MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS SEM REGULARIZAÇÃO
CASO ANALISADO: BACIA DO RIO PARACATU

JORGE VICTOR PILAR

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal de Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Porto Alegre, junho de 1998

“[...] numa terra de horizontes em fuga, um viajante inspirado sempre encontrará novas maravilhas. Pelo menos, essa é a minha metáfora para a criatividade humana.”

Marcelo Gleiser
(A dança do universo. Epílogo)

À memória do meu avô, Joseph Fracisc, um simples sapateiro tchecoslovaco, que sempre acreditou no poder libertário da educação e lutou muito para dar a seus filhos uma educação superior.

SUMÁRIO

Agradecimentos vii
Resumo ix
Abstract x
Lista de figuras xi
Lista de Tabelas xii

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS 1
1.1 Introdução 1
1.2 Objetivos 2
1.3 Organização do trabalho 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4
2.1 A problemática do planejamento dos recursos hídricos 4
2.2 A abordagem sistêmica 6
2.3 Reflexões sobre os trabalhos consultados 16
2.4 Programação linear 19
2.4.1 Algoritmo Simplex 23
2.4.2 Método dos pontos interiores 24

3 CASO EM ESTUDO 26
3.1 Área de estudo 26
3.2 Condições iniciais da bacia e projetos a serem implantados .. 28
3.3 Dados disponíveis 28

4 METODOLOGIA 30

4.1 Considerações gerais 30
4.2 Otimização da dimensão do sistema 30
4.2.1 Reservatórios 32
4.2.1.a Relação área-volume 32
4.2.1.b Evaporação do reservatório ‘r’ 33
4.2.1.c Precipitação no reservatório ‘r’ 34
4.2.1.d Esquema dos fluxos nos reservatórios 34
4.2.1.e Restrições 35
4.2.2 Trechos de rio 38
4.2.2.a Restrições 38
4.2.3 Considerações sobre os volumes efetivamente consumidos 41
4.2.4 Considerações sobre as demandas variáveis 43
4.2.5 Abordagem binária 44
4.2.5.a Restrições e inequações de compatibilidade 46
4.2.5.b Função objetivo 48
4.2.5.1 Variante ‘tudo ou nada’ 50
4.2.5.2 Variante com alternativas pré-definidas 51
4.2.5.3 Variante com penalizações 54
4.2.6 Abordagem não-binária 58
4.2.6.a Restrições e inequações de compatibilidade 59
4.2.6.b Função objetivo 63
4.3 Operação do sistema 64
4.3.1 Uma alternativa deselegante 65
4.3.2 Alternativa envolvendo risco 66

5 APLICAÇÃO 74
5.1 Desenvolvimento do trabalho 74
5.2 Planejamento estratégico 75
5.2.1 Variante ‘tudo ou nada’ (binária) 75
5.2.2 Variante com alternativas pré-definidas (binária) 78
5.2.3 Variante com penalizações (binária) 83
5.2.4 Abordagem não-binária 85
5.2.5 Arquivos em formato MPS 89

5.2.6 Programa de otimização empregado 89
5.3 Planejamento tático 89
5.3.1 Análise de freqüências relativas 90
5.3.2 Otimização das decisões 90

6 RESULTADOS 92
6.1 Otimização da dimensão do sistema 92
6.1.1 Resultados 92
6.1.2 Comparação dos resultados 95
6.1.3 Critério de decisão 97
6.1.4 Características dos modelos e aspectos computacionais 98
6.2 Operação do sistema 99
6.2.1 Análise de freqüências relativas 100
6.2.2 Matrizes dos benefícios 101
6.2.3 Resultados 101

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 103
7.1 Conclusões 103
7.2 Recomendações 105

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA 107

ANEXO A - Dados e resultados 113
ANEXO B - Linearização de curvas por segmentos 167

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar minha imensa gratidão ao Brasil e a Rio Grande do Sul, que me receberam e me acolheram como um de seus filhos, nas pessoas do diretor do IPH, Dr. Raul Dorfman e do coordenador da Pós-Graduação, Dr. Carlos Tucci.

Ao CNPq, por ter financiado esta pesquisa.

À Faculdade de Engenharia da UNNE e à própria UNNE, que me ajudaram a trasladar-me até Porto Alegre.

A meus amigos do Departamento de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da UNNE, que me apoiaram e me ajudaram a escolher este excelente curso de pós-graduação, na pessoa de meu amigo, o engenheiro Carlos Deppetris.

A Marisa, minha amada companheira, que me apoiou, me seguiu e me cuidou durante estes dois anos, fazendo deles uma permanente lua de mel.

A meus pais, Olga e Alejandro, por seu exemplo de luta e perseverança, que me inspirou em todo momento.

A minha avó Lidia e a meus irmãos Mabel, Sonia, Claudia e Sergio, que me fizeram sentir que o amor fraternal supera qualquer barreira espacial.

A meus companheiros e amigos do IPH, Mario, Adolfo, Jaildo, Walter, Roberto, Cleuda, Stella, Flávio, Käthe, Roberval, Sérgio, por sua paciência comigo e com meu temperamento, não sempre agradável.

Um agradecimento especial a meus amigos Marcus, sempre disposto a escutar-me com estoicismo e a tentar me ensinar o Português (não o conseguiu) e Alex, meu grande companheiro de jornada no aprendizado da ‘otimização’, que sem seu apoio tudo teria sido muito mais difícil.

Aos professores Tucci, Clarke, Joel e Carlos André, por sua sapiência e por seus exemplos de vida.

Um especial agradecimento ao professor Alejandro que, sem saber, me transmitiu seu interesse pela programação matemática e me ensinou que a Matemática é muito mais simples e agradável do que imaginava.

Desejo também agradecer especialmente às ‘Jussaras’, Jussara Barbieri e Jussara Silva, bibliotecárias do IPH, por seu profissionalismo, pelo o carinho com que desempenham sua labor e por sua guia, indispensável na fase de pesquisa bibliográfica deste trabalho.

A Nadir, secretária da Pós-Graduação do IPH, que com sua eficiência conseguiu resolver todos os meus problemas ‘institucionais’.

Finalmente, meu agradecimento especialíssimo a meu orientador, Dr. Lanna, não apenas por sua orientação, sempre precisa, e pelas respostas a meus questionamentos, senão também pelas dúvidas e perguntas que semeou no meu espírito. Por isso ..., por tudo..., MUITO OBRIGADO DOM ANTÔNIO !

MUITO OBRIGADO BRASIL !
MUITO OBRIGADO IPH !
MUITO OBRIGADO PROFESSORES !
MUITO OBRIGADO AMIGOS !
MUITO OBRIGADO MINHA GENTE !

RESUMO

Os sistemas hídricos são recursos quantitativa e qualitativamente escassos e as obras necessárias para seu aproveitamento requerem investimentos de uma quantia considerável. Sendo os recursos hídricos limitados e os econômicos e financeiros difíceis de se obter, todo esforço para um planejamento hídrico racional tem um interesse social real.

Este trabalho apresenta vários modelos para a otimização da implantação de projetos de irrigação num sistema de recursos hídricos sem regulação: a bacia do rio Paracatu. Analisa-se, também, um esquema de otimização das decisões com referência à operação das áreas implantadas.

Foi escolhida a programação linear como instrumento de planejamento, a qual é aplicada num contexto determinístico e, também, num contexto de futuro desconhecido.

Os resultados mostram a eficácia e a eficiência da programação linear para resolver problemas deste tipo, apresentando-se, portanto, como uma importante ferramenta para fornecer alternativas aos tomadores de decisões.

ABSTRACT

The water systems are quantitatively and qualitatively scarce resources and the necessary constructions for their management required great investments. For being the water resources limited and the economical and financial ones hard to obtain, all of the effort in order to reach rational water planning has a real social interest.

This work introduces a lot of optimizations approaches of the implement of projects of irrigation in a system of water resources without regulation: the Paracatu River watershed. We also analyze a layout of optimizing decisions related to the operation of the areas that were implemented.

The linear programming was choosing as an instrument of planning, which was applied in a deterministic context and also in a context of unknown future.

The results show the effectiveness and the efficiency of the linear programming in order to solve problems like the ones above mentioned and appearing as an important tool to supply the decision makers with alternatives.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Compatibilidades a serem consideradas na modelação 8
Figura 2.2 Limitações dos modelos 8
Figura 2.3 Árvore do processo de otimização 12
Figura 2.4 Princípio da solução da PL 22
Figura 3.1 Mapa de localização da bacia 26
Figura 3.2 Esquema adotado para a bacia do rio Paracatu 27
Figura 4.1 Relação linear entre área e volume 32
Figura 4.2 Balanço de massas num reservatório 35
Figura 4.3 Volumes que intervêm no balanço de massas num trecho de rio 38
Figura 4.4 Considerações sobre os volumes de retorno 41
Figura 4.5 Esquema dos volumes efetivamente consumidos num trecho de rio 42
Figura 4.6 Comparação entre ofertas e demandas 64
Figura 4.7 Matriz das decisões e suas conseqüências 66
Figura 4.8 Esquema proposto para a otimização da decisão 71
Figura 6.1 Comparação entre as cinco abordagens 94

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Esquema de avaliação das probabilidades condicionais 69
Tabela 6.1 Resultado da otimização para diferentes graus de atendimento 97
Tabela 6.2 Escolha dos perímetros sob irrigação por aspersão a serem implantados 98
Tabela 6.3 Tamanhos e características computacionais dos modelos 99
Tabela A-1 Perímetros sob irrigação existente..... 114
Tabela A-2 Perímetros sob irrigação por inundação projetados 115
Tabela A-3 Perímetros sob irrigação por aspersão projetados 116
Tabela A-4 Demandas da população urbana para o ano 1997 117
Tabela A-5 Demandas da população urbana para o ano 2001 118
Tabela A-6 Demandas da população urbana para o ano 2006 119
Tabela A-7 Demandas da população urbana para o ano 2016 120
Tabela A-8 Demandas rurais difusas para o ano 2016 121
Tabela A-9 Dados econômicos das áreas sob irrigação existentes 122
Tabela A-10 Dados econômicos dos projetos de irrigação por inundação 123
Tabela A-11 Dados econômicos dos projetos de irrigação por aspersão 124
Tabela A-12 Vazões ecológicas por PC 125
Tabela A-13 Vazões da sub-bacia incremental do PC1 126
Tabela A-14 Vazões da sub-bacia incremental do PC2 127
Tabela A-15 Vazões da sub-bacia incremental do PC3 128
Tabela A-16 Vazões da sub-bacia incremental do PC4 129
Tabela A-17 Vazões da sub-bacia incremental do PC5 130
Tabela A-18 Vazões da sub-bacia incremental do PC6 131
Tabela A-19 Vazões da sub-bacia incremental do PC7 132
Tabela A-20 Vazões da sub-bacia incremental do PC8 133
Tabela A-21 Vazões da sub-bacia incremental do PC9 134
Tabela A-22 Vazões da sub-bacia incremental do PC10..... 135
Tabela A-23 Vazões da sub-bacia incremental do PC11 136
Tabela A-24 Vazões da sub-bacia incremental do PC12 137
Tabela A-25 Vazões da sub-bacia incremental do PC13 138
Tabela A-26 Vazões da sub-bacia incremental do PC14 139
Tabela A-27 Vazões da sub-bacia incremental do PC15 140
Tabela A-28 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC1 141
Tabela A-29 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC2 142

Tabela A-30 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC3 143
Tabela A-31 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC4 144
Tabela A-32 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC5 145
Tabela A-33 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC6 146
Tabela A-34 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC7 147
Tabela A-35 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC8 148
Tabela A-36 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC9 149
Tabela A-37 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC10 150
Tabela A-38 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC11 151
Tabela A-39 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC12 152
Tabela A-40 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC13 153
Tabela A-41 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC14 154
Tabela A-42 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC15 155
Tabela A-43 Resultados da otimização aplicando a Abordagem 1 156
Tabela A-44 Superfícies viáveis de serem implantadas segundo a Abordagem 1 157
Tabela A-45 Resultados da otimização aplicando a Abordagem 2 158
Tabela A-46 Superfícies viáveis de serem implantadas segundo a Abordagem 2 159
Tabela A-47 Resultados da otimização aplicando a Abordagem 3 160
Tabela A-48 Superfícies viáveis de serem implantadas segundo a Abordagem 3 161
Tabela A-49 Resultados da otimização aplicando a Abordagem 4 162
Tabela A-50 Superfícies viáveis de serem implantadas segundo a Abordagem 4 163
Tabela A-51 Resultados da otimização aplicando a Abordagem 5 164
Tabela A-52 Superfícies viáveis de serem implantadas segundo a Abordagem 5 165
Tabela A-53 Comparação entre os resultados da otimização da operação com ‘futuro conhecido’ e com ‘futuro desconhecido’ 166

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A vida na Terra começou na água; agora a água doce dá vida às cidades sedentas, irriga as culturas que secam e é o habitat de uma multiplicidade de seres vivos.

(Hay suficiente agua en el mundo?, OMM / UNESCO, 1997, p.7)

1.1. INTRODUÇÃO

O aumento populacional e o desenvolvimento econômico dos países latino-americanos se traduzem em um aumento das demandas quantitativas e qualitativas de água. A escala mundial, as demandas de água têm aumentado de seis a sete vezes entre 1900 e 1995, mais que o dobro da taxa de aumento da população (Shiklomanov, apud Hay suficiente agua en el mundo?, 1997).

Não existe hoje atividade humana na qual a água não seja insumo de alguns dos seus processos.

As quantidades de água são limitadas e os recursos econômicos e financeiros escassos (Desarrollo, 1996). Os investimentos envolvidos nas obras de um aproveitamento de um recurso hídrico são, sempre, de uma quantia considerável e, portanto, precisa-se de várias dezenas de anos de uso satisfatório dessas obras para amortizá-las. Além disso, as modificações que sejam necessárias introduzir para melhorar suas performances são também muito custosas, quando não de difícil ou impossível execução.

Portanto, um planejamento racional, visando a maximizar os retornos e minimizar os investimentos, é imprescindível para otimizar o uso dos recursos hídricos e dos recursos econômicos e financeiros, os que hoje já são escassos, situação que piorará muito rapidamente no futuro próximo.

É comum ouvir a denúncia da existência de uma brecha entre a teoria e a prática na análise dos recursos hídricos. Como o planejamento e a operação devem se correlacionar, a procura de abordagens simples mas não simplistas e sua aplicação a situações concretas apresenta um interesse real.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é formular, desenvolver e aplicar modelos para o planejamento de sistemas de recursos hídricos, considerando a bacia como uma unidade de análise.

São utilizados modelos de otimização e técnicas de programação linear, tanto na fase de planejamento estratégico (dimensionamento do sistema), quanto na fase de planejamento tático (operação do sistema).

A aplicação destes modelos é feita na bacia do rio Paracatu, afluente do rio São Francisco, onde existe um problema real: na bacia já existem perímetros sob irrigação, pretendendo-se aumentar a superfície irrigada, dando, simultaneamente, atendimento às demandas da população, à dessedentação do gado e mantendo no rio, permanentemente, a vazão ecológica. Mas a água não é suficiente para tudo isto. Portanto, é preciso adotar decisões sobre quais demandas serão atendidas e quais projetos poderiam ser implantados. Utilizou-se como elemento de juízo a eficiência econômica.

O trabalho tem como complicação adicional a inexistência de barragens que regularizem as vazões, ou seja, o aproveitamento será feito a fio d'água, o que torna o problema muito especial em virtude da escassa bibliografia sobre este tipo de situação.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está dividido em quatro partes, a saber:

- o caso em estudo - bacia do rio Paracatu - onde se faz uma descrição da bacia onde foi aplicada a metodologia proposta neste trabalho, suas particularidades, assim como os dados disponíveis (capítulo 3);

- os métodos que são propostos, tanto para a fase de otimização do sistema, quanto para a fase de operação anual do mesmo (capítulo 4);

- a aplicação destes métodos ao caso em estudo - bacia do rio Paracatu (capítulo 5);

- finalmente, uma análise dos resultados e as conclusões e recomendações finais (capítulos 6 e 7).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O pior inimigo da humanidade não parece ser o holocausto nuclear senão a ignorância; a ignorância de alguns de nós, que fomos educados e presumimos conhecer. Este é um estranho tipo de ignorância, resultante, talvez, de uma excessiva quantidade de informação.

Enzo Levi(*)

2.1. A PROBLEMÁTICA DO PLANEJAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS

A água é imprescindível para a vida e portanto sempre foi e será objeto de demanda. A satisfação das necessidades domésticas, urbanas, de irrigação, de produção de energia, de refrigeração, tem sido o grande objetivo da planificação hidrológica (Sahuquillo , 1993).

Segundo Barth (1987), Planejamento, no sentido de ciência econômica, é a forma de conciliar recursos escassos e necessidades abundantes.

Os usos da água são quase sempre conflitantes, devido a que são competitivos e às vezes contraditórios, ou seja um uso inviabiliza o outro (Sahuquillo, 1993). Devido à crescente competição entre as demandas por um recurso finito, a água é (ou pode ser considerada) um bem econômico e uma mercadoria comercializável (Evaluación, 1997).

A formulação de projetos e a avaliação dos seus efeitos está longe de poder ser abordada com precisão matemática, já que nestas duas atividades é necessário levar em conta condicionamentos políticos, sócio-econômicos, legais e institucionais, que os limitam, restringem ou inviabilizam (Buras, 1972; Sahuquillo, 1993).

Além disto, existem condicionantes de tipo físico : por exemplo as entradas de água do sistema sofrem perdas, como infiltração (condicionantes litológicas e geológicas) e se armazenarão em um ou vários reservatórios, sendo sua/s capacidade /s limitada /s por condições topográficas.

(*) *LEVI, E. 1995. Preface. In: ____. The science of water. The foundation of modern hydraulics. New York: American Society of Civil Engineers. p. xiv.*

Não existe uma metodologia única (padrão) na formulação de um esquema de planejamento de recursos hídricos, dado que os objetivos e sua evolução temporal variam de região em região, de país em país. Em alguns casos o planejamento tem o objetivo inicial de desenvolvimento e incremento das áreas sob irrigação (como foi o caso da Venezuela) e com o tempo se incorporam outros novos objetivos, como abastecimento urbano e industrial, saneamento, hidro-eletricidade, navegação, controle de enchentes, etc. Às vezes o próprio plano de desenvolvimento dos recursos hídricos gera novos (e às vezes sérios) problemas que requerem uma ação de planejamento corretiva, como o que aconteceu no Paquistão, onde o desenvolvimento da agricultura sob irrigação na década de setenta provocou o aumento do nível freático, salinização de solos e aqüíferos, diminuição de áreas produtivas e outros problemas (Sahuquillo, 1993).

O número de exemplos de objetivos a atingir por um esquema de planejamento e as metodologias que foram utilizadas é tão grande quanto o número de regiões onde foram aplicados.

Portanto, duas conclusões preliminares poderiam ser extraídas:

1) É necessário planificar a longo prazo em razão do tempo de maturação e da vida útil destas obras e também pela repercussão das decisões que são tomadas e que podem atingir várias gerações, sendo seus efeitos muitas vezes irreversíveis (Barth, 1987; Kindler, 1992). Não é exagero dizer que os projetos destinados a satisfazer as demandas do ano 2025 devem iniciar-se ou estar num estágio avançado do planejamento antes do fim do século (Evaluación, 1997).

2) A alocação dos recursos hídricos entre usos múltiplos é um problema bastante complexo, cuja solução deve ser procurada aplicando uma abordagem sistêmica.

Os parágrafos anteriores, que aparecem como frases voluntaristas, recorrentes em qualquer relatório técnico, verdades tão óbvias que nem precisam ser repetidas mais uma vez, adquirem hoje, no fim de século, uma relevância impensada nas décadas de setenta ou oitenta: os habitantes do planeta estão assistindo (e padecendo...) ao esgotamento das fontes tradicionais de água, sendo que a demanda está crescendo a uma taxa que assusta (Burás, 1988, apud Sahuquillo, 1993; Shiklomanov, apud Hay, 1997).

Isto exige uma rápida aproximação entre as entidades encarregadas do planejamento e os centros de pesquisas tecnológicas para gerar, conjuntamente, novas alternativas de solução técnica, social, ambiental, econômica e politicamente viáveis.

2.2. A Abordagem Sistêmica

Como foi colocado anteriormente, não existe uma metodologia padrão no planejamento hídrico e portanto é imprescindível que ele seja feito aplicando uma abordagem sistêmica. Pode-se dizer que a análise sistêmica tem seu lugar ganho no gerenciamento e operação de reservatórios (Simonovic, 1992).

Sistema é um conjunto de componentes (elementos) que interagem entre si para atingir uma finalidade específica, de acordo com um plano ou princípio (Instituto de Pesquisas Espaciais, 1972).

A análise sistêmica é um estudo analítico, para ajudar ao tomador de decisões (planejador) a identificar e selecionar uma alternativa dentre um grande número delas. Segundo Lanna (1997b), pode-se afirmar que a abordagem sistêmica está relacionada à abstração ou simplificação de um problema complexo, de forma tal que sejam mantidas apenas as informações mais relevantes, visando a sua solução. Para isto é preciso que sejam definidos e especificados com clareza as hipóteses, objetivos e critérios de avaliação (Andreu , 1993a).

Segundo Labadie (1987) e Andreu (1993a) a análise sistêmica deve ser efetuada através dos seguintes passos:

1) Definição dos problemas operacionais.
2) Identificação dos componentes do sistema no tempo e no espaço e coleta de dados relevantes.
3) Definição dos objetivos gerais e específicos.
4) Definição dos métodos e critérios da avaliação, que determinarão se as soluções alternativas permitirão alcançar os objetivos propostos.
5) Criação de alternativas viáveis física, econômica e socialmente, para o sistema e para sua administração.

6) Avaliação das alternativas possíveis e seleção da melhor, usando a tecnologia, tempo e recursos humanos e financeiros disponíveis.

7) Revisão, atualização e retroalimentação, para checar se os objetivos originais foram alcançados. Deverão ainda ser incorporadas as novas informações obtidas.

É importante salientar que, da ótica do planejamento, o projeto de um aproveitamento e a sua operação não são compartimentos isolados e, portanto, devem ser considerados e analisados simultaneamente (Goulter, 1992).

Sendo assim, o problema se complica mais ainda pela existência dos conflitos operacionais, como os que se apresentam no caso de suprimento hídrico quando se deve decidir que parte da reserva de água será usada no presente e que parte será preservada para seu uso futuro (Lanna, 1982).

A ciência formal que estuda a melhor forma de alocação de recursos escassos entre atividades que competem por eles é a Pesquisa Operacional, que se apoia num ramo da Matemática chamado de Programação Matemática (Hillier e Lieberman, 1986). Porém, quando se fala da programação matemática como ferramenta ou subsídio para a tomada de decisões, a palavra programação não se refere a algum sinônimo de computação, senão a planejamento, embora o computador seja uma ferramenta quase imprescindível nesta tarefa.

Uma descrição detalhada e precisa do significado da terminologia utilizada na programação matemática pode-se encontrar no trabalho de Greenberg (1996-8), disponível na Internet.

Para tomar uma decisão com bases científicas é preciso ter um modelo. Um modelo é uma representação da realidade, na maioria das vezes com simplificações do fenômeno real (Loucks, 1992), que finalmente é expresso ou descrito em forma esquemática devendo esta descrição ser feita com o auxílio de métodos matemáticos (Ventsel, 1983).

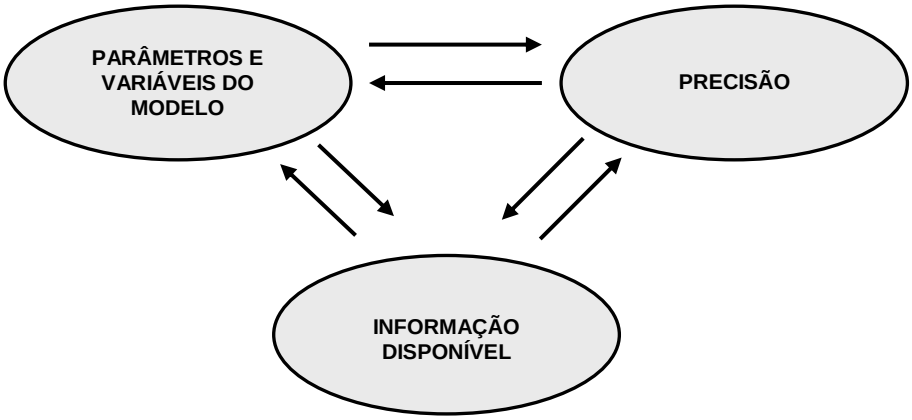

Figura 2.1 Compatibilidades a serem consideradas na modelação

Não existe uma metodologia universal para a construção de modelos matemáticos, mas uma recomendação pode ser feita como critério geral: deve-se procurar compatibilizar a precisão com a quantidade de parâmetros e variáveis, e a disponibilidade de informação (Andreu, 1993a), o que é esquematizado na figura 2.1.

Na modelação matemática existe um princípio às vezes esquecido, que é representado na figura 2.2:

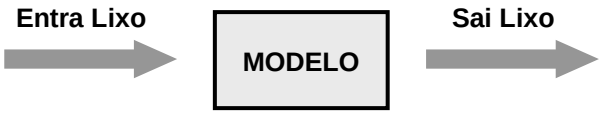

Figura 2.2 Limitações dos modelos

Então, se os dados são ruins, é inócuo que o modelo seja minucioso e preciso, porem, é desejável que seja assim.

Uma outra recomendação importante: tomar decisões com base numa enorme quantidade de informação é impossível, ou seja, abaixo de certa quantidade, os dados são insuficientes e, acima de outra certa quantidade, são excessivos. A definição destes patamares fica estritamente sujeita ao bom senso e experiência do profissional. É por isto que, segundo Igor Ansoff, as tomadas de decisão são sempre feitas em situações de informação incompleta (Ansoff, apud Ximenes, 1997).

Os problemas com que lida a Pesquisa Operacional podem-se classificar, segundo Ventsel (1983), em:

a) problemas diretos e

b) problemas recíprocos.

Os **problemas diretos** procuram dar resposta à pergunta '*o **que aconteceria se ...**'* em determinadas circunstâncias adota-se uma determinada solução. O 'que aconteceria' deve-se analisar através de índices de eficiência, conhecidos como **função objetivo** (Wagner, 1986), **função econômica** (Kaufmann e Hery-Labodere, 1971-1976), **função de valor** (Hall e Dracup, 1974), **função critério**, etc. Estes tipos de problemas são abordados e resolvidos através da **simulação**.

Por sua vez, os **problemas recíprocos** tentam dar resposta à pergunta '***como...***' escolher uma solução viável que maximize um índice de eficiência. Estes tipos de problemas são resolvidos através da **otimização**.

Num artigo já clássico no planejamento dos recursos hídricos, Yeh (1985) fez uma revisão aprofundada dos modelos de gerenciamento e operação de reservatórios, no qual adverte que cada problema de planejamento e operação de reservatórios é único, não existindo um algoritmo geral ou universal para a resolução destes problemas.

Segundo Simonovic (1992), as diferentes formas de abordagem sistêmica do manejo e operação de reservatórios podem classificar-se em:

1) simulação;

2) otimização;

3) análise multiobjetivo;

4) combinação das técnicas anteriores.

- MODELOS DE SIMULAÇÃO

Um modelo de simulação tenta reproduzir o comportamento de um sistema (neste caso a bacia hidrográfica) através de algoritmos, ou seja tenta reproduzir as

respostas desse sistema aos impulsos de entrada (Tucci, 1987).

A simulação não é capaz de gerar diretamente uma solução ótima a um problema (Hall e Dracup, 1974), mas pode ser uma interessante maneira de checar distintas alternativas de decisão predefinidas e detectar a melhor delas.

A afirmação de que não é possível encontrar um ótimo por simulação é 'forte' e pode ser sustentada através dos conceitos de **complexidade algorítmica** (Ruelle, 1993).

As técnicas de simulação têm preenchido o vazio entre as ferramentas simplistas e fáceis de usar para a determinação dos volumes de armazenamento, como o método de Rippl, e os métodos de otimização mais sofisticados.

Em geral, pode ser dito que os conceitos de base da simulação são fáceis de entender. Daí a vantagem que têm os modelos de simulação sobre os outros tipos de análises.

Os primeiros exemplos de simulação aplicada aos recursos hídricos se remontam à década dos anos 50. Os modelos de simulação mais modernos são o HEC-3, o HEC-5 e o HEC-5 Q, que incorpora a simulação da qualidade da água, o ACRES, o RESER, o IRIS e outros (Simonovic, 1992). O SAGBAH, desenvolvido por Lanna (1997c), é um modelo de simulação destinado a dar apoio ao gerenciamento de bacias hidrográficas.

- MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

As revistas e publicações especializados reportam inúmeros casos de aplicação de modelos de otimização ao dimensionamento e operação de sistemas de recursos hídricos (Vieira Neto, 1991; Tao e Lenox, 1991; Sheer et al.,1992; Valdés et al., 1992; Mohan e Raipure, 1992; Oliveira, 1995; Lund e Ferreira, 1996 e muitos outros).

Um novo campo para a aplicação destes modelos é no manejo de terras úmidas. Vadas, et al. (1995), apresentam uma metodologia para o desenvolvimento de terras úmidas (wetlands) na bacia do rio San Joaquin, na California, onde o gerenciamento foi feito por otimização, aplicando o programa MINOS. Esta parte do trabalho foi formulada como um problema de **PL** , tendo sido os problemas de não-linearidades resolvidos através de aproximações sucessivas. Neste trabalho,

incluiram-se aspectos qualitativos das águas nas restrições.

Em termos práticos, os modelos de otimização permitem tomar decisões, tanto no planejamento quanto na operação, que em algum sentido mensurável são ótimas (OPTIMIZATION, 1998?).

Um modelo de otimização está constituído por uma **função objetivo (FO)** que se quer maximizar ou minimizar, em breve otimizar (Braga, 1987; NEOS Guide, 1996):

$$FO: \quad MAX / MIN \ \{ F(x_1, x_2, ..., x_n) \} \tag{2.1}$$

devendo serem satisfeitas algumas **restrições**:

$$G_i(x_1, x_2, ..., x_n) \begin{cases} > b_i \\ < b_i \\ = b_i \end{cases} \tag{2.2}$$

onde:

x_j	variáveis de decisão	(j = 1, 2, ..., n)
G_i	funções de restrição	(i = 1, 2, ..., m)
b_i	parâmetros do modelo	(i = 1, 2, ..., m)

O número de variáveis de decisão define a **dimensão** do espaço (euclidiano) onde deverá ser procurada a solução do problema aplicando técnicas de programação matemática. Dentro do espaço n-dimensional, as **m** restrições delimitam a região **viável** das variáveis de decisão a um polígono, poliedro ou hiper-poliedro com $\frac{n!}{m! \cdot (n-m)!}$ vértices (Hillier e Lieberman, 1986). Para poder garantir uma solução com caráter de ótimo global, este espaço deve ser **convexo**[1] (Fritzche, 1978).

As soluções que satisfazem as restrições definem o conjunto das **soluções viáveis**. Dentre as soluções viáveis, a que satisfaz a função objetivo é chamada de

[1] *É possível demonstrar que num espaço convexo um ótimo local é também um ótimo global.*

solução ótima.

No caso dos parâmetros serem conhecidos o modelo chama-se de **determinístico**, enquanto que se os parâmetros fossem considerados variáveis aleatórias, tem-se uma situação de **programação estocástica**.

A NEOS Guide (1996), elaborada pela NEOS (Network-Enabled Optimization System), tem uma página da Internet destinada à difusão de diversas informações sobre otimização. Numa outra página secundária associada é apresentado o processo de otimização numa interessante árvore, que é reproduzida na figura 2.3.

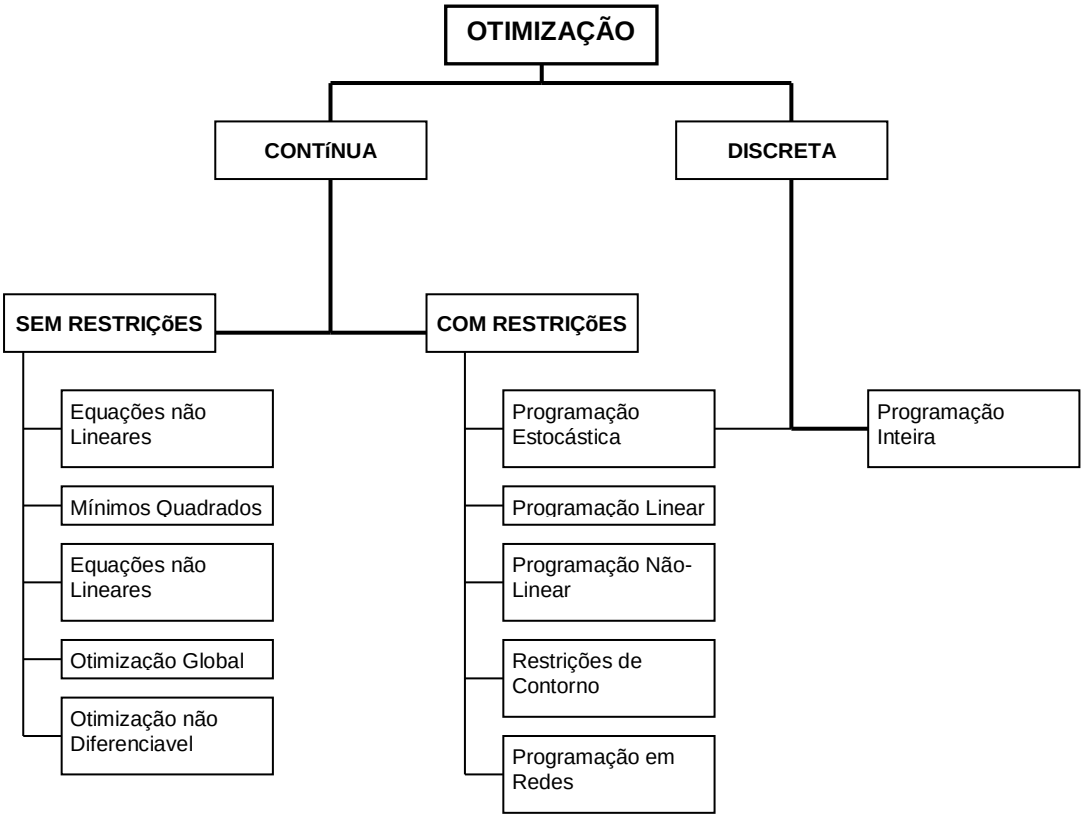

Figura 2.3 Árvore do processo de otimização (NEOS Guide Optimization Tree, 1996)

As restrições têm a finalidade de forçar o modelo a obedecer leis físicas, requerimentos econômicos, sociais, legais, etc. As restrições típicas em sistemas de reservatórios incluem: equação de conservação de massa, descarga máxima e mínima, armazenamento máximo e mínimo, obrigações contratuais e legais e outras.

Como já foi dito anteriormente, a maioria dos modelos de otimização são baseados em alguma técnica de programação matemática, como por exemplo:

a) Programação Linear (**PL**);

b) Programação Dinâmica (**PD**);

c) Programação Não-Linear (**PNL**).

Segundo Simonovic (1992), a **PL** é uma das técnicas de otimização mais amplamente utilizadas no planejamento dos sistemas de recursos hídricos e é considerada, por vários autores, um dos avanços científicos mais importantes da história científica recente (Simonovic, 1992; Hillier e Lieberman, 1988). Esta técnica está limitada a problemas lineares, ou seja problemas onde a função objetivo e as restrições são lineares, mas existem técnicas adicionais de linearização que estendem o uso da programação linear a outros problemas não lineares (ver Anexo B).

Existem inúmeros manuais específicos de **PL** e de Pesquisa Operacional como os de Gass (1966), o de Stark e Nicholls (1972), o de Lanzer (1982), o de Wagner (1986), o de Hillier e Lieberman (1988), o de Taha (1995) que é muito recente, o de Schrage (1997), que apresenta exemplos de aplicação do programa LINDO à solução de problemas de otimização e muitos outros, inclusive alguns disponíveis na Internet, como o de Reveliotis (1997). Por sua vez,. Fouer e Gregory (1996) têm um site na Internet onde fazem uma coletânea das perguntas mais comuns sobre **PL** (FAQ), dos softwares de domínio público e comerciais para a solução deste tipo de problemas, e de artigos e livros específicos.

A primeira aplicação da **PL** em problemas de operação determinística de reservatórios data de 1962 (Dorfman, apud Simonovic, 1992).

A **PD** é uma eficiente técnica matemática para estabelecer seqüências de decisões interrelacionadas. Tem sido amplamente utilizada no planejamento e operação de sistemas de recursos hídricos (Bahskar e Whitlatch, 1980; Karamouz e Houck, 1987; Crawley e Dandy, 1993).

Baseia-se no princípio de “otimalidade”, segundo o qual a seqüência de decisões ótimas a adotar num estádio qualquer do processo de decisão para atingir o ótimo procurado, independe das decisões adotadas nos estádios anteriores (Wagner, 1986; Kaufmann e Hery-Labodere, 1971-1976, Ventsel, 1983; Taha, 1995). O processo de decisão é seqüencial, no qual um problema que envolve várias direções de ação possíveis é decomposto numa série de etapas ou passos,

representando cada um destes um problema simples.

A **PD** produz normas de decisão retro-alimentadas, o que permite a tomada de decisão em qualquer etapa do sistema (Labadie, 1987). O interessante é que não se limita a problemas formulados de uma forma linear.

A sua maior desvantagem, segundo o seu criador Richard Bellman (Bellman, apud Labadie, 1987), é a sua dimensionalidade: há enormes requerimentos de memória para problemas com muitas variáveis de estado. Mas, por outro lado, a introdução de restrições não representam problema; pelo contrário, facilitam a sua resolução.

A **PNL** é bastante mencionada na literatura mas não se fez popular na análise de sistemas de recursos hídricos. Os principais motivos são (talvez) que as técnicas de resolução são iterativas, lentas e consomem muita memória do computador (Simonovic, 1992). A matemática envolvida nos modelos não lineares é muito mais complexa que nos casos de programação linear.

Se as funções envolvidas não delimitam espaços convexos, a única garantia de atingir um ótimo global é a solução analítica do problema, o que pode não ser fácil e, inclusive, pode não ser possível. Como alternativa, são utilizados métodos diretos,ou iterativos, de procura do ótimo (Ventsel, 1983), como o método do gradiente, o método Newton-Raphson (Taha, 1995), o método de Rosembrock, que não garantem que o ótimo atingido seja global. Apesar disso, a **PNL** oferece uma formulação mais geral dos problemas de otimização, ou seja, que não está limitada a funções objetivo nem restrições lineares (Yeh, 1985). A **PNL** inclui programação quadrática, programação geométrica e outras.

Fourer e Gregory (1997) mantêm na Internet uma lista das perguntas mais freqüentes (FAQ) sobre a **PNL**, na qual são referenciados trabalhos, publicações e programas para resolução de problemas de este tipo.

- ANÁLISE MULTIOBJETIVO

A otimização multiobjetivo tem suas origens nos trabalhos de Edgeworth e Pareto, de finais do século dezenove (NEOS Guide, 1996).

É muito comum, no planejamento dos recursos hídricos, que as metas (objetivos) procuradas não sejam únicas, senão que o problema consista em

otimizar um conjunto de objetivos, às vezes conflitantes entre si, como é o caso dos interesses econômicos e os interesses ambientais (Barros e Braga, 1991; Miloradov, 1992; Braga e Gobetti, 1997).

Mas, não é possível encontrar uma solução única que satisfaça todos os objetivos de uma vez só: uma solução que otimize um determinado índice de eficácia não é capaz, em geral, de otimizar nenhum outro (Ventsel, 1983). Segundo Braga e Gobetti (1997), não existe um único ótimo num problema com múltiplos objetivos, senão um conjunto de ótimos que satisfazem de diferentes formas os diferentes objetivos envolvidos na análise.

A formulação de um problema de objetivos múltiplos é bastante similar aos de otimização com um único objetivo:

$$\text{FO:} \quad \text{MAXIMIZE} \quad \overline{Z}(\overline{x}) \tag{2.3}$$

sujeito a:

$$G_i(\overline{x}) \leq 0 \qquad i = 1, 2, ..., m \tag{2.4}$$

onde:

$\overline{Z}(\overline{x})$ é o vetor dos objetivos $\{Z_1(\overline{x}); Z_2(\overline{x}); .....; Z_p(\overline{x})\}$

$\overline{x}$ é o vetor das variáveis de decisão

A grande diferença com a otimização tradicional é que a função objetivo, no caso da otimização multiobjetivo, é um vetor, onde cada componente $Z_j(\overline{x})$ deste vetor objetivo é o valor do resultado com referência ao objetivo **j** (Andreu, 1993b).

A solução analítica da otimização de um vetor é, em teoria, impossível, embora no dia a dia sejam tomadas decisões em condições de objetivos múltiplos.

Na programação multiobjetivo, o processo de tomada de decisões se divide, fundamentalmente, em duas etapas:

1) determinação do conjunto de decisões **dominantes**, ou **eficazes**, ou **não inferiores** ou **de Pareto**.

2) eleição da melhor **solução de compromisso**, a que não necessariamente será a ótima, senão aceitável segundo alguns critérios estabelecidos pelo encarregado de tomar a decisão (decisões heurísticas).

Existem várias técnicas para a geração do conjunto de decisões dominantes, entre elas o método das **restrições** e o método dos **fatores de ponderação** (Ventsel, 1983; Andreu, 1993b; Braga e Gobetti, 1997).

A eleição (decisão) de uma das alternativas de solução (trade-off) pode ser feita a partir de informação prévia sobre as preferências do encarregado de tomar as decisões ou, então, através de uma interação permanente com este encarregado, conseguindo assim uma manifestação progressiva de suas preferências. Como técnicas para a eleição da melhor solução de compromisso podem-se citar a **programação de metas**, o método dos **valores substitutivos de intercâmbio**, o método **passo a passo** e outros, como o método **Electre**, o método de estimação de **pesos ótimos**, o método de **solução seqüencial**, etc. (Andreu, 1993b; Braga e Gobetti, 1997).

A utilização de uma abordagem multiobjetivo tem algumas vantagens sobre as técnicas convencionais com objetivos únicos: objetivos incomensuráveis podem ser incorporados no planejamento, como questões ambientais, paisagísticas, interesse histórico, etc.

2.3. Reflexões Sobre os Trabalhos Consultados

Os trabalhos presentes na bibliografia revisada poderiam ser classificados em:

- livros tradicionais, que só apresentam os diferentes modelos e métodos para abordagens do tipo sistêmica, aplicados ou não, aos recursos hídricos;
- artigos que fazem uma “revisão do estado da arte” dos modelos existentes para o gerenciamento e operação de sistemas de recursos hídricos;
- artigos que apresentam alguma variante aos modelos “clássicos”, como contribuição científica à solução de problemas aplicando uma abordagem sistêmica;

- artigos que apresentam um problema em particular e o modelo específico que foi utilizado para sua resolução;
- artigos que reportam a existência de brechas entre a teoria e a prática na análise sistêmica dos recursos hídricos.

No que se refere à aplicação dos modelos de otimização aos recursos hídricos, todos os trabalhos consultados visam otimizar sistemas com regulação, ou seja com reservatórios, tanto superficiais quanto subterrâneos. A abordagem de aproveitamentos a fio de água através de modelos de otimização é uma lacuna percebida nesta revisão.

Com base na análise crítica da bibliografia consultada, algumas reflexões poderiam ser feitas:

- a **PL** tem as mencionadas limitações de que tanto a função objetivo quanto as restrições devem ser lineares;
- a **PL** garante um "ótimo global" na resolução de problemas;
- a **PL** não tem problemas de dimensionalidade;
- a **PL** é uma técnica relativamente simples e comprensível por qualquer profissional que trabalhe na operação de sistemas de recursos hídricos e não requer equipamentos computacionais sofisticados;
- a **PD** tem flexibilidade em problemas de objetivos múltiplos e abordagens estocásticas;
- a **PD** produz normas de decisão retro-alimentadas, que permitem a tomada de decisão em qualquer etapa do sistema (problema);
- a **PD** tem problemas de dimensionalidade, pelo qual, problemas com muitas variáveis de estado, têm enormes requerimentos de memória;
- a **PD** não garante a obtenção de "ótimos globais";
- as técnicas de resolução por **PNL** são, na maioria das vezes, iterativas, lentas e consomem muita memória;
- na **PL-Multiobjetivo** as "funções de intercâmbio" não são fáceis de entender por profissionais alheios à pesquisa e aos âmbitos acadêmicos: a enumeração de

todas as soluções de Pareto e, fundamentalmente, a escolha de uma delas não é tarefa que possa ser automatizada (não é algorítmica).

Pelas conclusões enunciadas acima, pode-se dizer que a utilização da **PL** para o planejamento de um sistema de recursos hídricos apresenta um interesse importante e que, embora as pesquisas atuais estejam mergulhando em modelos mais complexos e sofisticados, até com abordagens explicitamente estocásticas, a exploração da **PL** está longe de ter atingido todo o seu potencial.

Embora as suposições de linearidade limitem a aplicabilidade da **PL**, essas limitações não impedem seu uso nas fases iniciais do planejamento de sistemas de recursos hídricos, que é o objetivo desta pesquisa, ou mesmo em estudos de viabilidade. Por exemplo, Oliveira (1995), resolve o problema de operação de um sistema de cinco reservatórios, um centro urbano e dois perímetros irrigados, situados na bacia do rio Acaraú, no estado do Ceará, aplicando **PL**. Para a mesma bacia, Vieira Neto (1991) estudou o problema da expansão da capacidade deste sistema de açudes, para garantir o abastecimento dos perímetros irrigados e da cidade de Sobral, também utilizando **PL**. Por sua vez, Trezos (1991) apresenta o desenvolvimento de um modelo de otimização que foi resolvido utilizando **PL** com inteiros, destinado ao planejamento da operação de um sistema hidrelétrico da companhia Edison de eletricidade, nos Estados Unidos.

Uma grande vantagem que tem a **PL** é a existência de pacotes computacionais já prontos, alguns de domínio público (e portanto em versões com limitações) e que podem ser encontrados na Internet, como o LINDO, o HOPDM, o PCx, o COPL_LC e outros. Uma grande vantagem é que todos eles reconhecem o formato **MPS** (**M**atematical **P**rograming **S**ystem), que apresenta um sistema de equações (matriz), primeiro por linhas e depois por colunas (Fouer e Gregory, 1996). Uma descrição acurada deste formato é apresentada no manual do programa MINOS (Murtagh e Saunders, 1987) e também no trabalho de Santana (1998).

Por sua vez, a **PD** exige a elaboração de um programa para cada problema ou a adaptação de algum já pronto.

2.4. PROGRAMAÇÃO LINEAR

É um caso especial do modelo geral de otimização, quando o conjunto de restrições e a função objetivo são lineares.

A formulação geral do problema poderia-se escrever como:

$$\text{FO:} \quad \text{MAXIMIZE} \;\; Z = \overline{C}^T \cdot \overline{X} \;\; (\text{ou MINIMIZE } -Z) \qquad (2.5)$$

sujeito a:

$$\overline{A} \cdot \overline{X} \leq \overline{B} \qquad (2.6)$$

$$x_i \geq 0 \qquad [\,\overline{X} = (x_1, x_2, \ldots, x_i, \ldots, x_n)] \qquad (2.7)$$

onde:

$\overline{C}^T$ é a matriz linha de benefícios unitários (no caso de um problema de minimização, seriam custos unitários), de dimensão 1 x n;

$\overline{X}$ é o vetor das variáveis de decisão, de dimensão n x 1;

$\overline{A}$ é a chamada matriz tecnológica, de dimensão m x n;

$\overline{B}$ é o vetor dos recursos disponíveis, de dimensão m x 1.

Este problema expresso em forma matricial fica:

FO: MAX Z

sendo

$$Z = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \cdots & c_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdots \\ x_n \end{bmatrix} \qquad (2.8)$$

Por sua vez, as restrições apresentadas em forma de matrizes ficariam como:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_m \end{bmatrix} \qquad (2.9)$$

Mediante a introdução de **variáveis de folga** ou **residuais**, o sistema de inequações pode-se transformar em um sistema de equações.

$$\overline{A} \cdot \overline{X} \leq \overline{B} \longrightarrow \overline{A} \cdot \overline{X} + \overline{Y} = \overline{B} \qquad (2.10)$$

onde $\overline{Y}$ é o vetor de variáveis de folga (de dimensão m x 1), as que devem ser, necessariamente, positivas.

Após esta transformação, as restrições ficam como um sistema de **m** equações com **n+m** incógnitas[2].

Segundo a Álgebra Linear (Gass, 1966), num espaço de **n** dimensões podem-se ter, como máximo, um conjunto de **n** vetores linearmente independentes e esta coleção é chamada de **base** (os **n** vetores unitários de um espaço E^n são também uma base).

Então, num espaço E^n, qualquer ponto (vetor) pode ser expresso inequivocamente como uma combinação linear, também chamada de condição linear (Lipschutz, 1974), de uma dada **base**. Uma condição linear em E^2 define uma reta, em E^3 um plano e em um espaço de dimensão superior um hiperplano.

Seja a base **(U_1, U_2, ..., U_n)**, chama-se de **combinação convexa U** à combinação linear que satisfaz o seguinte:

$$U = \alpha_1 \cdot U_1 + \alpha_2 \cdot U_2 + ... + \alpha_n \cdot U_n \qquad (2.11)$$

$$\alpha_i \geq 0 \quad \text{(são escalares)} \qquad (2.12)$$

[2] ***n*** *incógnitas* x_i *e* ***m*** *incógnitas* y_i *.*

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_i = 1 \qquad (2.13)$$

Então, a combinação convexa de pontos (vetores) que formam uma base é um outro ponto.

Se num sub-espaço um ponto não se pode expressar como uma combinação convexa de qualquer outros dois pontos deste sub-espaço, o ponto é um ponto extremo ou **vértice** desse sub-espaço (Gonzaga, 1989).

É possível perceber que, num espaço E^2, se:

$$Z = c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 \qquad (2.14)$$

esta equação é a equação de uma reta, cuja distância à origem $\mathbf{dist_{ORIG}}$ é igual a:

$$dist_{ORIG} = \frac{Z}{\sqrt{c_1^{\,2} + c_2^{\,2}}} \qquad (2.15)$$

Dado que $\mathbf{c_1}$ e $\mathbf{c_2}$ são constantes, a maximização de **Z** é equivalente ou proporcional à maximização da distância desta reta à origem (Kaufmann e Hery-Labodere, 1971-1976).

Se além da função a maximizar tem-se uma restrição $\mathbf{g(x_1,x_2) \leq c}$, onde **c** é um escalar, e a restrição de não negatividade $\mathbf{x_i \geq 0}$, neste caso n=2 e m=1. Graficamente, esta situação fica como indicado na figura 2.4.

O espaço de validade do problema é a interseção entre o primeiro quadrante de E^2 e o semi-espaço que fica baixo a reta $\mathbf{g(x_1, x_2)}$, o que conforma o triângulo sombreado da figura 2.4. É fácil perceber que a máxima distância da reta que representa a função objetivo ao origem se dará no ponto **A** , onde $\mathbf{x_1 = 0}$ e $\mathbf{x_2 = x_A}$.

