

**LOCALIZAÇÃO DE RESERVATÓRIOS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE
OTIMIZAÇÃO EM AMBIENTE DE GEOPROCESSAMENTO: ESTUDO DE CASO
NA BACIA DO RIO CORURIBE, EM ALAGOAS.**

FERNANDO SILVA DE CARVALHO

Porto Alegre, Brasil.
10 de Julho de 2006.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
Em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

**LOCALIZAÇÃO DE RESERVATÓRIOS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE
OTIMIZAÇÃO EM AMBIENTE DE GEOPROCESSAMENTO: ESTUDO DE CASO
NA BACIA DO RIO CORURUPE, EM ALAGOAS.**

FERNANDO SILVA DE CARVALHO
Engenheiro Civil

Orientador: PROF. DR. CARLOS ANDRÉ BULHÕES MENDES
Co-Orientadora: PROF. Dra. CLEUDA CUSTÓDIO FREIRE

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

Porto Alegre, Brasil.
Julho de 2006.

Dedicatória

Dedico este trabalho a meus pais José Maria Carnaúba e Walderez. Aos meus irmãos Gustavo e Waleska. E a minha noiva Amanda.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, o autor da vida, pelo dom de chegar até aqui com saúde, e por estar comigo em todos os momentos (nem sempre fáceis) de avanços, retrocessos, avaliações e decisões inerentes à realização desse trabalho.

Aos meus pais Zequinha e Walderez pelo incondicional amor, por toda a paciência, compreensão e incentivo e aos meus irmãos Gustavo e Waleska pela compreensão, apoio e pelas demonstrações de amor e carinho. Vocês escrevem as páginas mais bonitas deste trabalho, pena não poder expressá-las com letras impressas em papiro, pois estas só são gravadas de maneira efetiva e eterna no coração.

À minha noiva Amanda, por ter acreditado em nosso amor e ter me apoiado desde o princípio, e principalmente, nas horas difíceis desta jornada, varando a noite em telefonemas que acalentavam a saudade e fortificavam-me na busca deste ideal.

Agradeço novamente ao professor e irmão Gustavo Carvalho pela atenção, o incondicional apoio e amor, e principalmente, pelos seus eloqüentes conselhos visando a minha melhor formação acadêmica e pessoal.

Ao conterrâneo professor Carlos André Mendes, meu orientador, pela confiança, insistência e pela sua dedicação.

À professora Cleuda Freire, minha Co-orientadora, que no meu retorno a Maceió, auxiliou na conclusão deste trabalho.

Aos professores do IPH, nas pessoas do Prof. Joel Goldenfun, Carlos Tucci, Alfonso Riso, Olavo, Antônio Eduardo Lanna. Ao professor André Silveira, que me ajudou no ingresso do mestrado com sua atenção e dedicação na busca do financiamento desta pesquisa através da FAPEAL.

À COHIDRO nas pessoas de Dr. Wellington Lou e Jerônimo Lima e aos, hoje, companheiros de trabalho, Alexandre Barros e Clebenilson..

Ao IPH pela estrutura e boa vontade de todos que fazem este instituto.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Alagoas – FAPEAL, financiadora desta pesquisa.

Aos mestres da UFAL, que me incentivaram e abriram o caminho para esta pesquisa. Em especial ao professor Silvio Chagas, meu tio, que me auxiliou na conclusão desta pesquisa.

Minha gratidão aos amigos conquistados nesta estada em Porto Alegre, nas pessoas de Márcio Giacomoni, Adalberto, Cristiane Battiston, Janaíne, Fernanda, Angélica, Eduardo, Lidiane, Martin Romagnoli, Maurício Dai Pra, Nicolás, Mônica, Richard Ducker, Walter e Bruno Collischon, Daniel Alasia, Dante Larentis, André Petry e aos nordestinos Adriano Rolim, Francis e Marcos Cruz, Uziel, Tarciana, Alana e Carlos André Paiva (doidão),

Aos amigos alagoanos, que compartilharam muito com a conclusão desta etapa de minha vida: Sidnei e Karina, Marllus e Manuela, Walter e Cris, Laura Acioli, LG e Rys, Teresa, Regina e Rodrigo.

Sou eternamente grato pelo acolhimento dos gaúchos Diego Carrilo e sua esposa Marilu, ao mesmo tempo que estendo o agradecimento a toda a família: Filipe, Fabíola, Sandra e Miguel. Um agradecimento especial ao casal gaúcho Ane Lourdes e Roger que participaram também da família alagoana formada em POA.

Aos zooamigos da Cauduro, pelo companheirismo da família formada. Aqueles que viram minhas vitórias e derrotas no mestrado, mas que acima de tudo torciam, como uma família, pelas conquistas e pelo reergimento nas batalhas perdidas. Não posso deixar de identificá-los com seus passageiros nomes: Peru, Galo de briga, Bode, Capivara e Pato (Baronesa).

Aos demais amigos, por saber que poderia contar com eles a todo e qualquer momento, mesmo quando que pela simples presença. Aqueles que aqui não foram lembrados, mas que certamente contribuíram com este êxito e estão marcados em meu coração.

Resumo

O planejamento estratégico de reservatórios em uma bacia carece de uma análise multidimensional, pois os objetivos inerentes a cada projeto podem ser conflitantes por natureza, necessitando que a análise do projeto considere que ao tentar satisfazer todos os objetivos simultaneamente, seria impossível encontrar uma situação ótima. Por isso, a necessidade de abordar os problemas relativos ao planejamento do ponto de vista multiobjetivo.

Esta pesquisa verificou a aplicabilidade da Programação Compromisso, como técnica multiobjetivo, para a localização ótima de reservatórios, realizando uma análise multiobjetivo condicionando os critérios e restrições, determinados pelas características da bacia e de seus usuários para a melhor solução das funções objetivo.

No entanto, este planejamento foi aperfeiçoado com a aplicação em ambiente de geoprocessamento, permitindo o armazenamento, análise e representação de dados espaciais ou não espaciais. Para tanto foram utilizados os dados das demandas na bacia de estudo; do Modelo Numérico do Terreno; dados de armazenamento do solo; uso do solo e índice de aridez, além daquelas restrições que impossibilitam a implantação de reservatórios, como por exemplos, áreas urbanas e estradas.

A aplicação foi feita na bacia do rio Coruripe, no Estado de Alagoas. Esta bacia foi escolhida por possuir características que possibilitam a aplicação da metodologia. Além disso, verifica-se a necessidade de estudos para a localização de reservatórios, principalmente, no que tange o atendimento à demanda gerada pelas áreas irrigadas e às indústrias de açúcar e álcool.

Apesar dos resultados indicarem uma possível solução, não cabe ao analista apontar uma solução imediatamente, ficando facultativo aos tomadores de decisão a melhor solução a partir de um consenso entre os mesmos. Isto acontece devido à possível mudança nos objetivos a serem alcançados, pois caberá a cada potencial tomador de decisões a função de privilegiar um aspecto a outro que considere menos importante.

Abstract

The strategical planning of reservoirs in a basin requires a multidimensional analysis, therefore the objectives inherent to each project can be conflicting by nature, requiring that the analysis of the project consider that when trying to satisfy the objectives all simultaneously, it would be impossible to find an optimum situation. Therefore, the necessity to approach the problems related to the planning from the multiobjective point of view.

This research verifies the applicability of the Programming Commitment, as multiobjective technique, for the implantation of optimum localization of reservoirs, thus carrying through a multiobjective analysis conditioning the criteria and restrictions, determined for the characteristics of the basin and its users, for the best solution of the objective functions.

However, this planning can be improved when applied in a geoprocessing environment, allowing the storage, analysis and representation of space or non-spatial data. Data used include the demands in the study basin the Digital Terrain Numeric; data of storage capacity of the soil; land use and index of dryness, in beside restrictions that preclude the implantation of reservoirs, for instance, the urban areas and roads.

The application was done in the basin of the river Coruripe, in the State of Alagoas. This basin was chosen for it has characteristics that make possible the application of the methodology. Moreover, here is a used of studies for the localization of reservoirs, mainly, in that it refers to satisfying the demand generated by the irrigated areas and the industries of sugar and alcohol.

Despite the results indicating a solution, it is not of the analyst to point out a solution immediately, being facultative to the decision moreless the best solution from a consensus amongthem. This happens due to the possible change in the objectives to be reached, because it is to role decision maker to give more importance to aspects that he consider more relevant..

SUMÁRIO

Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Lista de Figuras.....	x
Lista de Quadros.....	xi
Lista de Siglas.....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Definição do Problema.....	1
1.2. Justificativa.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Estrutura da dissertação.....	4
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. Gerenciamento dos Recursos Hídricos.....	5
2.2. Análise Sistêmica dos Recursos Hídricos.....	7
2.3. Análise multiobjetivo.....	9
2.3.1. Formulação de um problema multiobjetivo.....	10
2.3.2. Terminologia para análise multiobjetivo.....	13
2.4. Métodos de otimização multiobjetivo.....	15
2.5. Programação Compromisso.....	18
2.6. O uso dos Sistemas de Informações Geográficas.....	25
2.7. Aplicação conjunta da Programação Compromisso e dos Sistemas de Informações Geográficas em planejamento de recursos hídricos.....	28
3. Metodologia.....	37
3.1. Procedimentos e ferramentas empregadas.....	38
3.2. Identificação dos usuários e priorização dos usos da água.....	39
3.3. Identificação dos objetivos, variáveis decisórias e restrições para localização de reservatórios.....	40
3.3.1. Identificação dos Objetivos.....	41
3.3.2. Equacionamento.....	42
3.3.3. Padronização de mapas e dados.....	43
3.4. Aquisição do Banco de Dados.....	44
3.4.1. Modelo numérico do terreno (MNT).....	44
3.4.2. Classificação do Solo.....	46
3.4.3. Uso do solo.....	47
3.4.4. Superfície de Precipitação, Evapotranspiração.....	48
3.4.5. Demanda hídrica.....	51

3.5. Aplicação da Técnica Programação Compromisso	52
4. Área de Estudo	56
4.1. Aspectos Físicos e Climatológicos.....	59
4.1.1. Modelo Numérico do Terreno	59
4.1.2. Classificação do Solo	60
4.1.3. Cobertura Vegetal.....	61
4.1.4. Climatologia	62
4.2. Rede Hidrométrica.....	63
4.3. Usuários e Demandas Hídricas.....	65
4.4. Plano atual de reservatórios na bacia.....	68
5. Aplicação e Resultados	71
5.1. Usuários e prioridades.....	71
5.2. Identificação dos objetivos, variáveis decisórias e restrições para a localização de reservatórios.	72
5.2.1. Atendimento ao abastecimento humano.....	74
5.2.2. Atendimento à demanda para dessedentação animal.	74
5.2.3. Atendimento à demanda para Agroindústria.....	75
5.2.4. Atendimento à irrigação.....	75
5.2.5. Restrições de Ordem Física.....	75
5.3. Formulação das alternativas de <i>layout</i> de reservatórios - Cenários.....	76
5.4. Preparação dos dados e mapas.....	84
5.4.1. MNT.....	84
5.4.2. Mapas de demandas	85
5.4.3. Mapas de distâncias	85
5.4.4. Mapas de restrições absolutas.....	86
5.4.5. Mapas de índice de aridez	88
5.4.6. Mapas de uso do solo e infiltração	89
5.4.7. Relação Cota x Área x Volume.....	90
5.4.8. Resultados das Funções Objetivo.....	91
5.5. Análise dos dados.....	95
5.6. Aplicação da programação compromisso.....	96
5.7. Discussão dos resultados	103
6. Conclusões e Recomendações	111
6.1. Conclusões.....	111
6.2. Recomendações:.....	113
7. Referências Bibliográficas	114
ANEXOS	118

Lista de Figuras

Figura 2.1– Planejamento via simulação e otimização	9
Figura 2.2 - Curvas de conceitos da análise multiobjetivo.....	12
Figura 2.3 – Região não dominadas no espaço das decisões.....	13
Figura 2.4 – Região viável do espaço dos objetivos	14
Figura 2.5- Fronteira decisória com dois objetivos opostos.	20
Figura 2.6- Ilustração da programação compromisso com dois objetivos opostos.....	21
Figura 2.7 –Objetos geográficos e sua representação espacial.....	26
Figura 2.8 – Representação <i>raster</i>	27
Figura 2.9– Exemplificação da representação (a) vetorial e (b) <i>raster</i>	27
Figura 2.10 - Dados usados para localização de reservatórios	34
Figura 2.11– Resultado da localização do reservatório de cheias (sem escala).....	35
Figura 3.1.– Fluxograma com etapas do trabalho.	38
Figura 3.2.– (1) Depressão, (2) Preenchimento Efetuado.	45
Figura 3.3 – Direção do escoamento para um conjunto de células 3x3.	46
Figura 3.4 – Fluxograma com as etapas da aplicação da Programação Compromisso.....	53
Figura 4.1 – Localização geográfica da Bacia do Rio Coruripe	56
Figura 4.2 – Divisão municipal.....	57
Figura 4.3 - MNT da Bacia do Rio Coruripe.	59
Figura 4.4 – Textura do Solo segundo PDRH do Coruripe.....	62
Figura 4.5 - Uso do Solo na Bacia do Coruripe no ano 2000.....	63
Figura 4.6 - Localização dos postos pluviométricos e fluviométricos	65
Figura 4.7 - Localização das barragens Coruripe I e Coruripe II previstas no PDRH.....	70
Figura 5.1 – Esquema dos Pontos de Captação(Controle)	73
Figura 5.2 – Esquema das Alternativas I e II.....	78
Figura 5.3 – Esquema das Alternativa III e IV	81
Figura 5.4– Esquema da Alternativa V	83
Figura 5.5 – Esquema das cinco alternativas analisadas	84
Figura 5.6– Demandas da bacia	85
Figura 5.7– Mapas de distância dos reservatórios	86
Figura 5.8 – Restrições absolutas.....	87
Figura 5.9 – Índice de Aridez Mensal	88
Figura 5.10 – (a) Mapas de uso do solo e (b) Infiltração.....	89
Figura 5.11– Comparação dos resultados para $\alpha = 1$ e $p = 1$	103
Figura 5.12 - Comparação dos resultados para $\alpha = 2$ e $p=1$	104
Figura 5.13 - Comparação dos resultados para $\alpha = \infty$	105
Figura 5.14 - Comparação dos resultados para $\alpha = 1$ e $\alpha = 2$ (para situação (b))	106
Figura 5.15 - Comparação dos resultados para $\alpha = \infty$ (para situação (b)).....	106
Figura 5.16 - Comparação dos resultados para $\alpha = 1$ e $\alpha = 2$ (para situação (c))	107
Figura 5.17 - Comparação dos resultados para $\alpha = \infty$ (para situação (c))	107
Figura 5.18 - Comparação dos resultados para $\alpha = 1$ e $\alpha = 2$ (para situação (d))	108
Figura 5.19 - Comparação dos resultados para $\alpha = \infty$ (para situação (d)).....	108

Lista de Quadros

Quadro 2.1- Passos da metodologia de planejamento de problemas multiobjetivos	10
Quadro 2.2 - Um exemplo de não-inferioridade	11
Quadro 2.3 - Valores de variáveis de decisões e objetivos para o problema simples.....	14
Quadro 2.4 – Trabalhos com aplicação de técnicas multiobjetivo e casos nacionais.....	17
Quadro 2.5 - Valores máximos e mínimos	23
Quadro 2.6- Valores da Programação Compromisso com $\alpha = 1$	23
Quadro 2.7- Valores da Programação Compromisso com $\alpha = 2$	23
Quadro 2.8- Valores da Programação Compromisso com $\alpha = \infty$	24
Quadro 2.9– Matriz de Avaliação das alternativas de recursos hídricos.....	29
Quadro 2.10– Distância L_s	30
Quadro 2.11 - Resumo de diferentes sistemas de localização dos reservatórios	36
Quadro 3.1 – Reclassificação da Pedologia.....	47
Quadro 3.2 – Reclassificação do uso do solo quanto à aptidão para reservatórios.....	48
Quadro 4.1 – Percentuais de participação em área da bacia do rio Coruripe por município (IBGE:2000).....	57
Quadro 4.2- Áreas e populações dos municípios na Bacia.....	58
Quadro 4.3- Critérios para classificação do solo e seu uso para irrigação	60
Quadro 4.4- Classificação do PDRH do rio Coruripe e a classificação para a pesquisa.....	61
Quadro 4.5– Posto de bases meteorológicas e pluviométricas utilizados nos estudos.....	64
Quadro 4.6- Inventário das Estações Fluviométricas.....	64
Quadro 4.7- Demanda anual para abastecimento urbano	67
Quadro 4.8- Rebanhos inseridos na bacia.....	67
Quadro 4.9– Demanda hídrica para o processo industrial das Usinas	68
Quadro 4.10- Demandas totais na bacia do Coruripe.....	68
Quadro 5.1– Prioridades de uso para as águas em Alagoas	71
Quadro 5.2– Ordem de prioridade adotada para a bacia do rio Coruripe.....	72
Quadro 5.3. – Pontos de Captação (Controle)	72
Quadro 5.4- Alternativa I.....	78
Quadro 5.5- Pontos de captação (controle) atendidos	78
Quadro 5.6 - Alternativa II	79
Quadro 5.7 - Pontos de captação (controle) atendidos	80
Quadro 5.8- Alternativa III (Cenário I)	80
Quadro 5.9- Alternativa III (Cenário II).....	80
Quadro 5.10- Pontos de captação (controle) atendidos	81
Quadro 5.11 - Pontos de captação (controle) atendidos	81
Quadro 5.12- Alternativa III	82
Quadro 5.13- Alternativa V	82
Quadro 5.14- Pontos de captação (controle) atendidos	83
Quadro 5.15 – Valores referentes à posição dos reservatórios no mapa de aridez	88
Quadro 5.16- Valores referentes à posição dos reservatórios nos mapas de uso do solo e infiltração	89

Quadro 5.17 - Valores referentes à relação área/volume para alternativas	90
Quadro 5.18 – Resultado das Funções Objetivo para ponderadores iguais.....	91
Quadro 5.19 – Resultado das F.O. dando maior importância ao desnível geométrico.	92
Quadro 5.20 – Resultado das F.O. dando maior importância a distância (c)	93
Quadro 5.21 – Resultado das F.O. dando maior importância a demanda (d).....	94
Quadro 5.22 - Matriz de entrada alternativa de projetos <i>versus</i> objetivos	96
Quadro 5.23 - Matriz de avaliação adicionada aos valores extremos dos sistemas.....	96
Quadro 5.24 - Padronização da matriz de entrada para $p = 1$ e $p = 2$	96
Quadro 5.25 - Padronização da matriz de entrada para $p = \infty$	97
Quadro 5.26 – Cálculo de l_p^j	97
Quadro 5.27 - Menores distâncias entre as soluções ideais e suficientes.....	97
Quadro 5.28 – Solução minimax.....	97
Quadro 5.29 – Padronização da matriz de entrada para $\alpha = 2, p = 1$ e $\alpha = 2, p = 2$	98
Quadro 5.30 - Padronização da matriz de entrada para $\alpha = 2$ e $p = \infty$	98
Quadro 5.31 - Padronização da matriz de entrada para $\alpha = \infty, p = 1$ e $\alpha = \infty, p = 2$	98
Quadro 5.32 - Padronização da matriz de entrada para $\alpha = \infty$ e $p = \infty$	98
Quadro 5.33 – Cálculo de l_p^j para $\alpha = 2$	99
Quadro 5.34 – Cálculo de l_p^j para $\alpha = \infty$	99
Quadro 5.35 - Menores distâncias entre as soluções ideais e suficientes.....	99
Quadro 5.36 – Solução minimax para $\alpha = 2$ e $\alpha = \infty$	99
Quadro 5.37 - Matriz de avaliação acrescidos dos valores extremos dos sistemas	100
Quadro 5.38 – Cálculo de l_p^j	100
Quadro 5.39 - Menores distâncias entre as soluções ideais e suficientes.....	100
Quadro 5.40 - Matriz de avaliação acrescidos dos valores extremos dos sistemas	101
Quadro 5.41 – Cálculo de l_p^j	101
Quadro 5.42 - Menores distâncias entre as soluções ideais e suficientes.....	101
Quadro 5.43 - Matriz de avaliação acrescidos dos valores extremos dos sistemas	101
Quadro 5.44 – Cálculo de l_p^j	102
Quadro 5.45 - Menores distâncias entre as soluções ideais e suficientes.....	102

Lista de Siglas

- ANA → Agência Nacional de Águas
ANEEL → Agência Nacional de Energia Elétrica
ASSUCAL → Associação das Usinas de Açúcar e Alcool de Alagoas.
DNAEE → Departamento Nacional de Águas e Energia
DNOCS → Departamento Nacional de Obras Contra Secas
ESAB → Escola Superior Agrária de Beja
ETE → Estação de Tratamento de Esgoto
GPS → Sistema de Posicionamento Global
IBAMA → Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE → Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFOCS → Inspetora Federal de Obras Contra a Seca
IMA → Instituto do Meio Ambiente
INMET → Instituto Nacional de Meteorologia
IOCS → Inspetoria de Obras Contra a Seca
MMA → Ministério do Meio Ambiente
MNT → Modelo Numérico do Terreno
NMRH-AL → Núcleo de Meteorologia e Recursos Hídricos de Alagoas
PDRH → Plano Diretor de Recursos Hídricos
P.L → Programação Linear
P.C → Ponto de Controle
RMSP → Região Metropolitana de São Paulo
SEMARHN / AL → Secretaria Executiva de Meio Ambiente, Recursos Hídricos e Naturais
SEPLANDES → Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento
SIG → Sistema de Informações Geográficas
SUDENE → Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
UFRGS → Universidade Federal do Rio Grande do Sul

1. Introdução

Ao longo da história, o homem parece acreditar que a água nunca faltará. Porém, diante do quadro de crescimento populacional e da utilização desordenada e ineficiente, parece que esta percepção não se sustenta. O Brasil não foge à regra no que se refere ao uso ineficiente da água. No entanto, o desenvolvimento dos usos dos recursos hídricos ainda é incipiente se levado em conta todo o território nacional, não possuindo atualmente uma infraestrutura apropriada na busca de um aproveitamento ordenado destes recursos.

