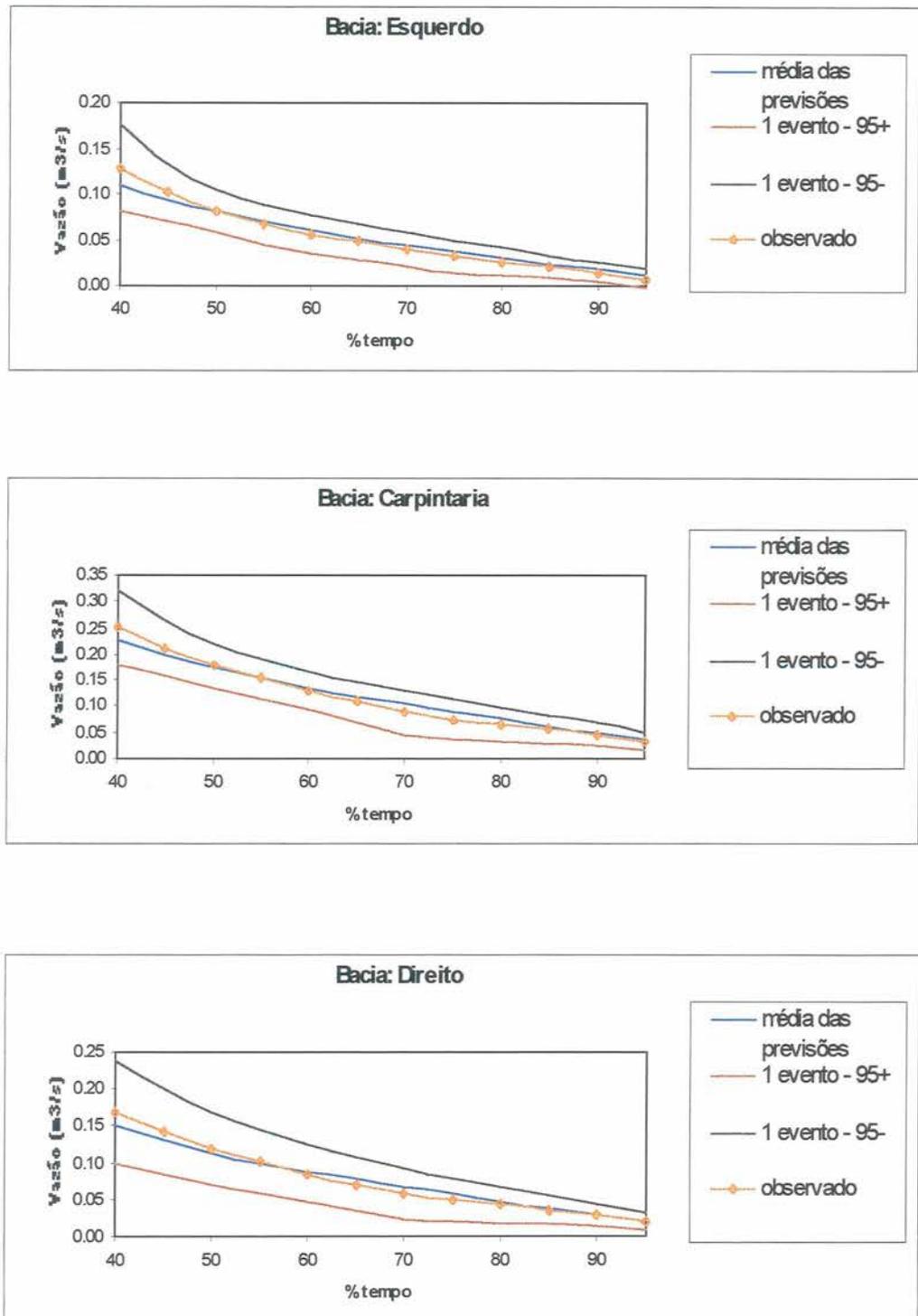


Figura 4.12 – Curvas de permanência e intervalos de confiança de 95% centralizadas na curva média observada - bacias de Esquerdo, Direito e Carpintaria

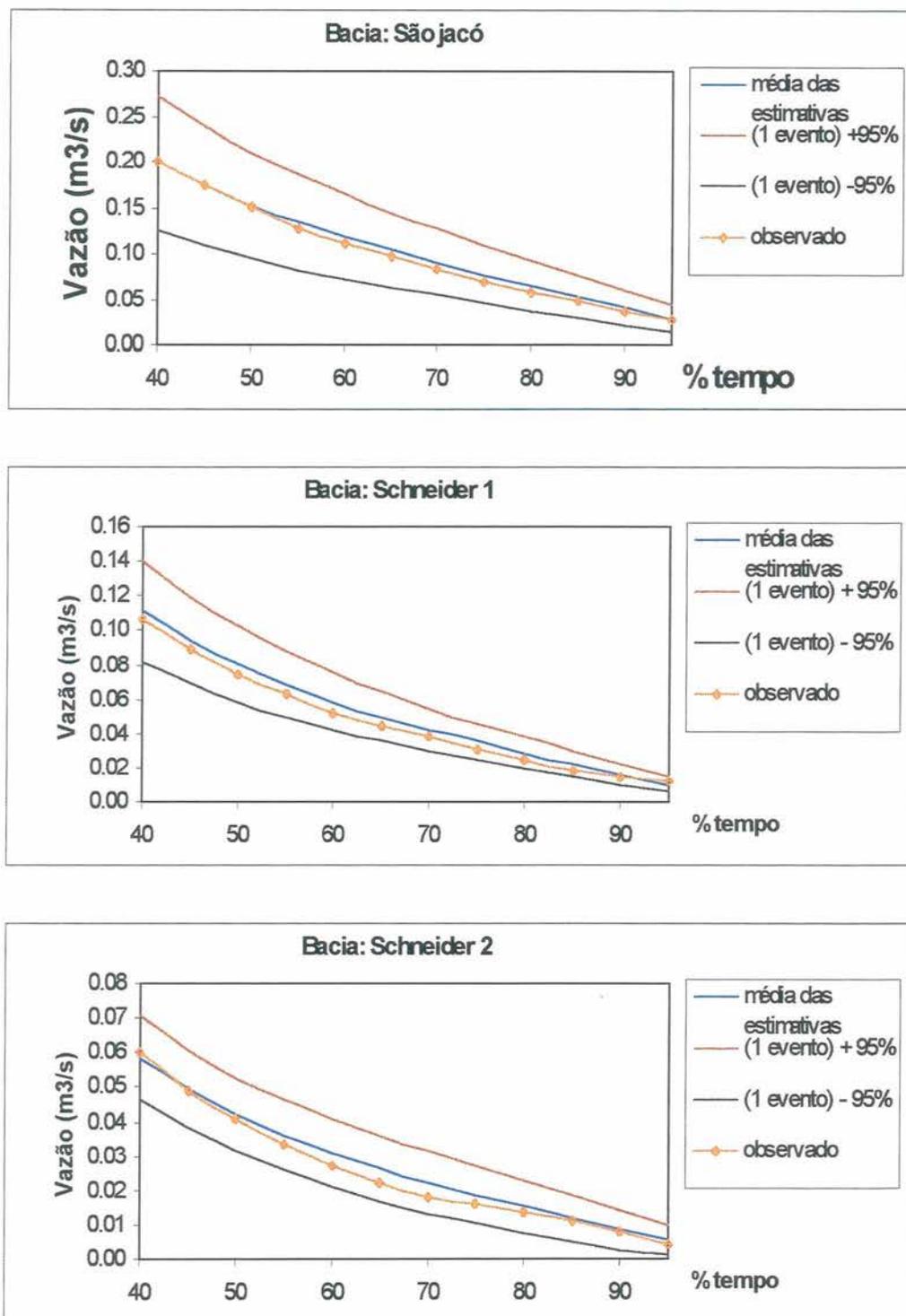


Figura 4.13 – Curvas de permanência e intervalos de confiança de 95% centralizadas na curva média das estimativas
- bacias de São Jacó, Schneider 1 e Schneider 2

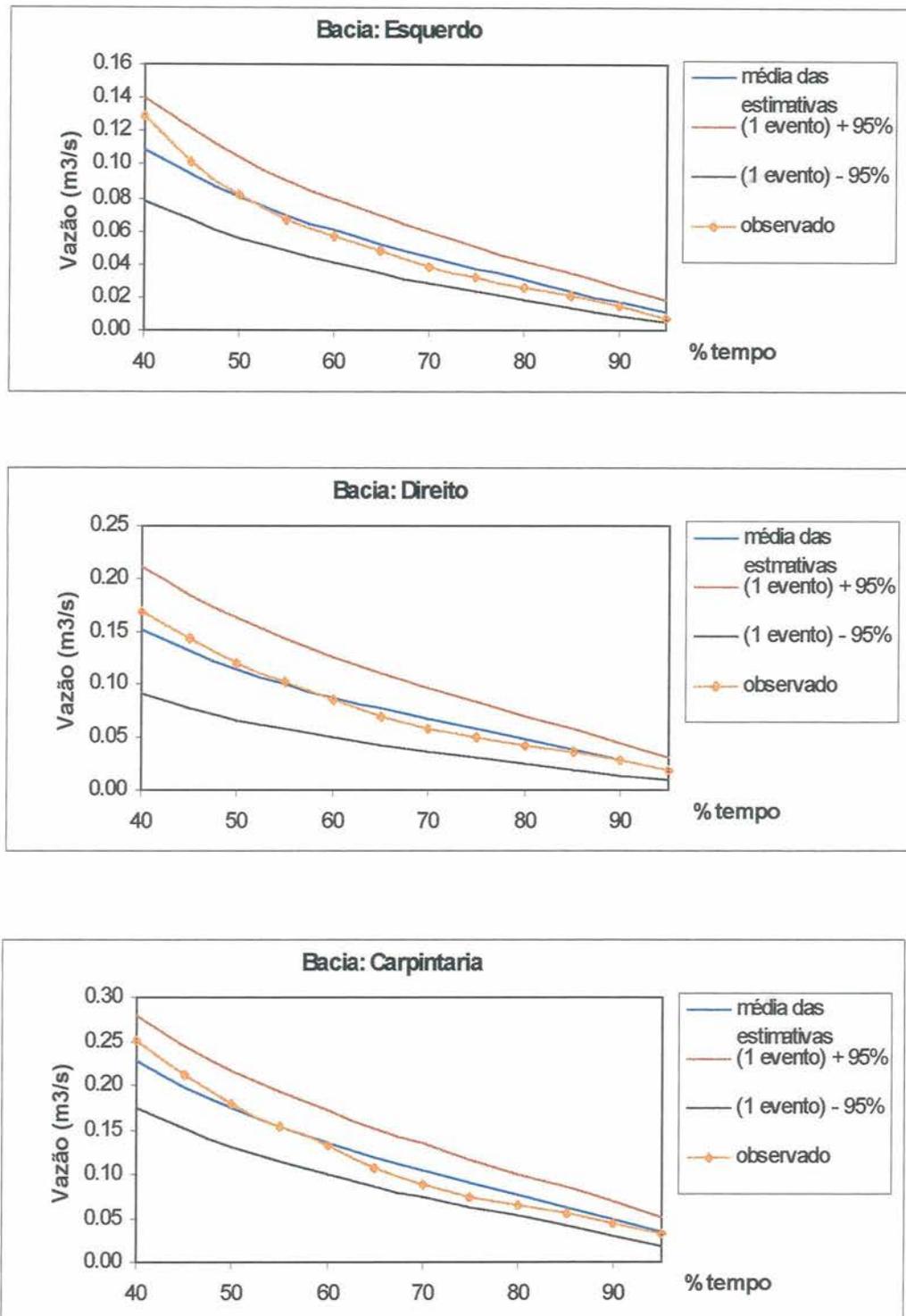


Figura 4.14 – Curvas de permanência e intervalos de confiança de 95% centralizadas na curva média das estimativas - bacias de Esquerdo, Direito e Carpintaria

4.4.4 – Variabilidade da incerteza em função do número de estiagens medidas

Até aqui considerou-se apenas uma estiagem para analisar as estimativas com o método proposto. Para se avaliar o ganho de informação com a consideração de mais de um evento de estiagem, utilizou-se o critério descrito a seguir: define-se como evento de duas estiagens ou duas depleções a consideração de dois eventos de estiagem quaisquer (cada qual definido por três vazões medidas), intercalados por no mínimo uma cheia ou uma elevação de vazões. Generalizando, teríamos evento de 3, 4 até “n” estiagens. Entretanto o ajuste permanece sendo individual, por estiagem. Assim os parâmetros do evento múltiplo de estiagem é a média aritmética dos valores obtidos individualmente para cada estiagem.

O conhecimento de um evento múltiplo de estiagens, significa ter-se, na realidade, vários conjuntos esporádicos de vazões avaliadas em campo, sem que isso constitua um verdadeiro conhecimento do fluviograma, espelho da produção hídrica da bacia.

Para se verificar a diminuição da incerteza com um certo evento de n estiagens, a medida que n aumenta, foram geradas por Monte Carlo conjuntos adicionais de pares de parâmetros $C_{inf}-K_{sub}$. Considerou-se as situações com $n=2$, $n=3$ e $n=10$, para cada bacia. Para $n=2$ foram gerados 500 pares de $C_{inf}-K_{sub}$, tomando-se a média de cada 2 gerações. Para $n=3$, foram gerados 750 $C_{inf}-K_{sub}$ e calculadas as médias para cada trinca de gerações. E finalmente, para $n=10$, foram gerados 2500 $C_{inf}-K_{sub}$, com média a cada 10. Assim, a exemplo do item 4.4.3, trabalhou-se com 250 pares de $C_{inf}-K_{sub}$ para cada n e para cada bacia.

Contando as simulações do item 4.4.3, o modelo chuva-vazão (item 4.2) foi rodado 6000 vezes (6 bacias, 4 conjuntos de estiagens, 250 jogos de parâmetros) para traçar um panorama das incertezas envolvidas na aplicação do método hora em análise.

Foram consideradas também as duas maneiras de calcular o intervalo de confiança de 95%, conforme apresentado no item 4.3.

As figuras 4.15 e 4.16 apresentam os intervalos de confiança 95% centralizados nas curvas de permanência observadas para as 6 bacias estudadas. Em geral, como era esperado, nota-se uma diminuição da banda de confiança, isto é, uma diminuição da incerteza, a medida que se disponha do conhecimento de mais eventos de estiagens.

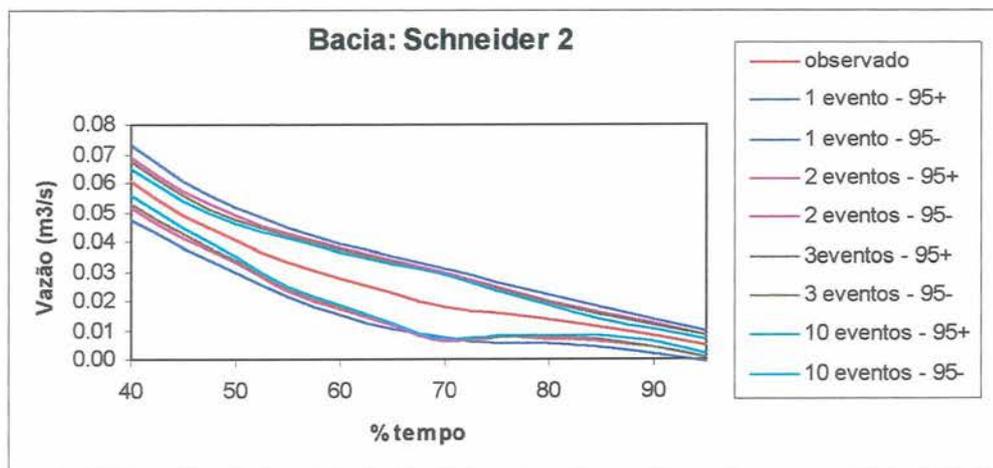
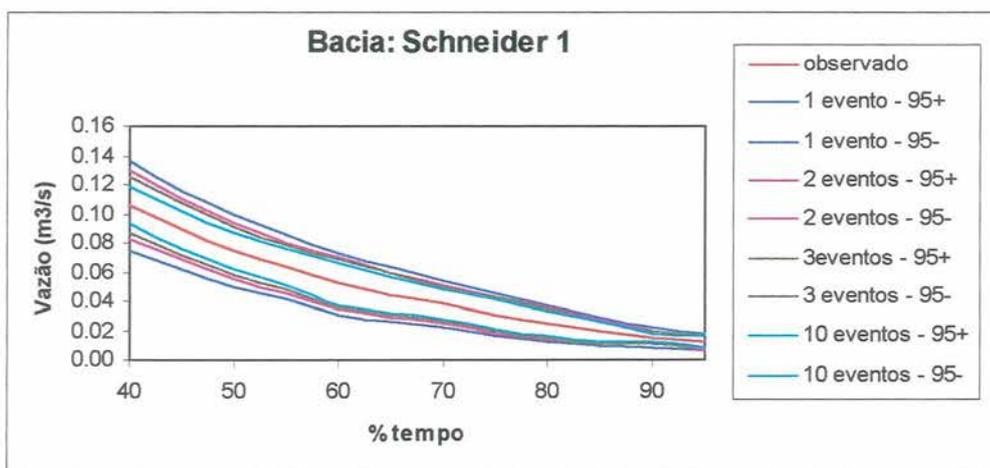
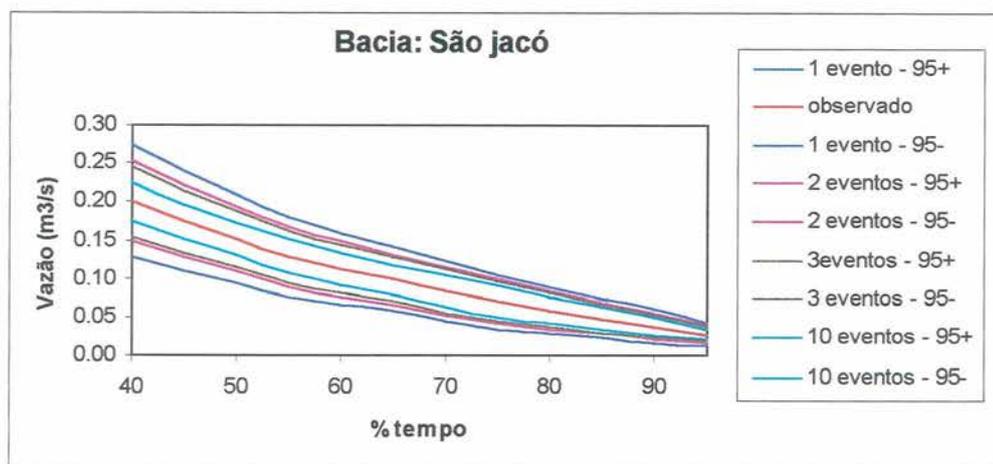


Figura 4.15 – Intervalos de confiança 95% centralizados na curva de permanência observada (1993-94-95) considerando o conhecimento de 1, 2, 3 e 10 eventos em São Jacó, Schneider 1 e Schneider 2

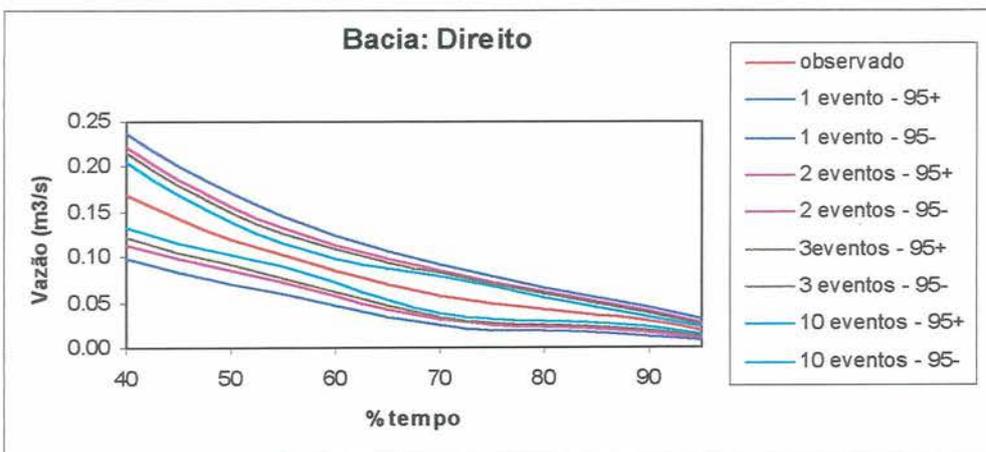
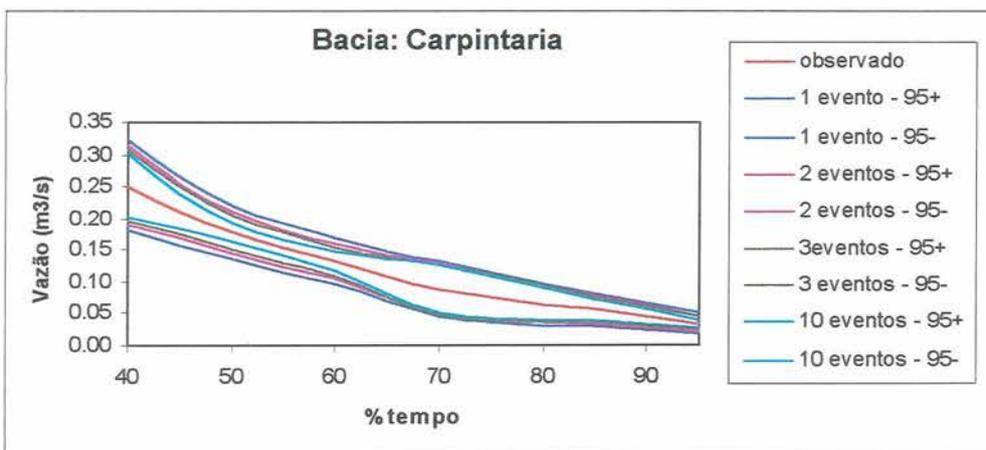
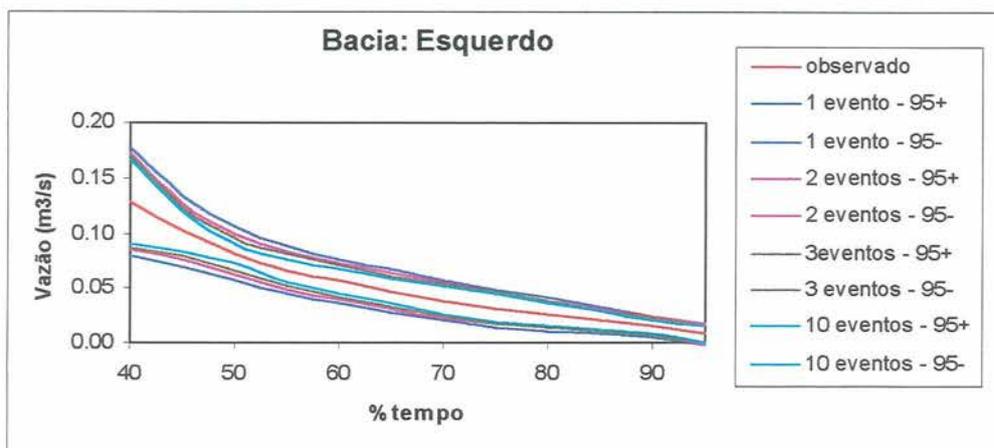


Figura 4.16 – Intervalos de confiança 95% centralizados na curva de permanência observada (1993-94-95) considerando o conhecimento de 1, 2, 3 e 10 eventos em Vale Direito, Vale Esquerdo e Carpintaria

Entretanto, nota-se nas figuras 4.15 e 4.16 um comportamento peculiar dos intervalos de confiança centralizados na curva observada, sobretudo nas bacias Schneider1, Schneider2 e Carpintaria: para permanências no entorno de 70% se nota um aumento nos intervalos de confiança. A explicação para isso pode ser buscada nas figuras 4.11 e 4.12, relativas a $n=1$. Quando a média das previsões, isto é, a média das 250 curvas de permanência geradas pelo modelo, se afasta da curva de permanência observada, isto indica que há uma maior excentricidade das curvas geradas em relação a esta última, o que acaba inflacionando os erros padrão e conseqüentemente as bandas de confiança. A questão que se coloca é saber qual das duas, a curva de permanência observada ou a média das previsões do modelo constitui a tendência central para a curva de permanência. Esta é uma questão difícil de responder, mesmo que se possa suspeitar da competência do modelo em reproduzir esta faixa de vazões.

Quando o intervalo de confiança é centrado na média das previsões, esta anomalia desaparece (figuras 4.17 e 4.18). Isto acontece evidentemente devido à hipótese básica de normalidade dos parâmetros do modelo. Mesmo que esta hipótese não tenha sido efetivamente comprovada é mais conveniente analisar a incerteza pelas figuras 4.15 e 4.16 porque estas últimas contrariam as expectativas naturais em alguns casos: nas situações acima referidas dos postos Schneider1, Schneider2 e Carpintaria nas permanências no entorno dos 70% é pouco notável a melhora da incerteza (diminuição da banda de confiança) quando n varia de 1 a 10 eventos.

Portanto, passa-se a enfocar a curva de permanência observada como uma das realizações possíveis desta curva. Estando ela no interior da banda de confiança oferecida pelo modelo, constitui-se uma espécie de indicador de bom desempenho deste (figuras 4.13 e 4.14).

A análise da incerteza associada às bandas de confiança 95% das figuras 4.17 e 4.18 fica mais clara através dos gráficos dos erros-padrão (equação 4.17) apresentadas nas figuras 4.19 e 4.20. É nítida a redução da incerteza a medida que n aumenta para todas as permanências. A grosso modo a incerteza diminui quase 30% ao se passar de $n=1$ para $n=2$, e 60% de $n=1$ para $n=10$.

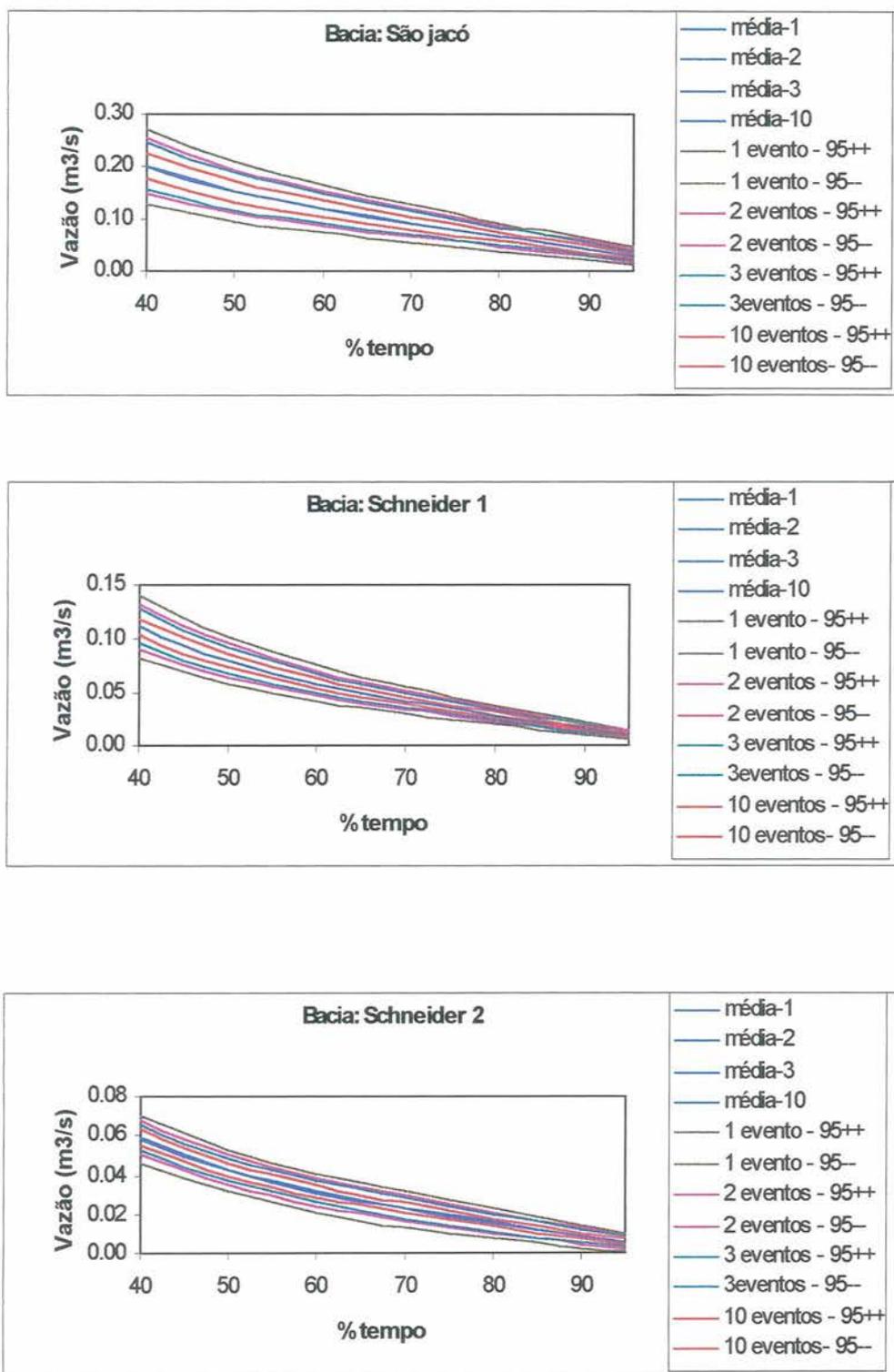


Figura 4.17 – Intervalos de confiança 95% centralizados na curva média das estimativas por Monte Carlo (1993-94-95) considerando o conhecimento de 1, 2, 3 e 10 eventos em São Jacó, Schneider 1 e Schneider 2

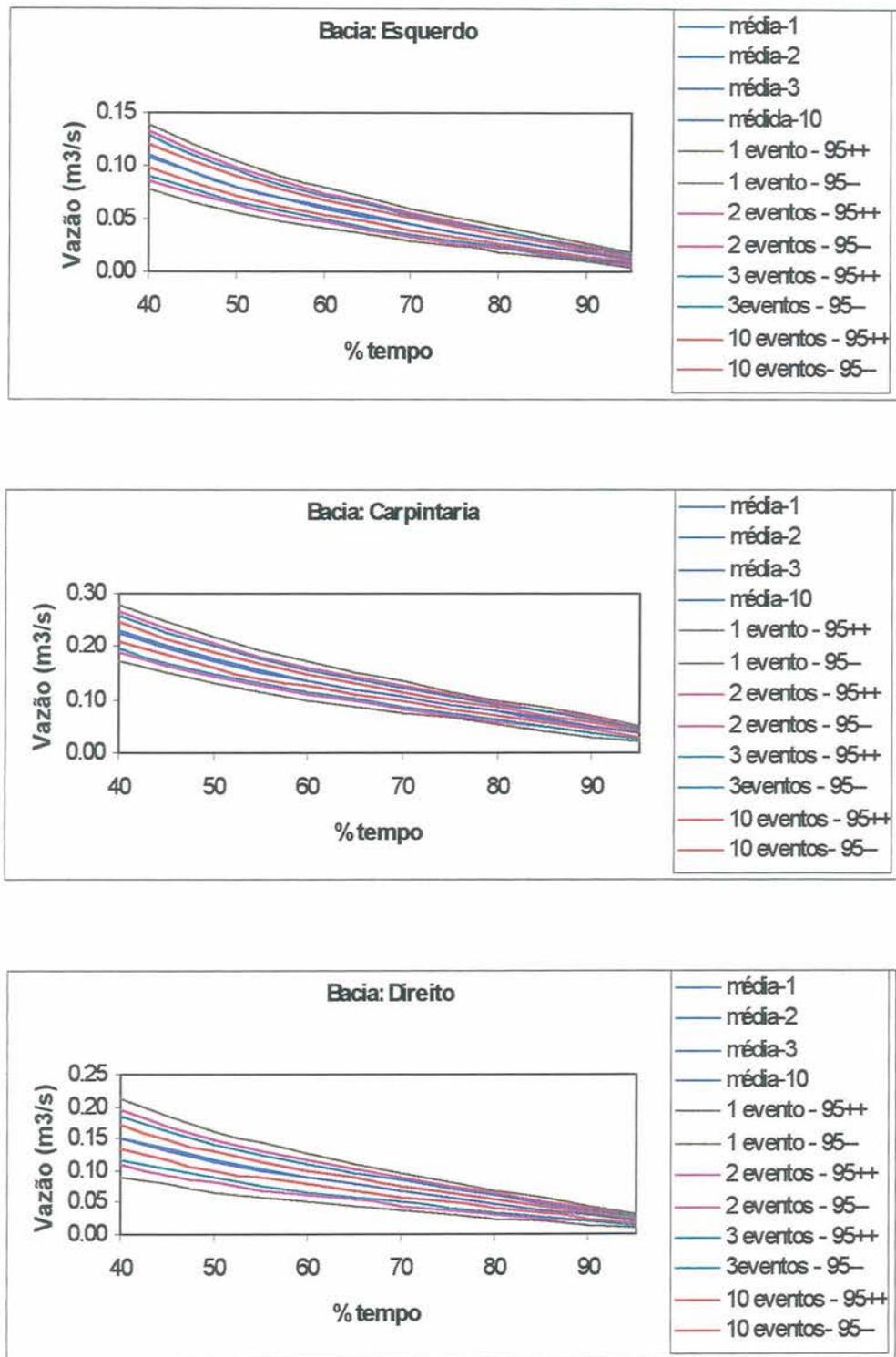


Figura 4.18 – Intervalos de confiança 95% centralizados na curva média das estimativas por Monte Carlo (1993-94-95) considerando o conhecimento de 1, 2, 3 e 10 eventos em Vale Direito, Vale Esquerdo e Carpintaria

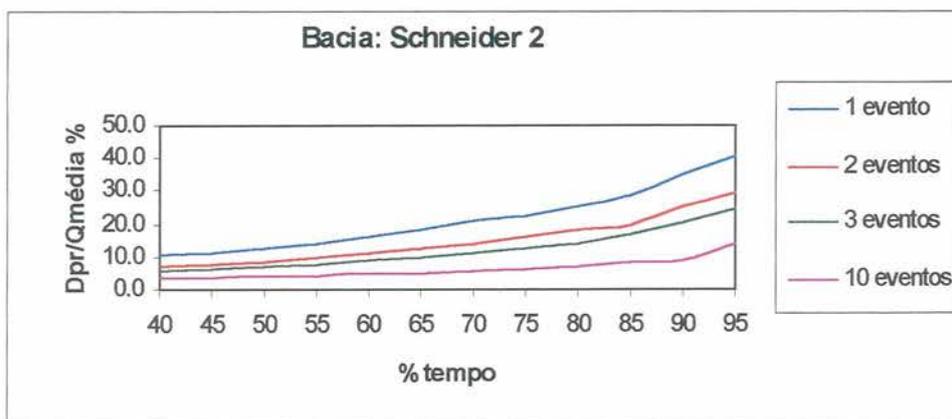
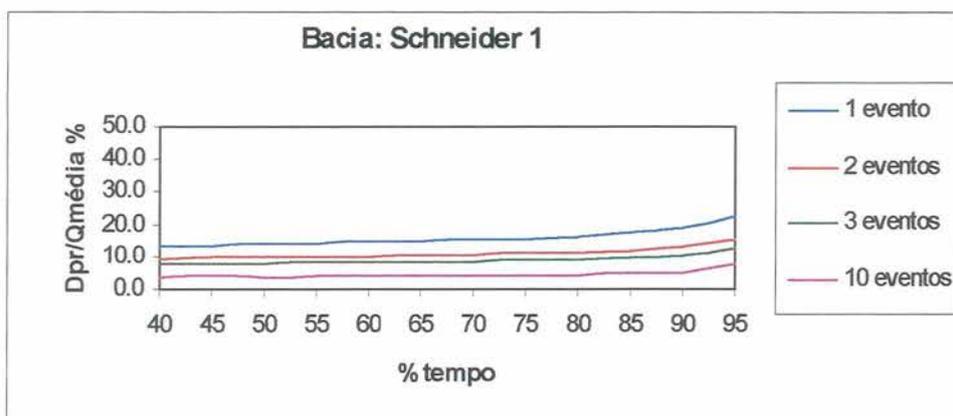
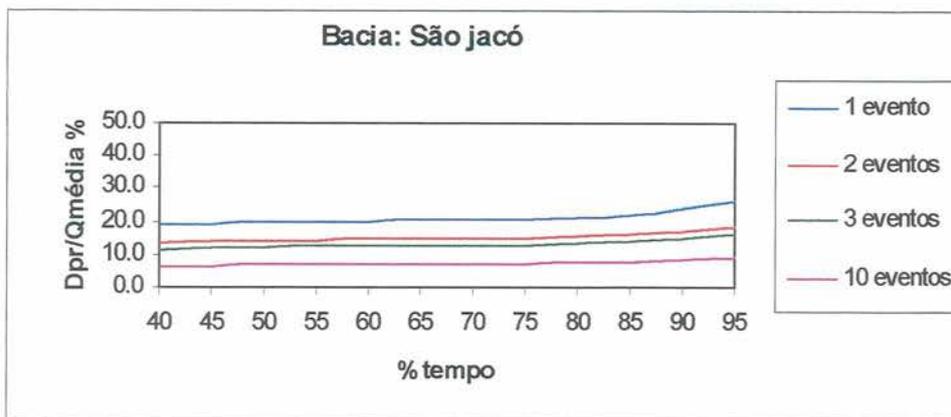