No caso que o problema fosse de **minimização**, além da restrição de não negatividade, $\mathbf{x_i \geq 0}$, a outra restrição deveria mudar de sentido e ficaria como $\mathbf{g(x_1,x_2) \geq c}$. Então o espaço de validade do problema seria a parcela não sombreada do primeiro quadrante da figura 2.4 e o mínimo valor de **Z**, equivalente à mínima distância à origem, acontecerá no ponto **B** , onde $\mathbf{x_1 = x_B}$ e $\mathbf{x_2 = 0}$.

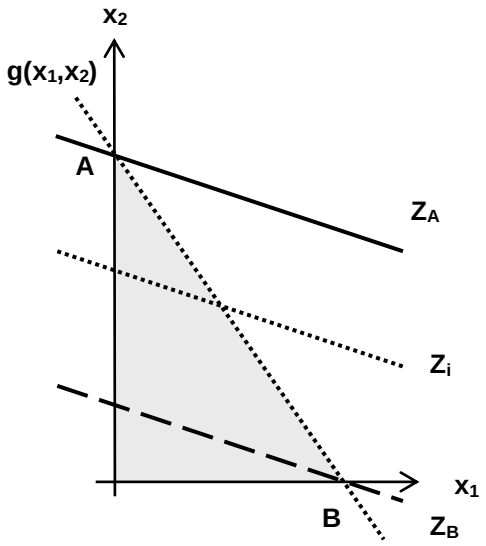

Figura 2.4 Princípio da solução da PL

Dado que maximizar ou minimizar **Z**, em breve, **otimizar Z**, é equivalente a maximizar ou minimizar a sua distância à origem, a condição de ótimo acontecerá, necessariamente, num ponto (vértice) onde uma das variáveis de decisão é nula (Kaufmann e Hery-Labodere, 1971-1976).

Então, no caso de se ter **m** restrições e **n** variáveis, com **n > m**, a solução do problema ocorrerá num ponto onde **n-m** variáveis sejam nulas e este fato é a base dos algoritmos de resolução de problemas de **PL**.

No caso de ser **m > n**, significa que pelo menos **m-n** restrições são espúreas[3], o que significa que elas são uma combinação linear de outras restrições. Mas, às vezes, a detecção das restrições espúreas não é tarefa fácil.

Chama a atenção que, embora os problemas de programação linear tenham uma longa história, só desde alguns anos se dispõe de algoritmos de tempo polinomial, ou seja eficientes, para a solução destes problemas (Ruelle, 1993). Os algoritmos mais conhecidos para a solução de problemas de **PL** são o método **Simplex**, o método do **elipsoide** e o método dos **pontos interiores**.

[3] *Lembrar que num espaço E^n apenas podem-se ter **n** vetores linearmente independentes*

2.4.1. ALGORITMO SIMPLEX

O método Simplex foi desenvolvido por George Dantzing em 1946 (Dantzing, apud Gonzaga, 1989). Este método procura o ótimo de uma função linear pulando de vértice em vértice do espaço que limita as soluções viáveis do problema. Portanto, é um método que, desde a ótica da análise da complexidade algorítmica (Ruelle, 1993), é pouco eficiente já que demanda um tempo de resolução (número de iterações) do tipo **exponencial**. Porém, seu desempenho em problemas do mundo real é excelente (Gonzaga, 1989).

O método Simplex baseia-se em fazer zero **n-m** incógnitas em cada iteração e resolver o sistema de **m** x **m** resultante pelo método Gauss-Jordan, que consiste em expressar a matriz dos coeficientes das variáveis que não foram "zeradas" como uma matriz identidade (só a diagonal principal é diferente de zero e igual a um), fazendo transformações lineares. O sistema, após esta transformação, é chamado de **forma canônica** e a matriz identidade de **base**.

O algoritmo permite estabelecer de maneira fácil qual variável deveria sair da base e qual entrar, ou seja, escolher qual a variável que seria conveniente modificar para introduzir a maior taxa de variação na função objetivo em cada iteração (Lanzer, 1982).

A estrutura do método permite a programação, em alguma linguagem de computação, da solução dos problemas de uma maneira muito fácil. O analista de sistemas de recursos hídricos não precisa escrever um programa de computador para resolver o algoritmo Simplex para cada problema que se apresenta na prática, dado que existem pacotes computacionais prontos, específicos e de aplicação geral (não especifica), entre eles o "Solver" do Microsoft-Excel. Wurbs (1993) apresenta uma revisão de vários modelos existentes, tanto para simulação quanto para otimização de sistemas de reservatórios e, como ponto interessante, salienta o importante potencial do software comercial de propósitos múltiplos, como o Lotus-123, o Quattro Pro e o Excel. Outros programas mais específicos estão disponíveis comercialmente, como o MINOS (Murtagh e Saunders, 1987), o THORA (Taha, 1995) e o LINDO (Lindo Systems, 1996), entre outros, sendo este último, na sua versão 'extended', capaz de resolver um problema de até 100.000 variáveis e 32.000 restrições, incluindo a posibilidade de resolver problemas de PL por inteiros.

Na NEOS Guide (1996), encontra-se uma lista de vinte e três programas (solvers) para resolver problemas de **PL** através do algoritmo Simplex.

Algumas técnicas adicionais, como o método **primal-dual** e o método **branch and bound** (O'Laoghaire e Himmelblau, 1974; Wagner, 1986; Taha, 1995; NEOS Guide, 1996) permitem o melhoramento do desempenho deste método na resolução de problemas de grande porte ou com matrizes esparsas e, também, de problemas com variáveis inteiras.

O método Simplex foi o único algoritmo disponível para a resolução de problemas de **PL** até o ano 1978, em que apareceu o algoritmo do elipsóide de Khachiyan (Khachiyan, apud Gonzaga, 1989).

2.4.2. Método dos Pontos Interiores

Quase pela mesma época em que Dantzing apresentou seu algoritmo Simplex, vários cientistas, entre eles Von Neumann, Hoffman e Frisch, começaram a dar forma a um algoritmo que, em vez de pular pelos vértices da região viável, a atravessava, num intento de reduzir a complexidade algorítmica do método Simplex (Andersen, et al., 1996). Eles estavam construindo as bases do método das **barreiras**.

Esta semente do atual método dos pontos interiores apresentava problemas computacionais, até instabilidade numérica. Em 1978 foi publicado o algoritmo de **elipsóides** de Khachiyan (Khachiyan, apud Gonzaga, 1989) que, em teoria, permitia resolver os problemas de PL em tempo **polinômico**, embora na prática se apresentara muito lento. Finalmente, em 1984, Karmakar (Karmakar, apud Gonzaga, 1989; Andersen et al., 1996) publicou uma variante muito eficiente do método dos pontos interiores, segundo ele 50 vezes mais rápido que o Simplex na solução de grandes problemas e que se baseava numa transformação não-linear, mediante a qual a região viável era tratada como um cone. Esta transformação é, por sua vez, uma variante do método das penalizações, só que em vez de punir a situação de estar fora da região viável, utiliza uma função de penalização que cresce indefinidamente perto da fronteira desta região viável.

A partir da publicação de Karmakar, surgiram muitos métodos computacionais baseados em seu algoritmo e hoje os mais robustos e eficientes utilizam uma função

barreira logarítmica. O programa HOPDM - Higer Order Primal Dual Method -, desenvolvido por Gondzio e Makowski (Gondzio e Terelaky, 1994; Gondzio e Makoski, 1995; Gondzio, 1995) em linguagem FORTRAN, disponível gratuitamente na Internet, foi utilizado com sucesso por Oliveira (Oliveira, 1995) para otimizar a expansão e operação de um sistema de reservatórios, com o objetivo de irrigação e abastecimento de populações, na bacia do Baixo Acaraú no estado do Ceará. Outros programas, também disponíveis na Internet, são o PCx (Czyzyk et al., 1997) e o COPL_LC (Ye, 1997b).

Andersen et al. (1996), Andersen e Ye (1997), Gondzio e Terelaky (1994), entre outros, descrevem a teoria e aplicações do método dos pontos interiores. Um recente livro publicado por Ye (1997a) apresenta em detalhe toda a teoria do algoritmo dos pontos interiores. Por sua vez, Steve Wright (1998), do Optimization Technology Center no Argone National Laboratory , mantém na Internet uma lista atualizada dos principais trabalhos e publicações sobre o método dos pontos interiores.

3. CASO EM ESTUDO

Os moradores das cidades, que dia após dia vêem fluir água das torneiras, dócil às suas necessidades, não têm noção de sua idiossincrasia. Eles não podem imaginar quanta destreza é necessária para manipular nossa amiga-inimiga, quanto discernimento deve ser adquirido no entendimento de sua natureza arrogante, para domesticá-la e dominá-la.

Enzo Levi(*)

3.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é a bacia do rio Paracatu, no noroeste do estado de Minas Gerais, sudeste de Goiás e leste do Distrito Federal (figura 3.1). Sua área de drenagem, tem uma superfície de 45 625 Km^2 (Plano, 1998?).

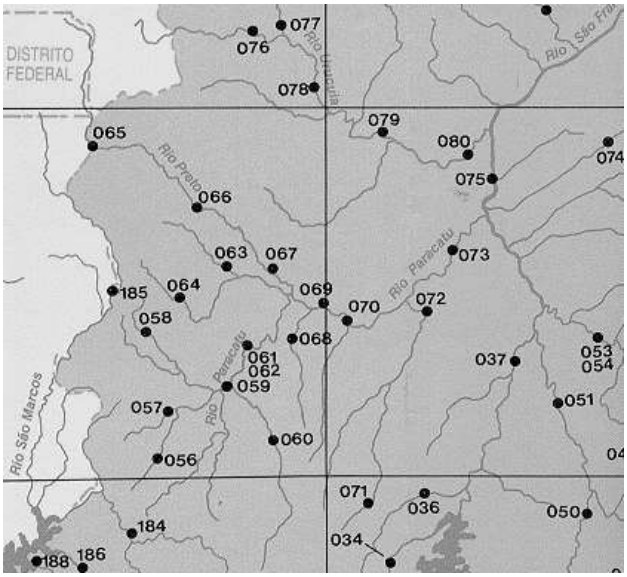

Figura 3.1 Mapa de localização da bacia.

(*) *LEVI, E. 1995. Preface. In: ____. The science of water. The foundation of modern hydraulics. New York: American Society of Civil Engineers. p. xiii.*

A bacia do rio Paracatu tem um uso eminentemente agrícola e pecuário, sendo a superfície das novas áreas que se pretendem irrigar da ordem de 87.782 ha e o rebanho que se pretende atender da ordem de 800.000 cabeças.

A população urbana da bacia é da ordem de 180.000 habitantes, enquanto que a população rural é da ordem de 140.000 habitantes.

É suposto que os requerimentos d'água do aproveitamento serão atendidos fazendo captações **a fio d'água**, ou seja sem reservatórios.

Os dados de deflúvios mensais, os econômicos e as demandas de água foram obtidos da empresa MAGNA Engenharia.

Os cursos de água foram divididos em 15 trechos, com um ponto de controle ou **PC** no fim de cada um. Não foi considerada a implantação de barragens em nenhum deles.

O esquema do aproveitamento é apresentado na figura 3.2.

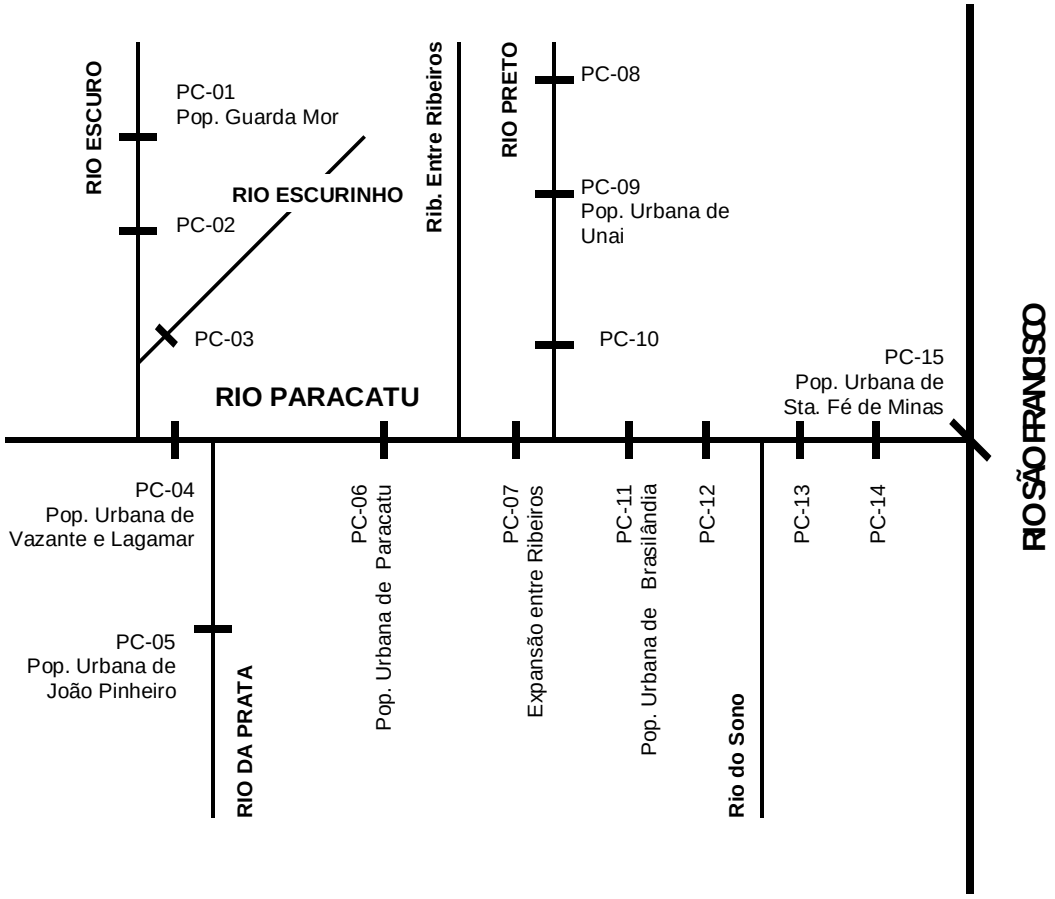

Figura 3.2 Esquema adotado para a bacia do rio Paracatu

3.2. CONDIÇÕES INICIAIS DA BACIA E PROJETOS A SEREM IMPLANTADOS

A situação inicial da bacia e as características dos projetos que nela se pretendem implantar, que são a base a partir da qual foi elaborado e desenvolvido este trabalho, podem ser descritas da seguinte forma:

- As culturas existentes e a implantar podem ser classificadas, em função do tipo de irrigação a utilizar, em dois tipos: culturas sob irrigação por inundação (arroz) e culturas sob irrigação por aspersão (culturas várias ou policulturas).

- Nos 15 PCs já existiam 37.084,60 ha de perímetros irrigados com produção de culturas várias (policulturas), estando sua distribuição detalhada na tabela A-1 (Anexo A).

- No que se refere à irrigação por inundação (arroz), é cogitada a implantação de 10 áreas sob irrigação: 1 no PC4, 1 no PC6, 2 no PC14 e as 6 restantes no PC15. Os detalhes destas áreas a implantar e seus respectivos consumos estão na tabela A-2 (Anexo A).

- Cogita-se implantar 18 novas áreas sob irrigação por aspersão: 2 no PC2, 1 no PC3, 3 no PC5, 2 no PC6, 5 no PC7, 2 no PC10 e 3 no PC12, estando os respectivos detalhes das superfícies e das demandas na tabela A-3 (Anexo A).

3.3. DADOS DISPONÍVEIS

- Dispunha-se de 55 anos de dados de vazões mensais para cada um dos PCs. Estas vazões correspondem às bacias incrementais dos PCs e os valores se encontram nas tabelas A-13 até A-27 (Anexo A).

- O detalhe das demandas dos centros urbanos encontram-se nas tabelas A-4, A-5, A-6 e A-7 (Anexo A), que correspondem às demandas projetadas para os anos 1997, 2001, 2006 e 2016 respectivamente.

- Os dados das demandas de irrigação fornecidos e apresentados nas tabelas A-1, A-2 e A-3 (Anexo A), não especificavam se eles correspondiam à tomada parcelar, ou à tomada do canal distribuidor principal ou a qualquer outra situação. Ante esta indefinição (falta de informação) se adotou a hipótese de que eles já estão corrigidos e correspondem aos volumes a serem retirados do rio, ou seja que já tem incorporadas as perdas na condução.

- As demandas rurais 'difusas' (população rural e gado) se encontram discriminados na tabela A-8 (Anexo A).

- Adotou-se como coeficientes de uso consuntivo os valores de 0,60 para as culturas, 0,20 para o consumo humano e 1,00 para o consumo do gado.

- Os dados econômicos, de custos e benefícios previstos e que serviram de base para a avaliação da eficiência (econômica) dos esquemas montados encontram-se nas tabelas A-9, A-10 e A-11 (Anexo A). Estes dados foram retirados do **fluxo de caixa** do projeto para o ano de estabilização destes fluxos financeiros (ano 30).

- Os dados das vazões mínimas a serem mantidas em cada PC (vazões ecológicas) encontam-se na tabela A-12 (Anexo A).

Embora se tenha percebido que os valores (dados) de rentabilidade das policulturas são excessivamente altos (ao ponto que, segundo o fluxo de caixa, a taxa interna de retorno - **TIR** deste projeto, a escala de bacia, não seria um número real, senão um número imaginário), não foram feitos estudos de consistência dos dados, pois adotou-se a hipótese de trabalho de privilegiar a elaboração e aplicação de diferentes metodologias de otimização. As metodologias elaboradas e testadas, algumas delas inéditas, tem aplicabilidade geral em problemas semelhantes e, portanto, independem dos dados com que são utilizadas.

4. METODOLOGIA

Embora possa parecer paradoxo, toda a ciência é dominada pela ideia de aproximação.

Bertrand Rusell

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O trabalho apresenta duas partes bem diferenciadas: a primeira, onde o objetivo é o planejamento 'estratégico' do sistema e que poderia ser chamado de **otimização da dimensão do sistema**, e a segunda, onde o objetivo é o planejamento 'tático' ou **operação do sistema**.

4.2. OTIMIZAÇÃO DA DIMENSÃO DO SISTEMA

As hipóteses mais significativas da metodologia adotada para a otimização do sistema são:

- A localização dos elementos do sistema (canais, usuários, etc.) foram definidos em uma etapa anterior, não sendo esta localização nem as considerações levadas em conta para sua definição questionadas neste trabalho.

- As dimensões que um elemento possa adotar são fixas, ou seja, uma vez escolhida uma, não existirá a possibilidade de sua expansão ou contração.

- No caso em que um projeto seja viável, ele será implantado no ano ‘zero’, ou seja no início do período de análise.

- Adotou-se o mês como intervalo de tempo para a análise, dado que reflete razoavelmente as variações sazonais da demanda e da oferta hídrica.

- A abordagem foi determinística, ou seja 'com futuro conhecido', utilizando como dados de entrada as séries de dados de vazões observadas no passado.

- Considerou-se que as demandas seriam atendidas na sua totalidade e os benefícios líquidos deste atendimento seriam fixos.

- No caso de serem implantados reservatórios, a evaporação dos mesmos será uma função linear do armazenamento.

- Os custos de operação e manutenção e os benefícios brutos são fixos.

- Algumas demandas foram consideradas como fixas e outras como variáveis. Por exemplo, a demanda de água para gado não foi considerada como variável devido a que ela é tão pequena que seu atendimento será garantido ainda com vazões muito baixas. Associar a ela uma variável de decisão só complicaria a resolução matemática do problema, não aportando ganhos na formulação conceitual. Por sua vez, o abastecimento de água às populações foi considerado de ‘primeríssima’ prioridade, ou seja, as demandas humanas também foram consideradas fixas. Portanto, apenas as demandas de irrigação foram consideradas como não fixas, sendo chamadas de **demandas variáveis** no contexto deste trabalho. As outras demandas, como as do gado e das populações (urbanas e rurais) foram chamadas de **demandas fixas**.

- A função objetivo adotada foi a maximização do valor presente dos benefícios líquidos (**VPBL**). A eleição da função objetivo é fundamental e determinante num trabalho de otimização e de sua correta eleição depende o sucesso do planejamento. Embora possa ser motivo de discussão e debate, considerou-se que o **VPBL** reflete razoavelmente os objetivos propostos.

Na continuação, serão explicadas por separado as restrições nos PCs com reservatórios e os que podem ser considerados trechos de rio.

4.2.1. RESERVATÓRIOS

Neste trabalho não foram incluídos reservatórios em nenhum dos PCs. Mas, como esta decisão foi feita posteriormente à formulação geral do modelo, quando a implantação de reservatórios ainda estava sendo considerada, considerou-se pertinente apresentar sinteticamente uma forma de abordagem das restrições para eles. O intuito de uma formulação mais geral e abrangente é que ela poderá ser mais útil para quem decida continuar trabalhando no futuro na otimização de sistemas de recursos hídricos.

Antes de apresentar as restrições é preciso fazer alguns esclarecimentos e considerações, especialmente no que faz à questão de evaporação e precipitação sobre a superfície do reservatório.

4.2.1.a. RELAÇÃO ÁREA - VOLUME

Os reservatórios com objetivo de geração de energia têm, em geral, seu intervalo de variação de armazenamento limitado, razão pela qual a relação **área – volume** pode-se considerar, sem grandes erros, como linear (figura 4.1). Portanto, chamando de **A** a área e **V** o volume:

$$A = a + b \cdot \frac{V_1 + V_2}{2} \tag{4.1}$$

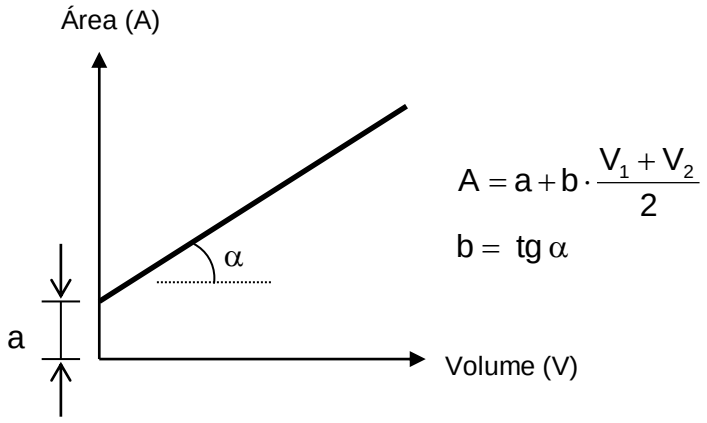

Figura 4.1 Relação linear entre área e volume

Se $\mathbf{V_1}$ é o volume no fim do intervalo de tempo **1** e $\mathbf{V_2}$ o volume no fim do intervalo **2**, o termo $\frac{V_1 + V_2}{2}$ será o volume médio do intervalo ou período **2**. Os termos **a** e **b** são os parâmetros da relação linear.

No caso em que a relação linear seja inadmissível, pode ser feito o que se conhece como uma linearização por segmentos, ou seja, tentar aproximar uma poligonal à curva. Uma metodologia desenvolvida durante a elaboração deste trabalho é apresentada no Anexo B.

4.2.1.b. EVAPORAÇÃO NO RESERVATÓRIO 'r'

No caso de ser aceita a hipótese de relação linear entre área e volume, a evaporação no reservatório **r**, no mês **m**, pode ser expresso como:

$$\begin{aligned} EV(m)_r &= e(m)_r \cdot A = e(m)_r \cdot \left(a + b \cdot \frac{V_1 + V_2}{2} \right) = \\ &= e(m)_r \cdot a + \frac{e(m)_r \cdot b}{2} \cdot V_1 + \frac{e(m)_r \cdot b}{2} \cdot V_2 \end{aligned} \tag{4.2}$$

onde $\mathbf{e(m)_r}$ é a taxa de evaporação do reservatório **r** no mês **m**.

Para simplificar a escrita da equação de acima, algumas variáveis foram agrupadas segundo:

$$CAE(m)_r = e(m)_r \cdot a \tag{4.3}$$

$$CBE(m)_r = \frac{e(m)_r \cdot b}{2} \tag{4.4}$$

O significado de $\mathbf{V_1}$ e $\mathbf{V_2}$ é o seguinte:

$V_1 = S(t, m-1)$ o armazenamento no fim do mês **m-1**, do ano **t**

$V_2 = S(t, m)$ o armazenamento no fim do mês **m**, do ano **t**

Levando em conta as considerações anteriores, a equação de evaporação fica:

$$EV(t,m)_r = CAE(m)_r + CBE(m)_r \cdot S(t,m-1) + CBE(m)_r \cdot S(t,m) \qquad (4.5)$$

4.2.1.c. Precipitação no reservatório 'r'

Seguindo o mesmo raciocínio utilizado na evaporação, a precipitação sobre a superfície do reservatório **r**, no mês **m**, pode-se expressar como:

$$PR(t,m)_r = CAP(m)_r + CBP(m)_r \cdot S(t,m-1) + CBP(m)_r \cdot S(t,m) \qquad (4.6)$$

onde:

$PR(m)_r$ precipitação sobre o reservatório **r** no mês **m**

$$CAP(m)_r = pr(m)_r \cdot a$$

$$CBP(m)_r = \frac{pr(m)_r \cdot b}{2}$$

$pr(m)_r$ taxa de precipitação sobre o reservatório **r** no mês **m**

a, b os parâmetros da relação linear área - volume

4.2.1.d. Esquema dos fluxos nos reservatórios

Feitas estas considerações prévias e levando em conta que a notação $\mathbf{S_r(t,m)}$ se refere ao armazenamento do reservatório **r**, <u>no fim</u> do mês **m** e no ano **t**, o esquema geral que representa os volumes que entram e que saem de um reservatório é o que se apresenta na figura 4.2.

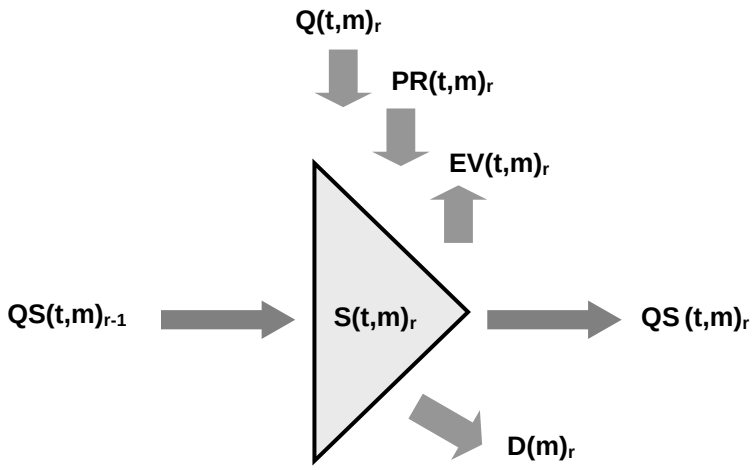

Figura 4.2 Balanço de massas num reservatório

onde:

$Q(t,m)_r$ vazão da bacia incremental contribuinte do mês **m**, do ano **t**;

$QS(t,m)_{r-1}$ vazão de saída do PCr-1 no mês **m** e no ano **t**;

$QS(t,m)_r$ vazão de saída do PCr no mês **m** e no ano **t**;

$S(t,m)_r$ armazenamento do reservatório **r** no fim do mês **m**, do ano **t**;

$PR(t,m)_r$ precipitação sobre o lago do reservatório **r** no mês **m** ;

$EV(t,m)_r$ evaporação do lago do reservatório **r** no mês **m** ;

$D(m)_r$ demandas do PCr, incluindo as consideradas fixas e as consideradas variáveis.

4.2.1.e. Restrições

Em qualquer abordagem hidrológica a grande restrição que deve ser observada é o balanço de massas, que pode ser expresso como:

VARIAÇÃO DE ARMAZENAMENTO = ENTRADAS – SAÍDAS

o que, em forma de equação, fica:

$$S(t,m)_r - S(t,m-1)_r = \left[Q(t,m)_r + QS(t,m)_{r-1} + PR(t,m)_r\right] - \\ - \left[QS(t,m)_r + D(m)_r + EV(t,m)_r\right] \qquad (4.7)$$

A vazão de saída $\mathbf{QS(t,m)_{r-1}}$ sintetiza tudo o 'que aconteceu' a montante do PCr . A vazão de saída $\mathbf{QS(t,m)_r}$ envolve as vazões turbinadas e vertidas.

Expressando isto em fórmulas fica:

$$QS(t,m)_{r-1} = QT(t,m)_p + QV(t,m)_p + \sum_{j=p+1}^{r-1} Q(t,m)_j - \sum_{j=p+1}^{r-1} D(m)_j \qquad (4.8)$$

$$QS(t,m)_r = QV(t,m)_r + QT(t,m)_r \qquad (4.9)$$

onde o índice **p** representa o primeiro **PC** com reservatório a montante do **PCr** e o extremo do operador somatório, **j = p+1**, indica o primeiro PC a jusante do **PCp** (o **PCp** é um reservatório). No caso de não existir pontos com reservatório a montante de **r**, o índice **p+1** representa o PC mais a montante com influência no **PCr**.

O significado dos outros termos é:

$QT(t,m)_j$ vazão turbinada no PCi, no mês **m** do ano **t**;

$QV(t,m)_j$ vazão vertida no PCi, no mês **m** do ano **t**.

Então, levando em conta estas considerações, a equação (4.7) fica:

$$S(t,m)_r - S(t,m-1)_r = \begin{bmatrix} Q(t,m)_r + QS(t,m)_{r-1} + CAP(m)_r + \\ + CBP(m)_r \cdot S(t,m-1)_r + CBP(m)_r \cdot S(t,m)_r \end{bmatrix} - \\ - \begin{bmatrix} QV(t,m)_r + QT(t,m)_r + D_r(m) + CAE(m)_r + \\ + CBR(m)_r \cdot S(t,m-1)_r + CBE(m)_r \cdot S(t,m)_r \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Esta é, em forma sintética, a primeira restrição a ser levada em conta no análise de um PC com reservatório. A única ressalva que deve ser feita é que, no primeiro mês do primeiro ano (**t=1** e **m=1**), o termo $\mathbf{S_r(t,m)}$ não é variável de decisão, senão o **armazenamento inicial**, ou seja uma condição inicial (constante).

Outras restrições a serem verificadas são:

$$QV(t,m)_r + QT(t,m)_r \geq QEC_r \quad (4.11)$$

$$S(t,m)_r \geq S_{mínimo} \quad (4.12)$$

$$S(t,m)_r \leq S_{MÁXIMO} \quad (4.13)$$

sendo:

QEC_r a vazão ecológica do $\mathbf{PC_r}$

$S_{mínimo}$ o armazenamento mínimo

$S_{MÁXIMO}$ o armazenamento máximo

Ainda existe uma outra restrição: no fim do período de análise (ou seja no mês **m = 12** e no ano **t = T**) o armazenamento tem que ser igual ao armazenamento inicial $\mathbf{S_{inicial}}$ **,** para não ter perdas nem ganhos de água armazenada. Então:

$$S(T,12)_r = S_{inicial} \quad (4.14)$$

4.2.2. TRECHOS DE RIO

Os volumes que entram e que saem de um trecho de rio são apresentados esquematicamente na figura 4.3.

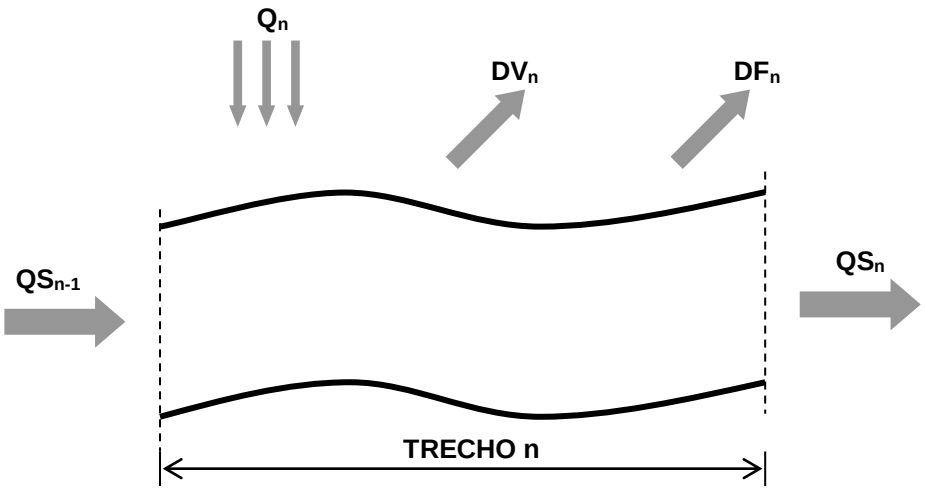

Figura 4.3 Volumes que intervêm no balanço de massas num trecho de rio

Observação: *na apresentação das equações dos trechos não foram indicadas as dependências temporais das variáveis para evitar gerar confusões e pelo fato de que as equações apresentadas serão desenvolvidas em detalhe mais adiante. Porém, para entender a formulação, é preciso lembrar que* ***QS_n, QS_{n-1}*** *e* ***Q_n*** *variam mês a mês e ano a ano, enquanto as demandas unitárias variam apenas com o mês.*

4.2.2.a. RESTRIÇÕES

Novamente, a restrição básica que deve ser observada é a equação de balanço hídrico que, como já foi colocado, é uma equação de **conservação de massa**:

$$QS_n = QS_{n-1} + Q_n - DF_n - DV_n \qquad (4.15)$$

No caso de um trecho de rio, esta equação poder-se-ia expressar em

palavras como que "*tudo o que entra é igual a tudo o que sai"* . Mas, por sua vez, tudo o que sai deve ser maior ou igual à vazão ecológica. Então a equação de balanço hídrico fica como:

$$QS_{n-1} + Q_n - DF_n - DV_n \geq QEC_n \qquad (4.16)$$

onde:

QS_{n-1} vazão de saída do trecho anterior 'n-1'

Q_n vazão da bacia incremental contribuinte ao trecho 'n'

DF_n demandas fixas do trecho 'n'

DV_n demandas variáveis do trecho 'n'

QEC_n vazão ecológica do trecho 'n'

Como já foi colocado nas hipóteses de partida, no contexto deste trabalho as demandas da população (rural e urbana) e as demandas do gado foram consideradas **demandas fixas**, enquanto que as demandas das culturas sob irrigação (inundação e aspersão) foram consideradas como **demandas variáveis**.

As demandas e contribuições de um trecho foram caracterizadas pelas demandas e contribuições contabilizadas no PC de jusante do trecho. Para exemplificar, o trecho **1** foi caracterizado pelas demandas e contribuições contabilizadas no **PC1**, o trecho **2** foi caracterizado pelas demandas e contribuições contabilizadas no **PC2** e, finalmente, o trecho **n** foi caracterizado pelas demandas e contribuições contabilizadas no **PCn**. Sendo assim, é indistinto falar do **trecho n** ou do **PCn**.

Agrupando no lado esquerdo da inequação as variáveis que poderiam ser chamadas de **variáveis de decisão** e no lado direito as que poderiam ser chamadas de **parâmetros do modelo** ou **valores fixos**, tem-se:

$$DV_n \leq QS_{n-1} + Q_n - DF_n - QEC_n \qquad (4.17)$$

Continuando com o raciocínio, seria preciso desenvolver o termo QS_{n-1}. Mas duas situações conceitualmente diferentes poderiam ocorrer:

i) trecho sem reservatório a montante e
ii) trecho com reservatório a montante.

i) TRECHO SEM RESERVATÓRIO A MONTANTE

Para este caso, desenvolvendo o termo $\mathbf{QS_{n-1}}$ da equação (4.17) segundo a equação (4.15) tem-se:

$$\sum_{i=a}^{n} DV_i \leq \sum_{i=a}^{n} Q_i - \sum_{i=a}^{n} DF_i - QEC_n \qquad (4.18)$$

onde o limite **a** dos operadores somatório representa o primeiro PC com influência a montante do **PCn**.

ii) TRECHO COM RESERVATÓRIO A MONTANTE NO $\mathbf{PC_w}$

Neste caso uma pequena modificação deve ser introduzida no desenvolvimento do termo $\mathbf{QS_{n-1}}$:

$$\sum_{i=w+1}^{n} DV_i - QV_w - QT_w \leq \sum_{i=w+1}^{n} Q_i - \sum_{i=w+1}^{n} DF_i - QEC_n \qquad (4.19)$$

onde o limite **w** dos operadores somatório representa o PC com reservatório, a montante do **PCn**; $\mathbf{QT_w}$ é a vazão turbinada no reservatório **w** e $\mathbf{QV(t,m)_w}$ é a vazão vertida do reservatório **w**. Os outros termos têm o mesmo significado do caso de trecho sem reservatório a montante.

Devido a que a inclusão de reservatórios finalmente foi desconsiderada, a formulação do caso “com reservatório a montante” tem apenas a finalidade de

generalizar a formulação do problema e, daqui em diante, esta situação não será mais levada em conta.

4.2.3. CONSIDERAÇÃO SOBRE OS VOLUMES EFETIVAMENTE CONSUMIDOS

Embora pareça evidente, é preciso fazer um esclarecimento: apenas uma parcela do volume retirado para atender alguma demanda é consumida efetivamente (uso consuntivo), enquanto que a parcela restante retorna ao rio novamente.

Neste abordagem será considerado que este retorno aporta ao trecho de jusante (o fato de estar trabalhando com intervalo de análise mensal justifica esta simplificação). Na figura 4.4 é ilustrada esta consideração:

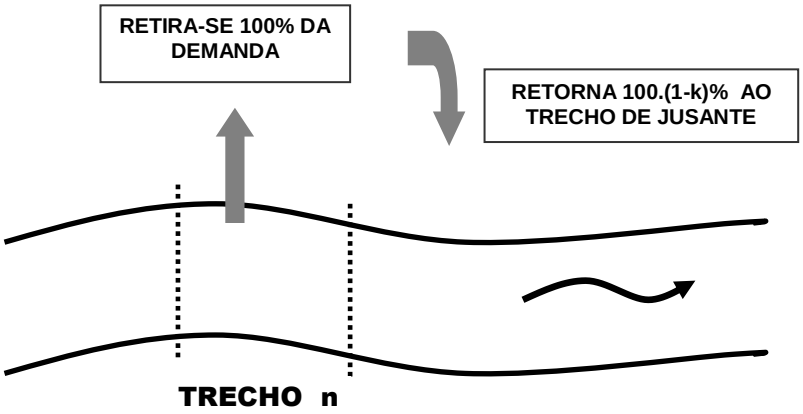

Figura 4.4 Considerações sobre os volumes de retorno

Será chamada de coeficiente de uso consuntivo **k** à parcela da demanda que é efetivamente consumida. Então, para retornar de novo ao rio **(1-k)** vezes a demanda, primeiramente deve ser retirada a totalidade desta demanda e isto é o que deve ser verificado.

O que aparece como uma obviedade deve ser considerado com muito cuidado na hora de fazer o balanço hídrico, dado que contabilizar indiscriminadamente apenas a parcela **k** da demanda conduz a situações falsas.

Para esclarecer esta questão considere-se a figura 4.5.

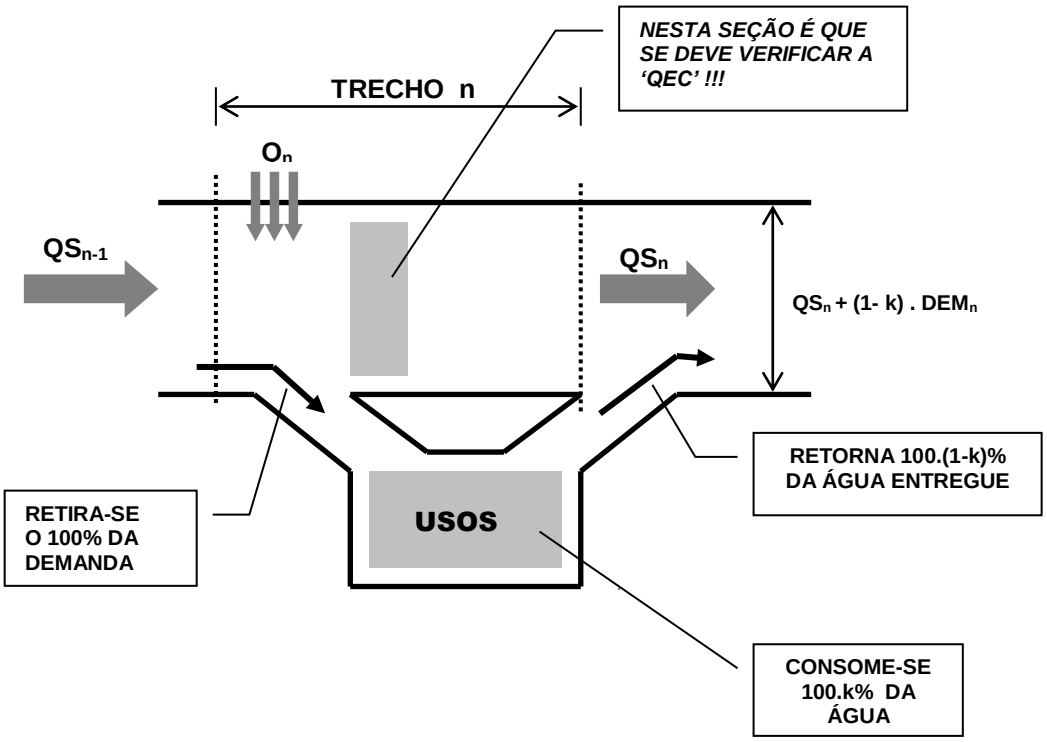

Figura 4.5 Esquema dos volumes efetivamente consumidos num trecho de rio

É preciso salientar que as equações e inequações que se apresentam a seguir, tomadas fora do contexto em que estão inseridas, podem levar a confusões e erros. O que se pretende dizer é que unicamente têm validade e aplicabilidade geral as equações e inequações finais, expressas utilizando operadores somatórios.

Levando em conta as observações do parágrafo acima, as equações de balanço hídrico deverão ser:

$$QS_n = QS_{n-1} + Q_n - (100\%)DF_n - (100\%)DV_n \qquad (4.20)$$

$$QS_n \geq QEC_n \qquad (4.21)$$

Desenvolvendo o termo **QS_{n-1}** da equação (4.20) tem-se:

$$QS_{n-1} = QS_{n-2} - (k_1 \cdot DF_{n-1}) - (k_2 \cdot DV_{n-1}) \qquad (4.22)$$

onde:

k_1 coeficiente de **uso consuntivo** das demandas fixas

k_2 coeficiente de **uso consuntivo** das demandas variáveis

Seguindo com este raciocínio, finalmente tem-se para o trecho **n**:

$$\sum_{i=a}^{n} Q_i - k_1 \cdot \sum_{i=a}^{n-1} DF_i - k_2 \cdot \sum_{i=a}^{n-1} DV_i - 100\% \cdot DF_n - 100\% \cdot DV_n \geq QEC_n \qquad (4.23)$$

onde o extremo **a** do operador somatório representa o primeiro **PC** com influência a montante do **PCn**.

4.2.4. Considerações sobre as demandas variáveis

A definição das **demandas variáveis** é uma questão central num problema de otimização de recursos hídricos. Esta definição pode ser feita através de diferentes abordagens. Mas, na tentativa de fazer uma classificação, poderiam ser agrupadas em **abordagem binária** e **abordagem não binária**.

Para o caso em que as áreas dos perímetros a serem implantados já tenham sido definidas num estágio anterior, como é este caso, a maioria dos autores fazem (e sugerem) uma abordagem que poderia-se chamar de **binária** (O'Laoghaire et al, 1974; Lanna, 1986). Neste tipo de abordagem, a existência de um elemento de projeto é caracterizada pélos valores de duas variáveis inteiras, binárias, ou seja, só podem adotar valores **1** ou **0**:

- a variável $\mathbf{V_j}$, adota valor **1** no caso em que o elemento de projeto **j** seja implantado; no caso contrario o seu valor é **0;**

- a variável $\mathbf{U(t)_j}$, adota valor **1** em caso em que a demanda do elemento de projeto **j** possa ser atendida no intervalo **t** ; no caso contrário o seu valor é **0**.

É possível ver que $\mathbf{U(t)_j}$ e $\mathbf{V_j}$ estão estreitamente associadas: no caso em que um elemento de projeto seja implantado (**V=1**), a variável **U** pode adotar valor **0** ou **1**, mas no caso em que o elemento de projeto não seja implantado (**V=0**), logicamente, a variável **U** só poderá adotar o valor **0**.

Embora não tendo sido vista na bibliografia consultada, também foi desenvolvida, formulada e testada uma **abordagem não binária**, onde as variáveis de decisão não estão mais limitadas a apenas os valores, **0** ou **1**, senão podem adotar qualquer valor entre **0** e **1**.

Dado que estes dois tipos de abordagem têm diferentes formulações conceituais, eles serão analisados por separado.

Já foi indicado anteriormente que não serão implantados reservatórios na bacia . Portanto, as considerações que serão colocadas daqui em diante levam em conta este fato.

4.2.5. Abordagem Binária

Neste caso, na definição das demandas variáveis foram utilizadas variáveis binárias chamadas de **U**, que indicam se num ano **t** as demandas de um projeto serão atendidas (**U=1**) ou não (**U=0**). Então, as demandas variáveis foram definidas como:

$$DV(m)_n = DI(m)_n \cdot UI(t)_n + DA(m)_n \cdot UA(t)_n + DE(m)_n \cdot UE(t)_n \qquad (4.24)$$

onde:

$DV(m)_n$ é a demanda variável do trecho (ou PC) **n**, no mês **m**;

$DI(m)_n$ demanda de irrigação por inundação do PC **n**, no mês **m**;

$UI(t)_n$ variável binária que indica se a demanda de irrigação por inundação do PC **n** será atendida no ano **t**;

$DA(m)_n$ demanda de irrigação por aspersão do PC **n**, no mês **m**;

$UA(t)_n$ variável binária que indica se a demanda de irrigação por aspersão do PC **n** será atendida no ano **t**;

$DE(m)_n$ demanda das áreas sob irrigação já existentes no PC **n**, para o mês **m**;

$UE(t)_n$ variável binária que indica se a demanda de irrigação da área sob irrigação já existente no PC **n** será atendida no ano **t**;

n índice que representa o trecho ou PC em questão;

Dado que, em geral, em cada PC existem vários sub-projetos de irrigação por inundação e aspersão, cada um destes foi analisado por separado, ou seja, associou-se a cada um deles uma variável **U** e uma variável **V**, de forma tal que se poderiam apresentar algumas situações como:

- num PC **n** poderia-se implantar o sub-projeto **a** de irrigação por inundação, o sub-projeto **b** de irrigação por aspersão, enquanto que o sub-projeto **c** de irrigação por aspersão poderia não ser viável de implantar;

- no ano **t**, no PC **n**, com os sub-projetos **a**, e **b** implantados, poderia apresentar-se o caso em que a demanda de **a** seja atendida enquanto que a de **b** não.

Na formulação do problema procurou-se que, no caso de ser necessária a escolha da implantação de uma ou outra área projetada, ou do suprimento de uma ou outra área implantada, sejam considerados dois critérios simultaneamente:

- a maximização do valor presente dos benefícios líquidos (função objetivo) e

- uso mais eficiente da água (restrição de balanço hídrico).

4.2.5.a. Restrições e Inequações de Compatibilidade

Chamando de:

k_I ao coeficiente de uso consuntivo da irrigação por inundação;

k_A ao coeficiente de uso consuntivo da irrigação por aspersão;

k_E ao coeficiente de uso consuntivo da irrigação das áreas existentes e

k_P ao coeficiente de uso consuntivo da demanda da população, tanto urbana quanto rural,

a restrição de balanço hídrico que deve ser verificada cada mês de cada ano do período de análise e em cada PC é:

$$\begin{aligned} &\sum_{i=a}^{n}\left[k_I \cdot DI(m)_i \cdot UI(t)_i + k_A \cdot DA(m)_i \cdot UA(t)_i + k_E \cdot DE(m)_i \cdot UE(t)_i\right] \leq \\ \leq\ &\sum_{i=a}^{n}\left[Q(t,m)_i - k_P \cdot \left(DU(m)_i + DR_i\right) - DG_i\right] - QEC_n \end{aligned} \qquad (4.25)$$

onde:

$DI(m)_i$ demanda de irrigação por inundação, do PC **i**, no mês **m**;

$UI(t)_i$ variável binária associada ao atendimento da demanda $DI(m)_i$ no ano **t** (**1** significa que a demanda será atendida e **0** que a demanda não será atendida);

$DA(m)_i$ demanda de irrigação por aspersão, do PC **i**, no mês **m**;

$UA(t)_i$ variável binária associada ao atendimento da demanda $DA(m)_i$ no ano **t**;

$DE(m)_i$ demanda das áreas sob irrigação já existentes no PCi, para o mês **m**;

$UE(t)_i$ variável binária associada ao atendimento da demanda $DE(m)_i$ no ano **t**;

$Q(t,m)_i$ vazão da bacia incremental contribuinte do trecho **i**, no ano **t**, no mês **m**;

$DU(m)_i$ demanda da população urbana, do trecho **i** no mês **m**;

DR_i demanda da população rural do PC **i**, considerada invariável no tempo;

DG_i demanda do gado do PC **i**, também considerada invariável no tempo;

QEC_n vazão ecológica do trecho **n**;

a primeiro PC com influência a montante do PCn;

k coeficientes de uso consuntivo: o índice **I** representa a irrigação por inundação, o índice **A** a irrigação por aspersão, o índice **E** os perímetros irrigados existentes e o índice **P** a população (rural e urbana).

Uma outra variável binária foi introduzida, a variável **V**, associada à implantação ou não de um projeto de irrigação. Como já foi explicado nas hipóteses gerais, considerou-se que se um projeto é viável, ele será implantado no ano 'zero', ou seja no início do período de análise. Logo, **V** não é uma variável dependente do tempo.

No caso em que um projeto seja implantado (**V=1**), a variável **U** poderá adotar valor **0** ou **1**, mas no caso em que um projeto não seja viável (**V=0**), logicamente, a variável **U** só poderá adotar o valor **0**.

Portanto é preciso introduzir restrições de compatibilidade entre **U** e **V**, as que devem serem verificadas para cada PC, todos os anos do período de análise. Estas restrições são apresentadas a seguir:

$$U(t)_n - V_n \leq 0 \qquad (4.26)$$

Este grupo de restrições refletem a condição lógica e necessária de que $U(t)_n \leq V_n$.