Em geral, o planejamento do uso dos recursos hídricos carece de uma análise multidimensional, pois os objetivos inerentes a cada projeto podem ser conflitantes por natureza, necessitando que a análise do projeto considere que, ao tentar satisfazer todos os objetivos simultaneamente, seria impossível encontrar uma situação ótima. Desta feita, é necessária a análise de soluções possíveis. Por isso, a necessidade real seria abordar os problemas relativos ao planejamento sob o ponto de vista multiobjetivo.

1.1. Definição do Problema

A atual escassez hídrica indica uma necessária e benéfica intervenção antrópica, principalmente em locais com regimes hídricos desfavoráveis, como é o caso do nordeste brasileiro, onde a intensificação da ocupação agrícola, urbana e/ou industrial combinada com condições climáticas desfavoráveis geram demandas de água que não são atendidas apenas com a capacidade natural de fornecimento.

Um fator causador desta necessidade de intervenção é a sazonalidade das vazões. Estas têm como consequência a ocorrência de excessos hídricos em períodos úmidos, assim como o déficit hídrico em períodos secos, sendo natural o planejamento por parte do homem para solucionar ou apaziguar estas situações, permitindo que as vazões excedentes nos períodos úmidos sejam reservadas para a utilização nos períodos mais secos.

A área escolhida para estudo foi a bacia do rio Coruripe no Estado de Alagoas que é conhecido historicamente como um dos maiores produtores de cana-de-açúcar do país e possui na atividade agrícola a base de sua economia. O Rio Coruripe é considerado de domínio estadual, em virtude de ter todo o seu percurso inserido no território do estado, e é considerado um dos mais importantes sistemas hídricos componentes da complexa rede hidrográfica alagoana.

Os estudos elaborados e apresentados no plano diretor de recursos hídricos (PDRH) indicam que o aproveitamento dos recursos hídricos dependerá da implantação de reservatórios de regularização, uma vez que a demanda hídrica da irrigação e industrial de algumas das principais usinas de açúcar e álcool do Estado, e que estão localizadas na bacia do Rio Coruripe, não estão em pleno atendimento. Aliado a esta escassez, o abastecimento da cidade de Teotônio Vilela também enfrenta atualmente sérias deficiências.

Embora seja uma solução apontada no PDRH, são necessários estudos com maior embasamento científico, pois a localização de reservatórios de regularização na bacia despertou grande interesse em todos os segmentos de usuários e nas lideranças políticas da região, gerando discussões e criando expectativa de que os estudos de viabilidade desses barramentos possam ser iniciados.

Diante do quadro de escassez da área em estudo, é tácito que o recurso hídrico é altamente pleiteado e seu planejamento é indispensável para um melhor desenvolvimento econômico da bacia. Este planejamento deve alcançar o ótimo quando se trata de atendimento à demanda para a irrigação das lavouras, das indústrias, da piscicultura e principalmente para o abastecimento humano.

1.2. Justificativa

Nos projetos de construção de reservatórios para a regularização de vazões devem ser considerados diferentes usos da água, além dos objetivos a serem alcançados com sua construção. Deste modo, a localização do reservatório possui uma fundamental importância para o melhor planejamento do uso do recurso na bacia. Isto se deve ao fato do reservatório de regularização, além de atender aos aspectos socioeconômicos e ambientais, dever também estar associado à geomorfologia da área e a outros fatores condicionantes do meio físico, como por exemplo, a topografia, a morfologia do rio, condições geológicas-geotécnicas, distância de transporte da água, a qualidade dos materiais de construção, condições hidrológicas, condições de desvio do rio, entre outros.

Desta forma, a pesquisa foi realizada utilizando técnica multiobjetivo. Para tanto foi escolhida a Programação Compromisso, que se baseia em propriedades como geração de soluções factíveis, ausência de dominância entre grupos e neutralidade. Estas propriedades fazem com que os modelos de Programação Compromisso sejam promissores para localização de reservatórios que utilizam tendências ótimas ao invés de valores determinados

por especialistas. Sendo assim, além de buscar as melhores soluções, buscam-se aquelas que satisfaçam a todos os objetivos, mesmo que não completamente.

Na busca do melhor planejamento de reservatórios em uma bacia, algumas ferramentas têm sido comumente utilizadas. Dentre elas, a utilização de informações geográficas vêm registrando um aperfeiçoamento significativo nesta escolha. Neste contexto, o SIG (Sistema de Informações Geográficas) se insere como uma tecnologia de informação que permite o armazenamento, análise e representação tanto de dados espaciais como de dados não espaciais. Considerando o uso das informações geográficas, uma importante e utilizada ferramenta adicional de apoio à tomada de decisão, o geoprocessamento, permite modelar espacialmente os critérios escolhidos para representar os processos e funções relevantes para a seleção de locais de barramentos, quando a variável ambiental é inserida no processo decisório (Cruz & Pereira Filho, 2005).

O planejamento dos recursos hídricos no Estado de Alagoas ainda é incipiente e necessita de embasamentos científicos que poderão servir de ferramentas auxiliando nas decisões tomadas na bacia. Uma dessas decisões se refere à identificação dos objetivos a serem alcançados com a implantação de reservatórios na bacia e que são discutidos nesta pesquisa.

Além disso, a localização de reservatórios na bacia ainda está sendo discutida pelos tomadores de decisões, deixando claro a necessidade que, através de estudos científicos, se disponha de um esquema que permita comparar diversas alternativas para a localização de reservatórios baseados nos múltiplos objetivos apontados pelo uso múltiplo da água na bacia, sendo exatamente este o objeto do presente trabalho.

1.3. Objetivos

O aumento das demandas por água ao longo do tempo vem tornando alguns locais que no passado possuíam abundância hídrica a em regiões com carência de água. Conseqüentemente, o grande desafio do planejamento dos recursos hídricos é atender aos usos múltiplos da água, minimizando os problemas gerados por esta carência.

Inserida neste contexto, a pesquisa tem como principal objetivo analisar a aplicabilidade da Programação Compromisso como técnica de otimização para a localização de reservatórios, utilizando, para esta finalidade, o ambiente de geoprocessamento. Este ambiente foi adotado por permitir uma maior integração dos dados e um aperfeiçoamento significativo da pesquisa.

O problema analisado não possuirá apenas uma solução. Isto se deve ao fato de que a compreensão do mesmo não é única. Diante disso, a pesquisa é compelida a analisar a sensibilidade dos parâmetros da Programação Compromisso, possibilitando que sejam desenvolvidas condições que fomentem e orientem as discussões sobre a seleção de reservatórios.

1.4. Estrutura da dissertação

O texto está estruturado em seis capítulos, incluindo esta Introdução. O Capítulo 2 apresenta a revisão de literatura onde são abordados a análise multiobjetivo, os métodos de otimização e o uso conjunto de técnicas multiobjetivo com sistemas de informações geográficas (SIG). A metodologia, apresentada no capítulo 3, indica as ferramentas e a estrutura do estudo realizado. No capítulo 4 é descrita a área escolhida para o estudo de caso. As simulações e resultados estão organizados, de forma conjunta no capítulo 5. Por fim, no Capítulo 6 estão as conclusões e as recomendações do trabalho.

2. Revisão Bibliográfica

Esse capítulo tem como meta apresentar as necessidades e soluções para planejamento e a gestão dos recursos hídricos. Entretanto, a pesquisa bibliográfica é compelida a apresentar soluções provenientes de uma análise multiobjetivo, e a experiência da utilização de técnicas multiobjetivos, em especial a Programação Compromisso, em ambiente de geoprocessamento, uma vez que se trata do objeto principal e motivador desse trabalho.

2.1. Gerenciamento dos Recursos Hídricos

O planejamento dos recursos hídricos pelo homem não é novidade. No Egito antigo, por exemplo, as obras de barragens no Rio Nilo e os tanques de nivelamento dão indícios desta preocupação. Ainda na idade antiga, existem especulações de que o lago Méris, no oásis de Faium, próximo do Cairo, era usado para a regularização de vazões do Rio Nilo, através de um canal de desvio de águas. Mas a preocupação com os recursos hídricos também se estende às cheias e para medí-las foram desenvolvidos nilômetros (espécie de fluviômetro). Por outro lado, os Maias teriam abandonado suas cidades, provavelmente, pela carência de água e erosão do solo. (Liebman, 1979 *apud* Silva, 1998).

Já na Idade Média, a preocupação com o uso da água aumentou basicamente por causa das necessidades de seu uso para o abastecimento humano e, principalmente, por causa das epidemias de doenças relacionadas à água. Este período foi marcado por epidemias, pois sem os tratamentos da água e a coleta dos esgotos, aliado ao fato dos hábitos higiênicos serem pouco considerados, as epidemias proliferaram.

No Brasil, segundo Silva (1998), a preocupação com o uso da água teve início com a preocupação com a saúde pública, possuindo registros no período colonial onde o abastecimento público era realizado basicamente por chafarizes e aquedutos, sendo o Rio de Janeiro, a então capital do Brasil, a pioneira no transporte de água através de aqueduto. Posteriormente, a captação de água para abastecimento passou a ser realizada individualmente nos mananciais. Isto tornava o acesso à água minoritário o que veio a mudar com a instituição da república.

Abordando a necessidade de abundância de água no nordeste, verifica-se que de um modo geral ocorreram em média 9 (nove) secas por século, uma a cada 11 (onze) anos. Apesar de afetarem índios e os primeiros colonizados, as secas dos séculos XVI e XVII não tiveram grande impacto, devido ao número reduzido de habitantes e à abundância de recursos

naturais que minimizavam os efeitos da seca (Brito Guerra, 1981 *apud* Ministério do Meio Ambiente, 2005). A partir do século XVIII, começam a acontecer secas de maior gravidade, como a de 1777-1788, quando restou apenas 1/8 do gado da capitania do Ceará. Dentre as secas que causaram maiores prejuízos, destaca-se, sobremaneira, a seca de 1877-1879, que ocasionou a perda de mais de meio milhão de vidas. Isto ocorreu também devido à total falta de preparo das autoridades para enfrentar o problema. De fato, caso houvesse açudes para coletar precipitações isoladas que aconteceram na região, muitas tragédias seriam evitadas. Esta seca ficou conhecida como a "seca grande" e motivou o império a tomar as primeiras medidas para combater os efeitos das estiagens no nordeste.

No início do século passado, em 1909, foi criada a IOCS (Inspetoria de Obras Contra a Seca), que veio posteriormente, em 1919, a ser chamada de IFOCS (Inspetora Federal de Obras Contra a Seca). No ano de 1945 um fato muito importante na luta contra as secas foi a criação do (DNOS) Departamento Nacional de Obras de Saneamento que ficou incumbido da execução das obras de drenagem, aterros e canais, e também com a responsabilidade da construção dos sistemas de águas e esgotos em todo país. Porém, estes serviços seriam de responsabilidade das administrações municipais (DNOCS, 2004). No entanto, o grande salto foi a criação da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), pois, a partir da sua criação se tornaram mais fáceis os financiamentos para o desenvolvimento da região. Na década de 1980 foi instituída a Política Nacional do Meio Ambiente e, posteriormente, com a criação do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) em 1989 obteve-se um impulso na valorização da água.

A partir da Lei Federal 9.433/97, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, o cenário do gerenciamento dos recursos hídricos mudou, pois a lei foi criada basicamente para fornecer instrumentos legais a fim de disciplinar os múltiplos usos da água. O mais importante elemento surgido nos últimos anos foi a criação da ANA (Agência Nacional de Águas) que é uma autarquia sob regime especial com autonomia administrativa e financeira, vinculadas ao Ministério do Meio Ambiente. Cabe à ANA a implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos.

Em Alagoas, a Lei estadual Nº 5.965/97 que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e institui o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos de Alagoas, é a responsável pelo cumprimento, complemento e detalhamento, a nível estadual, dos tópicos da lei federal 9.433/97. A Lei Estadual, assim como a Federal, prega que a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada, participativa e integrada, com o concurso do

Poder Público, dos usuários e das comunidades, e os recursos hídricos deverão ser reconhecidos como instrumento indutor do desenvolvimento sócio-econômico do Estado.

A descentralização, participação e integração dos setores são fatores essenciais para uma gestão mais democrática, sem favorecimento para aqueles que têm dinheiro. Esse fundamento se fortalece com as criações dos comitês de Bacias Hidrográficas que são organizações legalizadas composta pelos três setores (público, civil e usuários) com objetivo principal servir como fórum de discussões sobre o uso e preservação dos recursos hídricos da região hidrográfica em questão.

A participação do poder público e dos usuários é notável no planejamento e gerenciamento, possuindo a tendência de uma abordagem sistêmica dos problemas, fazendo com que os estudos evoluam a cada dia na busca de minimizar as secas e dispor de melhores opções para o pleno uso do recurso hídrico.

2.2. Análise Sistêmica dos Recursos Hídricos

A complexidade dos problemas relacionados à melhor utilização dos usos dos recursos hídricos implica em tratar estas questões como um sistema. Lanna (2002) afirma que a abordagem sistêmica está relacionada à abstração, ou simplificação, de um problema complexo de uma maneira que só são levadas em conta as informações mais relevantes para a sua solução.

Como exemplo de uma análise sistêmica pode-se citar o presente trabalho, pois a bacia do rio Coruripe constitui um sistema, composto por subsistemas que sob certos estímulos e condições de contorno, reagem gerando saídas.

Icid (1980) *apud* Luz (1994), conceituou uma formulação geral em que a “Análise sistêmica é um procedimento de solução de problemas por meio do qual a inter-relação de cada parte do problema com todas as outras é considerada, assim como as inter-relações entre os objetivos e os meios para as suas realizações. É freqüentemente empregada quando dados requeridos para solução de um problema não podem ser obtidos diretamente por observação. Neste caso, o projeto pode ser considerado como um subsistema de um certo sistema ou como uma combinação de subsistemas em interação com outros sistemas”.

Segundo Santana (1998), um sistema pode ser definido neste contexto como sendo uma combinação de partes coordenadas para produzir um mesmo resultado, ou de maneira a formar um conjunto para solução.

Os modelos podem ser um exemplo lógico de uma coordenação de um sistema, possuindo características otimizantes ou não. Os otimizantes buscam uma solução final obtida pela minimização ou maximização de uma função-objetivo. Já os modelos não otimizantes são utilizados de forma iterativa, buscando as melhores soluções.

Ainda segundo Santana (1998), os problemas de planejamento de recursos hídricos abordados com técnicas de otimização são bastante complicados e de difícil solução. Esta colocação foi particularmente válida nas duas últimas décadas, devido à falta de conhecimento geral das variáveis envolvidas no processo, bem como das limitações de máquinas (computadores) para resolvê-los. Durante este período, as técnicas de otimização se desenvolveram de forma significativa, devido às necessidades impostas naturalmente e aos avanços tecnológicos.

Como técnicas otimizantes são exemplificadas as Programações Lineares, Programação Dinâmica e a Programação não-dinâmica.

A Programação Linear (P. L) é a técnica mais conhecida e utilizada nas soluções de problemas de otimização. A P.L caracteriza-se pela existência de uma função-objetivo e funções de restrições que são apresentadas sob a forma de equações lineares. Desta feita, constitui uma simplificação do sistema em estudo.

A programação não-linear utiliza, entre outras alternativas, técnicas de linearização de funções para que posteriormente as mesmas sejam utilizadas de maneira semelhante à Programação Linear. Podem-se também utilizar algumas técnicas que solucionam seqüencialmente a função-objetivo através da Programação Linear.

A Programação Dinâmica é um procedimento de otimização aplicado a problemas com decisões seqüenciais. Estas admitem a utilização de equações não-lineares, não convexas e por vezes não-contínuas.

Na simulação um conjunto de relações matemáticas descreve a continuidade das variáveis de forma espacial e temporal, podendo estas ser agregadas a aspectos relativos a normas ou políticas operacionais. A Figura 2.1 mostra a diferença entre o planejamento via simulação e otimização.

Desta feita, os modelos que levam em conta uma análise sistêmica são os mais indicados num planejamento de recursos hídricos, pois estes englobam diversos sistemas que buscam diferentes objetivos integrando em apenas um projeto que atendam os objetivos almejados.

PLANEJAMENTO VIA SIMULAÇÃO VERSUS OTIMIZAÇÃO

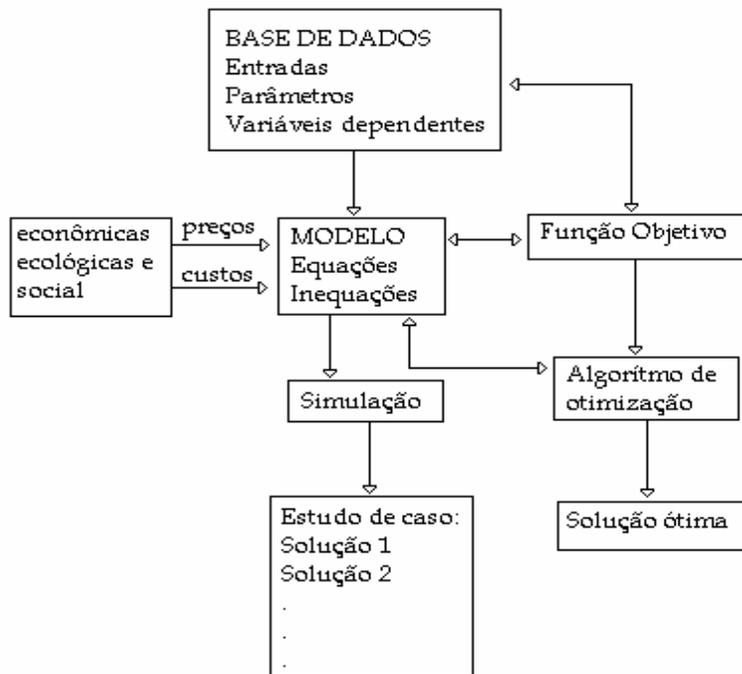


Figura 2.1– Planejamento via simulação e otimização

(Fonte: Santana ,1998 adaptado de O'Laoghair 1974)

A abordagem sistêmica é amplamente utilizada podendo suas aplicações serem consultadas em Oliveira & Lanna (1997) que utilizaram programação linear para derivar estratégias de operação que maximizassem o valor presente dos benefícios líquidos do uso da irrigação do rio Acaraú-CE. Vianna Jr.(2000) utilizou algoritmo de procura direta para otimizar a operação de reservatórios na bacia do rio Curu-CE.