Figura 4.19 - Erro Padrão da Estimativa em função da curva de permanência média das estimativas por Monte Carlo em São Jacó, Schneider 1 e Schneider 2

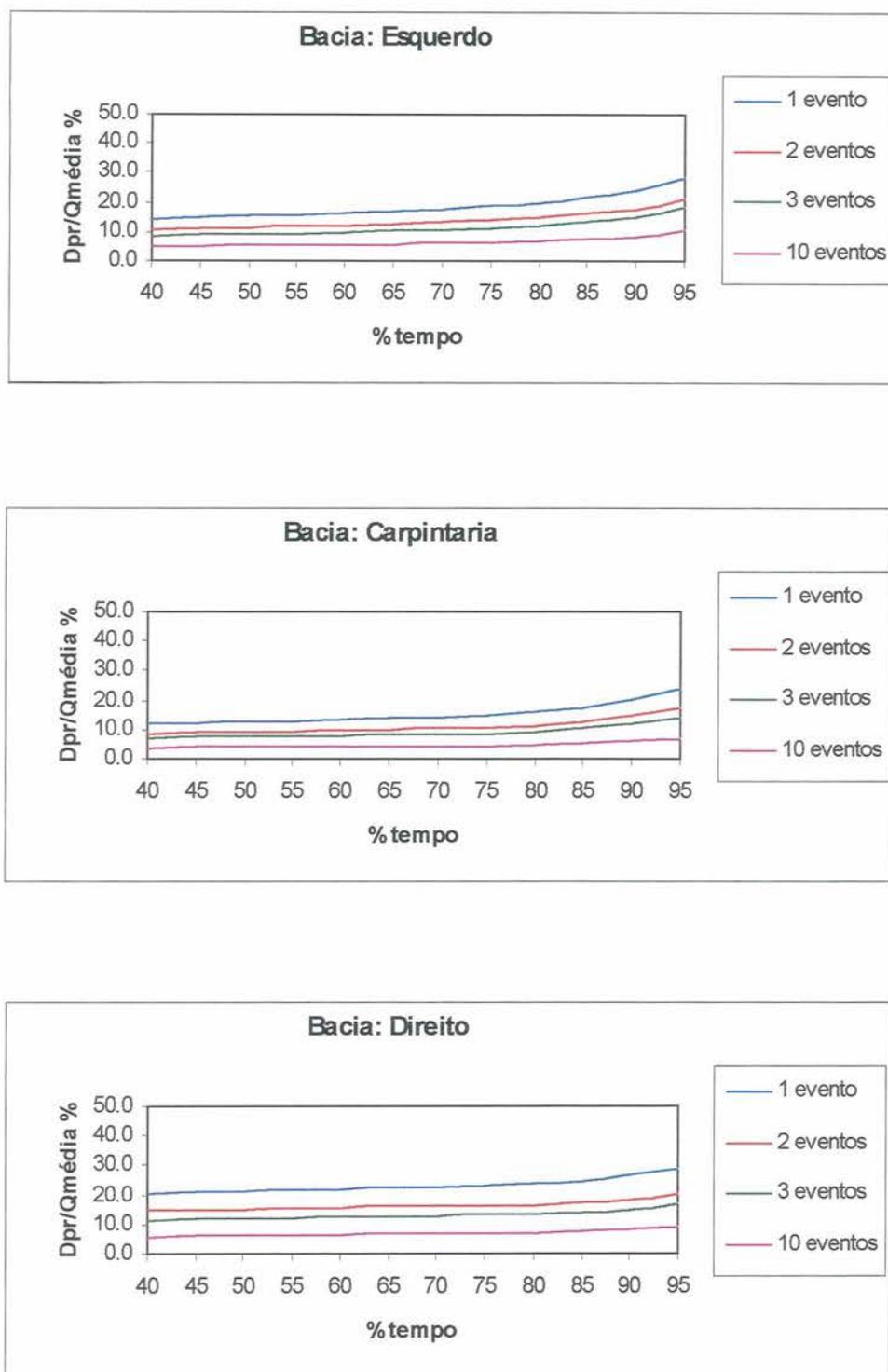


Figura 4.20 - Erro Padrão da Estimativa em função da curva de permanência média das estimativas por Monte Carlo em Vale Direito, Vale Esquerdo e Carpintaria

Em termos absolutos o erro padrão das estimativas representa em média de 15% a 30% dos valores esperados para $n=1$, segundo os dados consubstanciados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Erro padrão das estimativas em percentuais do valor médio esperado

BACIA (calha)	A (km ²)	Nº de depleções por evento	Epr/ Q _{med} 50%	Epr/ Q _{med} 60%	Epr/ Q _{med} 70%	Epr/ Q _{med} 80%	Epr/ Q _{med} 90%	Epr/ Q _{med} 95%
SÃO JACÓ	8,98	1	19.40	19.88	20.26	21.17	24.10	26.04
		2	13.95	14.49	14.77	15.22	17.22	18.62
		3	12.12	12.46	12.79	13.07	14.80	16.21
		10	6.73	6.98	7.21	7.42	8.61	8.97
SCHNEIDER II	3,23	1	12.77	16.45	20.89	25.49	35.29	41.07
		2	8.64	11.11	14.41	18.06	25.58	29.82
		3	6.74	8.83	11.26	14.01	20.69	25.00
		10	3.94	4.70	5.58	6.92	9.09	14.29
SCHNEIDER I	6,13	1	14.07	14.48	15.33	16.32	19.25	22.55
		2	9.95	10.20	10.80	11.42	13.04	15.69
		3	7.83	8.15	8.69	9.34	10.56	12.75
		10	3.86	4.08	4.22	4.50	5.00	7.77
CARPINTARIA	10,78	1	12.59	13.35	14.31	15.99	20.68	23.71
		2	9.23	9.77	10.32	11.59	14.94	17.28
		3	7.68	8.07	8.51	9.48	12.30	13.84
		10	4.00	4.17	4.41	4.78	6.32	7.02
V. DIREITO	6,88	1	21.38	22.16	22.84	23.69	26.69	28.71
		2	15.11	15.61	16.02	16.46	18.52	20.20
		3	12.05	12.54	12.89	13.31	15.10	16.75
		10	4.11	6.64	6.94	7.25	8.36	9.31
V. ESQUERDO	5,92	1	15.28	16.25	17.75	19.81	24.29	28.45
		2	11.39	12.05	13.17	14.52	17.88	21.37
		3	9.27	9.88	10.69	11.90	15.08	18.10
		10	5.30	5.58	6.22	7.05	8.33	10.26
MÉDIAS		1	15.91	14.69	18.56	20.41	25.05	28.42
		2	12.02	12.20	13.24	14.54	17.86	20.04
		3	11.92	9.98	10.80	11.85	14.75	17.10
		10	4.65	5.35	5.76	6.32	7.61	9.60

A consideração de mais de uma estiagem para aplicação do método proposto proporcionou uma melhora dos resultados, mas isto pode estar relacionado com o fato de que a consideração de apenas um evento de estiagem pode coincidir com uma eventual falta de representatividade da precipitação regional pois normalmente não se dispõe de posto ou informações pluviométricas na localização específica da pequena bacia. Esta falta de representatividade das chuvas pode provocar ajustes do modelo de

balanço hídrico que induzam à afirmação de parâmetros muito exagerados na associação com os macro-processos envolvidos segundo a definição do modelo, podendo levar o analista a solicitar a agregação de novos eventos de estiagem para a verificação dos resultados (parâmetros) encontrados. Em segundo lugar, para reforçar a idéia de se dispor preferencialmente de dois eventos para a aplicação do método, pode-se afirmar que o ajuste de mais estiagens ($n > 1$) evita que alguma tendenciosidade, que tenha passado despercebida do usuário, afete significativamente uma avaliação realista da disponibilidade hídrica.

Neste sentido pode ser recomendável a instalação de um pluviômetro simplificado em lugar conveniente junto aos domínios da pequena bacia e a residência de um morador local. Desta forma poder-se-ia desenvolver uma avaliação mais parcimoniosa dos parâmetros do modelo diminuindo os riscos de uma falta de representatividade da precipitação regional para o caso especial daquela estiagem avaliada. No passo seguinte para a geração da série histórica de vazões para a pequena bacia poder-se-ia utilizar a precipitação regional, do longo período disponível de dados, lançando-se mão dos parâmetros avaliados em função da chuva local. Esta alternativa caracteriza, por conseguinte, uma **recomendação** à continuidade das pesquisas no sentido de se verificar o provável impacto positivo nos resultados da avaliação.

4.5 Comparação das séries geradas e a regionalização

Inicialmente, deve-se considerar que não existe um estudo de regionalização da curva de permanência para pequenas bacias do Rio Grande do Sul. O estudo disponível abrange médias e grandes bacias e não deve ser aplicado em pequenas bacias, conforme recomendação da própria publicação (Tucci,1991). Entretanto, na ausência de metodologia concorrente, muitas vezes, o método é aplicado indevidamente. Pretende-se, neste item, comparar os resultados de uma aplicação como esta com os obtidos neste trabalho.

A comparação das curvas de permanência do estudo regional com as curvas obtidas com o monitoramento das calhas produziria a princípio uma análise tendenciosa, visto que as curvas regionais foram elaboradas a partir de séries mais extensas (20 anos em média), e as curvas observadas foram construídas com os dados de vazão de uma série curta (1993-1995).

Para analisar esta possível tendenciosidade foram comparadas as curvas de permanência geradas com dados de precipitação de um período mais longo (1975-1995) e as geradas com as precipitações do curto período acima referido. O capítulo 3 já apresentou uma análise sobre as precipitações desses dois períodos. O período curto, período de monitoramento das calhas, apresenta precipitações em torno de 7% mais elevadas (item 3.2.2).

O modelo chuva-vazão foi aplicado para avaliar a repercussão na curva de permanência desses 7% a mais. Para cada bacia, para ambos os períodos considerou-se, evidentemente, um mesmo jogo de parâmetros, K_{sub} e C_{inf} .

O jogo de parâmetros considerado para cada bacia (cada jogo simulando ambos períodos) correspondeu aos parâmetros médios de todos os ajustes do modelo aos eventos individuais (tabelas 4.1 e 4.2). Nas figuras 4.21 e 4.22 estão presentes, para as seis bacias experimentais, as curvas de permanência calculadas e a curva observada. Observa-se que os 7% a mais da precipitação do curto período produziu uma elevação dos escoamentos, avaliada em média em 5% para as seis bacias. Esta diferença pode ser considerada pequena, significando na prática, que é possível realizar a comparação direta da curva de permanência gerada pelos estudos regionais com a curva de permanência observada nas calhas. Por outro lado, a curva de permanência gerada pelo modelo com chuvas de 1975 a 1995 tem boa aderência à curva de permanência do período de monitoramento (1993 a 1995), o que reforça mais a possibilidade dessa comparação.

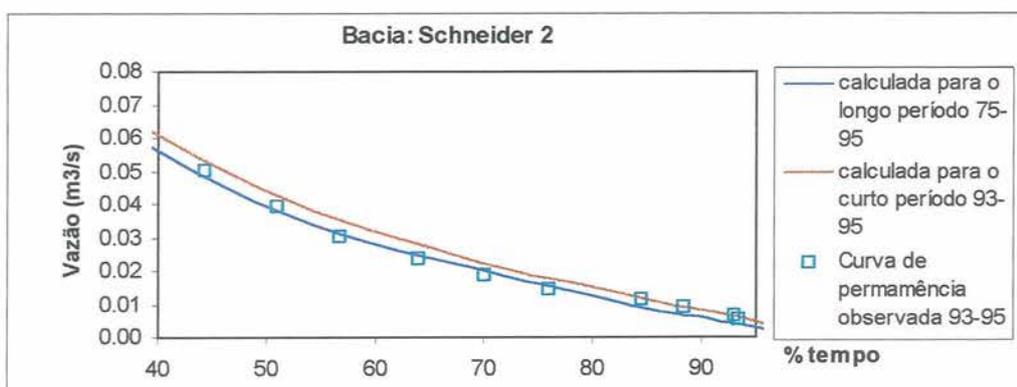
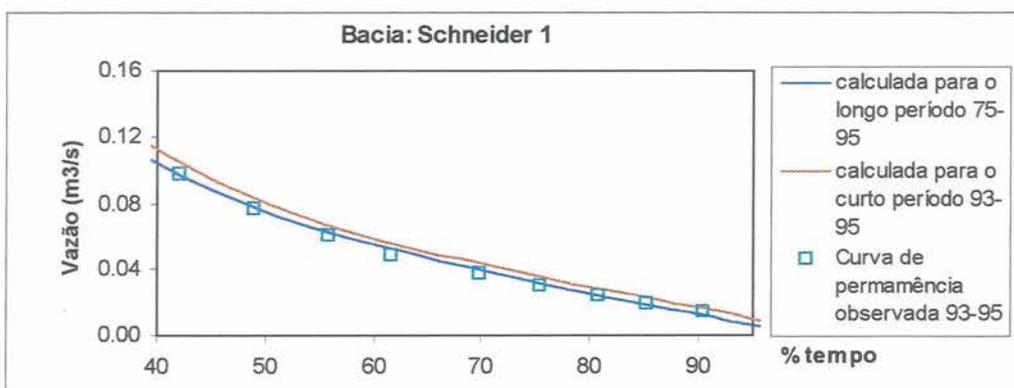
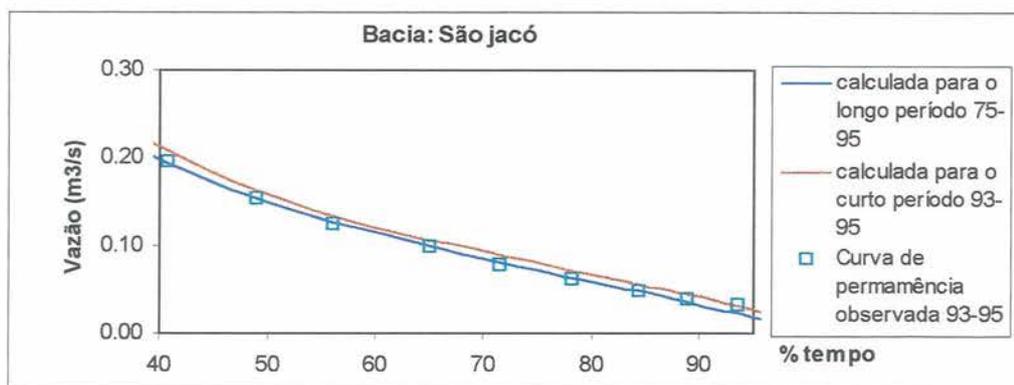


Figura 4.21 – Curvas de permanência sintetizadas pelo modelo para o longo e o curto período de precipitação considerado, com o mesmo jogo de parâmetros C_{inf} e K_{sub} – Bacias de São Jacó, Schneider1, Schneider2.

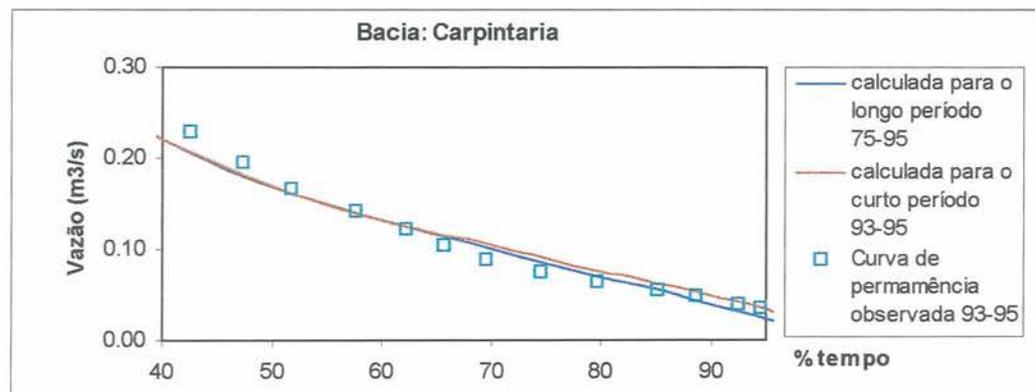
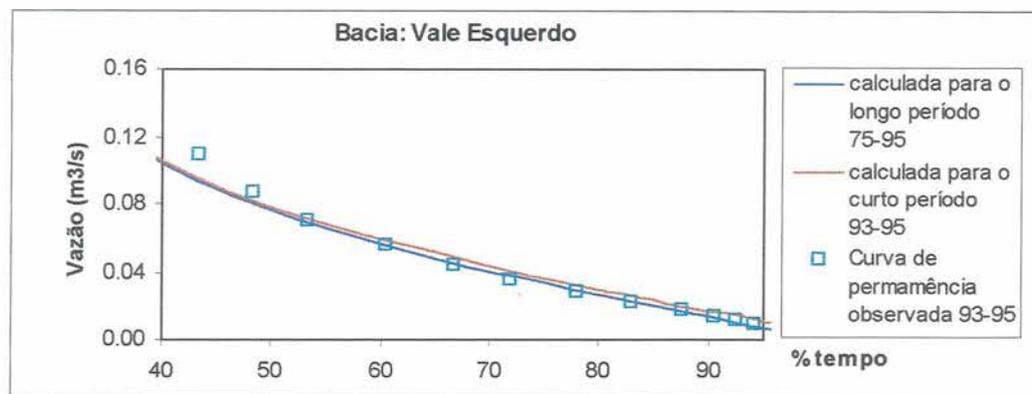
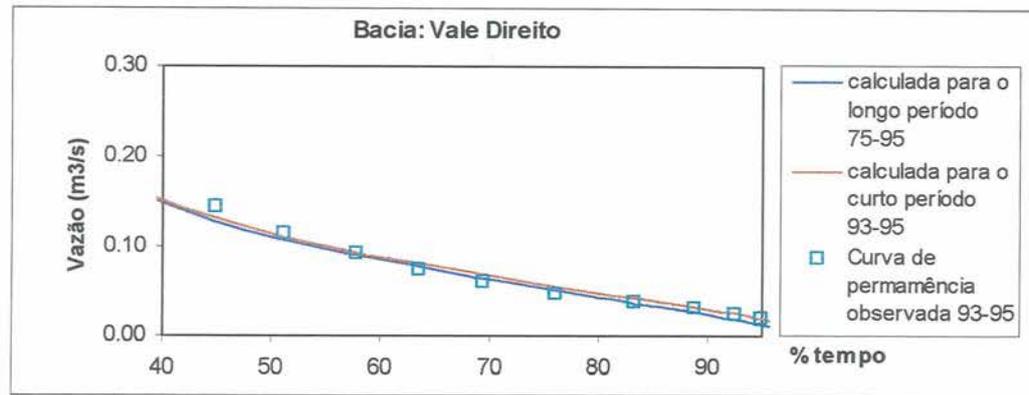


Figura 4.22 – Curvas de permanência sintetizadas pelo modelo para o longo e o curto período de precipitação considerado, com o mesmo jogo de parâmetros C_{inf} e K_{sub} – Bacias de Direito, Esquerdo e Carpintaria.

Assim, para avaliar a estimativa de regionalização em relação à do método basta observar a figura 4.23 onde graficou-se as curvas de permanência de vazões específicas das seis bacias experimentais contra as curvas obtidas do estudo de regionalização de Tucci(1991) para a mesma região do Estado. As curvas de regionalização foram obtidas individualmente para cada bacia entrando-se com a informação fisiografica da área de drenagem. As correspondentes curvas de permanência específicas foram determinadas dividindo-se as vazões das curvas de permanência normais pelas respectivas áreas de drenagem. Utilizou-se para isso o software REHI (REgionalização HIDrológica) que automatiza os cálculos do estudo de regionalização.

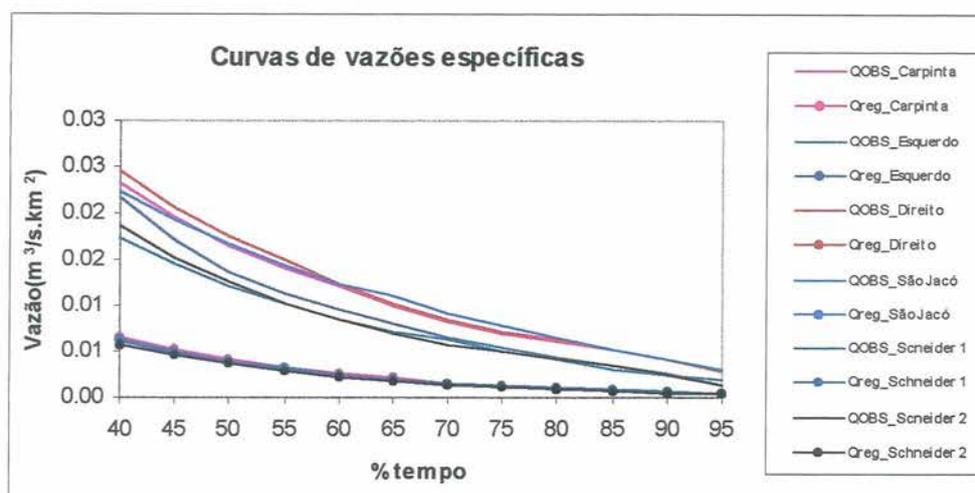


Figura 4.23: Vazões Específicas Observadas nas Bacias de Sapiranga e Dois Irmãos

Na figura 4.24 são plotadas as diferenças das estimativas de vazão para as bacias experimentais. Estes resultados mostram a diferença bruta dos resultados entre as estimativas por regionalização e as vazões monitoradas. A diferença média porcentual para todas as bacias, foi avaliada em pouco menos de 80% no trecho inferior da curva de permanência. Isto é, houve uma subestimação das vazões dessa ordem pela regionalização. Este resultado poderia indicar uma evidente inaplicabilidade do estudo regional disponível. Entretanto é preciso verificar se a curva de regionalização obtida com dados de bacias médias e grandes, pode se comportar como uma realização estatística possível da estimativa do método proposto, visto as suas incertezas. Nas figuras 4.25 e 4.26 apresenta-se, para visualização, as bandas de confiança de 95% para as estimativas do método proposto e a curva regional para cada bacia. Via de regra,

constata-se que a estimativa da regionalização cai fora dessas bandas de confiança, o que, na prática, é um indicativo consistente de que a extrapolação forçada para pequenas bacias do estudo regional não produz bom resultados. Entretanto as equações de regressão para a região do Estado das bacias experimentais são precárias (Tucci, 1991), o que coloca mais incerteza nesta comparação.

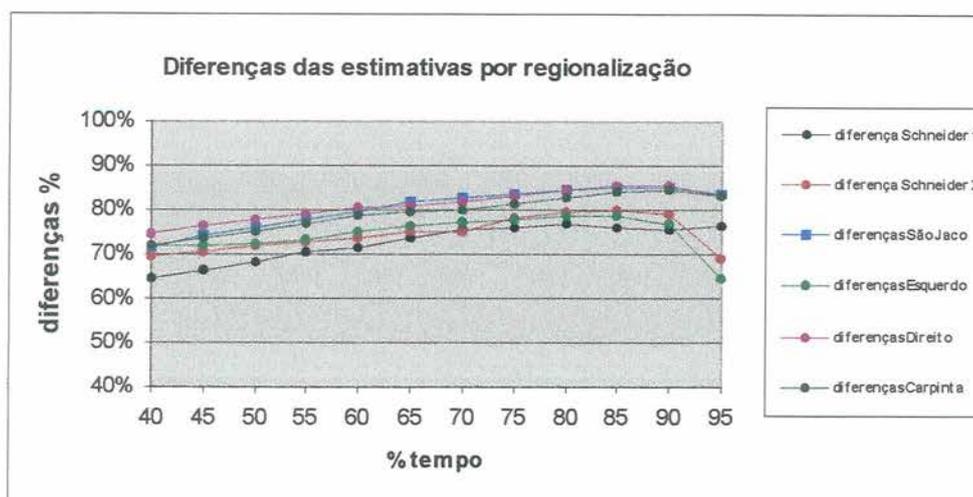


Figura 4.24 – Diferenças das estimativa por regionalização

Para outras regiões do Rio Grande do Sul nada pode ser afirmado. As comparações realizadas (figuras 4.23 e 4.24) não autorizam a dizer que o mesmo se reproduziria em outras regiões do Estado. Pode haver casos em que a extrapolação da regionalização estime curvas de permanência em pequenas bacias mais próximas de realidade, assim como o contrário pode se verificar. Só se poderá chegar a alguma conclusão mais firme quando houver dados de vazão suficientes para pequenas bacias em todo o Estado. A título ilustrativo, entretanto, pode-se fazer uma projeção de retorno econômico, no projeto de PCHs, considerando que as estimativas encontradas pudessem ser extrapoladas para todo o Estado. Em função de uma avaliação de potencial hidrelétrico remanescente em 6000 MW (Rio Grande do Sul, 1986) para pequenas e micro-centrais, considerando-se um aproveitamento de 50% da potência e uma tarifa média de energia de R\$40, uma subestimação sistemática das vazões em 75% pode deixar sem aproveitamento uma riqueza anual da ordem de 800 milhões de reais ($6000\text{MW} \times 8760 \text{ h} \times 50\% \times 40 \text{ R\$/MW} \times 0,75$).

A incerteza que cerca a aplicação do estudo de regionalização disponível (Tucci, 1991), de forma extrapolada, para pequenas bacias, não deve ser entendida como uma deficiência da técnica da regionalização. Provavelmente, no caso de existência de dados suficientes de pequenas bacias, a regionalização e o método proposto neste estudo seriam métodos concorrentes de estimativa da curva de permanência.

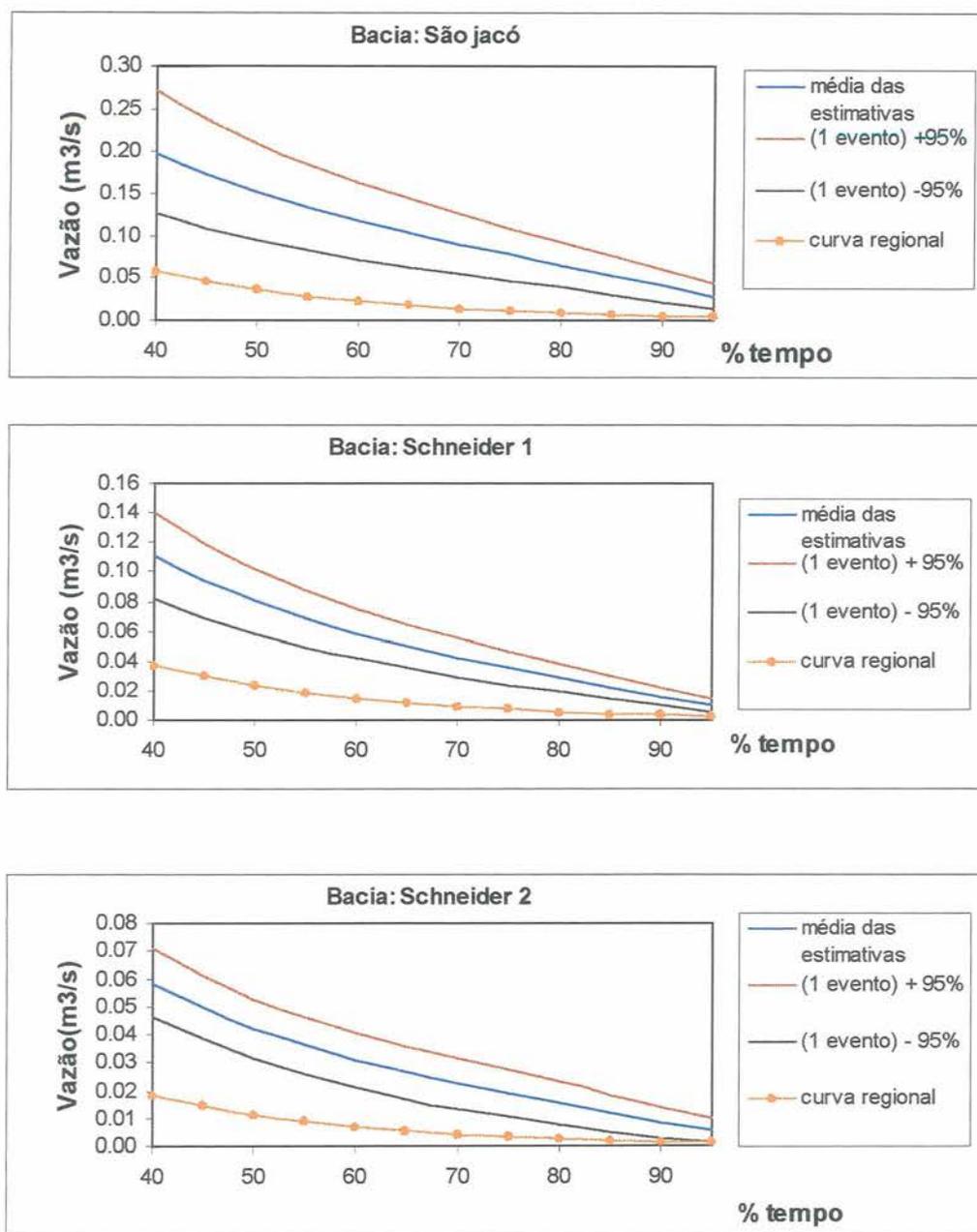


Figura 4.25 – Limites de confiança do método proposto e a estimativa da regionalização.

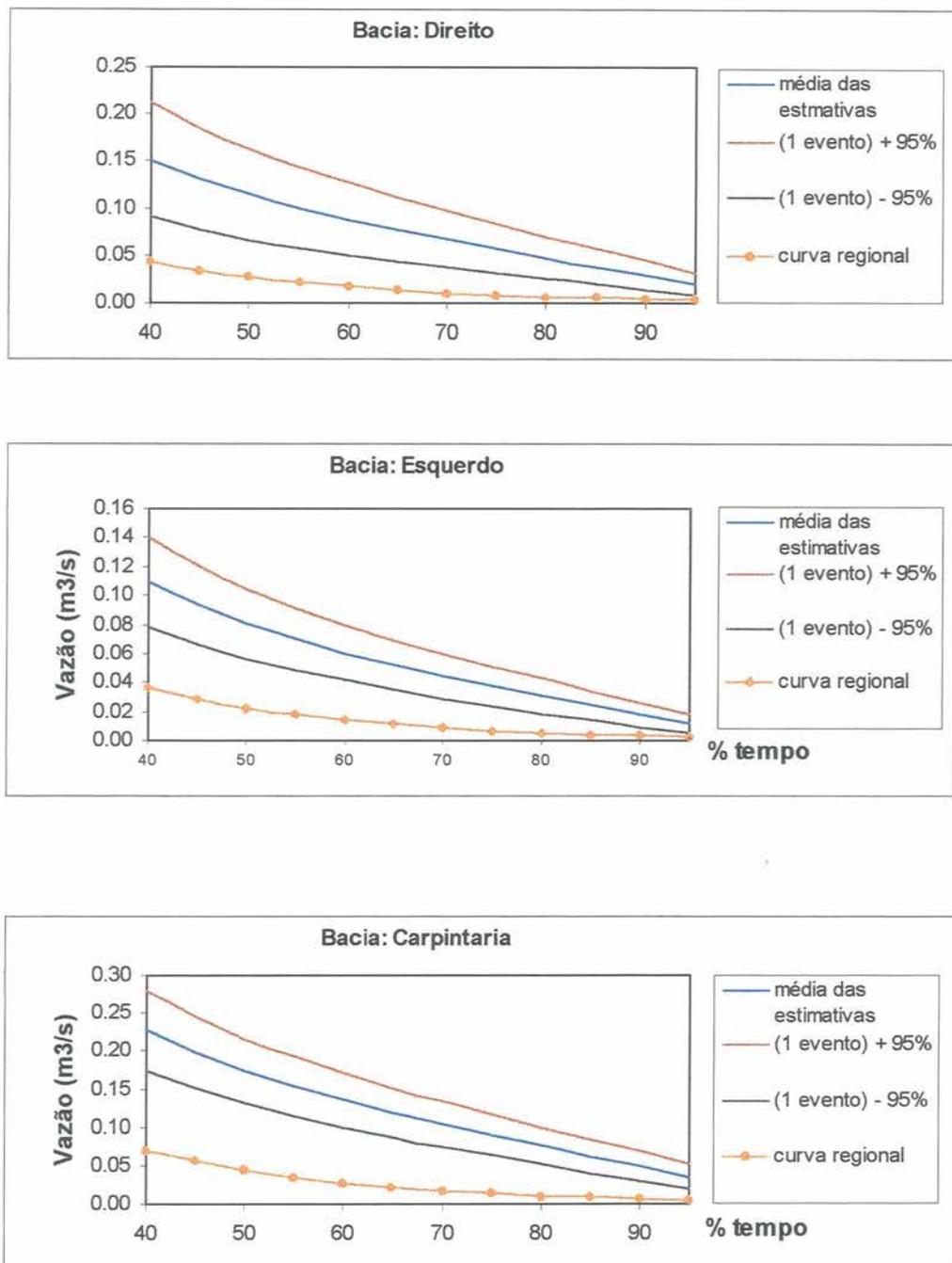


Figura 4.26 – Limites de confiança do método proposto e a estimativa da regionalização. Bacias de V.Direito, V. Esquerdo e Carpintaria.

4.6 Considerações Finais

As considerações a que se pretende chegar nesta seção poderiam ser introduzidas pela seguinte questão:

A metodologia proposta foi aplicada e verificada para 6 pequenas bacias. Como se pode imaginar sua aplicação para outras bacias? Qual o erro esperado? Pode-se assumir como idêntico ao erro encontrado para as bacias monitoradas?

Inicialmente pode-se dizer o seguinte: a estimativa obtida pela metodologia proposta não depende de parâmetros, equações regionais ou coeficientes de regiões definidas como hidrologicamente homogêneas. Como o procedimento depende da avaliação específica de medições de vazões na seção fluvial de interesse, o resultado de sua aplicação para outras bacias teria as mesmas dificuldades encontradas nas estimativas desenvolvidas para as bacias monitoradas produzindo consequentemente resultados semelhantes. O procedimento não depende de ajustes prévios, mas sim de uma interação direta com o manancial a ser avaliado. Em resumo a metodologia proposta reduz-se a um balanço hídrico desenvolvido especificamente para a seção fluvial de interesse e incorre nos erros usuais e inerentes a este tipo de avaliação dependendo da qualidade dos ajustes desenvolvidos e da qualidade dos dados disponíveis.