4.2.5.b. Função Objetivo

Como já foi colocado nas hipóteses de trabalho, a função objetivo adotada é a maximização do **VPBL**, o que expresso em forma de equação fica:

FO = maximize Z

sendo:

$$Z = \sum_{j=1}^{N^{o}PC} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{t=1}^{T} \left[FA(t) \cdot \left(UI(t)_j \cdot BLI_j + UA(t)_j \cdot BLA_j + UE(t)_j \cdot BLE_j \right) \right] - \\ - \left(VI_j \cdot CI_j + VA_j \cdot CA_j \right) \end{array} \right\} \qquad (4.27)$$

onde:

$FA(t) = \dfrac{1}{(1+d)^t}$ é o fator de atualização de pagamentos simples

O significado dos outros termos é:

$UI(t)_j$ variável binária associada ao atendimento da demanda da irrigação por inundação no PC **j**, no ano **t**;

BLI_j valor do benefício líquido esperado, do projeto de irrigação por inundação do PC **j**. Este valor é o resultado da subtração do valor previsto de ingressos pela venda do que seria produzido no PC **j** os custeios correspondentes (sementes, preparo da terra, custo da

energia, etc). Estes valores foram extraídos do fluxo de caixa para o ano onde este fluxo se estabiliza;

$UA(t)_j$ idem que o $UI(t)_j$, só que para irrigação por aspersão;

BLA_j idem que o BLI_j , só que para irrigação por aspersão;

$UE(t)_j$ idem que o $UI(t)_j$, mas para irrigação das áreas irrigadas existentes;

BLA_j idem que o BLI_j , mas para irrigação das áreas irrigadas existentes;

VI_j variável binária associada à implantação do projeto de irrigação por inundação do PC ‘j’;

CI_j custo de implantação do projeto de irrigação por inundação do PC ‘j’;

VA_j idem que o VI_j, só que para irrigação por aspersão;

CA_j idem que o CI_j, só que para irrigação por aspersão;

t o tempo em anos;

T o período de análise em anos;

NºPC o número de PCs;

No que tange ao período de análise (ou horizonte de planejamento), foram adotadas duas alternativas: uma de 10 anos, compatível com uma ótica privada e uma outra de 30 anos, compatível com uma ótica pública (social).

No contexto da abordagem binária foram desenvolvidas três formulações diferentes: uma primeira que poderia ser chamada de **‘variante tudo ou nada**’, a segunda que poderia ser chamada de **‘variante com alternativas pré-definidas’** e a terceira, que foi chamada de **‘variante com penalizações**’.

Para uma melhor visualização, as formulações de cada variante serão apresentadas por separado, na continuação.

4.2.5.1. VARIANTE 'TUDO OU NADA'

É a abordagem menos complicada, já que reduz o problema da otimização a um dilema simples: as áreas sob irrigação projetadas ou **serão** implantadas ou **não serão** implantadas. Além do mais, no caso de serem implantadas, o resultado da otimização estabelecerá se num determinado ano as demandas serão atendidas ou não, tanto para os projetos a serem implantados quanto para os perímetros de irrigação existentes. Isto tem uma importância relativa já que nesta etapa se está considerando o futuro como sendo 'conhecido' e a única certeza que se tem sobre ele é que o que aconteceu no passado não voltará a se repetir (Segura, 1993).

As restrições e inequações de compatibilidade como a função objetivo são as mesmas da formulação geral, anteriormente expressas. Embora possa parecer repetitivo, e apenas para não ficarem dúvidas, estas restrições, inequações de compatibilidade e função objetivo serão expostas a seguir:

a) Restrição de balanço hídrico (ou balanço de massas): tem-se uma para cada mês do período de análise e para cada PC:

$$\sum_{i=a}^{n}\sum_{s=1}^{S}\left(k_I \cdot DI(m)_{i,s} \cdot UI(t)_{i,s} + k_A \cdot DA(m)_{i,s} \cdot UA(t)_{i,s} + k_E \cdot DE(m)_i \cdot UE(t)_i\right) \leq \sum_{i=a}^{n}\left[Q(t,m)_i - k_P \cdot \left(DU(m)_i + DR_i\right) - DG_i\right] - QEC_n \quad (4.28)$$

O índice **i** representa o PC em questão e o índice **s** os sub-projetos de irrigação de cada PC.

b) Inequações de compatibilidade: tem-se uma para cada ano do período de análise e para cada sub-projeto de irrigação de cada PC:

$$UI(t)_{i,s} - VI_{i,s} \leq 0 \quad (4.29)$$

para as áreas sob irrigação por inundação.

$$UA(t)_{i,s} - VA_{i,s} \leq 0 \qquad (4.30)$$

para as áreas sob irrigação por aspersão.

As áreas sob irrigação existentes não intervêm nas inequações de compatibilidade já que não existem variáveis **V** associadas a elas (pois já foram implantadas anteriormente).

c) Função objetivo:

$$FO = MAX\left\{\sum_{i=1}^{NºPC}\sum_{s=1}^{S}\left[\sum_{t=1}^{T} FA(t)\cdot\begin{pmatrix} UI(t)_{i,s}\cdot BLI_{i,s} + UA(t)_{i,s}\cdot BLA_{i,s} + \\ + UE(t)_{i,s}\cdot BLE_{i,s} \end{pmatrix} - \\ -\left(VI_{i,s}\cdot CI_{i,s} + VA_{i,s}\cdot CA_{i,s}\right)\right]\right\} \qquad (4.31)$$

onde:

FA(t) é o fator de atualização de pagamentos simples;

i índice que representa o PC em questão;

t o tempo em anos;

T número de anos do horizonte de planejamento;

s índice que representa os sub-projetos de irrigação de cada PC;

4.2.5.2. VARIANTE COM ALTERNATIVAS PRÉ-DEFINIDAS

Devido a que com a abordagem anterior as decisões que podem ser tomadas são muito ‘duras’, sem matizes (um projeto será implantado - tudo - ou não será

implantado - nada -), foi desenvolvida uma segunda alternativa, onde cada sub-projeto de cada PC foi testado em três tamanhos diferentes, mais o tamanho nulo, resultando em quatro opções. Estes tamanhos ou alternativas foram 100%, 75%, ou 50% do tamanho projetado, ou, finalmente, tamanho nulo.

Esta alternativa permite que o grau de atendimento às demandas, num ano qualquer, seja menor ou igual ao tamanho de implantação. Ou seja, se o tamanho a implantar é 75% da máxima área projetada, o atendimento às demandas poderia ser de 75%, ou de 50%, ou zero, mas não de 100%, lembrando que as percentagens referem-se à máxima área projetada.

As restrições, inequações de compatibilidade e função objetivo são:

a) Restrição de balanço hídrico: tem-se uma para cada alternativa de tamanho de cada sub-projeto, em cada PC por cada mês e em cada ano do período de análise:

$$\sum_{i=a}^{n}\sum_{s=1}^{S}\sum_{y=1}^{3}\left[\begin{array}{l} k_I \cdot DI(m)_{i,s,y} \cdot UI(t)_{i,s,y} + k_A \cdot DA(m)_{i,s,y} \cdot UA(t)_{i,s,y} + \\ + k_E \cdot DE(m)_y \cdot UE(t)_y \end{array}\right] \leq$$
$$\leq \sum_{i=a}^{n}\left[Q(t,m)_i - k_P \cdot \left(DU(m)_i + DR_i\right) - DG_i\right] - QEC_n \qquad (4.32)$$

O índice **s** representa os diferentes sub-projetos de cada PC, o índice **y** as diferentes alternativas de tamanho (**y=1** $\Rightarrow$ 100% do máximo tamanho possível; **y=2** $\Rightarrow$ 75% deste tamanho e **y=3** $\Rightarrow$ 50% do mesmo tamanho), enquanto o índice **i** representa os PCs. O extremo **i=a** do operador somatório significa o primeiro PC a montante com influência no PC em questão.

b) Compatibilidade entre as variáveis **U** e **V**: tem-se uma restrição por ano do período de análise:

$$\left(UI(t)_{i,s,100\%} + 0.75 \cdot UI(t)_{i,s,75\%} + 0.50 \cdot UI(t)_{i,s,50\%}\right) -$$
$$-\left(1 \cdot VI_{i,s,100\%} + 0.75 \cdot VI_{i,s,75\%} + 0.50 \cdot VI_{i,s,50\%}\right) \leq 0 \qquad (4.33)$$

para as áreas sob irrigação por inundação.

$$\left(UA\,(t)_{i,s,100\%} + 0.75 \cdot UA\,(t)_{i,s,75\%} + 0.50 \cdot UA\,(t)_{i,s,50\%}\right) - \\ -\left(1 \cdot VA_{i,s,100\%} + 0.75 \cdot VA_{i,s,75\%} + 0.50 \cdot VA_{i,s,50\%}\right) \leq 0 \tag{4.34}$$

para as áreas sob irrigação por aspersão.

c) Compatibilidade entre as variáveis $\mathbf{U_s}$: uma restrição por sub-projeto, em cada PC, por cada ano do período de análise

$$\sum_{y=1}^{3} UI\,(t)_{i,s,y} \leq 1 \tag{4.35}$$

para as áreas sob irrigação por inundação.

$$\sum_{y=1}^{3} UA(t)_{i,s,y} \leq 1 \tag{4.36}$$

para as áreas sob irrigação por aspersão.

$$\sum_{y=1}^{3} UE(t)_{y} \leq 1 \tag{4.37}$$

para as áreas irrigadas existentes.

d) Compatibilidade entre as variáveis $\mathbf{V_s}$: uma restrição por sub-projeto, de cada PC.

$$\sum_{y=1}^{3} VI_{i,s,y} \leq 1 \tag{4.38}$$

para as áreas sob irrigação por inundação.

$$\sum_{y=1}^{3} VA_{i,s,y} \leq 1 \tag{4.39}$$

para as áreas sob irrigação por aspersão.

e) Função objetivo:

$$FO = MAX\left\{\sum_{i=1}^{NºPC}\sum_{s=1}^{S}\sum_{y=1}^{3}\left[\sum_{t=1}^{T}FA(t)\cdot\begin{pmatrix}UI\,(t)_{i,s,y}\cdot BLI_{i,s,y}+UA\,(t)_{i,s,y}\cdot BLA_{i,s,y}+\\+UE\,(t)_{i,s,y}\cdot BLE_{i,s,y}\end{pmatrix}-\right.\right.$$
$$\left.\left.-\left(VI_{i,s,y}\cdot CI_{i,s,y}+VA_{i,s,y}\cdot CA_{i,s,y}\right)\right]\right\} \quad (4.40)$$

onde:

FA(t) é o fator de atualização de pagamentos simples;

i índice que representa o PC em questão;

t o tempo em anos;

T número de anos do horizonte de planejamento;

s índice que representa os sub-projetos de irrigação de cada PC;

y índice que representa os tamanhos pré-definidos (neste caso 3 tamanhos).

4.2.5.3. VARIANTE COM PENALIZAÇÕES

A bacia em estudo e os projetos que se pretende implantar nela apresentam características muito particulares. Especificamente, o pico da demanda de irrigação por aspersão acontece no mês de setembro, mês no qual a disponibilidade hídrica é, geralmente, mínima, às vezes sendo apenas suficiente para satisfazer a vazão ecológica.

Então, uma dúvida poderia ser colocada: será que a sociedade estaria disposta a abrir mão da vazão ecológica em alguns meses de algum ano muito seco com o objetivo de ampliar ao máximo as áreas sob irrigação? Evidentemente aquilo

de 'abrir mão' pode não ser muito recomendável. Então a questão poderia ser reformulada da seguinte forma: será que a sociedade estaria disposta a arcar com as despesas decorrentes de atender as demandas de irrigação nos meses em que o rio não disponha de água suficiente, usando fontes alternativas?

Como resposta a esta dúvida montou-se um esquema que penaliza aqueles meses em que a vazão ecológica **QEC** não é satisfeita. Esta penalização poderia ser (ou melhor, deveria ser) feita através de um fator que reflita o custo de atender com outras fontes de suprimento às demandas de irrigação nos meses em que a oferta hídrica é insuficiente.

Para entender o raciocínio vejamos a inequação de restrição referida à vazão ecológica para um PC **n**:

$$\sum_{i=a}^{n} Q(t,m)_i - \sum_{i=a}^{n} DF(m)_i - \sum_{i=a}^{n} DV(m)_i \geq QEC_n \qquad (4.41)$$

sendo que os índices **i** representam os PCs com influência a montante do PC **n**.

Para transformar esta inequação em equação precisa-se de uma **variável de excesso** (ou folga), que será chamada de **PN**:

$$\sum_{i=a}^{n} Q(t,m)_i - \sum_{i=a}^{n} DF(m)_i - \sum_{i=a}^{n} DV(m)_i - PN(t,m)_n = QEC_n \qquad (4.42)$$

É evidente que a variável **PN** deve ser positiva no caso em que a vazão ecológica seja satisfeita. Mas, poderá acontecer que $\mathbf{PN(t,m)_n}$ seja menor, igual ou maior que zero.

Então, se:

$PN\ (t,m)_n < 0 \quad \Rightarrow$ Aplica-se a penalização, ou o suprimento é realizado pela fonte alternativa.

$PN\ (t,m)_n \geq 0 \quad \Rightarrow$ Não há penalização, ou o suprimento é realizado com folga.

Para evitar distorções na função objetivo, a variável **PN** foi definida da seguinte forma:

$$PN = PN1 - PN2 \tag{4.43}$$

onde **PN1** e **PN2** são variáveis **não negativas**.

Então, nesta abordagem, a penalização é feita da seguinte forma:

$$FO = MAX\left\{VPBL - \lambda \cdot \sum_{i=1}^{N^{o}PC} \sum_{t=1}^{T} \sum_{m=1}^{12} PN2(t,m)_i\right\} \tag{4.44}$$

sendo:

VPBL o valor presente do benefícios líquidos;

λ fator de penalização, ou custo do suprimento com fonte/s alternativa/s;

i o índice que representa os PCs;

t o índice que representa os anos;

m o índice que representa os meses do ano;

NºPC o número de PCs;

T o período de análise em anos (horizonte de planejamento).

Para entender como funciona esta penalização serão analisadas, a seguir, algumas situações hipotéticas:

1) **PN = - 2** e portanto é preciso penalizar. As possibilidades extremas são:

1.a) PN1 = 0 e PN2 = 2

1.b) PN1 = -2 e PN2 = 0

Dado que as variáveis **PN1** e **PN2**, por hipótese de trabalho, não podem ser negativas, a segunda alternativa é inviável. Então, sendo viável apenas a primeira, a função objetivo diminuirá. É possível observar que qualquer alternativa intermediária entre a 1.a e a 1.b, como por exemplo **PN1=1** e **PN2=3**, não será possível pela própria formulação da função objetivo, onde **PN2** entra com sinal negativo numa função a ser maximizada. Ou seja, a própria função objetivo puxará **PN2** para o menor valor não negativo possível, igual a dois neste caso.

2) **PN = 2** , portanto <u>não</u> é preciso penalizar. As possibilidades extremas são:

2.a) PN1 = 2 e PN2 = 0

2.b) PN1 = 0 e PN2 = -2

Novamente, pelo fato que as variáveis **PN1** e **PN2** não podem ser negativas, a segunda alternativa é inviável. Então, será viável apenas a primeira e a função objetivo <u>não</u> será alterada. De novo é possível observar que qualquer alternativa intermediária entre a 2.a e a 2.b, como por exemplo **PN1=4** e **PN2=2**, não será possível dado que ela diminuirá o valor da função objetivo a ser maximizada, onde **PN2** entra com sinal negativo.

Finalmente, as restrições desta variante são:

a) Restrição de balanço hídrico (ou balanço de massas): tem-se uma para cada mês do período de análise e para cada PC:

$$\sum_{i=a}^{n}\left[\left(\sum_{s=1}^{S}\left[\begin{array}{l} k_I \cdot DI(m)_s \cdot UI(t)_s + k_A \cdot DA(m)_s \cdot UA(t)_s + \\ + k_E \cdot DE(m) \cdot UE(t) \end{array}\right]\right) + \begin{array}{c} \\ + [PN1(t,m) - PN2(t,m)] \end{array}\right]_i = \tag{4.45}$$

$$= \sum_{i=a}^{n}\left[Q(t,m) - k_P \cdot (DU(m) + DR) - DG\right]_i - QEC_n$$

O índice **s** representa os sub-projetos de irrigação de cada PC.

b) Inequações de compatibilidade: tem-se uma para cada ano do período de análise e para cada sub-projeto de irrigação de cada PC.

$$UI(t)_s - VI_s \leq 0 \tag{4.46}$$

para as áreas sob irrigação por inundação.

$$UA(t)_s - VA_s \leq 0 \tag{4.47}$$

para as áreas sob irrigação por aspersão.

Como já foi explicado anteriormente, as áreas sob irrigação existentes não intervêm nas inequações de compatibilidade já que não existem variáveis **V** associadas a elas (pois as áreas já foram implantadas anteriormente).

c) Função objetivo:

$$FO = MAX\left\langle \begin{array}{l} \left\{ \sum_{i=1}^{NºPC} \sum_{s=1}^{S} \left[\sum_{t=1}^{T} FA(t) \cdot \left(\begin{array}{l} UI(t)_{i,s} \cdot BLI_{i,s} + UA(t)_{i,s} \cdot BLA_{i,s} + \\ + UE(t)_{i,s} \cdot BLE_{i,s} \end{array} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. \qquad - \left(VI_{i,s} \cdot CI_{i,s} + VA_{i,s} \cdot CA_{i,s} \right) \right] \right\} - \\ - \left\{ \lambda \cdot \sum_{i=1}^{NºPC} \sum_{t=1}^{T} \sum_{m=1}^{12} PN2(t,m)_i \right\} \end{array} \right\rangle \tag{4.48}$$

4.2.6. Abordagem Não-Binária

Após terem sido apresentadas três alternativas envolvendo variáveis binárias, uma pergunta aparece como muito pertinente: é imprescindível que as demandas sejam caracterizadas através de variáveis deste tipo (binárias)? Se a resposta a esta

questão for negativa, não poderia ser desenvolvida e aplicada uma metodologia utilizando variáveis **não-binárias**, ou seja, **contínuas**?

Como tentativa de responder esta última questão foi elaborada a seguinte abordagem, na qual a definição das demandas variáveis é feita segundo a equação (4.49), que se apresenta a continuação:

$$DV_n = DI_n \cdot AI_n + DA_n \cdot AA_n + DE_n \cdot AE_n \qquad (4.49)$$

onde:

DV_n demanda variável do PC **n**;

DI_n demanda de irrigação por inundação do PC **n**;

DA_n demanda de irrigação por aspersão do PC **n**;

DE_n demanda de irrigação por aspersão dos perímetros irrigados existentes no PC **n**;

AI_n grau de atendimento à demanda de irrigação por inundação do PC **n** (ele é função do ano **t** , ou seja varia com o tempo);

AA_n grau de atendimento à demanda de irrigação por aspersão do PC **n** (também é função do ano **t**);

AE_n grau de atendimento à demanda de irrigação por aspersão dos perímetros existentes no PC **n** (também varia com o ano **t**);

4.2.6.a. Restrições e Inequações de Compatibilidade

Novamente, a primeira restrição considerada foi a de balanço hídrico, que para um PC **n** se pode escrever como:

$$\sum_{i=a}^{n} DV_i \leq \sum_{i=a}^{n} Q_i - \sum_{i=a}^{n} DF_i - QEC_n \qquad (4.50)$$

onde o índice **i** representa um PC a montante do PC **n** com influência nele. Dentre eles o **a** é o que fica mais a montante.

Dado que as áreas máximas dos perímetros de irrigação existentes e a serem implantados são, por hipótese de trabalho, consideradas como fixas e definidas num estágio anterior do projeto, as seguintes restrições devem ser satisfeitas:

$$AI(t)_n \leq 1 \quad e \quad AI(t)_n \geq 0 \qquad (4.51)$$

$$AA(t)_n \leq 1 \quad e \quad AA(t)_n \geq 0 \qquad (4.52)$$

$$AE(t)_n \leq 1 \quad e \quad AE(t)_n \geq 0 \qquad (4.53)$$

os seja que as demandas serão atendidas numa percentagem que variará de **0** até **100%**.

Para definir o tamanho de implantação dos novos projetos foram utilizadas as variáveis ou coeficientes **C**, devendo eles serem interpretados segundo o seguinte:

CI_j variável que define o tamanho do projeto de irrigação por inundação a implantar no PCj

CA_j variável que define o tamanho do projeto de irrigação por inundação a implantar no PCj

Estas variáveis **C** não são função do tempo já que, no caso em um projeto apresente-se como viável, ele será implantado no ano zero (hipótese de trabalho).

Os tamanhos de implantação dos projetos, logicamente, serão adotados escolhendo os maiores dos tamanhos que poderiam ser atendidos ao longo do período de análise, respeitando as restrições de balanço hídrico e atendendo à eficiência econômica. Esta escolha é feita automaticamente pelo programa de otimização.

É possível perceber que existirão restrições de compatibilidade entre as variáveis **C** e **A**, que deverão ser satisfeitas durante todos os anos do período de análise. Elas são:

$$CI_n \geq AI(t)_n \tag{4.54}$$

$$CA_n \geq AA(t)_n \tag{4.55}$$

Reagrupando as variáveis de decisão do lado esquerdo da inequação, a formulação fica:

$$AI(t)_n - CI_n \leq 0 \tag{4.56}$$

$$AA(t)_n - CA_n \leq 0 \tag{4.57}$$

A metodologia tradicional de fazer o planejamento de um sistema de recursos hídricos aplicando primeiramente modelos de **otimização** e, numa segunda etapa de 'sintonia fina', modelos de **simulação**, tem como um dos objetivos a avaliação do grau de atendimento às demandas, ou seja da percentagem do tempo (período de análise) que as demandas poderiam ser satisfeitas. Sendo assim, não seria possível incluir este grau de atendimento no próprio processo de otimização? Como tentativa de dar resposta a esta pergunta, um outro grupo de restrições foram introduzidas na formulação do modelo de otimização.

Para tal fim foram incluídas as seguintes variáveis:

GAI grau de atendimento às demandas de irrigação por inundação

GAA grau de atendimento às demandas de irrigação por aspersão

GAE grau de atendimento às demandas dos perímetros existentes

Então, as restrições que refletem o atendimento foram formuladas como:

$$CI_n - \sum_{t=1}^{T} \frac{AI(t)_n}{T} \leq (1 - GAI) \cdot CI_n \tag{4.58}$$

$$CA_n - \sum_{t=1}^{T} \frac{AA(t)_n}{T} \leq (1 - GAA) \cdot CA_n \tag{4.59}$$

$$\sum_{t=1}^{T} \frac{AE(t)_n}{T} \geq GAA \tag{4.60}$$

O índice **n** representa o PC em questão, o índice **t** os anos, enquanto o extremo **T** do operador somatório é o horizonte de planejamento em anos.

Qual o significado destas restrições? Elas têm por finalidade forçar que num PC **n**, a média em relação ao período de análise, dos graus de atendimento anuais das demandas das culturas, representados pelas variáveis **A(t)**, seja maior que uma percentagem igual ao grau de atendimento garantido, vezes o tamanho de implantação, representado pelas variáveis **C**.

Reagrupando as variáveis se tem:

$$\sum_{t=1}^{T} \frac{AI(t)_n}{T} - GAI \cdot CI \geq 0 \tag{4.61}$$

$$\sum_{t=1}^{T} \frac{AI(t)_n}{T} - GAI \cdot CI \geq 0 \tag{4.62}$$

$$\sum_{t=1}^{T} \frac{AE(t)_n}{T} \geq GAA \tag{4.63}$$

Pode-se notar que, no caso em que seja escolhido um grau de atendimento garantido de **zero**, estas restrições serão espúrias e, então, o grau de atendimento não será limitante da otimização. Seria de se esperar que o valor da FO, no caso da otimização sem esta restrição, seja maior que no caso em que ela seja levada em consideração.

4.2.6.b. FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo adotada foi a maximização do **VPBL** :

FO = maximize VPBL

Chamando de:

CUI_n o custo de implantação dos projetos sob irrigação por inundação previstos para o PC **n**;

CUA_n o custo de implantação dos projetos sob irrigação por aspersão previstos para o PC **n**;

BI_n a estimativa dos benefícios anuais dos projetos sob irrigação por inundação que se pretendem implantar no PC **n**;

BA_n a estimativa dos benefícios anuais decorrentes dos projetos sob irrigação por aspersão que se pretendem implantar no PC **n**;

BI_n a estimativa dos benefícios anuais decorrentes dos projetos sob irrigação por aspersão já implantados no PC **n**;

d taxa de desconto utilizada;

FA(t) fator de atualização de pagamentos simples;

sendo:

$$FA(t) = \frac{1}{(1+d)^t} \qquad (4.64)$$

a **função objetivo** ficou:

$$FO = MAX\left\{\sum_{i=1}^{15}\left[\sum_{t=1}^{T}\left(\alpha(t)_i + \beta(t)_i + \gamma(t)_i\right) - \left(CI_i \cdot CUI_i + CA_i \cdot CUA_i\right)\right]\right\} \qquad (4.65)$$

onde:

$$\alpha(t)_i = AI(t)_i \cdot BI_i \cdot FA(t) \qquad (4.66)$$

$$\beta(t)_i = AA(t)_i \cdot BA_i \cdot FA(t) \qquad (4.67)$$

$$\gamma(t)_i = AE(t)_i \cdot BE_i \cdot FA(t) \qquad (4.68)$$

4.3. OPERAÇÃO DO SISTEMA

Uma vez feita a escolha dos perímetros sob irrigação a serem implantados (otimização do sistema) é preciso estabelecer uma metodologia para definir, em cada ano, qual a percentagem desses perímetros que poderiam ser atendidos de forma satisfatória pela irrigação. Este processo, no contexto deste trabalho, será chamado de **operação do sistema**.

Com referência aos perímetros irrigados por inundação, constatou-se que a regra de operação não oferece maiores problemas, dado que os meses em que se irriga são, simultaneamente, os meses com maior oferta hídrica (figura 4.6).

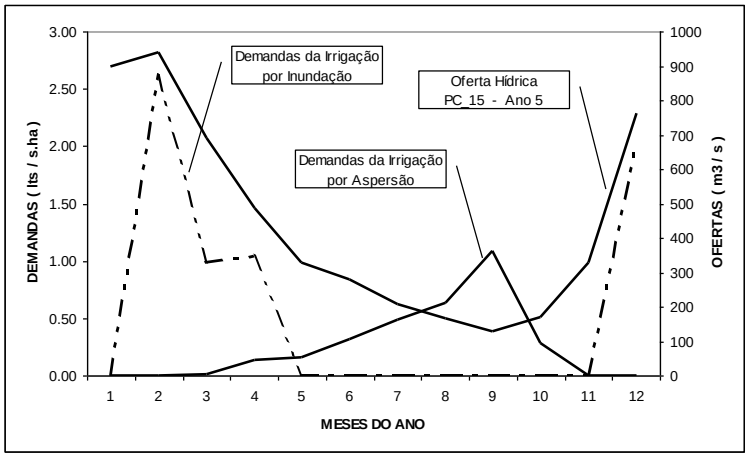

Figura 4.6 Comparação entre ofertas e demandas

Mas para os perímetros irrigados por aspersão a decisão não é tão simples: o máximo da demanda é em setembro, mês no qual a oferta hídrica é, normalmente, mínima. Por sua vez, o máximo da oferta costuma acontecer entre os meses de fevereiro e março, a partir dos quais as vazões de aporte iniciam uma marcada recessão. Além disto, a irrigação deve começar logo em abril.

A figura 4.6 mostra uma comparação, para o **PC15**, entre as vazões de aporte (correspondentes ao ano 5 dos dados) e as demandas unitárias da irrigação por inundação e por aspersão.

Então, a complicação de estabelecer as regras de operação para a irrigação por aspersão é clara: a decisão de quanta superfície preparar num ano qualquer deve ser tomada em março, seis meses antes de acontecer o pico da demanda.

4.3.1. Uma Alternativa Deselegante

Uma alternativa de solução muito simples e pouco elegante, seria considerar os 55 anos de dados como um 'catálogo' de hidrogramas que teriam boas chances de acontecer no futuro[4]. Então, em cada PC, em função das vazões acontecidas em janeiro, fevereiro e março (rama ascendente dos hidrogramas), se escolhe dentre os 55 hidrogramas observados no passado, aquele que se aproxime melhor dos valores desse ano em particular, aplicando o critério de 'mínimos quadrados'. Desta forma se monta uma tabela de vazões para os quinze PCs.

O processo de otimização é feito utilizando qualquer um dos esquemas utilizados na etapa anterior. A única diferença é que as demandas correspondem aos perímetros a serem implantados.

Novamente, esta metodologia é pouco elegante, pouco 'acadêmica' e difícil de sustentar, embora seja muito simples. Finalmente, a sua aplicação não será apresentada, embora tenha sido testada em forma experimental e apenas a título de curiosidade.

[4] *Esta afirmação relativa às 'boas chances' de se repetir é difícil de sustentar.*

4.3.2. ALTERNATIVA ENVOLVENDO 'RISCO'

Para explicar esta alternativa de solução será apresentada, a princípio, a análise para um PC genérico. Posteriormente, se explicará como o raciocínio pode ser estendido a todo o sistema.

Para cada PC foi montada uma tabela (matriz) de entrada dupla, segundo o mostrado na figura 4.7. Nela, cada linha corresponde a uma **decisão** sobre a quantidade de terra a preparar num determinado ano e as colunas representam os volumes de água de que poderiam se dispor em setembro. Ou seja, as linhas se correspondem com as **demandas** de cada decisão, enquanto que as colunas são as **ofertas** que poderiam acontecer.

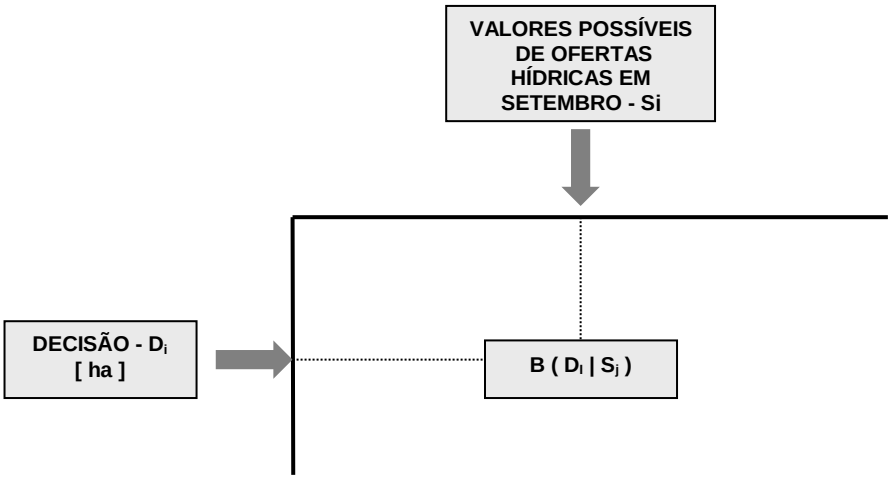

Figura 4.7 Matriz das decisões e suas conseqüências

Na matriz da figura 4.7, os valores $\mathbf{B(D_i \mid S_j)}$ são os benefícios decorrentes da decisão $\mathbf{D_i}$ tendo acontecido uma oferta hídrica em setembro $\mathbf{S_j}$. A maioria dos autores que trabalham com decisões em situação de incerteza utilizam matrizes semelhantes (Costa, 1977; Taha, 1995).

Cada decisão está associada a um determinado valor de volume de água que se espera dispor como oferta hídrica em setembro (**QOset**). Se esse valor de **QOset** acontecer, significa que a decisão foi acertada e os benefícios que se obteriam seriam máximos. Mas, se o valor de **QOset** fosse maior que o esperado?; e se fosse menor? Evidentemente estas situações devem ser penalizadas.

A penalização deverá refletir tanto as capacidades econômicas e financeiras dos produtores, quanto como o risco que eles estariam dispostos a assumir.

Neste trabalho, a penalização foi feita seguindo o raciocínio que se descreve a seguir:

- Dividindo a oferta **QOset** pela demanda unitária de setembro **Dset**, em m^3/ha, o resultado será uma quantidade de área que poderia ser atendida com a irrigação nesse mês de setembro. Dado que a cada hectare irrigado está associado um valor de produtividade prevista e, portanto, um valor de benefícios previstos. Então, é possível associar a cada m^3 de **QOset** um benefício monetário.

- Se o **QOset** (oferta) for maior que a vazão que uma dada decisão requer (demanda), se estará numa situação de **deixar de ganhar**. A metodologia utilizada considera que o que se deixou de ganhar, chamado neste trabalho de valor de benefícios não ganhos (**BNG**), deve ser debitado, como penalização, do valor de benefícios máximos que se esperava obter com uma dada decisão. Os benefícios não ganhos (**BNG**) foram calculados da seguinte forma:

$$\mathrm{BNG} = \frac{\left| \mathrm{Oferta}\,[\mathrm{m}^3] - \mathrm{Demanda}\,[\mathrm{m}^3] \right|}{\mathrm{Demanda\,Unit}_{\mathrm{SET}}\ [\mathrm{m}^3/\mathrm{ha}]} \cdot \mathrm{BenefíciosUnit}\ \ [\$/\mathrm{ha}] \qquad (4.69)$$

Onde:

Oferta volume de setembro menos as demandas fixas de setembro

Demanda volume de água requerido para setembro pela decissão adotada

- No caso em que a oferta fosse menor que a demanda, o valor a debitar do valor que se esperava ganhar será, não apenas o **BNG**, senão o **BNG** mais os insumos (custos) correspondentes à área que, tendo sido preparada (arada, semeada, etc.), não se poderá irrigar.

Esta matriz, que poderia ser chamada de **matriz dos benefícios decorrentes de uma decisão em função de uma determinada oferta hídrica em setembro,**

Qoset , não necessariamente deve ser quadrada e de fato neste trabalho ela não foi: tem 10 linhas, correspondendo elas a 10%, 20%, 30%, etc., até 100% do total da área implantada e tem 8 colunas, que é o número de intervalos de classe em que foram classificadas as 55 observações que se tem para cada PC.

Este número de 8 intervalos de classe corresponde a aproximadamente à raiz quadrada de 55, que segundo alguns autores é o número ótimo de intervalos de classe. Este número de intervalos de classe também é coerente com a fórmula de Struges (Lanna, 1997a).

Esta matriz poderia ser considerada como representando uma **situação de conflito**, típica dos jogos de dois jogadores, onde estariam competindo o planejador, com suas estratégias de decisões, e a Natureza, com suas alternativas de ofertas para **QOset**.

Se o comportamento do rio fosse totalmente imprevisível, a escolha de uma estratégia totalmente aleatória poderia ser o aconselhável (Ventsel, 1983). Mas, para o caso de uma bacia, seria possível que o histórico das vazões oferecesse uma 'pista' sobre os volumes que se poderiam dispor no ‘futuro’ setembro dado que já ‘aconteceu’ uma determinada vazão em março? Se a resposta a esta pergunta fosse afirmativa, a situação de incerteza que se tem (futuro desconhecido), poderia ser abordada como uma situação de risco.

A definição de risco está associada ao valor numérico de uma função densidade de probabilidades (Taha, 1995) e, para que essa função representasse uma situação real, a condição necessária deve ser a estabilidade estatística (Ventsel, 1983). Mas, as vazões de um rio conformam uma série infinita e, portanto, qualquer ajuste de uma função densidade de probabilidades que seja feito para uma série de vazões não passará de uma aproximação grosseira.

Porém, considerou-se que aquela probabilidade condicional pudesse ser um bom ponderador do que se poderia esperar, no fim de março, que acontecesse no próximo setembro, seis meses mais tarde. Ou seja, considerou-se que uma decisão baseada nesta informação não muito boa poderia ser menos ruim que outra baseada em outros elementos, como por exemplo uma eleição totalmente aleatória, ou uma consideração ‘laplaciana’ de equiprobabilidade das vazões de oferta (Taha, 1995), ou uma otimização determinística utilizando como dados de entrada os **valores esperados** das vazões de setembro, condicionados a março conhecido.

Aquela probabilidade condicional foi estimada através de uma análise de probabilidades empíricas, feito a partir das freqüências das vazões observadas em setembro, que aconteceram em correspondência com vazões observadas em março.

Tanto os valores de setembro quanto os de março foram agrupados em intervalos de classe, sendo o esquema utilizado apresentado na tabela 4.1.

Tabela 4.1 Esquema da avaliação das probabilidades condicionadas

		Vazões Setembro		
Vazões Março	Freqüências Março	S1	S2	S3
M1	**FqM1**	$\frac{F(S1 \mid M = M1)}{FqM1}$	$\frac{F(S2 \mid M = M1)}{FqM1}$	$\frac{F(S3 \mid M = M1)}{FqM1}$
M2	**FqM2**	$\frac{F(S1 \mid M = M2)}{FqM2}$	$\frac{F(S2 \mid M = M2)}{FqM2}$	$\frac{F(S3 \mid M = M2)}{FqM2}$
M3	**FqM3**	$\frac{F(S1 \mid M = M3)}{FqM3}$	$\frac{F(S2 \mid M = M3)}{FqM3}$	$\frac{F(S1 \mid M = M1)}{FqM1}$

O significado das siglas da tabela 4.1 é o seguinte:

Mi valor de referência do intervalo de classe **i** das vazões de março;

FqMi freqüência absoluta com que foram observadas vazões em março pertencentes ao intervalo de classe **Mi**;

Sj valor de referência do intervalo de classe **j** das vazões de setembro;

F(Sj | M=Mi) freqüência absoluta com que foram observadas em setembro, vazões pertencentes ao intervalo de classe **Sj** tendo acontecido nesse mesmo ano vazões em março pertencentes ao intervalo de classe **Mi**.

A tabela 4.1 poderia[5] ser atualizada todos os anos.

Então, num ano qualquer, no fim de março, se entraria na tabela com o valor

[5] *E seria muito conveniente que fosse assim.*

da vazão 'observada' neste mês e se extrairia a linha completa. Esta linha é um vetor que representa a probabilidade condicionada empírica de ocorrer valores de vazões de setembro dado que a vazão de março é conhecida e igual à de março acontecida nesse ano.

Finalmente, a otimização da regra de operação é feita aplicando **PL** com variáveis binárias, segundo o esquema que se apresenta a seguir.

$$FO: \text{ Max } E[BL] \tag{4.70}$$

$$E[BL] = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{8} D_i \cdot \left[B_{i,j} \cdot P(S_j \mid M = M^*)_j \right] \tag{4.71}$$

sujeito às seguintes restrições:

$$1) \quad \sum_{i=1}^{10} D_i = 1 \tag{4.72}$$

2) RESTRIÇÃO DE NÃO-NEGATIVIDADE (4.73)

onde:

E[BL] valor esperado dos benefícios líquidos;

D_i variável de decisão binária associada à escolha **i**;

$B_{i,j}$ benefícios decorrentes da escolha **i** no caso de acontecer o setembro **j**

$P(S_j \mid M=M^*)$ probabilidade (ponderador) de acontecer uma oferta **j** em setembro dado que aconteceu um março M=M*

Uma outra forma, matricial, de apresentar esta abordagem é a seguinte:

$$\overline{B} \cdot \overline{P} = \overline{E}[B] \tag{4.74}$$

onde:

$\overline{B}$ é a matriz dos benefícios de uma escolha **i**, tendo acontecido uma oferta **j** de água no mês de setembro e a dimensão desta matriz é **i x j**;

$\overline{P}$ é o vetor das probabilidades empíricas de acontecer uma oferta de água **j** no mês de setembro. A dimensão deste vetor é **j x 1**;

$\overline{E}$ [B] é o vetor dos valores esperados de benefícios de uma escolha **i**. A dimensão deste vetor é **i x 1**.

O processo é esquematizado na figura 4.8. A decisão $\mathbf{D_w}$ que maximiza o valor esperado dos benefícios $\mathbf{E\ [B]_w}$ poderia ser considerada a melhor escolha a ser adotada.

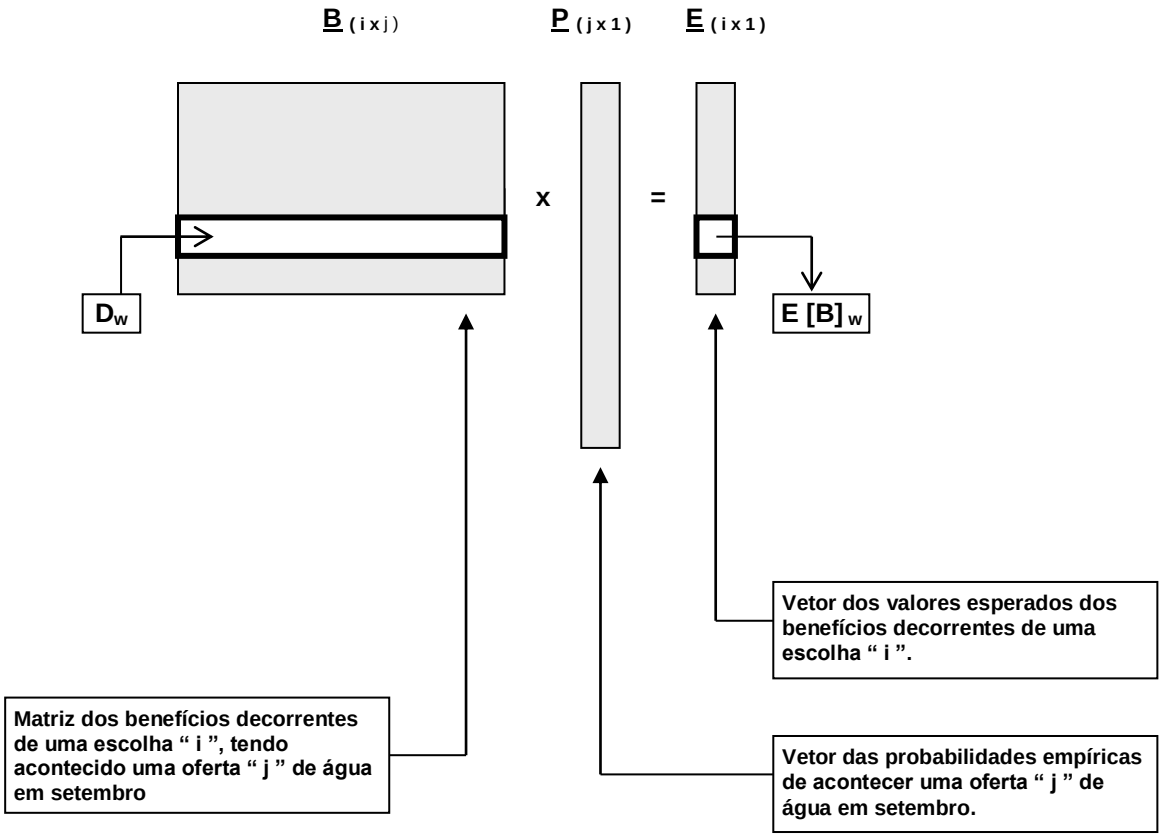

Figura 4.8 Esquema proposto para a otimização da decisão

A vazão disponível em setembro, num PC genérico **n**, $\mathbf{QD_n}$, é igual a:

$$QD_n = \sum_{i=a}^{n-1} \left(QS_i - DFS_i - DVS_i \right) + QS_n \qquad (4.75)$$

onde:

i índice que representa os PCs (o extremo **i = a** representa o primeiro PC a montante com influência no PC **n**);

QS_i é a vazão de setembro da bacia incremental contribuinte do PC **i**;

DFS_i as demandas fixas para setembro do PC **i** ;

DVS_i as demandas variáveis de setembro do PC **i**.

Este esquema apresenta uma **não linearidade**, emergente do fato que a água disponível num PC **n** é igual ao aporte de todas as sub-bacias a montante desse PC menos o somatório de todas as demandas fixas até o PC **n-1** e menos o somatório de todas as demandas variáveis até o PC **n-1** e que devem ser otimizadas.

Para contornar esta dificuldade foi adotado um esquema de **otimização por PC**: inicia-se o processo de otimização pelo **PC1** e se prossegue pelo **PC2**, considerando que a água disponível é igual aos aportes das sub-bacias do **PC1** e **PC2** menos a demanda fixa de **PC1** e menos a demanda variável e otimizada do **PC1**, que para o caso dos PCs a jusante de **PC1** se considera como 'fixa'.

O vetor de ponderação da probabilidade de acontecer uma vazão de setembro no **PC2** dado que a vazão de março é conhecida é estimado fazendo uma análise das freqüências com que aconteceram as vazões de setembro (**QS**) das bacias incrementais dos dois PCs ($\mathbf{QS_1}$+$\mathbf{QS_2}$) associadas às ocorrências das vazões de março (**QM**), também das bacias incrementais dos dois PCs ($\mathbf{QM_1}$+$\mathbf{QM_2}$).

O raciocínio aplicado ao **PC2**, pode ser estendido ao **PC3**, **PC4**,..., até o **PC15**, levando em conta em cada um a influência de todos os PCs a montante e que contribuem para esse PC.

Mas, é válido o esquema de fazer uma otimização por PC e não de toda a bacia em forma global? Do ponto de vista político isto poderia ser aceitável: uma vez escolhidos os perímetros a serem implantados (otimização do sistema, etapa anterior deste trabalho), não seria sustentável racionar a água num PC para que possa ser aproveitada num outro PC a jusante, sob o argumento que esse PC de jusante utiliza-a mais eficientemente.

5. APLICAÇÃO

A indeterminação é evidente, porém é indispensável adotar uma solução!

Elena Ventsel, (Investigación de Operaciones, 1983, p.41)

5.1. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A grande hipótese de trabalho foi atingir os objetivos propostos através da aplicação de apenas modelos de otimização e técnicas de **PL**, como uma alternativa à já clássica metodologia de fazer o planejamento estratégico por otimização e posteriormente uma 'sintonia fina' por simulação na fase de planejamento tático (Vieira, 1991; Oliveira, 1995).

Como já foi colocado num capítulo anterior, as pesquisas atuais têm abandonado, prematuramente, a **PL**. Mas, ela é muito poderosa, não tendo sido seu potencial totalmente explorado e pode ser sumamente útil nas fases iniciais do planejamento de sistemas de recursos hídricos. Tem a grande qualidade que se o modelo foi adequadamente elaborado, as decisões baseadas nos seus resultados têm um caráter global. Porém, o planejador não deve esquecer as limitações da modelação: parafraseando a Saati (Saati, apud Ventsel, 1983) os modelos de otimização dão subsídio para tomar decisões ruins, sendo que de outra forma as decisões adotadas seriam ainda piores.

Um ponto central na otimização é a eleição da função objetivo. Para este trabalho foi escolhido o **Valor Presente dos Benefícios Líquidos** (**VPBL**), mas se ele é adequado ou não pode ser motivo de interessantes debates.

O trabalho desenvolvido pode ser dividido, em grandes linhas, em duas partes bem diferenciadas:

I. **Planejamento estratégico:** para estabelecer quais projetos, e em que dimensão deveriam ser implantados, para maximizar a função objetivo escolhida. Esta primeira parte foi feita segundo uma abordagem **determinística**, ou seja considerando o futuro como conhecido, utilizando como cenário de planejamento a situação prevista (demandas) para o ano 2016.

II. **Planejamento Tático:** esta segunda parte é assemelhável a uma **operação** do sistema[6]. Nesta parte do trabalho foi aplicada uma abordagem com futuro desconhecido, tentando levar em conta o risco envolvido nas decisões.

5.2. PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO

5.2.1. VARIANTE 'TUDO OU NADA' (BINÁRIA)

Nesta abordagem consideraram-se os perímetros de irrigação atuais e os projetados, numa extensão igual à máxima possível.

O resultado da otimização indicou quais os projetos que deveriam ser implantados e quais não.

- VARIÁVEIS DE DECISÃO

As variáveis de decisão foram de tipo **binárias**, sendo a nomenclatura adotada para individualizá-las a seguinte:

UI aa b cc variável de decisão **anual**, de irrigação por **inundação**, no **PC aa**, na sub-área **b** e no ano **cc** ;

[6] *Não seria correto falar de 'operação' dado a inexistência de reservatórios para regulação; porém, o esquema que aqui se apresenta é apenas um subsídio para a tomada de uma decisão sobre as quantidades de terra a serem preparadas em cada ano, em cada PC.*

UA aa b cc variável de decisão **anual**, de irrigação por **aspersão**, no **PC aa**, na sub-área **b** e no ano **cc** ;

UE aa 0 cc variável de decisão **anual**, de irrigação por **aspersão** dos perímetros **existentes**, no **PC aa**, no ano **cc** ;

VI aa b 00 variável de decisão de implantação de um projeto irrigação por **inundação**, no **PC aa**, na sub-área **b**. Esta variável não é dependente do tempo já que foi adotado como hipótese de trabalho que se um projeto é viável, ele será implantado no **ano zero**;

VA aa b 00 variável de decisão de implantação de um projeto irrigação por **aspersão**, no **PC aa**, na sub-área **b**. As considerações sobre sua variabilidade temporal são as mesmas que para a variável equivalente que representa a irrigação por inundação.

A regra para entender a nomenclatura das variáveis é: os dois primeiros caracteres indicam o tipo de variável, os dois seguintes caracteres o PC, o caracter seguinte a sub-área de irrigação e os dois últimos o ano. Um caracter zero indica a não dependência da variável com o indicador.

- RESTRIÇÕES

A nomenclatura adotada para as restrições foi:

PC aa cc dd restrição de balanço hídrico correspondente ao **PC aa**, no ano **cc** e no mês **dd**. Tem-se uma restrição deste tipo por mês;

CI aa b cc restrição de compatibilidade entre as variáveis **UI** e **VI** (irrigação por inundação), do **PC aa**, sub-área **b**, ano **cc**. Tem-se uma restrição deste tipo por mês;

CA aa b cc restrição de compatibilidade entre as variáveis **UA** e **VA** (irrigação por aspersão), do **PC aa**, sub-área **b**, ano **cc**;

- COEFICIENTES

Os coeficientes (ou parâmetros, ou valores constantes) utilizados foram nomeados da seguinte forma:

K_I coeficiente de uso consuntivo da irrigação por inundação;

K_A coeficiente de uso consuntivo da irrigação por aspersão;

K_E coeficiente de uso consuntivo da irrigação por aspersão existente;

K_P coeficiente de uso consuntivo do abastecimento das populações;

DI aa b dd demanda da irrigação por **inundação** da sub-área **b** do **PC aa**, para o mês **dd**;

DA aa b dd demanda da irrigação por **aspersão** da sub-área **b** do **PC aa**, para o mês **dd**;

DE aa dd demanda da irrigação por **aspersão** dos perímetros **existentes** no **PC aa**, para o mês **dd**;

DU aa dd demanda da população **urbana** do **PC aa**, para o mês **dd**;

DR aa demanda mensal da população **rural** do **PC aa**;

DG aa demanda mensal do **gado** no **PC aa**;

QEC aa vazão ecológica do **PC aa**;

É importante salientar que as demandas de irrigação correspondem à máxima área possível de implantar.

Com esta nomenclatura, e colocando as variáveis de decisão do lado esquerdo da inequação e as constantes no lado direito, as restrições consideradas para o **PC aa**, no mês **dd**, ficaram:

PC aa cc dd)

$$\begin{aligned}
&\sum_{ii=n}^{aa-1}\left\{\sum_{b=1}^{B}\left[\begin{array}{l} k_I \cdot DI\ ii\ b\,dd \cdot UI\ ii\ b\,cc + k_A \cdot DA\ ii\ b\,dd \cdot UA\ ii\ b\,cc + \\ + k_E \cdot DE\ ii\ dd \cdot UE\ ii\ cc \end{array}\right]\right\} + \\
&+ \sum_{b=1}^{B}\left[\begin{array}{l} DI\ aa\ b\,dd \cdot UI\ aa\ b\,cc + DA\ aa\ b\ dd \cdot UA\ aa\ b\,cc + \\ + DE\ aa\ dd \cdot UE\ aa\ cc \end{array}\right] \leq \\
&\leq \sum_{ii=n}^{aa-1}\left[Q\ ii\ cc\,dd - k_P \cdot DU\ ii\ dd - DR\ ii - DG\ ii\right] + \\
&+ \left[Q\ aa\ cc\,dd - DU\ aa\ dd - DR\ aa - DG\ aa\right] - QEC\,aa
\end{aligned} \tag{5.1}$$

onde **ii** representa os PCs com influência no PC **aa**; o extremo **n** o primeiro PC a montante com influência no **PC aa** e o extremo **B** representa o número máximo de sub-projetos num PC qualquer.