2.3. Análise multiobjetivo

Os problemas de planejamento que envolvem usos múltiplos da água são geralmente muito complexos e exigem um conhecimento considerável por parte dos decisores, porém, a matemática se torna uma aliada, pois propicia uma aproximação para a solução do problema, tornando suas soluções possíveis. Cohon (1978) apresenta uma metodologia geral para a resolução de um problema multiobjetivo. Esta metodologia consiste em 6 (seis) passos e é apresentada no Quadro 2.1, estando baseada na metodologia apresentada por deNeufville e Stafford (1971) *apud* Cohon (1978).

Quadro 2.1- Passos da metodologia de planejamento de problemas multiobjetivos

Passos da metodologia de planejamento de problemas multiobjetivos	
1	Identificação e quantificação do objetivo
2	Definição das variáveis decisórias e restrições
3	Coleção dos dados
4	Geração e avaliação de alternativas
5	Seleção de uma alternativa preferida
6	Implementação da alternativa selecionada

A metodologia inicia com a identificação e quantificação dos objetivos (passo 1), seguida da definição das variáveis e restrições (passo 2). Ou seja, esta etapa é considerada a parte mais importante da análise (os objetivos), logo após o controle que os tomadores de decisão têm disponível para eles (as variáveis de decisão) e o tamanho limite do controle, ou seja, as restrições.

Depois os dados são coletados no passo (3), sendo, em seguida, geradas e avaliadas as alternativas (passo 4). Estas alternativas são geradas com base nas variáveis e restrições impostas pelo problema, levando em consideração os impactos e objetivos a serem alcançados.

No passo (5) uma alternativa preferida é selecionada pelos tomadores de decisão, realizando a análise através de uma política para seleção da melhor solução. Isto pode ocorrer de diferentes formas, a depender do número de decisores e do contexto da formação do decisor. Por exemplo, um simples tomador de decisão pode selecionar uma alternativa, um grupo de tomadores de decisões, assim como os membros de um comitê de bacia de um rio, podem selecionar uma alternativa consensual, ou ainda um grupo de tomadores de decisão (como um corpo legislativo) pode selecionar por um mecanismo de votação direta.

2.3.1. Formulação de um problema multiobjetivo

A análise com multiobjetivos é caracterizada pela otimização de problemas com duas ou mais funções objetivo. O problema da análise multiobjetivo difere dos tradicionais apenas nas expressões de suas respectivas funções objetivo. É comum que se encontre uma otimização com apenas um objetivo, com n variáveis decisórias e m restrições como mostrado abaixo:

$$\text{maximize } Z(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad 2.1$$

$$g_i(x_1, x_2, \dots) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \quad 2.2$$

$$x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad 2.3$$

Já com problemas multiobjetivos a otimização com n variáveis decisórias e m restrições e p objetivos tem-se:

$$\text{Maximize } Z(x_1, x_2, \dots, x_n) = [Z_1(x_1, x_2, \dots, x_n), Z_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, Z_p(x_1, x_2, \dots, x_n)] \quad 2.4$$

$$g_i(x_1, x_2, \dots) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \quad 2.5$$

$$x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad 2.6$$

onde: $Z(x_1, x_2, \dots, x_n)$, é uma função multiobjetivo e $Z_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $Z_2(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $Z_3(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, Z_p(x_1, x_2, \dots, x_n)$ representam p funções objetivo.

Num problema com apenas um objetivo, a melhor solução é chamada de solução ótima: a solução possível responde ao melhor valor da função objetivo, ou seja, o ótimo valor da função objetivo é único. Esta noção de otimalidade deve ser dosada para problemas com multiobjetivos, pois uma solução que maximiza um único objetivo, em geral, não é a mesma solução que maximiza todos os outros objetivos.

Atingir o ótimo em uma parte da ação é importante na solução de problemas com simples objetivos. Isto permite que os analistas e tomadores de decisão restrinjam suas atenções para uma simples solução ou uma quantidade pequeníssima de soluções dentre a quantidade de conjuntos de soluções possíveis.

Um novo conceito, o de não-inferioridade, limita a uma pequena finalidade os problemas multiobjetivos. A idéia de não-inferioridade é muito parecida com o conceito de dominância. Não-inferioridade é chamada de “não-dominância” por matemáticos, “eficiência” por estatísticos e economistas, e por “Otimalidade de Pareto” por economistas do bem-estar.

Admitindo um problema com dois objetivos e com 3 (três) alternativas apresentadas no Quadro 2.2, pode-se afirmar que a solução C é dominada pelas alternativas A e B, pois ambas possuem valores maiores em ambos objetivos, Z_1 e Z_2 . Uma solução que é dominada é chamada de solução inferior. Portanto, as soluções que não são dominadas são chamadas de não-inferiores. Desta maneira, as alternativas A e B são não-inferiores.

Quadro 2.2 - Um exemplo de não-inferioridade

Alternativa	Z_1	Z_2	
A	10	13	Não-inferior
B	13	10	Não-inferior
C	9	8	Inferior

Buscando uma definição com maior poder de compreensão, pode-se afirmar que num conjunto de soluções possíveis para um problema multiobjetivo, são chamadas de não-

inferiores se não existir solução possível que possa melhorar um objetivo sem prejudicar outro objetivo estudado.

Graficamente pode-se ter uma gama arbitrária de possíveis alternativas para maximização de um problema com dois objetivos mostradas na Figura 2.2. São chamadas possíveis aquelas soluções que estão no interior ao limite da Figura 2.2. Nota-se que os eixos do gráfico são os objetivos Z_1 e Z_2 . Nesta figura, é plotada a curva do espaço dos objetivos, por considerar os valores referentes aos objetivos para a formação da mesma, sendo a região (área possível) chamada de região das soluções possíveis no espaço dos objetivos.

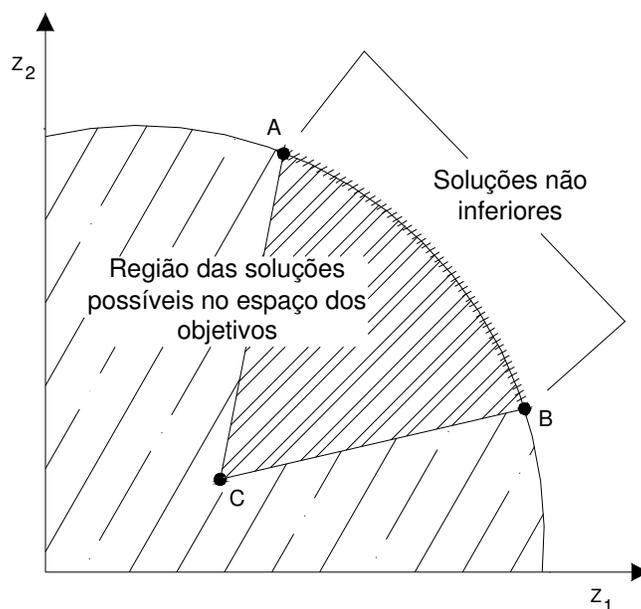


Figura 2.2 - Curvas de conceitos da análise multiobjetivo

Agora a definição de não-inferioridade pode ser usada para se obter as soluções não inferiores na Figura 2.2. Todas as soluções no interior devem ser inferiores ao menos para um objetivo para que, na busca por uma possível solução, possam melhorar ambos os objetivos simultaneamente. Considerando C um ponto interior na Figura 2.2, qualquer alternativa na área hachurada para o nordeste de C será dominada por ela, por isso C é chamada de alternativa dominante.

A análise anterior gera uma regra geral para esta situação: quando todos os objetivos devem ser maximizados, uma possível solução é não-inferior quando as demais soluções são possivelmente válidas para o nordeste, isto é, na área tal que a parte hachurada da Figura 2.2. Podendo chamar esta regra como a “regra do nordeste”. A solução não-inferior para região possível na Figura 2.2 são aquelas que se encontram na porção hachurada do limite entre os pontos A e B.

2.3.2. Terminologia para análise multiobjetivo

Alguns outros termos, além da não-inferioridade, definida na seção anterior, são necessários para um melhor entendimento da análise multiobjetivo, sendo estes termos introduzidos através de exemplo.

O problema apresentado como exemplo possui dois objetivos e duas variáveis decisórias, sendo o mesmo apresentado como:

$$\text{Max}[f(x) = [Z_1(x), Z_2(x)]] \quad 2.7$$

$$Z_1(x) = 5 \cdot x_1 - 2 \cdot x_2 \quad 2.8$$

$$Z_2(x) = -x_1 + 4 \cdot x_2 \quad 2.9$$

Sujeito as restrições:

$$g_1(x) = -x_1 + x_2 - 3 \leq 0 \quad 2.10$$

$$g_2(x) = x_1 + x_2 - 8 \leq 0 \quad 2.11$$

$$g_3(x) = x_1 - 6 \leq 0 \quad 2.12$$

$$g_4(x) = x_2 - 4 \leq 0 \quad 2.13$$

$$g_5(x) = -x_1 \leq 0 \quad 2.14$$

$$g_6(x) = -x_2 \leq 0 \quad 2.15$$

A região possível para este problema é apresentada na Figura 2.3. Os eixos do gráfico da Figura 2.3 são definidos para x_1 e x_2 (variáveis de decisão). A área compreendida por estes eixos é chamada de espaço de decisões (F_d). A região possível é incluída na área F_d na Figura 1.3.

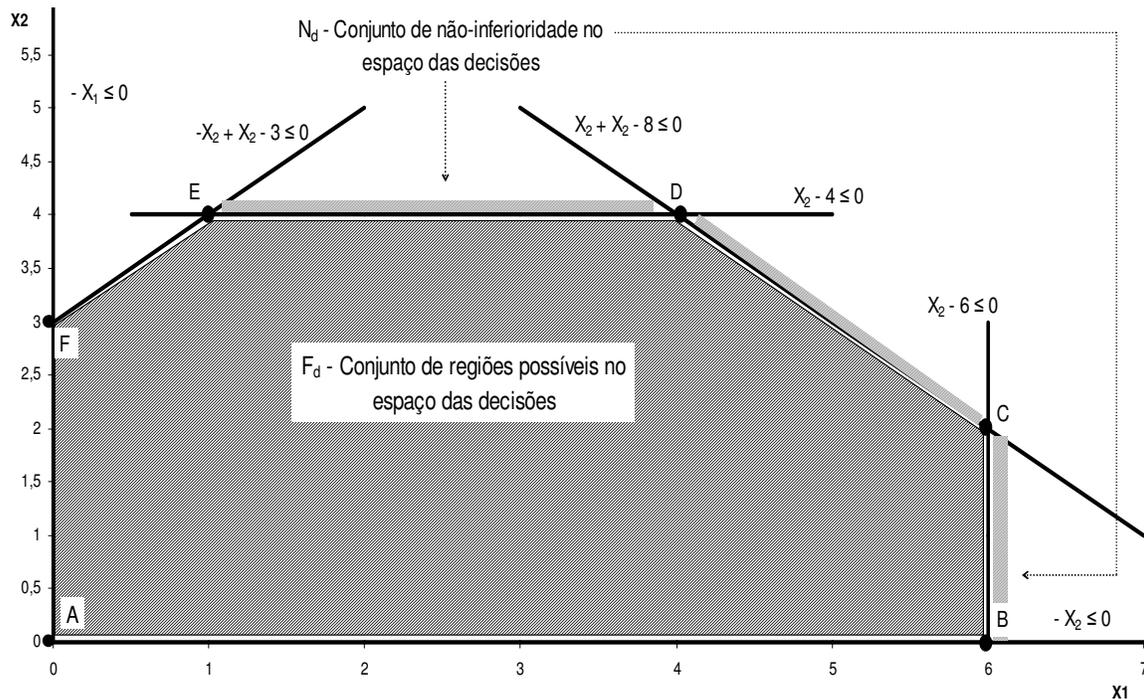


Figura 2.3 – Região não dominadas no espaço das decisões

A avaliação de Z_1 e Z_2 nos pontos extremos do espaço de decisões permite um ponto extremo em um novo espaço, o espaço dos objetivos. O espaço dos objetivos é definido pelos eixos com os objetivos correspondentes. O desenho no espaço dos objetivos é mostrado na Figura 2.4. Os valores de Z_1 e Z_2 nos pontos extremos de A até F são listados no Quadro 2.3 e plotados na Figura 2.4. Os pontos plotados no espaço dos objetivos são imagens de pontos correspondentes no espaço de decisões. Deste modo, o ponto A na Figura 2.3 leva ao ponto A na Figura 2.4 diretamente com os valores de Z_1 e Z_2 que A produz. Nas duas figuras os pontos extremos correspondem aos pontos extremos de mesmo nome.

Vale a pena ressaltar que, numa análise nos seis pontos extremos que são apresentados na Figura 2.4, nota-se que, apesar das variáveis decisórias serem não-negativas, as funções objetivo assumem valores negativos.

Quadro 2.3 - Valores de variáveis de decisões e objetivos para o problema simples

Pontos Extremos	X_1	X_2	Z_1	Z_2
A	0	0	0	0
B	6	0	30	-6
C	6	2	26	2
D	4	4	12	12
E	1	4	-3	15
F	0	3	-6	12

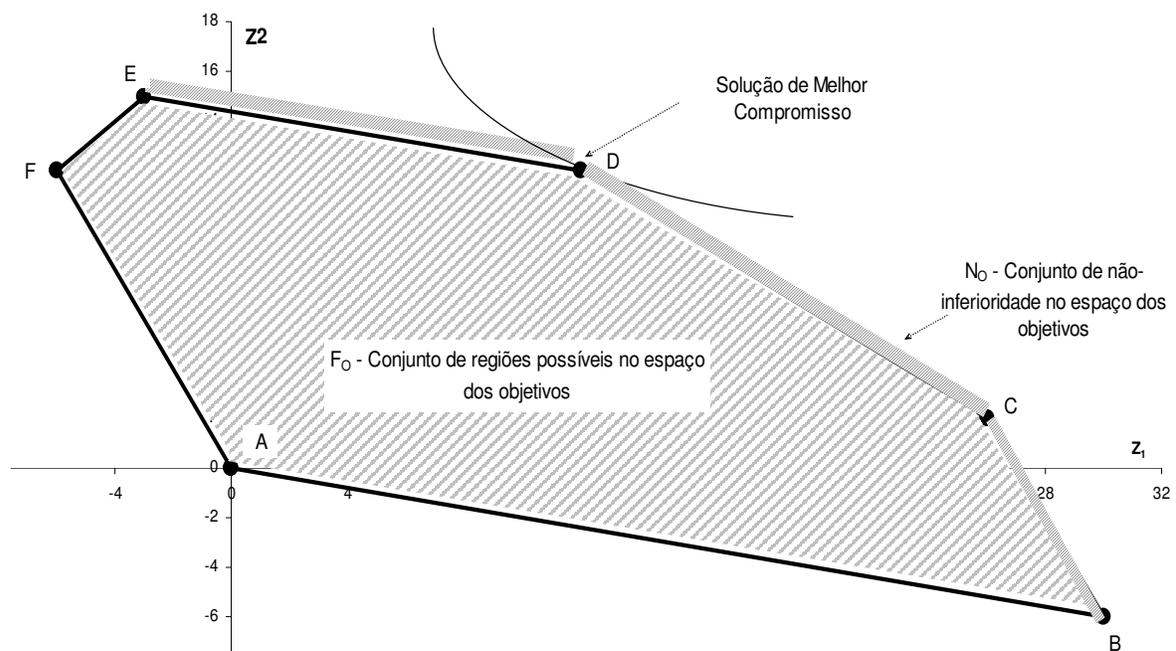


Figura 2.4 – Região viável do espaço dos objetivos

Todas as soluções contidas na área hachurada pertencem ao conjunto de regiões possíveis no espaço dos objetivos, na região identificada por F_0 . Usando a regra do nordeste descrita anteriormente, o conjunto de soluções não-inferiores no espaço dos objetivos não se encontra na parte hachurada do limite de F_0 na Figura 2.4. Os pontos extremos B,C,D e E e todos os outros da solução nas linhas conectadas são não-inferiores. Logo, analisando conjuntamente as duas Figuras, pode-se concluir que os pontos B,C,D e E são não-inferiores no espaço objetivo, assim como, são também não-inferiores no espaço de decisões. Neste caso, seria necessária uma atenção especial para a aplicação da regra do nordeste para soluções não-inferiores, pois, como esta é aplicada somente para o espaço dos objetivos, a regra não pode ser usada no espaço da decisão.

A parcela final da terminologia são as noções de *trade-offs*. *Trade-offs* é a solução de melhor compromisso, que é o conjunto de soluções não-inferiores das restrições que não são dominados por nenhuma outra possível solução. Por exemplo, o ponto C possui 26 unidades do objetivo Z_1 e apenas 2 do objetivo Z_2 , enquanto que D possui 12 unidades de cada objetivo. Qual é o melhor? Este valor perde 14 unidades em Z_2 para ganhar 10 unidades em Z_1 se movendo de D para C. A soma de um objetivo sacrificada para o ganho incremental do outro objetivo é chamada de *trade-offs*. Para a situação citada, o *trade-offs* entre Z_1 e Z_2 movendo de D para C é $(14/10)$ ou $(7/5)$, isto é, $(7/5)$ unidades de Z_2 devem ser perdidos para cada unidade ganha pelo objetivo Z_1 . Da mesma forma, são necessárias $(5/7)$ de ganho de Z_1 para cada unidade perdida por Z_2 . A direção e o modo com que o *trade-off* é medido não importa. É importante apenas que os *trade-offs* sejam declarados.

O conjunto de soluções não-inferiores geralmente inclui muitas alternativas, e obviamente apenas uma delas será selecionada pelos decisores. A solução não-inferior que é selecionada como a alternativa preferida é chamada de solução de melhor compromisso.

Nas situações onde os objetivos são conflitantes, o conceito de otimização da função objetivo é abandonado e utiliza-se o conceito de solução satisfatória, pois se procura a solução que atenda melhor a todos objetivos simultaneamente.

2.4. Métodos de otimização multiobjetivo

Os métodos de otimização podem ser classificados segundo Cohon (1978). Esta classificação é realizada de acordo com cada forma que o decisor precisa utilizar para a solução de seu problema. Estas técnicas são definidas como:

- **Técnicas que geram o conjunto das soluções não dominadas**

Nestas técnicas são consideradas apenas as restrições físicas do problema. A ênfase é dada ao desenvolvimento de informações sobre o problema multiobjetivo. É considerado um vetor de funções objetivo, e mediante tal vetor é gerado o conjunto das soluções não dominadas. São restrições apresentadas ao decisor para a solução do problema.

Durante o processo não são consideradas as preferências do decisor e o analista deve tratar apenas com as restrições físicas do problema (Braga e Gobetti, 2002).

Estão classificados dentro desta técnica os seguintes métodos:

- método da ponderação;
- o método das restrições e;
- o método multiobjetivo linear.

Nos estudos de Cohon e Marks (1975) é apresentado um exemplo de aplicação deste método no planejamento de um rio hipotético, considerando objetivos regionais e nacionais. A obtenção de ótimos segundo cada um dos objetivos foi feita aplicando um modelo linear. Neste trabalho foram comparados os métodos da ponderação e o método das restrições para fazer a análise dos *trade-offs* entre os objetivos.

Estes métodos têm uma carga conceitual matemática muito grande. Em geral são considerados muito laboriosos e requerem um processamento tal que, na prática, os tomadores de decisões reais tendem a duvidar deles e a não aplicá-los.

- **Técnicas que utilizam uma articulação antecipada das preferências**

Neste grupo as técnicas solicitam, anteriormente à decisão a ser tomada, a opinião do decisor a respeito das eventuais trocas entre os objetos e valores relativos a estes. A depender do problema e de suas características, as variáveis de decisão utilizadas podem ser contínuas ou discretas. É importante salientar que algumas técnicas são aplicadas a variáveis discretas ou a contínuas e, em algumas situações, em ambos os tipos de variáveis (Braga & Gobetti, 2002).

São baseados na articulação antecipada das preferências os métodos da função utilidade, da programação por metas, o método Electre, o método Promethee, o método do valor substituto de troca, o método da matriz de prioridades e o método da análise-Q.

Uma aplicação clássica no cenário nacional utilizando o método da Matriz de Prioridades foi apresentada por Braga Jr. & Rocha (1988) para a localização do pólo Petroquímico do Rio de Janeiro. O método foi considerado bastante atrativo do ponto de vista prático, a partir das análises realizadas pelos decisores com base nos resultados do método aplicado.