A vazão, em determinada seção fluvial, é uma variável integradora da resposta do sistema físico bacia hidrográfica aos impulsos de precipitações e evapotranspirações locais, ao longo do tempo. Em períodos de estiagem, as vazões são a resposta do sistema aos impulsos de precipitação, ou melhor explicitando, a ausência de impulsos de precipitação no sistema. Desta forma, a avaliação de vazões em período de estiagem caracteriza a oferta hídrica do sistema não produzida como consequência do escoamento superficial na bacia.

Quantos aos erros encontrados, avalia-se os resultados da aplicação da metodologia como consequência do ajuste efetuado a valores verdadeiros (vazões medidas). Em decorrência, os resultados devem ocorrer no entorno dos valores verdadeiros procurados, consequência do balanço hídrico desenvolvido, conforme visualiza-se na nuvem de previsões para as seis pequenas bacias estudadas. O erro padrão médio das estimativas avaliados para as bacias estudadas pode ser considerado satisfatório variando, em função do número de eventos conhecidos, em até 30% dos valores observados (Tabela 4.4).

Assim, a metodologia proposta caracteriza uma solução alternativa para a avaliação de disponibilidades hídricas, quando a regionalização não produz bons resultados ou precisa ser extrapolada, na hipótese de não haver condições para o monitoramento contínuo com registradores automáticos por um período determinado de tempo (2 à 5 anos). Mesmo quando a regionalização produz bons resultados por coeficientes de outras bacias de magnitude semelhante, deve-se avaliar que o método proposto produz resultados a partir de coeficientes definidos para a própria bacia alvo do estudo.

Desta forma pode-se considerar que a metodologia proposta é passível de ser aplicada a qualquer bacia sem a dependência de estudos prévios de regionalização e de estudos de representatividade regional de variáveis hidrológicas normalmente escassos para a realidade Brasileira.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Relativas à quantificação de vazão com dados escassos

O presente estudo abrangeu os seguintes objetivos:

- mostrar uma alternativa capaz de suprir ausência de metodologia para a quantificação de vazões medianas e mínimas de pequenas bacias em regiões cujos pequenos mananciais estão desprovidos de dados fluviométricos - realidade quase constante no território brasileiro. A ausência de metodologia, muitas vezes, leva ao uso abusivo de estudos de regionalização hidrológica;

- mostrar, através da metodologia proposta, que a estratégia de algumas medições locais em períodos de estiagem produzem resultados vinculados à realidade local da bacia considerando-a no seu estágio atual. Esta metodologia deve ser considerada na hipótese da impossibilidade de se exercer o monitoramento hidrológico convencional, seja por falta de tempo (*pela necessidade de obtenção rápida dos resultados*) ou pela falta de recursos financeiros. O monitoramento hidrológico convencional consiste em estabelecer uma estação hidrométrica na seção fluvial de interesse, sua operação e manutenção ao longo do tempo;

- apresentar um procedimento prático para avaliação baseado em medições locais e expeditas de descargas nos períodos de estiagem do manancial fluvial.

O método baseia-se na análise do significado de uma curva de depleção obtida numa rápida interação com o meio, a qual pode ser obtida com a medição de algumas vazões, em curto espaço de tempo (uma a duas semanas). O significado da depleção medida é avaliado por simulação de balanço hídrico diário que tenta reproduzi-la a partir da cronologia de precipitações. Em decorrência do objetivo de reproduzir prioritariamente os períodos de estiagem, o método proposto se aplica ao estudo de vazões de maior frequência.

A rápida interação com o meio, ora proposta (medições de descarga no local), não se confunde com o método prático da Eletrobrás (1983) que se atém à estimativa de vazão para projeto de turbinas de Pequenas Centrais Hidrelétricas e sugere uma medição de vazão de estiagem, tomando-a como vazão de 95% de permanência.

Este método não situa a vazão no contexto de funcionamento da bacia e, só por sorte, a medição realizada coincidiria com a vazão de 95 % de permanência.

Portanto, a aplicação do método ora proposto, se divide em duas etapas principais:

- levantamento da amostragem reduzida de vazões que tem por objetivo dar uma vinculação local às estimativas, funcionando como uma ancoragem hidrológica aos procedimentos de simulação;
- desenvolvimento de simulação chuva-vazão que tem por objetivo gerar séries sintéticas de vazões diárias. A depleção formada pelas vazões medidas em campo devem ser ajustadas por um modelo de balanço hídrico simplificado (com dois parâmetros), considerando-se o histórico de precipitações e evaporações regionais disponíveis para a região. O ajuste dos parâmetros pode ser interativo (manual), via processo de tentativa e erro.

Através do modelo de balanço hídrico, o objetivo do método proposto é o de avaliar com maior ênfase as vazões formadas no meio subterrâneo, simulando a oferta de vazão na ausência de precipitação.

A robustez do método reside na vinculação local proporcionada pelas vazões reais medidas *in loco*. Também o funcionamento mais estável das depleções facilmente identificáveis com esvaziamento de aquíferos, permite estimativas mais confiáveis dos parâmetros do modelo de balanço hídrico. Sugerindo-se apenas dois parâmetros para o modelo de balanço hídrico, o cotejo entre o histórico das precipitações e das evaporações com a depleção medida, propicia, por sua vez, a geração de uma série cronológica de vazões com um nível de informação mais realista quando comparada a outros métodos sem vinculação local.

Em síntese, a medição expedita de vazões em curto período de estiagem (uma a duas semanas) e sua simulação por um modelo de balanço hídrico diário constituem-se alternativa interessante para a síntese de dados hidrológicos em bacias sem dados. A vantagem principal é a não necessidade de instalação de uma estação hidrométrica convencional com medições sistemática durante vários anos para estabelecer o regime hidrológico da bacia, sobretudo para vazões pequenas e médias, cujo conhecimento é indispensável a muitos projetos de engenharia com demanda

hídrica (abastecimento de água potável, geração de energia hidrelétrica, irrigação e outros).

A verificação da metodologia baseou-se em dados de seis pequenas bacias onde considerou-se o conhecimento de um evento de estiagem (3 vazões medidas) até o conhecimento de 10 eventos de estiagens subsequentes, intercalados por cheias. Os resultados obtidos demonstram a melhora gradativa das estimativas à proporção em que novos eventos de estiagem se disponibilizem ao método proposto.

Considerando-se a ausência de método concorrente ao proposto, pode-se dizer que o mesmo representa uma alternativa, embora ainda não se possa avaliar com profundidade as incertezas associadas devido ao pequeno número de anos de monitoramento para a verificação (3 anos), nas 6 pequenas bacias avaliadas.

Entretanto, todas as bacias apresentaram um erro padrão da estimativa que indica uma atração das estimativas aos valores reais de disponibilidade hídrica, proporcionados, certamente, pela vinculação local das estimativas em decorrência das medições de vazão na seção fluvial de interesse.

Como recomendação prática, na ausência de método concorrente, em caso da **necessidade** de avaliação e de não dispor-se de condições para o monitoramento convencional, sugere-se o uso da metodologia analisada preliminarmente, na seguinte condição: dispor do conhecimento de no mínimo dois eventos de estiagens subsequentes. O conhecimento de dois eventos de estiagem permite melhor análise por parte do profissional responsável pela avaliação, quando houver problema de representatividade das precipitações que possa conduzir a resultados incompatíveis com a realidade física - coeficiente de escoamento exagerado ou fora de limites no modelo de balanço hídrico -. Essa observação vale também para o parâmetro de propagação do escoamento subterrâneo. Ao dispor-se de melhor a avaliação das chuvas na própria bacia, a seleção de um evento de estiagem bem caracterizado pela ausência da chuva pode produzir resultados certamente melhores do que os encontrados para as avaliações das 6 pequenas bacias.

Recomenda-se, ainda, a continuidade das pesquisas, o estudo da aplicação do método a bacias maiores até onde as curvas de permanência regionais não sejam confiáveis pela indisponibilidade de dados, presumindo-se que o mesmo possa tornar-se alternativa viável à ausência de método concorrente, pois caracteriza-se por um ajuste vinculado à seção fluvial de interesse.

Outra recomendação relaciona-se à aplicação do método para bacias maiores onde as curvas de permanência (CPs) estimadas pela regionalização hidrológica possam ser aplicadas. Considerando-se o princípio da parcimônia, recomenda-se a adoção deste critério de preocupar-se precisamente em explicar a ocorrência de vazões no período de estiagem, de modo a permitir a síntese de um fluviograma para a seção fluvial não monitorada através da desagregação da CP, pela precipitação e evapotranspiração regional. Esta desagregação da CP em fluviograma sintético pode utilizar um modelo simplificado de transformação chuva-vazão, sem ater-se a analisar os mecanismos de formação das cheias, permitindo a adoção de intervalos de tempo de simulação mais confortáveis (maiores) e um número menor de parâmetros.

5.2 - Relativas ao monitoramento hidrológico de baixo custo

Através do monitoramento hidrológico estabelecido com a rede experimental de pequenas bacias, conclui-se que a utilização de estruturas hidráulicas do tipo Parshall pode representar procedimento adequado para a avaliação das potencialidades hídricas de pequenas bacias em regiões com carência de dados necessários aos estudos de viabilidade econômica de pequenos aproveitamentos de recursos hídricos.

O monitoramento exercido com registros em intervalos de tempo diário permitiu registrar a ocorrência de vazões de modo compatível com a necessidade de avaliação de disponibilidades hídricas fluviais, evitando-se portanto, o uso de limnógrafos de alto custo, sua operação e manutenção.

O grande argumento deste tipo de monitoramento alternativo é o baixo custo da informação, conseqüência do baixo custo de construção das calhas e da facilidade de obtenção dos dados. Os níveis são obtidos pelas leituras das régua linimétricas, através de um observador local, e; a vazão, pela respectiva curva de descargas. Sem contabilizar os custos variáveis (transporte de material e deslocamento de pessoal) o custo médio de para a construção da calha fica em torno de 250 reais (material e mão de obra).

Outras vantagens deste tipo de estrutura são a sua robustez, que a protege contra depredações, e a facilidade de medições de vazões com o micro-molinete

hidrométrico, em seções retangulares de leito fixo, como as do seu canal de aproximação. Nestas estruturas uma medição de descargas pode ser executada por uma pessoa em apenas trinta minutos.

O monitoramento de estruturas existentes, a partir do ano de 1992, permitiu registrar mais de 80% das vazões ocorridas. Considerando que o segmento inferior da curva de permanência de vazões é o mais importante para avaliar a potencialidade hídrica de uma pequena bacia, verifica-se que o período de tempo monitorado é suficiente para tais avaliações. No caso de uma pequena central hidrelétrica, o estudo de viabilidade econômica considera normalmente o trecho de Q50% a Q95% para definição da vazão de projeto da usina. A energia gerada por faixa de potência é representada pela área abaixo da curva de permanência, feitas as devidas conversões no eixo das ordenadas de vazões para potências.

Ao analisar-se o inventário das estações fluviométricas DNAEE(1991), constatam-se regiões carentes de dados fluviométricos em pequenas bacias hidrográficas, as quais caracterizam realidades estadual e brasileira. Pode-se citar, como compartilhantes da mesma realidade, a maioria dos países da África. Assim, o monitoramento de baixo custo em pequenas bacias pode ser procedimento recomendável para suprir tais carências.

No caso específico do Rio Grande do Sul, o monitoramento alternativo das potencialidades hídricas fluviais de pequenas bacias é mais conveniente ainda, pois existem mais de 200 calhas já construídas pelo Programa Estadual de Controle dos Borrachudos. Estas calhas possibilitam desenvolver-se o monitoramento continuado.

Esta avaliação comprovada pelo monitoramento exercido nas calhas, proporciona a possibilidade de inventariar-se as potencialidades hídricas de uma pequena bacia a baixo custo e projetar o estabelecimento de uma estação fluviométrica completa, também de baixo custo. A construção de um calha complementada com a implantação de régua de registro de níveis máximos ocorridos, permite registrar o fluviograma completo para a pequena bacia. As vazões medianas e mínimas registradas nas calhas, permitem avaliar as disponibilidades hídricas para consumo. Por sua vez, as régua de níveis máximos permitem o registro das vazões máximas ocorridas e a conseqüente formação de séries anuais. Estas séries anuais de vazões máximas constituem-se importante informação para o cálculo das vazões de segurança das estruturas de um pequeno aproveitamento de recursos hídricos.

Assim, as perspectivas que se configuram como possibilidades de realização imediata, relativas à pesquisa de monitoramento e extensão deste trabalho, são:

- considerando-se que monitoramento de baixo custo é viável técnica e economicamente (conclusões do cap.3) é possível estabelecer uma rede estadual de pequenas bacias a partir da base de calhas instaladas no Rio Grande do Sul, de modo a subsidiar a avaliação direta das potencialidades hídricas para projetos e oferecer suporte ao desenvolvimento de estudos aplicados e pesquisas de metodologias de estimativas para pequenas bacias cujo monitoramento convencional é bastante dispendioso;

- possibilidade de instalação de estações hidrométricas completas de baixo custo, agregando-se a estrutura hidráulica utilizada para a avaliação de vazões medianas e mínimas, réguas de máxima para estimar os picos de cheia. Desta forma pode-se formar séries anuais de vazões máximas que, somadas às informações de disponibilidade hídrica provenientes do monitoramento das calhas, formam uma base completa de dados para avaliações hídricas;

- complementar a rede de monitoramento de pequenas bacias com avaliação de parâmetros da qualidade das águas, atendo-se ao baixo custo, na rede atualmente estabelecida, reforçada pelo fato de que a maioria das calhas já instaladas pertencem à mata atlântica brasileira, zona de preservação ambiental permanente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOTT, M. B., BATHURST, J. C., CUNGE, P. E., O'CONNELL, J.A., RASMUSSEN, J. 1986. An introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique, "SHE," 1. History and philosophy of a physically based distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.87, p.45-59.
- ACQUA-PLAN. 1977. *Estudo de viabilidade global* [da Companhia Rio Grandense de Saneamento – CORSAN]. Porto Alegre. 205f.
- ALFARO, J. F. 1974. Medidas de Águas en Canales por Medio del Aforador "Sin Cuello". In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE IRRIGAÇÃO, 1., 1974, Porto Alegre. *Anais*. Porto Alegre: UFRGS. p. 459-529.
- BERLATO, M.A., FONTANA, D.C., BONO, L. 1993. Tendência temporal da precipitação pluvial anual do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 8., 1993, Porto Alegre. *Resumos*. Santa Maria: UFSM. p.5.
- BEVEN, K. 1985. *Distributed models*. In: ANDERSON, M.G., BURT, T.P. ed. Hydrological forecasting. New York: John Wiley, ch.13, p.405-435.
- BEVEN, K. 1989. Changing ideas in hydrology – the case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 105, p.157-172.
- BORDAS, M. P., LANNA, A. E., DE LUCA, S. J. 1990. *Projeto Potiribu: avaliação e controle dos impactos da agricultura sobre os recursos hídricos do derrame basáltico sulamericano*. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA PARA O PROGRESSO DA CIÊNCIA, 42, 1990, Porto Alegre. 2f.
- BORDAS, M. P., TUCCI, C. E. M., SILVEIRA, R. L., SEMMELMMAN, F. R. e D'AMICO, J. J. 1981. Regime Hidrológico e sedimentológico dos cursos d'agua da encosta meridional do derrame basáltico sul-americano: Bacia representativa do rio Forqueta(RS). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO EM HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 4, 1981, Fortaleza. *Anais*. São Paulo: ABRH, vol. 1, p.160-75.

- BOSS, G. B., REPLOGLE, J. A., CLEMMENS, A. J. 1984. *Flow Measuring Flumes for Open Channel Systems*. New York: John Wiley. 315p.
- BRASIL. *Decreto nº 2.003, de 10 de setembro de 1996*. Regulamenta a produção de energia elétrica por Produtor Independente e por Autoprodutor e dá outras providências.
- BRASIL. *Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995*. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, v.133, n.129-A, p.10125-10128, 8 jul. 1995. Secção1, Ed. Extra.
- BRASIL. *Lei nº 9433 de 8 de janeiro de 1997*. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do artigo 21 da Constituição Federal e altera o artigo 1 da lei 801 de 13 mar. 1990, que modifica a lei nº 7990 de 28 dez. 1989.
- CANALI, G. E. 1981. *Produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas rurais*. Porto Alegre: UFRGS - Curso de Pós-Graduação em Hidrologia Aplicada. 234f. Dissertação (Mestrado).
- CARLESSO, R. 1988. *Calha Medidora de Vazões*. Lavoura Arroseira, Porto Alegre, v. 41, n. 382, p. 24-26, nov./dez.
- CHEVALLIER, P. 1988. *Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide Booro-Boroton (Côte d'Ivoire)*. Montpellier: Université des Sciences et Techniques du Languedoc. 331 p. Thèse (Doctorat).
- CHRISTOFOLETTI, A. 1974. *Geomorfologia*. São Paulo: Ed. Edgard Blucher. 150 p.
- CLARKE, R. T. 1993. *Hidrologia Estatística*. In: TUCCI, C.E., org. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS. ABRH:Edusp, cap. 17, p. 659-702.
- CRAWFORD, N. H. e LINSLEY, R. K. 1966. *Synthesis of continuous streamflow hydrographs on a digital computer*. Stanford: Stanford University of Civil Engineering. (Technical Report 12).

- DIGMAN, S.L. 1978. Synthesis of flow-duration curves for unregulated streams in New Hampshire. *Water Resources Bulletin*, Minneapolis, v. 14, n. 6, p. 1481-1502, Dec.
- DNAEE. 1987. Inventário das estações fluviométricas. Brasília. Não paginado.
- DORFMAN, R. 1977. *Critérios de avaliação de alguns métodos de cálculo da evapotranspiração potencial*. Porto Alegre: UFGRS – Curso de Pós-Graduação em Hidrologia Aplicada. 196f. Dissertação (Mestrado).
- ELETROBRÁS 1983. *Manual de Pequenas Centrais Hidrelétricas*. Rio de Janeiro. Não paginado.
- FENNESSEY, N.; VOGEL, R. M. 1990. *Regional flow duration curves for ungauged sites in Massachusetts*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v. 116, n. 4, p. 530-549. Jul./Aug.
- FÓRUM DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE DO RIO GRANDE DO SUL. 1996. *Anais*. Santa Maria: UFSM.
- HAAN, C. T. 1989. *Parametric Uncertainty in Hydrologic Modeling*. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph*, v. 32, n. 1, p.137-145.
- HORBACH, R. 1986. *Geologia*. In: BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. *Projeto Radambrasil*: folha SH22, Porto Alegre e partes das folhas SH21 Uruguaiana e SI22 Lagoa Mirim. Rio de Janeiro. p.29-312. (Levantamento de Recursos Naturais, v. 33).
- JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. 1995. *Tratamento de Esgotos Domésticos*. Rio de Janeiro: ABES. 720p
- JUSTUS, J. O.; MACHADO, M. L. A. & FRANCO, M. S. M. 1986. *Geomorfologia*. In: BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. *Projeto RADAMBRASIL*: folha SH22 Porto Alegre e partes das folhas SH21 Uruguaiana e SI22 Lagoa Mirim. Rio de Janeiro. p.313-404. (Levantamento de Recursos Naturais, v. 33).
- KAVISKI, E., FIOR, M. T. 1985. *Regionalização de Curvas de Permanência de Vazões Médias Diárias em Pequenas Bacias Hidrográficas do Estado do Paraná*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 6, 11985, São Paulo. *Anais. São Paulo*: ABRH. v. 3, p.188-201.

- KER, J. C., ALMEIDA, J. A., FASOLO, P. J., HOCNMÜLLER, D. P. 1986. Pedologia - Levantamento exploratório de solos. In: BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. *Projeto RADAMBRASIL: folha SH22 Porto Alegre e partes das folhas SH21 Uruguaiana e SI22 Lagoa Mirim*. Rio de Janeiro. p.405-540. (Levantamento de Recursos Naturais, v. 33).
- KLEMES, V. 1986. *Operational testing of hidrological simulation models. Hidrological Science Journal*, v. 31, n. 1, p.13-24.
- KUCZERA, G. 1983. *Improved Parameter Inference in Catchment Models 1. Evaluation Parameter Uncertainty. Water Resources Research*, Washington, v. 19, n.5, p.1151-1162, Oct.
- MACIEL FILHO., C. L. 1987. *Caracterização geológica-geotécnica dos materiais naturais e das modalidades de uso na Depressão Periférica do Rio Grande do Sul: relatório final da pesquisa*. Santa Maria: UFSM.
- MACIEL FILHO., C. L. 1991. *Caracterização geológico-geotécnica de formações sul-rio-grandenses das regiões centro e oeste: relatório final da Pesquisa*. Santa Maria: UFSM.
- MACIEL FILHO, C. L., VARGAS, LUCERO. 1991. *Análise da bacia hidrográfica do Arroio Grande*. In: SIMPÓSIO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 4, 1991, Porto Alegre. *Anais*. Porto Alegre: Instituto de Geociências/UFRGS. v.1, p399-413.
- MACIEL FILHO, C. L., GONTAN, SPINELLI. 1995. *Revisão da estratigrafia na região de Santa Maria*. In: SIMPÓSIO SOBRE CRONOESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ, 2, 1995, Porto Alegre. *Boletim de resumos expandidos*. Porto Alegre: ILEA/UFRGS. 123p.
- MARDINI, L. B. 1997. Medidores fixos de vazão em pequenas bacias rurais para utilização de larvicida. [Porto Alegre]: Programa Estadual de Controle dos Simulídeos no Rio Grande do Sul Brasil. Palestra a ser proferida no curso "La Biología e el control de los Mosquitos" na Universidade da Florida, Vero Beach, EUA, de 27/10 a 07/11/1997.
- MARTINEZ, C. B. 1988. *Pré-dimensionamento de Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH's*. Itajubá: Escola Federal de Engenharia. 92p. Dissertação (Mestrado).

- MIMIKOU, M., KAEMAKI, S. 1985. *Regionalization of flow duration characteristics*. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 82, p. 77-91
- MOORE, R.J., CLARKE, R.T. 1981 A distribution function approach to rainfall-runoff modelling, *Water Resources Research*. Washington, v. 17, n.5, p.1367-1382, Oct.
- MURDOCK, R. U. & GULLIVER, J. S. 1993. *Prediction of river discharge at ungaged sites with analysis of uncertainty*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v. 119, n. 4, p. 473-487, Jul./Aug. .
- PORTO, R. L.L. 1995. Escoamento superficial direto. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.L.; BARROS, M. T. *Drenagem Urbana*. Porto Alegre: ABRH: Ed. da Universidade/UFGRS. cap.4, p. 107-165.
- QUIMPO, R. G., ALEJANDRINO, A. A. & MCNALLY, T. A. 1983. Regionalized flow duration curves for Philippines. *Journal of Water Resources Planning. and Managemet*, New York, v. 109, n. 4, p. 320-330, Oct.
- REFSGAARD, J. C., KNUDSEN, J. 1996. *Operacional validation and intercomparison of diferent types of hydrological models*. *Water Resources Research*, Washington, v.32, n.. 7, p 2189-2202.
- RIO GRANDE DO SUL. Companhia Estadual de Energia Elétrica. 1986. *Reavaliação do potencial hidrelétrico brasileiro estado do Rio Grande do Sul: relatório*. Não paginado.
- RIO GRANDE DO SUL. *Lei nº 10350 de 30 de dezembro de 1994*. Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos e regulamenta o artigo 171 da Constituição do Estado do Rio Grande do Sul. *Diário oficial do Estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre. 31dez. 1994.
- ROCHE, M. 1963. *Hydrologie de Surface*. Paris: Gauthier-Vilars. 430 p.
- SA, J. de F. 1995. *Integração de modelo distribuído e geo-processamento*. Porto Alegre: UFRGS. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 144f. Dissertação (Mestrado).
- SANTANA, R. F. 1987. *Aproveitamentos hidrelétricos de pequeno porte: avaliação de custos e benefícios: modelo "Flash"*. Brasília. DNAEE. 166p.

- SEMMELMAN, F. R., SILVEIRA, R. L., D'AMICO, J., SILVEIRA, G. L. BORDAS, M. P. 1985. *Contribuição para o Conhecimento de Influência do uso do Solo sobre os Regimes Hidrológico e Sedimentológico*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 5, São Paulo. *Anais*. São Paulo: ABRH . v. 3, p.202-211.
- SILVEIRA, G. L. 1982. *Erosão do solo na região da encosta do planalto no estado do Rio Grande do Sul: representatividade dos parâmetros de chuva e influência da área cultivada, da declividade e do uso do solo na produção de sedimentos*. Porto Alegre: UFRGS - Curso de pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 151 f. Dissertação (Mestrado).
- SILVEIRA, G. L. 1992. *Estudos hidrológicos para dosificação do Bacillus thuringiensis israelensis no combate ao Simulideo: relatório parcial da pesquisa*. Santa Maria, UFSM.
- SILVEIRA, G. L. 1995. Informações hidrológicas em pequenas bacias hidrográficas rurais. *A Água Em Revista*, Belo Horizonte, v. 3, n. 4, p. 31-39, fev..
- SILVEIRA, R. L. 1974. *Hidrometeorologia: notas de aula*. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 2 v.
- SILVEIRA, R. L., DE LUCA, S., SEMMELMANN, F. R. 1985. *Projeto Simulideo – IPH: relatório parcial*. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. Não paginado.
- SOROOSHIAN, S. e GUPTA, V. K. 1983. *Automatic Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Models: The Question of Parameter Observability and Uniqueness*. *Water Resources Research*, Washington, v. 19, n. 1, p 260-268. Feb
- SOUZA, M. A., MARDINI, L. F., GOMES, E., SILVEIRA, G. L. 1994. *Evolução do controle biológico de Simulídeos através do Bacillus thuringiensis israelensis no Rio Grande do Sul, Brasil*. In: SEMINÁRIO QUALIDADE DE ÁGUAS CONTINENTAIS NO MERCOSUL, 1, 1994, Porto Alegre. *Anais*. Porto Alegre: ABRH. P. 261-278.

- TASK COMMITTEE. 1985. Quantifying land use change effects, evaluation of hydrological models used to quantify major land use change effects. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v. 111, p. 1-17.
- TEIXEIRA, M. B., COURA NETO, A. B. 1986. *Vegetação - As regiões fitoecológica, sua natureza e seus recursos econômicos. Estudo Fitogeográfico*. In: BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. Projeto RADAMBRASIL: folha SH22 Porto Alegre e partes das folhas SH21Uruguaiana e SI22 Lagoa Mirim. Rio de Janeiro. p.541-632. (Levantamento de Recursos Naturais. V. 33).
- TROUTMAN B. M. 1985. *Errors and Parameter Estimation in Precipitation-Runoff Modeling 1. Theory*. *Water Resources Research*, v. 21, n 8, p.1195-1213.
- TUCCI, C. E., SANCHES, J., SIMÕES LOPES, M. O. 1981. *Modelo IPH II de Simulação Precipitação-Vazão na Bacia: alguns resultados*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 4, 1981, Fortaleza. *Anais*. São Paulo: ABRH, v. 2, p. 83-103.
- TUCCI, C. E. 1987. Modelos Determinísticos. In: BARTH, F. T. et al., org. *Modelos para o gerenciamento dos Recursos Hídricos*. São Paulo: ABRH: Nobel. cap.3.
- TUCCI, C. E. 1991. coord. *Regionalização de Vazões no Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: IPH/UFRGS. 2v. em 4.
- TUCCI, C. E. 1993. organizador. *Hidrologia, Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS: ABRH: Edusp. 943p.
- TUCCI, C. E. 1997. *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre: IPH/UFRGS [livro em preparação].
- VOGEL, R.M., FENNESSEY N. M. 1994. *Flow Duration Curves. I: New Interpretation and Confidence Intervals*. *Journal Water Resources Planning and Management*, New York, v 120, n.4. p 485-504.
- ZECHARIAS, Y. B., BRUTSAERT, W. 1988. Recession Characteristics of Groundwater Outflow and Base Flow From Mountainous Watersheds. *Water Resources Research*, Washington, v. 24, n 10, p.1651-1658.

LISTA DOS ANEXOS

ANEXO A - DADOS DA REDE EXPERIMENTAL DAS PEQUENAS BACIAS

BACIAS HIDROGRÁFICAS MONITORADAS: Descrição física das pequenas bacias, mapas plani-altimétrico das bacias hidrográficas, documentação fotográfica da calha e da paisagem da região e; fluviograma monitorado.

- A1 - Bacia de São Jacó
- A2 - Bacia de Schneider 1
- A3 - Bacia de Schneider 2
- A4 - Bacia de Vale Direito
- A5 - Bacia de Vale Esquerdo
- A6 - Bacia de Carpintaria
- A7 - Bacia de Linha Brasil
- A8 - Bacia de Linha Araripe
- A9 - Bacia de Recanto Suiço
- A10 - Bacia de São José do Cai
- A11 - Bacia do Arroio Paraíso
- A12 - Bacia de Primavera

ANEXO B - CODIFICAÇÃO DO MODELO SIMPLIFICADO

ANEXO C - VISUALIZAÇÃO DOS FLUVIOGRAMAS OBSERVADOS E GERADOS COM OS PARÂMETROS MÉDIOS DE AJUSTE AOS EVENTOS INDIVIDUAIS

ANEXO A

DADOS DA REDE EXPERIMENTAL DAS PEQUENAS BACIAS

BACIAS HIDROGRÁFICAS MONITORADAS: Descrição física das pequenas bacias, mapas plani-altimétrico das bacias hidrográficas, documentação fotográfica da calha e da paisagem da região e; fluviograma monitorado.

- A1 - Bacia de São Jacó.....
- A2 - Bacia de Schneider 1.....
- A3 - Bacia de Schneider 2.....
- A4 - Bacia de Vale Direito.....
- A5 - Bacia de Vale Esquerdo.....
- A6 - Bacia de Carpintaria
- A7 - Bacia de Linha Brasil.....
- A8 - Bacia de Linha Araripe.....
- A9 - Bacia de Recanto Suiço.....
- A10 - Bacia de São José do Caí.....
- A11 - Bacia do Arroio Paraíso.....
- A12 - Bacia de Primavera.....

Descrição física das pequenas bacias

Geologia

Todas as pequenas bacias estudadas situam-se, pela análise do mapa geológico de Harbach et al (1986), sobre a formação Serra Geral. Esta formação é resultante de vulcanismo fissural, do período cretáceo na bacia geológica do Paraná; constitui-se numa sucessão de corridas de lavas, de composição predominantemente básica (basaltos toleííticos) com alguns termos intermediários como andesitos na sua sequência inferior, e uma sequência superior identificada pelo domínio de efusivas ácidas (riolitos, riodacitos e vitrófiros), intercaladas com arenitos eólicos.

As pequenas bacias de Saporanga e de Dois Irmãos situam-se sobre os basaltos. Em Nova Petrópolis, as bacias do Caí e Paraíso situam-se sobre vulcânicas ácidas no topo e sobre basaltos na base; e, as bacias do Recanto Suíço, Linha Araripe e Linha Brasil sobre vulcânicas ácidas. Em Santa Maria, a bacia Primavera assenta sobre as vulcânicas ácidas.

Embora os mapas geológicos de pequena escala não apresentem, ocorrem camadas de arenito eólico Botucatu entrecaladas entre as lavas basálticas ou entre as basálticas e as ácidas, conforme Maciel Filho et al (1987 e 1991). Essas camadas conhecidas como arenitos intertrapeanos tem influência na alimentação de pequenas bacias.

As estruturas mais marcantes na região Leste do Estado são fraturas de direção NE. No centro dominam duas direções, NE e NW.

Geomorfologia

De acordo com Justus, Machado e Franco(1986), as pequenas bacias estudadas situam-se sobre o Planalto das Araucárias ou Planalto Meridional distribuídas em três unidades geomorfológicas:

- o *Planalto dos Campos Gerais*, onde estão a bacia Primavera de Santa Maria, e; Caí, Paraíso e Recanto Suíço de Nova Petrópolis;
- a *Serra Geral*, onde estão Linha Araripe e Linha Brasil de Nova Petrópolis e;
- os *Patamares da Serra Geral*, onde estão as bacias de Sapiroanga e Dois Irmãos.

As bacias que estão sobre o Planalto dos Campos Gerais, o estão, na realidade, junto a borda correspondente a Serra Geral e, por isso sofrem os efeitos dessa proximidade, não apresentando, por exemplo áreas deprimidas e brejosas que hoje são interpretadas como dolinas e são características do planalto.

O Planalto dos Campo Gerais representa ampla área elevada, onde se registram as maiores cotas altimétricas de todo o Planalto das Araucárias.

A bacia de Primavera em Santa Maria possui altitudes em torno de 460 metros, junto ao divisor de águas das bacias dos rios Jacuí e Ibicuí.

As bacias de Nova Petrópolis apresentam altitudes de 647 metros (Paraíso e Recanto Suíço), 575 metros (Caí), nas nascentes, chegando a 80 metros nos exutórios das bacias de Caí e Paraíso. Estas duas bacias tem a sua maior parte na unidade Serra Geral.

Esta unidade geomorfológica caracteriza-se a oeste por um relevo relativamente plano e conservado, representado por superfícies de aplanamento desnudadas, retocadas e degradadas. Ocorre frequentemente linhas estruturais ocupadas por cursos d'água. As linhas de pedras estão recobertas por camadas de colúvio de espessura variável mas não profundas.

A Serra Geral representa os terminais abruptos do Planalto dos Campos Gerais. Constitui-se num relevo escarpado mais rebaixado, com cotas altimétricas que caem gradativamente para oeste; apresenta-se mais festonada, uma vez que sofre a ação erosiva dos rios de grande porte que descem da regiões mais elevadas.

As características do relevo, em especial, são propícias ao desenvolvimento de uma vegetação do tipo florestal.

As formas de relevo estão representadas por profunda e intensa dissecação com marcante controle estrutural, frequentes ocorrências de sulcos estruturais de diversas orientações e cursos fluviais a ele adaptados.

Os Patamares da Serra Geral correspondem aos terminais rebaixados da Serra Geral que avançam sobre a Depressão. Engloba formas em colinas com pequeno aprofundamento dos vales fluviais, formas de relevo que representam forte controle estrutural e, localizadamente, formas planares. O setor ligado a Área Serrana apresenta uma diminuição do controle estrutural.

Pedologia

Segundo Ker, Almeida, Fasolo e Hochmüller(1986), os solos que ocorrem nas bacias estudadas são:

- terra roxa estruturada (bacias de Sapiranga e Dois Irmãos)
- terra bruna estruturada intermediária para bruno-acizentado (bacias de Linha Araripe, Recanto Suíço, Caí superior e Paraíso superior)
- podzólico bruno acizentado (bacia de Primavera em Santa Maria)
- brunizém avermelhado (bacia de Linha Brasil)
- solos litólicos (bacias de Caí inferior e Paraíso inferior)

A terra roxa estruturada compreende solos com horizonte B textural, não hidromórficos, com argila de atividade baixa. São solos profundos, bem drenados, geralmente com textura muito argilosa. Apresentam sequência de horizontes A, Bt e C, com pequena variação de cor e textura ao longo do perfil e transição gradual ou difusa entre os sub-horizontes. Têm como substrato o basalto.

A terra bruna estruturada intermediária para podzólico bruno acinzentado compreende solos minerais, não hidromórficos, caracterizando-se pela presença de horizonte B textural e argila de atividade baixa. Apresentam, como feições particulares de seu caráter intermediário, maior contraste entre os horizontes e valores normalmente médios da atividade da argila. A sequência de horizontes é do tipo A, Bt, C com horizonte A espesso (geralmente maior que 35cm) e com elevados teores de carbono orgânico, suficiente para lhe conferir o caráter húmico. Apresentam textura muito argilosa no horizonte B. Estão relacionados aos riodacitos e riolitos da Formação Serra Geral.

O solo podzólico bruno acinzentado compreende solos minerais, não hidromórficos, caracterizado pela presença de horizonte B textural, marcante diferenciação entre os horizontes e valores médios a altos da atividade da argila. São solos moderadamente drenados, pouco profundos e profundos, de coloração brunada. Apresentam sequência de horizontes A, Bt e C, sendo a textura média ou argilosa no horizonte A. No horizonte B a textura é argilosa ou muito argilosa. Os solos álicos são derivados das rochas vulcânicas ácidas da Formação Serra Geral.