CI aa b cc) $\quad UI\,aa\,b\,cc - VI\,aa\,b\,00 \leq 0$ (5.2)

CA aa b cc) $\quad UA\,aa\,b\,cc - VA\,aa\,b\,00 \leq 0$ (5.3)

A função objetivo utilizada foi a indicada na equação (4.31) do capítulo correspondente a **Metodologia**.

5.2.2. VARIANTE COM ALTERNATIVAS PRÉ-DEFINIDAS (BINÁRIA)

Nesta abordagem, os projetos de cada PC foram testados em 3 tamanhos diferentes: 100%, ou 75%, ou 50% do tamanho projetado. No caso de não ser factível nenhuma destas alternativas, o projeto não 'deveria' ser implantado (tamanho nulo).

- VARIÁVEIS DE DECISÃO

As variáveis de decisão foram também de tipo **binário**, sendo a nomenclatura adotada para individualizá-las a seguinte:

UI aa b e cc variável de decisão anual, de irrigação por **inundação**, no **PC aa**, na sub-área **b**, com a alternativa **e** e no ano **cc** ;

UA aa b e cc variável de decisão anual, de irrigação por **aspersão**, no **PC aa**, na sub-área **b** , com a alternativa **e** e no ano **cc** ;

UE aa 0 e cc variável de decisão anual, de irrigação por **aspersão** dos perímetros **existentes**, no **PC aa**, com a alternativa **e** e no ano **cc** ;

VI aa b e 00 variável de decisão de implantação de um projeto irrigação por **inundação**, no **PC aa**, na sub-área **b**, alternativa **e**. Esta variável não é dependente do tempo já que foi adotada como hipótese de trabalho que se um projeto é viável, ele será implantado no **ano zero**;

VA aa b e 00 variável de decisão de implantação de um projeto irrigação por **aspersão**, no **PC aa**, na sub-área **b**, alternativa de tamanho **e**.

A regra para entender a nomenclatura das variáveis é: os dois primeiros caracteres indicam o tipo de variável, os dois seguintes caracteres o PC, o caracter seguinte a sub-área de irrigação, o seguinte caracter a alternativa[7] e os dois últimos o ano. Um caracter zero indica a não dependência da variável com o indicador.

- RESTRIÇÕES

A nomenclatura adotada para as restrições foi:

[7] *As alternativas podem ser 1, 2 ou 3, correspondendo a 100%, 75% ou 50%, respectivamente, da máxima área projetada.*

PC aa cc dd restrição de balanço hídrico correspondente ao **PC aa**, no ano **cc** e no mês **dd**. Tem-se uma restrição deste tipo por mês;

CI aa b 0 cc restrição de compatibilidade entre as variáveis **UI** e **VI** (irrigação por inundação), do **PC aa**, sub-área **b**, para o ano **cc**. Tem-se uma restrição deste tipo por ano;

CA aa b 0 cc restrição de compatibilidade entre as variáveis **UA** e **VA** (irrigação por aspersão), do **PC aa**, sub-área **b**, para o ano **cc**;

XI aa b cc restrição de compatibilidade entre as diferentes alternativas para as variáveis **UI** (irrigação por inundação), do **PC aa**, sub-área **b**, ano **cc**. Tem-se uma restrição deste tipo por ano;

XA aa b cc restrição de compatibilidade entre as diferentes alternativas para as variáveis **UA** (irrigação por aspersão), do **PC aa**, sub-área **b**, ano **cc**;

XE aa 0 cc restrição de compatibilidade entre as diferentes alternativas para as variáveis **UE** (irrigação por aspersão dos perímetros existentes), no **PC aa**, no ano **cc**;

WI aa b 00 restrição de compatibilidade entre as diferentes alternativas para as variáveis **VI** (irrigação por inundação), do **PC aa**, sub-área **b**. Não tem dependência do tempo, ou seja que cada sub-área tem uma única restrição deste tipo;

WA aa b 00 restrição de compatibilidade entre as diferentes alternativas para as variáveis **VA** (irrigação por aspersão), do **PC aa**, sub-área **b**;

- COEFICIENTES

Os coeficientes ou valores constantes utilizados foram nomeados da seguinte forma:

K_I coeficiente de uso consuntivo da irrigação por inundação;

K_A coeficiente de uso consuntivo da irrigação por aspersão;

K_E coeficiente de uso consuntivo da irrigação em projeto existente;

K_P coeficiente de uso consuntivo do abastecimento das populações;

DI aa b e dd demanda da irrigação por **inundação** da sub-área **b**, alternativa **e**, do **PC aa**, para o mês **dd**;

DA aa b e dd demanda da irrigação por **aspersão** da sub-área **b**, alternativa **e**, do **PC aa**, para o mês **dd**;

DE aa e dd demanda da irrigação por **aspersão** dos perímetros **existentes** no **PC aa**, alternativa **e**, para o mês **dd**;

DU aa dd demanda da população **urbana** do **PC aa**, para o mês **dd**;

DR aa demanda mensal da população **rural** do **PC aa**;

DG aa demanda mensal do **gado** no **PC aa**;

QEC aa vazão ecológica do **PC aa**;

Seguindo esta nomenclatura, e agrupando as variáveis de decisão do lado esquerdo da inequação e as constantes do lado direito, as restrições consideradas para o **PC aa**, no mês **dd**, ficaram:

PC aa cc dd)

$$\sum_{ii=n}^{aa-1}\left\{\sum_{b=1}^{B}\left[\begin{array}{l} k_I \cdot DI\ ii\ b\ e\ dd \cdot UI\ ii\ b\ e\ cc + k_A \cdot DA\ ii\ b\ e\ dd \cdot UA\ ii\ b\ e\ cc + \\ + k_E \cdot DE\ ii\ e\ dd \cdot UE\ ii\ 0\ e\ cc \end{array}\right]\right\} +$$
$$+ \sum_{b=1}^{B}\left[\begin{array}{l} DI\ aa\ b\ e\ dd \cdot UI\ aa\ b\ e\ cc + DA\ aa\ b\ e\ dd \cdot UA\ ii\ b\ e\ cc + \\ + DE\ aa\ e\ dd \cdot UE\ aa\ 0\ e\ cc \end{array}\right] \leq \qquad (5.4)$$
$$\leq \sum_{ii=n}^{aa-1}\left[Q\ ii\ cc\ dd - k_P \cdot DU\ ii\ dd - DR\ ii - DG\ ii\right] +$$
$$+ \left[Q\ aa\ cc\ dd - DU\ aa\ dd - DR\ aa - DG\ aa\right] - QEC\ aa$$

Igual que na variante anterior, o índice **ii** representa os PCs com influência no PC **aa**; o extremo **n**, o primeiro PC a montante com influência no **PC aa** e o extremo **B** representa o número máximo de sub-projetos num PC qualquer.

CI aa b 0 cc)

$$\begin{array}{l} \left(1 \cdot UI\ aa\ b\ 1\ cc + 0.75 \cdot UI\ aa\ b\ 2\ cc + 0.50 \cdot UI\ aa\ b\ 3\ cc\right) - \\ - \left(1 \cdot VI\ aa\ b\ 100 + 1 \cdot VI\ aa\ b\ 2\ 00 + 1 \cdot VI\ aa\ b\ 3\ 00\right) \leq 0 \end{array} \qquad (5.5)$$

CA aa b 0 cc)

$$\begin{array}{l} \left(1 \cdot UA\ aa\ b\ 1\ cc + 0.75 \cdot UA\ aa\ b\ 2\ cc + 0.50 \cdot UA\ aa\ b\ 3\ cc\right) - \\ - \left(1 \cdot VA\ aa\ b\ 100 + 1 \cdot VA\ aa\ b\ 2\ 00 + 1 \cdot VA\ aa\ b\ 3\ 00\right) \leq 0 \end{array} \qquad (5.6)$$

XI aa b cc) $$\sum_{e=1}^{3}\left(UI\ aa\ b\ e\ cc\right) \leq 1 \qquad (5.7)$$

XA aa b cc) $$\sum_{e=1}^{3}\left(UA\ aa\ b\ e\ cc\right) \leq 1 \qquad (5.8)$$

XE aa b cc) $$\sum_{e=1}^{3}\left(UE\ aa\ 0\ e\ cc\right) \leq 1 \qquad (5.9)$$

WI aa b 00) $$\sum_{e=1}^{3}(VI\,aa\,b\,e\,00) \leq 1 \qquad (5.10)$$

WA aa b 00) $$\sum_{e=1}^{3}(VA\,aa\,b\,e\,00) \leq 1 \qquad (5.11)$$

A função objetivo utilizada foi a indicada na equação (4.40) do capítulo correspondente a **Metodologia**.

5.2.3. VARIANTE COM PENALIZAÇÕES (BINÁRIA)

Como já foi explicado no capítulo Metodologia, nesta variante consistiu em penalizar aqueles meses em que a vazão ecológica não foi atendida.

A nomenclatura adotada foi:

- VARIÁVEIS DE DECISÃO

Neste caso nem todas estas variáveis foram de tipo **binárias**, sendo a nomenclatura adotada para individualizá-las a seguinte:

UI aa b cc variável **binária** de decisão anual, de irrigação por **inundação**, no **PC aa**, na sub-área **b** e no ano **cc** ;

UA aa b cc variável **binária** de decisão anual, de irrigação por **aspersão**, no **PC aa**, na sub-área **b** e no ano **cc** ;

UE aa 0 cc variável **binária** de decisão anual, de irrigação por **aspersão** dos perímetros **existentes**, no **PC aa**, no ano **cc** ;

VI aa b 00 variável **binária** de decisão de implantação de um projeto irrigação por **inundação**, no **PC aa**, na sub-área **b**. Esta variável não é dependente do tempo já que foi adotada como hipótese de trabalho que se um projeto é viável, ele será implantado no **ano zero**;

VA aa b 00 variável **binária** de decisão de implantação de um projeto irrigação por **aspersão**, no **PC aa**, na sub-área **b**;

PA aa cc dd é uma parcela da variável de folga utilizada, que intervém apenas nas restrições de balanço hídrico mas não na função objetivo e tem correspondência com o **PC aa**, ano **cc**, mês **dd**. É uma variável **não inteira**;

PB aa cc dd é a outra parcela da variável de folga e intervém nas restrições de balanço hídrico e como variável a penalizar na função objetivo. É também uma variável **não inteira**.

A regra para entender a nomenclatura das variáveis é: os dois primeiros caracteres indicam o tipo de variável, os dois caracteres seguintes o PC, o caracter seguinte, a sub-área de irrigação e os dois últimos o ano. Esta regra não se aplica às variáveis de folga, que não têm dependência com as sub-áreas **b**.

Um caracter zero indica a não dependência da variável com o indicador.

- RESTRIÇÕES

A nomenclatura adotada para as restrições foi:

PC aa cc dd restrição de balanço hídrico correspondente ao **PC aa**, no ano **cc** e no mês **dd**. Tem-se uma restrição deste tipo por mês;

CI aa b cc restrição de compatibilidade entre as variáveis **UI** e **VI** (irrigação por inundação), do **PC aa**, sub-área **b**, no ano **cc**. Tem-se uma restrição deste tipo por ano;

CA aa b cc restrição de compatibilidade entre as variáveis **UI** e **VI** (irrigação por inundação), do **PC aa**, sub-área **b**, no ano **cc**. Tem-se uma restrição deste tipo por ano;

- COEFICIENTES

Os coeficientes utilizados foram nomeados numa forma igual ao caso da variante '**tudo ou nada**' anteriormente descrita neste capítulo.

Com a nomenclatura indicada, as restrições consideradas para o **PC aa**, no mês **dd**, ficaram (as variáveis de decisão foram colocadas do lado esquerdo da inequação e as constantes do lado direito):

PC aa cc dd)

$$\sum_{ii=n}^{aa-1}\left\{\sum_{b=1}^{B}\left[\begin{array}{l} k_I \cdot DI\ ii\ b\,dd \cdot UI\ ii\,b\,cc + k_A \cdot DA\ ii\ b\,dd \cdot UA\ ii\ b\,cc + \\ + k_E \cdot DE\ ii\ dd \cdot UE\ ii\ cc \end{array}\right]\right\} +$$
$$+ \sum_{b=1}^{B}\left[\begin{array}{l} DI\ aa\ b\,dd \cdot UI\ aa\ b\,cc + DA\ aa\ b\,dd \cdot UA\ aa\ b\,cc + \\ + DE\ aa\ dd \cdot UE\ aa\ cc \end{array}\right] +$$
$$+ PA\ aa\ cc\,dd - PB\ aa\ cc\,dd = \qquad (5.12)$$
$$= \sum_{ii=n}^{aa-1}\left[Q\ ii\ cc\,dd - k_P \cdot DU\ ii\ dd - DR\,ii - DG\,ii\right] +$$
$$+ \left[Q\,aa\,cc\,dd - DU\,aa\,dd - DR\,aa - DG\,aa\right] - QEC\,aa$$

CI aa b cc) $\qquad UI\,aa\,b\,cc - VI\,aa\,b\,00 \leq 0 \qquad (5.13)$

CA aa b cc) $\qquad UA\,aa\,b\,cc - VA\,aa\,b\,00 \leq 0 \qquad (5.14)$

A função objetivo utilizada foi a indicada na fórmula (4.48) do capítulo Metodologia.

5.2.4. ABORDAGEM NÃO-BINÁRIA

Esta é uma alternativa onde as variáveis de decisão são todas **reais** (não-inteiras e contínuas). Além disto, nesta abordagem se incorporou a alternativa de incluir restrições que garantem um grau de atendimento mínimo as demandas.

A nomenclatura utilizada foi:

- VARIÁVEIS DE DECISÃO

AI aa cc 00 representa o grau de atendimento durante o ano **cc** à demanda da irrigação por inundação do **PC aa**;

AA aa cc 00 idem à anterior mas para a irrigação por aspersão;

AE aa cc 00 idem às anteriores mas para a irrigação por aspersão das áreas existentes;

CI aa 00 00 indica o tamanho de implantação dos projetos de irrigação por inundação como uma percentagem da máxima área prevista a implantar no **PC aa**;

CA aa 00 00 idem ao caso anterior mas para as áreas sob irrigação por aspersão;

- RESTRIÇÕES

PC aa cc dd restrição de balanço hídrico correspondente ao **PC aa**, no ano **cc** e no mês **dd**. Tem-se uma restrição deste tipo por mês;

XI aa cc 00 é uma restrição que cuida que o tamanho de implantação do projeto de irrigação por **inundação** seja no mínimo igual ao menor grau de atendimento à demanda no **PC aa**, no ano **cc**. Tem-se uma destas restrições por ano;

XA aa cc 00 idem ao caso anterior, porem para os projetos de irrigação por aspersão;

GI aa 00 00 restrição que cuida para que o grau de atendimento à demanda de irrigação por **inundação** seja como mínimo igual ao estabelecido. Tem-se uma destas restrições por ano;

GA aa 00 00 idem à anterior, porém para os projetos de irrigação por **aspersão**;

GE aa 00 00 idem às duas anteriores, mas com referência às áreas **existentes** sob irrigação (por aspersão).

- COEFICIENTES

Os coeficientes utilizados foram nomeados da seguinte forma:

K_I coeficiente de uso consuntivo da irrigação por inundação;

K_A coeficiente de uso consuntivo da irrigação por aspersão;

K_E coeficiente de uso consuntivo da irrigação por aspersão existente;

K_P coeficiente de uso consuntivo do abastecimento das populações;

DI aa dd demanda da irrigação por **inundação** do **PC aa**, para o mês **dd**;

DA aa dd demanda da irrigação por **aspersão** do **PC aa**, para o mês **dd**;

DE aa dd demanda da irrigação por **aspersão** dos perímetros **existentes** no **PC aa**, para o mês **dd**;

DU aa dd demanda da população **urbana** do **PC aa** para o mês **dd**;

DR aa demanda mensal da população **rural** do **PC aa**;

DG aa demanda mensal do **gado** no **PC aa**;

QEC aa vazão ecológica do **PC aa**;

N^o_{ANOS} número de anos do período de análise;

GI_{ATEND} grau de atendimento das demandas de irrigação por **inundação**;

GA_{ATEND} grau de atendimento das demandas de irrigação por **aspersão**.

Com esta nomenclatura, e colocando as variáveis de decisão do lado esquerdo da inequação e as constantes do lado direito, as restrições consideradas para o **PC aa**, no mês **dd**, ficaram:

PC aa cc dd)

$$\begin{aligned}
&\sum_{ii=n}^{aa-1}\left[\begin{array}{l} k_I \cdot DI\ ii\ dd \cdot AI\ ii\ cc\,00 + k_A \cdot DA\ ii\ dd \cdot AA\ ii\ cc\,00 + \\ + k_E \cdot DE\ ii\ dd \cdot AE\ ii\ cc\,00 \end{array}\right] + \\
&+\left[\begin{array}{l} DI\,aa\,dd \cdot AI\ aa\,cc\,00 + DA\ aa\ dd \cdot AA\,aa\,cc\,00 + \\ + DE\,aa\,dd \cdot AE\,aa\,cc\,00 \end{array}\right] = \\
&= \sum_{ii=n}^{aa-1}\left[Q\ ii\ cc\,dd - k_P \cdot DU\ ii\ dd - DR\,ii - DG\,ii\right] + \\
&+\left[Q\,aa\,cc\,dd - DU\,aa\,dd - DR\,aa - DG\,aa\right] - QEC\,aa
\end{aligned} \tag{5.15}$$

Novamente **ii** representa os PCs com influência no PC **aa**; o extremo **n** o primeiro PC a montante com influência no **PC aa**.

XI aa cc 00) $$AI\,aa\,cc\,00 - CI\,aa\,00\,00 \le 0 \tag{5.16}$$

XA aa cc 00) $$AA\,aa\,cc\,00 - CA\,aa\,00\,00 \le 0 \tag{5.17}$$

GI aa 00 00) $$CI\,aa\,00\,00 - \frac{1}{N^o{}_{ANOS}} \sum_{jj=1}^{N^o\,ANOS} \left(AI\ aa\ jj\,00\right) \le \left(1 - GI_{ATEND}\right) \tag{5.18}$$

GA aa 00 00) $$CA\,aa\,00\,00 - \frac{1}{N^o{}_{ANOS}} \sum_{jj=1}^{N^o\,ANOS} \left(AA\ aa\ jj\,00\right) \le \left(1 - GA_{ATEND}\right) \tag{5.19}$$

GE aa 00 00) $$\frac{1}{N^o{}_{ANOS}} \sum_{jj=1}^{N^o\,ANOS} \left(AE\ aa\ jj\,00\right) \ge GA_{ATEND} \tag{5.20}$$

A função objetivo utilizada foi a indicada na fórmula (4.65) do capítulo Metodologia.

OBSERVAÇÃO: Esta abordagem não-binária foi também testada sem as restrições referidas ao grau de atendimento às demandas.

5.2.5. ARQUIVOS EM FORMATO MPS

As equações e inequações de todos os modelos formulados (variantes) foram escritas em formato **MPS** (**M**athematical **P**rograming **S**ystem).

Para cada um dos modelos formulados, foi preparado um gerador de arquivos neste formato, ou seja um código de computação que **monta** as equações e inequações neste formato.

Estes programas foram desenvolvidos em linguagem FORTRAN, tendo a característica de fazer a leitura dos dados, que foram fornecidos em arquivos ASCII, e montar simultaneamente os arquivos de saída no formato **MPS**.

5.2.6. PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO EMPREGADO

A otimização foi feita utilizando o programa comercial **LINDO**, na sua versão 'extended', que permite o processamento de até 32.000 restrições e 100.000 variáveis (Lindo Systems, 1996).

5.3. PLANEJAMENTO TÁTICO

No contexto deste trabalho o planejamento tático referiu-se ao estabelecimento de uma metodologia para dar subsídio na tomada de uma decisão, no mês de março de um ano qualquer, sobre quais as percentagens dos perímetros implantados sob irrigação por aspersão que deveriam ser preparadas para que o valor esperado dos benefícios a serem obtidos sejam máximos.

Apenas para ganhar em clareza e pelo fato que a metodologia utilizada

consiste em uma otimização por PC, o esquema do planejamento tático (ou de operação do sistema ou, em breve, **operação**) foi desenvolvido em sua totalidade em planilha de cálculo Excel.

O desenvolvimento da metodologia de operação teve duas etapas. A primeira consistiu em fazer uma análise das freqüências relativas conjuntas, das vazões de março e setembro. A segunda etapa consistiu na otimização propriamente dita das decisões a serem tomadas.

5.3.1. ANÁLISE DE FREQÜÊNCIAS RELATIVAS

Este análise de freqüências não levou em conta apenas as vazões das bacias incrementais de cada PC, sendo também computadas as vazões das bacias incrementais dos PCs contribuintes para o PC considerado. Por exemplo no **PC4** confluem as vazões dos PCs **1**, **2** e **3**; portanto a vazão do **PC4** foi calculada como a soma das vazões das bacias incrementais dos PCs **1**, **2**, **3** e **4**.

Os 55 dados de vazões foram agrupados em 8 intervalos de classe. Os resultados dos análises das freqüências conjuntas absolutas, das vazões de setembro contra as vazões de março são apresentadas nas tabelas A-28 até A-42 (Anexo A).

Cada linha desta tabela, dividida pela freqüência do março correspondente é o vetor de ponderação utilizado na etapa seguinte de otimização das decisões a serem tomadas.

5.3.2. OTIMIZAÇÃO DAS DECISÕES

Em cada PC as decisões que poderiam ser tomadas foram classificadas em dez grupos, correspondendo eles a **10%**, **20%**, etc., até **100%** da superfície sob irrigação que foi implantada. Cada uma destas decisões foram chamadas de $\mathbf{D_i}$, com **i** variando de 1 até 10 (as dez decisões que poderiam ser tomadas).

Para cada decisão $\mathbf{D_i}$ foram calculados os benefícios decorrentes de oito valores (mais precisamente intervalos de classe) possíveis de oferta hídrica em setembro **QOset**. Cada intervalo de classe da oferta hídrica foi caracterizado pelo valor médio do intervalo.

A ponderação das chances de acontecer cada um deste **QOset** foi feita através de um vetor. Este vetor, para um ano em particular, num PC qualquer, no qual foi observado durante o mês de março uma vazão que pertence ao intervalo $\mathbf{QM_j}$, é a linha correspondente a este $\mathbf{QM_i}$ da matriz da análise de freqüências conjuntas março-setembro, elaborada na primeira etapa da fase de **operação** do sistema.

A otimização foi feita aplicando as equações (4.70) até (4.73) do capítulo correspondente a Metodologia.

6. RESULTADOS

Sinto-me verdadeiramente constrangido por você não ter pedido minha opinião sobre o funcionamento do sifão antes de efetuar os gastos, pois eu poderia ter conseguido que você poupasse o ônus fazendo-lhe notar - exceto por alguns erros - a impossibilidade do assunto [...].

Galileo Galilei (*)

6.1. OTIMIZAÇÃO DA DIMENSÃO DO SISTEMA

Todos os modelos apresentados foram implementados e otimizados para séries de 30 anos (período de análise), o que é coerente com a importância e transcendência social de um empreendimento como o que foi objeto deste estudo. Estes períodos de análise começaram nos anos **0**, **5**, **10**, **15**, **20** e **25** da série de 55 anos de dados de que se dispunha.

Foi utilizada uma taxa de desconto de 12%, compatível com o tipo de empreendimento analisado.

Adotou-se um valor de uso consuntivo de **60%** para a irrigação, de **100%** para a dessedentação do gado e de **20%** para as demandas das populações.

6.1.1. RESULTADOS

i. IRRIGAÇÃO POR INUNDAÇÃO

O resultado da otimização mostrou, com referência aos perímetros sob irrigação por inundação, para todos os modelos (abordagens), o seguinte:

a.- todos os perímetros projetados são factíveis de serem implantados;

(*) *Carta de Galileo a Baliani, de data 6/8/1630. In: LEVI, E. 1995. The science of water. New York: American Society of Civil Engineers. ch.1, p.23.*

b.- as demandas destes perímetros poderiam ser atendidas todos os anos, na sua totalidade.

Este resultado era de se esperar, pelo fato de que as demandas da irrigação por inundação acontecem nos meses com maior oferta hídrica: o verão.

ii. Irrigação por Aspersão

Com referência aos perímetros sob irrigação por aspersão, a otimização mostrou que nem sempre será possível atender às demandas de todos os perímetros projetados e existentes, o que também não foi um resultado surpreendente. E é em situações como estas, que poderíamos chamar de conflitivas (usos conflitantes), que as abordagens formuladas e aplicadas apresentam suas vantagens e potencialidades para subsidiar na tomada de decisão.

Os resultados detalhados de cada um dos modelos testados são apresentados nas tabelas A-43, até A-52 (Anexo A).

O significado das denominações utilizadas neste item é o seguinte:

Abordagem 1 é a abordagem binária, na variante chamada de 'tudo ou nada';

Abordagem 2 é a abordagem binária, com 'alternativas pré-definidas';

Abordagem 3 é a abordagem binária, na variante 'com penalizações';

Abordagem 4 é a abordagem não-binária, sem grau de atendimento garantido;

Abordagem 5 é a abordagem não-binária, com 75% de garantia do grau de atendimento.

Apenas para ilustrar a flexibilidade das abordagens aplicadas nesta etapa do trabalho, na figura 6.1 é apresentada a variação dos atendimentos às demandas das

áreas que se pretendem implantar no **PC2**. Os cinco diagramas desta figura são o resultado da otimização para séries de 30 anos, iniciando todas elas no ano 10 (to) da série de 55 anos de dados.

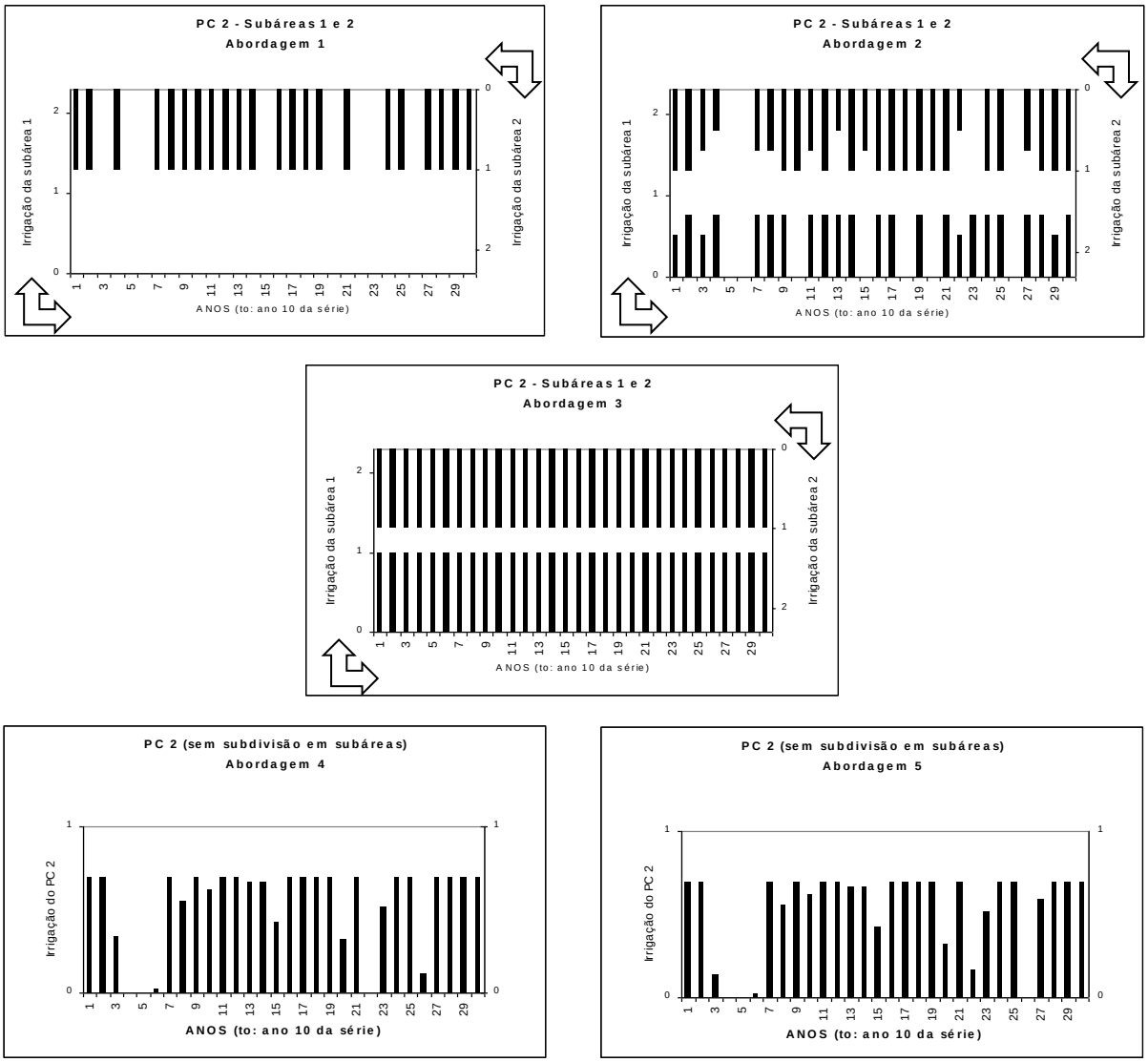

Figura 6.1 Comparação entre as cinco abordagens

Pode-se apreciar na figura 6.1 que, segundo a abordagem 1 (‘tudo ou nada’), a subárea 1 não seria viável de ser implantada, enquanto a 2 sim.

Segundo a abordagem 2 (‘com alternativas pre-definidas’), a subárea 1 seria factível de ser implantada num tamanho equivalente ao 75% do máximo projetado e, com referência ao atendimento das demandas, alguns anos poderia ser atendido o

75% do tamanho máximo projetado (tamaho de implantação), outros anos o 50% do tamanho máximo e outros anos as demandas não poderiam ser atendidas. A subárea 2 é viável de ser implantada num tamanho igual ao máximo projetado e o atendimento anual das demandas poderia ser do 100% deste tamanho máximo (tamanho de implantação), 75%, 50% ou 0%.

Já, segundo a abordagem 3 ('com penalizações'), tanto a subárea 1 como a 2 poderiam ser implantadas com 100% do tamanho máximo projetado. Estas áreas poderiam ser irrigadas todos os anos do período de análise.

Nas abordagens 4 e 5 (não binárias) cada PC foi considerado uma unidade de planejamento e, para o caso do **PC2**, os perímetros projetados poderiam ser implantados num 69,4% do tamanho máximo projetado. O atendimento das demandas poderá variar de forma contínua, conforme o ano analisado seja mais ou menos úmido.

Percebe-se que os resultados refletem as diferentes flexibilidades dos modelos: quando maior a flexibilidade do modelo, maior a área que poderia ser implantada.

6.1.2. Comparação dos Resultados

A comparação dos resultados será feita visando dois aspectos: a sensibilidade com as séries temporais de dados e a função objetivo:

i. Sensibilidade com as séries temporais de dados

Os resultados mostraram que apenas as áreas projetadas para os PCs **2** e **5** são sensíveis às séries de dados. Já quando incorporada as restrições de 'garantia de atendimento' na abordagem não-binária, os projetos do **PC7** são os que começam a apresentar sensibilidade com as séries temporais de dados.

Portanto, é nestes PCs onde deveria ser focalizada a atenção do tomador de decisões na hora de fazer as escolhas.

Os projetos que se pretende implantar nos outros PCs não apresentaram sensibilidade as séries de dados, o que estaria indicando a factibilidade de sua implantação com tamanho máximo.

ii. SENSIBILIDADE COM A FUNÇÃO OBJETIVO

Os resultados mostraram que o valor da função objetivo aumenta, conforme o modelo seja mais flexível, com mais alternativas de escolha, o que é muito razoável.

A abordagem não-binária, com 'grau de atendimento' (abordagem 5) apresentou, como era de se esperar, uma diminuição no valor da função objetivo se comparado com a abordagem não-binária sem grau de atendimento (abordagem 4).

Analisando a variante **não-binária**, com grau de atendimento, poder-se-ia considerar que ela leva implícita, porém de forma míope, uma 'espécie' de regra de operação: o resultado garante que as demandas de irrigação dos perímetros existentes e dos perímetros projetados, serão atendidas numa percentagem do tempo igual ou maior ao grau de atendimento que foi adotado. Na tabela 6.1 são apresentados alguns resultados da aplicação desta abordagem, para séries de trinta anos, iniciando todas elas no ano 10, para diferentes graus de atendimento às demandas. Neste quadro, o significado dos diferentes 'testes' é o seguinte:

- **Teste 1**: atendimento da irrigação por inundação, 75%; atendimento dos perímetros existentes, 80%; atendimento dos perímetros projetados sob irrigação por aspersão, 75%;

- **Teste 2**: atendimento dos perímetros sob irrigação por inundação, 99%; atendimento dos perímetros existentes 75% e dos perímetros projetados sob irrigação por aspersão, 75%;

- **Teste 3**: atendimento da irrigação por inundação, 99%; atendimento dos perímetros existentes, 85%; atendimento dos perímetros projetados sob irrigação por aspersão, 85%;

- **Teste 4**: atendimento dos perímetros sob irrigação por inundação, 99%; atendimento dos perímetros existentes, 90%; atendimento dos perímetros projetados sob irrigação por aspersão, 90%.

Tabela 6.1 Resultado da otimização para diferentes graus de atendimento

TESTES	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
	% DA ÁREA QUE PODERIA SER IMPLANTADA			
PC 02	66.43%	61.51%	55.57%	33.33%
PC 03	100%	100%	100%	94.64%
PC 05	87.21%	46.34%	46.34%	22.88%
PC 06	100%	100%	100%	100%
PC 07	85%	67.32%	36.04%	13.21%
PC 10	100%	100%	100%	100%
PC 12	100%	100%	100%	100%

6.1.3. CRITÉRIO DE DECISÃO

No contexto deste trabalho, na escolha dos perímetros a serem implantados, foi utilizado um critério muito conservador, que poderíamos chamar de **pessimismo extremo**. Foi usado o critério **max-min**: maximização dos resultados na pior das condições hidrológicas oferecidas dentre as séries alternativas de vazões históricas.

Outro planejador poderia considerar este critério não muito razoável e escolher um outro, em função de sua experiência, dos riscos que esteja disposto a assumir, do seu 'olfato', etc.

O resultado da escolha é apresentado na tabela 6.2.

Tabela 6.2 Escolha dos perímetros sob irrigação por aspersão a serem implantados

PC	PROJETO	Área Máx Projetada (ha)	TAMANHOS ADOTADOS em ha				
			ABORD. 1	ABORD. 2	ABORD. 3	ABORD. 4	ABORD. 5
2	*2.1*	3 784.00	0.00	1 892.00	3 784.00	2 625.97	2 625.97
	2.2	4 312.00	4 312.00	3 234.00	4 312.00	2 992.39	2 992.39
3	*3.1*	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00
5	*5.1*	5 232.00	5 232.00	3 924.00	5 232.00	5 231.22	3 906.77
	5.2	3 248.00	0.00	2 436.00	3 248.00	3 247.52	2 425.30
	5.3	3 968.00	3 968.00	2 976.00	3 968.00	3 967.41	2 962.93
6	*6.1*	11 536.00	11 536.00	11 536.00	11 536.00	11 536.00	11 536.00
	6.2	6 016.00	6 016.00	6 016.00	6 016.00	6 016.00	6 016.00
7	*7.1*	7 008.00	7 008.00	7 008.00	7 008.00	7 008.00	7 008.00
	7.2	512.00	512.00	512.00	512.00	512.00	512.00
	7.3	6 344.00	6 344.00	4 758.00	6 344.00	6 344.00	6 344.00
	7.4	2 816.00	2 816.00	2 816.00	2 816.00	2 816.00	2 816.00
	7.5	5 500.00	5 500.00	5 500.00	5 500.00	5 500.00	1 790.53
10	*10.1*	4 768.00	4 768.00	4 768.00	4 768.00	4 768.00	4 768.00
	10.2	2 312.00	2 312.00	2 312.00	2 312.00	2 312.00	2 312.00
12	*12.1*	5 820.00	5 820.00	5 820.00	5 820.00	5 820.00	5 820.00
	12.2	3 790.00	3 790.00	3 790.00	3 790.00	3 790.00	3 790.00
	12.3	2 350.00	2 350.00	2 350.00	2 350.00	2 350.00	2 350.00
SUP. TOTAL ADOTADA (ha)			74 460.00	73 824.00	81 492.00	79 012.51	72 151.89

6.1.4. Características dos Modelos e Aspectos Computacionais

As dimensões das matrizes dos sistemas de equações/inequações representativos dos diferentes modelos testados são apresentadas na tabela 6.3.

O **número de não-zeros** na matriz que define o problema, indica, apenas, quais das suas células diferem de zero. Ou seja, este número dá uma idéia de como esta matriz é esparsa.

Tabela 6.3 Tamanhos e características computacionais dos modelos

	Nº de Variáveis	Nº Equações ou Inequaç.	Nº de não-zeros	Tamanho do Arquivo MPS (KB)	Tempo de process. da Otimiz.
Abordagem 1	1318	4891	49228	3733	3-4 min
Abordagem 2	3954	6209	140776	9780	23-75 min
Abordagem 3	9418	4891	61378	4469	4-6 min
Abordagem 4	822	4438	32394	2597	30-40 seg
Abordagem 5	822	4438	32394	2597	30-40 seg

Estes modelos foram rodados e otimizados em computadores tipo 'PC', com processadores 'Pentium' de 166 MHz e memória RAM de 16 MB. O tempo de processamento apresentado na tabela 6.3 indica quanto demorou o programa **LINDO** para fazer a otimização. A grande diferença entre estes tempos é devida ao fato que a otimização de modelos com variáveis inteiras ou binárias é feita mediante o artifício conhecido como **branch and bound**, que resolve de forma iterativa, várias vezes o problema, até impor as condições **inteiras** às variáveis pertinentes. Este artifício é explicado em detalhes em Wagner (1986), Taha (1995), NEOS Guide (1996) e muitos outros.

6.2. Operação do Sistema

A otimização do sistema mostrou que os perímetros sob irrigação por inundação não apresentam problemas de atendimento de suas demandas. Portanto, os conceitos e resultados a serem apresentados daqui para a frente estarão referidos exclusivamente aos perímetros sob irrigação por aspersão, novos e existentes.

6.2.1. ANÁLISE DE FREQÜÊNCIAS RELATIVAS

Para cada um dos quinze PCs foi feita uma análise das freqüências relativas das vazões acumuladas de setembro, condicionadas às vazões acumuladas de março. As vazões acumuladas, logicamente, levam em conta as vazões da bacia incremental do PC em questão, mais as vazões das bacias incrementais de cada um dos PCs com influência a montante.

Os resultados destas análises são apresentadas nas tabelas A-28 até A-42 (Anexo A).

Tanto as vazões de março quanto as vazões de setembro foram agrupadas em oito intervalos de classe cada. O significado dos termos utilizados nas tabelas é o seguinte:

DENOMINAÇÃO — é apenas a denominação aplicada a cada intervalo de classe (por exemplo, **M3** significa 'intervalo de classe 3 das vazões de março' e **S5** significa 'intervalo 5 das vazões de setembro', para esse PC);

LIM. INF. — é o limite inferior do intervalo de classe (o limite inferior do primeiro intervalo é aberto);

LIM. SUP. — é o limite superior do intervalo de classe (o limite superior do último intervalo é aberto);

QM repres. — vazão representativa do intervalo de classe de março, calculada como a média entre o limite superior e o inferior do intervalo;

QS repres. — vazão representativa do intervalo de classe de setembro, calculada como a média entre o limite superior e o inferior do intervalo;

6.2.2. MATRIZES DOS BENEFÍCIOS

Como já foi explicado no capítulo correspondente a metodologia, para cada PC foi elaborada uma matriz, que tem nas linhas as alternativas de decisão (escolha), expressas em percentagem da superfície implantada (que resultou da otimização do sistema). Foram consideradas dez alternativas de decisão, correspondendo elas de 10% até 100% da superfície implantada.

Por sua vez, as colunas representam as possíveis disponibilidades de água em setembro, existindo oito colunas por matriz, uma por cada intervalo de classe em que foram agrupadas as vazões de setembro.

A disponibilidade de água em setembro, correspondente a uma coluna genérica **i**, para um PC genérico, foi calculada da seguinte forma: da vazão de setembro para esse PC, representativa do intervalo **i**, são descontadas as vazões utilizadas nos PCs de montante (resultado da otimização da operação do PC de montante) e também é descontada a vazão ecológica do PC que está sendo analisado. O limite superior da disponibilidade é a demanda da superfície implantada nesse PC e o limite inferior, logicamente, zero.

A forma de preenchimento das células desta matriz já foi explicada no capítulo 4, correspondente à metodologia. É possível perceber que, em virtude do critério de penalização adotado, o valor das células pode ser negativo.

6.2.3. RESULTADOS

O modelo de otimização da operação, com ‘futuro desconhecido’, foi rodado para os anos **5**, **10**, **15** e **20** da série de 55 anos de dados, para a implantação que surgiu da otimização do sistema para a **Variante 4**. Para tentar avaliá-los, os resultados foram comparados com os resultados da otimização do sistema num contexto de 'futuro conhecido', para os mesmos anos e para a mesma implantação. Para isso, o modelo não binário de otimização do sistema (etapa anterior deste trabalho) foi modificado, deixando como função objetivo apenas a maximização dos benefícios, ou seja, não incluindo nela os custos de implantação. A comparação dos resultados das abordagens com 'futuro conhecido' e com 'futuro desconhecido' é apresentada na tabela A-53 (Anexo A).

É importante, na hora de fazer a leitura da comparação entre os resultados dos modelos a futuro conhecido e a futuro desconhecido, que o segundo, ou seja o modelo de ‘operação do sistema’, penaliza de uma forma bastante severa as situações em que as disponibilidades hídricas para o mês de setembro, do ano analisado não sejam iguais às demandas decorrentes de uma dada decisão. Mas, devido a que o futuro é desconhecido, o modelo 'pondera' as disponibilidades hídricas para setembro através das freqüências relativas com que elas aconteceram nos 55 anos de observações (esta penalização poderia ser modificada, segundo os riscos que os produtores estivessem dispostos a assumir). Então, ao analisar os resultados, é importante não esquecer que a finalidade deste modelo não é adotar decisões 'automáticas', senão oferecer subsídios para que o planejador possa fazer uma escolha razoável, no contexto dos perímetros que foram implantados, na situação de incerteza sobre o futuro e com base nas vazões observadas no passado.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

[...] a teoria do conhecimento deveria mostrar como o fenômeno do conhecer gera a pergunta pelo conhecer. Esta situação é muito diferente das que encontramos correntemente, onde o fenômeno de perguntar e o que se pergunta pertencem a domínios diferentes.

Humberto Maturana R. e Francisco Varela G.
(El árbol del conocimiento, Cap. X, pág. 159)

7.1. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram utilizados modelos de otimização, tanto na fase de planejamento estratégico quanto na de planejamento tático, do aproveitamento de um sistema de recursos hídricos com múltiplos propósitos. Estes modelos mostraram-se eficazes, pois os resultados são um interessante subsídio para o processo decisório, e até eficientes, pois esses resultados foram obtidos com custos (computacionais) muito baixos.

A programação matemática convexa, em particular a **programação linear**, foi utilizada sem a necessidade de fazer simplificações de linearização grosseiras ou alheias à realidade. Esta abordagem tem a característica de apresentar soluções que possuem um caráter de ótimo global, em contraposição aos esquemas de trabalho que pretendem encontrar uma solução ótima por **simulação**, que apenas permitem a obtenção de ótimos locais[8].

Porém, é importante fazer a seguinte consideração: a programação linear não otimiza a solução do problema, senão a solução do modelo formulado. Portanto esta não é 'a metodologia', senão 'uma das metodologias' que é possível de ser utilizada

[8] *Para encontrar um ótimo global por simulação seria preciso testar todas as soluções possíveis, o que num problema de porte médio, como este, e na suposição de contar com um supercomputador, poderia demandar um tempo de processamento que se mediria em 'eras geológicas' ou unidades ainda maiores (ver exemplo apresentado no capítulo 3 do livro de Hall e Dracup, 1974).*

e apenas no caso em que a função objetivo e as restrições possam ser expressas através de polinômios 'lineares', ou, senão, poligonais (ver Anexo B).

O problema que foi abordado neste trabalho pode ser considerado bastante complexo:

- a bacia não possui (nem estão previstos) reservatórios que permitam uma regulação das vazões;

- existem 15 pontos onde devem ser verificadas as equações de balanço hídrico, cada um deles com vários tipos de demandas, como por exemplo de irrigação por inundação e por aspersão, de populações urbanas e rurais, além de dessedentação de gado;

- as duas características anteriores fazem com que as equações de balanço hídrico dos pontos mais a jusante sejam muito extensas (complexas),devido às disponibilidades de água dependerem das retiradas em cada um dos pontos com influência a montante.

Apesar desta complexidade, o desenvolvimento dos modelos foi bastante simples, utilizando ferramentas de uso diário de qualquer profissional da engenharia: simples microcomputadores tipo PC, o que fala da eficiência deste modelos.

Seria impróprio considerar um dos modelos aplicados como melhor que os outros, pois cada um deles mostra-se adequado para responder questões diferentes:

- o projeto 'x' é viável de ser implantado, sim ou não ?

- se não é viável em seu tamanho máximo projetado, seria viável num tamanho menor, digamos 75%, ou 50% ?

- e estas percentagens, não poderiam variar de forma contínua ?

- considerando que a demanda, nos meses de pouca oferta hídrica, seja atendida com fontes alternativas, e seu custo levado em conta, não seria possível ampliar o tamanho do projeto a ser implantado ?

- quais os projetos que deveriam ser implantados para que o grau de atendimento garantido às suas demandas seja maior ou igual a um determinado valor definido a priori ?

Cada uma destas perguntas teria resposta com algum das abordagens que foram desenvolvidos e aplicados neste trabalho.

Um outro ponto que vale a pena salientar é a possibilidade de utilizar a **PL** na fase de 'operação do sistema', levando em conta o desconhecimento do futuro. Isto permite adotar critérios de decisão que minimizem o risco de perdas (ou maximizem o valor esperado dos benefícios), salientando que o termo ‘risco’ é considerado neste contexto de forma relativa e não como o valor numérico de uma função densidade de probabilidades, mais ou menos conhecida.

Porém, considera-se que o esquema de trabalho bifásico adotado, com uma primeira parte onde o objetivo foi a otimização da implantação dos projetos a escala de bacia e, uma segunda, onde foi estabelecida uma forma de operação do sistema, é um pouco 'míope', já que implantação e operação são dois aspectos que não deveriam ser considerados por separado e sim de forma conjunta, o que constitui uma situação altamente **não-linear**.

Finalmente, pode-se concluir que, embora as pesquisas atuais tenham abandonado a programação convexa como ferramenta no planejamento hídrico, ela tem um potencial de possibilidades ainda não totalmente explorado.

7.2. RECOMENDAÇÕES

A elaboração deste trabalho respondeu as dúvidas que o motivaram, mas gerou uma grande quantidade de perguntas, que poderiam ser colocadas como recomendações:

- Com referência a levar em conta a conveniência de uma análise conjunta da implantação e da operação, deveria ser pesquisada uma abordagem onde a função objetivo seja a otimização de um **funcional** e não de uma **função**.

- Numa outra linha, a otimização em situação de futuro desconhecido deveria ser feita explorando outro tipo de abordagens, mais adequadas a situações de incerteza, como por exemplo lógica fuzzy, e que permitam a incorporação de dados não formais ou não quantificáveis, como por exemplo ‘dates minning’.

- Os modelos formulados neste trabalho, para o caso de futuro conhecido e para o caso de futuro incerto, poderiam servir como subsídio para um estudo de **custo da incerteza**.

- A variabilidade temporal dos preços de mercado do produzido pelas culturas e dos custos anuais de insumos não foram levados em conta neste trabalho, pelo que se recomenda que sejam considerados em futuras pesquisas sobre otimização de sistemas de recursos hídricos.

- A questão agronômica merece uma recomendação muito especial: os calendários agrícolas utilizados neste trabalho foram muito simplistas e estáticos. A dinâmica agrícola é muito mais complexa do que foi considerado no trabalho e, portanto, recomenda-se que isto seja levado em consideração em futuras pesquisas, mesmo porque os modelos formulados oferecem esta possibilidade.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ANDERSEN, E.D. , GONDZIO, J. , MÉSZÁROS, C. , XU, X. 1996. Implementation of interior point methods for large scale linear programming, Geneva: Logilab; Geneva: University. (Technical Report, 1996.3). [Comunicação via Internet].

ANDERSEN, E.D., YE, Y. 1997. A computational study of the homogeneous algorithm for large-scale convex optimization. [s.l.]. 40 p. [Comunicação via Internet].

ANDREU, J. 1993a. Análisis de sistemas y modelación. In: ____. Conceptos y métodos para la planificación hidrológica. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. p.25-34.

ANDREU, J. 1993b. Análisis multiobjetivo. In: ____. Conceptos y métodos para la planificación hidrológica. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. p. 239-248.

BAHSKAR, N.R., WHITLATCH, A.E. Jr. 1980. Derivation of monthly reservoir release policies. Water Resources Research, Washington, v.16, n.6, p.987-993.

BARROS, M.T.L. de, BRAGA Jr., B.P.F. 1991. Otimização estocástica implícita da operação de sistemas de reservatórios considerando múltiplos objetivos. Revista Brasileira de Engenharia. Caderno de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, v.9, n.1, p.33-56.

BARTH, F.T. 1987. Fundamentos para a gestão dos recursos hídricos. In: MODELOS para gerenciamento de recursos hídricos. São Paulo: Nobel: ABRH. p.1-91. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos,1).

BRAGA Jr., B.P.F. 1987. Técnicas de otimização e simulação aplicadas em recursos hídricos. In: MODELOS para gerenciamento de recursos hídricos. São Paulo: Nobel: ABRH. p.427-518 (Coleção ABRH de Recursos Hídricos,1).

BRAGA Jr., B.P.F., GOBETTI, L. 1997. Análise multiobjetivo. In: TÉCNICAS quantitativas para gerenciamento de recursos hídricos. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS: ABRH. p.361- 420.

BURAS, N. 1972. Scientific allocation of water resources. New York: American Elseiver. 208 p.

COSTA, J. 1977. Teoria da decisão: um enfoque objetivo. Rio de Janeiro: Ed. Rio.

CRAWLEY, D., DANDY, G.C. 1993. Optimal operation of multiple-reservoir system. Journal of Water Resources Planning and Management, New York, v.119, n.1, p.1-17.

CZYCYK, J., MEHROTRA, S., WAGNER, M., WRIGHT, S. 1997. PCx user guide. [Argone National Laboratory]: Optimization Technology Center. 123 p. [Comunicação via Internet].

DESARROLLO sostenible de regiones multinacionales: documento técnico. 1996. In: CONFERENCIA CUMBRE sobre desarrollo sostenible, 7-8 dic. 1996, Santa Cruz de la Sierra. Documentos Técnicos. [Comunicação via Internet: http://www.oas.org/sp/prog/bolivia/sumsp.htm].