- **Técnicas que utilizam uma articulação progressiva das preferências**

Este grupo é destinado à solução de conflitos entre muitos grupos de interesse ou decisores. Neste grupo, assim que uma solução é alcançada, pergunta-se ao decisor se o nível atingido de atendimento aos objetivos é satisfatório e caso contrário o problema é novamente modificado, até que o decisor tenha uma postura a partir da melhor solução ou solução satisfatória para o problema.

Como exemplo desta técnica são apresentados os métodos de passo e o método da programação compromisso, este último mais estudado e mais conhecido no ambiente de recursos hídricos. Cohon & Marks (1975) analisaram este método além de compará-lo entre métodos de outros grupos anteriores. Duckstein & Opricovic (1980), aplicaram o método da programação compromisso no caso da Central Tisza River Basin na Hungria comparando o mesmo com o método Electre.

Gershon & Duckstein (1984) compararam as técnicas Electre, Programação Compromisso, Função Utilidade Multidimensional, sendo todas as técnicas aplicadas no planejamento de bacias hidrográficas, com poucas e sensíveis diferenças entre os mesmos.

O Quadro 2.4 apresenta uma síntese das aplicações dos métodos no cenário nacional, apresentando seus autores, os problemas decisórios e a técnica utilizada.

Quadro 2.4 – Trabalhos com aplicação de técnicas multiobjetivo e casos nacionais.

Autores	Problema Decisório	Técnica Utilizada
Andrade Filho (1986)	Operação de reservatório para geração de energia e irrigação no rio São Francisco.	Método dos Pesos (G1)
Fricke et al(1989)	Planejamento dos recursos hídricos da bacia do rio Piracicaba	Electre I e Electre II (G2)
Andrade Filho et al.(1990)	Gerenciamento dos recursos hídricos do sist. Cantareira e do rio Piracicaba	Método dos Pesos (G1)
Braga et al. (1991)	Planejamento dos recursos hídricos da bacia do vale do rio Doce	Matriz de Prioridades (G2)
Braga & Barbosa (1992)	Geração hidroelétrica e controle de cheias no rio Paranapanema	Método das Restrições (G1)
Gobbetti & Barros(1994)	Revisão do plano diretor de esgotos da região metropolitana de São Paulo	Promethee, Electre II, Função Utilidade Multidimensional, Programação Compromisso.
Barbosa & Gobbetti (1995)	Plano integrado de arov. E controle dos recursos hídricos das bacias do alto Tiête, Piracicaba, Baixada Santista e Sorocaba.	Electre I, Electre II, Programação compromisso.
Teixeira & Barbosa (1995)	Seleção de alternativas de projeto de barragens de uso múltiplo	Método dos Pesos, Electre I e Electre II

(adaptado de Barbosa, 1997)

As vantagens da aplicação dos métodos objetivos podem ser enumeradas em três. A primeira vantagem está relacionada às possibilidades de soluções geradas, podendo aumentar

o número de cenários de escolha e explicitar os compromissos entre os objetivos. A segunda vantagem seria o fato de permitir papéis mais apropriados aos participantes do processo decisório e, por último, a terceira vantagem seria uma maior aproximação da realidade através do uso de unidades adequadas a cada peso ou objetivo em particular.

Este método é iterativo, ou seja, se o conjunto das soluções de compromisso permitir ao decisor escolher uma solução que satisfaça a todos os objetivos e usuários o algoritmo acaba, caso contrário, o algoritmo continua com variações nas soluções escolhidas ou nos pesos, até que o decisor escolha a melhor solução. Desta feita, este método exige que o decisor possua um envolvimento considerável no processo de solução, com a vantagem de permitir que ele ganhe um bom entendimento da estrutura do problema.

A busca por soluções compromisso se baseia em propriedades como geração de soluções factíveis, ausência de dominância entre grupos e neutralidade. Estas propriedades fazem com que os modelos de programação compromisso sejam promissores para a elaboração de planos de localização de reservatório que utilizam tendências ótimas ao invés de valores determinados por especialistas. Portanto, para o caso específico da localização de reservatórios, a análise multiobjetivo parece se mostrar bastante indicada e promissora. Em primeiro lugar, são vários os objetivos a serem atingidos. Em segundo lugar, podem ser vários os agentes decisores interessados na melhor localização de reservatório para o melhor aproveitamento do recurso hídrico. Portanto, de acordo com as características referentes aos objetivos a serem alcançados nesta pesquisa e o interesse na melhor solução ou numa solução satisfatória para o problema, será utilizada esta técnica, sendo o método da programação compromisso o método utilizado para a otimização do sistema e detalhado no item seguinte.

2.5. Programação Compromisso

O método Programação Compromisso foi desenvolvido por Zeleny (1973) *apud* Rodrigues (2002), levando em consideração a multiplicidade de objetivos e a existência de um ponto ou alternativa ideal, normalmente inatingível, que conjuga os melhores resultados segundo os objetivos avaliados (Pilar, 2003). Numa versão apresentada por Duckstein & Opricovic (1980) foi incluída uma adaptação numérica para que a programação compromisso fosse aplicada a problemas discretos, facilitando a interpretação dos resultados. Segundo Pietrzak (1999), *apud* Rodrigues (2002) os modelos de programação compromisso têm como objetivo formar um subconjunto de soluções que têm como compromisso a escolha de vetores próximos ao ponto ideal.

As variáveis de decisão para a localização de um reservatório, por exemplo, podem ser representadas pelo seguinte vetor:

$$\vec{f}(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ f_3(x) \\ f_4(x) \\ f_5(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Área da superfície do reservatório} \\ \text{Capacidade de Armazenamento} \\ \text{Perdas por infiltração} \\ \text{Distância dos centros de demandas} \\ \text{Custo de transporte da água} \end{bmatrix}$$

A solução ideal é definida na forma de vetor. Esse vetor representa o melhor valor possível a ser alcançado pelo modelo quando respeitado o seu conjunto de restrições: Genericamente o ponto ideal é representado pela Equação 2.16:

$$f^\circ = [f_1^\circ, f_2^\circ, \dots, f_n^\circ] \quad 2.16$$

Onde: f° = representa o vetor de solução ideal;

f_i° = é a solução ótima obtida para o objetivo i .

Cada elemento do vetor acima pode, a princípio, ser quantificado de alguma maneira, e as ordens de grandezas de cada objetivo poderão influenciar a distância entre o ponto ideal e a solução obtida. Neste contexto, um pré-requisito para uma análise posterior é a padronização dos elementos das variáveis contínuas, isto é, dos valores atribuídos para cada local em cada função de cada objetivo a ser considerado no processo de análise para seleção da localização de reservatórios, fazendo com que as informações possam ser cruzadas, ou seja, que seja realizada uma análise comparativa entre os seus elementos. Estas variáveis estão representadas pelo vetor descrito na Equação 2.16.

A padronização envolve a transformação das escalas das variáveis, de tal forma que todas as variáveis sejam expressas no mesmo intervalo de grandeza, por exemplo, entre zero e um. Um elemento padronizado (f_i^*) torna-se:

$$f_i^*(x) = \frac{f_i(x)}{f_i^{\max}(x)}; \text{ indicador de benefícios, ou} \quad 2.17$$

$$f_i^*(x) = 1 - \frac{f_i(x)}{f_i^{\max}(x)}; \text{ indicador de custos.} \quad 2.18$$

Onde: $f_i^{\max}(x)$ é o máximo valor de f_i . Isto pode ser calculado, como:

$$f_i^{\max}(x) = \max_{i=1}^n f_i(x) \quad 2.19$$

As equações garantem que $0 \leq f_i^* \leq 1$, resultando que quanto mais próximo da unidade melhores os resultados.

Alternativamente, os procedimentos anteriores podem ser representados por:

$$f_i^*(x) = \frac{f_i(x) - f_i^{\min}(x)}{f_i^{\max}(x) - f_i^{\min}(x)} ; \text{ caso indicador de benefício, ou} \quad 2.20$$

$$f_i^*(x) = \frac{f_i^{\max}(x) - f_i(x)}{f_i^{\max}(x) - f_i^{\min}(x)} ; \text{ caso indicador de custos.} \quad 2.21$$

Onde: $f_i^{\min}(x)$ é o mínimo valor de f_i , calculado por $f_i^{\min} = \min_{i=1}^n f_i(x)$

Em geral, muitas decisões práticas possuem vários objetivos conflitantes e não-mensuráveis. Os procedimentos anteriores representam estes diferentes objetivos em um denominador comum.

Outro conceito importante que já foi apresentado no trabalho é a solução de Pareto (também conhecida por não-inferioridade ou solução não-dominada). A noção da solução de Pareto fica melhor aplicada através de um exemplo de um modelo multiobjetivo (com dois objetivos opostos). Por exemplo, suponha-se uma industria localizada à margem de um rio, com os seguintes dilemas:

- a) maximização da renda do trabalhador $f_1(x)$ e
- b) minimização da poluição gerada $f_2(x)$.

Se a receita gerada cresce muito, a qualidade ambiental piora, e por outro lado, se existe um programa de redução de poluentes muito forte, implica em redução de receita. A Figura 2.5 ilustra tal fronteira decisória com estes dois objetivos opostos.

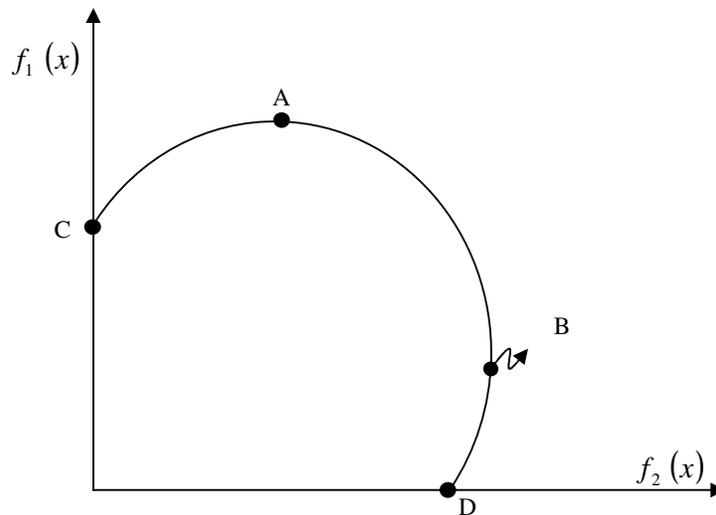


Figura 2.5- Fronteira decisória com dois objetivos opostos.

Um exame mais detalhado na Figura 2.5, indica que todos os pontos no trecho AB fazem parte da solução de Pareto, pois:

- a) todos os pontos interiores são dominados pelos pontos na fronteira;
- b) todos os pontos na fronteira C-A e D-B são dominados pelos pontos A e B.

A Figura 2.6 ilustra a solução de Pareto enfatizando-se o ponto de solução ideal $(f_i^\circ(x))$ da solução eficiente $(f_i^*(x))$, ou solução de Pareto.

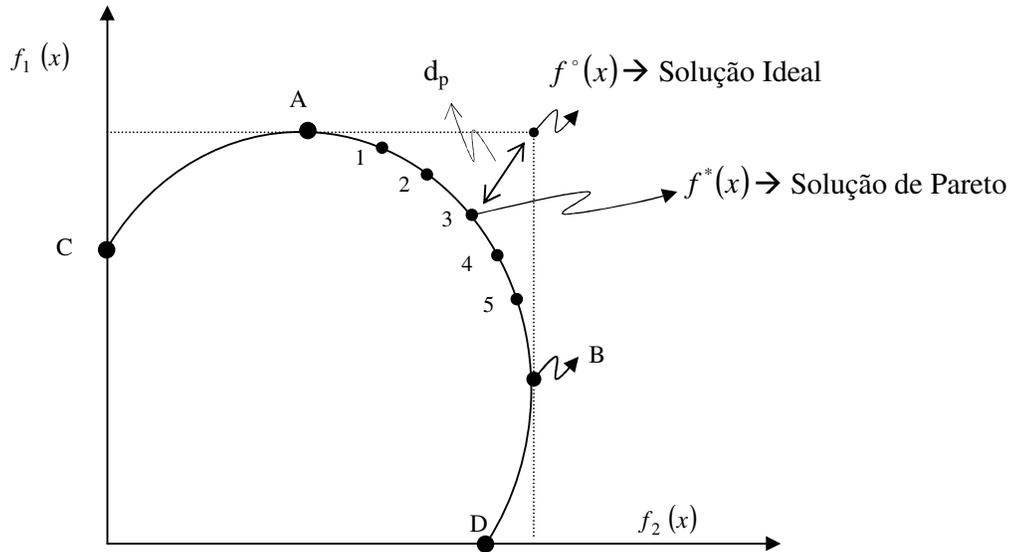


Figura 2.6- Ilustração da programação compromisso com dois objetivos opostos.

Neste contexto, a solução compromisso é um compromisso entre o que é desejável (solução ideal) e o que é possível (solução de Pareto). Este compromisso é baseado na menor discrepância entre os pontos, sendo expresso, numa forma geral por (d_p) . Esta forma de generalização do conceito de distância tornou-se comumente conhecida a partir dos estudos de Minkowsky (Rodrigues, 2002):

$$d_p = \left(\sum_{i=1}^n (f_i^\circ(x) - f_i^*(x))^p \right)^{1/p} \quad \text{para } p \geq 1 \quad 2.22$$

Incluída nesta definição de distância está a distância euclidiana, que ocorre quando o valor de p é igual a 2, porém, salienta-se que p pode assumir qualquer valor no intervalo de 1 até ∞ , pois este parâmetro possui função de ajuste matemático para a função apresentada. Portanto, a forma euclidiana (d_e), comumente utilizada é apresentada pela Equação 2.23 (Rodrigues, 2002):

$$d_e = \left(\sum_{i=1}^n (f_i^\circ(x) - f_i^*(x))^2 \right)^{1/2} \quad 2.23$$

Além da forma euclidiana apresentada, outras generalizações de conceito da distância podem ser utilizadas para determinação da solução de Pareto. Uma das medidas freqüentemente usadas é apresentada por (Rodrigues, 2002):

$$d_p = \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i^p (f_i^o(x) - f_i^*(x))^p \right)^{1/p} \quad 2.24$$

Na busca da solução de compromisso pode-se apresentar o método utilizado por Duckstein & Opricovic (1980). O objetivo do ajuste da programação seria achar uma solução para minimizar a discrepância, sabendo-se que a solução ideal é improvável. A Equação 2.25 representa a Programação Compromisso usada na determinação da menor distância apresentada em Duckstein & Opricovic (1980), sendo:

$$l_p = \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i^p \left| \frac{f_i^{\max} - f_i^*(x)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \right|^p \right]^{1/p} \quad 2.25$$

onde

l_p representa a distância entre dois pontos para a métrica p.

α_i = peso referente a discrepância entre as soluções ideal e real i ,

f_i^{\max} = os melhores valores no conjunto finito dos $f_i(x)$;

f_i^{\min} = os piores valores na matriz de avaliação;

p = o peso referente aos desvios máximos no ajuste matemático da função.

Variando o valor de p obtêm-se diferentes valores de distância da família de métricas L_p sendo que apenas as métricas 1 e 2 possuem significado geométrico, com $p = \infty$, a distância assume o valor representativo.

O método de Programação Compromisso é um método iterativo, fazendo com que o decisor tenha uma gama muito grande de opções para observar e concluir qual a melhor decisão, ou simplesmente, a que melhor lhe satisfaz. Ou seja, se o decisor chegar rapidamente numa conclusão sobre a solução satisfatória o método encerra, caso contrário todo o processo é reiniciado até que o decisor chegue a uma melhor solução.

Um exemplo da aplicação deste método pode ser a continuação do problema apresentado no item 2.3.2. Para os critérios e restrições dos dados apresentados no Quadro 2.3 são retirados os piores e os melhores valores para aplicação do método da Programação Compromisso, sendo apresentados no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 - Valores máximos e mínimos

Pontos Extremos	X_1	X_2	Z_1	Z_2
A	0	0	0	0
B	6	0	30	-6
C	6	2	26	2
D	4	4	12	12
E	1	4	-3	15
F	0	3	-6	12
f_i^{\max}			30	15
f_i^{\min}			-6	-6

Para a aplicação do método, ou seja, da Equação 2.25, os valores indicados no Quadro 2.5, são atribuídos valores de α para 1, 2 e ∞ , pois esta alteração procura analisar a mudança dos resultados à medida que a discrepância entre os valores reais e ideais se alteram. No entanto, esta alteração no parâmetro α justifica a busca do resultado através de uma articulação progressiva das preferências. Os resultados desta aplicação são apresentados nos Quadros 2.6, 2.7 e 2.8, assim como as variações para o ajuste matemático da função os pesos atribuídos a p .

Quadro 2.6- Valores da Programação Compromisso com $\alpha = 1$

$\alpha = 1$			
	$p = 1$	$p = 2$	$p = \infty$
A	1,5476	0,9495	0,0000
B	1,0000	0,5000	0,0200
C	0,7302	0,2040	0,0000
D	0,6429	0,2602	0,0000
E	0,9167	0,8403	0,0003
F	1,1429	1,0102	0,0200

Quadro 2.7- Valores da Programação Compromisso com $\alpha = 2$

$\alpha = 2$			
	$p = 1$	$P = 2$	$p = \infty$
A	1,0000	0,5000	0,0200
B	0,8413	0,2040	0,0000
C	1,1429	0,2602	0,0000
D	1,8333	0,8403	0,0005
E	2,1429	1,0102	0,0400
F	2,3810	0,9495	0,0000

Quadro 2.8- Valores da Programação Compromisso com $\alpha = \infty$

$\alpha = \infty$			
	$p = 1$	$p = 2$	$p = \infty$
A	84,04762	34,97732	0,00022
B	1,00000	0,50000	0,02000
C	11,73016	0,80889	0,00000
D	50,14286	12,51020	0,00000
E	91,66667	42,01389	0,02580
F	100,14286	50,01020	2,00000

Para três variantes de pesos apresentados aos decisores, cabe ao decisor avaliar quais são os pesos mais importantes para a implantação da alternativa. Diante do Quadro 2.8, pode-se considerar como a melhor das soluções possíveis a escolha da alternativa B, pois se apresenta numericamente com menores valores em relação às demais. Uma outra decisão a ser dominada seria de acordo com o peso que o decisor daria e, desta forma poderia ser escolhido a alternativa C, caso a 1ª escolha não seja satisfatória a todos.

Segundo Alvez & Clímaco (1999) *apud* Rodrigues (2002), o método utilizado em seus estudos analisa a sensibilidade para identificar as áreas dos pontos de referência que gerem um mesmo conjunto de soluções eficientes. Suas soluções foram obtidas através da minimização das maiores distâncias entre as soluções eficientes e o vetor de referência utilizando programação compromisso.

Numa análise realizada por Cohon & Marks (1975) foram apontadas algumas desvantagens do uso da metodologia da programação compromisso. Por se tratar de um método iterativo, o decisor pode não se sentir satisfeito com os resultados obtidos após um certo número de iterações, porém o decisor poderá ser forçado a escolher uma solução dentre as resultantes da aplicação do método, com ou sem a sua satisfação.

Porém, a grande vantagem apontada seria de que com o cansativo e excessivo número de iterações, o decisor seria compelido a ter um envolvimento considerável no processo de solução, com a vantagem de permitir que o mesmo tenha um bom entendimento da estrutura do problema.

Braga & Rocha (1988) utilizaram a programação compromisso para a análise da localização do Pólo Petroquímico do Rio de Janeiro, considerando o método bastante atrativo com o uso de uma ferramenta computacional, apesar de reconhecerem que os resultados apresentados não deveriam ser considerados como definitivos, por se tratar de um resultado comprometido com os compromissos estabelecidos e que são factíveis de mudança com as alterações dos pesos atribuídos. Uma vantagem apontada seria o fato do método permitir a

introdução de aspectos subjetivos e percepções particulares do decisor na seleção da solução que mais satisfizes.

2.6. O uso dos Sistemas de Informações Geográficas.

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm sido, com o passar dos anos, utilizados nas mais diversas áreas de trabalho. Define-se SIG como uma tecnologia de informação que permite o armazenamento, análise e representação tanto de dados espaciais como de dados não espaciais. Ou ainda como um sistema de apoio à decisão que envolve a integração de dados georreferenciados num ambiente orientado para a resolução de problemas (Parker & Cowan, 1988, *apud* ESAB, 2003/2004).