O brunizém avermelhado compreende solos minerais, não hidromórficos, com o horizonte B textural, argila de atividade alta. A sequência de horizontes é do tipo A, Bt, C. O horizonte B apresenta textura argilosa. Normalmente são pouco profundos (50 a 100cm), ocorrendo variações para perfis rasos e profundos. Ocupam relevo plano até fortemente ondulado e são desenvolvidos de litologias variadas.

Os solos litólicos compreendem uma classe de solos rasos, poucos desenvolvidos que possuem um horizonte A assentado diretamente sobre a rocha matriz ou sobre horizonte C, geralmente com muito material de rocha em decomposição.

Clima e Vegetação

Segundo Teixeira e Coura Neto(1986) as regiões fitoecológicas que ocorrem nas bacias estudadas são:

- Região de Savana - campos (bacia de Primavera em Santa Maria)
- Região da Floresta Estacional Semi-decidual (bacias de Sapiranga)
- Região da Floresta Estacional Decidual (bacias de Dois Irmãos, Caí inferior e Paraíso inferior)
- Região da Floresta Ombrófila Mista (bacias de L. Brasil, L. Araripe, Recanto Suíço, Caí superior e Paraíso superior)

A Savana (campos) ou Savana gramíneo lenhosa com floresta de galeria ocorre no Planalto das Missões estendendo-se até proximidades de Santa Maria. Os campos desenvolvem-se em áreas de relevo suave ondulado, sobre solos latossólicos e podzólicos e, estão caracterizados pela quase ausência de capões arbóreos.

As florestas de galeria são estreitas, porém densas e de porte medianamente alto. As espécies mais comuns são as seguintes: canafístula, açoita-cavalo, pitangueira, pessegueiro-bravo, aroeira-preta.

A savana ocorre em ambientes caracterizados pelas seguintes condições: clima estacional, solos rasos ou arenosos lixiviados, relevo geralmente aplainado, pedogênese férrica e vegetação gramíneo-lenhosa.

A Floresta Estacional Semi-decidual caracteriza-se pelo clima úmido onde as temperaturas médias compensadas são inferiores a 15 graus centígrados durante quatro meses do ano, o que torna este período frio, responsável pela estacionalidade fisiológica das plantas.

Esta mesmas condições climáticas ocorrem na região da Floresta Estacional Decidual, com a diferença de que a Floresta Semi-decidual apresenta de 20% a 50% de árvores caducifólias. Esta reduzida percentagem de indivíduos

deciduais se deve principalmente a ausência de grápia que, estando presente no estreito emergente da Floresta Estacional Decidual é a responsável pela fitofisionomia decidual desta última.

Na área de interesse, a floresta foi muito devastada pela colonização alemã do século passado. As espécies predominantes desta floresta são as seguintes: mata-olho, tonheiro, maria-mole, comboatá, laranjeira do mato, catingá, cincho, batinga.

Na Floresta Estacional Decidual o clima apresenta durante o ano dois períodos distintos: um com temperatura média superior a 20 graus, de novembro a fevereiro e, outro com temperatura média inferior a 15 graus, de junho a agosto. Com relação as precipitações pluviométricas não são registrados déficit hídrico.

A estrutura da floresta é representada por dois estratos arbóreos distintos: um, emergente aberto e decíduo, com altura variando entre 25 e 30 m, e, outro dominado e contínuo, com altura não superior a 20 m, formado principalmente por espécies perenifoliadas, além de um estrato de arvoretas. O dossel emergente é dominado por leguminosas caducifólias como grápia e angico. Outras espécies presentes são: cabriúva, louro, umbu, guajuvira, açoita-cavalo, canela preta, batinga, canela-guaicá, mata-olho.

Na Floresta Ombrófila Mista o elemento principal é a Araucária augustifolia ou o pinheiro brasileiro.

O clima que vigora é super úmido com as curvas ombrotérmicas sempre positivas. Há ocorrência de três ou mais meses com temperaturas médias compensadas mensais abaixo de 15 graus C, o que ocasiona a chamada seca fisiológica das plantas tropicais, criadora da estacionalidade. Por esta razão, além das coníferas sempre verdes e adaptadas ao frio também são encontradas as espécies latifoliadas tropicais, deciduais, companheiras no estrato da sub-mata.

Na floresta montana das bacias estudadas, além do pinheiro ocorre : angico vermelho, açoita-cavalo, cabriúva, canjerana, guajuvira.

ANEXO A1

BACIA DE SÃO JACÓ

Paisagem da bacia hidrográfica.....	Fig. A1.1
Vista da calha.....	Fig. A1.2
Mapa plani-altimétrico da bacia.....	Fig. A1.3
Fluviograma observado.....	Fig. A1.4

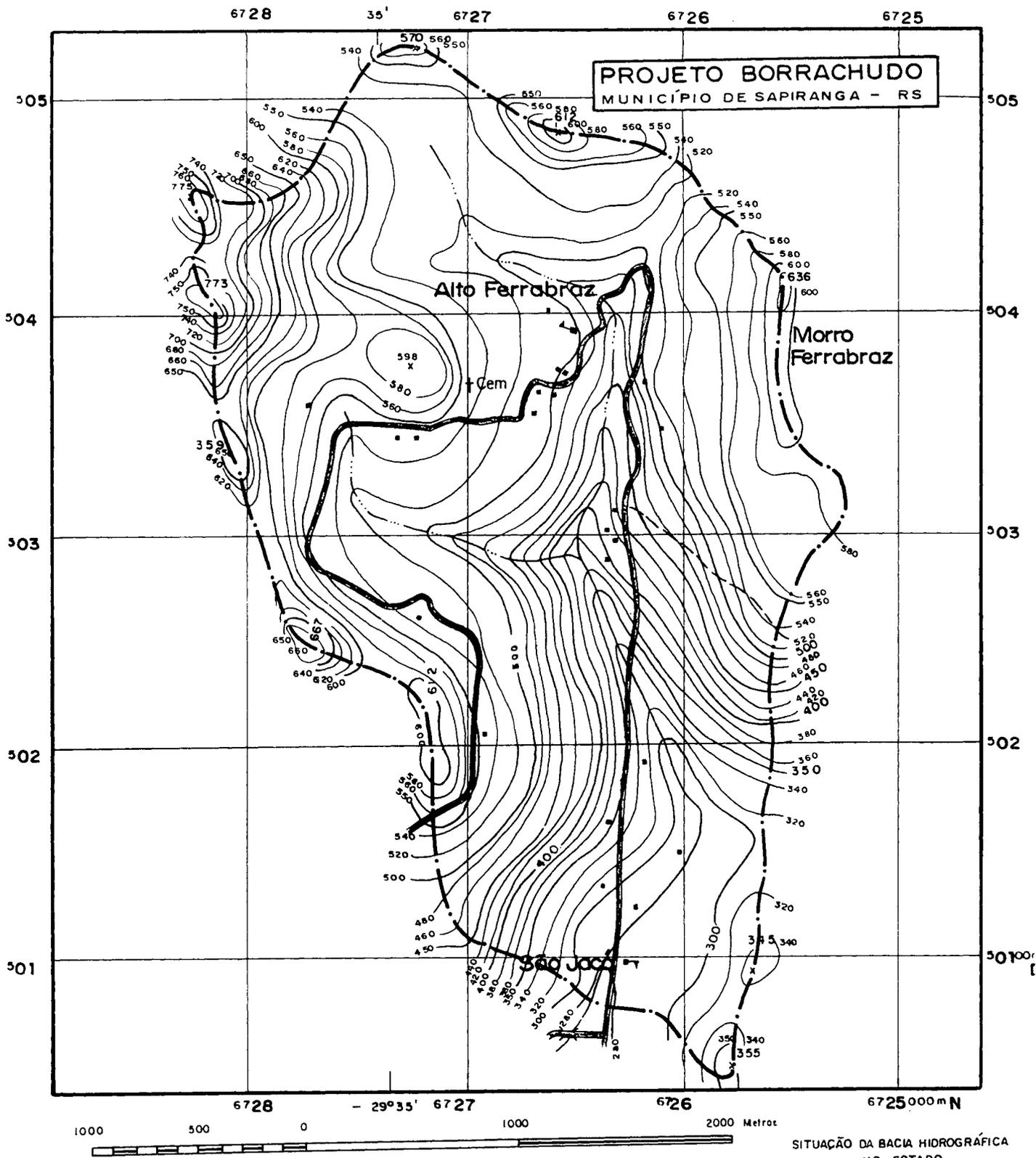
CALHA SÃO JACÓ SAPIRANGA



Fig. Paisagem da Bacia Hidrográfica Contribuinte à Calha São Jacó



Fig. Vista da Calha São Jacó



PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
 ORIGEM DA QUILOMETRAGEM UTM "EQUADOR E MERIDIANO 54° W. GR."
 ACRESCIDAS AS CONSTANTES 10.000 KM E 500 KM RESPECTIVAMENTE

Desenho, diagramação e arte final: Des. Téc. Esp. ARTHUR HECTOR CUNHA

SITUAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA NO ESTADO

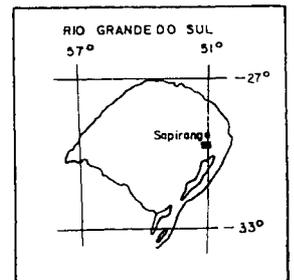
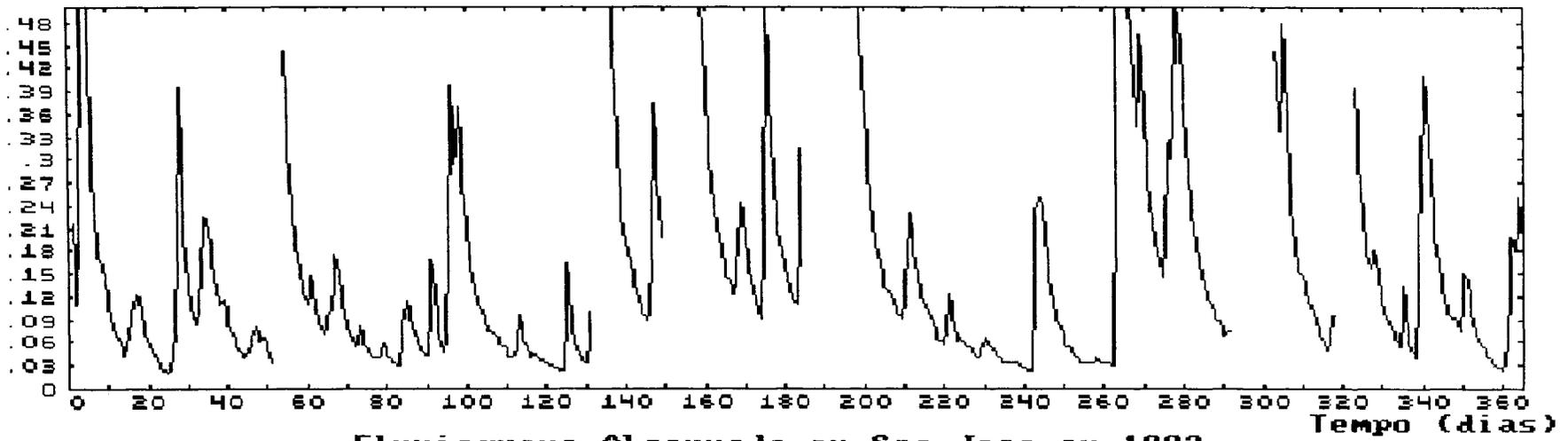


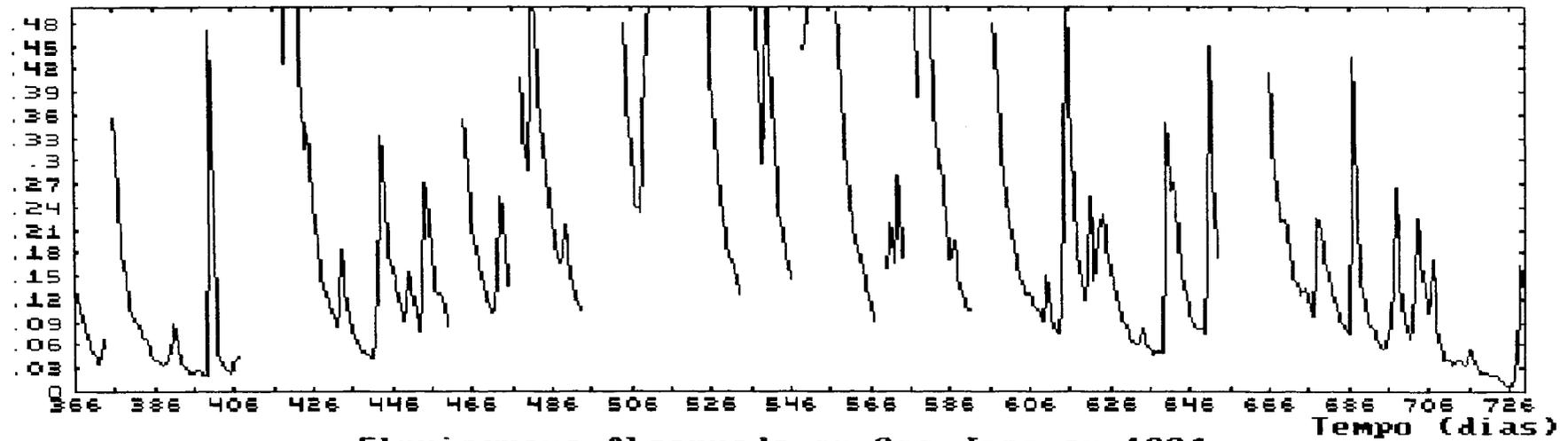
FIGURA **Bacia Hidrográfica e rede de drenagem – CALHA SÃO JACÓ**
 Saporanga - RS.

Uazio (m3/s)



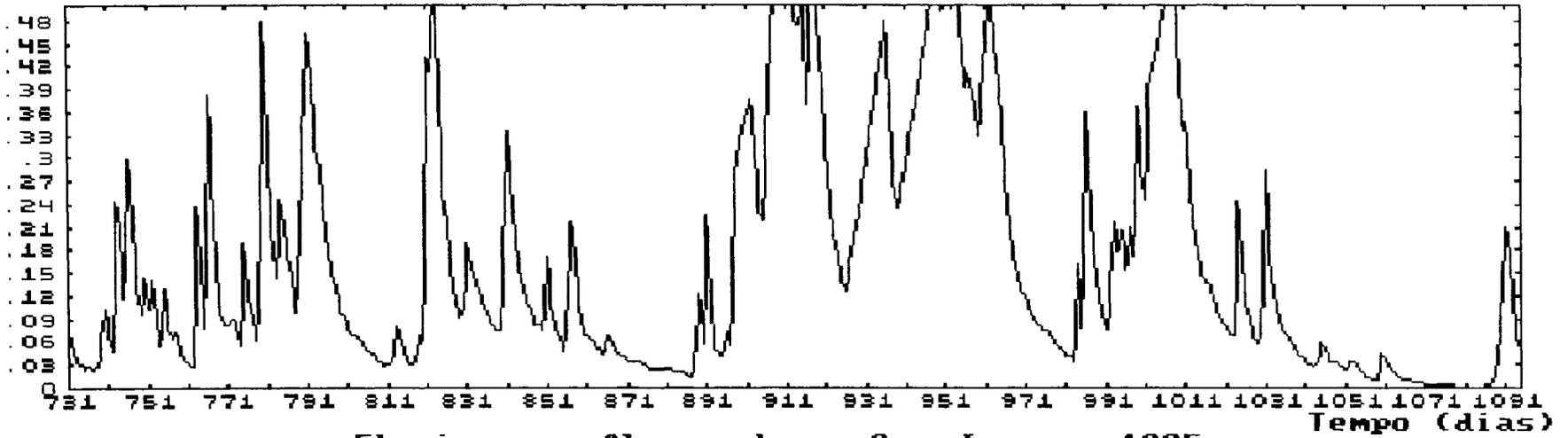
Fluviograma Observado em Sao Jaco em 1993

Uazio (m3/s)



Fluviograma Observado em Sao Jaco em 1994

Uazao (m3/s)



Fluviograma Observado em Sao Jaco em 1995

ANEXO A2

BACIA DE SCHNEIDER 1

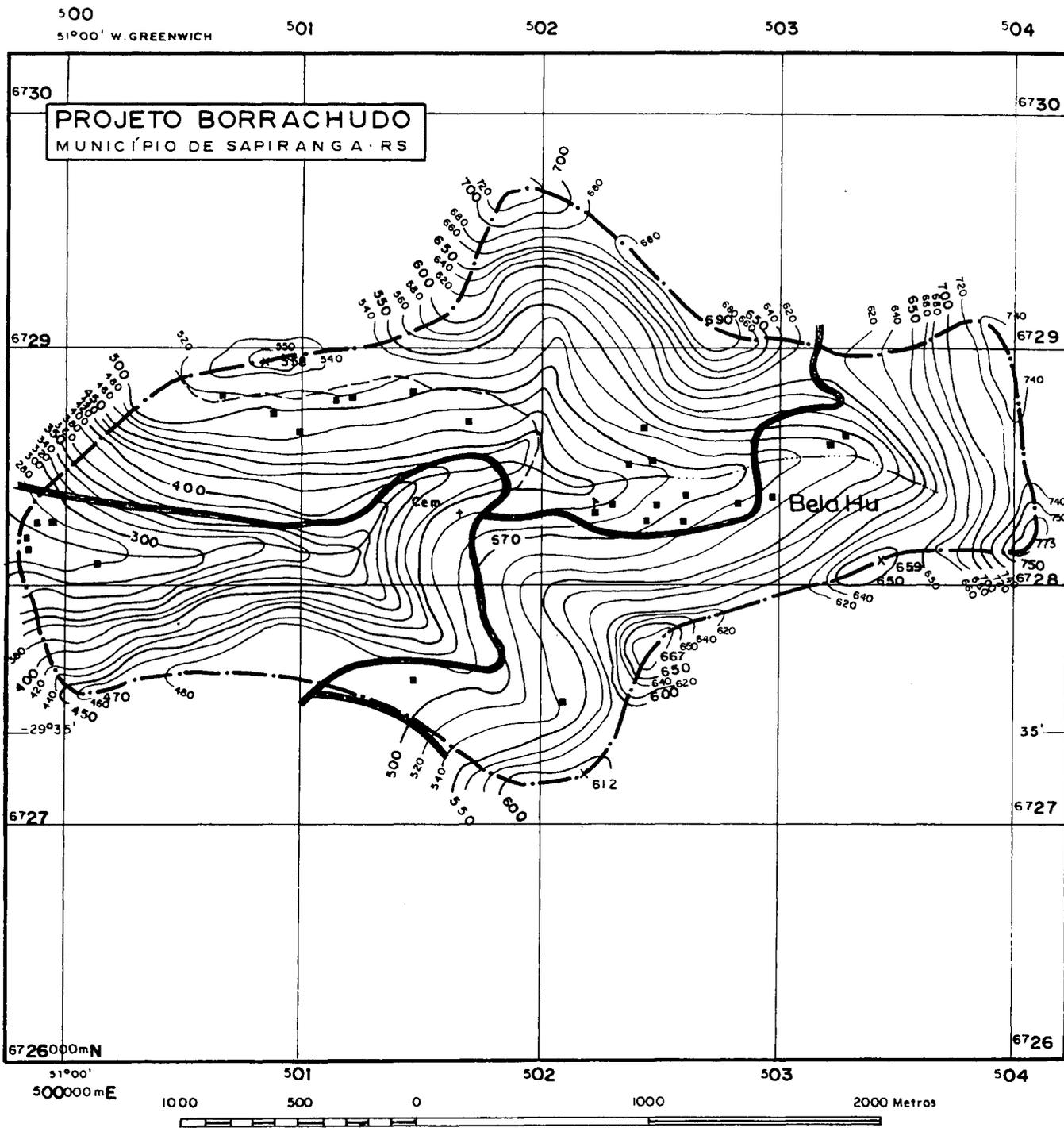
Paisagem da bacia hidrográfica.....	Fig. A2.1
Vista da calha.....	Fig. A2.2
Mapa plani-altimétrico da bacia.....	Fig. A2.3
Fluviograma observado.....	Fig. A2.4



Fig. Paisagem da Bacia Hidrográfica Contribuinte à Calha Schneider I

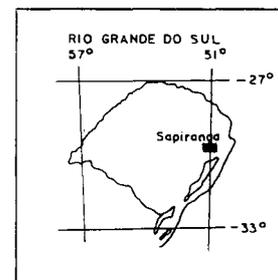


Fig. Vista da Calha Schneider I



PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
 ORIGEM DA QUILOMETRAGEM UTM "EQUADOR E MERIDIANO 54° W. GR."
 ACRESCIDAS AS CONSTANTES 10.000 KM E 500 KM RESPECTIVAMENTE

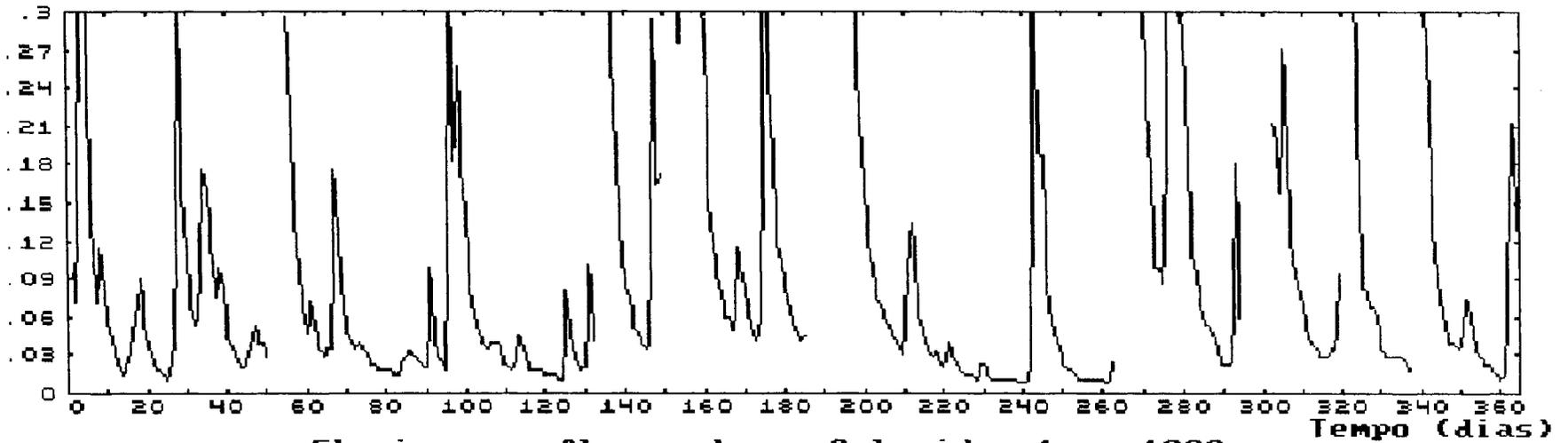
Desenho, diagramação e arte final: Des. Téc. Esp. ARTHUR HECTOR CUNHA



SITUAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA NO ESTADO

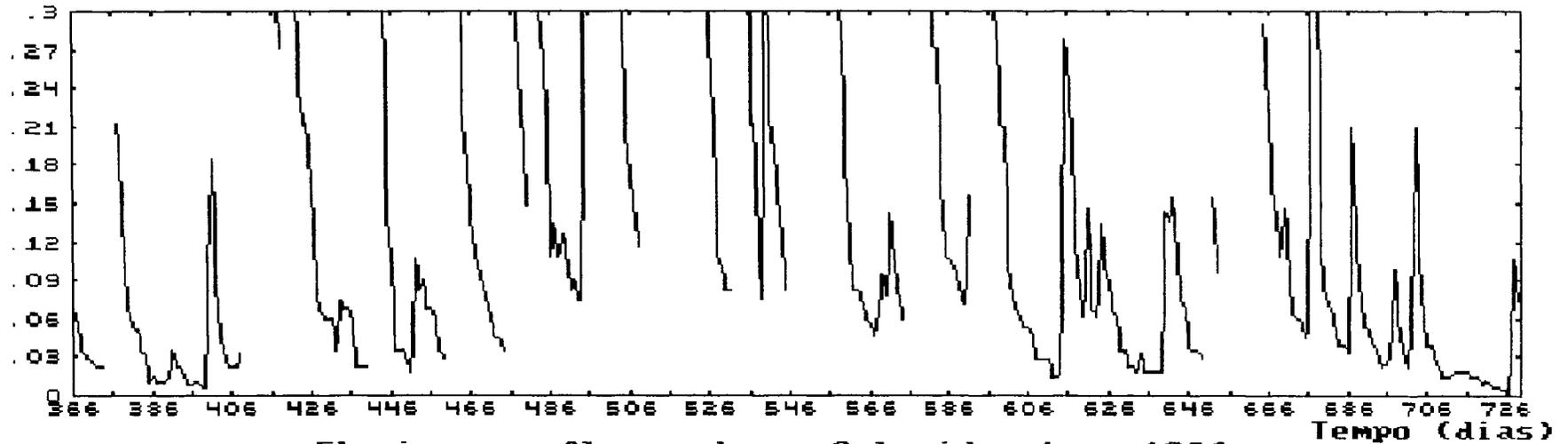
FIGURA 5 - Bacia Hidrográfica de Schneider I

Uazao (m³/s)



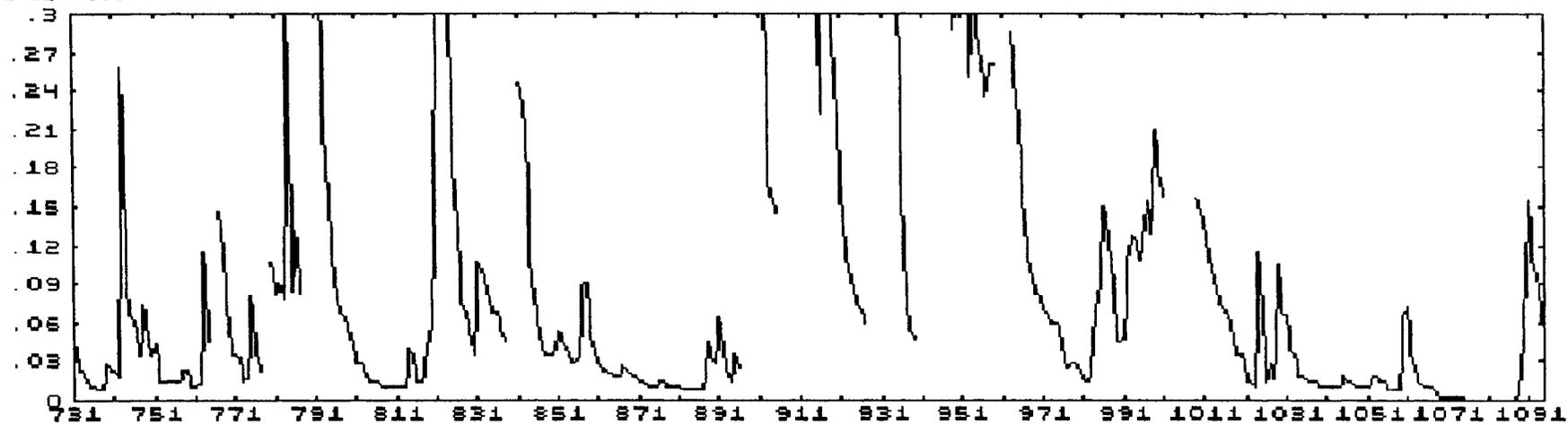
Fluviograma Observado em Schneider 1 em 1993

Uazao (m³/s)



Fluviograma Observado em Schneider 1 em 1994

Uazio (m³/s)



Fluviograma Observado em Schneider 1 em 1995

Tempo (dias)

ANEXO A3

BACIA DE SCHNEIDER 2

Paisagem da bacia hidrográfica.....	Fig. A3.1
Vista da calha.....	Fig. A3.2
Mapa plani-altimétrico da bacia.....	Fig. A3.3
Fluviograma observado.....	Fig. A3.4



Fig. Paisagem da Bacia Hidrográfica Contribuinte à Calha Schneider II



Fig. Vista da Calha Schneider II

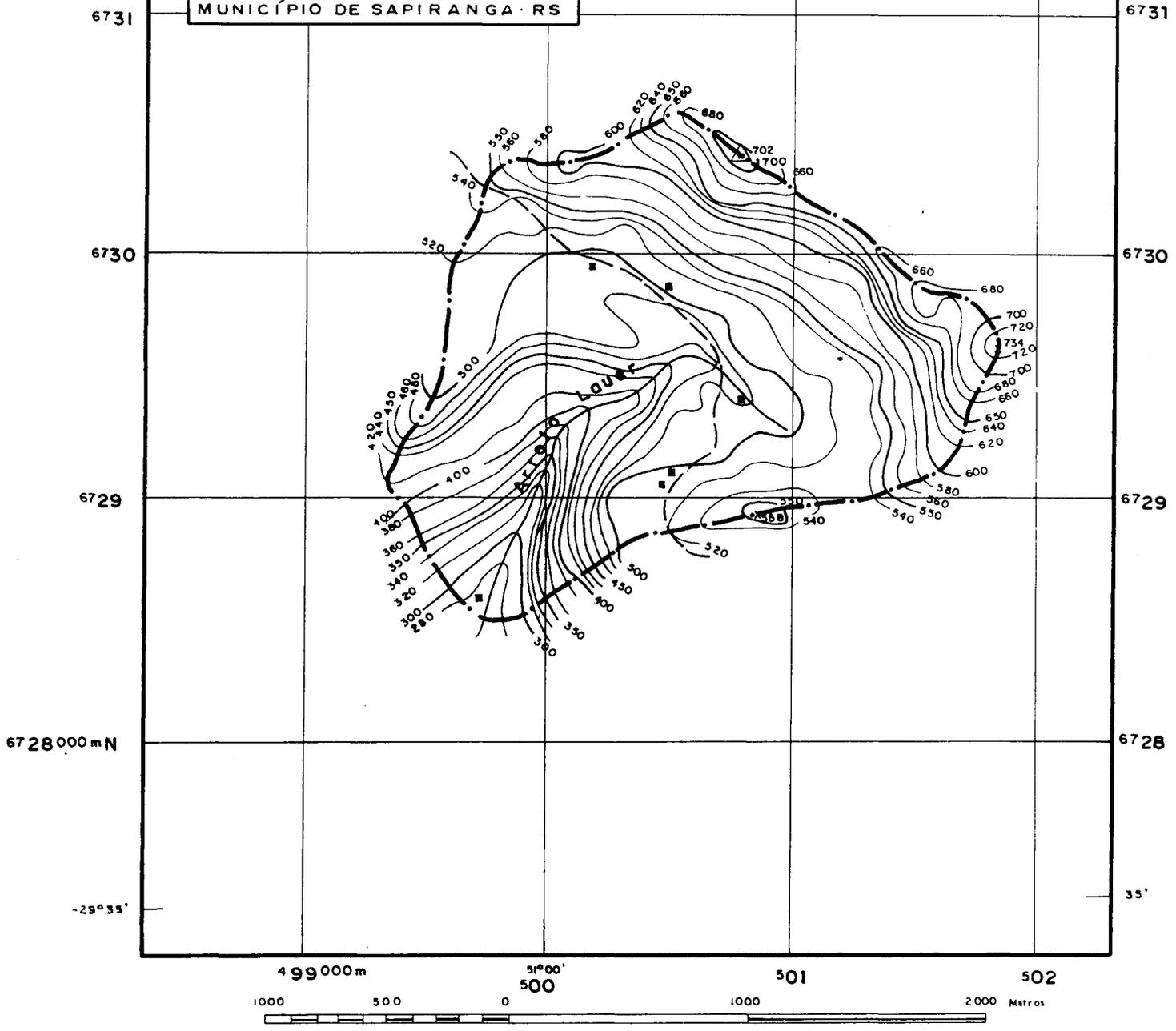
499

500
51°00' W. GREENWICH

501

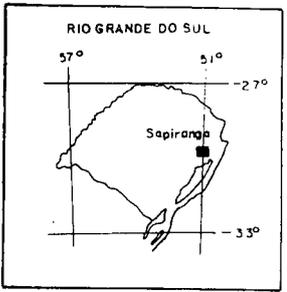
502

PROJETO BORRACHUDO
MUNICÍPIO DE SAPIRANGA - RS



PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
 ORIGEM DA QUILOMETRAGEM UTM "EQUADOR E MERIDIANO 54° W. GR."
 ACRESCIDAS AS CONSTANTES 10.000 KM E 500 KM RESPECTIVAMENTE

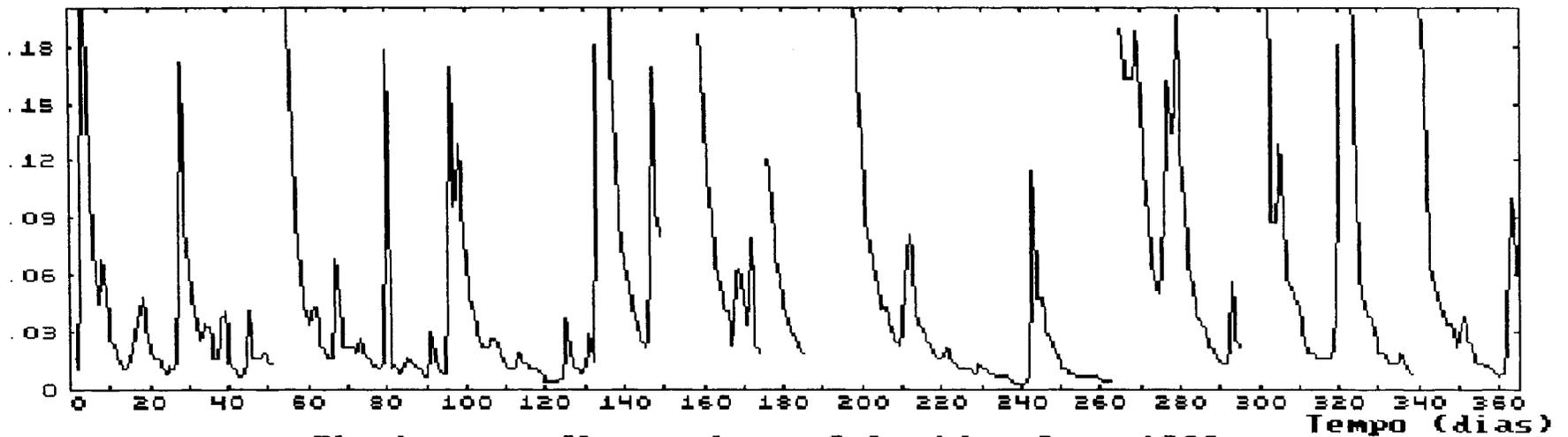
Desenho, diagramação e arte final: Des. Tec. Esp. ARTHUR HECTOR CUNHA



SITUAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA NO ESTADO

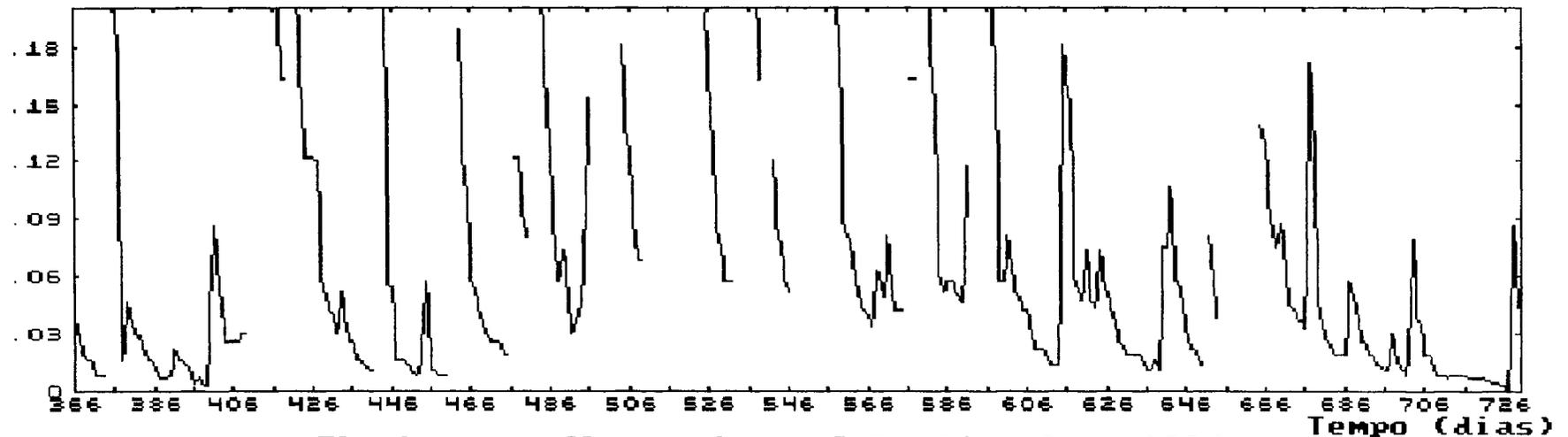
FIGURA **Bacia Hidrográfica e rede de drenagem – CALHA SCHNEIDER II - Sapiranga - RS.**