EVALUACIÓN global de los recursos mundiales de agua dulce: artículo especial. 1997. Waterway, Boletín PHI, n.11, jul/set. [Comunicação via Internet: http://www.unesco.org.uy/phi/wateresp/Wat11/Wat11_artesp.html]

FOUER, R., GREGORY, J.W. 1996. Linear programming: frequently asked questions list. [s.l.]: World Wide Web. [Comunicação via Internet: http://www-c.mcs.anl.gov/home/otc/Guide/faq/linear-programming-faq.html]

FOUER, R., GREGORY, J.W. 1997. Non linear programming: frequently asked questions. [s.l.]: World Wide Web. [Comunicação via Internet: http://www-c.mcs.anl.gov/home/otc/Guide/faq/nonlinear-programming-faq.html]

FRITZSCHE, H. 1978. Programação não linear: análise e métodos. São Paulo: Edgar Blücher: Editora da Universidade / USP. 170 p.

GASS, S.L. 1966. Programación lineal: métodos y aplicaciones. México: Continental. 340 p.

GONDZIO, J. 1995. HOPDM, (version 2.12) – a fast solver based on a primal-dual interior point method. Warsaw: Systems Research Institute, Polish Academy of Sciences. 6f. [Comunicação via Internet].

GONDZIO, J., MAKOSKI, M. 1995. HOPDM, modular solver for LP problems: user's guide to version 2.12. Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis. (Working Paper – 95 – 50). [Comunicação via Internet].

GONDZIO, J., TERLAKY, T. 1994. A computational view of interior-point methods for linear programming. Geneva: Logilab: HEC Geneva: University of Geneva. (Technical Report 1994.22). [Comunicação via Internet].

GONZAGA, C.C. 1989. Algoritmos de pontos interiores para programação linear. Rio de Janeiro: Instituto de Matemática Pura e Aplicada de CNPq: 17º Colóquio Brasileiro de Matemática. 116 p.

GOULTER, I.C. 1992. Systems analysis in water-distribution network design: from theory to practice. Journal of Water Resources Planning and Management, New York, v.118, n.3, p.238-248.

GREENBERG, H.J. 1996-98. Mathematical programming glossary [s.l.]: World Wide Web [Comunicação via Internet: http://www-math.cudenver.edu/~hgreenbe/glossary/glossary.html].

HALL, W., DRACUP, J. 1974. Ingeniería de sistemas en los recursos hidráulicos. México: Mc Graw-Hill. 436 p.

HAY suficiente agua en el mundo? 1997. [s.l.]: Organización Meteorológica Mundial: UNESCO. 22 p.

HILLIER, F.S., LIEBERMAN, G.J. 1988. Introdução à pesquisa operacional. Rio de Janeiro: Editora Campus; São Paulo: Editora da Universidade / USP. 805 p.

INSTITUTO de Pesquisas Espaciais. 1972. Engenharia de sistemas: planejamento e controle de projetos. 3.ed. Petrópolis: Vozes.

KARAMOUZ, M., HOUCK, M.H. 1987. Comparison of stochasting and deterministic dynamic programming for reservoir operating rule. Water Resources Bulletin, Bethesda, v.23, n.1, p.1-9.

KAUFMANN, A., HERY-LABODERE, A. 1971-1976. Métodos y modelos de la investigación de operaciones. México: Continental. 3 t.

KINDLER, J. 1992. Rationalizing water requirements with aid of fuzzy allocation model. Journal of Water Resources Planning and Management, New York, v.118, n.3, p.308-323.

LABADIE, J.W. 1987. Otimização da operação de projetos hidroagrícolas. [Brasilia]: PRONI-IICA-CSU. 249 p.

LANNA, A.E. 1982. Operação estratégica de reservatórios para suprimento hídrico e controle de cheias. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 124 p. [Recursos Hídricos , publicação n.4).

LANNA, A.E. 1986. Dimensionamento e/ou expansão da capacidade de um sistema de suprimento hídrico com técnicas de programação linear. In: CONGRESO LATINO-AMERICANO SOBRE MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA ENGENHARIA, 7., 1986, São Carlos. Anais. São Carlos: Escola de Egenharia. V.2, p.795-807.

LANNA, A.E. 1997a. Elementos de estatística e probabilidades. In: TUCCI, C.E., org., Hidrologia: ciência e aplicação. 2.ed. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS: ABRH, cap.4, p.79-176.

LANNA, A.E. 1997b. Introdução. In: TÉCNICAS quantitativas para gerenciamento de recursos hídricos. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS: ABRH. p.15-42.

LANNA, A.E. 1997c. SAGBAH - Sistema de apoio ao de gerenciamento de bacias hidrográficas. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 22 p.

LANZER, E.A. 1982. Programação linear: conceitos e aplicações. Rio de Janeiro: IPEA / INPES. 258 p.

LINDO Systems. 1996. Lindo: user's manual. Chicago: Lindo Systems. 390 p.

LIPSCHUTZ, S. 1974. Álgebra linear. São Paulo: McGraw-Hill. 413 p.

LOUCKS, D.P. 1992. Water resources systems models: their role in planning. Journal of Water Resources Planning and Management, New York, v.118, n.3, p.214-223.

LUND, J.R., FERREIRA, I. 1996. Operating rule optimization for Missouri River reservoir system. Journal of water resources planning and management, New York, v.122, n.4, p.287-295.

MILORADOV, M. 1992. Planning and management of water resource systems in developing countries. Journal of Water Resources Planning and Management, New York, v.118, n.6, p.603-619.

MOHAN, S., RAIPURE, D.M. 1992. Multiobjetive analysis of multireservoir system. Journal of Water Resources Planning and Management, New York, v.118, n.4, p.356-370.

MURTAGH, B.A., SAUNDERS, M.A. 1987. MINOS 5.1 user's guide [s.l.] Stanford University. (Tecnical Report SOL 83-20R).

NEOS Guide. 1996. [Argone: Optimization Technology Center] [Comunicação via Internet: http://www-c.mcs.anl.gov/home/otc/Guide/]

O'LAOGHAIRE, D.T., HIMMELBLAU, D.M. 1974. Optimal expansion of water resources system. New York: Academic Press. 272 p.

OLIVEIRA, J.A. de. 1995. Otimização da operação de um sistema de reservatórios para irrigação e abastecimento urbano. Porto Alegre : UFRGS - Curso de Pós-Graduação em Engenharia, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 113 f. Dissertação (Mestrado).

OPTIMIZATION technology white paper [1998?]. Mountain View: ILOG. 21 p. [Comunicação via Internet: http://www.ilog.com].

PLANO Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paracatu. [1998?]. Secretaria de Recursos Hídricos.
[Comunicação via Internet: http://www.mma.gov.br/port/SRH/rioparacatu.html].

REVELIOTIS, S. 1997. An introduction to linear programming and the simplex algorithm. [s.l.] UAL Data. [Comunicação via Internet: http://www.isye.gatech.edu/~spyros/LP/LP.html].

RUELLE, D. 1993. Acaso e caos. São Paulo: Ed. da Universidade Estadual Paulista. 224 p.

SAHUQUILLO HERRAIZ, A. 1993. Reflexiones sobre la planificación hidrológica. In: ANDREU ALVAREZ, J.,ed. Conceptos y métodos para la planificación hidrológica. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, p.1-14.

SANTANA, A.G. de. 1998. Dimensionamento ótimo de um sistema de recursos hídricos de grande porte. Porto Alegre: UFRGS-Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Dissertação (Mestrado). [Dissertação a ser defendida em 10/07/98].

SCHRAGE, Linus. 1997. Optimization modeling with LINDO. 5.ed. Pacific Grove: Brooks/Cole. 470 p.

SEGURA, J.M. 1993. Hidrología estocástica y planeamiento hidráulico. In: ANDREU ALVAREZ, J.,ed. Conceptos y métodos para la planificación hidrológica. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, p.97-105.

SHEER, D.P., ULRICH, T.J., HOUCK, M.H. 1992. Managing lower Colorado River. Journal of Water Resources Planning and Management, New York, v.118, n.3, p.324-336.

SIMONOVIC, S.P. 1992. Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice. Journal of Water Resources Planning and Management, New York, v.118, n.3, p.262-280.

STARK, R.M., NICHOLLS, R.L. 1972. Mathematicas foundations for design civil engineering systems. New York: Mc Graw-Hill. 566 p.

TAHA, H.A. 1995. Investigación de operaciones. 5.ed. México. Alfaomega. 960 p.

TAO, T., LENOX, W.C. 1991. Reservoir operation by succesive linear programming. Journal of Water Resources Planning and Management, New York, v.117, n.2, p.274- 281.

TREZOS, T. 1991. Integer programming aplication for planning of hidropower production. Journal of Water Resources Planning and Management, New York, v.117, n.3, p.340-351.

TUCCI, C.E.M. 1987. Modelos determinísticos. In: MODELOS para gerenciamento de recursos hídricos. São Paulo: Nobel: ABRH. p.213-324. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos,1).

VADAS, R.G., GARCIA, L.A., LABADIE, J.W. 1995. A mehodology for water quantity and quality assesment for wetland development. Water Science and Tecnology, Oxford, v.31, n.8, p.293-300.

VALDES, J.B. et al. 1992. Aggregation-disaggregation aproach to multireservoir operation. Journal of Water Resources Planning and Management, New York, v.118, n.4, p.423-444.

VENTSEL, E.S. 1983. Investigación de operaciones: problemas, principios, metodología. Moscú: MIR. 280 p.

VIEIRA NETO, J.F. 1991. Dimensionamento ótimo do sistema de irrigação e barragens da bacia do rio Acaraú – Ceará. Porto Alegre: UFRGS - Curso de Pós-Graduação em Engenharia, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 113 f. Dissertação (Mestrado).

WAGNER, H.M. 1986. Pesquisa operacional. 2ª ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall. 851 p.

WRIGHT, S. 1998. Interior-point methods on line: archive of interior-point papers. [Argone National Laboratory]: Optimization of Technology Center. [Comunicação via Internet: http://www-c.mcs.anl.gov/home/otc/InteriorPoint/]

WURBS, R.A. 1993. Reservoir-system simulation and optimization models. Journal of Water Resources Planning and Management, New York, v.119, n.4, p.455-472.

XIMENES, F.B. 1997. Chega de tanta informação!. Informática Exame, São Paulo, v.12, n.133., p.38, abr.

YE, Y. 1997a. Interior point algorithm: theory and analysis. New York: John Wiley. 418 p. [Comunicação via Internet: primeiros capítulos disponíveis em: http://dollar.biz.uiowa.edu/col/ye/book.html].

YE, Y. 1997b. User's guide of COPL-LC. Iowa: Computational Optimization Laboratory. 18 p. [Comunicação via Internet: http://www.dollar.bizuiowa.edu/col/ye/].

YEH, W.W.G. 1985. Reservoir management and operations models: a state-of-the-art review. Water Resources Research, Washington, v. 21, n. 12, p.1797-1818.

ANEXO A. Dados e Resultados

Tabela A-1 Perímetros sob irrigação existentes

PC	Área Implantada (ha)	PERÍMETRO EXISTENTES DEMANDAS (m3 / seg)											
		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1	316.00	0	0	0	0	0	0.025	0.009	0.044	0.341	0.06	0	0
2	2 208.00	0	0	0	0	0	0.177	0.066	0.309	2.385	0.42	0	0
3	392.20	0	0	0	0	0	0.031	0.012	0.055	0.424	0.075	0	0
4	1 717.50	0	0	0	0	0	0.137	0.052	0.24	1.855	0.326	0	0
5	1 278.00	0	0	0	0	0	0.102	0.038	0.179	1.38	0.243	0	0
6	821.00	0	0	0	0	0	0.066	0.025	0.115	0.887	0.156	0	0
7	14 476.90	0	0	0	0	0	1.158	0.434	2.027	15.635	2.751	0	0
8	8 153.00	0	0	0	0	0	0.571	0.082	0.734	7.582	1.875	0	0
9	586.00	0	0	0	0	0	0.041	0.006	0.053	0.545	0.135	0	0
10	1 345.00	0	0	0	0	0	0.108	0.04	0.188	1.453	0.256	0	0
11	1 275.00	0	0	0	0	0	0.102	0.038	0.179	1.377	0.242	0	0
12	17.00	0	0	0	0	0	0.001	0.001	0.002	0.018	0.003	0	0
13	4 248.00	0	0	0.066	0.797	0.996	1.859	3.053	3.85	5.907	1.527	0	0
14	31.00	0	0	0	0	0	0.002	0.001	0.004	0.033	0.006	0	0
15	220.00	0	0	0	0	0	0.018	0.007	0.031	0.238	0.042	0	0

Tabela A-2 Perímetros sob irrigação por inundação projetados

PC	Sub-Área	Área máx Projetada (ha)	PERÍMETROS SOB IRRIGAÇÃO POR INUNDAÇÃO Demanda [m³/s]											
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
4	4.1	1285.00	0	2.930	0.942	0.994	0	0	0	0	0	0	0.445	2.176
6	6.1	1330.00	0	3.032	0.975	1.029	0	0	0	0	0	0	0.461	2.252
14	14.1	335.00	0	0.875	0.331	0.348	0	0	0	0	0	0	0	0.679
14	14.2	100.00	0	0.261	0.099	0.104	0	0	0	0	0	0	0	0.203
15	15.1	635.00	0	1.659	0.627	0.660	0	0	0	0	0	0	0	1.287
15	15.2	620.00	0	1.620	0.612	0.645	0	0	0	0	0	0	0	1.257
15	15.3	350.00	0	0.915	0.345	0.364	0	0	0	0	0	0	0	0.709
15	15.4	925.00	0	2.417	0.913	0.962	0	0	0	0	0	0	0	1.875
15	15.5	290.00	0	0.758	0.286	0.302	0	0	0	0	0	0	0	0.588
15	15.6	420.00	0	1.098	0.414	0.437	0	0	0	0	0	0	0	0.851

Tabela A-3 Perímetros sob irrigação por aspersão projetados

PC	Sub-Área	Área máx Projetada (ha)	PERÍMETROS SOB IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO Demanda (m³/s)											
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2	2.1	3784.00	0	0	0.047	0.520	0.615	1.183	1.821	2.389	4.091	1.064	0	0
2	2.2	4312.00	0	0	0.054	0.593	0.701	1.348	2.075	2.722	4.662	1.213	0	0
3	3.1	2720.00	0	0	0.034	0.374	0.442	0.850	1.309	1.717	2.941	0.765	0	0
5	5.1	5232.00	0	0	0.065	0.719	0.850	1.635	2.518	3.303	5.657	1.472	0	0
5	5.2	3248.00	0	0	0.041	0.447	0.528	1.015	1.563	2.050	3.512	0.914	0	0
5	5.3	3968.00	0	0	0.050	0.546	0.645	1.240	1.910	2.505	4.290	1.116	0	0
6	6.1	11536.00	0	0	0.144	1.586	1.875	3.605	5.552	7.282	12.473	3.245	0	0
6	6.2	6016.00	0	0	0.075	0.827	0.978	1.880	2.895	3.798	6.505	1.692	0	0
7	7.1	7008.00	0	0	0.088	0.964	1.139	2.190	3.373	4.424	7.577	1.971	0	0
7	7.2	512.00	0	0	0.006	0.070	0.083	0.160	0.246	0.323	0.554	0.144	0	0
7	7.3	6344.00	0	0	0.079	0.872	1.031	1.983	3.053	4.005	6.859	1.784	0	0
7	7.4	2816.00	0	0	0.035	0.387	0.458	0.880	1.355	1.778	3.045	0.792	0	0
7	7.5	5500.00	0	0	0.037	0.441	0.551	1.028	1.689	4.984	3.268	0.845	0	0
10	10.1	4768.00	0	0	0.060	0.656	0.775	1.490	2.295	3.010	5.155	1.341	0	0
10	10.2	2312.00	0	0	0.029	0.318	0.376	0.723	1.113	1.459	2.500	0.650	0	0
12	12.1	5820.00	0	0	0.073	0.800	0.946	1.819	2.801	3.674	6.293	1.637	0	0
12	12.2	3790.00	0	0	0.047	0.521	0.616	1.184	1.824	2.392	4.098	1.066	0	0
12	12.3	2350.00	0	0	0.029	0.323	0.382	0.734	1.131	1.483	2.541	0.661	0	0

Tabela A-4 Demandas da população urbana para o ano 1997

PC	CIDADE	DEMANDAS URBANAS POR PC PARA 1997 Demanda (m³/s)											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	Guarda Mor	0.012	0.012	0.011	0.011	0.011	0.011	0.012	0.013	0.012	0.011	0.011	0.011
2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Laga. e Vaz.	0.060	0.065	0.061	0.064	0.063	0.063	0.064	0.069	0.070	0.068	0.058	0.060
5	João Pinheiro	0.095	0.093	0.091	0.092	0.089	0.091	0.091	0.096	0.098	0.095	0.090	0.091
6	Paracatu	0.125	0.131	0.128	0.123	0.127	0.125	0.127	0.123	0.122	0.111	0.120	0.121
7		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Unaí	0.106	0.111	0.109	0.105	0.108	0.106	0.108	0.105	0.104	0.095	0.102	0.103
10		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Brasilândia	0.021	0.026	0.025	0.026	0.022	0.024	0.024	0.026	0.026	0.025	0.021	0.021
12		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	Santa Fé	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005	0.006	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006

Tabela A-5 Demandas da população urbana para o ano 2001

PC	CIDADE	DEMANDAS URBANAS POR PC PARA 2001 Demanda (m^3/s)											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	Guarda Mor	0.016	0.015	0.015	0.015	0.014	0.014	0.015	0.017	0.015	0.014	0.014	0.014
2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Laga. e Vaz.	0.081	0.088	0.083	0.087	0.086	0.086	0.087	0.094	0.096	0.092	0.079	0.081
5	João Pinheiro	0.095	0.093	0.091	0.092	0.089	0.091	0.091	0.096	0.098	0.095	0.090	0.091
6	Paracatu	0.147	0.155	0.152	0.146	0.150	0.147	0.150	0.146	0.144	0.131	0.142	0.143
7		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Unaí	0.120	0.126	0.124	0.119	0.122	0.120	0.122	0.119	0.118	0.107	0.115	0.117
10		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Brasilândia	0.032	0.040	0.037	0.039	0.033	0.035	0.035	0.039	0.039	0.037	0.032	0.031
12		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	Santa Fé	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005	0.006	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006

Tabela A-6 Demandas da população urbana para o ano 2006

PC	CIDADE	DEMANDAS URBANAS POR PC PARA 2006 Demanda (m³/s)											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	Guarda Mor	0.019	0.019	0.018	0.018	0.017	0.018	0.019	0.020	0.019	0.018	0.017	0.017
2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Laga. e Vaz.	0.102	0.110	0.104	0.108	0.107	0.107	0.108	0.117	0.120	0.115	0.099	0.101
5	João Pinheiro	0.095	0.093	0.091	0.092	0.089	0.091	0.091	0.096	0.098	0.095	0.090	0.091
6	Paracatu	0.207	0.217	0.213	0.205	0.211	0.207	0.211	0.205	0.203	0.184	0.199	0.201
7		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Unaí	0.147	0.154	0.151	0.145	0.149	0.147	0.149	0.145	0.144	0.131	0.141	0.142
10		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Brasilândia	0.036	0.046	0.043	0.045	0.038	0.041	0.041	0.045	0.045	0.042	0.036	0.036
12		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	Santa Fé	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005	0.006	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006

Tabela A-7 Demandas da população urbana para o ano 2016

PC	CIDADE	DEMANDAS URBANAS POR PC PARA 2016 Demanda (m³/s)											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	Guarda Mor	0.028	0.027	0.026	0.026	0.025	0.025	0.027	0.029	0.027	0.025	0.024	0.025
2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Laga. e Vaz.	0.146	0.157	0.149	0.155	0.153	0.153	0.155	0.167	0.171	0.164	0.141	0.144
5	João Pinheiro	0.128	0.125	0.123	0.124	0.120	0.123	0.123	0.129	0.131	0.128	0.121	0.123
6	Paracatu	0.293	0.308	0.302	0.291	0.299	0.293	0.299	0.291	0.288	0.261	0.282	0.285
7		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Unaí	0.197	0.207	0.203	0.195	0.201	0.197	0.201	0.195	0.193	0.176	0.189	0.191
10		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Brasilândia	0.046	0.058	0.054	0.057	0.048	0.051	0.051	0.057	0.057	0.054	0.046	0.045
12		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	Santa Fé	0.008	0.010	0.009	0.009	0.008	0.007	0.009	0.009	0.010	0.009	0.008	0.008

Tabela A-8 Demandas rurais difusas para o ano 2016

I T E N S	PC 01	PC 02	PC 03	PC 04	PC 05	PC 06	PC 07	PC 08	PC 09	PC 10	PC 11	PC 12	PC 13	PC 14	PC 15
Rebanho (cabeças)	24 936	56 302	88 413	125 153	82 073	53 128	255 590	121 769	94 604	198 463	40 876	48 025	157 785	57 786	24 586
População rural (habitantes)	2 222	3 425	3 831	8 269	7 974	2 560	13 659	66 404	7 272	16 618	3 612	3 976	13 052	7 934	4 928
Demanda do rebanho (m^3/s)	0.014	0.033	0.051	0.072	0.047	0.031	0.148	0.070	0.055	0.115	0.024	0.028	0.091	0.033	0.014
Demanda população rural (m^3/s)	0.002	0.003	0.003	0.007	0.006	0.002	0.011	0.054	0.006	0.013	0.003	0.003	0.011	0.006	0.004
Demanda total (m^3/s)	0.016	0.035	0.054	0.079	0.054	0.033	0.159	0.124	0.061	0.128	0.027	0.031	0.102	0.040	0.018

Tabela A-9 Dados econômicos das áreas sob irrigação existentes

ÁREAS SOB IRRIGAÇÃO EXISTENTES - Dados da Produção

Custeio e Custos de Prod.: 2 215.04 [$/Ha/ano]
Ben. Brutos da Venda: 8 458.65 [$/Ha/ano]

PC	Área máx (ha)	Custeios Anuais [$/ano]	Benef. Brutos Anuais [$/ano]	Benef. Líquidos Anuais [$/ano]
1	316.00	699 952.64	2 672 933.40	1 972 980.76
2	2 208.00	4 890 808.32	18 676 699.20	13 785 890.88
3	392.20	868 738.69	3 317 482.53	2 448 743.84
4	1 717.50	3 804 331.20	14 527 731.38	10 723 400.18
5	1 278.00	2 830 821.12	10 810 154.70	7 979 333.58
6	821.00	1 818 547.84	6 944 551.65	5 126 003.81
7	14 476.90	32 066 912.58	122 455 030.19	90 388 117.61
8	8 153.00	18 059 221.12	68 963 373.45	50 904 152.33
9	586.00	1 298 013.44	4 956 768.90	3 658 755.46
10	1 345.00	2 979 228.80	11 376 884.25	8 397 655.45
11	1 275.00	2 824 176.00	10 784 778.75	7 960 602.75
12	17.00	37 655.68	143 797.05	106 141.37
13	4 248.00	9 409 489.92	35 932 345.20	26 522 855.28
14	31.00	68 666.24	262 218.15	193 551.91
15	220.00	487 308.80	1 860 903.00	1 373 594.20

Tabela A-10 Dados econômicos dos projetos de irrigação por inundação

ÁREAS SOB IRRIGAÇÃO POR INUNDAÇÃO - Dados da Produção

Produtividade: 4.00 [tn/Ha/ano]
Invest.Inic.: 1 750.00 [$/Ha] <---------- INCLUI CUSTO DA TERRA
Op.e Manut.: 70.00 [$/Ha/ano]
Ben. da Venda: 330.00 [$/tn]

PC	Sub-Área	Área máx Projetada (ha)	Produção Total [tn/ano]	Invest. Inic. Total [$]	Benef. Brutos Anuais [$/ano]	Custos Operac. Anuais [$/ano]	Benef. Liq. Anuais [$/ano]
4	4.1	1 285.00	5 140.00	2 248 750.00	424 050.00	89 950.00	334 100.00
6	6.1	1 330.00	5 320.00	2 327 500.00	438 900.00	93 100.00	345 800.00
14	14.1	335.00	1 340.00	586 250.00	110 550.00	23 450.00	87 100.00
14	14.2	100.00	400.00	175 000.00	33 000.00	7 000.00	26 000.00
15	15.1	635.00	2 540.00	1 111 250.00	209 550.00	44 450.00	165 100.00
15	15.2	620.00	2 480.00	1 085 000.00	204 600.00	43 400.00	161 200.00
15	15.3	350.00	1 400.00	612 500.00	115 500.00	24 500.00	91 000.00
15	15.4	925.00	3 700.00	1 618 750.00	305 250.00	64 750.00	240 500.00
15	15.5	290.00	1 160.00	507 500.00	95 700.00	20 300.00	75 400.00
15	15.6	420.00	1 680.00	735 000.00	138 600.00	29 400.00	109 200.00

Tabela A-11 Dados econômicos dos projetos de irrigação por aspersão

ÁREAS SOB IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO - Dados da Produção

Invest.Inic.: 10 600.00 [$/Ha] <---------- INCLUI CUSTO DA TERRA
Custeio e Custos de Prod.: 2 276.31 [$/Ha/ano]
Ben. Brutos da Venda: 8 458.65 [$/Ha/ano]

PC	Sub-Área	Área máx (ha)	Invest. Inic. Total [$]	Custeios Anuais [$/ano]	Benef. Brutos Anuais [$/ano]	Benef. Líquidos Anuais [$/ano]
2	2.1	3 784.00	40 110 400.00	0.00	32 007 531.60	23 625 820.24
2	2.2	4 312.00	45 707 200.00	0.00	36 473 698.80	26 922 446.32
3	3.1	2 176.00	23 065 600.00	0.00	18 406 022.40	13 586 095.36
5	5.1	5 232.00	55 459 200.00	0.00	44 255 656.80	32 666 567.52
5	5.2	3 248.00	34 428 800.00	0.00	27 473 695.20	20 279 245.28
5	5.3	3 968.00	42 060 800.00	0.00	33 563 923.20	24 774 644.48
6	6.1	11 536.00	122 281 600.00	0.00	97 578 986.40	72 026 284.96
6	6.2	6 016.00	63 769 600.00	0.00	50 887 238.40	37 561 557.76
7	7.1	7 008.00	74 284 800.00	0.00	59 278 219.20	43 755 218.88
7	7.2	512.00	5 427 200.00	0.00	4 330 828.80	3 196 728.32
7	7.3	6 344.00	67 246 400.00	0.00	53 661 675.60	39 609 461.84
7	7.4	2 816.00	29 849 600.00	0.00	23 819 558.40	17 582 005.76
7	7.5	5 500.00	58 300 000.00	0.00	46 522 575.00	34 339 855.00
10	10.1	4 768.00	50 540 800.00	0.00	40 330 843.20	29 769 532.48
10	10.2	2 312.00	24 507 200.00	0.00	19 556 398.80	14 435 226.32
12	12.1	5 820.00	61 692 000.00	0.00	49 229 343.00	36 337 810.20
12	12.2	3 790.00	40 174 000.00	0.00	32 058 283.50	23 663 281.90
12	12.3	2 350.00	24 910 000.00	0.00	19 877 827.50	14 672 483.50

Tabela A-12 Vazões ecológicas por PC

Vazões Ecológicas por PC

PC	Vazão Ecológica (m3 / s)
1	1.09
2	1.47
3	0.85
4	3.77
5	2.15
6	7.54
7	11.06
8	3.37
9	3.89
10	5.33
11	16.95
12	18.20
13	23.81
14	25.09
15	26.14

Tabela A-13 Vazões da sub-bacia incremental do PC1

Vazões da Sub-Bacia Incremental do PC1 [em m3/s]

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	15.96	19.52	14.73	8.51	6.73	5.39	4.53	3.84	3.62	4.26	11.50	13.73
2	18.08	10.70	9.72	12.02	6.85	5.58	4.58	3.99	4.49	5.24	6.92	13.71
3	14.78	15.29	18.52	13.64	8.85	6.92	6.01	4.63	4.70	5.88	10.04	18.54
4	38.11	21.66	17.31	11.81	9.21	7.82	6.52	5.60	4.94	9.08	9.14	11.87
5	9.51	16.68	17.52	10.70	7.29	6.08	4.96	3.86	2.88	4.48	4.81	8.18
6	12.92	25.80	18.93	16.83	9.90	8.06	6.75	5.37	4.65	6.88	15.20	34.01
7	33.50	19.28	31.46	16.57	13.45	10.33	8.64	6.83	6.21	4.56	4.73	14.42
8	29.16	22.82	38.87	17.18	11.64	9.33	7.85	6.37	6.92	6.14	7.95	26.09
9	20.66	21.30	17.70	10.84	8.00	6.47	5.37	4.07	3.88	6.70	8.77	11.87
10	25.40	28.26	13.68	8.46	8.08	7.95	6.83	5.78	5.07	5.37	5.66	12.61
11	17.14	20.70	14.55	11.76	7.65	5.71	4.73	3.81	3.12	5.40	14.72	16.78
12	22.86	29.45	21.79	16.73	9.95	4.51	5.96	4.76	3.88	3.89	3.86	6.98
13	12.28	23.07	38.62	14.67	10.08	8.03	6.24	4.76	4.02	3.66	7.16	14.48
14	7.44	6.31	17.60	14.83	8.24	5.92	4.48	3.27	2.99	7.52	4.92	17.95
15	9.49	17.90	9.69	9.46	8.34	5.39	3.32	2.46	1.64	1.15	6.74	10.41
16	13.96	11.47	10.54	13.77	5.60	4.12	2.99	1.95	1.28	4.42	7.40	20.79
17	19.46	12.99	20.92	8.38	9.97	8.35	5.35	3.66	3.25	1.33	5.89	12.17
18	17.44	13.90	17.31	15.96	8.06	5.50	4.02	3.27	2.75	6.42	9.22	22.92
19	19.95	25.51	17.42	13.98	9.33	7.11	6.14	4.94	4.76	6.44	5.10	6.21
20	18.85	12.12	21.38	9.94	6.19	4.92	4.14	3.43	2.91	4.55	10.70	8.62
21	22.33	25.92	25.40	14.30	9.21	6.84	5.35	4.14	3.36	3.20	8.75	19.74
22	39.13	35.68	22.43	12.34	10.69	7.29	5.65	4.78	4.02	3.12	4.78	8.03
23	23.48	22.85	20.64	10.65	8.34	6.00	4.50	3.66	3.04	4.86	8.17	37.60
24	28.64	21.75	11.48	7.93	5.96	4.97	4.02	3.76	3.04	2.48	4.57	3.68
25	18.23	20.91	11.05	8.56	6.24	4.15	3.73	3.15	2.39	4.96	9.91	13.50
26	23.99	28.32	33.76	16.39	9.80	7.32	6.14	5.11	4.07	6.85	11.84	19.64
27	38.62	33.98	19.26	14.67	9.62	7.21	5.86	4.45	3.88	9.18	10.94	22.17
28	23.25	24.80	18.34	12.24	8.08	6.37	5.06	3.94	3.30	3.09	9.46	22.71
29	18.00	19.88	19.00	10.39	6.78	5.47	5.47	3.81	3.62	5.86	6.61	14.37
30	10.84	10.70	9.41	6.42	4.73	3.49	2.84	2.38	2.11	4.63	19.87	20.97
31	35.80	28.32	16.65	10.97	7.90	5.95	4.88	3.86	4.18	6.47	6.63	17.29
32	4.19	4.25	6.55	4.20	2.50	2.42	1.88	1.62	2.16	4.76	10.62	28.90
33	12.61	13.89	13.22	9.83	5.78	4.52	4.30	3.17	2.64	7.95	20.08	12.74
34	16.39	14.27	16.27	16.23	8.08	6.26	5.04	3.45	3.91	5.14	10.57	10.36
35	11.79	6.20	26.09	20.27	11.00	7.82	6.09	5.11	4.18	5.09	4.02	7.67
36	9.44	7.28	4.09	5.84	3.63	2.57	2.41	1.88	1.56	4.07	14.17	9.59
37	5.75	8.97	6.50	4.68	3.48	2.63	2.31	1.83	4.60	4.37	13.16	37.34
38	37.60	22.71	13.02	10.47	8.31	7.06	5.62	4.58	4.36	3.63	6.13	10.38
39	17.29	10.19	13.50	10.12	7.06	5.39	4.48	3.66	3.25	4.09	5.68	21.94
40	24.65	41.34	20.41	14.88	10.97	8.93	7.08	6.27	5.79	6.14	8.46	8.49
41	24.86	31.17	14.55	14.35	9.31	7.40	6.27	5.11	4.47	4.88	8.48	14.53
42	27.88	13.96	12.79	9.88	8.29	6.55	5.29	4.40	3.54	9.72	22.04	16.52
43	29.16	24.29	33.25	20.03	13.15	10.28	8.70	7.08	6.03	8.44	8.01	13.99
44	32.99	44.17	25.24	21.04	13.73	11.05	11.05	8.75	7.16	12.35	20.61	41.18
45	20.23	12.49	12.48	13.37	7.95	6.79	6.21	4.99	4.84	4.09	5.15	8.49
46	29.16	18.74	18.64	11.92	7.95	6.92	5.93	5.11	4.49	4.22	8.38	21.66
47	42.45	34.54	17.90	11.71	9.85	8.27	6.93	6.52	5.42	5.32	3.86	11.56
48	12.12	8.66	8.00	10.15	5.88	4.60	3.43	2.81	2.67	2.61	7.66	30.18
49	22.61	26.76	16.88	11.50	8.52	6.69	5.04	4.02	3.30	4.48	5.36	12.46
50	10.00	14.50	7.85	5.73	4.30	4.12	3.35	2.76	2.61	5.59	10.58	28.59
51	21.75	15.24	11.79	8.76	7.53	5.84	5.51	4.22	3.86	3.88	4.70	5.33
52	12.71	14.77	25.44	16.20	10.11	7.66	5.96	4.75	4.23	4.79	9.70	9.98
53	26.65	75.02	19.95	11.75	10.88	6.42	4.02	7.75	9.93	24.93	37.04	34.75
54	20.79	17.31	10.80	10.42	7.20	6.52	4.91	4.00	3.21	3.38	4.19	7.28
55	33.57	12.51	40.49	14.23	10.18	8.59	6.91	5.28	4.05	4.75	7.20	17.90

Tabela A-14 Vazões da sub-bacia incremental do PC2

Vazões da Sub-Bacia Incremental do PC2 [em m3/s]

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	36.16	44.23	33.38	19.28	15.24	12.21	10.26	8.69	8.20	9.64	26.05	31.12
2	40.97	24.25	22.02	27.24	15.53	12.63	10.37	9.04	10.18	11.88	15.69	31.06
3	33.49	34.64	41.95	30.90	20.05	15.69	13.62	10.49	10.66	13.33	22.75	42.01
4	86.34	49.08	39.23	26.76	20.86	17.72	14.78	12.69	11.20	20.57	20.72	26.89
5	21.56	37.78	39.69	24.25	16.51	13.77	11.24	8.75	6.53	10.14	10.90	18.54
6	29.26	58.44	42.88	38.14	22.42	18.26	15.30	12.17	10.54	15.59	34.43	77.07
7	75.91	43.69	71.27	37.54	30.48	23.41	19.59	15.47	14.07	10.32	10.71	32.68
8	66.06	51.71	88.08	38.92	26.36	21.14	17.79	14.43	15.69	13.91	18.02	59.10
9	46.82	48.25	40.10	24.55	18.14	14.67	12.17	9.21	8.80	15.18	19.88	26.89
10	57.54	64.03	31.00	19.16	18.31	18.02	15.47	13.10	11.50	12.17	12.81	28.57
11	38.82	46.90	32.97	26.65	17.33	12.93	10.72	8.63	7.07	12.23	33.35	38.01
12	51.80	66.72	49.37	37.90	22.54	10.22	13.50	10.78	8.80	8.81	8.74	15.82
13	27.81	52.28	87.50	33.23	22.83	18.20	14.14	10.78	9.10	8.29	16.23	32.80
14	16.86	14.31	39.87	33.59	18.66	13.41	10.14	7.42	6.77	17.04	11.14	40.68
15	21.50	40.54	21.96	21.44	18.89	12.21	7.53	5.56	3.72	2.61	15.27	23.58
16	31.64	25.98	23.87	31.20	12.69	9.34	6.78	4.42	2.91	10.02	16.77	47.11
17	44.10	29.42	47.40	18.98	22.60	18.92	12.11	8.29	7.36	3.01	13.35	27.58
18	39.52	31.50	39.23	36.17	18.25	12.45	9.10	7.42	6.23	14.54	20.90	51.92
19	45.20	57.80	39.46	31.67	21.15	16.11	13.91	11.18	10.78	14.60	11.56	14.08
20	42.71	27.46	48.44	22.51	14.02	11.14	9.39	7.76	6.59	10.31	24.25	19.53
21	50.59	58.72	57.54	32.39	20.86	15.51	12.11	9.39	7.60	7.24	19.82	44.73
22	88.66	80.83	50.82	27.96	24.22	16.53	12.81	10.84	9.10	7.07	10.84	18.19
23	53.19	51.77	46.76	24.13	18.89	13.59	10.20	8.29	6.89	11.01	18.50	85.18
24	64.90	49.27	26.02	17.96	13.50	11.26	9.10	8.52	6.89	5.61	10.36	8.34
25	41.31	47.39	25.03	19.40	14.14	9.40	8.46	7.13	5.42	11.24	22.45	30.59
26	54.35	64.15	76.49	37.12	22.19	16.59	13.91	11.59	9.22	15.53	26.82	44.50
27	87.50	76.98	43.63	33.23	21.79	16.35	13.27	10.08	8.80	20.80	24.79	50.24
28	52.67	56.20	41.55	27.72	18.31	14.43	11.47	8.92	7.48	7.01	21.44	51.46
29	40.79	45.03	43.05	23.53	15.36	12.39	12.39	8.63	8.20	13.27	14.97	32.57
30	24.57	24.25	21.32	14.55	10.72	7.90	6.43	5.38	4.79	10.49	45.03	47.51
31	81.12	64.15	37.72	24.85	17.91	13.47	11.07	8.75	9.46	14.66	15.03	39.17
32	9.50	9.62	14.83	9.52	5.66	5.48	4.26	3.67	4.89	10.78	24.07	65.48
33	28.57	31.47	29.96	22.27	13.10	10.24	9.73	7.19	5.99	18.02	45.51	28.86
34	37.14	32.33	36.85	36.76	18.31	14.19	11.42	7.82	8.86	11.65	23.95	23.47
35	26.71	14.05	59.10	45.93	24.92	17.72	13.79	11.59	9.46	11.53	9.10	17.38
36	21.38	16.49	9.27	13.23	8.23	5.83	5.46	4.27	3.53	9.21	32.09	21.73
37	13.04	20.32	14.72	10.60	7.88	5.96	5.24	4.14	10.42	9.91	29.82	84.60
38	85.18	51.45	29.49	23.71	18.83	15.99	12.74	10.37	9.88	8.23	13.89	23.53
39	39.17	23.10	30.59	22.93	15.99	12.21	10.14	8.29	7.36	9.27	12.87	49.72
40	55.86	93.66	46.24	33.71	24.86	20.24	16.05	14.20	13.11	13.91	19.16	19.24
41	56.32	70.61	32.97	32.51	21.09	16.77	14.20	11.59	10.12	11.07	19.22	32.91
42	63.16	31.63	28.97	22.39	18.77	14.85	11.99	9.97	8.02	22.02	49.94	37.43
43	66.06	55.04	75.33	45.39	29.78	23.29	19.70	16.05	13.65	19.12	18.14	31.70
44	74.75	100.08	57.19	47.66	31.12	25.03	25.03	19.82	16.23	27.99	46.70	93.29
45	45.83	28.31	28.28	30.30	18.02	15.39	14.08	11.30	10.96	9.27	11.68	19.24
46	66.06	42.47	42.24	27.00	18.02	15.69	13.44	11.59	10.18	9.56	18.98	49.08
47	96.19	78.27	40.56	26.53	22.31	18.74	15.70	14.78	12.27	12.05	8.74	26.19
48	27.47	19.63	18.14	22.99	13.33	10.42	7.76	6.37	6.05	5.91	17.36	68.38
49	51.22	60.64	38.24	26.05	19.30	15.15	11.42	9.10	7.48	10.14	12.15	28.22
50	22.66	32.85	17.79	12.99	9.73	9.34	7.59	6.26	5.91	12.67	23.97	64.78
51	49.27	34.54	26.70	19.85	17.06	13.23	12.49	9.57	8.75	8.78	10.65	12.07
52	28.80	33.46	57.64	36.70	22.90	17.35	13.50	10.77	9.58	10.85	21.98	22.61
53	60.38	169.98	45.20	26.63	24.64	14.54	9.10	17.56	22.50	56.47	83.93	78.72
54	47.10	39.22	24.46	23.61	16.31	14.77	11.12	9.06	7.27	7.65	9.50	16.49
55	76.06	28.34	91.73	32.25	23.06	19.46	15.66	11.97	9.18	10.76	16.32	40.55

Tabela A-15 Vazões da sub-bacia incremental do PC3

Vazões da Sub-Bacia Incremental do PC3 [em m3/s]

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	22.58	43.14	51.39	18.68	13.88	10.72	11.65	10.16	4.58	3.10	23.16	24.17
2	30.83	17.83	33.29	42.27	14.12	12.75	12.14	10.27	9.01	10.63	12.25	17.97
3	50.09	31.85	44.30	20.55	18.42	14.34	11.95	6.15	5.40	4.85	26.63	51.68
4	120.61	63.56	45.31	27.79	21.13	16.79	14.17	11.62	9.82	12.66	40.82	28.17
5	43.43	45.60	34.02	25.62	18.54	16.38	13.12	11.37	9.78	11.40	18.54	15.67
6	68.19	83.40	56.61	146.24	38.22	22.72	18.00	15.77	13.98	19.39	36.62	66.74
7	117.57	36.34	40.39	41.84	26.63	20.55	17.70	15.83	12.89	8.27	4.61	30.40
8	29.67	35.32	49.51	60.66	22.14	16.45	14.02	12.07	11.43	5.78	21.28	42.27
9	53.42	34.60	37.20	27.94	16.67	15.51	13.93	11.53	11.91	6.46	13.08	23.98
10	41.40	137.99	61.68	33.15	24.90	18.05	15.03	13.88	13.40	13.79	9.58	33.29
11	31.70	31.27	27.94	27.79	14.77	12.54	12.12	11.14	9.85	16.24	27.50	34.16
12	29.53	31.70	28.95	24.75	12.24	3.92	9.04	8.61	8.10	2.61	1.99	20.70
13	25.19	34.02	78.91	31.41	14.77	12.47	10.17	4.36	2.70	1.93	14.06	30.11
14	14.34	6.22	25.19	23.01	12.59	9.49	4.10	2.39	1.78	5.37	17.09	50.53
15	33.87	55.74	29.82	24.03	6.87	10.46	9.42	3.01	2.88	7.87	6.84	31.56
16	20.55	24.03	16.32	27.94	14.56	12.38	10.71	9.49	8.45	4.48	18.32	38.36
17	55.16	30.25	56.03	18.52	20.99	18.96	14.19	12.40	11.18	2.83	26.63	74.85
18	95.27	75.87	91.65	82.82	41.40	29.24	22.43	7.80	6.57	17.66	18.96	45.02
19	29.10	43.00	30.11	32.57	17.95	14.38	13.46	11.28	11.53	14.25	12.96	17.58
20	33.44	24.61	54.44	20.41	14.69	13.08	12.08	11.18	10.01	11.60	26.49	21.57
21	51.10	51.68	57.91	31.99	21.28	16.29	13.67	11.88	11.13	9.23	16.89	55.88
22	90.64	81.95	44.01	26.63	23.16	13.11	10.71	4.98	3.85	4.09	13.22	20.26
23	64.28	65.30	54.87	25.91	21.71	15.69	13.75	5.59	4.33	13.38	24.75	87.16
24	73.26	61.10	29.10	21.86	17.21	15.15	13.53	12.07	10.85	4.11	14.17	11.34
25	53.71	58.49	30.40	24.17	16.57	12.65	11.01	4.40	3.14	12.30	31.70	27.65
26	53.28	51.54	64.43	42.13	22.43	17.16	15.14	11.57	9.95	17.21	37.49	42.71
27	87.45	103.52	52.26	34.16	24.90	19.39	16.37	13.34	3.84	12.55	19.10	28.95
28	47.34	48.35	38.51	31.56	19.39	15.44	13.62	5.46	4.29	2.85	17.55	45.17
29	44.59	49.08	55.59	29.53	18.96	15.64	15.64	12.72	12.11	15.44	20.12	34.02
30	31.27	34.31	30.83	17.70	14.44	11.53	10.27	9.29	8.50	13.22	57.62	53.57
31	88.61	78.47	46.18	26.49	19.39	16.25	14.22	12.49	11.78	16.31	21.71	66.67
32	6.08	11.83	15.59	11.85	2.96	3.02	1.60	1.10	2.31	12.49	30.69	84.99
33	12.21	28.95	14.56	25.33	14.82	12.52	12.01	4.10	3.55	15.50	34.02	31.56
34	33.00	26.63	34.45	34.89	16.83	13.51	11.97	10.31	5.33	11.66	26.04	30.75
35	36.90	18.70	69.44	57.86	31.69	17.38	14.57	12.82	3.93	10.24	8.05	14.56
36	28.09	31.07	13.84	14.77	9.94	7.16	6.34	4.42	3.78	5.84	27.74	30.24
37	21.33	19.29	24.10	12.91	8.57	6.62	4.93	3.83	7.60	11.06	26.29	51.68
38	62.19	65.54	22.06	25.34	14.99	13.25	4.24	3.27	5.17	7.13	10.57	38.10
39	66.67	44.09	73.10	42.83	24.23	21.75	14.44	10.58	7.96	8.84	10.02	60.94
40	92.23	130.02	84.01	52.34	38.43	30.83	20.99	18.10	17.66	16.16	23.77	29.33
41	106.56	116.12	60.06	58.58	38.36	29.74	23.97	19.02	15.85	14.29	24.27	49.49
42	89.98	52.52	39.98	40.93	27.79	23.96	18.21	14.60	11.85	19.97	58.47	69.36
43	80.26	62.24	89.67	64.46	40.48	30.79	24.15	19.34	15.64	15.01	16.97	17.09
44	67.98	130.75	69.25	63.61	41.54	31.06	25.19	19.97	17.62	29.50	45.18	88.92
45	55.76	34.99	30.32	40.21	23.13	18.25	14.94	13.24	13.93	11.41	12.23	30.81
46	60.33	60.45	48.47	32.68	23.40	17.97	14.80	12.23	10.69	9.75	14.87	25.02
47	93.68	73.18	42.96	26.20	19.69	15.04	12.35	12.17	9.26	7.89	8.03	18.64
48	28.78	17.45	15.39	17.46	11.24	8.98	10.55	9.37	10.23	11.43	9.33	54.58
49	38.82	31.01	18.29	43.20	27.75	15.13	12.37	10.48	8.42	10.01	16.88	32.94
50	33.19	35.47	28.59	23.33	13.95	12.18	10.84	10.18	10.55	11.49	26.92	82.67
51	73.30	50.82	46.00	18.74	17.34	13.45	14.16	12.46	8.67	9.09	9.99	13.25
52	36.02	32.98	56.00	53.99	27.64	15.35	13.24	11.62	8.15	13.88	12.32	42.09
53	68.27	111.84	91.27	47.62	43.41	21.65	22.95	15.25	10.52	18.22	66.19	84.39
54	60.51	59.79	51.19	44.97	24.50	19.38	13.28	10.13	12.04	13.20	13.95	45.70
55	87.49	30.95	89.97	37.40	25.66	21.03	17.69	14.90	5.37	5.11	21.06	34.46

Tabela A-16 Vazões da sub-bacia incremental do PC4

Vazões da Sub-Bacia Incremental do PC4 [em m3/s]

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	40.67	79.06	74.12	33.40	20.18	13.51	17.36	12.31	9.40	6.36	41.80	41.96
2	56.05	28.55	38.19	43.21	20.71	18.87	16.00	13.18	9.89	13.92	16.75	31.99
3	50.72	58.33	75.63	36.97	28.98	23.24	16.11	12.62	11.09	9.95	47.17	100.16
4	285.29	117.19	83.27	50.36	37.99	26.34	20.80	15.41	11.61	17.61	39.15	57.81
5	51.17	81.32	62.09	50.85	33.51	26.52	18.59	14.89	11.52	14.95	23.86	32.15
6	89.66	137.37	103.25	109.81	63.70	41.05	32.12	24.20	20.40	34.80	71.91	133.14
7	218.88	66.43	73.83	76.63	48.06	36.84	31.48	24.32	18.10	8.33	9.46	56.91
8	54.06	64.39	91.17	106.53	39.77	25.64	20.49	16.36	15.01	11.85	35.88	77.53
9	92.38	63.24	68.09	50.61	26.10	23.65	20.31	15.22	16.02	13.26	18.50	49.21
10	75.74	170.46	95.85	57.09	41.96	32.12	22.63	22.19	19.03	17.06	19.65	47.10
11	57.63	56.86	50.61	52.25	22.08	17.37	16.48	14.40	11.67	22.34	49.98	62.22
12	53.55	57.76	52.40	44.75	16.72	8.05	9.95	9.04	7.96	5.36	4.09	23.44
13	46.04	62.09	148.84	61.77	22.08	17.21	12.34	8.94	5.54	3.95	20.58	54.52
14	21.16	12.77	44.11	39.51	17.46	10.90	8.42	4.91	3.64	11.03	24.33	87.85
15	40.61	66.68	38.94	38.37	14.09	12.96	10.75	6.19	5.91	7.20	14.03	38.64
16	34.30	43.79	25.36	56.46	19.77	14.51	12.17	8.47	7.47	9.19	31.35	71.98
17	110.34	54.06	110.49	31.20	34.27	29.32	18.11	13.90	11.01	5.81	31.51	87.55
18	107.02	88.74	119.55	99.20	43.02	27.61	21.28	16.00	13.49	23.55	33.38	89.36
19	52.38	81.78	54.52	65.04	28.79	21.26	19.30	14.70	15.35	19.62	16.07	27.93
20	61.56	44.45	93.44	34.00	19.77	16.07	13.48	11.29	10.08	13.77	46.17	33.96
21	101.59	91.97	119.40	53.50	32.15	21.99	16.30	12.56	10.68	10.78	29.79	110.65
22	184.16	167.12	79.70	40.40	33.96	18.56	13.48	10.23	7.90	8.39	16.22	32.91
23	124.38	129.02	106.12	41.18	32.60	20.28	16.30	11.47	8.89	16.91	39.93	179.63
24	172.08	115.82	49.51	31.20	24.45	19.50	15.85	13.39	11.17	8.44	18.45	15.40
25	111.40	120.21	59.02	35.10	20.08	13.06	10.96	9.03	6.44	18.72	57.89	49.31
26	103.53	99.85	127.11	84.85	38.29	27.14	22.85	15.31	11.88	30.59	57.09	93.59
27	188.69	233.97	114.42	68.48	42.42	26.98	20.08	14.69	7.88	25.76	29.79	55.59
28	89.21	93.11	72.28	59.43	31.85	21.68	16.00	11.20	8.80	5.86	27.96	88.37
29	69.89	81.65	95.10	42.89	22.79	16.38	16.38	11.70	10.86	19.93	23.86	52.83
30	53.74	55.15	46.04	22.20	16.91	12.04	9.69	7.49	6.07	19.32	113.55	109.59
31	178.26	178.82	89.51	51.47	31.85	25.11	19.93	15.85	15.38	24.76	23.40	162.64
32	12.48	12.48	21.43	14.19	6.07	6.21	3.28	2.26	4.74	16.60	47.57	185.67
33	25.06	54.86	29.89	37.44	18.87	14.15	13.51	8.41	7.28	23.10	65.04	45.59
34	62.04	53.48	67.17	64.11	23.40	16.38	13.22	9.78	7.88	26.87	57.71	54.79
35	49.81	26.74	125.74	110.12	36.53	22.15	15.85	12.53	8.06	16.15	12.63	29.89
36	58.57	48.80	19.32	32.76	16.60	11.31	9.98	6.99	5.08	21.28	41.43	36.46
37	26.64	30.17	36.14	17.21	12.74	9.30	8.68	5.37	19.14	17.24	49.62	116.70
38	121.60	154.25	35.84	28.23	29.28	18.09	8.69	6.72	7.33	16.88	30.57	69.83
39	162.64	66.77	134.04	80.17	41.18	38.99	26.11	17.06	12.85	14.72	21.06	99.47
40	160.01	242.33	86.95	53.97	36.68	30.26	21.13	16.00	17.78	14.20	30.57	42.57
41	181.14	182.34	65.36	67.85	35.62	27.92	22.34	16.30	12.45	14.20	34.32	72.15
42	149.29	56.15	49.06	55.53	29.13	25.74	17.66	13.69	9.33	23.85	84.54	97.97
43	129.66	73.20	145.21	72.37	42.27	30.88	24.45	19.17	15.43	27.93	34.47	30.94
44	158.50	259.04	153.97	102.95	60.38	46.01	36.38	27.93	23.86	67.62	114.80	187.18
45	96.00	56.96	49.21	57.40	31.40	24.33	20.08	17.36	24.96	20.08	21.10	66.42
46	132.01	124.84	102.91	54.52	36.75	29.01	24.30	19.02	18.62	19.62	34.00	65.24
47	188.98	151.24	75.47	46.01	34.42	26.05	20.83	20.83	14.05	15.40	15.75	43.93
48	51.47	33.09	33.66	32.77	19.17	15.24	12.50	10.69	12.47	14.70	18.68	110.80
49	87.25	81.81	61.74	46.01	25.36	18.56	14.46	11.76	9.51	15.40	19.65	50.84
50	42.72	66.68	55.85	23.71	16.45	15.19	11.96	9.86	7.97	15.13	47.78	165.70
51	111.34	60.33	49.36	25.75	23.22	14.74	14.15	10.62	9.65	13.87	13.57	22.58
52	77.02	83.36	121.15	98.43	37.35	24.36	17.63	13.99	11.92	20.34	32.56	58.83
53	182.70	295.13	140.23	70.71	46.27	32.25	24.02	18.24	17.24	30.47	120.95	174.19
54	82.99	90.48	57.48	42.59	27.30	24.03	18.06	14.46	13.36	16.00	20.39	87.49
55	175.31	49.68	185.48	64.13	37.76	26.54	20.81	15.82	11.02	10.50	27.25	59.36