Um SIG é um sistema constituído de duas partes, a parte que é representada pelo computador no uso do hardware e um programa executável (*software*) e um ambiente institucional com o fim de armazenar, manipular, visualizar e analisar dados de natureza espacial.

As informações geográficas de um SIG podem ser apresentadas por duas formas de dados para a representação em mapas, denominados vetoriais e *raster*.

Vetorial → Na representação vetorial os limites ou o curso das feições são definidos por uma série de pontos que quando unidos em linha reta formam uma representação gráfica de cada feição (Eastman, 1998), onde, a cada ponto está associado um par de coordenadas (x,y).

As representações gráficas são apresentadas, por exemplo, por:

- Pontos - podem representar poços, vértices geodésicos, postos de alta tensão, etc.
- Linhas - podem representar estradas, caminhos, linhas de água etc.
- Polígonos – podem representar limites de regiões, etc.

A partir destas representações gráficas pode se obter uma composição de vários mapas que foram elaborados de maneiras separadas. A Figura 2.7 representa os objetos geográficos e sua representação espacial.

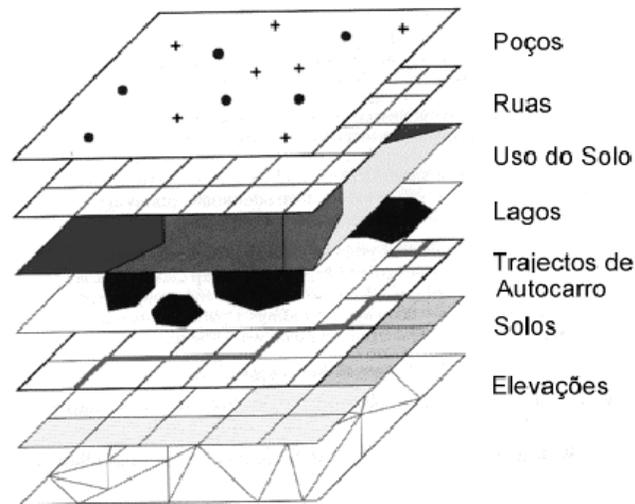


Figura 2.7 –Objetos geográficos e sua representação espacial
(Fonte: Esab 2003/2004).

Raster → Com esta representação gráfica das feições e seus atributos são apresentados arquivos unificados. Ou seja, a área em estudo é subdividida em uma malha de *pixels* nas quais são apresentados os atributos da superfície (Eastman 1998). Esta malha é organizada por linhas e por colunas, em geral, com origem no canto superior esquerdo. Cada uma dessas células contém um único valor que representa determinada característica da área da superfície a que se refere.

Numa comparação sucinta pode-se considerar que o sistema *raster* possui uma grande intensidade de dados atrelados ao conjunto de células. No entanto, a vantagem do uso deste sistema é o fato do mesmo possuir um espaço geográfico uniformemente definido em uma forma simples e previsível. Portanto, o sistema *raster* possui maior poder analítico sobre os sistemas vetoriais se o estudo for realizado para dados que variam continuamente no espaço. Uma outra vantagem do sistema *raster* é o fato da semelhança da sua estrutura com os computadores digitais. Os sistemas possuem resultados rápidos na avaliação de problemas que envolvem várias combinações matemáticas de dados em múltiplos planos (Eastman 1998). É considerado um sistema excelente para avaliação de modelos ambientais como a erosão potencial do solo, manejo de florestas, o relevo, estudo da biomassa, estudo da pluviosidade, etc. Já os sistemas vetoriais são orientados para o gerenciamento de bancos de dados, sendo muito eficiente no armazenamento de dados de mapas porque armazenam apenas os limites das aparências e não o que está dentro dos limites (Eastman, 1998).

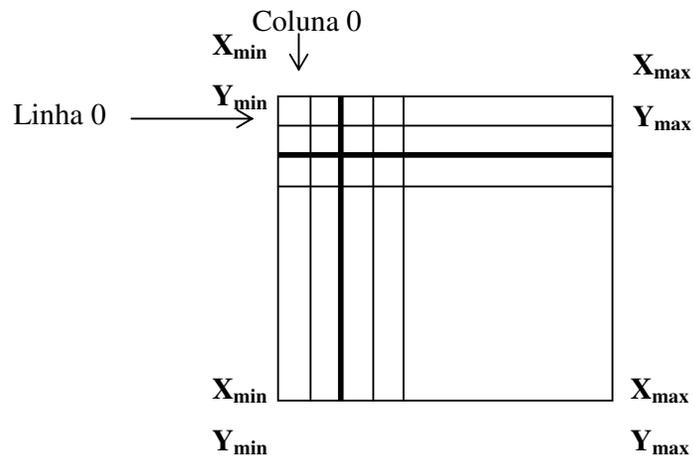


Figura 2.8 – Representação *raster* .

Em comparação com os sistemas *raster*, os sistemas vetoriais não possuem uma ampla gama de funções para a análise de um espaço contínuo, mas levam a vantagem em problemas que envolvem movimentos. Porém, os sistemas vetoriais são considerados atrativos pelo fato de que uma simples função de gerenciamento de bancos de dados geram excelentes possibilidades de mapeamento. Este sistema é considerado popular em aplicações municipais onde predominam questões de produção de mapas para engenharia e gerenciamento de banco de dados (Eastman, 1998).

A Figura 2.9 apresenta o resultado dos dois sistemas, vetorial e *raster*. Podem ser verificado, claramente as diferenças em suas interpretações do objeto.

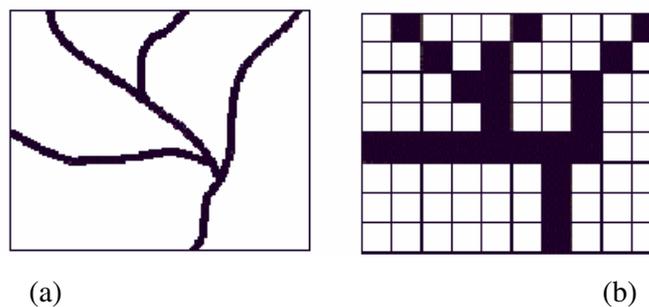


Figura 2.9– Exemplificação da representação (a) vetorial e (b) *raster*.

- **Operações com mapas**

O objetivo de mapear critérios para a utilização de dados matriciais é o cruzamento espacial através de operações em geoprocessamento. Portanto, por exemplo, na seleção de locais para reservatórios, as variáveis escolhidas devem ser mapeadas dentro da mesma janela de trabalho.

Para que sejam feitas as operações matemáticas entre mapas, os mapas devem estar em formato *raster*, ou seja, como grade de células. Possuem estas células uma coordenada geográfica(x e y) e um atributo numérico como eixo Z, que pode representar altitude, a declividade, ou qualquer atributo qualitativo ou quantitativo representável do espaço geográfico.

O formato *raster* facilita as operações de álgebras de mapas e de operações lógicas entre mapas, pois as células possuem a mesma dimensão e mesma coordenada. As operações podem ser feitas desde que os mapas possuam o mesmo número de linhas e colunas, podendo as operações serem combinadas para diferentes objetivos. Segundo Mendes & Cirilo (2001) estas operações podem ser classificadas em:

- operações lógicas: classificação dos mapas em áreas com valores verdadeiro (1) ou falso(0);
- operações aritméticas: adição, subtração, multiplicação, divisão, etc.;
- operações com tipos de dados: por exemplo, conversão de números reais para números inteiros;
- operações estatísticas: os resultados são mapas de média, mínimos, etc., resultando de processamento estatístico de um conjunto de mapas;
- operações multivariadas: análise de regressão multivariada.

Segundo Câmara & Medeiros (1998) *apud* Cruz & Pereira Filho (2005), a estas operações devem ser acrescentadas operações de ponderação, fatiamento em classes, operações de vizinhança e operações sazonais, porém, estas não serão aqui detalhadas por não serem o foco do trabalho. No entanto, o trabalho explorará parte das operações citadas acima, daí a importância dada ao tema abordado neste item.

2.7. Aplicação conjunta da Programação Compromisso e dos Sistemas de Informações Geográficas em planejamento de recursos hídricos.

Gobbetti (1993) apresentou a sensibilidade das aplicações multiobjetivos para aspectos diferentes dos analisados comumente, os aspectos da eficiência econômica dos projetos. Foram considerados no trabalho de Gobbetti os aspectos ambientais, sociais e regionais das obras, incluindo os mesmos nas análises realizadas. Foram comparados quatro métodos de análise multiobjetivo para a revisão do Plano Diretor de Esgotos da Região Metropolitana de São Paulo, sendo eles: Programação Compromisso, Função utilidade multidimensional,

Electre e Promethee. No presente estudo, as maiores informações apresentadas serão da aplicação do método da Programação Compromisso.

O desenvolvimento do trabalho se deu com a geração de oito alternativas de solução, qualificando-se estas através de doze objetivos em uma matriz de avaliação e distribuindo pesos entre os objetivos. Para a análise da programação compromisso a matriz de entrada é apresentada no Quadro 2.9 e os resultados da aplicação da programação compromisso (Equação 2.25) para as alternativas propostas estão apresentados no Quadro 2.10.

Quadro 2.9– Matriz de Avaliação das alternativas de recursos hídricos

Objetivos		Melhor Valor f_i^{\max}	Pior Valor f_i^{\min}	Pesos Originais	Pesos iguais
Objetivos Técnicos					
1	Conseqüência do extravasamento	5	2	0,040	0,0833
2	Flexibilidade do sistema	5	2	0,048	0,0833
3	Confiabilidade quanto à eficiência do processo de tratamento	5	2	0,120	0,0833
4	Imprevistos na Execução de obras	5	2	0,040	0,0833
5	Perda Energética	5	2	0,028	0,0833
6	Preservação dos recursos hídricos	5	3	0,056	0,0833
7	Riscos de ociosidade das obras Planejadas	5	2	0,040	0,0833
8	Conseqüência do transporte de lodos	5	3	0,028	0,0833
Objetivos Econômico-Financeiros					
9	Investimentos e Despesas de Exploração	5	2	0,247	0,0833
10	Investimento Iniciais	5	2	0,158	0,0833
11	Sensibilidade	5	2	0,045	0,0833
Objetivos de Aceitabilidade da Comunidade					
12	Aceitabilidade da Comunidade	5	2	0,150	0,0833

Fonte: Gobbetti, 1993.

Diante do Quadro 2.10 apresentado, a alternativa identificada pelo autor como a melhor solução compromisso foi a alternativa 5ª, sendo também nas outras técnicas analisadas a mesma alternativa adotada como a melhor alternativa. Este resultado parece ser incoerente com os cuidados com o meio ambiente, pois o corpo hídrico está sendo utilizado para o tratamento do esgoto sem nenhum pré-tratamento. No entanto, segundo Gobbetti (1993) a vantagem da utilização da programação compromisso seria porque esta precisou de um nível mínimo de informação de parte do decisor, apresentando ainda classificações bastante consistentes com os dos demais métodos, exigindo pouco tempo de operação computacional.

Quadro 2.10– Distância Ls

Alternativas		Pesos Originais			Pesos Iguais		
		p = 1	p = 2	p = ∞	p = 1	p = 2	p = ∞
1	Idêntico ao da SANEGRAN, com unidades redimensionadas para novas vazões do projeto	0,433	0,197	0,165	0,417	0,164	0,083
2	Adequação a alternativa 1 com aproveitamento de uma área total de uma estação em funcionamento	0,433	0,197	0,165	0,417	0,164	0,083
3	Prevê implementação de ETEs que não estão em funcionamento	0,336	0,183	0,165	0,292	0,122	0,083
4	Implantação de sete estações de tratamento	0,373	0,189	0,165	0,292	0,122	0,083
5 A	Aproveitamento do rio Juqueri como unidade de tratamento (sem tratamento)	0,384	0,184	0,150	0,375	0,142	0,083
5 B	Aproveitamento do rio Juqueri como unidade de tratamento (com tratamento)	0,318	0,154	0,120	0,361	0,137	0,083
6	Contempla a utilização de estabilização em serie no rio Juqueri	0,520	0,215	0,150	0,583	0,202	0,083
7	Disposição oceânica dos esgotos da RMSP.	0,738	0,318	0,147	0,736	0,241	0,083

Fonte: Gobbetti(1993)

A partir dos resultados apresentados são verificadas as vantagens e desvantagens inerentes a cada método estudado como, por exemplo, a função utilidade multidimensional requer um maior tratamento computacional, porém com maior precisão. Já no método Electre o decisor precisa estar mais familiarizado com o método para as análises realizadas, e por último o método Promethee foi considerado de fácil implementação e com uma análise bastante explícita, porém necessitava de uma boa interação por parte do decisor.

Pilar (2003) comparou as análises realizadas com os métodos da programação compromisso e análise hierárquica, para o traçado de obras com características lineares num espaço geográfico para a província de Resistência (Argentina). Este trabalho foi realizado com o auxílio de técnicas de SIG, com o objetivo alcançado de ser entendido pela proposta de utilização de ferramentas computacionais de ampla difusão entre os engenheiros. A programação compromisso foi considerada de boa utilização apesar dos resultados apresentados por uma das três variantes estudadas por este método não estar dentro das expectativas.

Bella et. all.(1996) utilizaram a programação compromisso em comparação a Electre III na análise de conflitos no planejamento dos recursos hídricos do Rio Grande nos EUA. Os critérios considerados foram:

- a) fatores econômicos incluindo a operação, manutenção e alocação dos custos, danos causados, benefícios para o controle de cheias, recreação, suprimento de água, e qualidade da água;

- b) fatores ambientais incluindo estéticas, habitat dos peixes, recreação, solos ribeirinhos e controle da erosão;
- c) planejamento por parte dos decisores, incluindo a alocação igualitária do recurso e o uso conjunto da alocação dos subsídios.
- d) fatores biológicos, incluindo as espécies da fauna e flora do sistema.

Foram desenvolvidas dezoito combinações baseadas nestes critérios, pois os mesmos geravam conflitos naquela região. Estes critérios foram escalados dos mais importantes para os menos importantes, sendo analisados cada um com sua medida individual. Na aplicação da Equação 1.25 foram considerados 3 valores de p : 1, 2 e ∞ . Neste, a Programação Compromisso é apontada como vantajosa por ter uma boa aproximação, requerer pouco conhecimento do método pelos decisores, o que permite um menor esforço na resolução dos conflitos, e por possibilitar aos decisores um maior controle sobre a solução dos objetivos, pois os objetivos são medidas individualizadas.

Phua & Minowa (2005) apresentaram em seu trabalho o uso conjunto da Programação compromisso e do Sistema de Informações Geográficas com o objetivo do apoio a decisão na criação de áreas de conservação de florestas, sob o ponto de vista da paisagem. Sendo assim a Programação compromisso é utilizada na integração dos mapas de prioridades para a conservação da floresta, identificando as áreas potenciais e delimitando possíveis criações de novas áreas de conservação.

Para a determinação destas áreas, foram adotados alguns critérios e indicadores utilizados em outras análises realizadas em Montreal e Helsinki. Foi realizada uma combinação destes critérios resultando nos seguintes critérios e indicadores:

- a) Conservação da biodiversidade (Diversidade das espécies e do ecossistema);
- b) Manutenção da produtividade da floresta;
- c) Saúde e vitalidade da floresta;
- d) Recurso de solo e água;
- e) Ciclo global do Carbono;
- f) Benefícios econômico-sociais e culturais;
- g) Estruturas legais, econômicas e institucionais.

Os critérios e os indicadores para a gerência de sustentabilidade da floresta podem ser considerados como os padrões comuns para a conservação da floresta entre a comunidade global porque os critérios e os indicadores objetivam a realização da proteção de floresta, assim como a utilização destas com o intuito de melhor gerenciamento de sua exploração como o uso da madeira e o uso recreacional. A Programação Compromisso foi utilizada e

permitiu que fossem identificadas novas áreas de conservação da floresta, além de delimitar aquelas já existentes. Isto pôde ser observado com melhor detalhe devido ao uso auxiliar do GIS, pois o mesmo permite que os decisores possam conduzir mais estudos do detalhe nas áreas reais necessitadas de conservação, podendo incluir objetivos que possam reduzir os custos e o tempo envolvidos no estágio de planejamento, além de identificar novas áreas protegidas com alto potencial, sob o ponto de vista da paisagem.

O estudo de Schumann & Geyer (1997) tem uma importância fundamental no desenvolvimento desta dissertação, pois o mesmo se refere a uma análise para localização de reservatórios de cheias usando o sensoriamento remoto e o SIG. Foram considerados o uso de várias características, sendo as mesmas calculadas para diferentes e potenciais locais de reservatórios através da utilização de um modelo numérico do terreno (MNT) e um sistema de informação geográfica (SIG).

Os primeiros critérios de planejamento considerados foram as características geomorfológicas, capacidade de armazenamento, área inundada e limite inundado do rio. Estas características dependem da altura do reservatório e o local do mesmo. Os critérios de planejamento relevantes ao armazenamento de cheias são a área drenada do reservatório, a distância entre os locais de reservatórios e o ponto de controle de cheias, as características da bacia drenada que são importantes para a formação do escoamento na bacia de drenagem do reservatório, ou seja, a capacidade de armazenamento do solo.

No que diz respeito aos objetivos mencionados acima, das seguintes características do reservatório para posições diferentes, foram estimados:

- a) a capacidade de armazenamento e a superfície da inundação do reservatório para uma altura da represa de cinco medidores;
- b) a área da bacia de drenagem do reservatório e a capacidade de armazenamento desta área,e;
- c) a distância entre o reservatório e o ponto de controle de cheias

Para a comparação dos diferentes locais dos reservatórios foram usadas as seguintes variáveis decisórias:

- a) a capacidade de armazenamento S e a área da bacia drenada do reservatório A_R ;
- b) A capacidade de armazenamento relativa S_R que podem ser estimadas com a relação

$$S_R = \frac{S}{A_{total}} ; \text{ onde:}$$

S_R = capacidade relativa de armazenamento em *mm*;

S = capacidade de armazenamento dos reservatórios em $mil\ m^3$;
 A_{total} = área da bacia de drenagem no ponto de controle em km^2 ;
 S_R é a medida da altura de vazão que pode ser armazenada no reservatório relacionado para a área total da bacia de drenagem no ponto de controle de cheia;

- c) A área da superfície inundada A_F , que é um parâmetro econômico relatado para a aquisição da área;
- d) a capacidade de armazenamento do solo da bacia de drenagem do reservatório, um critério que é relevante para a resposta da bacia de drenagem para chuva; e
- e) a distancia entre o reservatório e o ponto de controle de cheia, a qual caracteriza o comprimento de rio que está protegido contra cheias.

A área de estudo escolhida foi a bacia Prum, uma bacia secundária da bacia Mosel. O tamanho da bacia de drenagem é $576\ km^2$.

Neste trabalho foi usado um banco de dados, mostrado na Figura 2.10, contendo:

- a) Um modelo de elevação digital (MNT) com resolução de $50m \times 50m$,
- b) Dados de uso do solo classificado de um Landsat-TM cena de 20 de agosto de 1989 ;
- c) Mapa do solo USDA-textures.

Outros dados poderiam ser considerados neste estudo, mas estes não tinham uma boa qualidade coletada a partir do MNT:

- a) a seção longitudinal de um reservatório de bacia de drenagem,
- b) a seção transversal do reservatório da bacia de drenagem e
- c) a área da seção transversal da represa (barragem).