Uazao (m3/s)



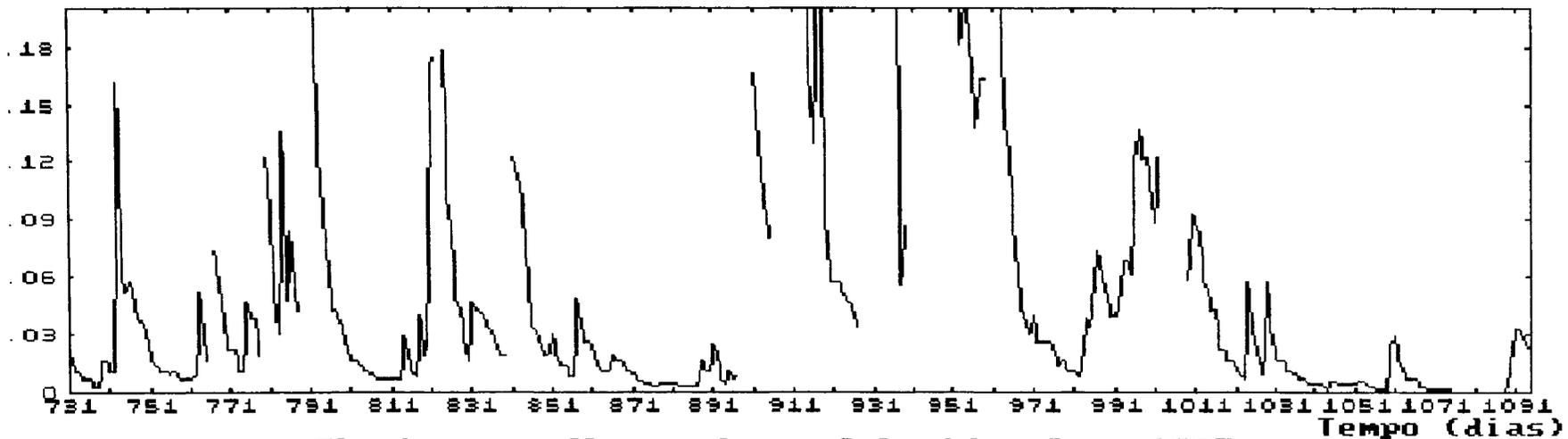
Fluviograma Observado em Schneider 2 em 1993

Uazao (m3/s)



Fluviograma Observado em Schneider 2 em 1994

Uazao (m³/s)



Fluviograma Observado em Schneider 2 em 1995

ANEXO A4

BACIA DE VALE DIREITO

Paisagem da bacia hidrográfica.....	Fig. A4.1
Vista da calha.....	Fig. A4.2
Mapa plani-altimétrico da bacia.....	Fig. A4.3
Fluviograma observado.....	Fig. A4.4



Fig. Paisagem da Bacia Hidrográfica Contribuinte à Calha Vale Direito

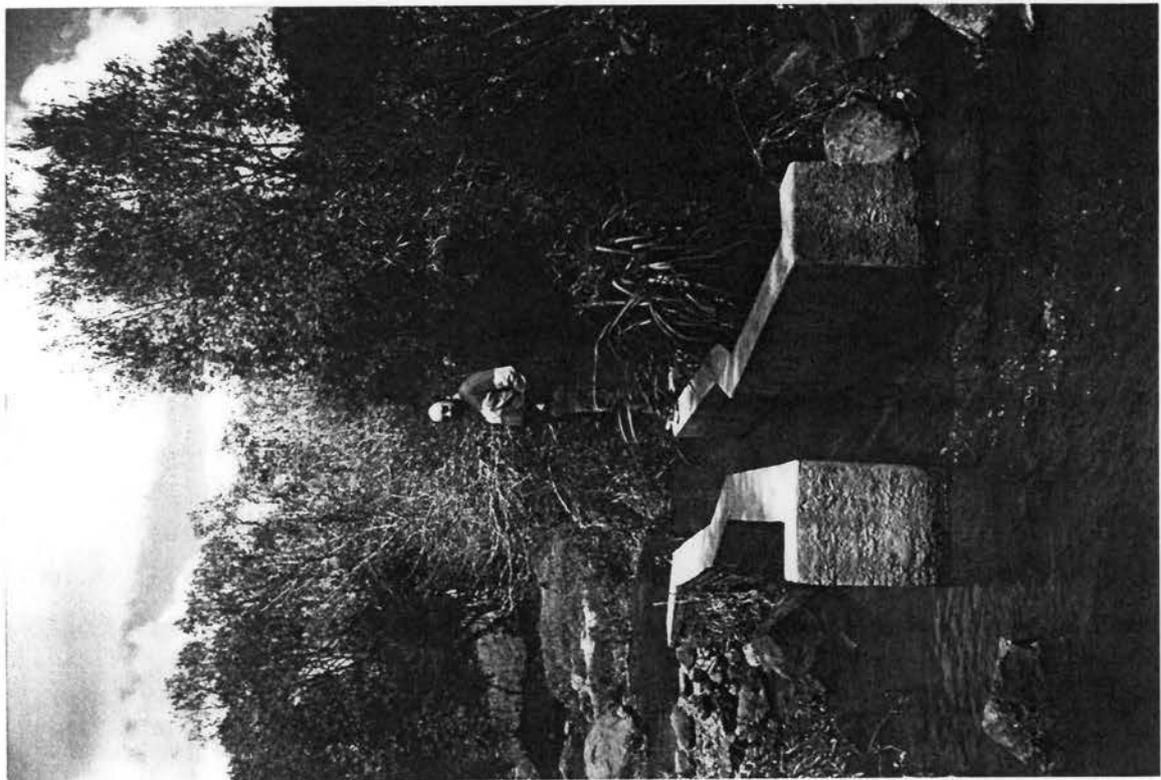
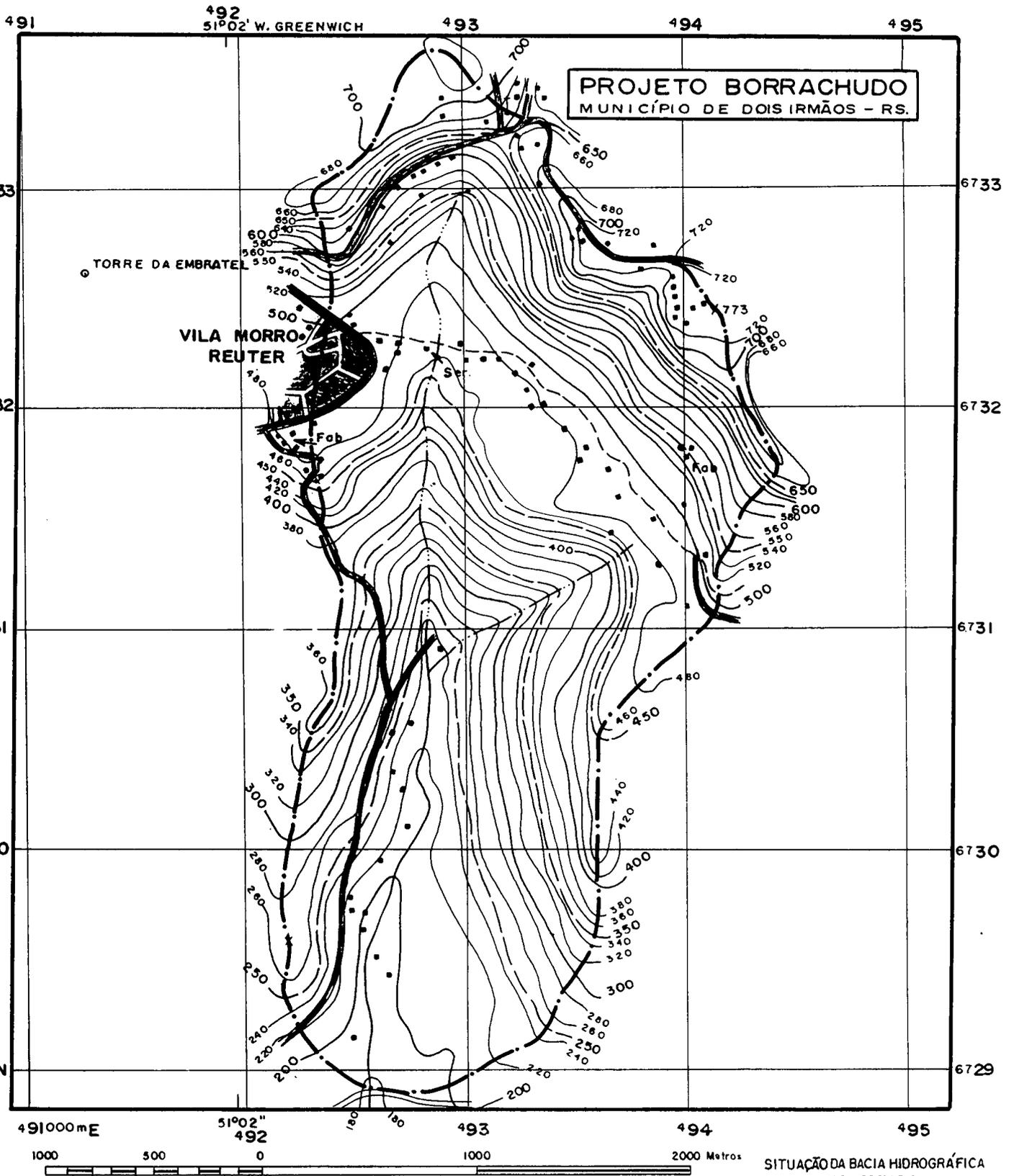


Fig. Vista da Calha Vale Direito



PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR

ORIGEM DA QUILOMETRAGEM UTM "EQUADOR E MERIDIANO 54° W. GR."

ACRESCIDAS AS CONSTANTES 10.000 KM E 500 KM RESPECTIVAMENTE

Desenho, diagramação e arte final: Des. Téc. Esp. ARTHUR HECTOR CUNHA

SITUAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA NO ESTADO

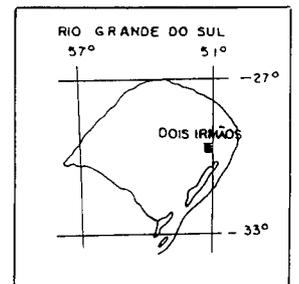
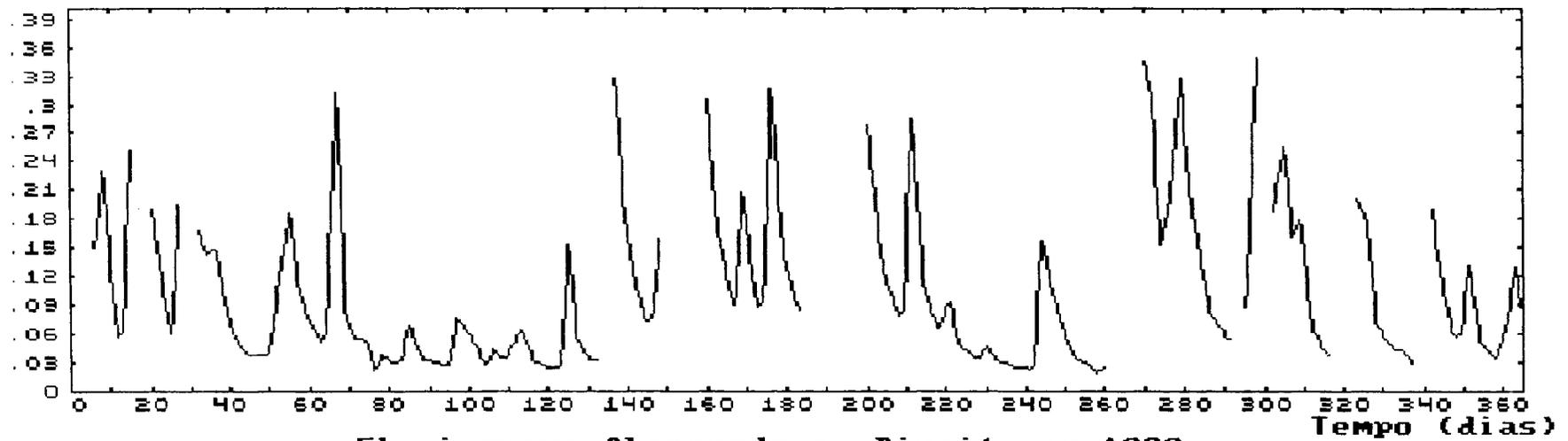


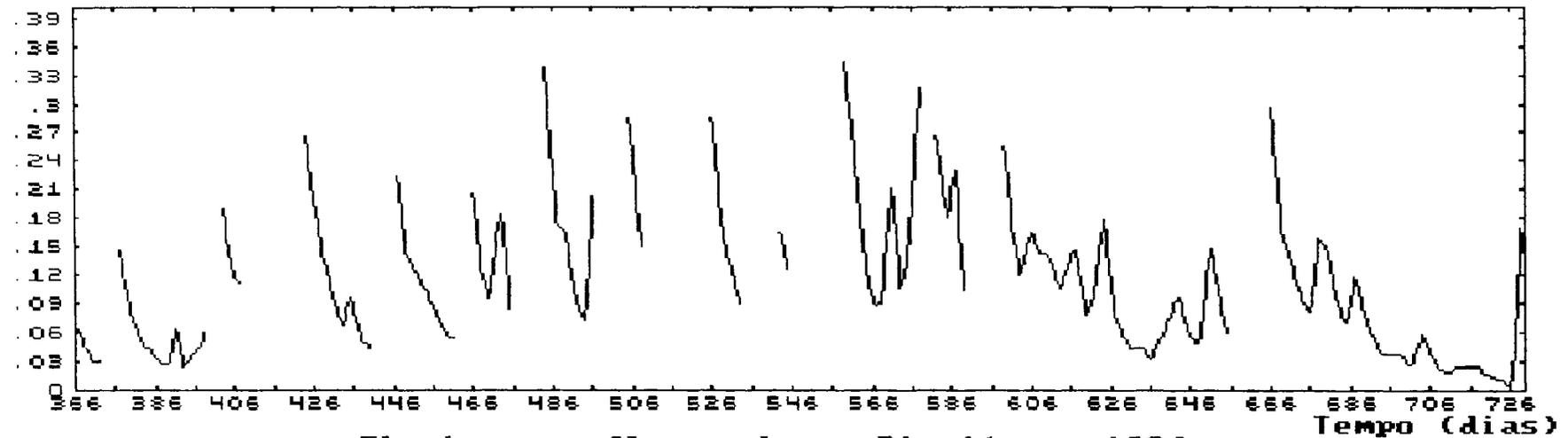
FIGURA Bacia Hidrográfica e rede de drenagem - CALHA VALE DIREITO - Dois Irmãos - RS.

Uzao (m³/s)



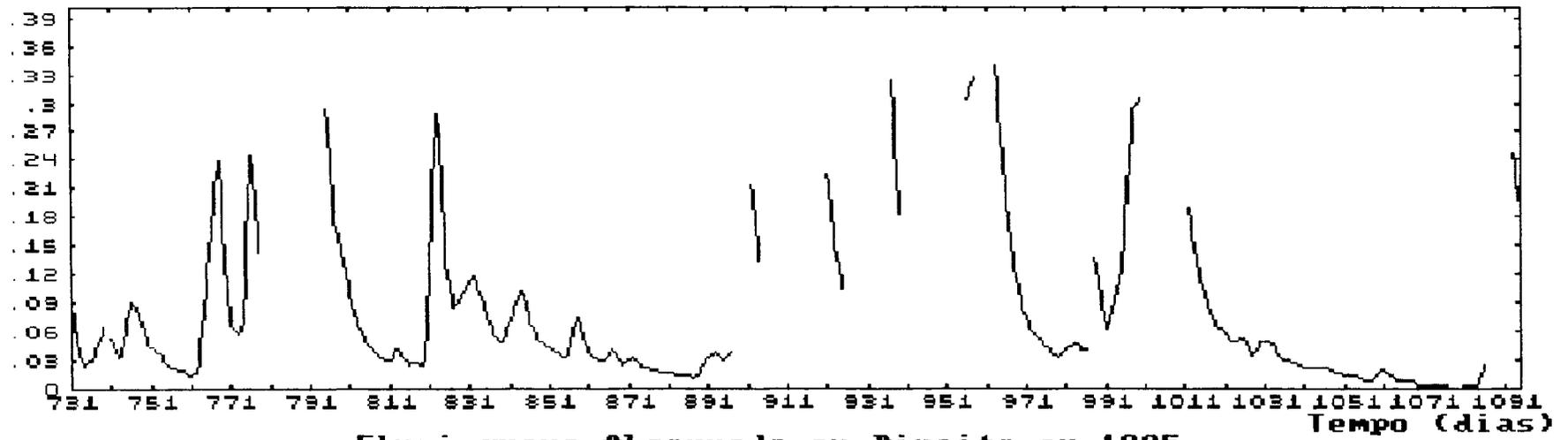
Fluviograma Observado em Direito em 1993

Uzao (m³/s)



Fluviograma Observado em Direito em 1994

Uzao (m³/s)



Fluviograma Observado em Direito em 1995

ANEXO A5

BACIA DE VALE ESQUERDO

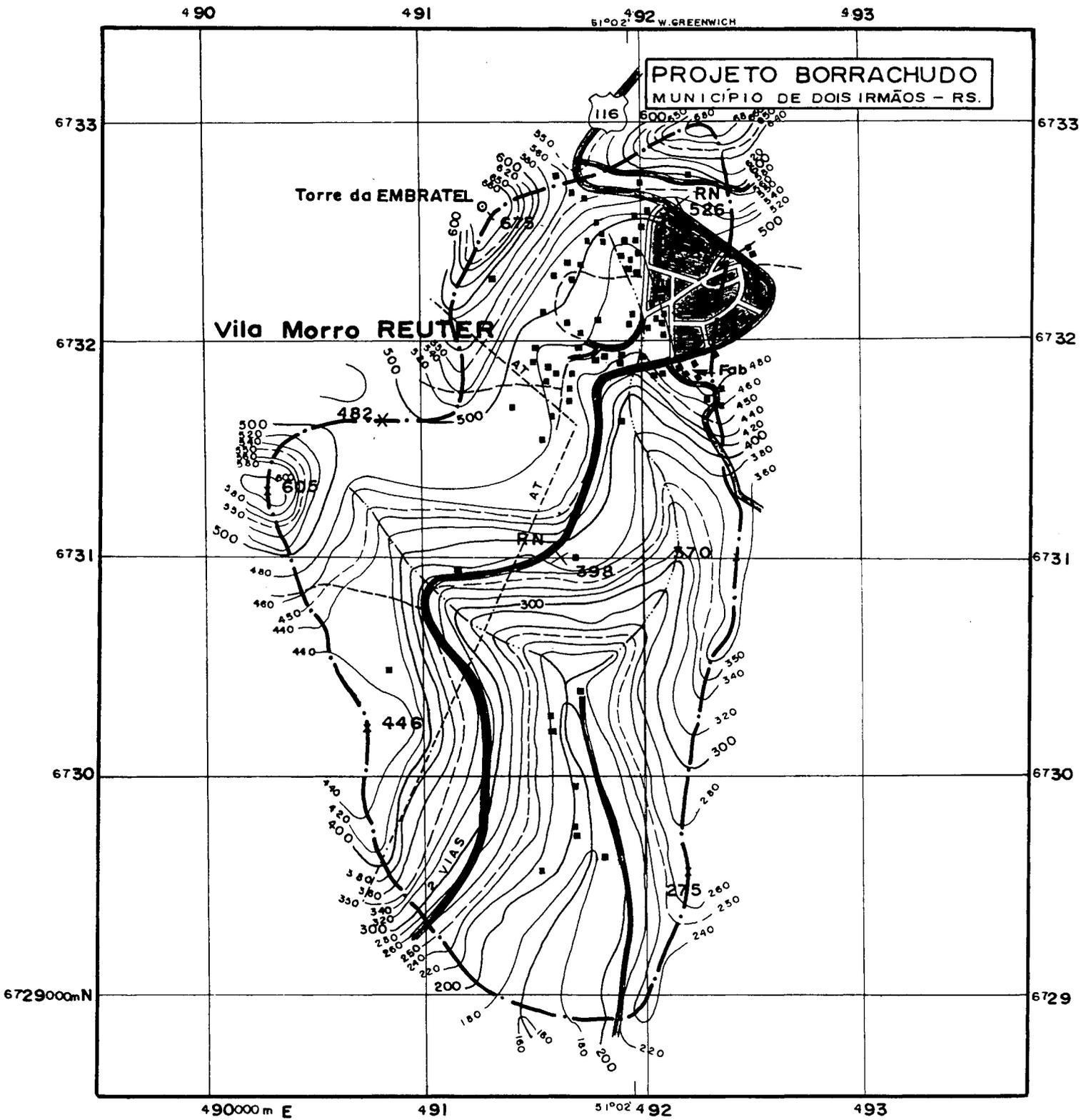
Paisagem da bacia hidrográfica.....	Fig. A5.1
Vista da calha.....	Fig. A5.2
Mapa plani-altimétrico da bacia.....	Fig. A5.3
Fluviograma observado.....	Fig. A5.4



Fig. Paisagem da Bacia Hidrográfica Contribuinte à Calha Vale Esquerdo



Fig. Vista da Calha Vale Esquerdo



PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
 ORIGEM DA QUILOMETRAGEM UTM "EQUADORE MERIDIANO 54° W. GR."
 ACRESCIDAS AS CONSTANTES 10.000KM E 500KM RESPECTIVAMENTE
 Desenho, diagramação e arte final: Des. Téc. Exp. ARTHUR HECTOR CUNHA

SITUAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA NO ESTADO

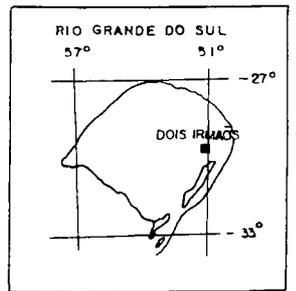
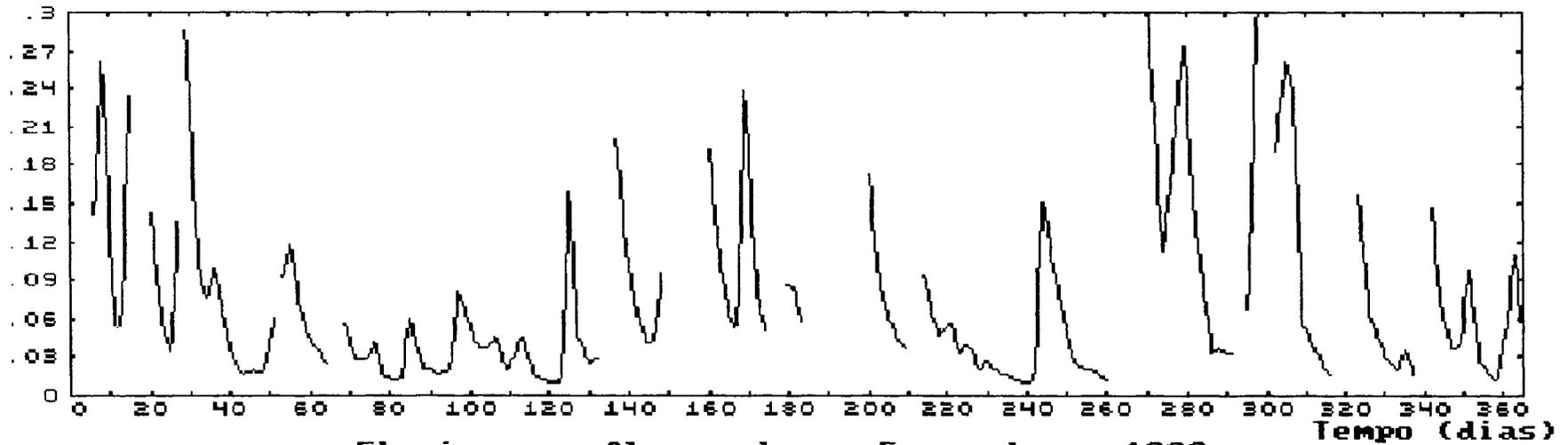


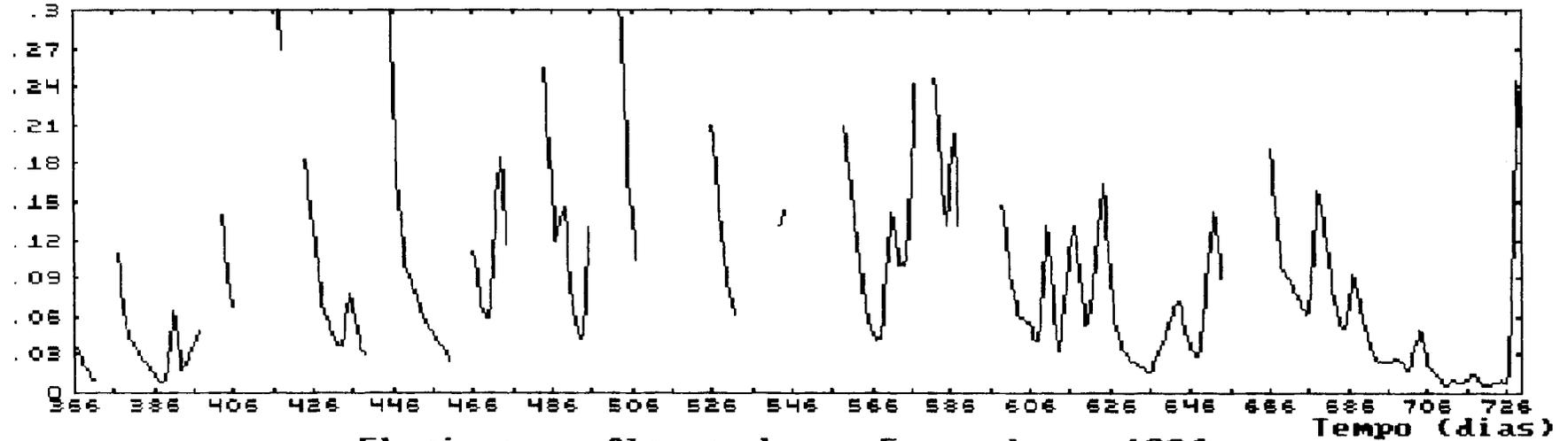
FIGURA **Bacia Hidrográfica e rede de drenagem - CALHA VALE ESQUERDO - Dois Irmãos - RS.**

Uazao (m³/s)



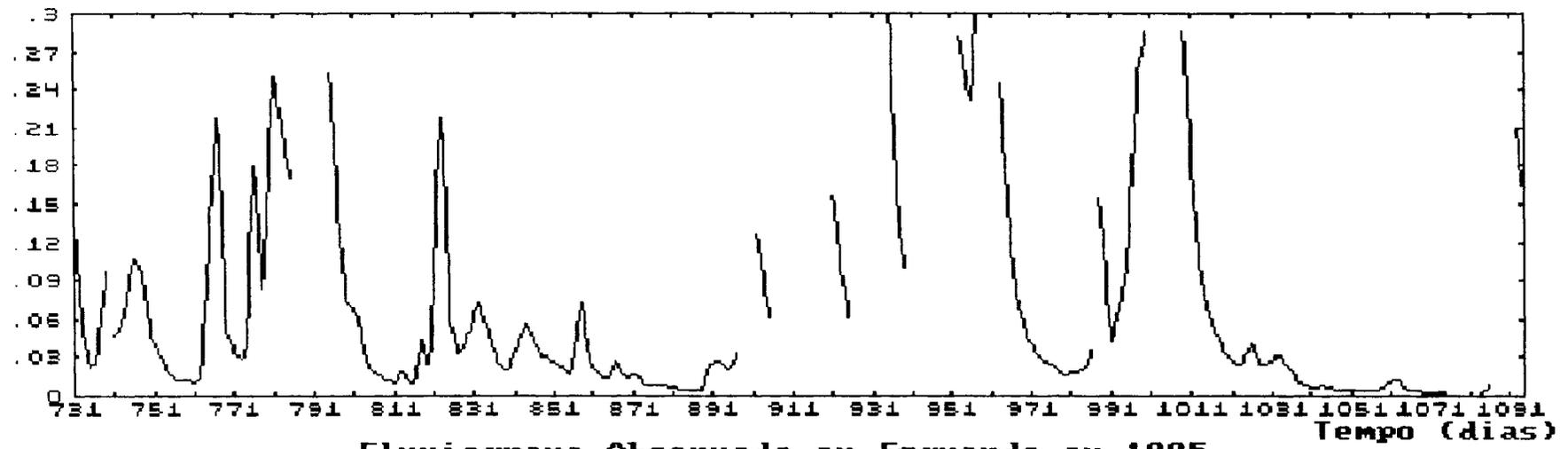
Fluviograma Observado em Esquerdo em 1993

Uazao (m³/s)



Fluviograma Observado em Esquerdo em 1994

Uazao (m3/s)



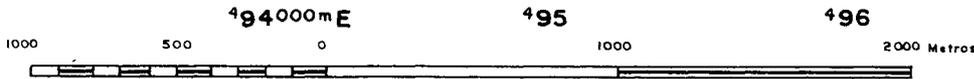
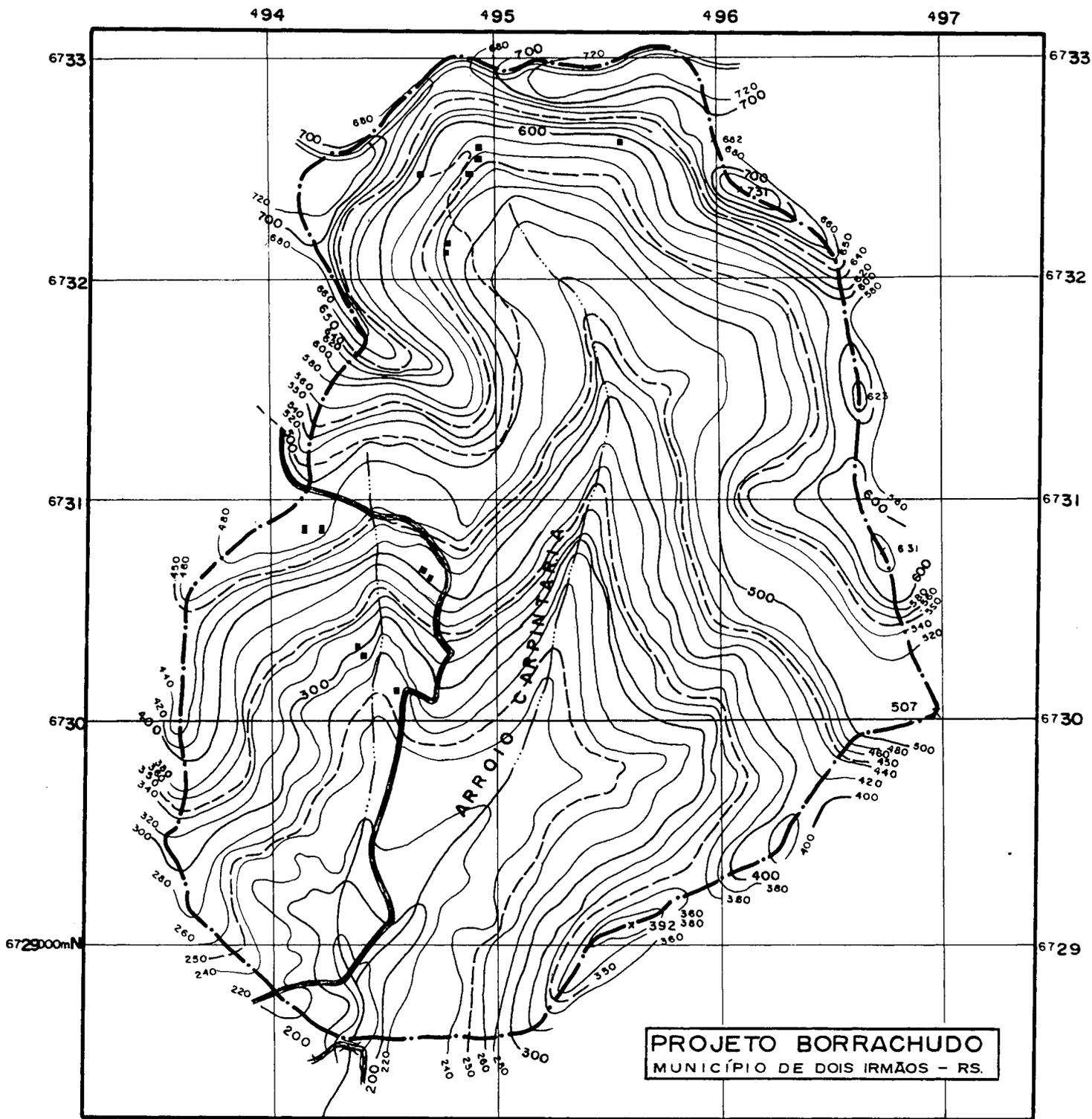
Fluviograma Observado em Esquerdo em 1995

ANEXO A6

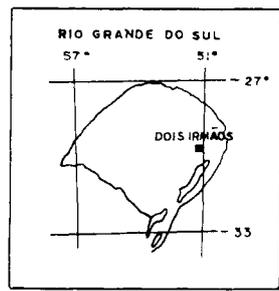
BACIA DE CARPINTARIA

Mapa plani-altimétrico da bacia.....Fig. A6.1

Fluviograma observado.....Fig. A6.2



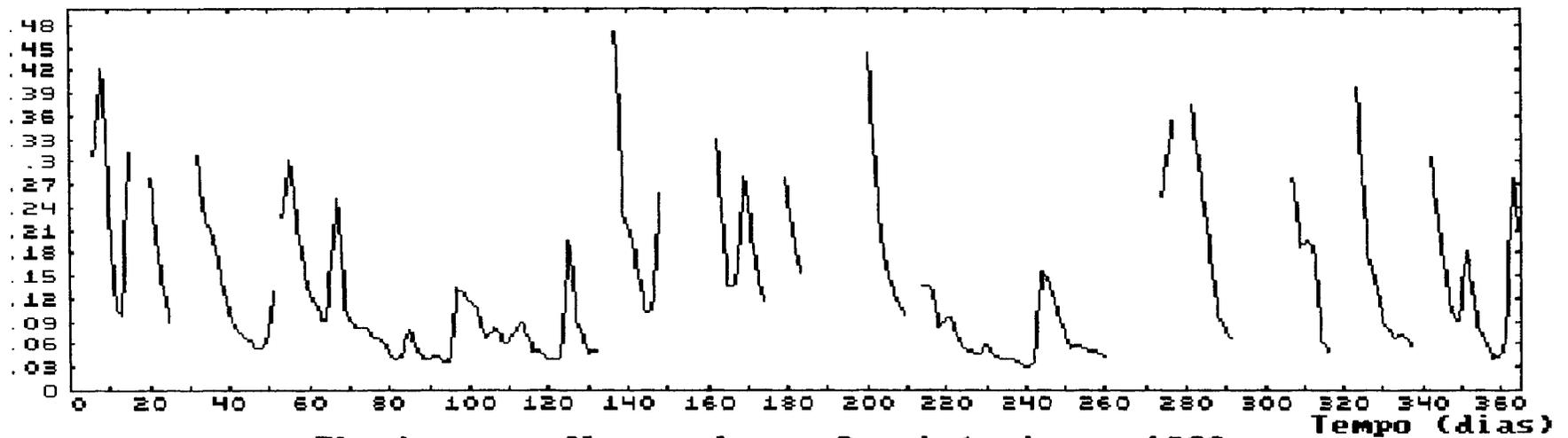
SITUAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA NO ESTADO



PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
 ORIGEM DA QUILOMETRAGEM UTM "EQUADORE MERIDIANO 54° W. GR."
 ACRESCIDAS AS CONSTANTES 10.000KM E 500KM RESPECTIVAMENTE
 Desenho, diagramação e arte final: Des. Téc. Esp. ARTHUR HECTOR CUNHA

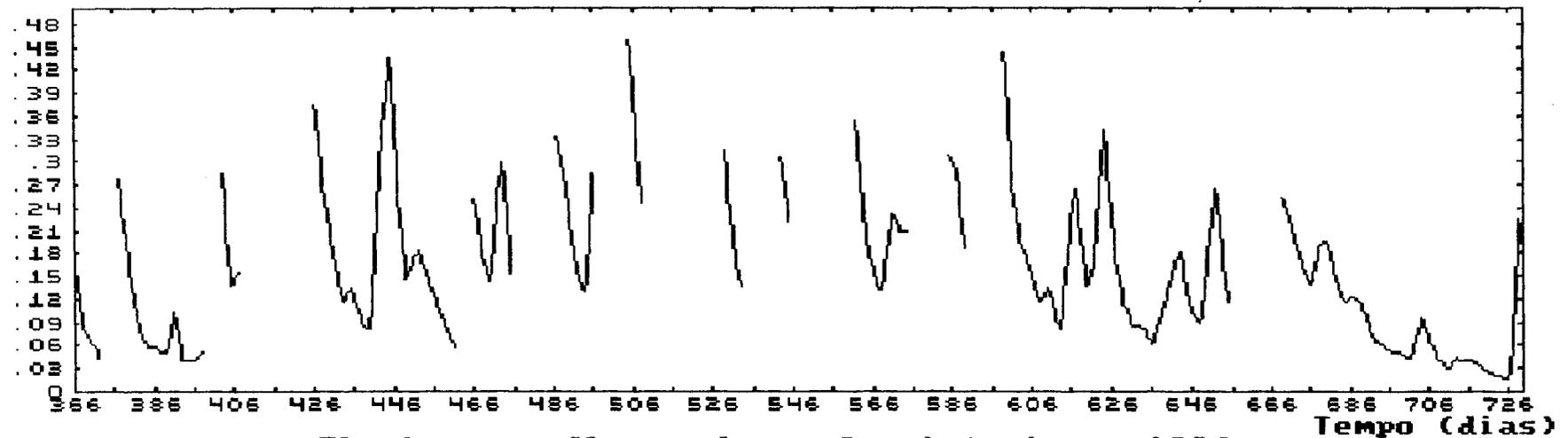
FIGURA **Bacia Hidrográfica e rede de drenagem - CALHA CARPINTARIA**
 Dois Irmãos - RS.