Tabela A-17 Vazões da sub-bacia incremental do PC5

Vazões da Sub-Bacia Incremental do PC5 [em m3/s]

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	37.00	72.59	86.88	30.26	17.20	16.47	14.80	10.49	8.01	5.42	38.00	39.76
2	51.28	28.78	55.55	71.09	17.65	16.09	18.93	11.23	8.43	11.86	14.28	27.27
3	84.62	53.04	74.59	33.49	29.81	19.81	18.60	10.76	9.45	8.48	44.02	87.38
4	206.68	107.93	76.35	46.02	34.49	22.45	17.73	13.13	9.89	19.83	68.58	141.01
5	73.09	76.85	56.80	42.26	28.56	26.27	20.63	17.60	9.82	17.65	30.01	63.57
6	115.95	142.27	95.90	251.04	64.07	37.25	27.38	25.22	22.11	31.48	61.31	113.44
7	201.42	60.81	67.83	70.33	44.02	33.49	26.83	20.73	15.43	7.10	8.07	50.53
8	49.28	59.05	83.62	102.92	36.25	26.40	22.19	18.80	17.70	10.10	34.74	85.44
9	90.38	58.06	61.69	48.62	31.27	28.44	22.04	17.88	18.53	11.30	15.77	167.08
10	69.58	236.76	104.67	55.30	41.01	29.15	23.94	18.91	21.11	21.78	35.75	55.55
11	53.86	53.29	48.62	49.84	18.82	14.80	14.05	12.27	9.95	26.02	45.52	57.05
12	49.03	52.79	48.03	40.76	19.10	6.86	8.48	7.70	6.79	4.57	3.49	33.74
13	41.51	56.80	134.50	52.29	23.49	19.50	10.52	7.62	4.73	3.37	17.54	50.03
14	22.74	10.89	41.51	37.75	19.70	9.29	7.18	4.19	3.11	9.40	27.50	85.37
15	56.55	94.39	49.53	39.51	12.01	11.04	9.16	5.27	5.04	6.14	11.96	52.54
16	29.24	39.51	21.62	46.27	23.11	19.35	16.45	14.34	12.54	7.83	29.63	64.32
17	93.39	50.28	94.90	29.98	34.24	30.73	22.49	19.38	17.27	16.65	44.02	127.48
18	162.82	129.23	156.55	141.26	69.58	48.53	36.75	30.23	27.88	28.48	30.73	75.85
19	44.64	69.70	46.47	54.29	24.54	22.81	21.21	17.45	17.88	22.59	20.36	28.35
20	64.68	46.49	92.14	39.25	23.34	20.56	18.83	17.27	15.24	18.00	43.77	39.92
21	86.37	103.47	108.14	62.98	38.38	26.12	21.58	18.48	17.17	9.19	25.39	94.65
22	173.56	160.37	92.12	52.98	45.33	15.82	11.49	8.72	6.74	7.15	20.81	40.12
23	136.18	130.07	105.47	52.15	40.32	28.01	21.71	18.55	17.32	23.30	45.87	148.78
24	124.72	103.67	54.34	35.75	27.70	24.14	21.33	18.80	16.70	14.54	22.44	16.49
25	90.89	114.17	50.53	39.76	26.60	19.80	16.97	15.79	13.09	16.09	52.79	59.34
26	113.48	121.20	154.20	81.39	32.63	32.97	27.70	13.05	10.13	26.07	62.81	71.84
27	149.28	177.10	88.38	63.18	41.01	31.48	26.25	21.01	6.72	21.96	25.39	48.03
28	79.86	81.61	64.57	52.54	31.48	24.64	21.48	18.33	16.40	13.79	23.83	76.10
29	75.10	69.59	94.14	49.03	30.73	24.99	24.99	19.93	18.88	30.84	39.39	83.44
30	52.04	57.30	51.28	28.55	22.91	17.88	15.69	13.99	12.64	20.81	97.65	106.14
31	151.29	133.74	77.85	43.77	31.48	26.05	22.54	19.53	18.30	26.15	40.63	147.32
32	23.03	22.98	18.27	20.69	12.86	13.01	11.31	10.66	11.71	14.15	40.55	145.02
33	60.01	48.03	68.76	41.76	23.56	19.58	21.03	15.37	13.89	24.74	56.80	62.61
34	64.88	44.02	57.55	64.49	31.11	24.00	18.63	15.77	14.49	29.68	54.04	56.80
35	47.78	28.23	99.41	70.36	38.50	28.00	23.14	20.11	16.75	31.57	18.30	30.48
36	52.54	54.29	22.74	30.73	18.75	15.09	14.27	12.29	11.01	18.14	48.22	37.75
37	33.08	34.89	38.05	19.50	14.32	12.08	7.40	11.95	16.32	20.69	58.56	123.36
38	110.47	52.23	36.25	36.69	22.29	19.10	20.83	15.12	15.83	14.38	18.54	76.10
39	147.32	63.31	75.43	25.75	21.53	16.15	23.30	17.16	14.14	30.89	26.49	113.69
40	157.55	222.97	122.22	72.34	34.84	26.00	23.16	29.25	28.48	20.69	52.77	53.29
41	182.37	198.91	89.63	93.14	51.54	41.26	24.22	20.57	17.44	17.92	48.73	109.67
42	154.45	62.63	80.87	59.34	36.03	35.45	29.87	26.62	23.90	34.99	106.17	131.28
43	206.27	124.90	206.49	101.91	56.05	44.02	33.51	27.84	22.18	28.93	28.28	33.89
44	160.87	249.06	130.34	102.09	54.04	42.01	34.71	29.55	26.75	60.81	91.05	155.43
45	86.78	49.03	44.27	51.79	31.48	26.40	19.57	20.83	25.07	23.49	22.69	72.76
46	112.52	109.68	151.44	64.67	41.50	30.55	26.83	23.53	15.87	25.25	28.98	55.61
47	205.65	141.09	74.74	42.04	29.81	23.89	22.27	24.63	19.57	18.72	13.43	37.44
48	55.74	43.16	38.71	27.93	22.30	15.80	16.29	12.80	10.63	18.36	15.92	110.07
49	74.36	78.49	53.47	48.28	23.56	19.73	15.75	13.35	10.97	24.43	32.24	54.07
50	55.61	84.00	59.37	25.25	19.16	19.00	16.67	15.54	16.17	17.80	47.26	139.66
51	88.67	57.80	48.71	18.91	22.83	8.62	13.56	10.55	11.55	21.45	11.56	19.25
52	65.64	71.05	98.62	87.74	38.50	22.64	19.09	18.00	18.41	38.60	26.54	50.15
53	113.31	121.71	84.14	64.36	47.98	35.39	29.18	24.94	23.90	41.27	109.92	125.37
54	57.90	68.23	50.88	45.39	29.41	25.18	21.34	21.15	22.23	26.59	17.38	74.57
55	144.53	34.34	172.77	47.70	31.14	22.96	19.71	15.28	12.03	14.06	38.02	57.21

Tabela A-18 Vazões da sub-bacia incremental do PC6

Vazões da Sub-Bacia Incremental do PC6 [em m3/s]

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	6.02	34.09	86.89	0.70	7.51	0.07	0.28	4.58	3.50	2.37	6.70	11.62
2	17.34	6.17	66.53	102.75	7.70	3.50	2.32	2.88	3.68	3.24	6.23	1.65
3	127.89	17.94	47.09	3.08	8.35	1.87	1.12	4.69	4.12	3.70	13.73	35.25
4	14.16	61.93	36.74	13.22	3.99	9.80	7.74	5.73	4.32	1.73	103.53	282.02
5	92.49	42.20	21.49	0.98	1.16	2.82	2.13	0.63	4.28	0.65	19.40	102.83
6	142.09	123.41	54.42	504.88	39.95	5.99	1.48	4.41	2.86	1.51	14.96	45.88
7	133.96	24.64	30.52	32.29	11.91	3.34	1.22	9.05	6.73	3.10	3.52	13.34
8	15.41	23.55	42.34	68.69	5.59	4.99	2.90	1.22	0.68	4.41	9.05	18.36
9	60.11	21.89	26.37	11.10	0.68	0.51	2.83	0.76	1.09	4.93	6.88	377.51
10	31.86	338.40	95.74	27.21	15.36	0.00	3.77	1.71	2.66	8.71	45.15	48.35
11	17.54	16.67	11.10	5.53	8.22	6.46	6.13	5.36	4.34	10.59	12.50	21.98
12	15.70	18.35	15.05	8.93	1.37	2.99	3.70	3.36	2.96	1.99	0.46	31.42
13	8.54	21.49	76.80	8.67	3.55	1.57	4.59	3.33	2.06	1.47	7.66	16.72
14	3.18	4.75	12.49	10.62	1.67	4.06	3.13	1.83	1.36	4.10	10.95	54.36
15	64.59	124.54	47.00	18.20	5.24	4.82	4.00	2.30	2.20	3.57	5.22	56.61
16	12.76	7.15	9.43	1.51	7.14	6.65	2.73	3.98	0.62	3.42	2.99	23.81
17	32.45	18.41	36.63	4.36	10.84	10.43	8.65	7.95	7.56	16.29	45.69	180.87
18	246.80	183.68	202.50	198.31	98.63	67.14	44.82	36.12	34.19	15.47	2.15	22.80
19	19.48	30.42	20.28	7.98	10.71	3.21	2.42	0.55	0.51	5.87	6.46	6.16
20	10.69	2.80	63.20	2.38	7.81	7.06	7.17	6.99	3.40	4.11	15.02	9.78
21	29.33	35.85	18.22	18.85	13.01	11.60	9.65	7.99	7.92	2.62	0.51	35.58
22	46.66	34.60	19.25	18.59	15.37	6.90	5.01	3.81	2.94	3.12	7.49	2.73
23	24.02	27.66	26.99	12.82	13.15	9.02	10.02	10.44	12.03	4.70	13.65	56.67
24	0.14	52.00	15.63	21.60	11.30	10.77	9.82	7.28	5.51	4.64	7.81	0.49
25	22.80	14.53	9.03	25.63	16.94	10.95	6.77	7.19	4.37	0.72	18.09	1.03
26	13.27	1.05	1.43	6.46	14.24	0.25	0.27	5.70	4.42	0.41	49.69	2.19
27	39.69	30.46	9.14	3.09	14.44	17.45	15.89	11.22	1.20	9.58	15.81	8.54
28	35.10	32.39	23.93	14.19	7.52	7.82	9.97	10.32	9.45	7.66	10.40	25.58
29	60.29	72.80	65.80	37.44	23.76	19.69	19.69	14.10	12.67	5.20	20.92	13.75
30	24.31	37.16	37.77	18.46	12.39	7.25	5.53	4.93	3.78	1.17	38.63	10.24
31	66.96	13.36	28.49	4.20	7.52	5.01	5.10	4.43	1.72	6.04	31.63	51.81
32	10.20	3.34	15.69	2.24	4.46	4.62	5.51	5.62	3.71	8.27	44.37	33.11
33	74.86	10.02	71.26	26.85	10.33	8.05	4.41	7.17	5.05	5.23	15.48	32.36
34	6.52	0.86	13.38	15.69	7.45	5.98	7.09	5.57	5.64	12.29	22.19	36.39
35	19.58	8.21	19.01	4.93	18.96	16.90	15.22	12.93	12.00	0.67	7.32	8.53
36	15.95	41.13	6.94	3.43	0.57	0.43	0.67	0.85	0.92	1.24	15.24	16.86
37	0.77	2.04	6.20	1.57	1.28	1.65	4.89	0.48	7.12	0.42	2.19	19.51
38	38.41	23.01	7.63	46.70	0.46	7.98	11.43	11.38	8.51	6.28	8.87	9.40
39	51.81	18.44	8.05	13.65	16.45	3.87	0.42	6.64	10.03	21.78	23.64	115.32
40	122.94	150.55	166.37	84.53	69.31	66.25	48.71	33.20	27.24	32.02	52.84	50.85
41	154.01	201.02	113.00	118.40	59.77	44.77	49.20	42.16	38.76	27.80	47.25	132.09
42	184.92	135.78	75.02	92.35	46.52	37.04	30.79	25.04	22.97	34.34	123.31	139.82
43	82.14	113.73	134.19	135.40	59.71	46.96	39.59	34.05	31.54	3.58	8.38	3.98
44	14.70	95.36	48.48	35.84	16.75	10.09	11.06	9.76	9.65	22.20	38.69	56.63
45	24.32	8.74	10.32	16.08	8.45	7.65	12.26	5.25	2.41	0.64	3.15	22.71
46	49.11	51.57	7.57	2.08	3.50	2.55	0.68	3.56	6.93	2.91	12.65	24.27
47	25.73	34.29	15.25	7.07	7.96	8.65	10.22	5.97	7.96	2.96	6.53	8.93
48	19.23	3.31	2.60	12.19	4.48	4.00	1.11	0.20	4.64	0.64	6.95	4.84
49	15.60	4.57	17.55	15.82	18.19	16.70	14.34	12.15	9.62	0.65	6.15	8.18
50	12.23	11.93	15.66	15.37	8.87	4.20	3.83	4.74	10.46	0.73	11.24	63.22
51	62.13	28.09	29.57	28.04	19.60	24.71	20.37	16.18	16.16	1.15	9.75	15.37
52	28.65	19.24	26.00	39.85	17.28	11.81	9.65	8.36	3.97	0.27	4.79	21.89
53	9.75	90.22	95.61	26.52	27.41	18.41	16.62	15.75	16.13	5.00	37.66	65.18
54	182.95	133.17	30.86	32.83	27.24	20.82	16.67	15.86	14.33	4.63	9.41	32.55
55	72.03	48.11	40.17	49.76	39.06	38.19	30.05	25.41	22.08	18.08	26.13	32.62

Tabela A-19 Vazões da sub-bacia incremental do PC7

Vazões da Sub-Bacia Incremental do PC7 [em m3/s]

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	55.75	118.57	143.79	43.84	29.16	19.51	22.34	17.79	13.58	9.19	57.52	60.61
2	80.96	41.23	88.48	115.92	29.91	25.70	23.85	18.14	14.29	19.25	24.20	41.68
3	139.81	84.06	122.11	49.55	43.05	30.57	23.27	18.23	16.02	14.38	68.13	144.67
4	355.27	180.95	125.21	71.67	51.32	38.05	30.04	22.25	16.77	25.44	111.49	239.35
5	119.45	126.09	90.70	65.04	43.40	36.81	26.86	21.50	16.64	21.59	43.40	102.64
6	195.11	241.56	159.72	433.58	103.53	56.19	41.76	34.95	29.47	46.01	98.66	190.68
7	345.98	97.78	110.16	114.59	68.13	49.55	40.84	35.13	26.15	12.03	13.67	79.64
8	77.42	94.68	138.04	172.10	54.42	37.03	29.60	23.63	21.68	17.12	51.76	115.92
9	149.98	92.47	100.43	72.12	37.69	34.16	29.33	21.99	23.14	19.16	26.72	285.36
10	113.26	408.36	175.20	88.04	62.82	41.90	32.70	29.16	27.70	28.89	53.53	88.48
11	83.62	82.29	72.12	71.67	31.90	25.09	23.80	20.79	16.86	36.37	70.79	91.14
12	76.98	83.62	75.21	62.38	24.16	11.63	14.38	13.05	11.50	7.74	5.44	49.99
13	63.71	90.70	227.85	82.73	31.90	24.86	17.83	12.92	8.01	5.71	29.73	78.75
14	30.57	18.45	63.71	57.07	25.22	15.75	12.17	7.09	5.26	15.93	38.98	141.13
15	90.25	157.06	77.87	60.17	20.35	18.71	15.53	8.94	8.54	10.80	20.26	83.18
16	49.55	60.17	36.63	72.12	31.24	24.60	19.47	15.75	12.56	13.27	42.74	103.97
17	155.29	79.19	157.95	43.36	50.88	44.68	30.13	24.64	20.93	19.82	68.13	215.46
18	277.84	218.56	266.78	239.79	113.26	76.10	55.30	43.80	39.64	40.70	44.68	124.32
19	75.65	118.13	78.75	86.27	41.59	30.70	27.87	21.24	21.99	30.31	26.37	40.48
20	88.93	61.94	153.08	49.11	31.63	26.72	23.67	20.93	17.34	22.21	67.69	52.65
21	142.90	144.67	163.70	84.50	51.76	36.54	28.54	23.05	20.75	14.95	38.36	157.50
22	263.68	237.14	121.22	68.13	57.52	26.81	19.47	14.78	11.41	12.12	27.16	48.67
23	183.16	186.26	154.41	65.92	53.09	34.69	28.76	23.18	21.02	27.65	62.38	253.07
24	210.59	173.43	75.65	53.53	39.33	33.05	28.09	23.63	19.91	16.10	30.04	21.41
25	150.87	165.47	79.64	60.61	37.38	25.40	20.40	18.32	13.54	24.33	83.62	71.23
26	149.54	144.23	183.61	115.47	55.30	39.20	33.00	22.12	17.17	39.33	101.32	117.24
27	253.95	303.06	146.44	91.14	62.82	46.01	36.77	27.52	10.62	37.21	45.13	75.21
28	131.40	134.50	104.41	83.18	46.01	33.93	28.36	22.78	19.38	14.78	40.39	124.76
29	122.99	136.71	156.62	76.98	44.68	34.55	34.55	25.62	23.76	33.93	48.22	90.70
30	82.29	91.58	80.96	40.84	30.88	21.99	18.14	15.13	12.74	27.16	162.81	150.42
31	257.49	226.52	127.86	67.69	46.01	36.41	30.22	24.91	22.74	36.59	53.09	234.93
32	25.97	22.92	34.38	22.96	13.14	13.41	10.40	9.25	11.10	24.91	80.52	246.43
33	82.29	75.21	88.93	64.15	32.03	25.00	23.45	17.56	14.95	34.11	90.70	83.18
34	87.60	68.13	92.02	93.35	38.18	28.05	23.32	18.27	16.02	42.83	85.83	90.70
35	74.77	40.26	165.91	132.73	58.40	39.86	31.28	25.93	20.00	28.85	22.74	44.24
36	83.18	86.27	30.57	44.68	23.54	17.08	15.62	12.12	9.87	27.78	65.48	57.07
37	39.02	43.58	52.21	24.86	18.40	14.47	13.27	10.35	27.65	24.91	71.67	168.56
38	175.64	172.55	51.76	62.38	36.50	28.32	22.12	17.79	17.39	24.38	39.73	100.87
39	234.93	96.45	157.95	89.81	53.98	44.07	34.07	25.93	22.30	36.59	41.19	191.13
40	268.55	384.02	206.17	118.13	79.19	68.13	50.88	42.07	40.70	36.15	74.33	84.50
41	312.35	341.55	148.65	154.85	81.41	63.27	52.65	42.47	36.10	33.05	73.44	172.10
42	284.92	138.48	113.26	117.24	62.82	55.30	42.78	35.22	29.16	52.21	177.85	208.38
43	244.66	171.66	281.82	170.33	89.37	68.13	54.42	44.68	37.69	39.60	47.34	44.68
44	220.77	386.24	218.12	153.96	85.83	64.59	53.09	42.61	37.65	97.78	161.04	262.80
45	135.82	76.98	68.58	81.85	46.01	37.03	32.21	27.21	34.69	28.80	30.48	102.20
46	190.68	184.05	163.25	78.75	53.09	40.84	34.11	29.16	26.90	30.17	49.11	94.24
47	272.98	214.13	107.95	63.27	47.78	37.92	33.18	32.34	24.86	23.49	23.05	60.17
48	79.64	50.44	48.67	47.34	29.16	22.52	18.98	15.40	18.01	21.68	26.99	150.87
49	118.57	110.61	87.16	69.90	41.37	32.87	26.37	21.90	17.70	25.00	34.73	73.44
50	68.58	102.64	83.62	39.38	27.25	23.98	19.86	17.87	18.98	21.86	69.02	239.35
51	167.24	92.47	79.19	44.02	39.73	28.05	27.78	21.41	20.97	22.52	21.68	35.70
52	111.25	115.20	164.51	145.31	58.40	37.23	28.63	24.29	20.67	35.57	43.26	84.98
53	219.38	360.21	206.13	104.04	75.13	52.91	41.95	34.46	33.28	47.98	174.49	241.56
54	181.48	170.79	88.06	73.06	49.72	42.04	33.12	29.43	28.24	28.26	30.26	126.38
55	254.08	81.33	261.66	101.02	65.15	51.01	40.81	32.29	25.04	23.70	52.98	93.34

Tabela A-20 Vazões da sub-bacia incremental do PC8

Vazões da Sub-Bacia Incremental do PC8 [em m3/s]

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	48.79	86.60	101.08	40.82	28.28	19.54	22.16	17.98	14.00	7.10	49.96	52.00
2	64.54	38.97	68.91	85.04	28.96	25.17	23.52	18.27	14.68	19.24	23.81	39.27
3	99.14	66.58	88.74	44.81	40.24	29.64	22.94	18.37	16.33	14.77	56.66	102.05
4	210.91	122.46	90.68	58.90	45.97	36.25	29.06	22.06	17.01	24.98	82.32	153.56
5	87.08	91.17	70.37	54.91	40.43	35.09	26.24	21.38	16.81	21.48	40.53	77.17
6	130.24	154.54	110.80	247.84	77.75	49.28	39.27	33.53	28.57	42.38	74.84	127.32
7	206.05	74.45	81.54	84.17	56.66	44.71	38.68	33.63	25.56	12.54	14.09	63.76
8	62.59	72.60	98.16	117.60	47.92	35.38	28.77	23.33	21.48	17.30	46.26	85.14
9	104.97	71.44	76.00	59.09	35.96	32.75	28.48	21.77	22.84	19.24	26.14	176.89
10	83.39	236.18	118.57	68.81	53.46	39.46	31.49	28.28	27.02	28.09	47.53	68.91
11	66.19	65.31	59.09	59.00	30.81	24.69	23.52	20.70	17.11	34.79	58.51	70.46
12	62.11	66.19	61.04	53.26	23.81	13.90	14.77	13.41	11.95	8.30	6.00	44.90
13	53.84	70.46	146.76	65.70	30.81	24.40	17.98	13.32	9.82	6.29	28.87	63.17
14	29.55	18.56	54.04	49.86	24.69	16.04	12.63	8.81	5.81	16.23	37.03	100.11
15	69.98	108.86	62.59	51.71	20.31	18.76	15.84	9.50	9.12	11.37	20.22	65.90
16	44.71	51.61	34.99	59.29	30.23	17.59	15.45	10.50	7.10	13.41	49.76	104.97
17	100.11	64.73	99.14	49.96	45.68	41.40	28.96	21.97	16.72	16.23	90.19	105.94
18	111.77	136.07	228.40	132.18	77.85	61.43	52.68	45.10	39.46	34.41	52.68	102.05
19	78.14	112.74	79.02	93.21	59.68	49.57	44.32	35.86	32.75	39.95	30.42	55.98
20	124.41	62.98	70.76	46.56	35.67	30.52	25.17	19.24	15.55	21.29	55.89	47.14
21	69.49	64.24	94.08	55.01	43.15	33.43	26.73	21.29	16.62	18.47	44.51	70.95
22	104.97	92.82	70.66	45.39	45.29	27.51	22.16	17.98	14.38	15.94	17.69	52.48
23	73.67	101.08	94.47	49.57	41.79	30.42	25.17	20.12	18.76	35.77	44.71	127.32
24	91.26	91.56	52.10	44.42	34.50	28.67	23.62	18.86	14.29	11.37	25.17	22.94
25	100.11	80.48	44.51	40.43	25.56	19.15	17.30	13.02	11.37	36.16	67.35	70.37
26	73.87	57.44	76.10	58.12	39.56	30.62	26.44	21.38	17.79	30.91	53.16	49.57
27	100.11	131.21	81.25	65.41	52.58	40.82	33.43	26.24	21.19	28.48	36.06	69.98
28	56.76	70.27	83.78	62.59	44.13	33.14	26.34	20.22	17.20	15.75	40.24	77.36
29	45.00	107.88	89.61	61.13	43.35	35.57	35.57	23.71	20.70	20.41	48.98	67.45
30	42.08	67.26	69.88	39.85	32.85	23.23	18.86	14.77	12.25	18.86	79.21	114.69
31	143.84	83.00	105.94	69.69	49.86	40.33	34.11	27.70	27.99	38.88	50.25	103.02
32	28.77	26.63	32.85	23.42	16.04	12.83	10.59	9.70	9.06	24.01	61.33	135.10
33	53.84	50.64	50.25	61.52	35.96	27.89	23.33	17.49	14.19	23.91	77.07	102.05
34	69.78	58.22	79.70	64.54	40.43	32.27	26.24	20.22	18.47	51.03	103.02	85.43
35	63.86	46.26	123.43	95.15	67.26	52.58	42.28	36.93	28.38	32.07	30.32	36.25
36	65.51	42.57	34.41	69.69	34.79	26.34	21.97	16.91	13.32	18.37	32.17	24.69
37	27.12	44.32	51.41	31.10	23.52	17.69	14.00	11.76	15.26	14.58	34.50	82.61
38	91.85	86.40	52.87	58.90	42.67	35.28	27.99	21.67	19.24	23.91	24.98	49.86
39	103.02	86.02	111.77	104.00	66.97	59.19	47.53	38.20	31.88	37.22	38.88	66.19
40	176.89	204.10	124.41	104.00	74.84	65.22	56.18	46.46	43.15	39.46	58.51	55.59
41	134.13	197.30	104.00	106.91	78.63	65.02	55.79	46.65	42.67	34.02	46.36	80.38
42	88.74	61.91	79.79	99.14	63.08	53.55	42.08	34.99	27.89	40.92	93.60	84.36
43	166.20	105.94	170.09	135.10	95.54	78.82	64.15	56.57	49.28	50.05	43.35	52.87
44	147.73	169.11	131.21	104.00	80.57	66.67	56.18	39.95	35.38	44.03	83.29	93.98
45	82.81	60.16	64.05	121.49	52.19	39.75	33.24	31.39	34.21	34.89	30.52	67.06
46	76.78	58.80	94.47	80.86	56.37	43.64	35.38	29.35	24.98	31.39	44.81	73.87
47	109.83	79.79	65.02	48.40	42.38	33.43	28.57	25.66	21.29	23.71	20.22	28.57
48	34.89	47.04	58.22	47.53	35.67	24.01	24.78	20.90	17.49	19.63	32.36	84.65
49	74.94	94.76	112.74	86.99	44.81	44.32	42.18	35.28	28.57	37.42	49.57	77.56
50	72.51	71.63	70.37	46.56	35.09	31.78	26.05	21.58	19.83	22.55	70.56	252.70
51	115.66	91.85	88.25	67.84	67.06	49.96	49.47	39.07	39.36	31.98	34.11	33.14
52	43.52	75.23	119.83	110.03	67.19	54.38	43.77	33.63	27.66	31.18	71.39	159.88
53	217.49	299.08	121.52	104.84	80.59	63.12	53.65	46.85	44.12	49.96	101.82	106.91
54	86.86	122.89	89.83	81.96	55.78	46.76	37.56	31.34	27.74	26.92	26.70	68.24
55	75.53	52.09	158.02	86.82	51.73	52.00	44.53	35.46	27.61	22.61	38.13	69.59

Tabela A-21 Vazões da sub-bacia incremental do PC9

Vazões da Sub-Bacia Incremental do PC9 [em m3/s]

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	13.56	41.18	49.20	9.12	5.97	4.03	5.49	3.17	0.97	1.48	14.17	15.30
2	28.96	8.16	31.38	40.32	6.04	7.16	6.24	3.34	1.34	3.87	6.40	8.34
3	48.13	30.09	42.37	11.20	8.86	6.11	5.92	3.39	2.26	1.40	18.29	49.74
4	110.04	61.05	43.44	19.70	11.99	7.52	6.13	5.43	2.64	7.05	38.81	78.28
5	41.45	43.71	32.19	17.15	9.04	7.38	7.75	5.06	2.53	5.11	8.94	35.96
6	65.36	78.82	54.59	130.50	36.28	13.73	8.43	6.98	5.96	9.99	34.67	63.74
7	107.35	34.45	38.38	39.84	18.20	11.20	8.08	7.07	7.37	2.58	1.02	28.53
8	27.89	33.43	47.59	58.36	12.94	7.37	5.95	6.13	5.11	2.80	11.98	40.38
9	51.36	32.78	35.31	19.87	7.44	6.82	5.97	5.27	5.87	3.87	5.41	91.20
10	39.41	124.04	58.90	31.33	16.18	8.42	6.59	5.97	5.65	5.89	12.68	31.38
11	29.88	29.39	19.78	19.79	6.43	6.89	6.24	4.68	2.69	7.21	19.43	32.25
12	27.62	29.88	21.01	16.09	6.40	0.91	1.40	0.64	2.51	1.69	1.26	11.29
13	16.54	32.25	74.51	29.61	6.34	6.73	3.17	0.59	2.13	1.31	6.04	28.21
14	6.20	3.50	16.62	14.08	6.89	2.10	2.67	1.84	1.21	2.20	7.77	48.67
15	31.98	53.51	27.89	15.22	4.47	3.60	1.99	1.99	1.90	2.35	4.41	29.72
16	11.20	15.13	7.29	19.96	6.27	2.96	1.77	2.20	1.48	0.64	14.08	51.36
17	48.67	29.07	48.13	14.17	11.73	9.47	6.04	5.38	2.47	2.20	19.02	51.90
18	55.13	68.59	119.73	66.43	36.34	21.28	15.74	11.37	8.52	7.22	15.84	49.74
19	36.50	55.67	36.98	44.84	20.13	13.90	11.03	7.45	6.92	8.69	6.36	17.85
20	62.13	28.10	32.41	12.16	7.45	6.45	7.16	3.87	1.83	5.00	17.76	12.60
21	31.71	28.80	45.33	17.14	10.33	6.98	5.57	5.00	2.42	3.44	11.02	32.52
22	51.36	44.63	32.35	11.55	11.55	5.72	5.49	3.17	1.18	2.04	3.01	15.66
23	34.02	49.20	45.54	13.90	9.73	6.36	7.16	4.36	3.60	7.45	11.11	63.74
24	43.77	43.93	15.39	10.94	7.13	6.05	6.30	3.66	1.13	2.35	7.16	5.92
25	48.67	37.79	11.12	8.01	5.33	4.00	4.18	1.75	0.48	4.42	9.27	27.64
26	29.74	18.82	35.37	19.07	8.51	6.35	5.49	5.06	3.07	6.43	16.10	14.00
27	50.17	79.74	35.43	23.92	15.65	9.21	5.65	6.43	4.39	5.87	7.53	27.10
28	18.29	27.74	37.65	18.38	9.93	8.63	7.24	4.24	3.61	3.30	8.86	34.76
29	11.38	57.33	45.89	16.63	10.51	7.46	7.46	4.94	4.31	5.76	4.12	15.82
30	9.64	25.25	25.95	11.30	6.82	4.87	3.92	3.15	2.60	4.01	30.76	64.65
31	85.67	39.74	64.14	28.32	17.87	8.86	7.14	5.81	5.89	8.93	14.44	63.24
32	7.67	6.28	6.56	6.21	4.40	3.29	1.92	0.44	1.86	5.02	25.18	82.39
33	11.11	12.02	14.25	26.89	7.44	5.80	4.96	3.69	2.98	5.45	32.36	59.28
34	21.76	20.30	32.23	22.46	12.08	6.66	5.40	4.24	5.25	16.71	50.97	30.86
35	19.42	14.58	68.57	35.94	11.17	6.68	5.32	4.91	1.30	8.80	9.95	17.14
36	20.07	11.06	2.65	21.81	7.21	5.49	4.64	3.53	2.83	3.85	15.63	7.65
37	5.65	8.65	11.49	6.52	4.95	3.69	2.99	2.14	1.26	5.64	17.19	69.71
38	47.05	26.80	9.24	3.10	3.35	1.87	1.22	1.29	2.72	7.84	18.40	68.88
39	63.24	67.45	99.71	52.82	8.42	9.60	6.52	5.30	3.68	10.55	11.13	27.25
40	149.81	106.15	3.84	26.52	9.76	11.19	4.68	5.25	4.45	4.13	19.92	15.81
41	94.95	121.93	29.48	38.70	13.43	8.81	8.39	5.66	9.29	6.31	23.60	25.88
42	66.38	6.35	36.88	40.84	10.20	10.29	9.81	7.57	6.22	16.07	75.22	59.39
43	118.50	19.56	89.58	44.16	19.25	14.50	7.91	5.68	3.27	9.11	6.77	12.68
44	75.05	132.29	57.36	22.94	11.15	3.15	1.88	8.78	7.37	14.08	44.30	89.60
45	28.62	20.49	18.42	64.78	17.19	8.60	6.99	6.60	7.96	8.15	6.98	14.31
46	29.67	12.65	77.46	19.95	10.27	6.86	10.33	6.12	6.39	6.60	14.10	23.54
47	67.87	38.35	18.78	4.71	8.36	2.78	2.79	7.22	1.68	1.49	6.39	26.49
48	19.71	15.11	28.30	4.09	7.45	5.02	5.18	1.13	3.13	9.68	21.18	94.56
49	32.41	46.22	67.78	30.15	11.29	10.94	2.16	2.99	1.03	4.85	18.06	14.29
50	17.08	22.18	5.89	1.94	2.72	1.45	3.08	1.95	4.20	5.70	32.30	133.19
51	55.03	19.23	10.69	3.38	3.78	4.84	1.73	1.43	1.94	1.12	5.74	9.14
52	15.41	2.56	112.65	44.49	11.24	2.25	2.07	4.32	8.43	5.02	25.21	22.11
53	18.45	79.02	59.71	51.24	3.44	7.16	6.43	2.89	1.81	11.95	49.22	57.40
54	21.66	68.82	16.61	15.79	7.88	6.36	3.34	3.95	2.82	3.75	11.07	25.93
55	51.66	15.25	81.05	23.11	15.20	6.18	4.26	2.06	1.28	2.71	16.85	26.60

Tabela A-22 Vazões da sub-bacia incremental do PC10

Vazões da Sub-Bacia Incremental do PC10 [em m3/s]

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	33.15	75.22	95.72	25.16	15.64	9.83	10.65	9.35	8.34	2.62	34.27	36.70
2	44.50	23.46	50.71	72.64	16.20	11.67	11.14	9.49	8.48	9.88	11.28	23.80
3	92.74	47.33	77.90	29.09	24.70	16.65	11.04	9.44	8.91	8.43	42.05	96.20
4	288.05	126.49	80.88	44.41	30.23	21.42	16.21	10.60	9.06	11.57	69.86	178.16
5	75.46	81.12	52.44	39.94	24.93	20.63	12.01	10.46	9.16	10.41	24.93	62.87
6	138.41	180.65	108.61	364.66	63.96	33.59	23.80	19.39	15.96	26.73	59.49	135.94
7	279.60	59.10	68.07	71.99	41.14	28.99	23.14	19.50	11.87	5.48	8.29	43.71
8	42.52	55.97	91.25	119.04	32.14	20.75	15.98	10.94	10.51	9.20	30.55	73.48
9	100.67	54.78	60.68	44.03	21.20	18.92	15.76	10.66	10.89	9.68	14.25	220.91
10	71.20	339.78	122.53	50.86	38.37	23.92	18.02	15.64	14.83	15.52	31.79	50.71
11	46.94	46.29	44.13	44.22	17.46	11.42	11.04	10.22	9.11	20.30	44.06	53.29
12	42.28	46.94	46.95	37.65	11.18	8.39	8.43	8.34	5.23	3.21	2.07	29.21
13	38.62	53.29	168.73	46.69	17.45	11.48	9.45	8.20	3.95	2.21	16.09	43.62
14	16.65	9.64	38.34	34.26	11.62	8.87	5.59	3.46	1.99	8.86	22.00	93.23
15	53.04	106.63	42.52	36.07	10.12	9.64	8.77	3.82	3.69	4.78	10.07	47.39
16	28.99	36.26	20.52	44.75	17.00	9.35	8.37	4.41	2.61	8.14	34.15	102.67
17	94.23	45.20	92.74	34.27	29.99	25.83	16.20	10.55	9.11	8.86	65.79	108.16
18	155.10	149.34	322.87	137.39	46.81	32.30	24.38	19.33	17.42	20.07	24.69	59.20
19	39.36	73.59	40.00	50.95	23.19	17.43	16.95	13.39	12.53	12.17	12.02	18.47
20	68.47	27.92	37.84	18.69	12.98	11.64	6.27	7.98	8.22	10.31	40.35	31.46
21	69.80	45.96	117.59	36.85	21.61	16.98	13.80	9.71	9.46	11.89	33.46	71.53
22	131.67	78.55	36.99	22.66	16.25	15.17	10.65	9.45	8.43	6.92	7.60	27.76
23	74.31	88.72	67.99	17.53	15.28	8.22	3.47	3.72	4.14	10.78	16.58	168.94
24	95.97	84.52	23.11	14.15	20.17	15.98	11.19	9.69	6.99	4.88	11.57	11.04
25	94.23	66.73	28.87	24.26	13.90	9.65	7.82	6.83	6.75	24.43	70.37	56.99
26	62.39	42.74	60.53	42.81	24.03	17.34	14.48	9.46	9.25	17.46	53.74	35.53
27	127.72	156.05	64.32	34.67	23.77	18.77	16.72	12.63	11.02	18.05	20.71	44.92
28	41.95	72.99	62.57	41.03	17.84	10.73	8.03	8.44	7.88	8.06	36.40	144.87
29	82.62	101.78	83.50	41.23	22.24	17.87	17.87	13.24	14.58	13.43	31.09	73.73
30	26.27	56.50	38.17	15.46	15.83	13.10	12.22	10.08	9.06	14.23	80.03	103.66
31	186.48	94.26	59.92	41.00	17.77	17.71	14.04	12.59	11.32	31.00	54.31	94.73
32	16.06	17.39	23.69	16.26	8.27	6.98	6.68	6.96	5.48	17.37	50.49	135.51
33	44.04	35.44	40.50	44.59	16.30	11.50	9.72	7.41	6.63	14.04	76.57	83.67
34	93.46	48.48	96.08	50.00	16.69	14.68	12.66	9.54	4.88	48.27	128.00	82.71
35	58.73	26.16	164.99	94.91	34.57	21.44	17.60	14.16	12.42	15.62	20.83	30.21
36	60.42	31.77	15.84	41.50	14.80	10.97	8.80	7.16	6.75	13.08	33.80	19.47
37	11.94	22.63	41.09	12.48	8.23	6.82	5.31	4.40	10.19	26.79	74.31	91.68
38	66.10	48.80	8.79	28.90	12.18	8.85	6.18	5.04	3.73	12.65	24.23	52.26
39	94.73	113.53	153.52	85.18	35.62	37.21	17.55	13.30	11.54	21.23	25.60	90.56
40	179.30	311.75	159.75	75.49	40.40	21.89	21.44	17.59	16.70	16.21	54.57	47.59
41	140.93	192.77	67.52	101.39	39.94	30.17	21.92	17.99	15.84	14.88	31.04	84.74
42	232.88	70.74	63.32	70.02	35.72	23.56	16.91	15.44	10.19	31.91	114.18	100.25
43	173.31	105.50	178.33	98.74	67.21	31.68	39.94	32.15	26.56	25.44	26.58	54.17
44	189.22	188.60	186.43	145.06	53.28	38.18	30.34	24.48	20.75	25.19	113.41	132.42
45	67.57	33.35	38.53	90.73	23.62	24.15	19.27	14.11	20.73	19.25	19.00	92.63
46	147.55	61.55	127.07	51.19	24.65	18.60	12.59	13.93	10.34	18.51	27.30	81.59
47	143.30	98.86	40.19	24.29	17.37	14.98	14.44	12.12	9.44	9.60	8.10	29.34
48	56.39	34.25	49.48	26.28	20.98	12.77	13.34	8.97	8.27	12.89	31.65	108.78
49	64.66	77.02	88.48	61.86	29.10	15.94	13.16	9.43	8.30	7.63	24.87	143.15
50	66.41	43.19	42.74	19.70	15.10	8.57	5.68	5.28	3.58	24.25	60.14	268.11
51	223.31	40.92	41.06	25.58	24.05	10.71	13.20	27.82	9.60	13.70	16.54	16.02
52	50.74	90.39	115.17	122.08	35.33	29.46	22.65	17.89	16.79	13.65	67.70	62.51
53	171.37	211.52	110.01	109.37	47.87	38.45	31.69	12.99	10.36	17.97	88.39	97.26
54	66.83	104.54	51.69	39.88	28.55	17.78	14.63	11.43	10.29	12.26	22.57	67.25
55	296.87	58.58	210.04	84.87	27.11	16.62	10.79	9.66	5.84	11.13	67.52	99.98

Tabela A-23 Vazões da sub-bacia incremental do PC11

Vazões da Sub-Bacia Incremental do PC11 [em m3/s]

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	13.05	27.72	33.61	10.28	6.82	4.57	5.21	4.16	3.18	2.50	13.44	14.18
2	18.90	9.64	20.65	27.08	7.01	5.99	5.60	4.24	3.35	4.50	5.65	9.74
3	32.73	19.73	28.59	11.64	10.08	7.16	5.46	4.26	3.75	3.37	15.93	33.85
4	83.30	42.28	29.32	16.76	12.03	8.91	7.01	5.21	3.93	5.94	26.01	56.02
5	27.91	29.52	21.24	15.25	10.13	8.62	6.28	5.02	3.89	5.07	10.18	23.97
6	45.64	56.51	37.36	101.32	24.26	13.20	9.79	8.18	6.92	10.81	23.04	44.67
7	80.86	22.89	25.72	26.79	15.88	11.59	9.55	8.23	6.09	2.82	3.20	18.61
8	18.17	22.12	32.34	40.24	12.71	8.67	6.92	5.50	5.07	4.00	12.13	27.13
9	35.12	21.68	23.53	16.85	8.82	7.99	6.87	5.16	5.41	4.48	6.24	66.73
10	26.45	95.47	40.97	20.61	14.71	9.79	7.65	6.82	6.48	6.77	12.57	20.65
11	19.53	19.24	16.85	16.81	7.45	5.85	5.55	4.87	3.95	8.52	16.61	21.29
12	17.97	19.58	17.54	14.61	5.65	3.16	3.36	3.05	2.69	2.76	2.58	11.64
13	14.86	21.24	53.10	19.39	7.45	5.80	4.17	3.02	2.18	1.47	6.97	18.41
14	7.16	4.32	14.91	13.40	5.89	3.68	2.85	1.93	4.26	3.73	9.11	32.98
15	21.14	36.68	18.17	14.08	4.76	4.37	3.63	2.09	2.00	2.53	4.74	19.48
16	11.59	14.03	8.57	16.90	7.31	5.06	3.98	3.16	2.19	3.03	11.79	30.15
17	34.68	18.75	34.78	11.89	11.93	10.47	7.01	5.46	4.35	4.16	20.17	47.74
18	76.96	49.69	77.94	54.07	24.79	17.24	13.64	10.67	8.96	8.52	12.62	29.32
19	24.31	33.95	23.28	22.41	13.01	9.94	8.62	6.82	6.43	7.40	6.33	10.57
20	29.47	16.17	28.64	11.93	7.55	6.38	5.31	4.34	3.47	5.11	15.73	12.32
21	31.13	29.79	38.72	18.75	11.86	8.58	6.82	5.39	4.69	4.65	11.76	35.69
22	55.73	53.17	27.27	14.70	12.63	6.38	4.78	3.71	2.88	3.03	5.64	12.45
23	37.95	41.35	35.34	15.13	12.15	8.03	5.55	4.65	4.53	6.24	11.45	50.17
24	56.32	39.58	18.68	12.07	8.82	7.11	5.85	4.87	3.86	3.12	6.48	6.88
25	34.10	41.01	16.36	13.48	8.42	5.71	4.70	4.01	3.00	6.88	20.95	18.91
26	30.49	27.38	35.95	23.19	11.79	8.52	7.21	5.07	4.01	9.21	21.19	22.41
27	51.63	63.33	30.79	19.68	13.93	10.91	8.18	6.82	3.38	8.13	9.94	18.75
28	25.43	28.55	24.60	18.41	10.42	7.65	6.28	5.02	4.31	3.54	10.23	31.27
29	28.01	30.84	36.19	17.29	10.38	7.99	7.99	5.60	5.26	8.00	10.77	24.66
30	15.89	19.87	19.27	9.06	7.65	5.54	4.62	3.44	2.89	5.31	30.76	35.10
31	58.40	47.10	29.57	16.66	10.47	8.58	6.94	5.85	5.29	9.78	13.05	51.15
32	6.34	5.85	7.89	5.34	3.43	3.22	2.48	2.18	2.36	5.99	18.87	51.76
33	21.70	16.92	18.97	16.36	8.00	6.13	5.54	4.03	3.25	7.53	22.42	23.72
34	22.11	17.07	24.07	22.73	9.37	6.74	5.54	4.30	3.52	11.86	25.48	23.28
35	21.64	11.55	43.04	37.25	14.95	10.84	8.30	6.82	5.09	7.36	7.16	11.06
36	20.31	17.10	7.45	13.88	6.38	4.56	3.98	3.10	2.50	5.65	13.35	11.45
37	7.70	9.69	14.03	6.28	4.36	3.32	2.84	2.27	4.87	6.53	19.48	37.31
38	34.97	32.59	10.23	13.44	7.70	5.99	4.61	3.74	4.82	5.70	9.26	21.48
39	51.15	28.69	41.70	25.23	13.25	12.23	8.38	6.48	5.41	8.57	9.45	33.56
40	64.30	86.65	49.20	29.03	18.27	15.34	11.64	9.45	9.01	8.18	17.54	17.24
41	57.97	79.89	28.76	35.90	18.80	13.98	11.89	9.45	8.13	7.65	17.20	35.12
42	59.43	28.01	24.84	28.25	14.47	12.32	9.35	7.79	6.24	12.09	42.76	42.10
43	63.44	44.31	64.63	44.85	23.42	17.46	13.64	11.09	9.25	9.37	9.99	19.05
44	62.24	81.84	52.53	38.41	21.88	17.09	12.32	10.55	8.52	16.33	37.92	61.07
45	31.19	16.95	16.17	25.48	11.25	8.72	7.40	6.53	7.89	7.06	8.52	28.87
46	45.83	41.35	36.83	22.12	12.76	9.93	8.36	6.88	6.11	7.59	11.03	22.17
47	55.53	38.38	22.31	13.17	10.32	7.84	7.00	6.76	4.83	4.71	6.09	12.87
48	18.02	13.13	13.18	10.38	8.06	5.50	4.82	3.53	4.27	5.31	8.39	37.46
49	25.48	29.53	26.79	18.44	10.72	8.04	6.82	5.31	4.17	5.89	9.23	21.40
50	18.80	19.83	17.44	9.19	6.88	5.41	4.56	3.90	4.09	6.19	19.39	73.55
51	46.91	21.14	19.18	12.32	9.93	7.36	7.79	6.56	6.23	5.38	6.55	9.26
52	23.04	25.99	42.99	38.09	14.51	9.36	7.72	6.35	6.62	7.83	15.36	23.45
53	50.03	97.57	43.99	26.83	18.90	13.11	10.42	8.33	7.73	11.85	39.67	55.32
54	33.87	40.22	26.07	17.90	12.16	9.75	7.66	6.62	6.28	6.05	6.96	26.75
55	57.05	18.06	63.52	25.20	13.97	11.52	9.51	6.96	5.27	5.24	14.23	24.46

Tabela A-24 Vazões da sub-bacia incremental do PC12

Vazões da Sub-Bacia Incremental do PC12 [em m3/s]