Para a determinação do local do reservatório foi utilizado a programação compromisso, sendo usado o método apresentado por Loucks et al, (1981). O vetor distância foi normalizado para um intervalo (0,1). Para cada local de reservatório potencial o I_p – valores métricos (Duckstein & Opricovic, 1980) foi computados (Equação 2.26):

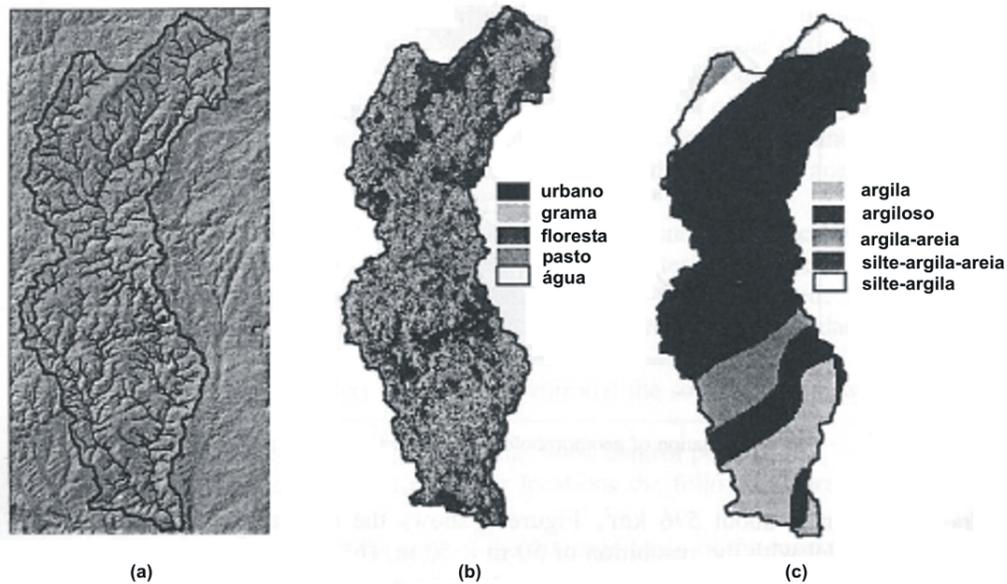


Figura 2.10 - Dados usados para localização de reservatórios

$$l_p = \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i^p \left| \frac{f_i^{\max} - f_i^*(x)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \right|^p \right]^{1/p} \quad 2.26$$

onde:

α_i = importância relativa ao reservatório i ,

f_i^{\max} = os melhores valores no conjunto finito dos $f_i(x)$;

f_i^{\min} = os piores valores na matriz de avaliação;

p = o peso referente aos desvios máximos.

A seguir a combinação de objetivos foi comparada para cada reservatório usando este método e considerando as seguintes combinações:

- a) A capacidade de armazenamento relativa S_R ;
- b) S_R e distância entre o ponto de controle;
- c) S_R e área inundada do reservatório;
- d) S_R e capacidade de armazenamento do solo;
- e) S_R , área inundada, capacidade de armazenamento do solo, distância da saída;

O Quadro 2.11 apresenta os resultados segundo os sistemas adotados, e a Figura 2.11 apresenta os resultados encontrados no trabalho.

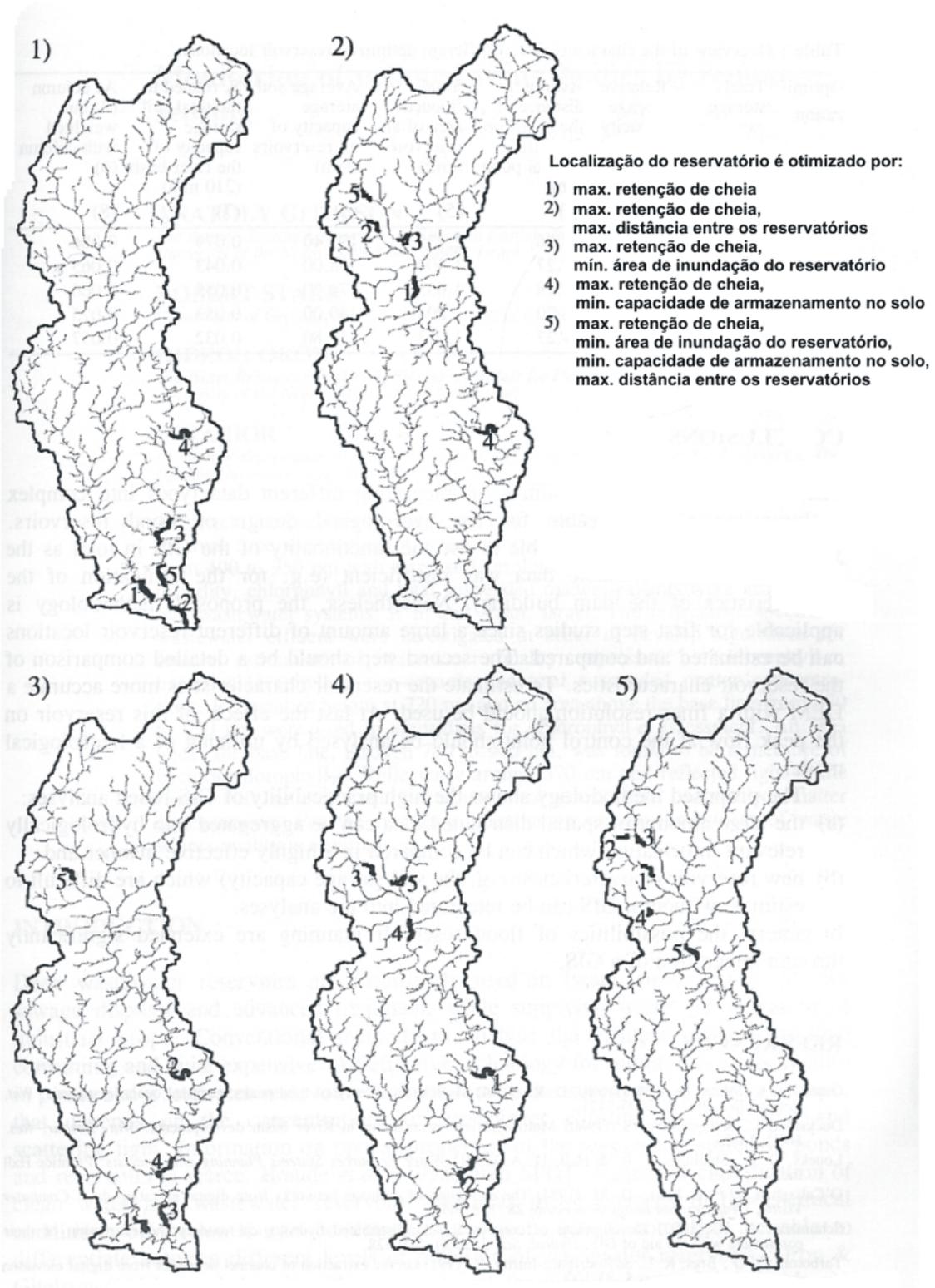


Figura 2.11– Resultado da localização do reservatório de cheias (sem escala)

Quadro 2.11 - Resumo de diferentes sistemas de localização dos reservatórios

S I S T E M A	Cap. Total de armazen.	Cap. relativa de armazen.	Distância média dos reservatórios ao ponto de controle	Área inundada total de todos os reservatórios	Capacidade média de armazenamento do solo de todos os reservatórios	SR para a cap. total de armaz. do solo da bacia	Combinação entre as colunas 7 e 6.
	Milhões m ³	mm	km	km ²	mm	210 mm	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	9.619	16.69	8.86	82.435	193.40	0.079	0.086
2	5.182	9	47.27	1.500	138.00	0.043	0.065
3	6.55	11.55	8.18	1.655	174.20	0.055	0.066
4	6.4725	1.22	37.70	1.804	149.00	0.053	0.075
5	3.8975	6.76	54.27	1.053	117.80	0.032	0.057

Os resultados apresentados por Schumann & Geyer (1997) mostram a possibilidade da integração de diferentes tipos de dados em análises complexas que são utilizáveis em projetos hidrológicos de reservatórios de cheias. A metodologia proposta mostrou a alta praticabilidade da análise baseada no Sistema de Informações Geográficas, sendo seus maiores motivos: a) grande quantidade da distribuição espacial de dados podem ser agregados em informações hidrologicamente relevantes que podem ser comparadas em maneiras altamente efetivas e; b) novo reservatório característico (i.e. a capacidade de armazenamento do solo), que são difíceis para estimação sem um SIG, pode ser integrado dentro da análise.

3. Metodologia

As soluções para a localização dos reservatórios são inúmeras, aumentando ainda mais à medida que o número de objetivos aumenta. No entanto, cada solução satisfaz de maneira diferente às expectativas dos vários setores da sociedade. Na busca da melhor solução, ou a solução que seja satisfatória a todos, podem ser usadas ferramentas que auxiliam nesta decisão.

Neste contexto, estão incluídos os SIGs, que quando utilizados num formato *raster*, permitem que o problema seja fragmentado espacialmente e que cada célula receba seu atributo individualmente, considerando a multiplicidade dos aspectos considerados relevantes para a solução do problema. Este trabalho utiliza a combinação das técnicas multiobjetivo com a utilização dos SIGs, sendo esta linha de pesquisa ainda pouco explorada no que diz respeito ao foco principal do trabalho.

O desenvolvimento da metodologia para a realização da pesquisa estará dividido em 4 (quatro) etapas. Estas etapas foram cumpridas na busca da melhor localização de reservatório de regularização no corpo hídrico em questão, neste caso o Rio Coruripe, no Estado de Alagoas. Além das etapas da metodologia, foi necessária uma busca sobre os procedimentos, modelos e ferramentas empregadas para a realização da pesquisa.

Desta feita, foram seguidas as etapas abaixo relacionadas e fundamentais para a realização deste trabalho (Figura 3.1):

- **Procedimentos e ferramentas empregadas**
- **Identificação dos usuários e priorização dos usos de água**
- **Identificação dos objetivos, variáveis decisórias e restrições para localização de reservatórios**
- **Aquisição do Banco de Dados**
 - a) Um modelo de elevação digital (MNT);
 - b) Mapa de classificação do solo;
 - c) Mapa de Uso do solo
 - c) Superfícies de Precipitação e de Evapotranspiração.
 - d) Demanda hídrica da bacia.
- **Aplicação da técnica Programação Compromisso**

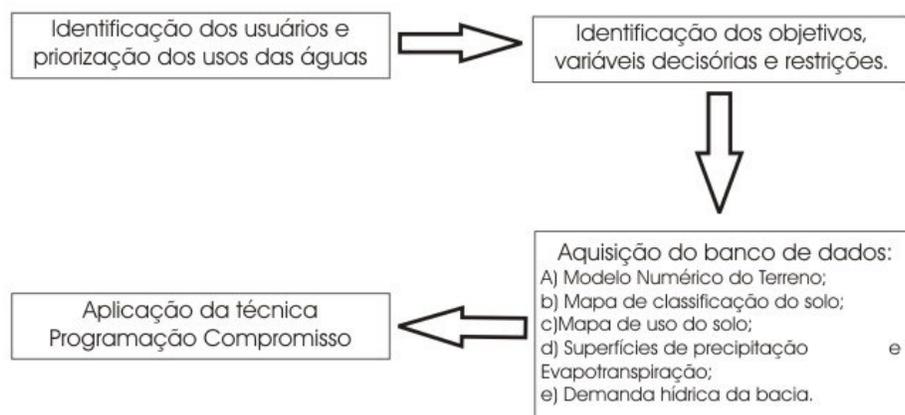


Figura 3.1.– Fluxograma com etapas do trabalho.

3.1. Procedimentos e ferramentas empregadas.

O desenvolvimento da pesquisa inicia no período de busca dos dados disponíveis. Para tanto, foram obtidos dados junto aos órgãos estaduais. Estes dados se referem às características físicas da bacia hidrográfica, assim como dados da rede hidrométrica da bacia e dados das demandas existentes na bacia.

Para o pleno desenvolvimento desta pesquisa necessitou-se do uso de *softwares* tanto para a interpretação dos dados disponíveis como para o desenvolvimento da metodologia aplicada.

Inicialmente, como ferramenta de trabalho, foi utilizado o programa AUTOCAD como instrumento de desenho, pois este era o formato dos mapas disponibilizados nos documentos oficiais do estado. Este programa foi de importância fundamental no embasamento dos dados fornecidos. Os mapas disponibilizados foram desenvolvidos baseados nas bases cartográficas do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), assim como o uso de imagens de radares, fotos aéreas, reconhecimento de campo e imagens de satélites que foram identificadas posteriormente.

A ferramenta escolhida para o desenvolvimento do trabalho foi o IDRISI, pois é característica dos *softwares* que usam o Sistema de Informação Geográfica (SIG) relacionar à bacia suas características físicas. Um SIG é um sistema auxiliado por computador para aquisição, armazenamento, análise e visualização de dados geográficos. Na etapa de geração

de resultados foi necessário o desenvolvimento de uma rotina que preenchesse uma lacuna na captura dos dados de área e volume dos reservatórios, apresentado no Anexo I.

Na última etapa do trabalho, a aplicação da Programação Compromisso, ou seja, as análises das alternativas geradas, foi utilizado o Excel, por se tratar de um programa de fácil emprego e entendimento. Nesta etapa foi analisada a matriz de avaliação gerada pela metodologia empregada, sendo determinados os melhores locais para implantação do reservatório segundo avaliação do analista.

3.2. Identificação dos usuários e priorização dos usos da água

Para o atendimento do uso múltiplo da águas torna-se necessário instituir uma escala de prioridades de acordo com o que preconiza a lei. Na legislação federal de recursos hídricos, a Lei 9.433/97 em seu artigo 1º, IV, consta que “a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas” como afirmado anteriormente. Porém, esta mesma Lei, em seu artigo 1º, III, assegura que, em situação de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos seria para o consumo humano e a dessedentação dos animais.

Considera-se como essencial e de consumo humano somente o uso para as necessidades mínimas de cada pessoa, ou seja, somente a água necessária para beber, comer e para a higiene pessoal. Desta forma, fica excluído o uso especificado para lazer, como nos casos dos parques municipais, nas piscinas entre outros usos considerados desprezíveis em caso de escassez hídrica. No caso dos animais é considerada apenas a sua dessedentação, ficando de fora o uso da água para o abate dos mesmos e sua comercialização (Pruski & Silva, 2000).

Portanto, de acordo com a legislação alagoana, e considerando o objetivo de garantir a qualidade das águas da bacia do rio Coruripe, pretende-se adotar, na ordem apresentada, a seguinte priorização de usos e demandas de água:

- abastecimento público e dessedentação de animais;
- desenvolvimento de atividades produtivas com fins de subsistência;
- manutenção dos ecossistemas aquáticos (expressa, primeiramente em termos da vazão residual a ser mantida a jusante das captações, seguido da vazão necessária à diluição dos efluentes lançados nos corpos d'água);
- demandas industriais (em função, especificamente para essa bacia, da expressão econômica dessa atividade).

3.3. Identificação dos objetivos, variáveis decisórias e restrições para localização de reservatórios.

Este item não pode deixar de iniciar com a distinção duvidosa entre ideal e objetivo. Segundo Hill (1973) *apud* Cohon (1978) o ideal pode ser definido como algo que todas as pessoas concordam e os objetivos possuem características do ideal, porém algumas pessoas podem não concordar. Um fator crucial entre este ideal e objetivo baseia-se no benefício operacional. Um objetivo pode ser pensado como uma afirmação matemática em termos de variáveis decisórias e restrições, isto é, uma função objetivo, enquanto que um ideal não pode ser incluído nesta qualificação. Como exemplo, pode-se pensar a maximização do bem estar social como um ideal, enquanto que a maximização da rede de economia eficientemente é um objetivo.

O maior dilema da programação e planejamento multiobjetivo é o trato com este grande número de objetivos considerados no processo decisório. Todos os objetivos (relacionados aos conflitos) podem derivar de apenas um ideal. Eficiência econômica, qualidade ambiental e equidade são três objetivos conflitantes que se originam de apenas um ideal, a maximização do bem-estar social.

Objetivos e ideais definidos aqui são os itens de interesse para a análise e planejamento. Eles estão incluídos nos modelos e permitem a avaliação das alternativas de solução. Adicionalmente, a seleção de uma alternativa preferida é diretamente relacionada ao conjunto de objetivos. Portanto, o benefício operacional de um objetivo como uma avaliação de variáveis decisórias é o ponto chave.

Neste contexto, a identificação e medida dos objetivos é um tanto dispendiosa, necessitando do analista uma grande parte de tempo e esforço. No entanto, o planejador deve persistir até que um conjunto representativo de objetivos seja desenvolvido, pois os tomadores de decisão irão avaliar estes objetivos em termos dos ideais a serem alcançados. O planejador deve continuamente perguntar se uma afirmação particular é específica o bastante para permitir medidas em termos de variáveis de decisão do problema. Como exemplo, pode ser citada a qualidade ambiental, que não é suficientemente específica para ser um benefício operacional. A análise deve considerar que a qualidade ambiental forma um problema contextual. Isto pode significar maximização de oxigênio dissolvido de vários diferentes pontos no corpo hídrico ou isto pode resultar na decomposição de um ideal dentro de vários

objetivos, isto é, qualidade ambiental pode requerer um objetivo para cada um dos vários poluentes do ar.

Outra consideração muito importante é a ordem para a qual uma afirmação particular de um objetivo é significativa na tomada de decisão. Deste modo, a equidade pode ser usada, pois esta equidade pode significar coisas diferentes para pessoas diferentes, além disso, essa pode ser uma alternativa para a formulação matemática de determinada afirmação do objetivo. A Equidade pode ser definida espacialmente, como para a distribuição de um benefício e/ou custos entre regiões ou jurisdição política. Alternativamente, equidade pode estar relacionado com a distribuição de impactos públicos entre classes de renda. Igualmente, com um sentido dado para objetivos igualitários, a análise poderá definir uma medida para o objetivo.

3.3.1. Identificação dos Objetivos

O processo para que os objetivos possam ser identificados por uma análise merece bastante atenção por parte do analista. A maneira ideal aconteceria quando o tomador de decisão tivesse em mãos uma relação (a partir de uma análise prévia) dos objetivos apropriados à bacia, mas isto tende a acontecer apenas em situações em que existe apenas um simples tomador de decisão, isto é, uma pessoa que irá fazer uma escolha final dentre o conjunto de alternativas. De qualquer modo, esta situação freqüentemente não ocorre, ficando o analista incumbido de relacionar os diferentes interesses da sociedade, cada um com um objetivo.

Existem fontes de variáveis e mecanismos para a definição de objetivos que o analista deve ter à sua disposição. Dentre os mais importantes são relacionados três fatores que o analista deve levar em conta para fazer a sua relação com os objetivos a serem alcançados com a pesquisa. *O analista ter conhecimento do problema de decisão é obviamente a primeira variável.* É necessário que o analista tenha um bom conhecimento da área em estudo para que sejam relacionados os mais diversos pontos de vista, da sociedade, do setor público e do setor privado.

Outra fonte possível de informação são os próprios tomadores de decisão. Pode ser com a identificação dos objetivos pelo tomador de decisões que sejam identificados reais necessidades do sistema, pois estes podem estar não aparentes no contexto de tomada de decisão pública. Apesar desta complexidade, o analista deve enfatizar contato com os tomadores de decisão ou pessoas que possam falar a eles ou ter acesso corriqueiro às reações dos tomadores de decisão. Um caso de estudo citado por Cohon (1978) ensinou essa lição aos

analistas envolvidos. Uma formulação para o planejamento dos objetivos que foi capturado numa ordem de equidade foi rejeitado devido à reação das pessoas influentes para com os tomadores de decisão. De qualquer maneira, a elegância matemática da formulação não foi completamente apreciada. Mas, naturalmente, elegância não é importante numa aplicação real. A tarefa mais crucial de uma análise é realizar uma representação de um problema que seja significativa para os tomadores de decisões.

Uma terceira origem de informações que pode ser usada para identificar objetivos é a *publicação de material relativo à bacia para a decisão do problema*. Esta alternativa pode não ser muito utilizada, pois os documentos oficiais podem não apresentar toda a extensão de dados necessários para um entendimento do processo de decisão. Todavia, quando os objetivos não podem ser encontrados, ou quando as alternativas anteriores tiverem se exaurido, os documentos governamentais podem ser a única alternativa. (Cohon, 1978).

Desta forma, a seleção do trabalho baseou-se nas três alternativas citadas acima, sendo necessários também identificar quais as variáveis decisórias e as restrições que podem representar espacialmente os objetivos significativos para a escolha da localização do reservatório. Portanto, para estruturar o problema é necessário que se pense quais os objetivos a serem alcançados.