Uazao (m3/s)



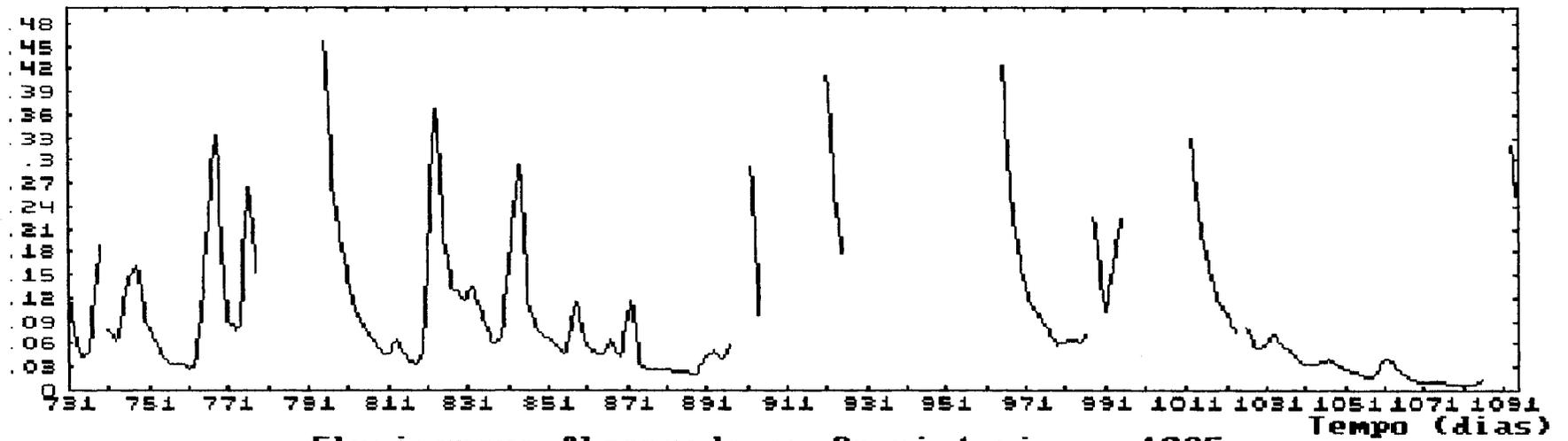
Fluviograma Observado em Carpintaria em 1993

Uazao (m3/s)



Fluviograma Observado em Carpintaria em 1994

Uazao (m3/s)



Fluviograma Observado em Carpintaria em 1995

ANEXO A7

BACIA DE LINHA BRASIL

Paisagem da bacia hidrográfica.....	Fig. A7.1
Vista da calha.....	Fig. A7.2
Mapa plani-altimétrico da bacia.....	Fig. A7.3
Fluviograma observado.....	Fig. A7.4



Fig. Paisagem da Bacia Hidrográfica Contribuinte à Calha Linha Brasil

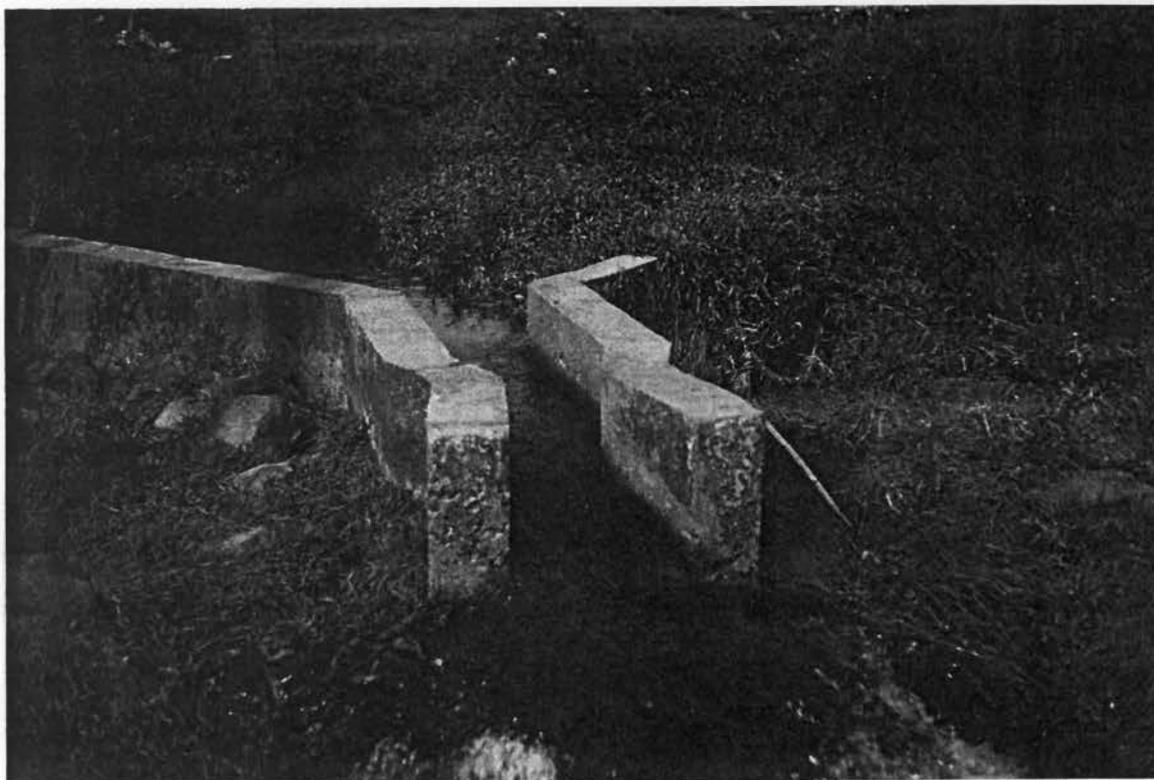
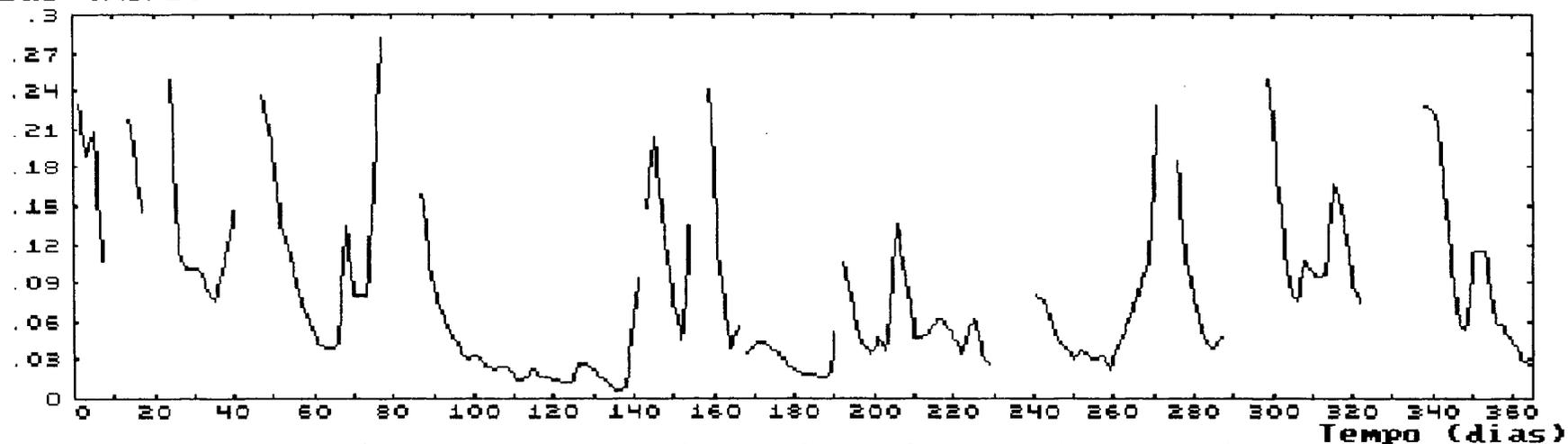


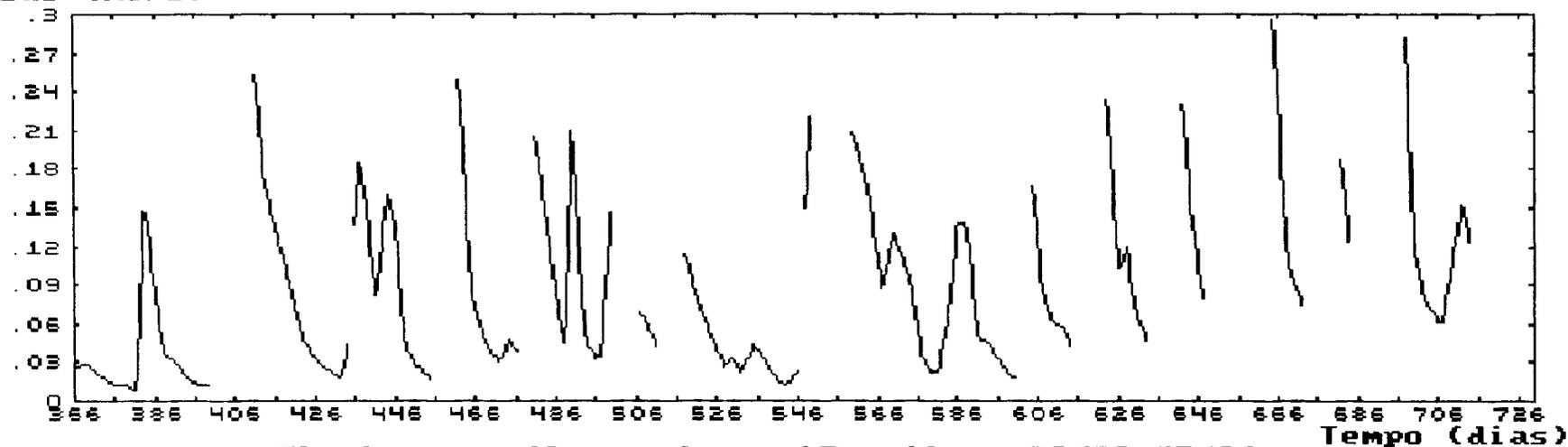
Fig. Vista da Calha Linha Brasil

Uazao (m3/s)



Fluviograma Observado em LBrasil em 08/92-07/93

Uazao (m3/s)



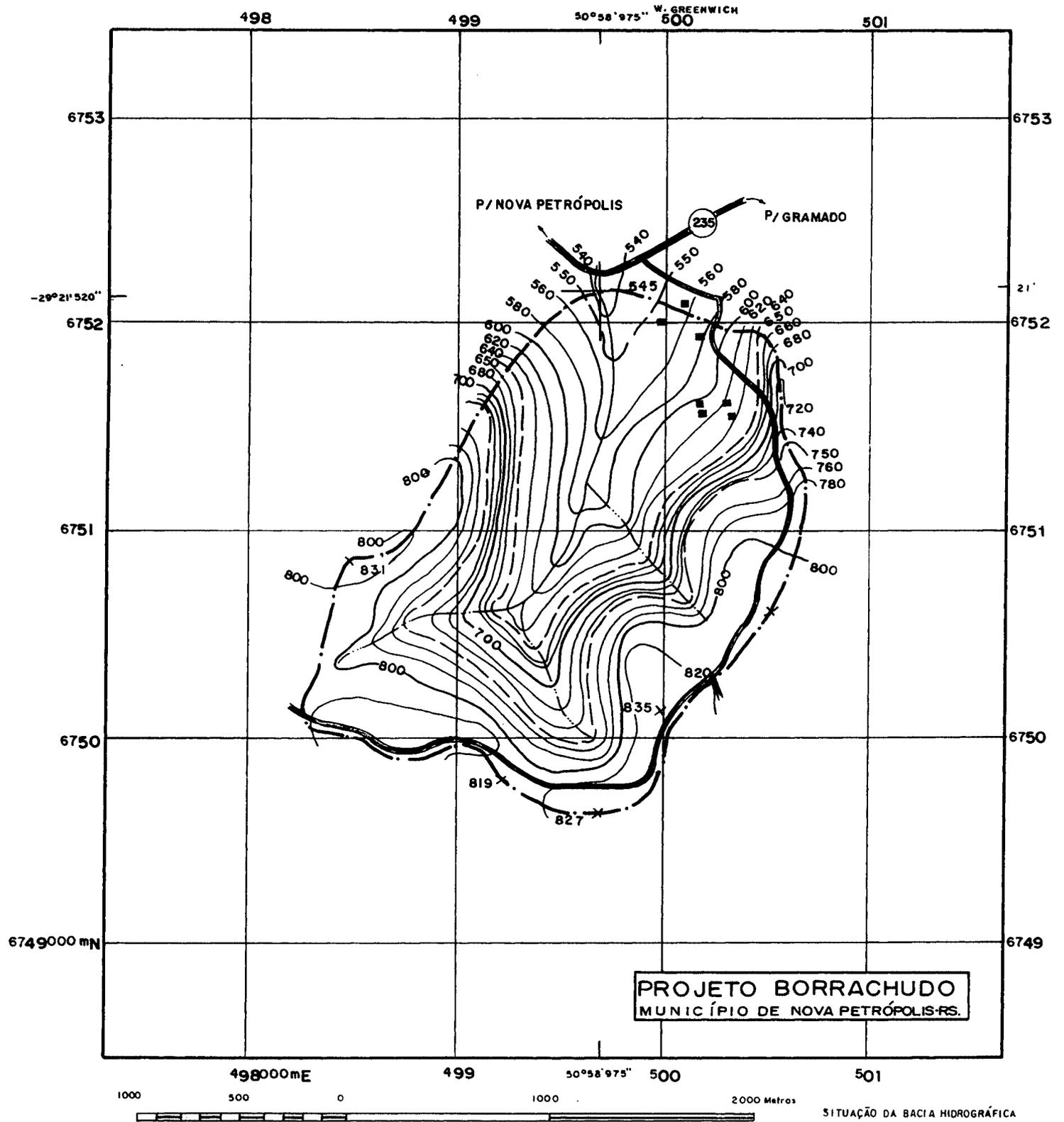
Fluviograma Observado em LBrasil em 08/93-07/94

ANEXO A8

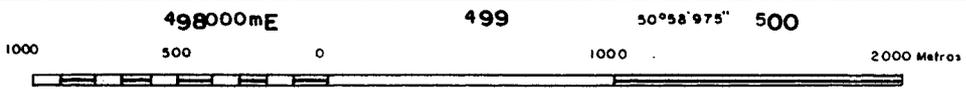
BACIA DE LINHA ARARIPE

Mapa plani-altimétrico da bacia.....Fig. A8.1

Fluviograma observado.....Fig. A8.2



PROJETO BORRACHUDO
MUNICÍPIO DE NOVA PETRÓPOLIS-RS.



PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
ORIGEM DA QUILOMETRAGEM UTM "EQUADOR E MERIDIANO 51° W. GR"
ACRESCIDAS AS CONSTANTES 10.000 KM E 500 KM, RESPECTIVAMENTE.
Desenho, diagramação e arte final: Des. Téc. Esp. ARTHUR HECTOR CUNHA

SITUAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA NO ESTADO

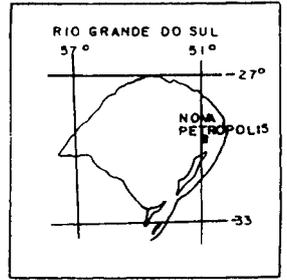
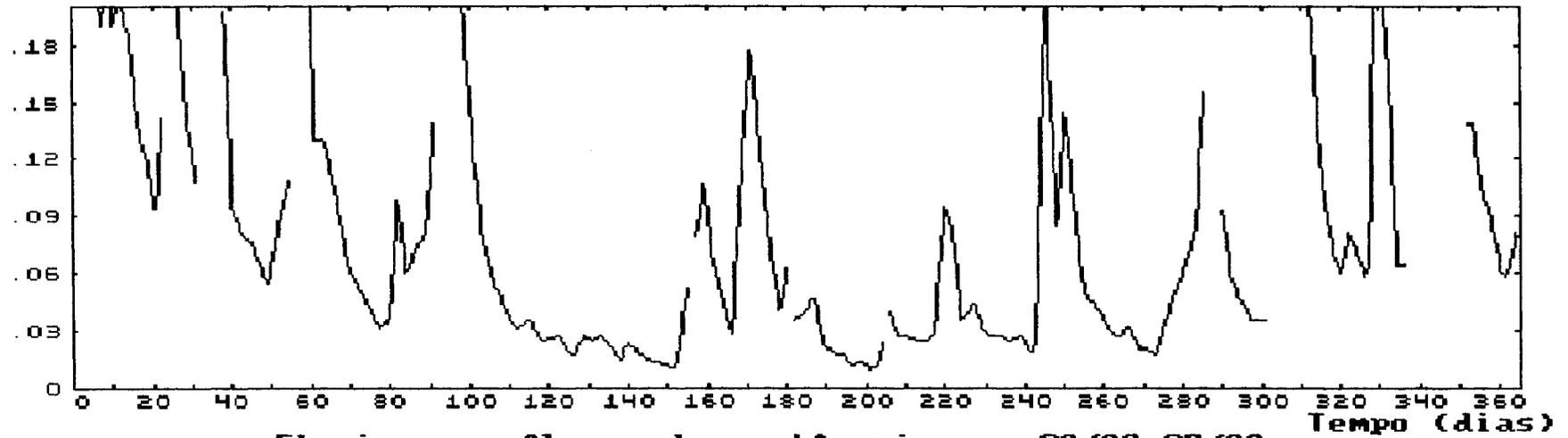
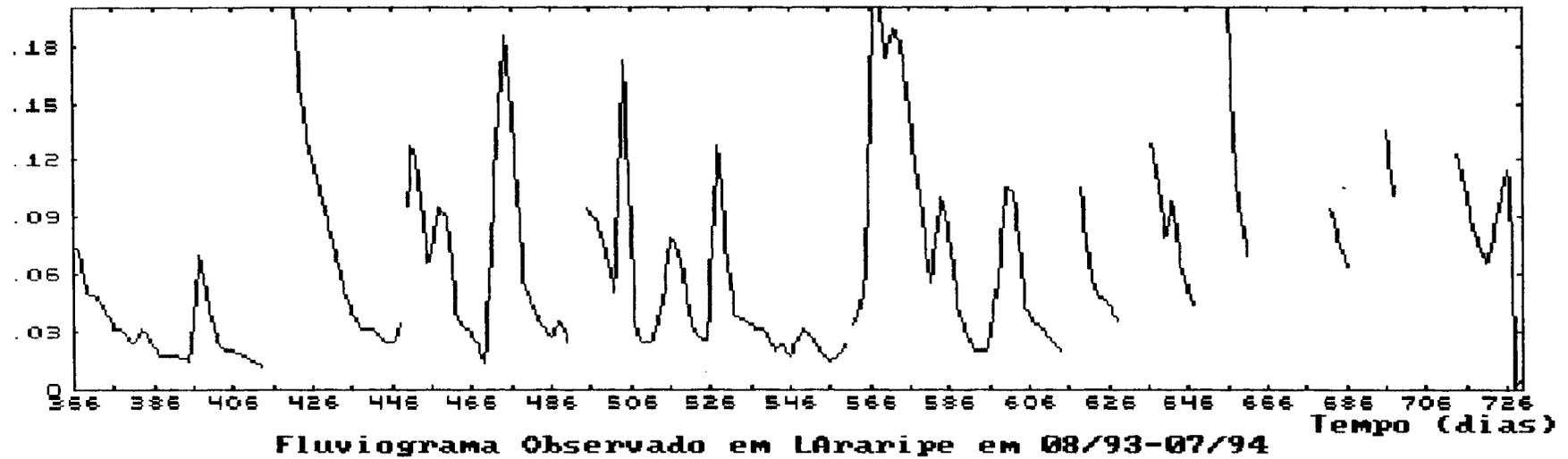


FIGURA **Bacia Hidrográfica e rede de drenagem - CALHA LINHA ARÁRIPE · NOVA PETROPOLIS - RS.**

Uazao (m3/s)



Uazao (m3/s)

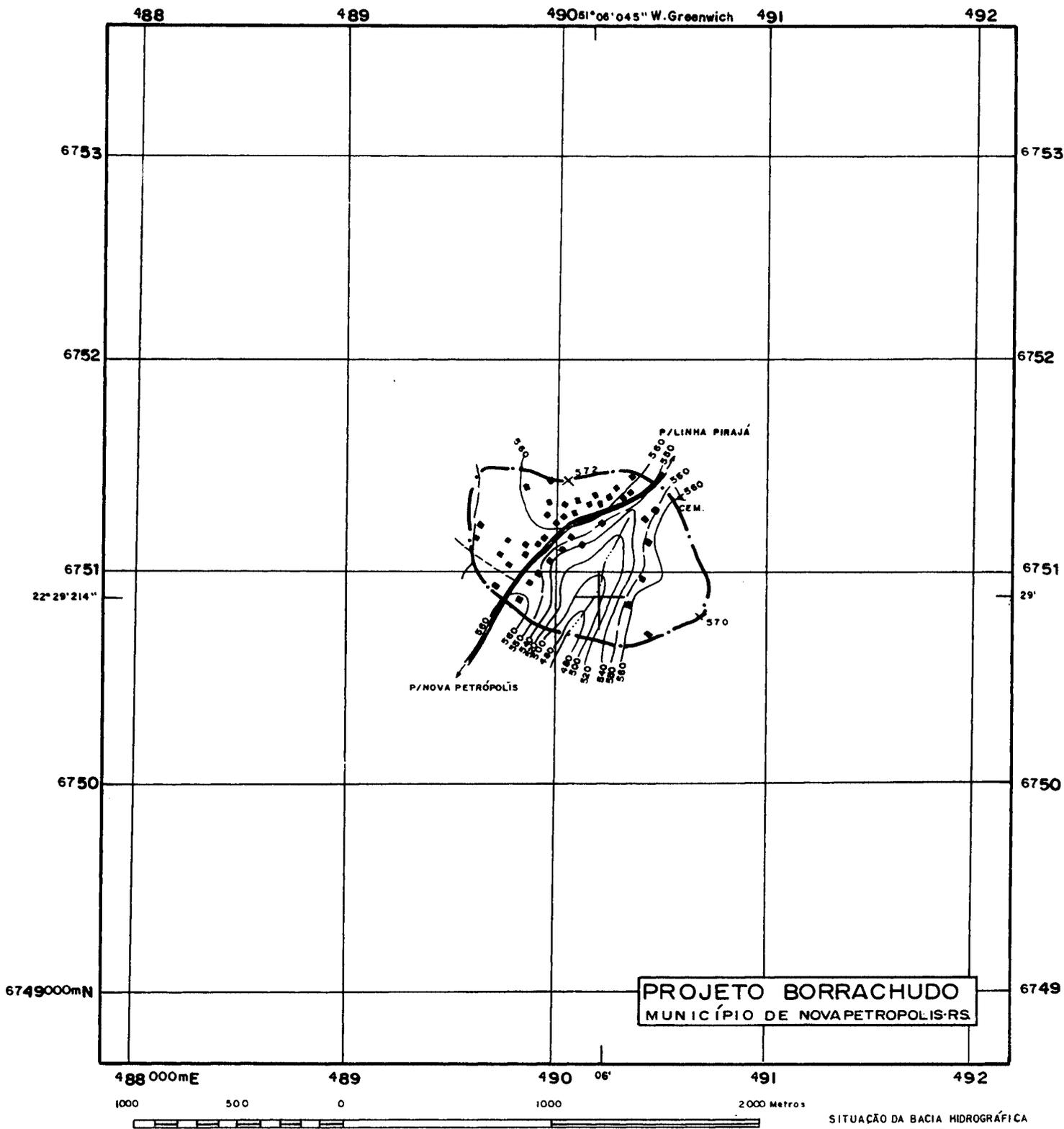


ANEXO A9

BACIA DE RECANTO SUIÇO

Mapa plani-altimétrico da bacia.....Fig. A9.1

Fluviograma observado.....Fig. A9.2



PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR

ORIGEM DA QUILOMETRAGEM UTM " EQUADOR E MERIDIANO 54° W. GR. "

ACRESCIDAS AS CONSTANTES 10.000KM E 500KM. RESPECTIVAMENTE

Desenho, diagramação e arte final: Des. Téc. Esp. ARTHUR HECTOR CUNHA

SITUAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA NO ESTADO

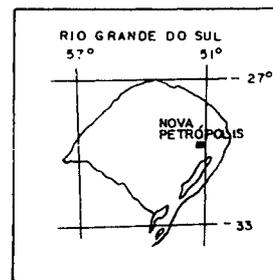
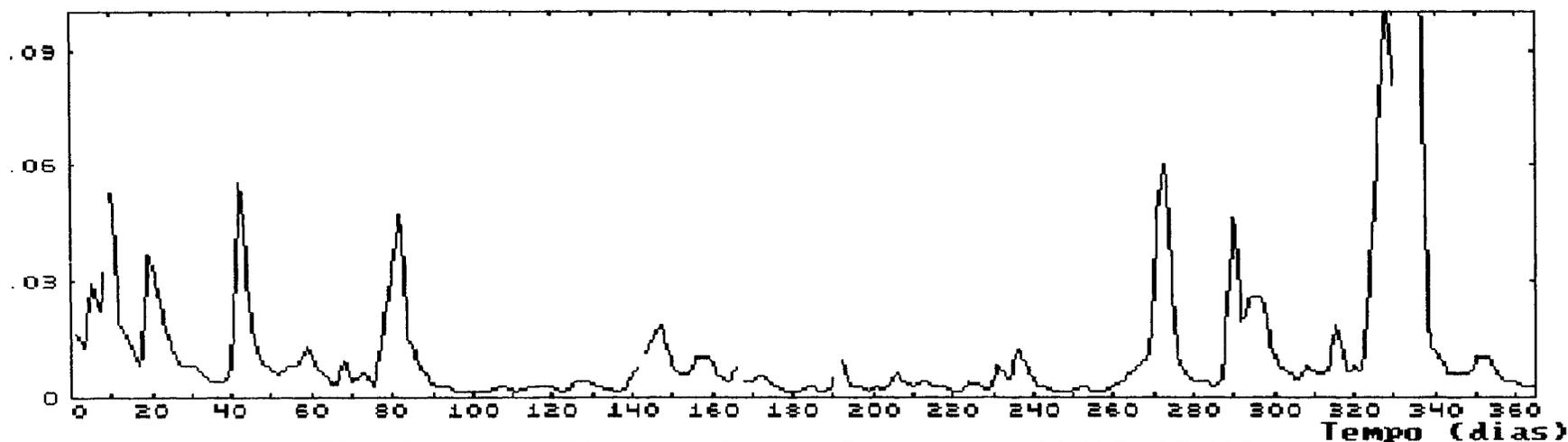


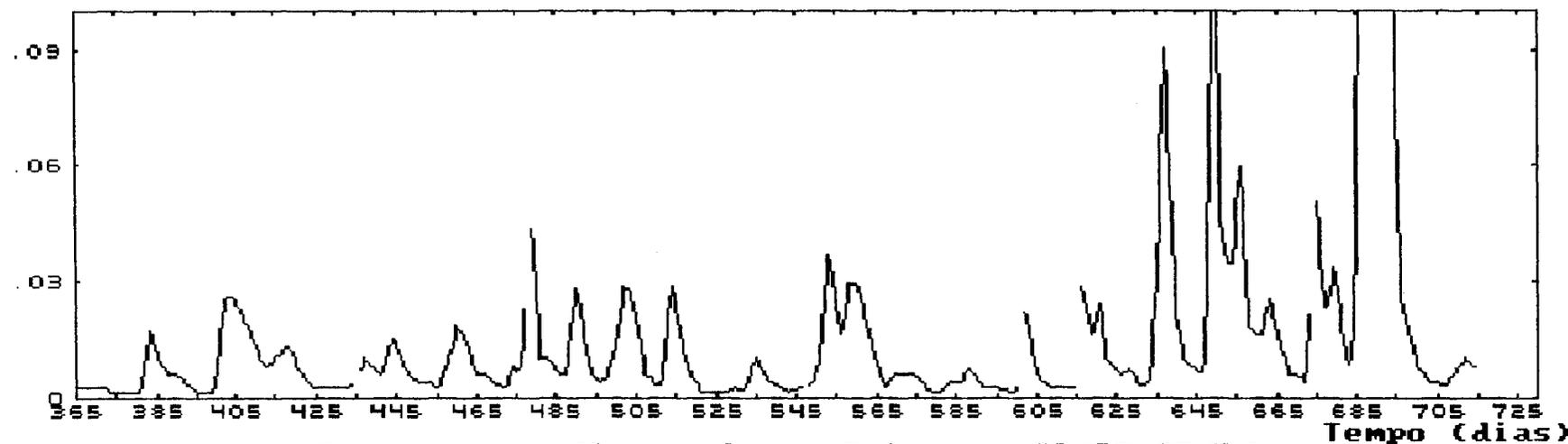
FIGURA **Bacia Hidrográfica e rede de drenagem - CALHA RECANTO SUÍÇO - Nova Petrópolis - RS.**

Uazao (m³/s)



Fluviograma Observado em Suico em 08/92-07/93

Uazao (m³/s)

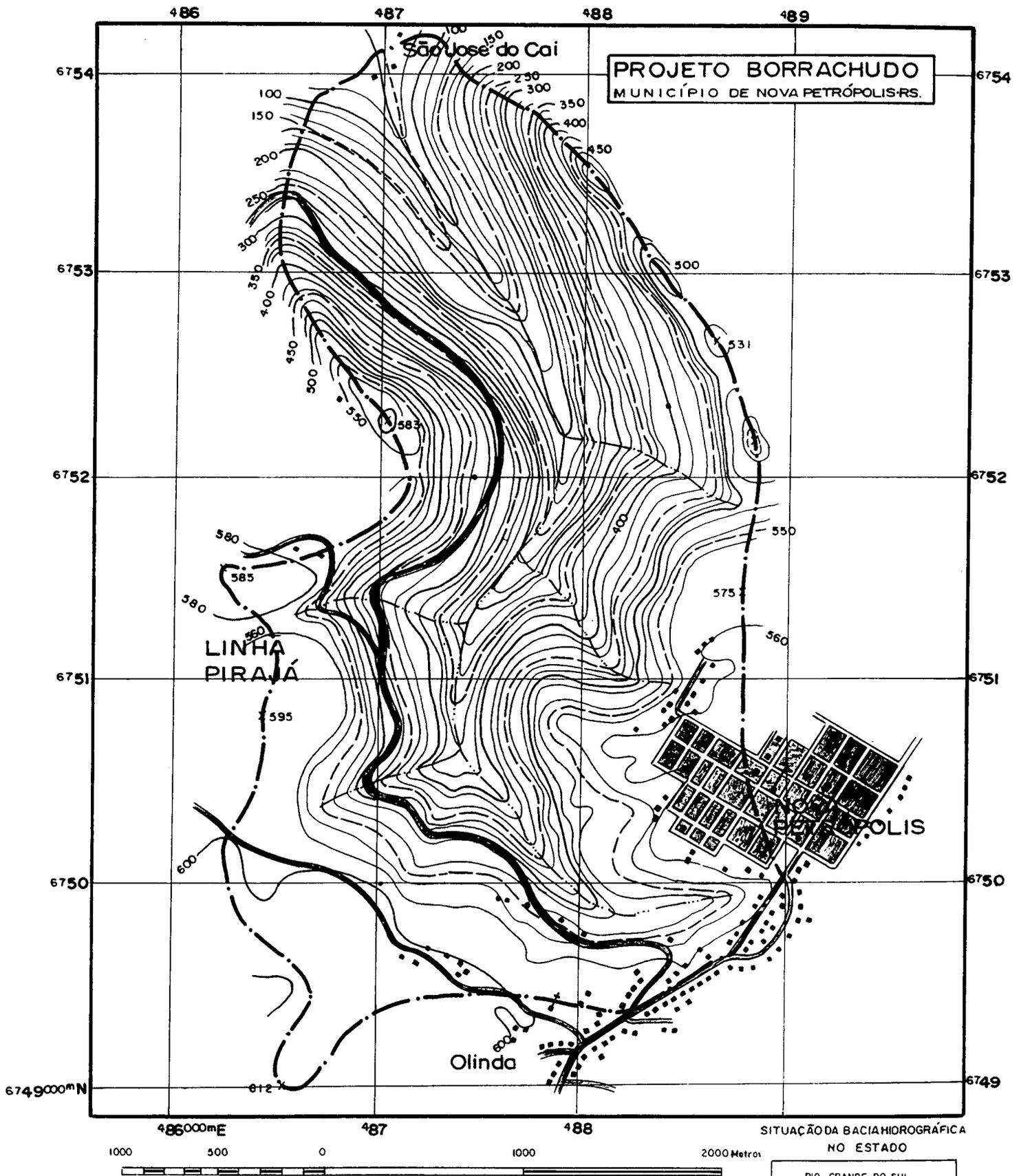


Fluviograma Observado em Suico em 08/93-07/94

ANEXO A10

BACIA DE SÃO JOSÉ DO CAÍ

Mapa plani-altimétrico da bacia.....	Fig. A10.1
Fluviograma observado.....	Fig. A10.2