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	20.22	42.94	52.07	15.92	10.56	7.08	8.07	6.45	4.93	3.87	20.83	21.96
2	29.28	14.94	32.00	41.96	10.87	9.28	8.68	6.57	5.18	6.97	8.75	15.09
3	50.71	30.56	44.30	18.03	15.62	11.09	8.45	6.60	5.81	5.21	24.68	52.44
4	129.04	65.50	45.43	25.96	18.64	13.81	10.87	8.07	6.08	9.21	40.30	86.78
5	43.24	45.73	32.90	23.62	15.70	13.36	9.73	7.77	6.02	7.85	15.77	37.13
6	70.71	87.53	57.88	156.96	37.58	20.45	15.17	12.68	10.72	16.75	35.69	69.20
7	125.26	35.47	39.84	41.50	24.60	17.96	14.79	12.75	9.43	4.37	4.96	28.83
8	28.15	34.26	50.11	62.33	19.70	13.43	10.72	8.53	7.85	6.20	18.79	42.03
9	54.41	33.58	36.45	26.11	13.66	12.38	10.64	8.00	8.38	6.94	9.66	103.38
10	40.97	147.90	63.46	31.92	22.79	15.17	11.85	10.56	10.04	10.49	19.47	32.00
11	30.26	29.81	26.11	26.03	11.55	9.06	8.60	7.54	6.11	13.21	25.73	32.98
12	27.84	30.33	27.17	22.64	8.75	4.90	5.21	4.73	4.17	4.28	3.99	18.03
13	23.02	32.90	82.25	30.03	11.55	8.98	6.46	4.68	3.37	2.28	10.79	28.52
14	11.09	6.69	23.09	20.75	9.13	5.70	4.41	2.99	6.59	5.78	14.11	51.09
15	32.75	56.82	28.15	21.81	7.38	6.78	5.63	3.24	3.10	3.92	7.35	30.18
16	17.96	21.73	13.28	26.18	11.32	3.95	6.49	1.02	3.40	4.70	18.26	46.71
17	53.73	29.05	53.88	18.41	18.49	16.22	10.87	8.45	6.74	6.44	31.24	73.95
18	119.23	76.97	120.74	83.76	38.41	26.71	21.13	16.53	13.88	13.21	19.54	45.43
19	37.65	52.60	36.07	34.71	20.15	15.39	13.36	10.56	9.96	11.47	9.81	16.37
20	45.65	25.05	44.37	18.49	11.70	9.89	8.23	6.72	5.38	7.92	24.37	19.09
21	21.22	19.63	27.18	14.18	8.94	7.21	4.59	4.71	3.33	3.18	8.74	24.57
22	42.22	40.85	20.36	9.93	10.31	9.89	7.41	5.74	4.47	4.69	4.91	9.69
23	25.81	28.10	24.32	12.79	9.31	7.67	8.60	2.60	11.03	8.48	14.61	77.72
24	90.97	65.74	14.53	5.93	13.66	11.02	9.06	7.55	5.98	4.83	10.04	2.47
25	52.82	66.72	19.42	3.18	0.21	2.63	2.98	1.93	3.32	9.47	6.32	16.03
26	47.24	42.41	55.69	35.92	18.26	13.21	11.17	7.85	6.22	14.26	32.83	34.71
27	79.99	98.10	47.69	30.49	21.58	4.02	13.71	0.59	5.23	12.60	15.39	29.05
28	39.39	44.22	38.11	28.52	16.15	11.85	9.73	7.77	6.67	5.48	15.85	48.45
29	43.39	46.72	56.07	26.79	16.07	12.38	12.38	8.68	8.15	2.08	16.68	19.88
30	71.09	30.79	2.28	14.04	11.85	2.77	0.13	5.34	4.48	8.23	26.59	33.82
31	21.58	72.97	45.80	25.81	16.22	2.21	5.34	0.05	3.65	9.33	14.32	79.23
32	5.59	8.99	14.34	6.72	0.76	0.85	1.86	2.29	3.63	0.34	42.85	37.61
33	6.14	19.82	20.90	9.53	6.08	2.72	4.78	1.49	3.05	0.09	17.41	21.88
34	13.26	13.07	41.13	15.60	4.20	6.09	5.78	3.02	3.04	16.94	36.41	36.07
35	4.27	3.73	19.03	4.01	23.17	0.18	1.46	4.59	2.09	11.39	11.09	17.13
36	31.47	26.49	11.55	21.51	9.89	7.06	6.17	4.80	3.87	8.75	20.68	17.73
37	11.92	15.02	21.73	9.73	6.75	5.15	2.86	2.53	7.55	10.11	30.18	57.80
38	54.18	50.48	15.85	20.83	11.92	9.28	7.14	2.87	0.88	8.83	14.34	33.28
39	79.23	44.45	64.59	39.09	20.53	18.94	12.98	10.04	8.38	13.28	14.64	51.99
40	99.61	575.46	76.21	44.97	28.30	23.77	18.03	14.64	13.96	12.68	27.17	26.71
41	89.80	123.75	136.23	55.61	29.13	21.66	18.41	14.64	12.60	11.85	26.64	54.41
42	92.06	43.39	38.48	43.77	22.41	19.09	14.49	12.07	9.66	17.44	34.36	53.04
43	45.93	36.04	23.42	11.82	6.51	12.60	9.18	6.57	6.42	5.20	13.46	29.51
44	96.41	126.77	52.99	22.92	9.76	0.58	19.09	2.70	13.21	24.04	2.22	0.94
45	6.09	26.26	25.05	39.47	17.43	13.51	11.47	10.11	12.22	10.94	13.37	68.98
46	79.14	20.10	57.05	6.23	19.77	8.63	9.33	11.47	14.95	2.96	12.69	31.14
47	86.02	59.46	34.56	1.00	7.20	6.16	7.21	3.72	6.57	8.74	9.43	29.81
48	1.91	7.83	16.92	16.07	7.96	8.53	18.03	5.47	11.05	8.23	17.75	58.03
49	39.47	82.54	41.50	15.99	16.60	12.45	4.59	8.23	5.32	9.13	7.80	16.18
50	29.13	29.71	27.01	13.58	0.47	8.38	7.07	6.04	6.33	9.58	30.03	113.94
51	72.67	32.75	39.96	6.22	13.60	11.39	12.07	2.01	3.76	23.84	24.61	14.34
52	28.79	23.89	66.59	59.01	22.48	14.49	2.94	9.84	10.26	25.76	23.80	29.29
53	77.51	151.14	68.15	38.31	29.27	20.31	16.14	12.90	11.98	34.30	182.48	133.61
54	91.57	59.09	73.41	27.72	11.01	15.11	11.87	10.25	14.74	9.36	10.79	66.48
55	120.84	27.97	52.15	39.04	21.64	7.62	0.24	10.79	8.16	8.12	31.38	37.89

Tabela A-25 Vazões da sub-bacia incremental do PC13

Vazões da Sub-Bacia Incremental do PC13 [em m3/s]

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	58.77	176.66	213.21	46.15	30.81	20.39	23.90	18.47	15.50	12.69	60.99	63.62
2	121.99	43.37	132.87	172.73	31.46	27.39	24.25	18.73	17.93	19.93	26.04	44.15
3	207.77	88.87	182.10	51.57	45.51	32.17	24.47	19.26	17.76	16.19	71.26	214.72
4	521.28	266.97	186.63	75.61	54.71	39.80	31.46	22.97	18.20	27.46	166.09	352.14
5	177.87	187.83	95.01	69.47	46.36	38.37	27.89	23.25	17.68	22.25	45.36	153.40
6	287.81	355.16	236.46	633.03	155.22	59.49	43.15	36.23	30.67	48.15	147.66	281.77
7	506.17	146.76	164.28	170.92	72.26	52.57	43.51	37.09	28.18	14.65	16.30	84.02
8	81.88	141.93	205.35	254.28	57.42	39.23	31.60	25.32	23.18	18.46	54.57	173.04
9	222.57	97.15	150.68	75.46	39.94	35.59	30.74	23.04	24.54	20.33	28.89	418.59
10	168.81	596.78	258.81	132.56	66.55	44.08	34.24	30.81	29.46	29.96	56.71	132.87
11	125.92	86.81	75.46	75.54	33.60	26.68	25.25	21.71	17.40	37.59	74.89	136.79
12	81.24	88.16	79.10	66.69	25.11	14.29	16.20	15.30	13.80	14.03	13.09	52.50
13	67.26	136.49	334.02	87.52	33.60	26.75	19.30	15.02	10.92	126.03	31.53	82.45
14	32.17	19.92	68.12	61.06	26.61	17.31	14.35	10.18	21.61	17.45	41.37	209.28
15	135.89	232.23	81.88	63.77	21.12	19.74	16.38	11.39	9.58	11.41	21.43	87.38
16	52.57	63.84	38.45	76.32	30.43	20.70	15.16	10.45	7.20	14.25	77.90	135.75
17	219.85	83.20	118.72	34.50	34.43	45.86	29.08	12.40	16.80	15.90	68.73	300.79
18	482.01	312.88	488.05	340.06	88.85	58.18	41.20	27.01	38.07	36.05	83.03	186.63
19	106.27	215.32	80.86	100.05	56.71	31.80	36.50	28.19	26.39	30.88	25.94	45.48
20	108.89	71.30	182.40	51.77	31.55	26.16	21.22	16.73	12.76	20.33	102.36	81.22
21	189.65	181.49	234.95	116.56	75.48	56.15	45.28	23.90	17.50	17.27	74.88	216.83
22	337.04	321.94	167.30	54.48	52.89	28.67	21.56	16.73	15.88	13.78	21.90	79.10
23	230.12	161.75	152.82	64.12	50.64	32.68	22.35	22.49	24.00	43.16	74.88	315.90
24	355.16	180.22	79.61	49.52	37.39	29.53	21.08	16.60	13.74	12.03	26.61	26.61
25	216.23	186.51	104.47	46.42	32.68	21.67	17.43	14.26	10.29	47.09	126.82	118.07
26	193.88	174.55	227.70	148.57	42.35	36.05	29.98	20.10	15.25	61.89	94.43	143.74
27	324.96	203.90	195.69	87.47	60.97	44.13	34.70	25.96	17.10	34.25	170.46	294.14
28	162.46	181.79	110.15	79.67	32.94	21.24	15.82	13.97	10.93	10.67	68.23	198.71
29	178.47	119.95	229.21	112.02	46.01	30.95	30.95	25.18	37.42	51.32	71.55	152.19
30	92.15	128.03	74.82	38.52	32.00	21.00	9.57	12.62	8.93	43.04	150.91	216.23
31	250.51	296.87	89.25	72.04	47.72	36.45	29.17	25.47	36.22	63.70	83.94	329.77
32	42.86	22.04	54.34	25.68	13.76	29.25	10.51	11.63	9.98	39.24	125.92	312.88
33	131.05	107.80	119.88	101.45	52.52	40.75	38.03	28.33	24.38	47.99	138.60	147.36
34	135.58	106.59	155.22	139.81	41.73	31.24	38.33	30.36	25.92	77.90	73.30	149.17
35	130.15	72.16	166.60	219.55	97.53	42.79	35.02	29.39	34.58	50.41	49.20	73.36
36	130.75	110.82	51.01	90.88	44.37	33.07	29.51	24.01	20.30	39.84	87.56	50.00
37	52.52	64.91	91.79	27.89	17.44	15.35	21.96	6.99	76.95	56.65	210.84	285.11
38	272.71	158.17	45.35	68.74	37.78	23.39	13.76	10.70	22.82	28.22	74.64	138.42
39	329.77	203.74	215.03	119.17	66.27	53.25	34.95	15.20	37.53	46.08	48.46	185.88
40	331.39	675.31	224.06	184.81	68.74	99.94	76.99	35.30	38.29	24.38	94.14	98.85
41	364.22	179.53	135.86	227.40	54.03	61.20	41.00	18.59	27.41	52.22	76.02	206.31
42	228.20	67.41	98.99	115.32	63.44	41.28	24.30	29.38	18.68	52.21	260.32	262.13
43	382.34	269.68	382.34	202.21	70.05	57.04	56.93	45.48	37.62	37.84	42.33	96.70
44	315.93	512.22	237.99	203.20	83.73	69.73	46.85	39.30	29.54	100.00	222.87	324.35
45	121.16	74.90	62.54	108.95	32.40	23.28	19.48	18.81	34.75	34.40	38.52	191.16
46	341.38	225.93	209.70	94.52	63.87	41.15	30.81	23.13	32.85	38.67	67.89	138.42
47	397.06	236.90	119.74	79.84	38.37	30.67	31.74	37.89	51.45	27.13	42.56	82.48
48	74.00	50.28	58.85	46.93	32.09	23.47	27.08	16.62	17.43	23.75	43.78	168.62
49	162.77	159.02	120.26	78.94	46.15	22.52	26.84	21.22	15.70	23.92	37.84	69.72
50	56.82	87.92	77.14	38.97	26.16	16.53	22.34	20.16	21.00	25.27	86.12	335.84
51	213.00	94.21	87.47	53.81	53.83	28.17	30.31	22.03	30.97	25.04	31.10	39.41
52	112.19	146.65	222.24	124.95	82.75	39.88	30.30	32.26	33.61	43.09	55.95	101.18
53	253.98	742.37	277.58	119.70	95.32	57.19	44.79	35.14	36.22	68.57	287.31	362.30
54	139.54	115.23	107.54	69.85	45.94	52.28	36.76	41.47	33.13	52.28	56.61	178.24
55	349.34	179.83	279.22	161.07	61.15	47.57	59.37	38.06	44.12	22.32	51.24	109.49

Tabela A-26 Vazões da sub-bacia incremental do PC14

Vazões da Sub-Bacia Incremental do PC14 [em m3/s]

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	25.23	2.34	2.79	19.85	13.19	8.82	10.11	8.03	5.00	4.94	26.02	27.38
2	0.01	18.63	0.13	2.27	13.55	11.61	10.75	8.17	3.67	8.67	10.97	18.85
3	3.23	38.13	1.90	22.43	19.49	13.83	10.54	8.24	6.24	5.51	30.75	4.28
4	8.72	5.03	2.37	32.39	23.29	17.20	13.55	10.03	7.20	11.54	1.91	7.86
5	2.13	2.17	40.99	29.53	19.64	16.63	12.11	9.75	7.53	9.75	19.64	1.60
6	5.19	4.84	6.54	26.97	1.78	25.51	18.85	15.77	13.33	20.86	1.34	1.23
7	13.83	0.24	1.72	1.08	30.75	22.43	18.49	15.91	11.83	3.45	4.30	35.98
8	35.12	1.07	2.65	9.72	24.58	16.77	13.40	10.68	9.82	7.34	23.44	1.96
9	3.43	41.85	0.32	32.54	17.06	15.41	13.26	9.96	10.46	8.67	12.11	11.41
10	2.19	23.22	10.19	0.44	28.45	18.92	14.76	13.19	12.54	13.04	24.30	0.13
11	0.08	37.20	32.54	32.47	14.41	11.32	10.75	9.39	7.60	16.41	32.11	0.21
12	34.76	37.84	33.90	28.31	10.89	6.11	5.50	4.30	3.60	5.46	5.10	22.50
13	28.74	0.51	15.98	37.48	14.41	11.25	8.10	4.48	3.08	12.06	13.47	35.55
14	13.83	8.39	28.88	25.94	11.40	6.49	4.05	2.22	8.42	6.95	17.63	3.72
15	0.11	4.77	35.12	27.23	9.08	8.46	7.02	2.01	3.32	4.89	9.17	37.63
16	22.43	27.16	16.56	32.68	13.93	7.71	7.50	5.52	3.66	2.13	74.10	58.27
17	108.15	36.15	64.29	21.50	21.57	20.14	13.36	9.60	8.19	7.81	37.27	69.21
18	7.99	7.12	11.95	179.94	46.15	31.82	24.80	18.99	17.14	16.29	37.97	30.37
19	46.73	22.68	43.14	43.24	24.99	18.20	16.48	12.98	12.23	14.12	12.04	20.26
20	55.11	31.13	93.60	22.91	14.40	12.13	10.05	8.16	6.49	9.68	27.64	29.78
21	49.35	183.51	163.05	31.44	25.52	10.85	9.72	10.11	8.48	8.39	28.12	27.17
22	312.96	268.06	120.70	26.52	23.38	12.33	9.25	7.17	2.72	5.72	10.34	12.90
23	13.88	75.25	65.45	28.11	22.44	14.87	10.53	8.76	9.35	7.84	10.12	194.10
24	34.84	76.98	34.63	21.96	16.86	13.55	8.92	6.40	7.06	5.87	12.32	12.32
25	83.77	79.63	3.53	23.58	14.87	10.24	8.46	7.12	5.45	13.91	9.18	44.93
26	3.12	2.45	174.30	0.43	21.65	16.29	13.74	9.58	7.54	54.32	40.87	6.26
27	25.04	116.10	6.31	37.94	26.79	19.70	15.73	12.04	4.60	15.54	28.91	52.43
28	0.60	7.21	47.49	35.33	19.06	13.76	11.18	9.03	7.67	6.43	7.77	25.29
29	21.53	58.05	67.79	1.98	20.00	15.05	15.05	10.82	17.58	4.68	2.45	8.81
30	35.88	3.97	34.19	17.33	14.59	9.96	7.53	6.43	5.27	11.74	58.77	72.77
31	106.57	6.13	53.75	31.96	20.28	15.55	12.83	10.54	3.11	28.30	35.06	80.23
32	14.14	10.97	30.66	10.32	6.14	7.04	4.59	4.27	2.62	13.76	113.08	107.12
33	44.95	72.20	55.12	2.55	0.48	1.25	4.97	3.77	3.02	20.01	38.40	4.64
34	22.42	14.41	33.78	38.19	17.27	12.76	3.67	5.04	3.58	29.10	44.70	10.83
35	54.85	7.84	77.40	9.45	2.47	19.21	14.98	12.61	2.82	24.59	15.80	24.64
36	61.25	44.18	10.99	13.12	2.63	1.33	1.69	1.39	0.10	1.16	7.44	22.00
37	4.48	15.09	10.21	12.11	14.06	6.45	30.94	4.06	13.66	14.72	12.16	8.89
38	59.29	77.83	42.65	69.26	28.22	24.61	26.64	18.50	8.89	22.78	13.36	25.58
39	80.23	57.26	68.97	56.83	45.73	44.75	34.05	35.80	11.47	36.92	5.54	113.12
40	48.61	154.69	95.94	1.19	34.26	2.06	4.01	17.70	17.24	24.62	23.86	10.61
41	5.78	140.47	63.14	4.27	33.97	26.88	22.00	16.41	22.37	0.78	33.12	5.69
42	111.80	49.59	47.01	53.68	27.83	22.72	16.70	14.62	11.32	23.10	23.68	25.87
43	77.66	13.32	13.03	14.79	26.95	30.96	25.08	20.26	16.95	17.05	18.94	37.66
44	123.02	20.37	62.01	31.80	39.27	30.47	23.15	18.71	35.46	26.00	4.02	35.65
45	32.84	32.65	30.46	24.05	15.60	20.72	20.52	26.19	22.25	10.60	16.48	12.84
46	99.62	119.07	18.30	44.48	37.13	26.85	25.19	24.87	9.15	14.33	0.11	9.58
47	22.94	11.04	6.26	7.16	18.63	14.33	13.26	13.12	6.35	9.68	10.44	27.52
48	32.27	23.72	25.16	20.07	14.91	10.54	10.54	6.88	8.46	10.25	17.05	72.38
49	0.62	61.92	51.74	34.35	20.55	14.48	12.42	10.05	7.73	11.19	17.05	37.98
50	34.19	38.13	33.59	17.52	12.13	9.47	8.96	7.74	8.10	11.75	37.37	142.50
51	90.79	40.78	37.94	7.19	6.17	13.83	14.69	11.47	22.03	11.66	13.90	17.71
52	44.65	51.24	85.28	70.02	8.80	17.91	13.87	12.56	13.09	16.78	28.67	44.43
53	98.90	274.70	7.11	51.51	34.74	25.20	19.97	15.91	15.05	25.30	7.66	11.90
54	14.04	72.38	52.17	33.76	22.22	19.49	14.98	13.69	12.90	13.62	15.41	1.49
55	31.21	82.49	118.66	0.52	26.86	21.14	1.98	13.98	11.75	10.03	27.23	47.21

Tabela A-27 Vazões da sub-bacia incremental do PC15

Vazões da Sub-Bacia Incremental do PC15 [em m3/s]

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	14.67	31.17	37.75	11.54	7.67	5.13	5.88	4.67	3.58	2.87	15.13	15.92
2	21.25	10.83	23.21	30.46	7.88	6.75	6.25	4.75	3.76	5.04	6.38	10.96
3	36.79	22.17	32.13	13.04	11.33	8.04	6.13	4.79	4.21	3.78	17.88	38.08
4	93.33	47.50	32.96	18.83	13.54	10.00	7.88	5.83	4.42	6.71	29.25	62.92
5	31.38	33.17	23.83	17.17	11.42	9.67	7.04	5.67	4.38	5.67	11.42	26.96
6	51.25	63.33	42.08	114.17	27.29	14.83	10.96	9.17	7.75	12.13	25.92	50.00
7	90.83	25.71	28.92	30.08	17.88	13.04	10.75	9.25	6.88	3.17	3.60	20.92
8	20.42	24.88	36.33	45.42	14.29	9.75	7.79	6.21	5.71	4.50	13.63	30.50
9	39.46	24.33	26.42	18.92	9.92	8.96	7.71	5.79	6.08	5.04	7.04	75.00
10	29.75	107.50	46.25	23.17	16.54	11.00	8.58	7.67	7.29	7.58	14.13	23.21
11	21.96	21.63	18.92	18.88	8.38	6.58	6.25	5.46	4.42	9.54	18.67	23.92
12	20.21	22.00	19.71	16.46	6.33	3.55	3.78	3.43	3.03	3.18	2.96	13.08
13	16.71	23.88	60.00	21.79	8.38	6.54	4.71	3.40	2.45	7.01	7.83	20.67
14	8.04	4.88	16.79	15.08	6.63	4.14	3.20	2.17	4.89	4.21	10.25	37.08
15	23.75	41.25	20.42	15.83	5.33	4.92	4.08	2.35	2.25	2.84	5.33	21.88
16	13.04	15.79	9.63	19.00	8.10	5.35	4.36	3.21	2.33	3.28	16.42	33.88
17	43.33	21.01	37.38	12.50	12.54	11.71	7.77	5.58	4.76	4.54	21.67	56.25
18	86.25	55.83	87.50	67.92	26.83	18.50	14.42	11.04	9.97	9.47	15.83	34.13
19	27.17	38.96	25.08	25.14	14.53	10.58	9.58	7.55	7.11	8.21	7.00	11.78
20	32.04	18.10	36.00	13.32	8.37	7.05	5.84	4.75	3.77	5.63	18.88	15.17
21	35.46	39.58	48.33	21.58	13.96	9.88	7.88	5.88	4.93	4.88	13.96	39.42
22	72.92	68.33	34.42	15.42	13.59	7.17	5.38	4.17	3.24	3.40	6.01	14.08
23	41.25	43.75	38.05	16.34	13.05	8.65	6.12	5.09	5.43	7.42	13.21	64.17
24	64.58	44.76	20.14	12.77	9.80	7.88	6.25	5.13	4.17	3.41	7.16	7.16
25	41.67	46.30	18.25	13.71	8.65	5.95	4.92	4.14	3.17	8.38	22.50	22.42
26	34.29	30.79	47.50	26.04	12.75	9.47	7.99	5.57	4.38	12.72	23.76	25.42
27	58.75	67.50	34.75	22.06	15.57	11.45	9.14	7.00	3.79	9.03	16.81	30.48
28	28.54	32.29	27.61	20.54	11.08	8.00	6.50	5.25	4.46	3.74	11.92	36.08
29	32.29	33.75	43.33	19.54	11.63	8.75	8.75	6.29	6.79	8.75	12.29	27.04
30	20.86	22.50	19.88	10.08	8.48	5.79	4.38	3.74	3.07	6.82	34.17	41.21
31	61.96	52.92	31.25	18.58	11.79	9.04	7.46	6.13	5.97	11.96	15.88	60.83
32	7.63	6.38	10.38	6.00	3.57	4.09	2.67	2.48	2.54	6.96	26.67	60.00
33	24.75	21.71	23.17	17.67	8.79	6.71	6.38	4.58	3.84	8.79	25.83	26.00
34	24.63	19.08	28.63	26.04	10.04	7.42	6.38	5.00	4.14	14.54	26.58	26.58
35	25.00	12.63	45.00	39.17	16.96	11.17	8.71	7.33	5.67	9.42	8.83	13.54
36	25.38	21.08	8.96	16.21	7.42	5.33	4.71	3.71	2.99	6.54	15.38	12.79
37	8.96	11.63	16.25	7.04	5.04	3.75	4.57	2.36	7.94	8.56	25.96	44.17
38	43.75	37.71	12.42	17.25	9.33	7.13	5.63	4.29	5.17	7.00	11.58	25.21
39	60.83	35.42	47.50	28.92	16.00	14.54	10.04	7.67	6.67	10.79	10.33	41.17
40	70.83	127.08	55.42	32.58	19.92	17.38	13.33	10.29	10.02	9.04	19.92	19.31
41	65.00	81.67	36.71	40.36	19.75	15.63	12.79	9.54	9.03	8.75	19.26	38.88
42	65.00	28.83	27.33	31.21	16.18	13.21	9.71	8.50	6.58	13.43	47.08	47.50
43	71.25	48.33	68.56	45.00	22.83	18.00	14.58	11.78	9.86	9.91	11.01	21.89
44	71.53	92.19	56.25	41.13	22.83	17.72	13.46	10.88	10.00	19.17	39.54	63.33
45	31.33	18.98	17.71	27.33	11.63	9.29	8.00	7.46	9.13	7.92	9.58	34.21
46	57.92	47.92	41.00	23.54	15.13	11.04	9.33	7.92	7.21	8.33	12.08	25.00
47	65.00	43.16	24.33	14.08	10.83	8.33	7.71	7.63	6.50	5.63	7.42	16.00
48	18.76	13.79	14.63	11.67	8.67	6.13	6.13	4.00	4.92	5.96	9.91	42.08
49	28.60	36.00	30.08	19.97	11.95	8.42	7.22	5.84	4.49	6.50	9.91	22.08
50	19.88	22.17	19.53	10.19	7.05	5.71	5.21	4.50	4.71	6.83	21.73	82.85
51	52.78	23.71	22.06	12.54	10.92	8.04	8.54	6.67	7.29	6.78	8.08	10.30
52	25.96	29.79	49.58	40.71	16.23	10.41	8.07	7.30	7.61	9.76	16.67	25.83
53	57.50	125.83	49.49	29.95	21.58	14.65	11.61	9.25	8.75	14.71	51.26	64.91
54	37.00	42.08	30.33	19.63	12.92	11.33	8.71	7.96	7.50	7.92	8.96	31.42
55	66.00	26.38	68.99	28.29	15.62	12.29	10.08	8.13	6.83	5.83	15.83	27.45

Tabela A-28 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC1

FREQ. RELATIVAS DAS VAZÕES DE SETEMBRO, CONDICIONADAS ÀS VAZOES DE MARÇO PC 1

					SETEMBRO							
				DENOMINAÇÃO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
				LIM. INFERIOR	---	1.28	2.52	3.75	4.99	6.22	7.46	8.69
				LIM. SUPERIOR	1.28	2.52	3.75	4.99	6.22	7.46	8.69	---
				QS repres.	0.66	1.90	3.13	4.37	5.61	6.84	8.08	9.31
	DENOM.	LIM.INF.	LIM.SUP	QM repres.								
	M1	---	4.09	1.49	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M	M2	4.09	9.29	6.69	0.00	0.25	0.50	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
A	M3	9.29	14.49	11.89	0.07	0.21	0.36	0.29	0.07	0.00	0.00	0.00
R	M4	14.49	19.69	17.09	0.00	0.00	0.42	0.53	0.05	0.00	0.00	0.00
Ç	M5	19.69	24.89	22.29	0.00	0.00	0.43	0.29	0.14	0.00	0.00	0.14
O	M6	24.89	30.09	27.49	0.00	0.00	0.25	0.50	0.00	0.25	0.00	0.00
	M7	30.09	35.29	32.69	0.00	0.00	0.00	0.33	0.67	0.00	0.00	0.00
	M8	35.29	---	37.89	0.00	0.00	0.00	0.67	0.00	0.33	0.00	0.00

Tabela A-29 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC2

FREQ. RELATIVAS DAS VAZÕES DE SETEMBRO, CONDICIONADAS ÀS VAZOES DE MARÇO PC 2

					SETEMBRO							
				DENOMINAÇÃO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
				LIM. INFERIOR	---	4.19	8.22	12.26	16.29	20.33	24.36	28.40
				LIM. SUPERIOR	4.19	8.22	12.26	16.29	20.33	24.36	28.40	---
				QS repres.	2.17	6.21	10.24	14.28	18.31	22.34	26.38	30.41
	DENOM.	LIM.INF.	LIM.SUP	QM repres.								
	M1	---	13.36	4.87	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M	M2	13.36	30.34	21.85	0.00	0.25	0.50	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
A	M3	30.34	47.32	38.83	0.07	0.21	0.36	0.29	0.07	0.00	0.00	0.00
R	M4	47.32	64.3	55.81	0.00	0.00	0.42	0.53	0.05	0.00	0.00	0.00
Ç	M5	64.3	81.28	72.79	0.00	0.00	0.43	0.29	0.14	0.00	0.00	0.14
O	M6	81.28	98.26	89.77	0.00	0.00	0.25	0.50	0.00	0.25	0.00	0.00
	M7	98.26	115.24	106.75	0.00	0.00	0.00	0.33	0.67	0.00	0.00	0.00
	M8	115.24	---	123.73	0.00	0.00	0.00	0.67	0.00	0.33	0.00	0.00

Tabela A-30 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC3

FREQ. RELATIVAS DAS VAZÕES DE SETEMBRO, CONDICIONADAS ÀS VAZOES DE MARÇO PC 3

					SETEMBRO							
				DENOMINAÇÃO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
				LIM. INFERIOR	---	1.78	4.05	6.32	8.59	10.85	13.12	15.39
				LIM. SUPERIOR	1.78	4.05	6.32	8.59	10.85	13.12	15.39	---
				QS repres.	0.65	2.91	5.18	7.45	9.72	11.99	14.26	16.53
	DENOM.	LIM.INF.	LIM.SUP	QM repres.								
	M1	---	13.84	8.28	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M	M2	13.84	24.96	19.40	0.00	0.29	0.14	0.43	0.14	0.00	0.00	0.00
A	M3	24.96	36.07	30.51	0.08	0.15	0.08	0.15	0.38	0.08	0.08	0.00
R	M4	36.07	47.19	41.63	0.00	0.10	0.20	0.00	0.30	0.40	0.00	0.00
Ç	M5	47.19	58.30	52.75	0.00	0.08	0.17	0.08	0.17	0.42	0.08	0.00
O	M6	58.30	69.42	63.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.25	0.50
	M7	69.42	80.53	74.98	0.00	0.67	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00
	M8	80.53	---	86.09	0.00	0.00	0.20	0.20	0.20	0.00	0.00	0.40

Tabela A-31 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC4

FREQ. RELATIVAS DAS VAZÕES DE SETEMBRO, CONDICIONADAS ÀS VAZOES DE MARÇO PC 4

					SETEMBRO							
				DENOMINAÇÃO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
				LIM. INFERIOR	---	13.95	21.22	28.50	35.77	43.05	50.32	57.60
				LIM. SUPERIOR	13.95	21.22	28.50	35.77	43.05	50.32	57.60	---
				QS repres.	10.31	17.59	24.86	32.14	39.41	46.68	53.96	61.23
	DENOM.	LIM.INF.	LIM.SUP	QM repres.								
	M1	---	46.52	20.72	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M	M2	46.52	98.11	72.32	0.00	0.60	0.00	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00
A	M3	98.11	149.71	123.91	0.00	0.20	0.20	0.40	0.13	0.00	0.07	0.00
R	M4	149.71	201.30	175.50	0.00	0.00	0.33	0.25	0.42	0.00	0.00	0.00
Ç	M5	201.30	252.89	227.10	0.00	0.00	0.18	0.36	0.00	0.27	0.18	0.00
O	M6	252.89	304.48	278.69	0.00	0.00	0.14	0.57	0.00	0.14	0.00	0.14
	M7	304.48	356.08	330.28	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.33	0.33
	M8	356.08	---	381.87	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabela A-32 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC5

FREQ. RELATIVAS DAS VAZÕES DE SETEMBRO, CONDICIONADAS ÀS VAZOES DE MARÇO PC 5

					SETEMBRO							
				DENOMINAÇÃO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
				LIM. INFERIOR	---	3.11	6.73	10.36	13.98	17.61	21.23	24.86
				LIM. SUPERIOR	3.11	6.73	10.36	13.98	17.61	21.23	24.86	---
				QS repres.	1.30	4.92	8.55	12.17	15.80	19.42	23.04	26.67
	DENOM.	LIM.INF.	LIM.SUP	QM repres.								
	M1	---	18.27	4.83	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M	M2	18.27	45.16	31.71	0.14	0.00	0.00	0.43	0.29	0.00	0.00	0.14
A	M3	45.16	72.05	58.60	0.00	0.06	0.22	0.28	0.28	0.11	0.06	0.00
R	M4	72.05	98.94	85.49	0.00	0.06	0.24	0.00	0.24	0.29	0.18	0.00
Ç	M5	98.94	125.82	112.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.20	0.00	0.20
O	M6	125.82	152.71	139.27	0.00	0.33	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.33
	M7	152.71	179.60	166.16	0.00	0.00	0.33	0.33	0.00	0.00	0.00	0.33
	M8	179.60	---	193.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00

Tabela A-33 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC6

FREQ. RELATIVAS DAS VAZÕES DE SETEMBRO, CONDICIONADAS ÀS VAZOES DE MARÇO PC 6

					SETEMBRO							
				DENOMINAÇÃO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
				LIM. INFERIOR	---	19.65	32.57	45.48	58.40	71.31	84.23	97.14
				LIM. SUPERIOR	19.65	32.57	45.48	58.40	71.31	84.23	97.14	---
				QS repres.	13.19	26.11	39.02	51.94	64.86	77.77	90.69	103.60
	DENOM.	LIM.INF.	LIM.SUP	QM repres.								
	M1	---	76.2	32.78	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M	M2	76.20	163.05	119.62	0.00	0.20	0.20	0.40	0.20	0.00	0.00	0.00
A	M3	163.05	249.90	206.47	0.06	0.06	0.29	0.35	0.12	0.12	0.00	0.00
R	M4	249.90	336.75	293.32	0.00	0.09	0.18	0.27	0.27	0.18	0.00	0.00
Ç	M5	336.75	423.59	380.17	0.00	0.00	0.08	0.46	0.23	0.15	0.00	0.08
O	M6	423.59	510.44	467.02	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.67
	M7	510.44	597.29	553.87	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50
	M8	597.29	---	640.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.33	0.33

Tabela A-34 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC7

FREQ. RELATIVAS DAS VAZÕES DE SETEMBRO, CONDICIONADAS ÀS VAZOES DE MARÇO PC 7

					SETEMBRO							
				DENOMINAÇÃO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
				LIM. INFERIOR	---	24.91	42.89	60.87	78.85	96.82	114.80	132.78
				LIM. SUPERIOR	24.91	42.89	60.87	78.85	96.82	114.80	132.78	---
				QS repres.	15.92	33.90	51.88	69.86	87.84	105.81	123.79	141.77
	DENOM.	LIM.INF.	LIM.SUP	QM repres.								
	M1	---	106.77	45.40	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M	M2	106.77	229.51	168.14	0.00	0.20	0.20	0.40	0.20	0.00	0.00	0.00
A	M3	229.51	352.25	290.88	0.06	0.06	0.28	0.33	0.17	0.06	0.06	0.00
R	M4	352.25	474.99	413.62	0.00	0.00	0.22	0.33	0.22	0.22	0.00	0.00
Ç	M5	474.99	597.74	536.37	0.00	0.00	0.07	0.50	0.21	0.14	0.00	0.07
O	M6	597.74	720.48	659.11	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.67
	M7	720.48	843.22	781.85	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50
	M8	843.22	---	904.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.33	0.33

Tabela A-35 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC8

FREQ. RELATIVAS DAS VAZÕES DE SETEMBRO, CONDICIONADAS ÀS VAZOES DE MARÇO PC 8

					SETEMBRO							
				DENOMINAÇÃO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
				LIM. INFERIOR	---	5.81	12.02	18.23	24.44	30.65	36.86	43.07
				LIM. SUPERIOR	5.81	12.02	18.23	24.44	30.65	36.86	43.07	---
				QS repres.	2.71	8.92	15.13	21.34	27.55	33.76	39.97	46.18
	DENOM.	LIM.INF.	LIM.SUP	QM repres.								
	M1	---	32.85	18.88	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M	M2	32.85	60.79	46.82	0.10	0.20	0.60	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
A	M3	60.79	88.72	74.75	0.00	0.11	0.37	0.26	0.11	0.11	0.05	0.00
R	M4	88.72	116.66	102.69	0.00	0.00	0.33	0.20	0.33	0.07	0.07	0.00
Ç	M5	116.66	144.59	130.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.17	0.00	0.33
O	M6	144.59	172.53	158.56	0.00	0.33	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.33
	M7	172.53	200.46	186.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	M8	200.46	---	214.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00

Tabela A-36 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC9

FREQ. RELATIVAS DAS VAZÕES DE SETEMBRO, CONDICIONADAS ÀS VAZOES DE MARÇO PC 9

					SETEMBRO							
				DENOMINAÇÃO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
				LIM. INFERIOR	---	7.02	13.52	20.03	26.53	33.04	39.54	46.05
				LIM. SUPERIOR	7.02	13.52	20.03	26.53	33.04	39.54	46.05	---
				QS repres.	3.77	10.27	16.78	23.28	29.79	36.29	42.79	49.30
	DENOM.	LIM.INF.	LIM.SUP	QM repres.								
	M1	---	37.06	14.84	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M	M2	37.06	81.50	59.28	0.10	0.30	0.40	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
A	M3	81.50	125.94	103.72	0.00	0.05	0.30	0.30	0.15	0.05	0.15	0.00
R	M4	125.94	170.38	148.16	0.00	0.00	0.42	0.17	0.08	0.17	0.00	0.17
Ç	M5	170.38	214.81	192.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.14	0.29	0.00
O	M6	214.81	259.25	237.03	0.00	0.33	0.00	0.00	0.33	0.33	0.00	0.00
	M7	259.25	303.69	281.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
	M8	303.69	---	325.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Tabela A-37 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC10

FREQ. RELATIVAS DAS VAZÕES DE SETEMBRO, CONDICIONADAS ÀS VAZOES DE MARÇO PC 10

					SETEMBRO							
				DENOMINAÇÃO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
				LIM. INFERIOR	---	9.01	19.02	29.04	39.05	49.07	59.08	69.10
				LIM. SUPERIOR	9.01	19.02	29.04	39.05	49.07	59.08	69.10	---
				QS repres.	4.00	14.02	24.03	34.05	44.06	54.07	64.09	74.10
	DENOM.	LIM.INF.	LIM.SUP	QM repres.								
	M1	---	52.9	8.75	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M	M2	52.9	141.2	97.05	0.05	0.21	0.58	0.05	0.00	0.05	0.05	0.00
A	M3	141.2	229.5	185.35	0.00	0.00	0.44	0.13	0.31	0.06	0.06	0.00
R	M4	229.5	317.8	273.65	0.00	0.00	0.27	0.18	0.27	0.18	0.09	0.00
Ç	M5	317.8	406.1	361.95	0.00	0.20	0.00	0.00	0.40	0.20	0.20	0.00
O	M6	406.1	494.4	450.25	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.50
	M7	494.4	582.7	538.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	M8	582.7	---	626.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00

Tabela A-38 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC11

FREQ. RELATIVAS DAS VAZÕES DE SETEMBRO, CONDICIONADAS ÀS VAZOES DE MARÇO PC 11

					SETEMBRO							
				DENOMINAÇÃO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
				LIM. INFERIOR	---	38.18	65.66	93.13	120.61	148.09	175.57	203.04
				LIM. SUPERIOR	38.18	65.66	93.13	120.61	148.09	175.57	203.04	---
				QS repres.	24.44	51.92	79.40	106.87	134.35	161.83	189.30	216.78
	DENOM.	LIM.INF.	LIM.SUP	QM repres.								
	M1	---	167.12	61.74	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M	M2	167.12	377.89	272.51	0.13	0.25	0.13	0.38	0.13	0.00	0.00	0.00
A	M3	377.89	588.66	483.28	0.00	0.06	0.25	0.31	0.31	0.00	0.06	0.00
R	M4	588.66	799.43	694.05	0.00	0.00	0.29	0.36	0.14	0.14	0.00	0.07
Ç	M5	799.43	1010.2	904.82	0.00	0.00	0.00	0.22	0.56	0.22	0.00	0.00
O	M6	1010.2	1220.97	1115.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.67
	M7	1220.97	1431.74	1326.36	0.00	0.50	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00
	M8	1431.74	---	1537.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Tabela A-39 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC12

FREQ. RELATIVAS DAS VAZÕES DE SETEMBRO, CONDICIONADAS ÀS VAZOES DE MARÇO PC 12

					SETEMBRO							
				DENOMINAÇÃO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
				LIM. INFERIOR	---	44.77	72.38	99.99	127.60	155.20	182.81	210.42
				LIM. SUPERIOR	44.77	72.38	99.99	127.60	155.20	182.81	210.42	---
				QS repres.	30.97	58.57	86.18	113.79	141.40	169.01	196.62	224.23
	DENOM.	LIM.INF.	LIM.SUP	QM repres.								
	M1	---	178.67	65.49	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M	M2	178.67	405.04	291.85	0.13	0.25	0.25	0.25	0.13	0.00	0.00	0.00
A	M3	405.04	631.41	518.22	0.00	0.06	0.39	0.22	0.22	0.06	0.06	0.00
R	M4	631.41	857.78	744.59	0.00	0.00	0.25	0.33	0.25	0.17	0.00	0.00
Ç	M5	857.78	1084.14	970.96	0.00	0.00	0.00	0.33	0.22	0.33	0.00	0.11
O	M6	1084.14	1310.51	1197.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.67
	M7	1310.51	1536.88	1423.70	0.00	0.33	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.33
	M8	1536.88	---	1650.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Tabela A-40 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC13

FREQ. RELATIVAS DAS VAZÕES DE SETEMBRO, CONDICIONADAS ÀS VAZOES DE MARÇO PC 13

					SETEMBRO							
				DENOMINAÇÃO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
				LIM. INFERIOR	---	59.32	90.32	121.32	152.32	183.32	214.32	245.32
				LIM. SUPERIOR	59.32	90.32	121.32	152.32	183.32	214.32	245.32	---
				QS repres.	43.82	74.82	105.82	136.82	167.82	198.82	229.82	260.82
	DENOM.	LIM.INF.	LIM.SUP	QM repres.								
	M1	---	229.68	85.28	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M	M2	229.68	518.48	374.08	0.00	0.33	0.25	0.25	0.00	0.08	0.08	0.00
A	M3	518.48	807.29	662.88	0.07	0.00	0.40	0.13	0.20	0.20	0.00	0.00
R	M4	807.29	1096.09	951.69	0.00	0.00	0.33	0.25	0.25	0.08	0.00	0.08
Ç	M5	1096.09	1384.89	1240.49	0.00	0.00	0.00	0.20	0.30	0.30	0.00	0.20
O	M6	1384.89	1673.69	1529.29	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50
	M7	1673.69	1962.50	1818.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.50
	M8	1962.50	---	2106.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Tabela A-41 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC14

FREQ. RELATIVAS DAS VAZÕES DE SETEMBRO, CONDICIONADAS ÀS VAZOES DE MARÇO PC 14

					SETEMBRO							
				DENOMINAÇÃO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
				LIM. INFERIOR	---	62.64	95.63	128.62	161.61	194.59	227.58	260.57
				LIM. SUPERIOR	62.64	95.63	128.62	161.61	194.59	227.58	260.57	---
				QS repres.	46.15	79.13	112.12	145.11	178.10	211.09	244.08	277.07
	DENOM.	LIM.INF.	LIM.SUP	QM repres.								
	M1	---	240.67	96.20	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M	M2	240.67	529.61	385.14	0.00	0.44	0.11	0.22	0.00	0.11	0.11	0.00
A	M3	529.61	818.55	674.08	0.06	0.06	0.41	0.12	0.18	0.18	0.00	0.00
R	M4	818.55	1107.49	963.02	0.00	0.00	0.42	0.25	0.17	0.08	0.00	0.08
Ç	M5	1107.49	1396.43	1251.96	0.00	0.00	0.00	0.30	0.20	0.40	0.00	0.10
O	M6	1396.43	1685.37	1540.90	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67
	M7	1685.37	1974.31	1829.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.50
	M8	1974.31	---	2118.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Tabela A-42 Freqüências relativas das vazões de março e setembro, no PC15

FREQ. RELATIVAS DAS VAZÕES DE SETEMBRO, CONDICIONADAS ÀS VAZOES DE MARÇO PC 15

					SETEMBRO							
				DENOMINAÇÃO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
				LIM. INFERIOR	---	64.89	98.99	133.09	167.19	201.28	235.38	269.48
				LIM. SUPERIOR	64.89	98.99	133.09	167.19	201.28	235.38	269.48	---
				QS repres.	47.84	81.94	116.04	150.14	184.24	218.33	252.43	286.53
	DENOM.	LIM.INF.	LIM.SUP	QM repres.								
	M1	---	249.63	99.55	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M	M2	249.63	549.79	399.71	0.00	0.44	0.11	0.22	0.00	0.11	0.11	0.00
A	M3	549.79	849.95	699.87	0.06	0.06	0.41	0.12	0.18	0.18	0.00	0.00
R	M4	849.95	1150.11	1000.03	0.00	0.00	0.42	0.25	0.17	0.08	0.00	0.08
Ç	M5	1150.11	1450.27	1300.19	0.00	0.00	0.00	0.30	0.20	0.40	0.00	0.10
O	M6	1450.27	1750.43	1600.35	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67
	M7	1750.43	2050.59	1900.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.50
	M8	2050.59	---	2200.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Tabela A-43 Resultado da otimização aplicando a Abordagem 1

ABORDAGEM BINÁRIA - VARIANTE 'TUDO OU NADA': Irrigação por Aspersão

PC	PROJETO	ÁREA MÁX. PROJETADA (ha)	ANO INICIAL	0	5	10	15	20	25
			FUN OBJ (10^6 $)	3422.26	4125.326	3422.26	4163.639	4080.075	4148.433
			VARIÁVEIS						
2	*2.1*	3 784.00	VA02100	0	1	0	0	0	1
	2.2	4 312.00	VA02200	1	1	1	1	1	1
3	*3.1*	2 176.00	VA03100	1	1	1	1	1	1
5	*5.1*	5 232.00	VA05100	1	1	1	1	1	1
	5.2	3 248.00	VA05200	0	1	0	1	0	1
	5.3	3 968.00	VA05300	1	1	1	1	1	1
6	*6.1*	11 536.00	VA06100	1	1	1	1	1	1
	6.2	6 016.00	VA06200	1	1	1	1	1	1
7	*7.1*	7 008.00	VA07100	1	1	1	1	1	1
	7.2	512.00	VA07200	1	1	1	1	1	1
	7.3	6 344.00	VA07300	1	1	1	1	1	1
	7.4	2 816.00	VA07400	1	1	1	1	1	1
	7.5	5 500.00	VA07500	1	1	1	1	1	1
10	*10.1*	4 768.00	VA10100	1	1	1	1	1	1
	10.2	2 312.00	VA10200	1	1	1	1	1	1
12	*12.1*	5 820.00	VA12100	1	1	1	1	1	1
	12.2	3 790.00	VA12200	1	1	1	1	1	1
	12.3	2 350.00	VA12300	1	1	1	1	1	1

Tabela A-44 Superfícies viáveis de serem implantas segundo a Abordagem 1

ABORDAGEM BINÁRIA - VARIANTE 'TUDO OU NADA': Irrigação por Aspersão

PC	PROJETO	ÁREA MÁX. PROJETADA (ha)	ANO INICIAL	0	5	10	15	20	25	TAMANHO ADOTADO (ha)
			FUN OBJ (10^6 $)	3422.26	4125.326	3422.26	4163.639	4080.075	4148.433	
			VARIÁVEIS	Tamanhos de Implantação Otimizados (ha)						
2	*2.1*	3 784.00	VA02100	-	3 784.00	-	-	-	3 784.00	-
	2.2	4 312.00	VA02200	4 312.00	4 312.00	4 312.00	4 312.00	4 312.00	4 312.00	4 312.00
3	*3.1*	2 176.00	VA03100	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00
5	*5.1*	5 232.00	VA05100	5 232.00	5 232.00	5 232.00	5 232.00	5 232.00	5 232.00	5 232.00
	5.2	3 248.00	VA05200	-	3 248.00	-	3 248.00	-	3 248.00	-
	5.3	3 968.00	VA05300	3 968.00	3 968.00	3 968.00	3 968.00	3 968.00	3 968.00	3 968.00
6	*6.1*	11 536.00	VA06100	11 536.00	11 536.00	11 536.00	11 536.00	11 536.00	11 536.00	11 536.00
	6.2	6 016.00	VA06200	6 016.00	6 016.00	6 016.00	6 016.00	6 016.00	6 016.00	6 016.00
7	*7.1*	7 008.00	VA07100	7 008.00	7 008.00	7 008.00	7 008.00	7 008.00	7 008.00	7 008.00
	7.2	512.00	VA07200	512.00	512.00	512.00	512.00	512.00	512.00	512.00
	7.3	6 344.00	VA07300	6 344.00	6 344.00	6 344.00	6 344.00	6 344.00	6 344.00	6 344.00
	7.4	2 816.00	VA07400	2 816.00	2 816.00	2 816.00	2 816.00	2 816.00	2 816.00	2 816.00
	7.5	5 500.00	VA07500	5 500.00	5 500.00	5 500.00	5 500.00	5 500.00	5 500.00	5 500.00
10	*10.1*	4 768.00	VA10100	4 768.00	4 768.00	4 768.00	4 768.00	4 768.00	4 768.00	4 768.00
	10.2	2 312.00	VA10200	2 312.00	2 312.00	2 312.00	2 312.00	2 312.00	2 312.00	2 312.00
12	*12.1*	5 820.00	VA12100	5 820.00	5 820.00	5 820.00	5 820.00	5 820.00	5 820.00	5 820.00
	12.2	3 790.00	VA12200	3 790.00	3 790.00	3 790.00	3 790.00	3 790.00	3 790.00	3 790.00
	12.3	2 350.00	VA12300	2 350.00	2 350.00	2 350.00	2 350.00	2 350.00	2 350.00	2 350.00