Geralmente as restrições são apresentadas de maneira *booleana*, ou seja, valor 0 (zero) para os locais onde não podem ser localizados os reservatórios e 1(um) para locais em que é possível esta localização. Esta representação só é possível na construção de mapas de restrições, caso contrário podem ser adotadas funções de restrições que irão maximizar determinada função aplicada a determinado critério. Dentre outras restrições possíveis as mais comuns são aquelas referentes a locais urbanos, pontes, estrada, terras alienadas ou de difícil aquisição por parte do estado.

3.3.2. Equacionamento

O equacionamento numa análise multiobjetivo tem como propósito atribuir valores para a região estudada de forma distribuída, segundo a discretização espacial adotada, e critérios previamente definidos de valoração de aspectos. Este equacionamento foi desenvolvido *pixel a pixel*, em ambiente de geoprocessamento e de forma georeferenciada.

A forma utilizada para o equacionamento multiobjetivo foi a combinação linear, que é representada na Equação 3.1:

$$V_a = \sum_{i=1}^n (X_i * p_i) = X_1 * p_1 + X_2 * p_2 + \dots + X_n * p_n \quad 3.1$$

Onde:

X é o fator ou aspecto considerado;

p a ponderação do aspecto e;

n o número de aspectos considerados.

Uma análise multicritério pode ser caracterizada pelo cruzamento de diferentes mapas que espacializam os critérios de valoração (os mapas de aspectos). As operações produzidas são realizadas *pixel a pixel* e envolvem grandes volumes de dados, requerendo a utilização de ferramentas de geoprocessamento.

Alguns mapas podem ser obtidos a partir de informações integrantes de um banco de dados, cujas tabelas são vinculadas aos programas de geoprocessamento. No entanto, outras podem ser geradas como produto do processamento de mapas em ambiente SIG.

Como dito anteriormente, as seleções dos objetivos, critérios e restrições estão relacionadas com o objetivo do estudo. Neste caso, a seleção de reservatórios. Assim, as variáveis são identificadas, primeiramente, considerando quais os critérios que podem influenciar diretamente na localização dos reservatórios; em seguida, são identificadas as restrições para o local e realizado o cruzamento dos dados.

3.3.3. Padronização de mapas e dados

Numa análise multicritério existe uma necessidade de padronização das variáveis contínuas dos mapas analisados, isto é, dos valores atribuídos para cada local em função de cada critério a ser considerado na análise multiobjetivo para a seleção de reservatórios, sendo estas informações cruzadas posteriormente.

A padronização envolve a transformação das escalas das variáveis, de tal forma que todas as variáveis sejam expressas no mesmo intervalo de grandeza, por exemplo, entre zero e um. Essa padronização pode ser realizada de várias formas e geralmente é efetuada de forma diferente para cada variável.

Nesta pesquisa, tanto na fase de aquisição dos dados de entrada como na própria aplicação da metodologia proposta, os elementos serão padronizados da mesma forma. Por exemplo, um elemento padronizado (f_i^*) torna-se:

$$f_i^*(x) = \frac{f_i(x) - f_i^{\min}(x)}{f_i^{\max}(x) - f_i^{\min}(x)}; \text{ caso indicador de benefício, ou} \quad 3.2$$

$$f_i^*(x) = \frac{f_i^{\max}(x) - f_i(x)}{f_i^{\max}(x) - f_i^{\min}(x)}; \text{ caso indicador de custos.} \quad 3.3$$

Onde: $f_i^{\min}(x)$ é o mínimo valor de f_i , calculado por $f_i^{\min} = \min_{i=1}^n f_i(x)$

Em geral, muitas decisões práticas possuem vários objetivos conflitantes e não-mensuráveis. Os procedimentos anteriores representam estes diferentes objetivos em relação a um denominador comum.

A partir das análises realizadas com relação aos critérios e restrições é aplicada à metodologia proposta da Programação Compromisso e posteriormente são analisadas as diversas possibilidades inerentes aos resultados. A cada sistema escolhido e do peso dado aos critérios pode-se optar pela melhor localização do reservatório.

3.4. Aquisição do Banco de Dados

Esta etapa se faz importante pelo fato da mesma ser o alicerce para a eficiência da pesquisa. E para tanto, tornou-se necessária a construção do banco de dados que por conveniência adotou-se como planos de informações importantes os dados relacionados a:

- a) Um modelo de elevação digital (MNT);
- b) Mapa de classificação do solo;
- c) Mapa de uso do solo;
- d) Superfície de Precipitação e de Evapotranspiração.
- e) Demandas hídricas na bacia.

3.4.1. Modelo numérico do terreno (MNT)

O modelo numérico do terreno é uma representação matemática da distribuição espacial de uma determinada característica vinculada à superfície real. Diante dos diferentes usos do MNT podem ser considerados como de fundamental importância para o trabalho: i) armazenamento de dados de altimetria para gerar mapas topográficos ii) análise de variáveis geofísicas; e iii) apresentação tridimensional da bacia. Foi utilizado o Idrisi como o programa para interpretar este MNT.

O primeiro passo foi a obtenção da rede de canais a partir dos dados do MNT na análise das depressões da bacia. Desta feita, pode-se determinar a rede de canais assim como os “melhores” locais para a localização dos reservatórios.

Para a obtenção da rede de canais são necessárias também as remoções das depressões. As depressões são consideradas obstáculos na determinação da direção do fluxo contínuo da água, pois quando uma célula é mais baixa e todas as demais são mais altas, caracteriza a depressão, podendo ser considerada uma impossibilidade na determinação do fluxo. Estas depressões são apresentadas fisicamente como lagos ou sumidouros, porém são comumente encontradas depressões de origens artificiais causadas por erros em células do MNT ou na interpolação do mesmo. Estas depressões são removidas através de algoritmos que preenchem as células que possuem esta característica, possibilitando assim a determinação da direção do fluxo. A Figura 3.2 apresenta um exemplo de depressões assim como o preenchimento efetuado.

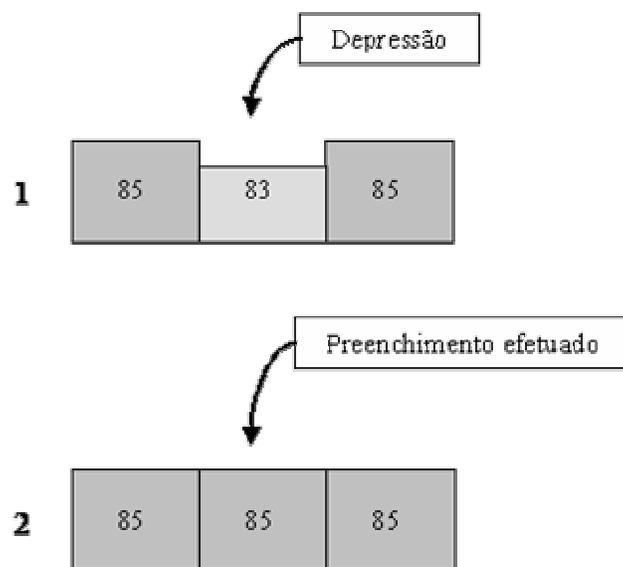


Figura 3.2.– (1) Depressão, (2) Preenchimento Efetuado.

A rede de canais da bacia do rio será delineada do MNT baseado no algoritmo modificado por Jenson, S. e J. Domingue, (1988). Primeiramente são identificados se uma célula ou um conjunto de células adjacentes são cercadas de vizinhos com elevação superior. Posteriormente, a direção do fluxo é especificada para cada célula com inclinação menor. Como exemplo, em um conjunto de 9 células (3x3) é calculada a superfície de direção do fluxo e identificada como o *pixel* mais baixo. A atribuição é feita mediante uma pesquisa de direção de maior declividade, determinada por dZ/dS , onde dZ é a diferença entre as

elevações na célula da direção considerada e a célula central e, dS tem valor igual a 1 das direções perpendiculares e $\sqrt{2}$ nas diagonais. A direção do fluxo é determinada como os *pixels* centrais e desprezados aqueles que não possuem tanta representação. Como exemplo a Figura 3.3 mostra a direção para uma superfície discretizada em 3 x 3.

No entanto, o reservatório não pode ser determinado somente em função dos dados no MNT; para tanto, são levados em conta os dados da classificação do solo onde são selecionadas algumas áreas em que o solo possui maior infiltração, ou seja, a possibilidade de escolher um local com infiltração alta é dificultada aplicando esta avaliação prévia.

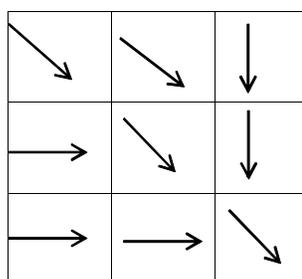


Figura 3.3 – Direção do escoamento para um conjunto de células 3x3.

3.4.2. Classificação do Solo

Do ponto de vista de engenharia, o objetivo da classificação dos solos é de poder estimar o seu provável comportamento ou, pelo menos, o de orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise do problema. No entanto, esta classificação também é importante na infiltração da água no solo, aspecto esse levado mais em conta na pesquisa.

São muitas as discussões sobre a validade dos sistemas de classificação, pois qualquer sistema cria grupos definidos por limites numéricos descontínuos, enquanto solos naturais apresentam características progressivamente variáveis. Entretanto, existem várias formas de classificação. Como, por exemplo, pela sua origem, pela sua evolução, pela presença ou não de matéria orgânica, pela estrutura, pelo preenchimento dos vazios, dentre outras formas. No entanto, os sistemas baseados no tipo e no comportamento das partículas que os constituem são os mais conhecidos.

Os sistemas de classificação que se baseiam nas características dos grãos que constituem os solos têm como objetivo a definição de grupos que apresentam

comportamentos semelhantes sob os aspectos de interesse da engenharia civil. Nestes sistemas, os índices empregados são geralmente a composição granulométrica.

Uma classificação bastante difundida e utilizada é a do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA/CNPS, 1999). Este sistema foi usado para a classificação do caso de estudo desta pesquisa, onde foram apresentados os estudos pedológicos, que têm como objetivo o reconhecimento das características físicas, químicas e agrológicas dos solos ocorrentes na bacia.

Porém, para a utilização destes dados foi necessária uma classificação posterior. Esta classificação está relacionada à drenagem do solo, sua infiltração e o conhecimento das características físicas da bacia, características fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa. Esta reclassificação dividiu a classificação original em quatro diferentes características, atribuindo um valor numérico a cada subdivisão(Quadro 3.1).

Quadro 3.1 – Reclassificação da Pedologia

Atributo	Sub-divisão
1	Baixa infiltração
2	Infiltração moderada
3	Alta Infiltração
4	Infiltração muito alta

3.4.3. Uso do solo

Um aspecto de extrema importância para o planejamento dos usos dos recursos hídricos é a caracterização da cobertura vegetal da bacia, abrangendo os estudos da vegetação e de uso atual das terras.

O mapeamento de uso das terras e cobertura vegetal teve como fonte os estudos realizados e divulgados em documentos oficiais. Estes estudos tiveram como fonte primária de informação os dados do satélite Landsat TM 5, cenas 214-067 e 215-067 mosaicadas. Posteriormente as imagens foram georreferenciadas para a projeção UTM, de acordo com o mapa planialtimétrico (base cartográfica). Foi utilizado ainda como referência da cobertura vegetal regional o mapa de vegetação do Projeto RADAMBRASIL – Folha Aracaju/Recife (RADAMBRASIL, 1983).

A classificação das imagens que foi disponibilizada foi realizada com apoio de visitas de reconhecimento de padrões de resposta espectral no campo. Vários pontos importantes para verificação em campo foram armazenados na memória de um receptor GPS (sigla em inglês para Sistema de Posicionamento Global) autônomo para rastreamento dos alvos em campo. Os dados descarregados do GPS foram então convertidos para um arquivo digital de

pontos e inseridos em ambiente de sistema de informações geográficas, junto com as imagens e a base cartográfica. As informações provenientes deste estudo subsidiaram o processo de classificação das imagens.

Entretanto, para a utilização destes dados foi necessária uma classificação posterior. Esta classificação está relacionada à aptidão para a implantação de reservatórios na área estudada. O objetivo desta reclassificação foi dividir a classificação original em 5 (cinco) diferentes classes de aptidão, atribuindo um valor numérico a cada subdivisão(Quadro 2.2).

Quadro 3.2 – Reclassificação do uso do solo quanto à aptidão para reservatórios.

Atributo	Sub-divisão
1	Aptidão muito baixa
2	Aptidão baixa
3	Aptidão moderada
4	Aptidão alta
5	Aptidão muito alta

3.4.4. Superfície de Precipitação, Evapotranspiração.

- **Interpolação dos dados**

Para a determinação das superfícies de precipitação e evapotranspiração foi necessária a utilização de alguns métodos de interpolação para efeito de comparação e a utilização daquele que mais se adequou ao estudo. Inicialmente, adotou-se o inverso do quadrado da distância - um dos métodos mais tradicionais e utilizados. Este método estima o valor desconhecido em um ponto do espaço utilizando uma média ponderada das amostras disponíveis, porém os pesos atribuídos são proporcionais à distância entre o ponto a ser estimado e os pontos conhecidos. Desta feita, são considerados que os pontos mais próximos devem assumir maior influência na determinação do ponto, sendo, portanto, mais representativos quanto mais próximos das amostras o ponto a ser interpolado estiver.

Outro método testado neste trabalho foi a interpolação através de *Krigagem*, cuja metodologia consiste na interpolação espacial e pode ser definida como um grupo de métodos de regressão linear que minimizam a variância da estimativa, a partir dos estudos entorno de um sistema de equações lineares considerando as covariâncias entre as amostras (Davis, 1986 *apud* Mendes & Cirilo, 2001). A *krigagem* difere do método tradicional por considerar que os pesos atribuídos às amostras foram estimados a partir de uma análise de dependência no espaço, determinada pelo variograma amostral.

Desta feita, foi considerada a *krigagem* ordinária como ferramenta para a interpolação dos dados. Na literatura este método é considerado aquele com um melhor estimador linear não tendencioso, pois faz com que a média dos erros seja igual a zero e minimiza a variância do erro. Faz-se necessário enfatizar que o variograma utilizado foi uma função linear, pois dentre as demais testadas não se observou mudança significativa fazendo com que fosse adotado o mais simples dos variogramas. Este método está incluído no Idrisi, programa utilizado para manipulação do ambiente de geoprocessamento.

Para a determinação destas superfícies interpoladas foram necessários o inventário e os estudos da rede pluviométrica e dos dados de evapotranspiração.

- **Rede pluviométrica**

Para o desenvolvimento dos estudos hidrológicos foram inventariadas 18(dezoito) estações pluviométricas. As entidades responsáveis pela operação dos postos pluviométricos, como ANEEL e SUDENE detêm a maior parte dos postos inventariados nesta região. Além disso, os dados pluviométricos foram obtidos do Banco de Dados Hidrometeorológicos da Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento (SEPLANDES) do Núcleo de Meteorologia e Recursos Hídricos de Alagoas - NMRH-AL.

Neste contexto foram necessárias as análises das estações pluviométricas, sendo realizados os preenchimentos de falhas e a análise de consistência dos dados.

O processo de preenchimento de falhas tem como objetivo complementar as séries de dados das estações pluviométricas que apresentem períodos sem informações ou com falhas nas observações devido a problemas com registros de aparelhos ou com operação dos dados. Para o preenchimento das séries, foi feita uma análise local, considerando o raio de influência entre os postos e algumas características topográficas, a exemplo da altitude dos postos.

Tal metodologia se fundamenta em processos iterativos de ajuste a uma curva dupla-massa, obtida pela soma dos valores acumulados, grafando-se no eixo vertical os dados do posto objeto de análise e, no eixo horizontal, os dados acumulados dos outros postos.

A análise pauta-se na realização de um único posto a cada vez, sendo fornecida a série original e a preenchida, do posto objeto de preenchimento e a série original dos postos de apoio. A seguir indicam-se, concisamente, os passos da sistemática de análise de consistência e preenchimento de falhas.

Selecionados os postos a serem utilizados nos estudos hidrológicos, foi escolhido um período comum para análise dos dados. A metodologia de análise e preenchimento de falhas, a nível mensal, seguiu os seguintes passos:

a) Escolha das estações de apoio - Fixados os períodos de análise, determinaram-se aqueles postos pluviométricos próximos ao posto a ser preenchido com características climáticas e topográficas semelhantes, utilizando-se, como apoio, três postos de cada vez.

b) Verificação de períodos comuns - A escolha dos postos de apoio, em cada período de análise, foi feita em função da série de dados disponíveis.

c) Seleção da série - O coeficiente de correlação mínimo, adotado para o aproveitamento da série consistida/preenchida, foi da ordem de: $r^2 \geq 0,70$ visto que não inabilita postos com boa quantidade de dados brutos ao mesmo tempo em que elimina aqueles altamente inconsistentes em relação aos dados.

Estabelecido tal critério, a partir da correlação igual ou superior à citada, em relação ao posto objeto de análise, obteve-se a série preenchida.

Após o preenchimento de falhas é necessário que se confirme a consistência dos dados do posto preenchido, ou seja, deve-se mostrar o grau de homogeneidade dos dados disponíveis no posto principal com relação às observações registradas nos postos de apoio. Utilizou-se para isto o método da Dupla Massa que consistiu em obter os valores médios das precipitações mensais acumuladas nos postos de apoio e os valores acumulados no posto a consistir.

- **Evapotranspiração**

O termo evapotranspiração se refere ao total da perda de água fisicamente evaporada do solo e fisiologicamente evaporada (transpirada) das plantas, e envolve uma troca de fase da água, da forma líquida para a forma de vapor e o transporte para a atmosfera. A evapotranspiração potencial representa a perda máxima de água na fase gasosa, de uma cobertura vegetal abundante e uniforme, de baixa altura, em fase de crescimento ativo, cobrindo totalmente uma extensa superfície e sem déficit de água.

O método utilizado para estimar a evapotranspiração potencial foi o de Linacre. Este procedimento baseia-se unicamente nos dados de temperatura mensal e latitude do lugar.

O método de Linacre é uma simplificação do método de PENMAN obtida através de correlações encontradas entre as diversas variáveis meteorológicas. Sendo assim, a equação de Linacre se resume a:

$$ETP = \frac{\frac{700(T + 0,006h)}{100 - \phi} + 15(T - T_0)}{80 - T} \quad 3.7$$

Onde:

ETP ⇒ Evapotranspiração potencial (mm/dia);

T ⇒ Temperatura média mensal (°C);

T0 ⇒ Temperatura média mensal do ponto de orvalho (°C) ;

h ⇒ Altitude (m);

ϕ ⇒ Latitude do local em graus (módulo);

Nesta pesquisa foram utilizados os dados disponibilizados no trabalho de Araújo (2002) onde foram determinados os dados de evapotranspiração para o estado de Alagoas a partir do método de Linacre, pois segundo Araújo (2002) é o que melhor se adaptou aos dados disponíveis.

3.4.5. Demanda hídrica

Este item apresenta relevância aos estudos das demandas hídricas da bacia hidrográfica, que se constituem em um dos parâmetros fundamentais para o planejamento dos recursos hídricos da bacia.

Um grande número de investimentos realizados por instituições públicas e privadas, muitas vezes com empréstimos internacionais, é destinado à construção, em grande escala, de projetos para uso de recursos hídricos. Um ponto crítico desta situação é a eficiência desses sistemas complexos, haja vista que existem dependências entre a forma como os mesmos venham a ser operados e mantidos e as finalidades para as quais foram projetados e construídos.

Em um complexo balanço entre usuários d'água será proposto um conjunto de reservatórios para os quais deverá ser definida a sua localização. Esses terão por objetivo armazenar grande parte das vazões afluentes à bacia, e qualquer tentativa de desenvolver planos de gerenciamento deverá considerar as diferentes alternativas para a operação dos sistemas hídricos.

Essas alternativas, por sua vez, deverão compreender uma análise de negociação entre as derivações para satisfação das demandas de abastecimento humano, dessedentação animal e agricultura irrigada, bem como para as demandas de outros usuários localizados às margens dos rios, tanto a jusante quanto a montante dos reservatórios.

Na bacia em estudo estão presentes dois grandes usuários com captação direta de seu leito: Duas Usinas de cana-de-açúcar, situadas no médio e no baixo curso do leito do rio.

Desta forma, a alocação de água dentro de uma estrutura de prioridades de demandas, definidas pela gestão, deve ser o ponto de partida na problemática do planejamento integrado dos recursos hídricos. A operação eficiente de um sistema com múltiplos reservatórios é de fundamental importância para a sustentabilidade da bacia estudada.