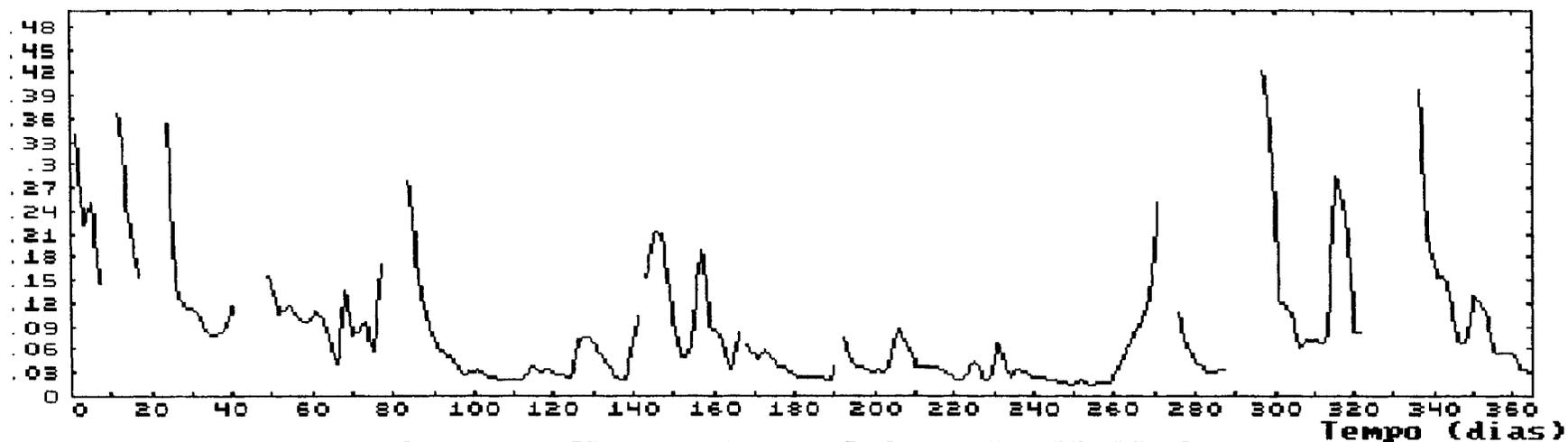


PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
 ORIGEM DA QUILOMETRAGEM UTM "EQUADOR E MERIDIANO 54° W. GR."
 ACRESCIDAS AS CONSTANTES 10.000 KM E 500 KM RESPECTIVAMENTE

Desenho, diagramação e arte final: Des. Téc. Exp. ARTHUR HECTOR CUNHA

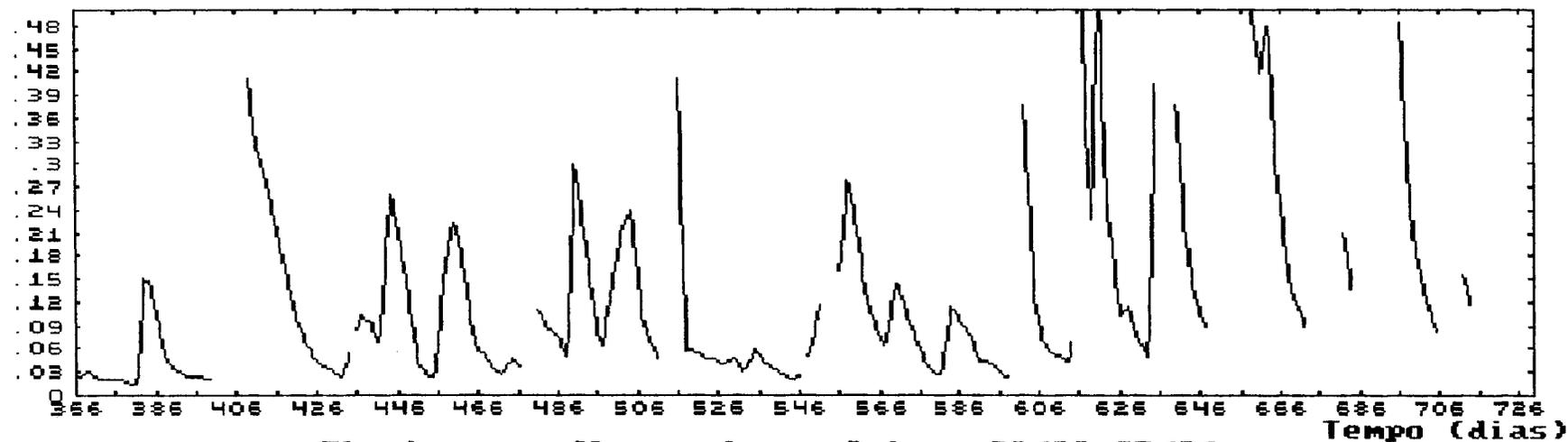
FIGURA **Bacia Hidrográfica e rede de drenagem – CALHA SÃO JOSÉ DO CAÍ · Nova Petrópolis – RS.**

Uazao (m3/s)



Fluviograma Observado em Cai em 08/92-07/93

Uazao (m3/s)

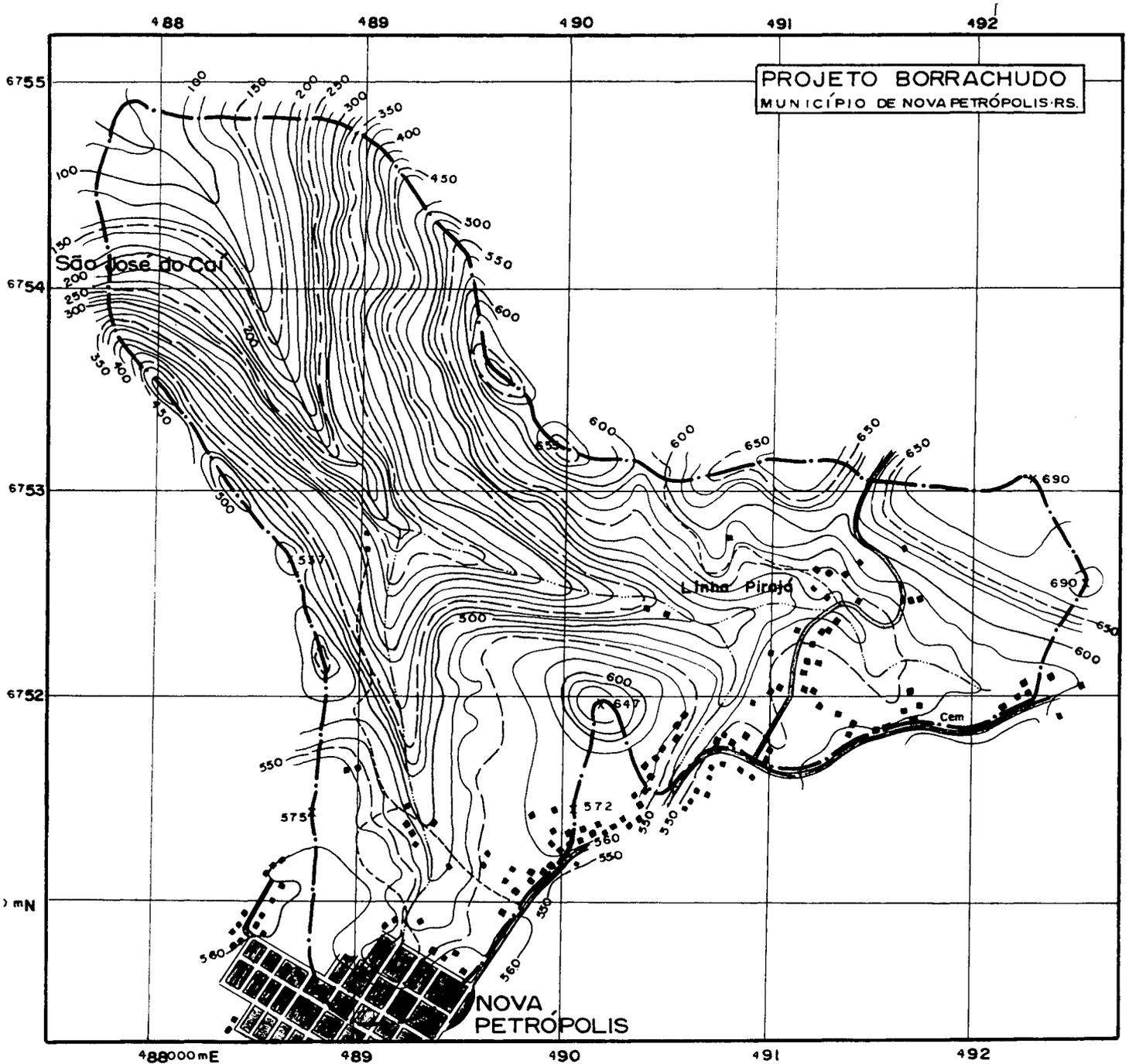


Fluviograma Observado em Cai em 08/93-07/94

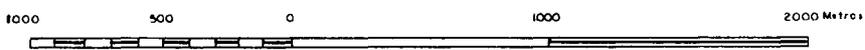
ANEXO A11

BACIA DO ARROIO PARAÍSO

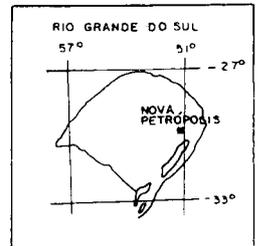
Paisagem da bacia hidrográfica.....	Fig. A11.1
Vista da calha.....	Fig. A11.2
Mapa plani-altimétrico da bacia.....	Fig. A11.3
Fluviograma observado.....	Fig. A11.4



PROJETO BORRACHUDO
MUNICÍPIO DE NOVA PETRÓPOLIS-RS.



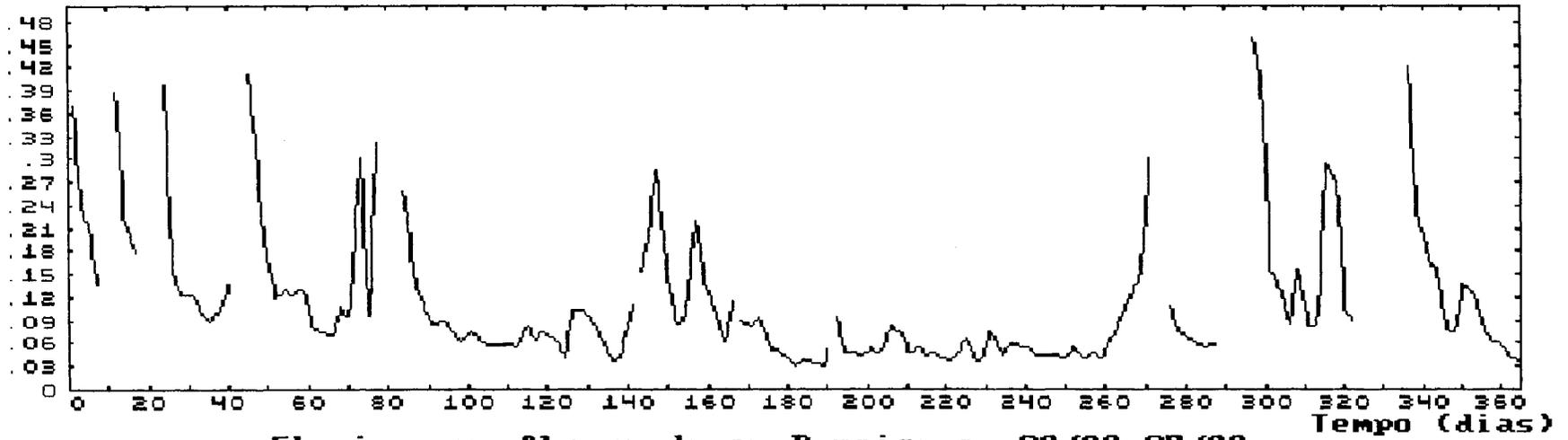
SITUAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA
NO ESTADO



PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
ORIGEM DA QUILOMETRAGEM UTM "EQUADOR E MERIDIANO 54° W. G.R."
ACRESCIDAS AS CONSTANTES 10.000KM E 500KM RESPECTIVAMENTE
Desenho, diagramação e arte final: Des. Téc Esp. ARTHUR HECTOR CUNHA

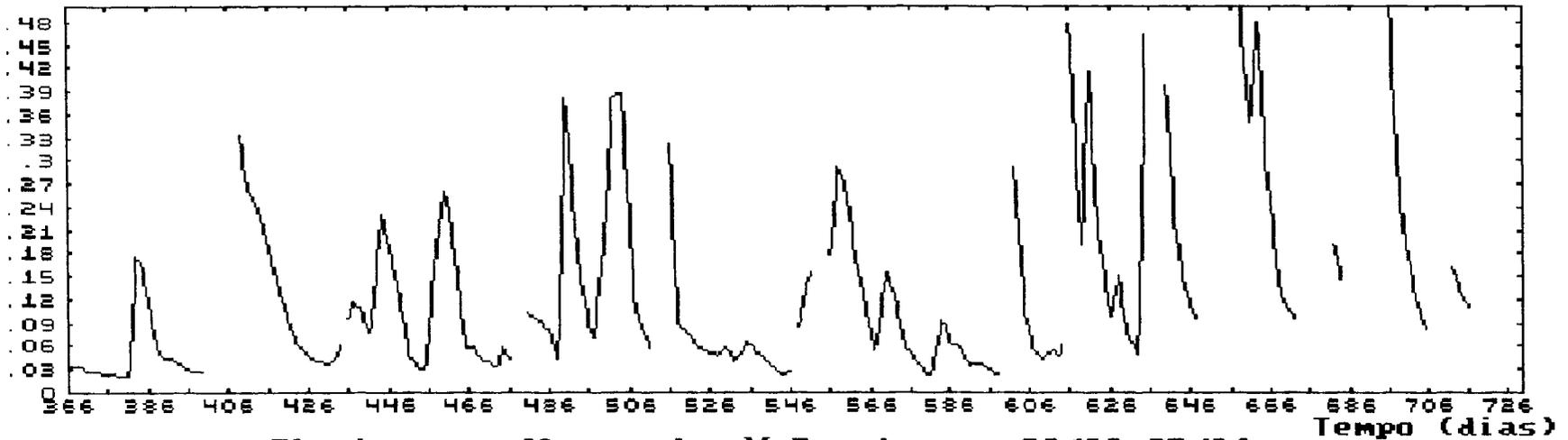
FIGURA Bacia Hidrográfica e rede de drenagem - CALHA PARAÍSO - Nova Petrópolis - RS.

Uazao (m³/s)



Fluviograma Observado em Paraiso em 08/92-07/93

Uazao (m³/s)



Fluviograma Observado em Paraiso em 08/93-07/94

ANEXO A12

BACIA DE PRIMAVERA

Paisagem da bacia hidrográfica.....	Fig. A12.1
Vista da calha.....	Fig. A12.2
Mapa plani-altimétrico da bacia.....	Fig. A12.3
Fluviograma observado.....	Fig. A12.4



Fig. Paisagem da Bacia Hidrográfica Contribuinte à Calha Primavera

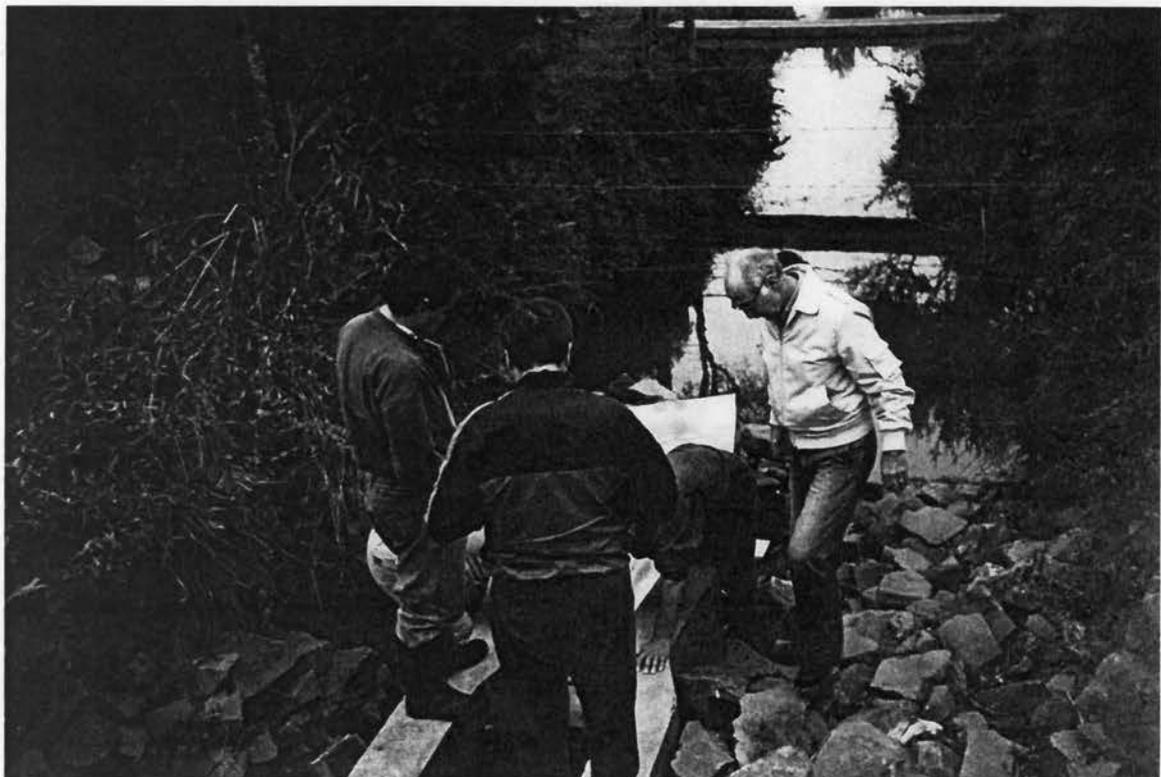
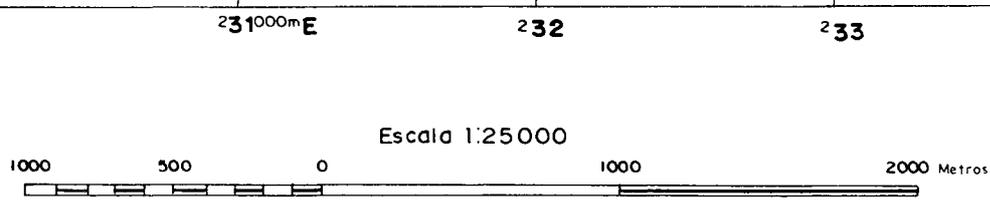
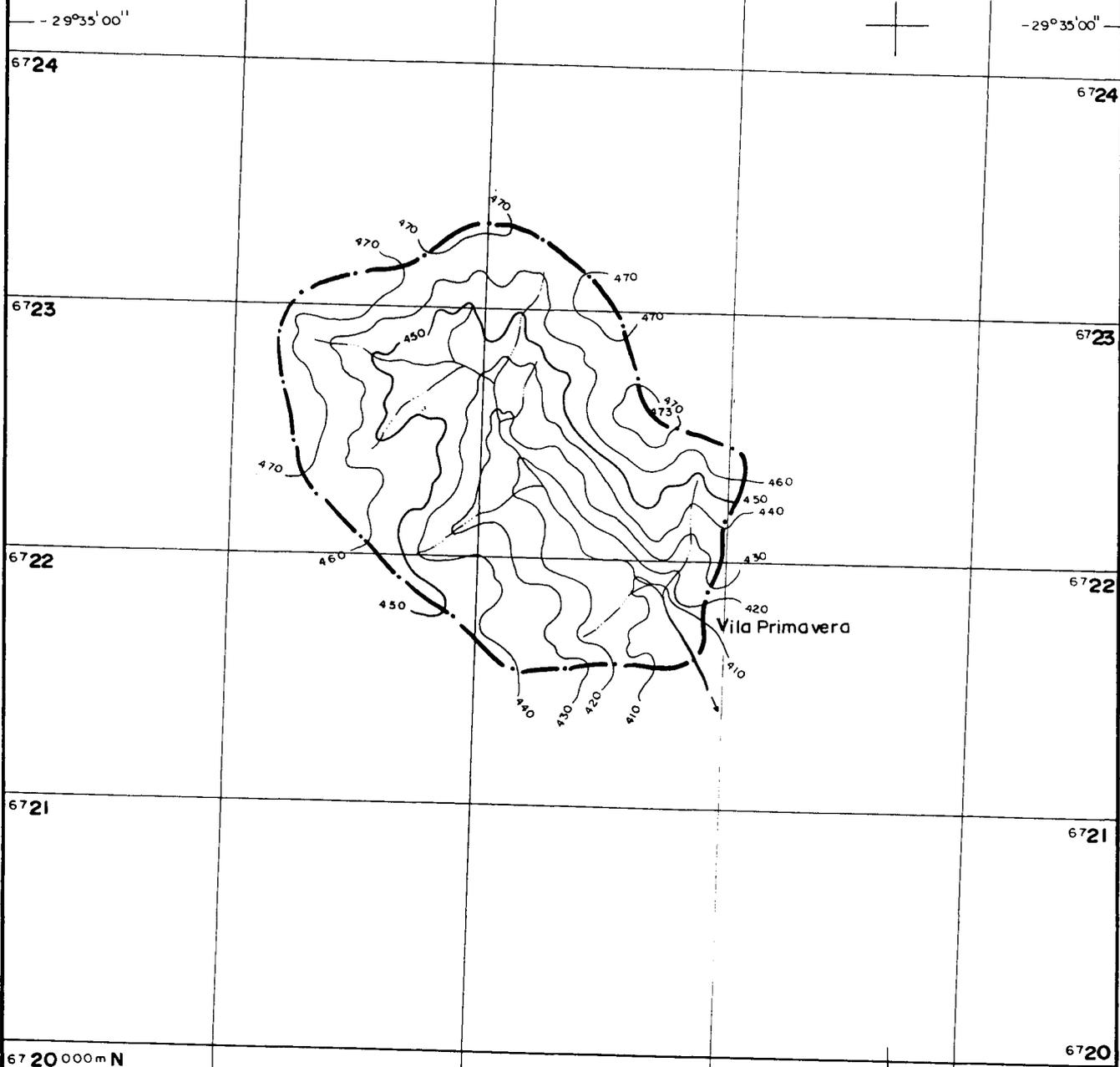


Fig. Vista da Calha Primavera

PROJETO BORRACHUDO
MUNICÍPIO: SANTA MARIA - NE - RS.



PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
ORIGEM DA QUILOMETRAGEM UTM "EQUADOR E MERIDIANO 54° W. GR."
ACRESCIDAS AS CONSTANTES 10.000 KM E 500 KM RESPECTIVAMENTE
Desenho, diagramação e arte final: Des. Tec. Esp. ARTHUR HECTOR CUNHA

SITUAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA NO ESTADO

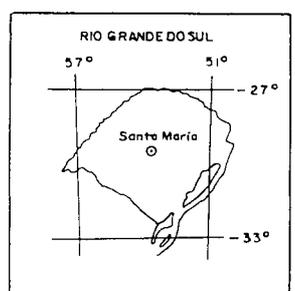
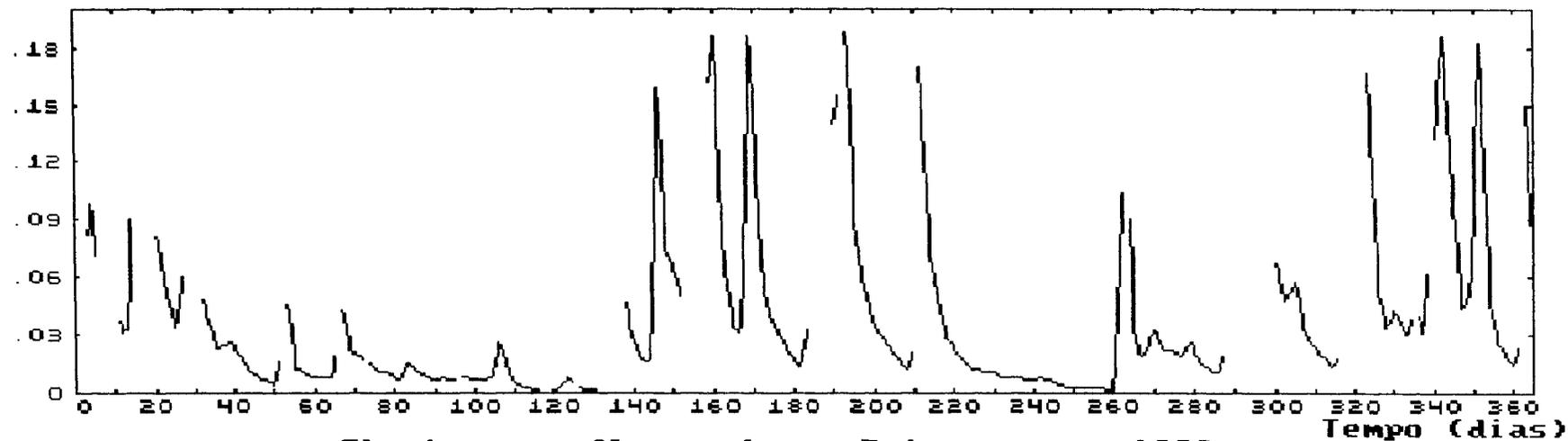


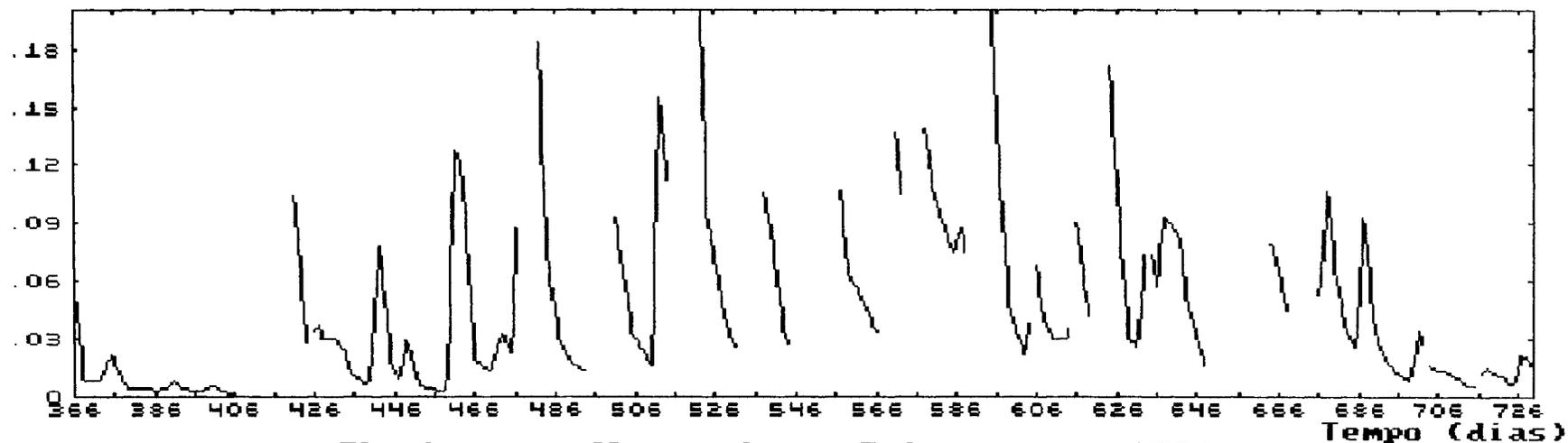
FIGURA - Bacia Hidrográfica e rede de drenagem - CALHA PRIMAVERA
Santa Maria - NE, RS

Uazao (m3/s)



Fluviograma Observado em Primavera em 1993

Uazao (m3/s)



Fluviograma Observado em Primavera em 1994

ANEXO B

Custos de operação da rede experimental

PLANILHA DE CUSTOS DA REDE EXPERIMENTAL ⁽¹⁾

Atividade	Valor unitário	Quantidade	Frequência	Quantitativos anuais	Total Anual em R\$
Pagamento do observador ⁽²⁾	R\$ 30,00 por mês	12 observadores	12 pagamentos por ano	144 pagamentos	4.320,00
Viagem de inspeção – deslocamento ⁽³⁾	500 km x R\$ 0,30/km	1 viagem	Trimestral	4 viagens por ano	600,00
Viagem de inspeção – diárias da equipe (1 técnico + 1 auxiliar) ⁽⁴⁾	R\$50/dia	4 diárias (2 dias x 2 pessoas)	Trimestral	16 diárias por ano	800,00
Aferição da calha – medição de descarga ⁽⁵⁾	R\$50/medição	12 medições por viagem	Trimestral	44 medições de descargas	2.400,00
TOTAL					8.120,00 ⁽⁶⁾

Observações:

- Os custos avaliados referem-se a experiência desta pesquisa (Silveira, 1992), não sendo computados os salários dos técnicos envolvidos no trabalho.
- O pagamento do observador é efetuado a título de gratificação
- Avaliou-se em 500 km o percurso médio das viagens de inspeção da rede para percorrer as 12 bacias em um período de tempo de 2 dias corridos
- A viagem requer a participação mínima de duas pessoas para efetuar as atividades de rotinas da inspeção quais sejam: limpeza da calhas quando necessária, instruções e pagamento dos observadores, medições de descarga, etc.
- O custo da medição de descarga avaliou-se em função do aluguel do equipamento, não sendo efetivamente pago, pois o mesmo pertence a Universidade.
- O valor de R\$ 8.120,00 /ano representa o custo médio real de operação da rede experimental de 12 bacias. Entretanto o valor efetivamente gasto foi de R\$ 3,000.00 por ano, tendo em vista a disponibilidade de recursos para a pesquisa. A adequação dos custos ocorreu em função:

➤ do uso dos veículos da Universidade;

- da colaboração dos municípios de Dois Irmãos e Nova Petrópolis que disponibilizaram sem ônus um funcionário da prefeitura em tempo parcial para a observação das calhas;
- da colaboração dos técnicos envolvidos que muitas vezes se deslocaram sem diárias e;
- do custo nulo das medições de descarga.

ANEXO C

Codificação do modelo simplificado

```

function F_simulacao

* inicializa variáveis

FA = AREA * 100 / it / 6
Qsub = perc / FA
Qsup = 0
K2 = EXP(-1 / Ksub)

* simulação do histórico de precipitação e evaporação
do while ! eof()

* perdas por evaporação e intercepção

PX = PREC
EX = EVAPO
if PX >= EX
    PX = PX - EX
else
    PX = 0
endif

* aporte de precipitação ao aquífero
Vi = PX * Cinf

* propagação do escoamento subterrâneo
Qsup = (PX*(1-Cinf))
Qsub = Qsub * K2 + Vi * (1 - K2)
Qtot = (Qsup + Qsub) * FA
skip
enddo

onde:
AREA = área da bacia hidrográfica em km2
PREC = precipitação ocorrida em mm
EVAPO = evaporação potencial em mm
Qsup = vazão de escoamento superficial
Qsub = vazão de escoamento subterrâneo
Qtot = vazão total calculada em m3/s
it = intervalo de tempo em minutos
FA = fator de área (relaciona mm com m3/s)
Vi = volume infiltrado em mm

Parâmetros de ajuste do modelo
K2 = coef. de propagação escoamento subterrâneo
Cinf = coef. de infiltração

```

ANEXO D

VISUALIZAÇÃO DOS FLUVIOGRAMAS OBSERVADOS E GERADOS COM OS PARÂMETROS MÉDIOS DE AJUSTE AOS EVENTOS INDIVIDUAIS

E1 - Bacia São Jacó

E2 - Bacia Schneider 1

E3 - Bacia Schneider 2

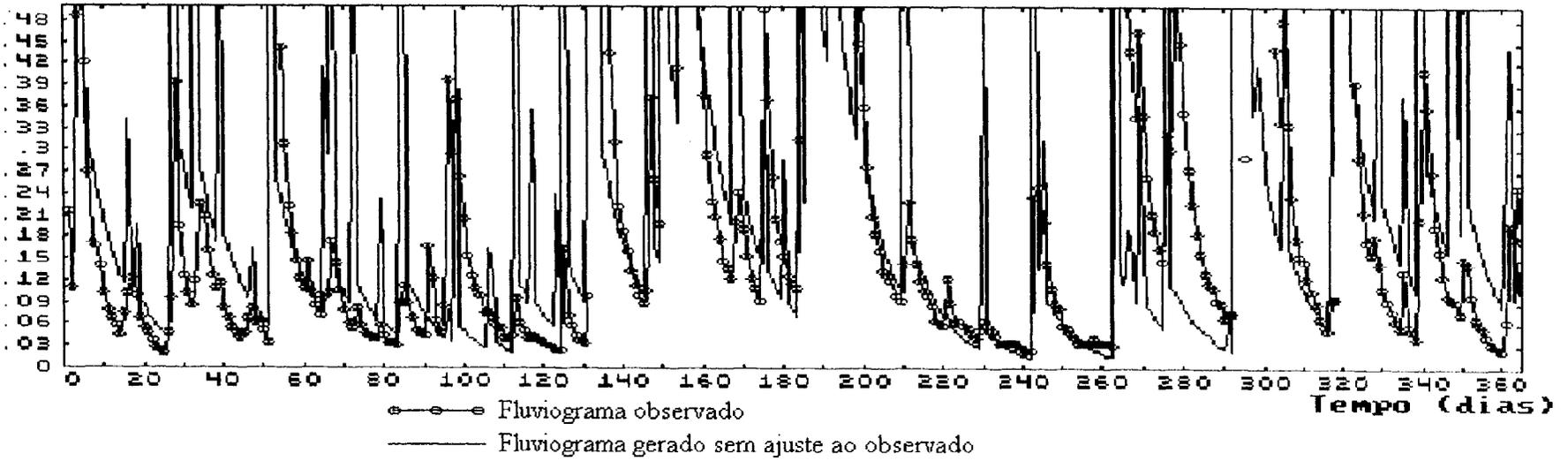
E4 - Bacia Vale Direito

E5 - Bacia Vale Esquerdo

E6 - Bacia Carpintaria

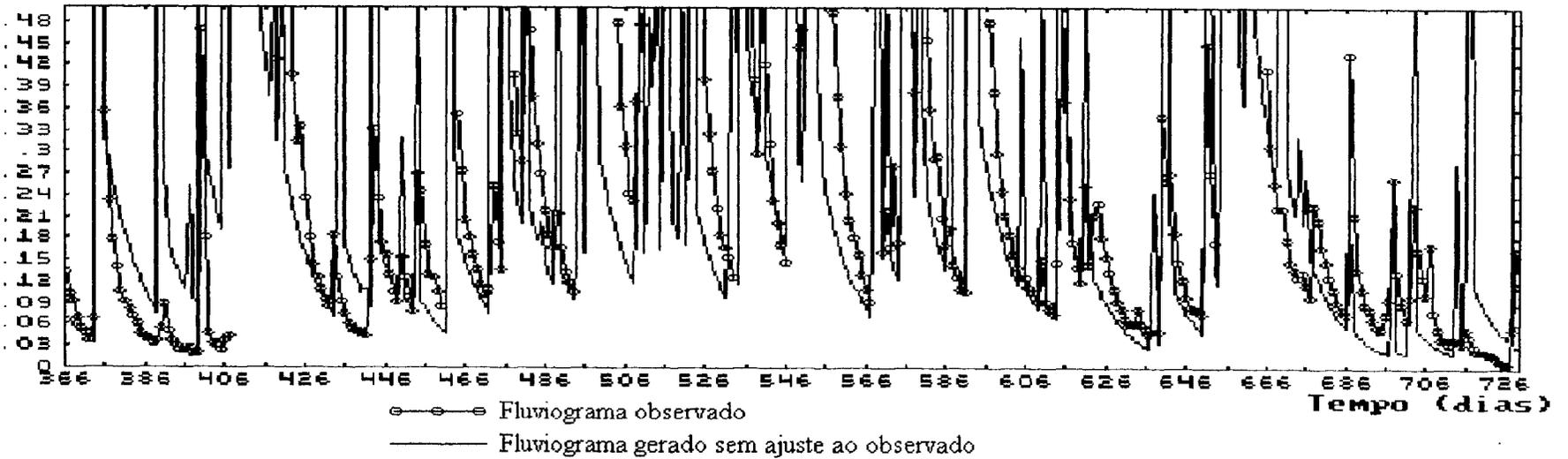
São Jacó – ano de 1993

Uazao (m³/s)