SUPERFÍCIE TOTAL A IMPLANTAR (ha)	74 460.00

Tabela A-45 Resultado da otimização aplicando a Abordagem 2

ABORDAGEM BINÁRIA - VARIANTE '2': Irrigação por Aspersão

PC	PROJETO	TAMANHO PROJETADO (ha)	ANO INICIAL	0	5	10	15	20	25
			FUNOBJ (10^6 $)	4134.62	4240.30	3579.22	4261.36	4198.99	4248.08
			VARIÁVEIS						
2		3 784.00	VA021100	1	1	0	1	1	1
	2.1	2 838.00	VA021200	0	0	1	0	0	0
		1 892.00	VA021300	0	0	0	0	0	0
		4 312.00	VA022100	1	1	1	1	0	1
	2.2	3 234.00	VA022200	0	0	0	0	1	0
		2 156.00	VA022300	0	0	0	0	0	0
3		2 176.00	VA031100	1	1	1	1	1	1
	3.1	1 632.00	VA031200	0	0	0	0	0	0
		1 088.00	VA031300	0	0	0	0	0	0
5		5 232.00	VA051100	1	1	1	1	1	1
	5.1	3 924.00	VA051200	0	0	0	0	0	0
		2 616.00	VA051300	0	0	0	0	0	0
		3 248.00	VA052100	1	1	1	1	1	1
	5.2	2 436.00	VA052200	0	0	0	0	0	0
		1 624.00	VA052300	0	0	0	0	0	0
		3 968.00	VA053100	1	1	1	1	1	1
	5.3	2 976.00	VA053200	0	0	0	0	0	0
		1 984.00	VA053300	0	0	0	0	0	0
6		11 536.00	VA061100	1	1	1	1	1	1
	6.1	8 652.00	VA061200	0	0	0	0	0	0
		5 768.00	VA061300	0	0	0	0	0	0
		6 016.00	VA062100	1	1	1	1	1	1
	6.2	4 512.00	VA062200	0	0	0	0	0	0
		3 008.00	VA062300	0	0	0	0	0	0
7		7 008.00	VA071100	1	1	1	1	1	1
	7.1	5 256.00	VA071200	0	0	0	0	0	0
		3 504.00	VA071300	0	0	0	0	0	0
		512.00	VA072100	1	1	1	1	1	1
	7.2	384.00	VA072200	0	0	0	0	0	0
		256.00	VA072300	0	0	0	0	0	0
		6 344.00	VA073100	1	1	1	1	1	1
	7.3	4 758.00	VA073200	0	0	0	0	0	0
		3 172.00	VA073300	0	0	0	0	0	0
		2 816.00	VA074100	1	1	1	1	1	1
	7.4	2 112.00	VA074200	0	0	0	0	0	0
		1 408.00	VA074300	0	0	0	0	0	0
		5 500.00	VA075100	1	1	1	1	1	1
	7.5	4 125.00	VA075200	0	0	0	0	0	0
		2 750.00	VA075300	0	0	0	0	0	0
10		4 768.00	VA101100	1	1	1	1	1	1
	10.1	3 576.00	VA101200	0	0	0	0	0	0
		2 384.00	VA101300	0	0	0	0	0	0
		2 312.00	VA102100	1	1	1	1	1	1
	10.2	1 734.00	VA102200	0	0	0	0	0	0
		1 156.00	VA102300	0	0	0	0	0	0
12		5 820.00	VA121100	1	1	1	1	1	1
	12.1	4 365.00	VA121200	0	0	0	0	0	0
		2 910.00	VA121300	0	0	0	0	0	0
		3 790.00	VA122100	1	1	1	1	1	1
	12.2	2 842.50	VA122200	0	0	0	0	0	0
		1 895.00	VA122300	0	0	0	0	0	0
		2 350.00	VA123100	1	1	1	1	1	1
	12.3	1 762.50	VA123200	0	0	0	0	0	0
		1 175.00	VA123300	0	0	0	0	0	0

Tabela A-46 Superfícies viáveis de serem implantas segundo a Abordagem 2

ABORDAGEM BINÁRIA - VARIANTE '2': Irrigação por Aspersão

PC	PROJETO	TAMANHO PROJETADO (ha)	ANO INICIAL	0	5	10	15	20	25	TAMANHO ADOTADO (ha)
			FUNOBJ (10^6 $)	4 134.62	4 240.30	3 579.22	4 261.36	4 198.99	4 248.08	
			VARIÁVEIS	Tamanhos de Implantação Otimizados (ha)						
2		3 784.00	VA021100	3 784.00	3 784.00	-	3 784.00	3 784.00	3 784.00	
	2.1	2 838.00	VA021200	-	-	2 838.00	-	-	-	2 838.00
		1 892.00	VA021300	-	-	-	-	-	-	
		4 312.00	VA022100	4 312.00	4 312.00	4 312.00	4 312.00	-	4 312.00	
	2.2	3 234.00	VA022200	-	-	-	-	3 234.00	-	3 234.00
		2 156.00	VA022300	-	-	-	-	-	-	
3		2 176.00	VA031100	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00
	3.1	1 632.00	VA031200	-	-	-	-	-	-	
		1 088.00	VA031300	-	-	-	-	-	-	
5		5 232.00	VA051100	5 232.00	5 232.00	5 232.00	5 232.00	5 232.00	5 232.00	5 232.00
	5.1	3 924.00	VA051200	-	-	-	-	-	-	
		2 616.00	VA051300	-	-	-	-	-	-	
		3 248.00	VA052100	3 248.00	3 248.00	3 248.00	3 248.00	3 248.00	3 248.00	3 248.00
	5.2	2 436.00	VA052200	-	-	-	-	-	-	
		1 624.00	VA052300	-	-	-	-	-	-	
		3 968.00	VA053100	3 968.00	3 968.00	3 968.00	3 968.00	3 968.00	3 968.00	3 968.00
	5.3	2 976.00	VA053200	-	-	-	-	-	-	
		1 984.00	VA053300	-	-	-	-	-	-	
6		11 536.00	VA061100	11 536.00	11 536.00	11 536.00	11 536.00	11 536.00	11 536.00	11 536.00
	6.1	8 652.00	VA061200	-	-	-	-	-	-	
		5 768.00	VA061300	-	-	-	-	-	-	
		6 016.00	VA062100	6 016.00	6 016.00	6 016.00	6 016.00	6 016.00	6 016.00	6 016.00
	6.2	4 512.00	VA062200	-	-	-	-	-	-	
		3 008.00	VA062300	-	-	-	-	-	-	
7		7 008.00	VA071100	7 008.00	7 008.00	7 008.00	7 008.00	7 008.00	7 008.00	7 008.00
	7.1	5 256.00	VA071200	-	-	-	-	-	-	
		3 504.00	VA071300	-	-	-	-	-	-	
		512.00	VA072100	512.00	512.00	512.00	512.00	512.00	512.00	512.00
	7.2	384.00	VA072200	-	-	-	-	-	-	
		256.00	VA072300	-	-	-	-	-	-	
		6 344.00	VA073100	6 344.00	6 344.00	6 344.00	6 344.00	6 344.00	6 344.00	6 344.00
	7.3	4 758.00	VA073200	-	-	-	-	-	-	
		3 172.00	VA073300	-	-	-	-	-	-	
		2 816.00	VA074100	2 816.00	2 816.00	2 816.00	2 816.00	2 816.00	2 816.00	2 816.00
	7.4	2 112.00	VA074200	-	-	-	-	-	-	
		1 408.00	VA074300	-	-	-	-	-	-	
		5 500.00	VA075100	5 500.00	5 500.00	5 500.00	5 500.00	5 500.00	5 500.00	5 500.00
	7.5	4 125.00	VA075200	-	-	-	-	-	-	
		2 750.00	VA075300	-	-	-	-	-	-	
10		4 768.00	VA101100	4 768.00	4 768.00	4 768.00	4 768.00	4 768.00	4 768.00	4 768.00
	10.1	3 576.00	VA101200	-	-	-	-	-	-	
		2 384.00	VA101300	-	-	-	-	-	-	
		2 312.00	VA102100	2 312.00	2 312.00	2 312.00	2 312.00	2 312.00	2 312.00	2 312.00
	10.2	1 734.00	VA102200	-	-	-	-	-	-	
		1 156.00	VA102300	-	-	-	-	-	-	
12		5 820.00	VA121100	5 820.00	5 820.00	5 820.00	5 820.00	5 820.00	5 820.00	5 820.00
	12.1	4 365.00	VA121200	-	-	-	-	-	-	
		2 910.00	VA121300	-	-	-	-	-	-	
		3 790.00	VA122100	3 790.00	3 790.00	3 790.00	3 790.00	3 790.00	3 790.00	3 790.00
	12.2	2 842.50	VA122200	-	-	-	-	-	-	
		1 895.00	VA122300	-	-	-	-	-	-	
		2 350.00	VA123100	2 350.00	2 350.00	2 350.00	2 350.00	2 350.00	2 350.00	2 350.00
	12.3	1 762.50	VA123200	-	-	-	-	-	-	-
		1 175.00	VA123300	-	-	-	-	-	-	-

SUPERFÍCIE TOTAL A IMPLANTAR (ha)	**79 468.00**

Tabela A-47 Resultado da otimização aplicando a Abordagem 3

ABORDAGEM BINÁRIA - VARIANTE '3': Irrigação por Aspersão

PC	PROJETO	ÁREA MÁX. PROJETADA (ha)	ANO INICIAL	0	5	10	15	20	25
			FUNOBJ (10^6 $)	5081.268	5076.635	5056.443	5081.391	5084.273	5085.565
			VARIÁVEIS						
2	*2.1*	3 784.00	VA02100	1	1	1	1	1	1
	2.2	4 312.00	VA02200	1	1	1	1	1	1
3	*3.1*	2 176.00	VA03100	1	1	1	1	1	1
5	*5.1*	5 232.00	VA05100	1	1	1	1	1	1
	5.2	3 248.00	VA05200	1	1	1	1	1	1
	5.3	3 968.00	VA05300	1	1	1	1	1	1
6	*6.1*	11 536.00	VA06100	1	1	1	1	1	1
	6.2	6 016.00	VA06200	1	1	1	1	1	1
7	*7.1*	7 008.00	VA07100	1	1	1	1	1	1
	7.2	512.00	VA07200	1	1	1	1	1	1
	7.3	6 344.00	VA07300	1	1	1	1	1	1
	7.4	2 816.00	VA07400	1	1	1	1	1	1
	7.5	5 500.00	VA07500	1	1	1	1	1	1
10	*10.1*	4 768.00	VA10100	1	1	1	1	1	1
	10.2	2 312.00	VA10200	1	1	1	1	1	1
12	*12.1*	5 820.00	VA12100	1	1	1	1	1	1
	12.2	3 790.00	VA12200	1	1	1	1	1	1
	12.3	2 350.00	VA12300	1	1	1	1	1	1

Tabela A-48 Superfícies viáveis de serem implantas segundo a Abordagem 3

ABORDAGEM BINÁRIA - VARIANTE '3': Irrigação por Aspersão

PC	PROJETO	ÁREA MÁX. PROJETADA (ha)	ANO INICIAL	0	5	10	15	20	25	TAMANHO ADOTADO (ha)
			FUNOBJ (10^6 $)	5081.268	5076.635	5056.443	5081.391	5084.273	5085.565	
			VARIÁVEIS	Tamanhos de Implantação Otimizados (ha)						
2	*2.1*	3 784.00	VA02100	3 784.00	3 784.00	3 784.00	3 784.00	3 784.00	3 784.00	3 784.00
	2.2	4 312.00	VA02200	4 312.00	4 312.00	4 312.00	4 312.00	4 312.00	4 312.00	4 312.00
3	*3.1*	2 176.00	VA03100	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00
5	*5.1*	5 232.00	VA05100	5 232.00	5 232.00	5 232.00	5 232.00	5 232.00	5 232.00	5 232.00
	5.2	3 248.00	VA05200	3 248.00	3 248.00	3 248.00	3 248.00	3 248.00	3 248.00	3 248.00
	5.3	3 968.00	VA05300	3 968.00	3 968.00	3 968.00	3 968.00	3 968.00	3 968.00	3 968.00
6	*6.1*	11 536.00	VA06100	11 536.00	11 536.00	11 536.00	11 536.00	11 536.00	11 536.00	11 536.00
	6.2	6 016.00	VA06200	6 016.00	6 016.00	6 016.00	6 016.00	6 016.00	6 016.00	6 016.00
7	*7.1*	7 008.00	VA07100	7 008.00	7 008.00	7 008.00	7 008.00	7 008.00	7 008.00	7 008.00
	7.2	512.00	VA07200	512.00	512.00	512.00	512.00	512.00	512.00	512.00
	7.3	6 344.00	VA07300	6 344.00	6 344.00	6 344.00	6 344.00	6 344.00	6 344.00	6 344.00
	7.4	2 816.00	VA07400	2 816.00	2 816.00	2 816.00	2 816.00	2 816.00	2 816.00	2 816.00
	7.5	5 500.00	VA07500	5 500.00	5 500.00	5 500.00	5 500.00	5 500.00	5 500.00	5 500.00
10	*10.1*	4 768.00	VA10100	4 768.00	4 768.00	4 768.00	4 768.00	4 768.00	4 768.00	4 768.00
	10.2	2 312.00	VA10200	2 312.00	2 312.00	2 312.00	2 312.00	2 312.00	2 312.00	2 312.00
12	*12.1*	5 820.00	VA12100	5 820.00	5 820.00	5 820.00	5 820.00	5 820.00	5 820.00	5 820.00
	12.2	3 790.00	VA12200	3 790.00	3 790.00	3 790.00	3 790.00	3 790.00	3 790.00	3 790.00
	12.3	2 350.00	VA12300	2 350.00	2 350.00	2 350.00	2 350.00	2 350.00	2 350.00	2 350.00

SUPERFÍCIE TOTAL A IMPLANTAR (ha)	81 492.00

Tabela A-49 Resultado da otimização aplicando a Abordagem 4

ABORD. NÃO BINÁRIA - VAR. 'SEM GARANTIA': Irrig. por Aspersão

PC	ÁREA MÁX. PROJETADA (ha)	ANO INICIAL	0	5	10	15	20	25
		FUNOBJ (10^6 $)	4266.669	4349.003	3663.533	4398.821	4379.275	4379.419
		VARIÁVEL						
2	8 096.00	CA020000	100.00%	100.00%	69.40%	78.19%	85.05%	100.00%
3	2 176.00	CA030000	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
5	12 448.00	CA050000	100.00%	100.00%	99.99%	99.99%	99.99%	100.00%
6	17 552.00	CA060000	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
7	16 680.00	CA070000	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
10	7 080.00	CA100000	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
12	11 960.00	CA120000	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
7.5	5 500.00	CA07-bis	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Tabela A-50 Superfícies viáveis de serem implantas segundo a Abordagem 4

ABORD. NÃO BINÁRIA - VAR. 'SEM GARANTIA': Irrig. por Aspersão

PC	ÁREA MÁX. PROJETADA (ha)	ANO INICIAL	0	5	10	15	20	25	ÁREA ADOTADA (ha)
		OBJ (10^6 $)	4266.669	4349.003	3663.533	4398.821	4379.275	4379.419	
		VARIÁVEL	Tamanhos de Implantação Otimizados (ha)						
2	8 096.00	CA020000	8 096.00	8 096.00	5 618.36	6 330.49	6 885.39	8 096.00	5 618.36
3	2 176.00	CA030000	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00
5	12 448.00	CA050000	12 448.00	12 448.00	12 446.15	12 446.15	12 446.15	12 448.00	12 446.15
6	17 552.00	CA060000	17 552.00	17 552.00	17 552.00	17 552.00	17 552.00	17 552.00	17 552.00
7	16 680.00	CA070000	16 680.00	16 680.00	16 680.00	16 680.00	16 680.00	16 680.00	16 680.00
10	7 080.00	CA100000	7 080.00	7 080.00	7 080.00	7 080.00	7 080.00	7 080.00	7 080.00
12	11 960.00	CA120000	11 960.00	11 960.00	11 960.00	11 960.00	11 960.00	11 960.00	11 960.00
7.5	5 500.00	CA07-bis	5 500.00	5 500.00	5 500.00	5 500.00	5 500.00	5 500.00	5 500.00

SUPERFÍCIE TOTAL A IMPLANTAR (ha)	79 012.51

Tabela A-51 Resultado da otimização aplicando a Abordagem 5

ABORD. NÃO BINÁRIA - VAR. 'COM GARANTIA 75%': Irrig. por Aspersão

PC	ÁREA MÁX. PROJETADA (ha)	ANO INICIAL	0	5	10	15	20	25
		FUNOBJ (10^6 $)	4228.936	4324.149	3627.959	4382.776	4362.446	4372.923
		VARIÁVEL						
2	8 096.00	CA020000	100.00%	100.00%	69.40%	78.19%	78.19%	100.00%
3	2 176.00	CA030000	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
5	12 448.00	CA050000	74.67%	95.90%	88.65%	100.00%	99.99%	100.00%
6	17 552.00	CA060000	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
7	16 680.00	CA070000	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
10	7 080.00	CA100000	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
12	11 960.00	CA120000	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
7.5	5 500.00	CA07-bis	100.00%	100.00%	32.56%	100.00%	100.00%	100.00%

Tabela A-52 Superfícies viáveis de serem implantas segundo a Abordagem 5

ABORD. NÃO BINÁRIA - VAR. 'COM GARANTIA 75%': Irrig. por Aspersão

PC	ÁREA MÁX. PROJETADA (ha)	ANO INICIAL	0	5	10	15	20	25	ÁREA ADOTADA (ha)
		FUNOBJ (10^6 $)	4228.936	4324.149	3627.959	4382.776	4362.446	4372.923	
		VARIÁVEL	Tamanhos de Implantação Otimizados (ha)						
2	8 096.00	CA020000	8 096.00	8 096.00	5 618.36	6 330.49	6 330.49	8 096.00	5 618.36
3	2 176.00	CA030000	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00	2 176.00
5	12 448.00	CA050000	9 295.00	11 937.98	11 035.67	12 448.00	12 446.15	12 448.00	9 295.00
6	17 552.00	CA060000	17 552.00	17 552.00	17 552.00	17 552.00	17 552.00	17 552.00	17 552.00
7	16 680.00	CA070000	16 680.00	16 680.00	16 680.00	16 680.00	16 680.00	16 680.00	16 680.00
10	7 080.00	CA100000	7 080.00	7 080.00	7 080.00	7 080.00	7 080.00	7 080.00	7 080.00
12	11 960.00	CA120000	11 960.00	11 960.00	11 960.00	11 960.00	11 960.00	11 960.00	11 960.00
7.5	5 500.00	CA07-bis	5 500.00	5 500.00	1 790.53	5 500.00	5 500.00	5 500.00	1 790.53

SUPERFÍCIE TOTAL A IMPLANTAR (ha)	72 151.89

Tabela A-53 Comparação entre os resultados da otimização da operação com ‘futuro conhecido’ e com ‘futuro desconhecido’

DADOS IMPLANT.	PCs	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15
	ÁREA IMPLANTADA (Ha)	316.00	7 826.36	2 568.20	1 717.50	13 726.00	18 373.00	36 656.90	8 153.00	586.00	8 425.00	1 275.00	13 235.00	4 248.00	31.00	220.00

RESULTADOS DO RACIONAMENTO (Futuro Conhecido)

ANO 5	% A PREPARAR	100.00%	91.19%	100.00%	100.00%	50.46%	100.00%	72.02%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	SUP. A PREPARAR (Ha)	316.00	7 136.65	2 568.20	1 717.50	6 926.35	18 373.00	26 399.44	8 153.00	586.00	8 425.00	1 275.00	13 235.00	4 248.00	31.00	220.00
ANO 10	% A PREPARAR	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	SUP. A PREPARAR (Ha)	316.00	7 826.36	2 568.20	1 717.50	13 726.00	18 373.00	36 656.90	8 153.00	586.00	8 425.00	1 275.00	13 235.00	4 248.00	31.00	220.00
ANO 15	% A PREPARAR	0.00%	45.58%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	45.74%	74.16%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	SUP. A PREPARAR (Ha)	0.00	3 567.10	0.00	0.00	0.00	0.00	16 768.08	6 046.26	586.00	8 425.00	1 275.00	13 235.00	4 248.00	31.00	220.00
ANO 20	% A PREPARAR	100.00%	92.25%	100.00%	100.00%	86.98%	100.00%	74.07%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	SUP. A PREPARAR (Ha)	316.00	7 220.04	2 568.20	1 717.50	11 938.49	18 373.00	27 152.82	8 153.00	586.00	8 425.00	1 275.00	13 235.00	4 248.00	31.00	220.00

RESULTADOS DA OPERAÇÃO (Futuro Desconhecido)

ANO 5	% A PREPARAR	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	40.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	SUP. A PREPARAR (Ha)	316.00	7 826.36	2 568.20	1 717.50	5 490.40	18 373.00	36 656.90	8 153.00	586.00	8 425.00	1 275.00	13 235.00	4 248.00	31.00	220.00
ANO 10	% A PREPARAR	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	60.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	SUP. A PREPARAR (Ha)	316.00	7 826.36	2 568.20	1 717.50	8 235.60	18 373.00	36 656.90	8 153.00	586.00	8 425.00	1 275.00	13 235.00	4 248.00	31.00	220.00
ANO 15	% A PREPARAR	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	40.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	SUP. A PREPARAR (Ha)	316.00	7 826.36	2 568.20	1 717.50	5 490.40	18 373.00	36 656.90	8 153.00	586.00	8 425.00	1 275.00	13 235.00	4 248.00	31.00	220.00
ANO 20	% A PREPARAR	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	60.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	SUP. A PREPARAR (Ha)	316.00	7 826.36	2 568.20	1 717.50	8 235.60	18 373.00	36 656.90	8 153.00	586.00	8 425.00	1 275.00	13 235.00	4 248.00	31.00	220.00

ANEXO B. Linearização de Curvas por Segmentos

B.1. Introdução

No caso em que não seja admissível a consideração de uma relação linear entre variáveis, ou seja no caso em que esta relação seja marcadamente não-linear, para poder trabalhar com programação linear é preciso tentar se aproximar a curva através de uma poligonal.

A maioria dos autores que escreveram sobre programação linear apresentam este problema e diferentes variantes de solução, mas que quase sempre precisam da **programação inteira** (Lanzer, 1982; Taha, 1995), ou que são difíceis de programar.

Portanto, durante a elaboração deste trabalho foi desenvolvida uma metodologia que não pretende ser original nem inédita mas sim de fácil implementação.

Para entender esta metodologia é preciso fazer algumas considerações prévias, que por simplicidade serão definidas para um espaço euclideano de duas dimensões R^2.

i. Interpretação Vetorial de um Ponto

Qualquer ponto $\mathbf{P_i}$ fica perfectamente definido pelas suas coordenadas $\mathbf{x_i}$ e $\mathbf{y_i}$, que podem ser consideradas como as componentes de um vetor (figura B-1).

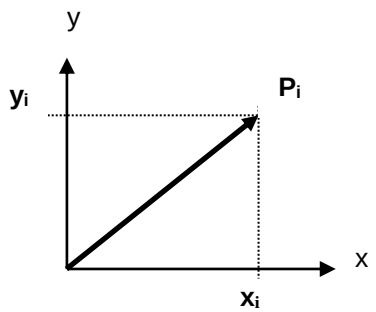

Figura B-1 Interpretação vetorial de um ponto

Ou seja que:

$$P_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \qquad \text{(B-1)}$$

Então é possível definir um ponto pelo seu vetor posição.

ii. Ponto Situado Sobre um Segmento

Sendo um segmento a porção de uma reta limitada entre dois pontos, a seguir será analisado como pode-se definir a posição de um terceiro ponto pertencente a este segmento.

Seja o segmento definido pelos pontos **P_1** e **P_2** e que o ponto cuja posição precisa-se definir seja o ponto **A** (figura B-2).

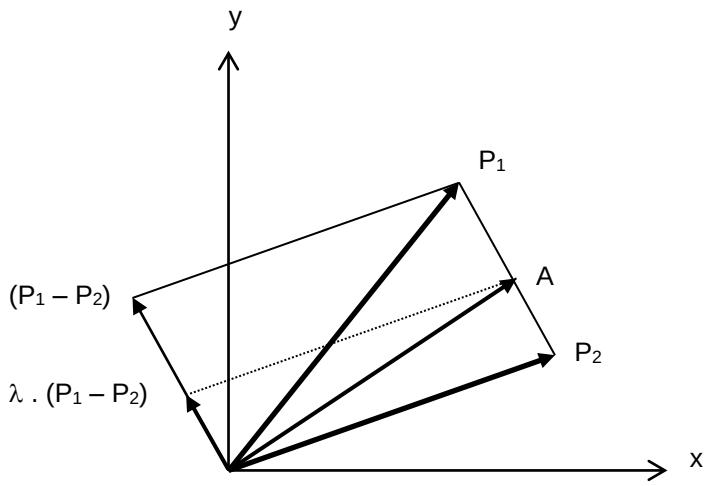

Figura B-2 Ponto situado sobre um segmento

$$A = P_2 + \lambda \cdot (P_1 - P_2) = P_2 + \lambda \cdot P_1 - \lambda \cdot P_2 \qquad \text{(B-2)}$$

$$\Rightarrow \boxed{A = \lambda \cdot P_1 + (1 - \lambda) \cdot P_2} \qquad \text{(B-3)}$$

Então, um ponto qualquer **A** localizado no segmento que une outros dois pontos, **P1** e **P2,** é uma combinação linear deste dois e só destes dois pontos. Ou seja:

$$X_A = \lambda \cdot X_1 + (1-\lambda) \cdot X_2 \qquad \text{(B-4)}$$

$$Y_A = \lambda \cdot Y_1 + (1-\lambda) \cdot Y_2 \qquad \text{(B-5)}$$

B.2. LINEARIZAÇÃO DE CURVAS

O desenvolvimento desta metodologia será feito com base numa curva côncava, e considera-se que esta curva pode ser linearizada, de forma aceitável, através dos segmentos que ligam os pontos $\mathbf{P_o}$, $\mathbf{P_1}$, $\mathbf{P_2}$ e $\mathbf{P_3}$ (figura B-3).

Então, como definir automaticamente a ordenada $\mathbf{y_i}$ de um ponto genérico $\mathbf{P_i}$ do qual apenas conhece-se a abscissa $\mathbf{x_i}$?

Pelo visto nos parágrafos anteriores, pode-se afirmar que qualquer ponto da poligonal definida pelos pontos $\mathbf{P_o}$, $\mathbf{P_1}$, $\mathbf{P_2}$ e $\mathbf{P_3}$ é uma combinação linear destes pontos.

$$P_i = A_i \cdot P_0 + B_i \cdot P_1 + C_i \cdot P_2 + D_i \cdot P_3 \qquad \text{(B-6)}$$

onde **A**, **B**, **C** e **D** são coeficientes que variam de **0** até **1** e que satisfazem a seguinte restrição:

$$A_i + B_i + C_i + D_i = 1 \qquad \text{(B-7)}$$

Deve-se salientar que cada $\mathbf{P_i}$ tem associado um único conjunto (A_i,B_i,C_i,D_i).

Uma outra condição que deve ser verificada é que apenas dois destes coeficientes podem ser simultaneamente não-nulos (pelo fato demonstrado de que um ponto pertencente ao segmento que une dois pontos é uma combinação linear apenas destes dois pontos).

Mais ainda, a possibilidade de pares de coeficientes não-nulos está limitada. Para este caso as únicas possibilidades de pares não nulos são (A,B), (B,C) e (C,D), o que é chamado de **condição de adjacência** (Lanzer, 1982).

Para entender melhor esta condição de adjacência, na figura B-3 foram 'mapeados' os valores possíveis dos coeficientes **A**, **B**, **C** e **D**:

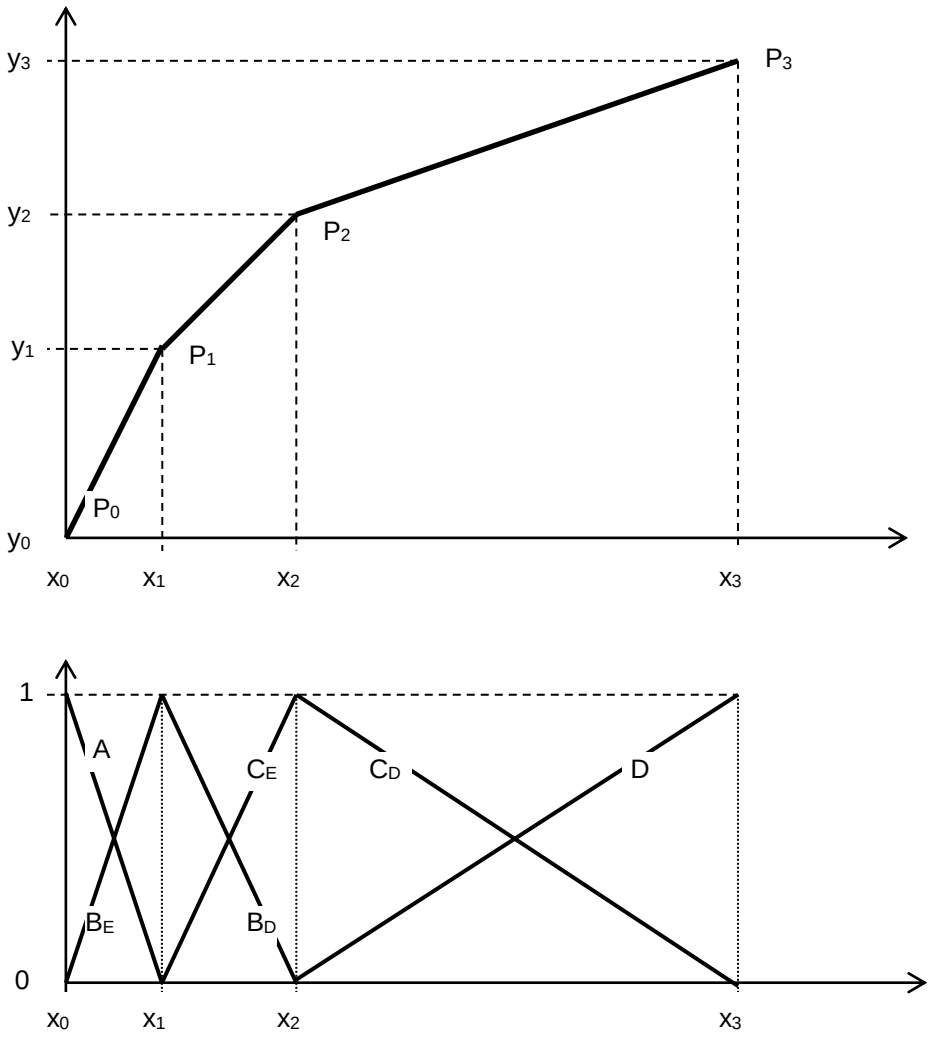

Figura B-3 Mapa dos valores que podem adotar os coeficientes de A, B, C e D

Os índices $_E$ e $_D$ foram utilizados apenas para indicar a cauda esquerda e direita, respectivamente, das retas que representam as variações dos coeficientes **B** e **C**.

As possibilidades de variação dos coeficientes são:

<u>COEFICIENTE **A**</u>: varia de 1 até 0 entre x_0 e x_1, sendo 0 para $x \geq x_1$.

COEFICIENTE **B**: varia de 0 até 1 entre x_0 e x_1; de 1 até 0 entre x_1 e x_2 e tem valor 0 para $x \geq x_2$.

COEFICIENTE **C**: é 0 para $x \leq x_1$; varia de 0 até 1 entre x_1 e x_2 e de 1 até 0 entre x_2 e x_3.

COEFICIENTE **D**: é 0 para $x \leq x_2$ e varia de 0 até 1 entre x_2 e x_3.

Estas variações podem ser representadas através de equações lineares. Logo, as coordenadas de qualquer ponto da poligonal poderão ser definidas pelas seguintes equações:

$$\begin{cases} X_i = A \cdot x_0 + B \cdot x_1 + C \cdot x_2 + D \cdot x_3 \\ Y_i = A \cdot y_0 + B \cdot y_1 + C \cdot y_2 + D \cdot y_3 \end{cases} \qquad \text{(B-8)}$$

mas, devem-se verificar as seguintes restrições:

$$\begin{cases} A \leq 1 \\ A \geq 0 \end{cases} \qquad \text{(B-9)}$$

$$\begin{cases} B \leq 1 \\ B \geq 0 \\ B \leq B_E \\ B \leq B_D \end{cases} \qquad \text{(B-10)}$$

$$\begin{cases} C \leq 1 \\ C \geq 0 \\ C \leq C_E \\ C \leq C_D \end{cases} \qquad \text{(B-11)}$$

$$\begin{cases} D \leq 1 \\ D \geq 0 \end{cases} \qquad \text{(B-12)}$$

Com estas restrições a condição de adjacência estaria coberta. Mas, embora a formulação apresentada apareça como aceitável, para ser aplicada num programa de otimização ainda deve ser trabalhada um pouco, fundamentalmente porque apresenta 'furos', como por exemplo é exigido que B seja menor ou igual que B_D e simultaneamente maior ou igual a zero. Então, sendo que B_D tem valores negativos quando X é maior que x_2, não é possível satisfazer as duas restrições simultaneamente.

Para contornar este problema pode-se recorrer a vários artifícios, alguns dos quais são apresentados na continuação.

B.2.1. ARTIFÍCIO 1

Para exemplificar este artifício será considerado o coeficiente B. Com a finalidade de eliminar os valores negativos de B serão definidos dois coeficientes ou variáveis auxiliares, B_1 e B_2 (figura B-4 e B-5).

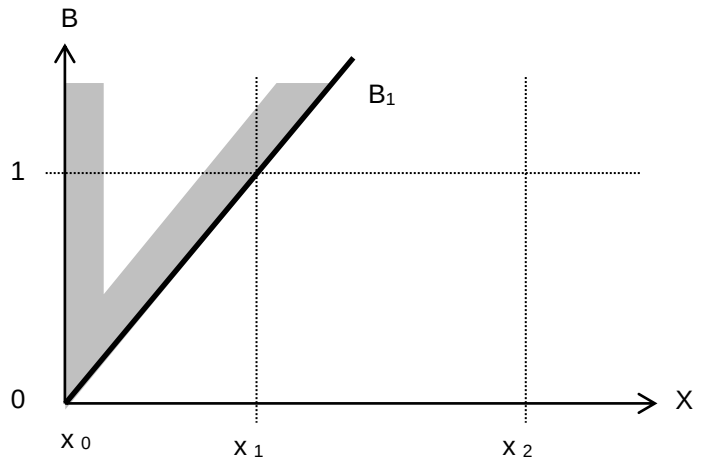

Figura B-4 Definição do coeficiente B_1

A variável B_1 tem validade apenas no setor do primeiro quadrante que fica acima da reta da figura B-4, o que pode ser expresso como:

$$B_1 - \frac{1}{(x_1 - x_0)} \cdot X \geq 0 \qquad \text{(B-13)}$$

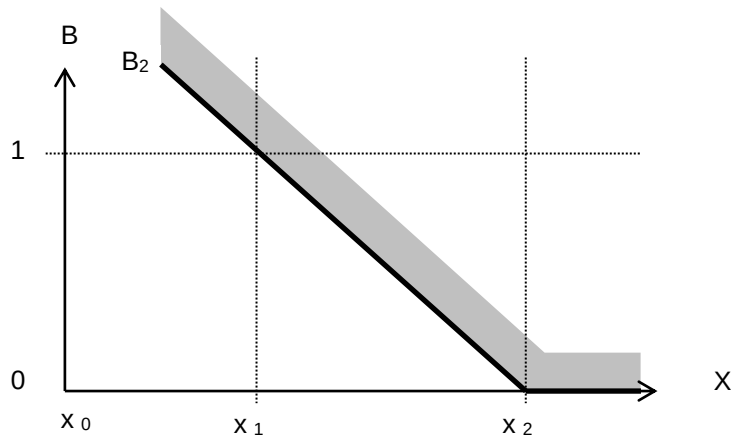

Figura B-5 Definição do coeficiente B_2

A validade de B_2 corresponde ao setor do primeiro quadrante que fica acima da reta (figura B-5), o que pode ser expresso como:

$$B_2 + (X - x_1) \cdot \frac{1}{(x_2 - x_1)} \geq 1 \qquad \text{(B-14)}$$

Logo, o valor do coeficiente B deverá ser tal que se cumpra, simultaneamente, que:

$$B \leq B_1 \;\; ; \;\; B \leq B_2 \;\; \text{e} \;\; B \leq 1 \qquad \text{(B-15)}$$

Estendendo o que foi exemplificado para B aos outros coeficientes, o conjunto completo de restrições necessárias e que podem ser reconhecidas por um programa de otimização é:

$$X + x_1 \cdot A_1 \geq x_1 \qquad \text{(B-16)}$$

$$x_1 \cdot B_1 - X \geq 0 \tag{B-17}$$

$$(x_2 - x_1) \cdot B_2 + X \geq x_2 \tag{B-18}$$

$$(x_2 - x_1) \cdot C_1 - X \geq -x_1 \tag{B-19}$$

$$(x_3 - x_2) \cdot C_2 - X \geq x_3 \tag{B-20}$$

$$(x_3 - x_2) \cdot D_1 - X \geq -x_2 \tag{B-21}$$

$$A \leq \begin{cases} A_1 \\ 1 \end{cases} \tag{B-22}$$

$$B \leq \begin{cases} B_1 \\ B_2 \\ 1 \end{cases} \tag{B-23}$$

$$C \leq \begin{cases} C_1 \\ C_2 \\ 1 \end{cases} \tag{B-24}$$

$$D \leq \begin{cases} D_1 \\ 1 \end{cases} \tag{B-25}$$

Condição de não-negatividade (B-26)

$$X = A \cdot x_0 + B \cdot x_1 + C \cdot x_2 + D \cdot x_3 \tag{B-27}$$

$$Y = A \cdot y_0 + B \cdot y_1 + C \cdot y_2 + D \cdot y_3 \tag{B-28}$$

B.2.2. ARTIFÍCIO 2

Este outro artifício também precisa de variáveis auxiliares, mas referidas ao eixo dos ‘X’ e que serão chamadas de XX1, XX2 e XX3, cuja definição é ilustrada na figura B-6.

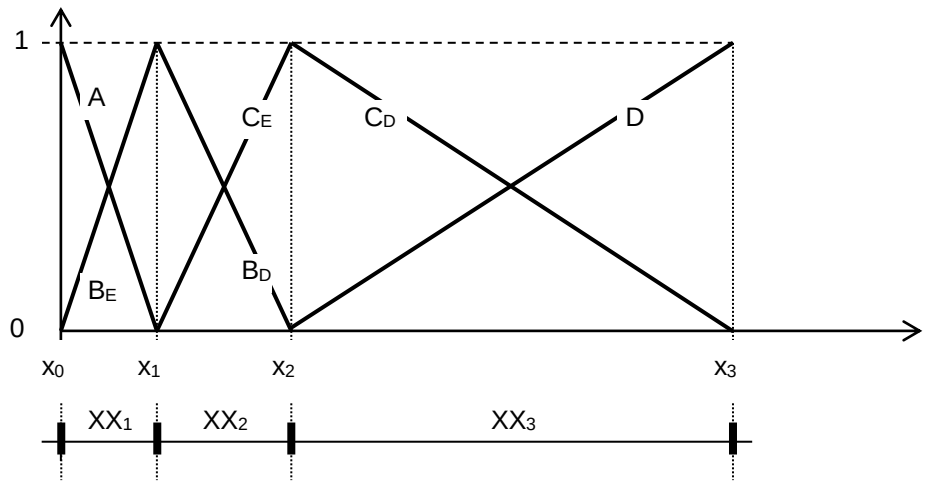

Figura B-6 Definição das variáveis auxiliares

Estas variáveis ficam definidas pelas seguintes equações e inequações:

$$XX_1 \begin{cases} \geq 0 \\ \leq x_1 \end{cases} \tag{B-29}$$

$$XX_2 \begin{cases} = X - x_1 \\ \geq 0 \\ \leq x_2 - x_1 \end{cases} \tag{B-30}$$

$$XX_3 \begin{cases} = X - x_2 \\ \geq 0 \\ \leq x_3 - x_2 \end{cases} \tag{B-31}$$

Estas restrições apresentam furos, devido a que não é possível satisfazê-las a todas simultaneamente. Para contornar este problema precisar-se-á de mais duas variáveis auxiliares provisórias e que chamaremos de $XX2_{aux}$ e $XX3_{aux}$. Elas entram em jogo da seguinte forma:

$$XX2_{aux} \geq X - x_1 \tag{B-32}$$

$$XX3_{aux} \geq X - x_2 \tag{B-33}$$

Então, agora é possível definir inequivocamente as variáveis XX_1 e XX_2:

$$XX_2 \begin{cases} \leq XX2_{aux} \\ \leq x_2 - x_1 \end{cases} \tag{B-34}$$

$$XX_3 \begin{cases} \leq XX3_{aux} \\ \leq x_3 - x_2 \end{cases} \tag{B-35}$$

As expressões que definem A, B, C e D ficam como segue:

$$A = XX_1 \cdot \frac{1}{x_1} \tag{B-36}$$

$$B = XX_1 \cdot \frac{1}{x_1} - XX_2 \cdot \frac{1}{(x_2 - x_1)} \tag{B-37}$$

$$C = XX_2 \cdot \frac{1}{(x_2 - x_1)} - XX_3 \cdot \frac{1}{(x_3 - x_2)} \tag{B-38}$$

$$D = XX_3 \cdot \frac{1}{(x_3 - x_2)} \tag{B-39}$$

Sendo que A, B, C e D tem que satisfazer a seguinte equação:

$$A + B + C + D = 1 \tag{B-40}$$

Finalmente, o conjunto de restrições, expresso em forma reconhecível por um programa de otimização é:

$$X - XX2_{aux} \leq x_1 \tag{B-41}$$

$$X - XX3_{aux} \leq x_2 \tag{B-42}$$

$$XX_1 \leq x_1 \tag{B-43}$$

$$XX_2 - XX2_{aux} \leq 0 \tag{B-44}$$

$$XX_2 \leq x_2 - x_1 \tag{B-45}$$

$$XX_3 - XX3_{aux} \leq 0 \tag{B-46}$$

$$XX_3 \leq x_3 - x_2 \tag{B-47}$$

$$A - XX_1 \cdot \frac{1}{x_1} = 0 \tag{B-48}$$

$$B - XX_1 \cdot \frac{1}{x_1} + XX_2 \cdot \frac{1}{(x_2 - x_1)} = 0 \tag{B-49}$$

$$C - XX_2 \cdot \frac{1}{(x_2 - x_1)} + XX_3 \cdot \frac{1}{(x_3 - x_2)} = 0 \tag{B-50}$$

$$D - XX_3 \cdot \frac{1}{(x_3 - x_2)} = 0 \tag{B-51}$$

$$A,\ B,\ C\ \text{e}\ D \leq 1 \tag{B-52}$$

$$A + B + C + D = 1 \tag{B-53}$$

$$X = A \cdot x_0 + B \cdot x_1 + C \cdot x_2 + D \cdot x_3 \tag{B-54}$$

$$Y = A \cdot y_0 + B \cdot y_1 + C \cdot y_2 + D \cdot y_3 \qquad \text{(B-55)}$$

Condição de não-negatividade (B-56)

B.2.3. Conclusões

Os esquemas de linearização apresentados permitem o ajuste automático de curvas ou relações não-lineares entre variáveis, através de poligonais, sem precisar da programação inteira. Mas uma observação deve ser feita: eles foram desenvolvidos para o caso de uma curva 'côncava'. Porém, o raciocínio feito tem validade para o caso de se ter uma curva 'convexa', sem precisar da 'inversão' das inequações.

B.3. Um Problema Que Não é Incomum

As vezes, no trabalho com recursos hídricos, acontece que a curva de custos das obras hidráulicas em função do volume tem forma côncava, semelhante à curva mostrada no início deste anexo (figua B-3). Então, o que poderia ser feito se o objetivo da otimização é a minimização de custos?

B.3.1. A Solução Proposta

É fácil perceber que no caso de se procurar o mínimo de uma função côncava aplicando a metodologia apresentada no item A.2 deste anexo, o programa de otimização escolherá o primeiro e o último ponto para fazer a combinação linear, ou seja que calculará o custo como pertencente ao segmento (secante) que une estes dois pontos e que não pertence à poligonal aceita como representativa da variação do custo em função do volume (figura B-7). O que fazer então?

Se o problema é maximizar uma função que produz uma curva côncava, a aplicação da metodologia proposta no início deste anexo resolveria o problema: a ordenada da combinação linear de dois pontos consecutivos é sempre maior que a

ordenada da combinação de qualquer outros dois pontos, o que satisfaz a condição de adjacência requerida.

Da mesma forma, se procura-se minimizar uma função que produz uma curva convexa, a metodologia proposta também resolve o problema.

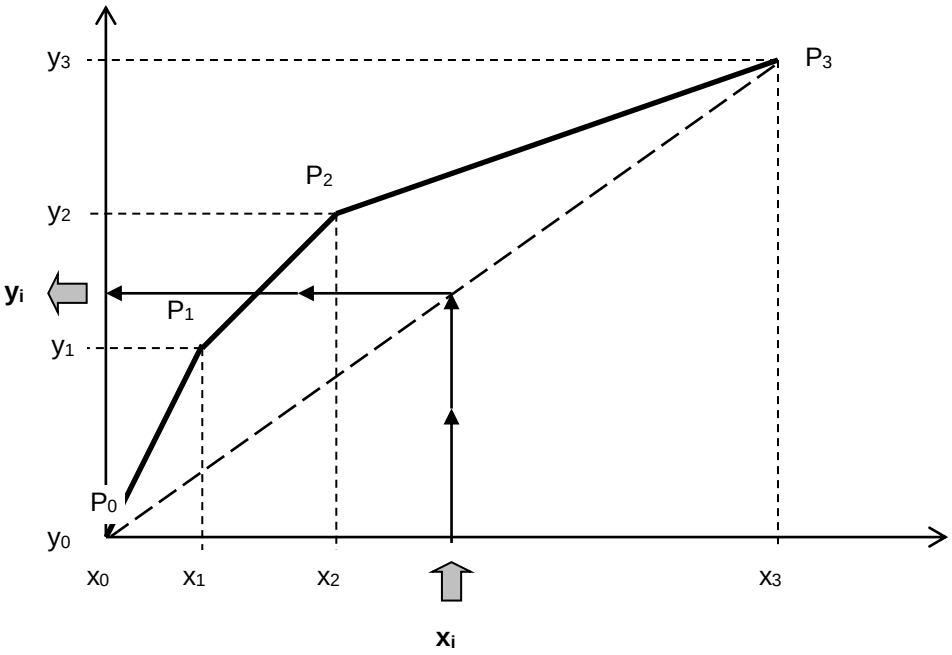

Figura B-7 Problema da minimização de uma curva côncava

Se o problema é minimizar $Y = f(X)$ que produz uma curva côncava, fazendo uma mudança, para expressar X como $X = g(Y)$, ter-se-á uma curva convexa que, pelo visto anteriormente, tem solução garantida aplicando a metodologia proposta neste anexo (figura B-9).

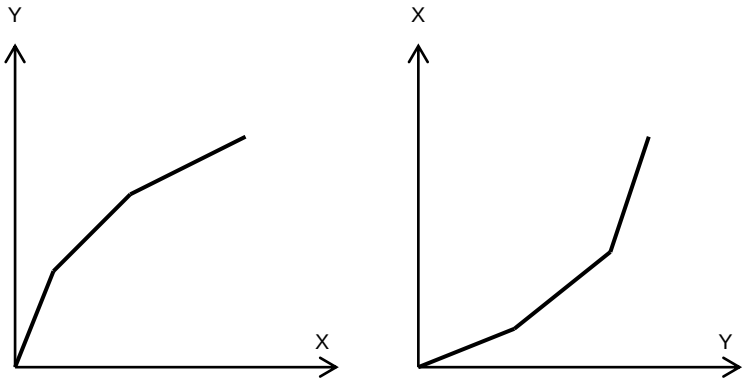

Figura B-8 Mudança de eixos no problema

Então, incorporando o 'mapeamento' dos coeficientes A, B, C, etc., com referência ao eixo das ordenadas, o problema ficaria perfeitamente contornado e fácil de ser resolvido (figura B-10).

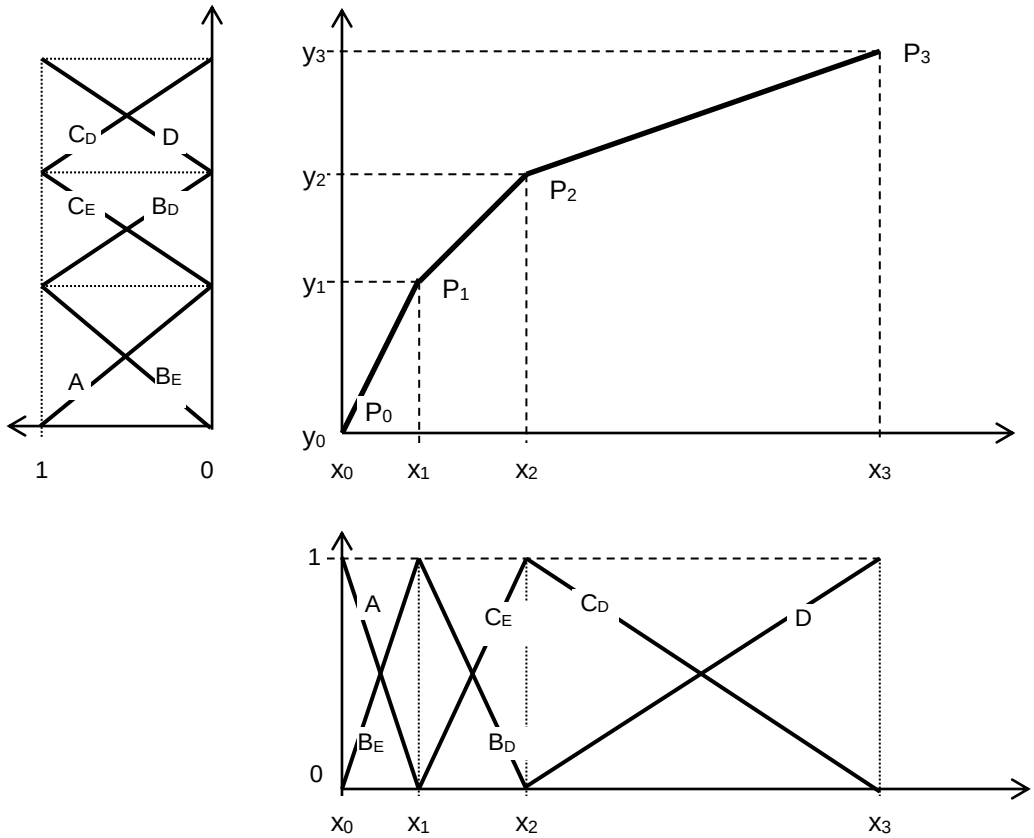

Figura B-9 Mapas dos valores que podem adotar os coeficientes de A, B, C e D

Finalmente, o conjunto de inequações que é preciso incorporar para mapear os coeficientes com referência às ordenadas, para uma poligonal formada por três segmentos, será:

$$Y + y_1 \cdot A_1 \geq y_1 \qquad \text{(B-57)}$$

$$y_1 \cdot B_1 - Y \geq 0 \qquad \text{(B-58)}$$

$$(y_2 - y_1) \cdot B_2 + Y \geq y_2 \qquad \text{(B-59)}$$

$$(y_2 - y_1) \cdot C_1 - Y \geq -y_1 \qquad \text{(B-60)}$$

$$(y_3 - y_2) \cdot C_2 - Y \geq y_3 \qquad \text{(B-61)}$$

$$(y_3 - y_2) \cdot D_1 - Y \geq -y_2 \qquad \text{(B-62)}$$

É preciso salientar que estas restrições seguem os lineamentos do que foi chamado de 'artifício 1'.

B.3.2. Conclusões

A extensão da metodologia proposta no início deste anexo, incorporando o mapeamento dos coeficientes A, B, C, D, etc., com referência ao eixo das ordenadas, permite a aplicação da **PL** a problemas onde os requerimentos de linearidade não podem ser satisfeitos, incluindo problemas de minimização de curvas côncavas e de maximização de curvas convexas.

Se é possível substituir a não-linearidade por uma poligonal, será possível fazer a otimização aplicando **PL** e sem recorrer á programação inteira nem a métodos que aplicam aproximações sucessivas.