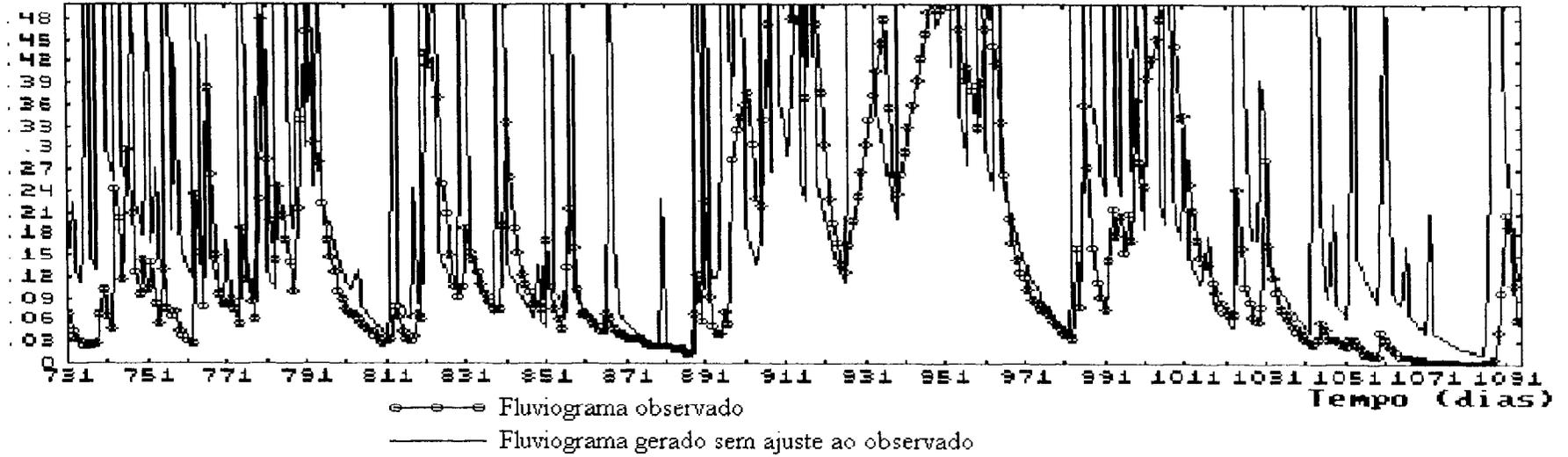
São Jacó – ano de 1994

Uazao (m³/s)



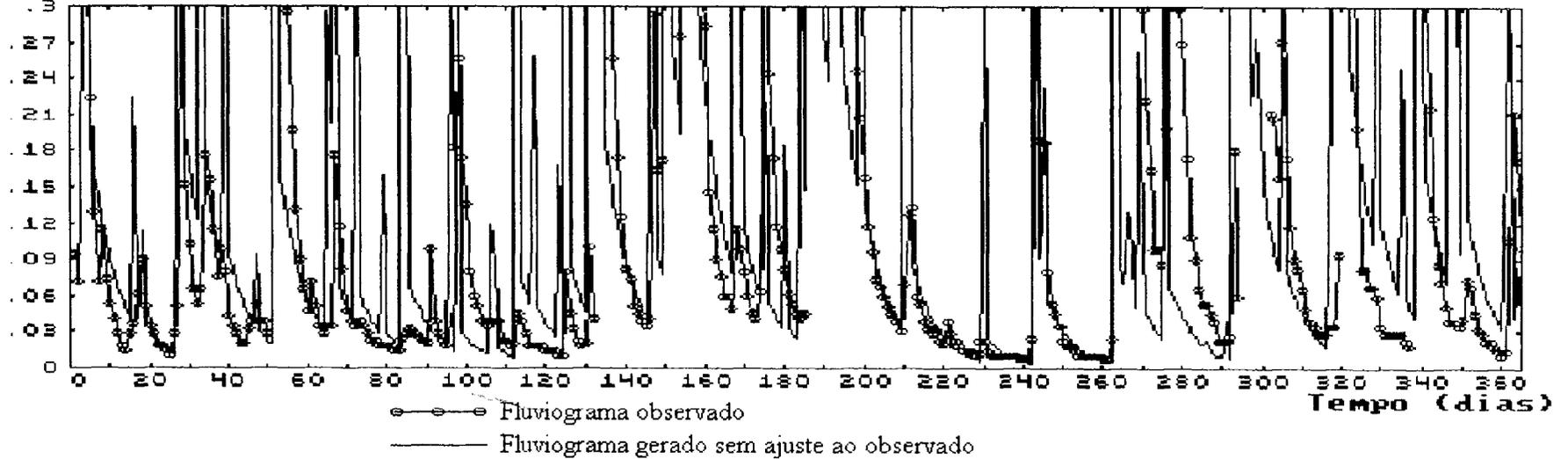
São Jacó - ano de 1995

Uazio (m³/s)



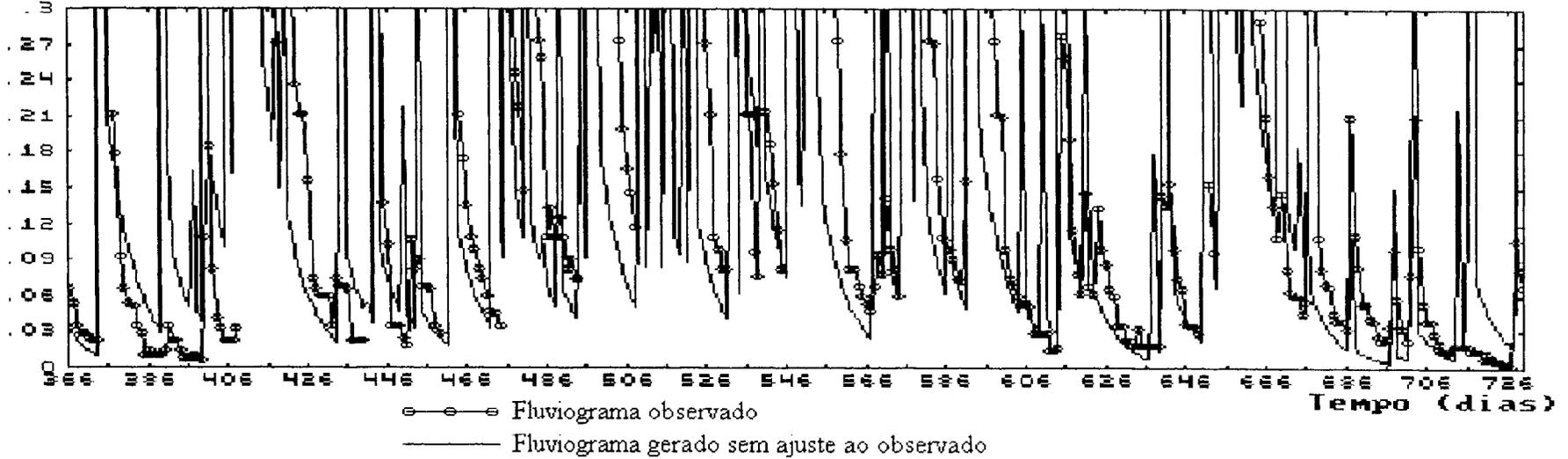
Schneider 1- ano de 1993

Uazio (m³/s)



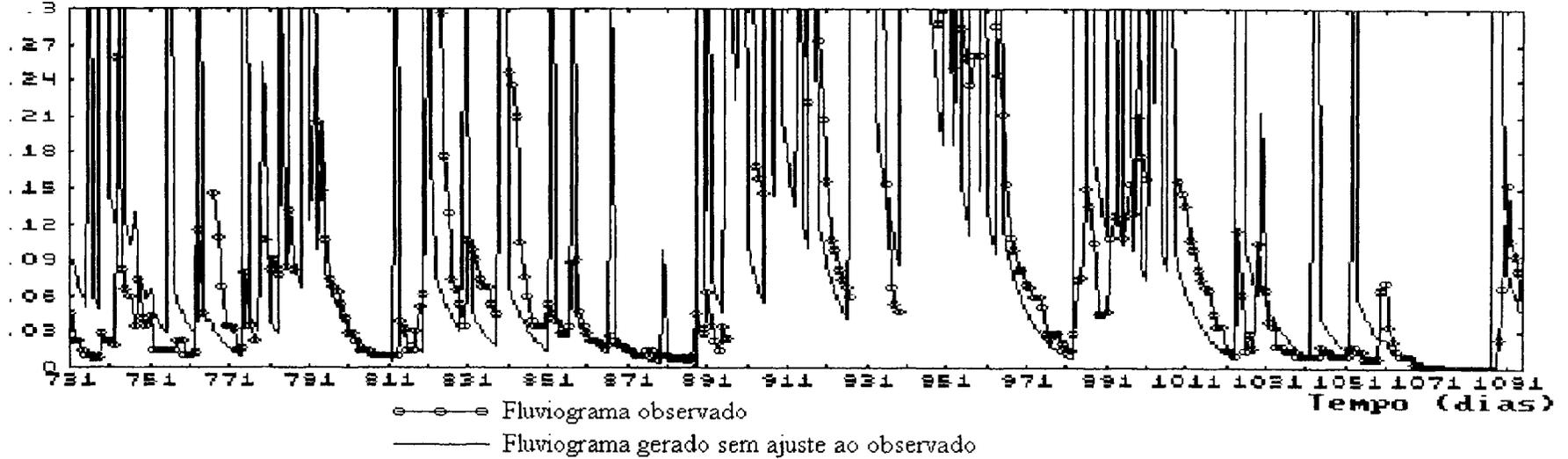
Schneider 1- ano de 1994

Vazao (m3/s)



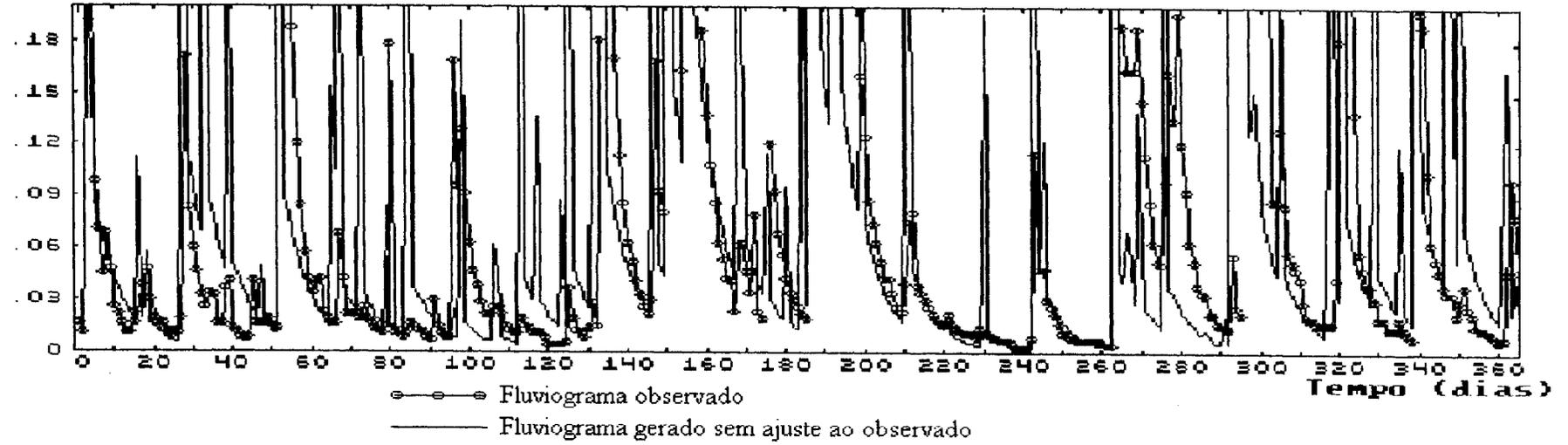
Schneider 1- ano de 1995

Vazao (m3/s)



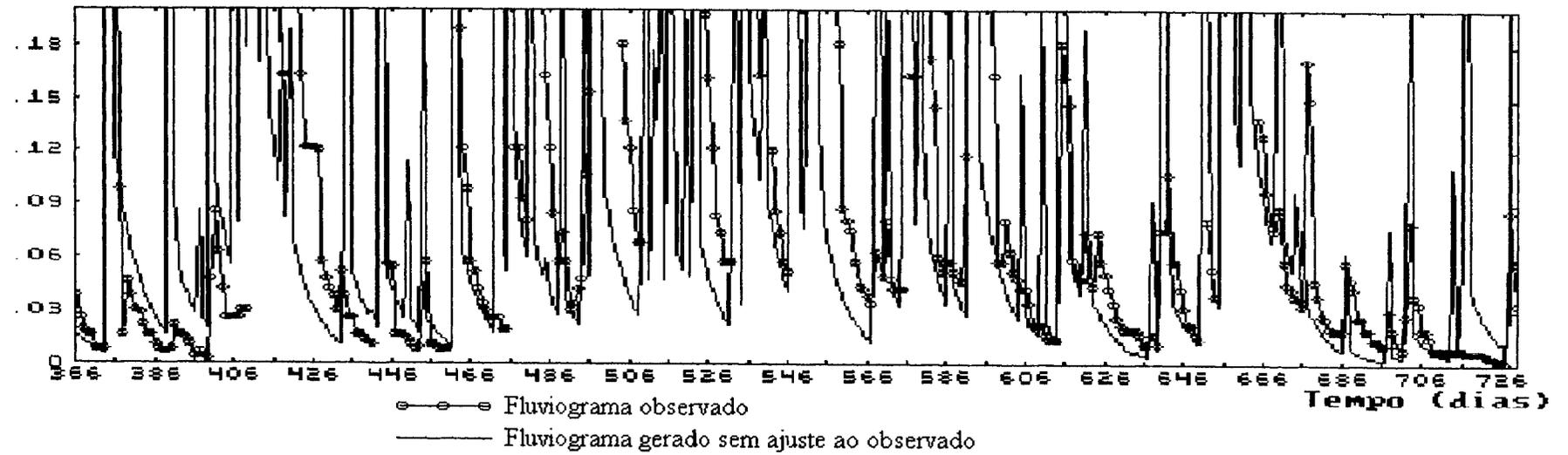
Schneider 2 - ano de 1993

Uazao (m³/s)



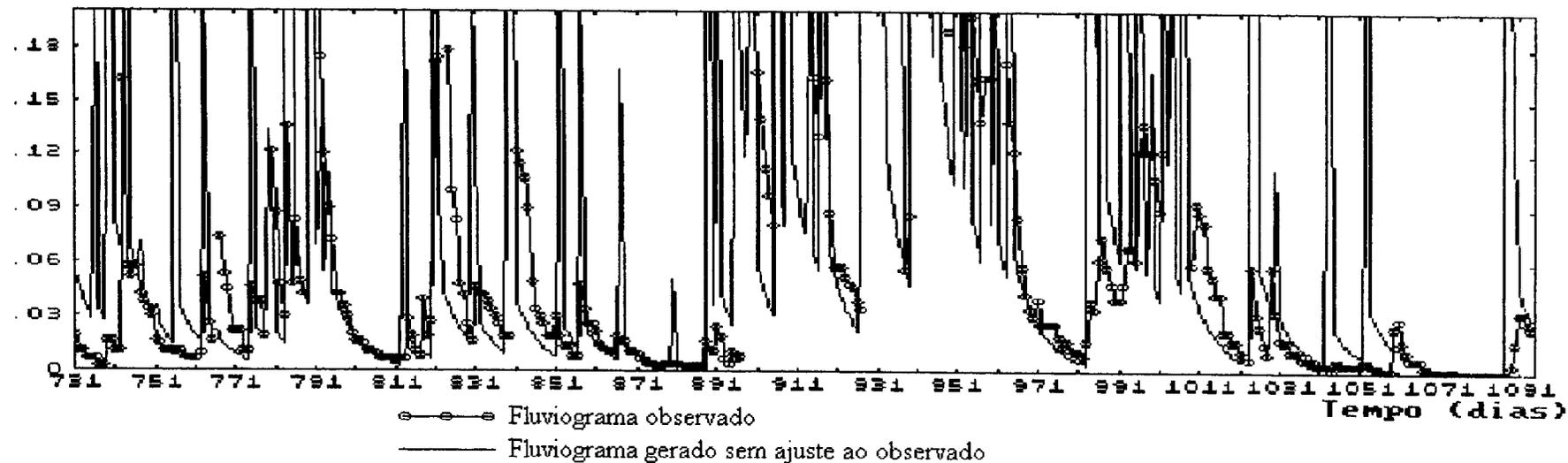
Schneider 2 - ano de 1994

Uazao (m³/s)



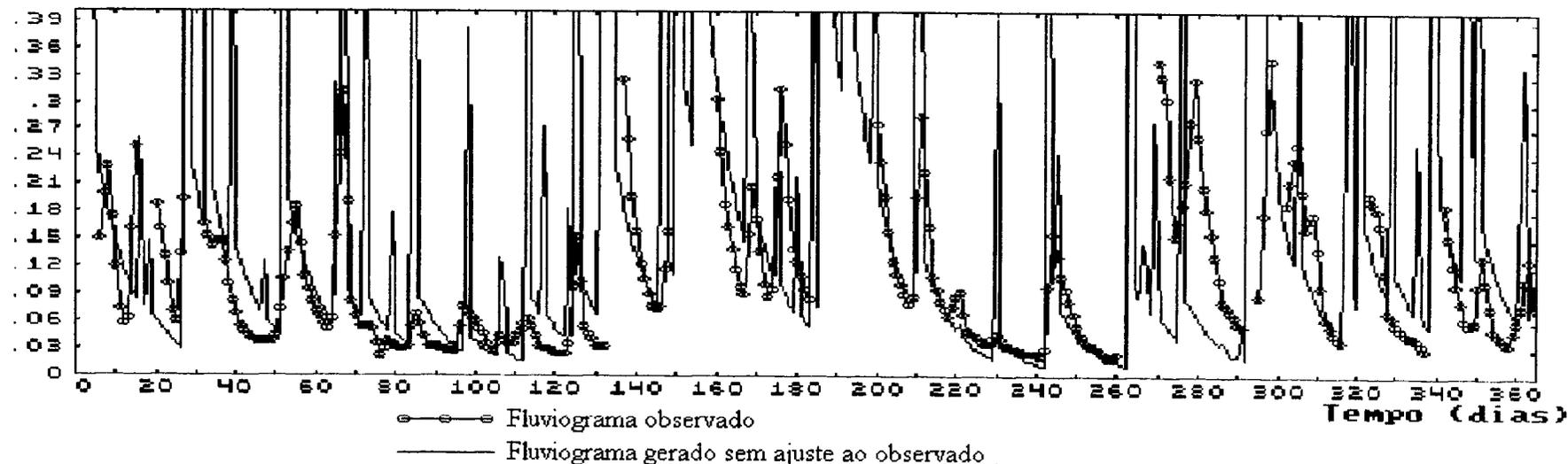
Schneider 2 - ano de 1995

Vazao (m3/s)



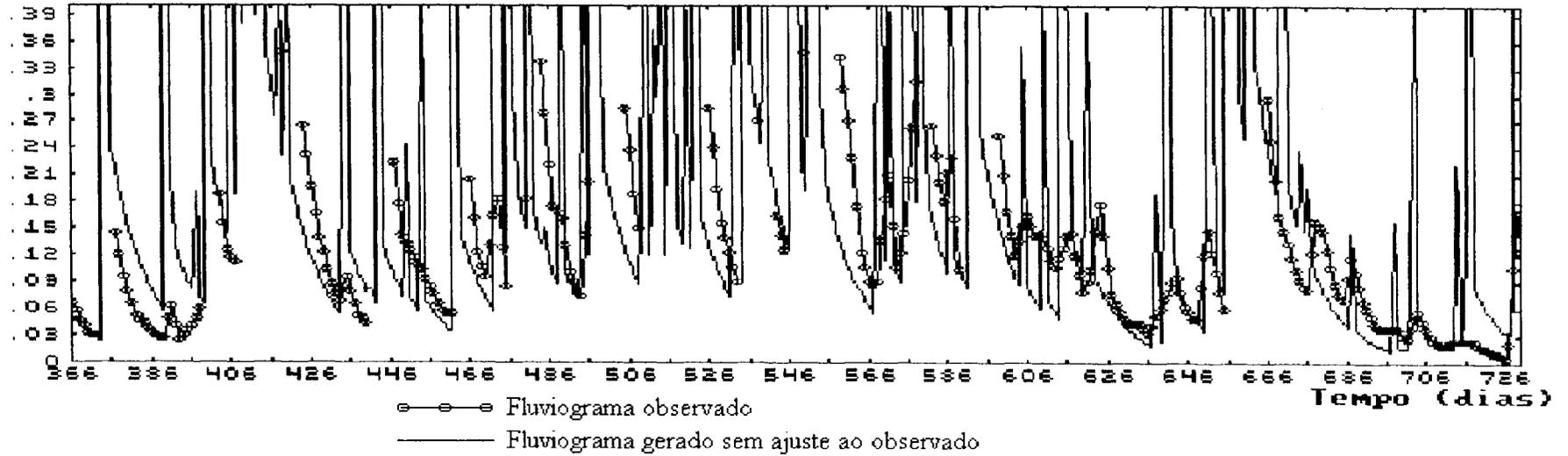
Vale Direito - ano de 1993

Vazao (m3/s)



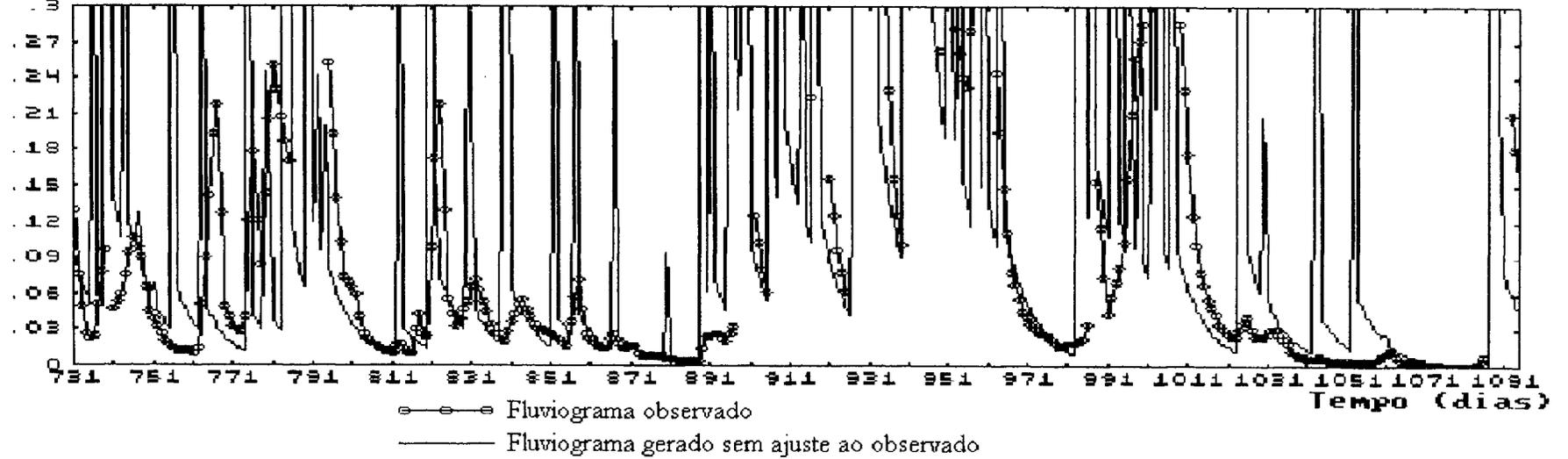
Vale Direito – ano de 1994

Uazao (m³/s)



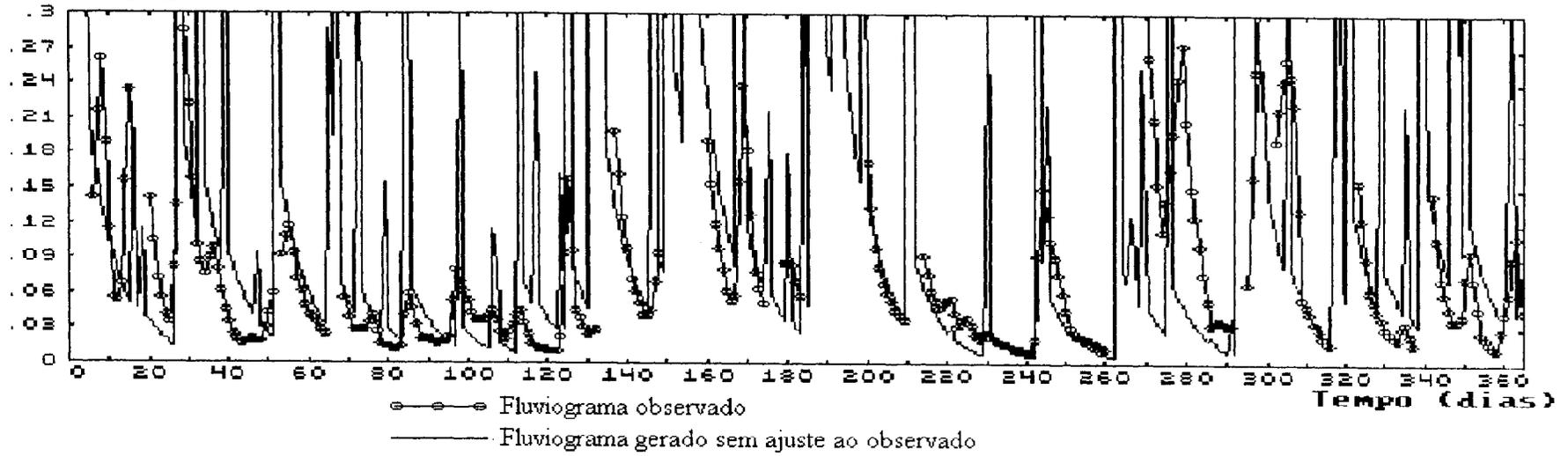
Vale Direito – ano de 1995

Uazao (m³/s)



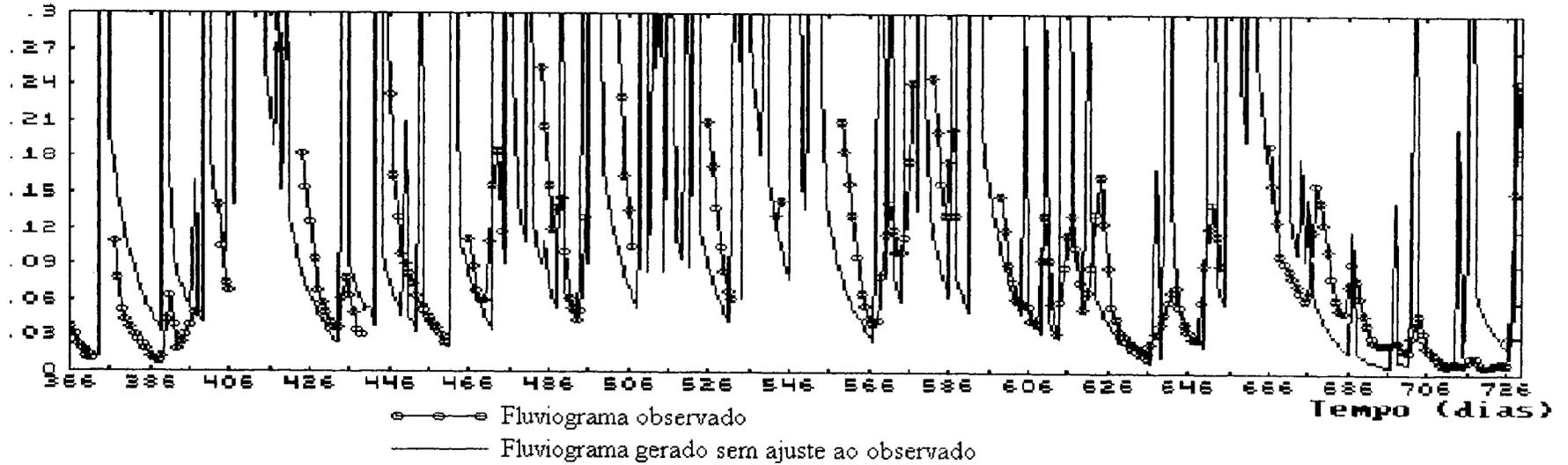
Vale Esquerdo - ano de 1993

Uazao (m³/s)



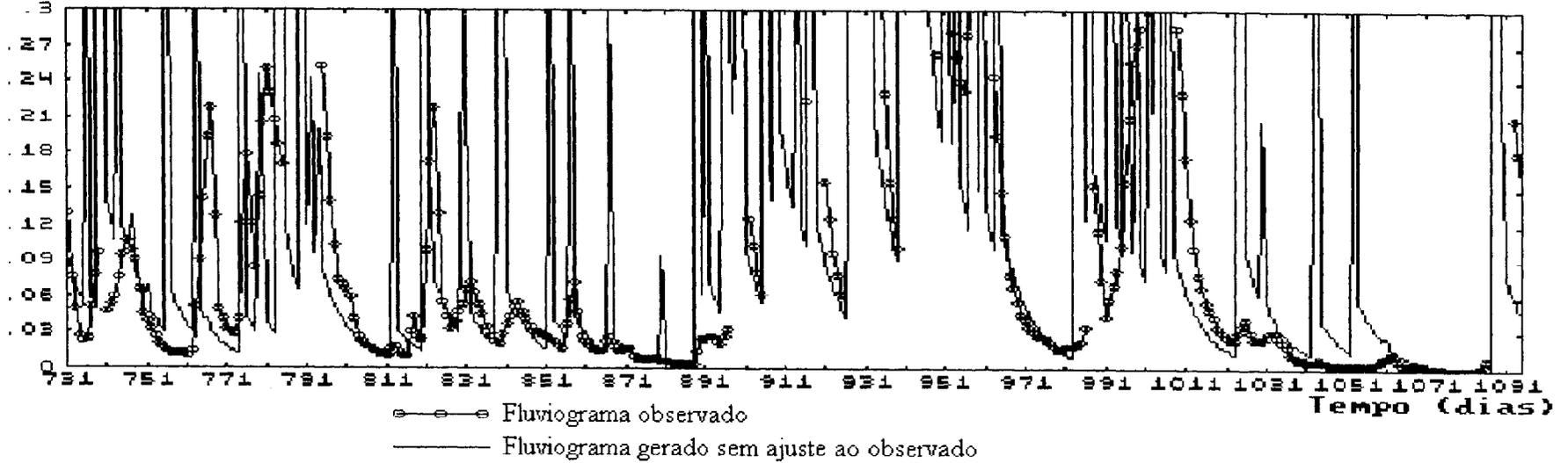
Vale Esquerdo - ano de 1994

Uazao (m³/s)



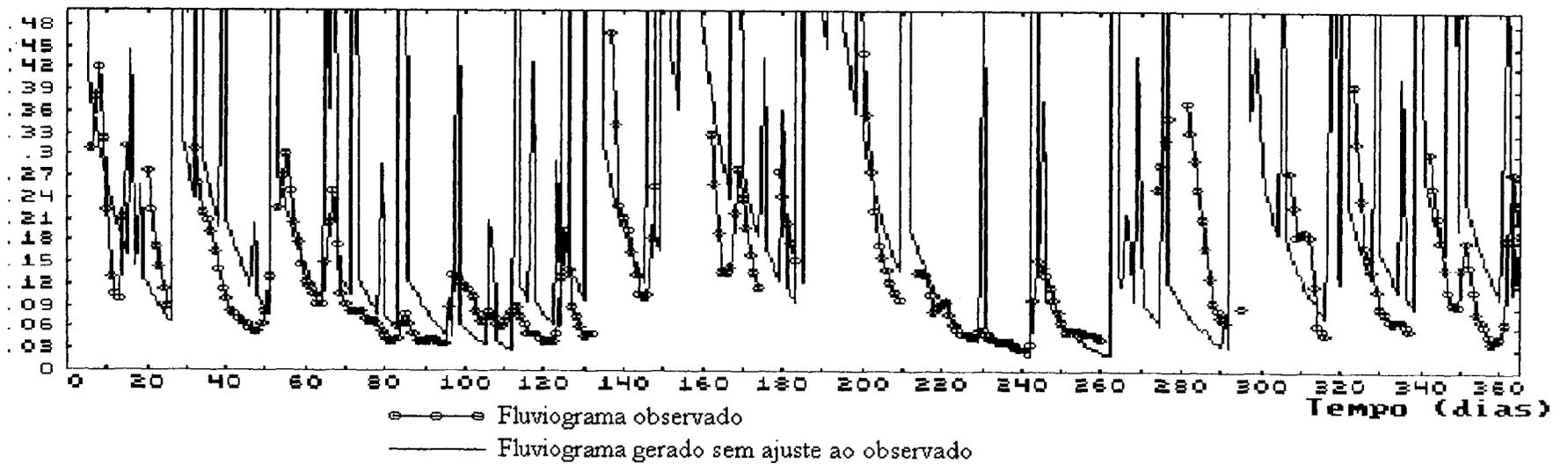
Vale Esquerdo – ano de 1995

Uazao (m³/s)



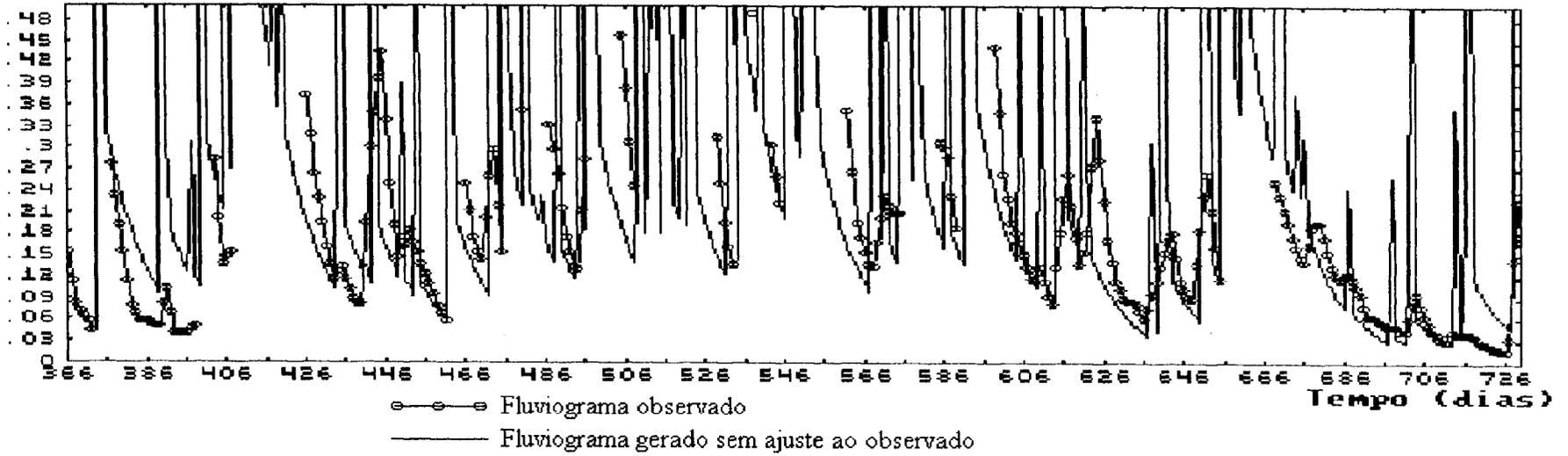
Carpintaria – ano de 1993

Uazao (m³/s)



Carpintaria – ano de 1994

Uazao (m³/s)



Carpintaria – ano de 1995

Uazao (m³/s)