3.5. Aplicação da Técnica Programação Compromisso

Como abordado e definido no item 2.5, o método da Programação Compromisso baseia-se em uma noção geométrica do melhor, ou seja, o método foi elaborado para identificar a solução mais próxima de uma ideal, utilizando-se de um determinado padrão de medida de proximidade (Zeleny, 1973 *apud* Duckstein & Opricovic, 1980).

O método consiste em classificar várias alternativas sendo comparadas segundo a distância que cada uma tenha em relação ao ponto ideal, ou ao ponto anti-ideal, no espaço das decisões. O procedimento se assemelha à obtenção de ótimos de Pareto.

A Equação 3.8 é apresentada como a solução para a determinação da menor distância apresentada em Duckstein & Opricovic (1980), sendo:

$$l_p = \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i^p \left| \frac{f_i^{\max} - f_i^*(x)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \right|^p \right]^{1/p} \quad 3.8$$

onde:

α_i = peso referente a discrepância entre as soluções ideal e real i ,

f_i^{\max} = os melhores valores no conjunto finito dos $f_i(x)$;

f_i^{\min} = os piores valores na matriz de avaliação;

p = o peso referente aos desvios máximos no ajuste matemático da função.

Depois da introdução sobre Programação Compromisso apresentada no capítulo anterior e rerepresentada na Equação 3.8, serão abordados neste item os passos para o desenvolvimento da metodologia para a seleção de reservatórios, utilizando otimização multiobjetivo.

Assumindo uma matriz alternativa de projetos *versus* objetivos (f_{ij} , onde o valor numérico dos elementos f_{ij} na direção de i representa os critérios e na direção j indica alternativas de sistema. O algoritmo para a busca da solução compromisso é dividido em duas partes, conforme fluxograma apresentado na Figura 3.4:

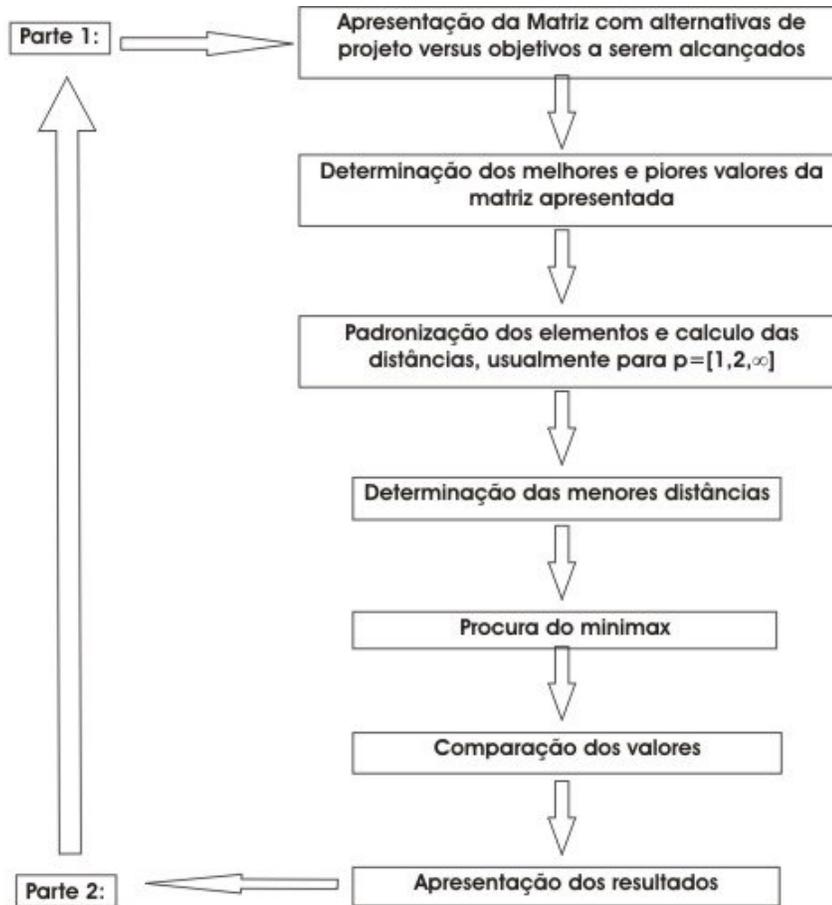


Figura 3.4 – Fluxograma com as etapas da aplicação da Programação Compromisso

→ Parte 1

A primeira parte do algoritmo está dividida em 7 passos.

1) Nesse primeiro passo o analista já deve ter identificado e quantificado os objetivos, assim como identificado, dentre todas as possibilidades estudadas, quais os sistemas a serem “testados” para assim definir qual a melhor alternativa de projeto a ser escolhida. Portanto, o primeiro passo será a entrada da matriz com alternativas de projeto *versus* objetivos a serem alcançados $[f_{ij}]$.

2) No segundo passo do algoritmo é necessária a determinação dos valores que representem os melhores e os piores valores dentro das alternativas propostas para cada objetivo identificado. Os melhores e piores valores são identificados por:

$$f_i^{\max} = \text{melhor } f_{ij}$$

$$f_i^{\min} = \text{pior } f_{ij}$$

3) Neste passo é realizada a padronização dos elementos das variáveis contínuas, isto é, dos valores atribuídos a cada local em cada função de cada objetivo a ser considerado no processo de análise para seleção da localização de reservatórios, fazendo com que as informações possam ser cruzadas, ou seja, permitindo que seja realizada uma análise comparativa entre os seus elementos.

A padronização envolve a transformação das escalas das variáveis decisórias, de tal forma que todas as variáveis sejam expressas no mesmo intervalo de grandeza, um exemplo muito comum é o intervalo entre zero e um. Após a padronização são calculadas as distâncias relativas, d_{ij} , do objetivo para o ponto ideal, definido em:

$$d_{ij} = \left(\frac{f_i^{\max} - f_{ij}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \right)^p \quad 3.9$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, n ;$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, m$$

$$l_p^j = \left(\sum_{i=1}^n d_{ij} \right)^{\frac{1}{p}} \text{ para } p \in Q, \quad 3.10$$

onde I é o conjunto dos inteiros, usualmente $[1, 2, \infty]$

4) Neste passo são determinadas as menores distâncias que ocorrem entre as soluções ideais e suficientes, ou seja:

$$\min_{i \in j} l_p^j = \left(\sum_{i=1}^n d_{ij} \right)^{\frac{1}{p}} \text{ para } p \in Q \quad 3.11$$

Este passo pode ser considerado o mais importante matematicamente, pois as soluções aqui diagnosticadas serão avaliadas pelos tomadores de decisões em conjunto com os resultados do passo 5. Ou seja, neste passo é determinada a solução correspondente da Programação Compromisso $x(p)$ (ou sistema de alternativa correspondente).

5) Este passo (5) se limita a procurar a solução minimax (para $p = \infty$),

$$\min_{i \in j} \max_{i \in n} \left| \frac{f_i^{\max} - f_{ij}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \right| \quad 3.12$$

Ou seja, dentre as alternativas geradas, a partir da equação fundamental que rege a programação, é determinada a pior solução dentre as melhores soluções geradas.

6) Neste sexto passo, o objetivo é que os valores resultantes da Programação Compromisso, gerados no quarto passo, possam ser comparados ($x_c(1)$, $x_c(2)$ e $x_c(\infty)$).

7) Neste passo os resultados são apresentados aos tomadores de decisões para que sejam avaliados e propostos pesos que serão utilizados na segunda parte do algoritmo.

→ **Parte 2**

1) Ainda com os dados iniciais da matriz de entrada $[f_{ij}]$ são analisados e adicionados pesos para os objetivos determinados pelos tomadores de decisão, são eles $\alpha_i = 1, 2, \dots, n$, analisando novamente toda a primeira parte do algoritmo, ou seja, repete-se os passos 2 a 7, como na parte 1, usando:

$$l_p^j = \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i^p d_{ij} \right)^{\frac{1}{p}} \quad \text{no passo 3} \quad 3.13$$

As duas partes do algoritmo podem ser executadas no mesmo espaço de tempo, ou seja, quando a primeira parte estiver sendo executada podem-se aplicar as análises referentes aos pesos dados às discrepâncias, fazendo com que seja apresentado aos tomadores de decisões um maior número de alternativas, geradas no mesmo espaço de tempo, para a solução do problema. Mas o propósito para que a análise da primeira parte seja feita separadamente é o fato de que os decisores podem ser influenciados pelos resultados apresentados, e, assim, as análises preliminares quanto aos pesos dados as discrepâncias podem ser pouco discutidas pelos decisores, os mais interessados pela implantação dos sistemas. Desta feita, somente após os dados reavaliados, aos olhos dos tomadores de decisões na parte 2, a solução pode ser escolhida ou não, dependendo da satisfação dos decisores. Todavia, a parte 2 fará parte da estrutura da análise de sensibilidade.

Neste contexto os modelos de solução compromisso de Pareto possuem uma grande importância operacional, pois facilmente são interpretados como modelos de discrepância entre a solução ideal e a eficiente. Salienta-se também a facilidade do cálculo se comparado com outros métodos.

De acordo com as características referentes às análises ambientais peculiares a esta pesquisa e o interesse na melhor solução ou numa solução satisfatória para o problema, será utilizada esta técnica, sendo o método da programação compromisso utilizado para a otimização do sistema.

4. Área de Estudo

O rio Coruripe é um dos mais importantes sistemas hídricos componentes da complexa rede hidrográfica alagoana, e por isso foi escolhida para teste da metodologia proposta. Trata-se de um rio de domínio estadual, em virtude de ter todo o seu percurso inserido no território do Estado de Alagoas. Além disso, a bacia apresenta uma base econômica bastante diversificada, compreendendo cultivos em larga escala de cana de açúcar, milho, feijão, fumo e coco, usinas de açúcar e álcool de grande porte, fazendo com que o planejamento do uso dos recursos hídricos seja um importante fator no desenvolvimento da bacia e conseqüentemente do Estado de Alagoas.

A bacia hidrográfica do rio Coruripe está localizada na parte central do Estado, sendo delimitada pela coordenadas geográficas 9°15' e 10°10' de latitude sul e 36°05' e 36°45' de longitude oeste, conforme mostra a Figura 4.1. Na Figura 4.2 são apresentadas as divisões municipais.

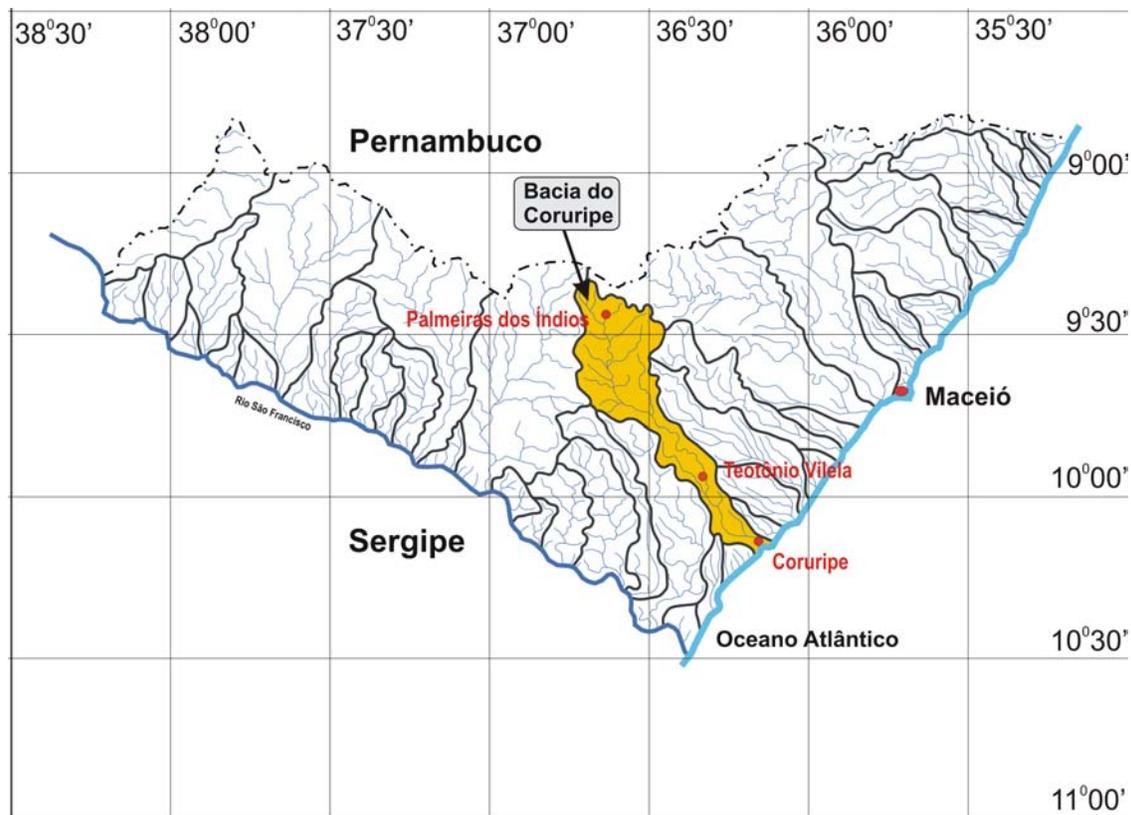


Figura 4.1 – Localização geográfica da Bacia do Rio Coruripe

Seus limites ao norte são com a bacia do rio Paraíba; a oeste com as bacias dos rios Traipu e Piauí; e a leste com as bacias dos rios São Miguel, Jequiá, e Poxim. Na foz, faz

limites com as drenagens dos riachos Lagoa do Pau, ao norte, e Feliz Deserto, ao sul. No Quadro 4.1 é apresentada a formação percentual da área da bacia.

Quadro 4.1 – Percentuais de participação em área da bacia do rio Coruripe por município (IBGE:2000).

N	Municípios	Área (km ²)			
		Total	Na bacia	% do município	% da bacia
01	Arapiraca	366,0	133,0	37,3	8,52
02	Belém	48,2	29,7	63,3	1,90
03	Campo Alegre	295,1	1,5	0,5	0,09
04	Coité do Nóia	88,5	86,3	100,0	5,52
05	Coruripe	967,4	183,6	19,5	11,76
06	Igaci	333,6	227,1	69,3	14,54
07	Junqueiro	220,7	148,3	68,9	9,49
08	Limoeiro de Anadia	334,4	137,7	42,3	8,82
09	Mar Vermelho	91,6	2,9	3,3	0,19
10	Palmeira dos Índios	460,6	341,3	76,0	21,85
11	Tanque d'Arca	156,0	16,3	10,7	1,04
12	Taquarana	166,5	106,0	65,3	6,79
13	Teotônio Vilela	297,9	148,3	51,1	9,49
Totais		3.826,5	1.562,0	-	100,00



Figura 4.2 – Divisão municipal

Em termos demográficos, a bacia hidrográfica do rio Coruripe compreende, total ou parcialmente, treze municípios, que apresentavam uma população total de 500.205 habitantes no ano 2000, equivalente a cerca de 18% da população estadual. A bacia apresenta uma alta densidade populacional, da ordem de 130 hab/km². A taxa de crescimento demográfico foi de 2,78% ao ano no período 1960/1991, sendo que essa taxa de crescimento vem caindo, tendo sido de 2,05% no período 80/91, e caindo para 1,42%, quando se considera o período 80/96. No período 1991/1996, a população se manteve praticamente estável.

Quadro 4.2- Áreas e populações dos municípios na Bacia

N	Municípios	Área (km ²)			População total			População na bacia		
		Total	Na bacia	%	Sede	Rural	Total	Sede	Rural	Total
01	Arapiraca	366,0	133,0	37,3	143.949	42.407	186.356	0	15.816	15.816
02	Belém	48,2	29,7	63,3	1.823	4.095	5.918	1.823	2.591	4.414
03	Campo Alegre	295,1	1,5	0,5	16.113	24.923	41.036	0	127	127
04	Coité do Nória	88,5	86,3	100,0	2.521	9.469	11.990	2.521	9.469	11.990
05	Coruripe	967,4	183,6	19,5	17.281	31.354	48.635	17.281	6.106	23.387
06	Igaci	333,6	227,1	69,3	5.884	19.707	25.591	5.884	13.654	19.538
07	Junqueiro	220,7	148,3	68,9	6.958	16.870	23.828	0	11.626	11.626
08	Limoeiro de Anadia	334,4	137,7	42,3	2.110	22.149	24.259	2.110	9.359	11.469
09	Mar Vermelho	91,6	2,9	3,3	1.478	2.596	4.074	0	85	85
10	Palmeira dos Índios	460,6	341,3	76,0	47.121	20.881	68.002	47.121	15.876	62.997
11	Tanque d'Arca	156,0	16,3	10,7	2.142	4.474	6.616	0	479	479
12	Taquarana	166,5	106,0	65,3	4.336	12.706	17.042	4.336	8.303	12.639
13	Teotônio Vilela	297,9	148,3	51,1	29.842	7.016	36.858	29.842	3.582	33.424
Totais		3.826,5	1.562,0	-	281.558	218.647	500.205	110.918	97.073	207.991

Fonte: IBGE - Censo Demográfico (2000)

A bacia apresenta uma base econômica bastante diversificada, compreendendo cultivos em larga escala de cana de açúcar, milho, feijão, fumo e coco, usinas de grande porte de açúcar e álcool, como a Coruripe, Guaxuma e a Seresta, e a pecuária de leite, estando localizado em Palmeira dos Índios o maior laticínio do Estado.

Aos produtos agrícolas, é dada maior ênfase, pois eles são cultivados na totalidade da bacia. Os produtos agrícolas que ocupam maiores áreas, dentre os demais, são: o feijão, com cerca de 18.000 ha, a mandioca, com cerca de 11.000 ha, e o milho, com cerca de 9.000 ha. Segue-se a cana de açúcar, o algodão herbáceo, o abacaxi, batata doce e arroz.

4.1. Aspectos Físicos e Climatológicos

Este item contempla uma análise dos principais aspectos físicos e climatológicos que foram considerados de fundamental importância para o desenvolvimento pleno da presente pesquisa.

4.1.1. Modelo Numérico do Terreno

Para o trabalho foi obtido um MNT com resolução de 90 x 90 m, junto ao Laboratório de Geoprocessamento do Centro de Ecologia da UFRGS que está disponível publicamente na forma digital. No entanto, foi necessário uma reformatação para que o MNT ficasse com uma resolução de 100x100m, pois esta resolução facilitou no tratamento com as coordenadas, sendo a resolução adotada para a realização deste trabalho. A Figura 4.3 mostra o modelo numérico do terreno da bacia do Rio Coruripe.

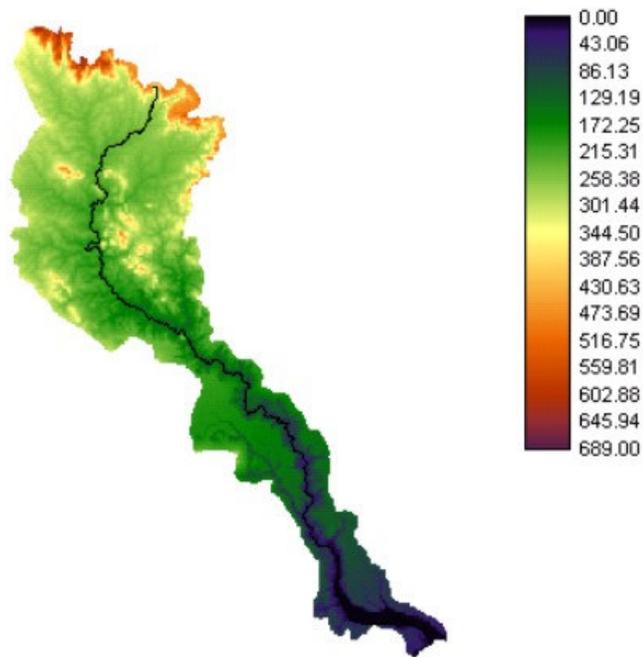


Figura 4.3 - MNT da Bacia do Rio Coruripe.

O rio principal da bacia nasce nas proximidades do município de Palmeira dos Índios, a uma altitude de aproximadamente 550 m. Nos seus 28 km de extensão iniciais, o rio tem o seu curso orientado no sentido geral N – S, inflectindo, após esse trecho, para o sentido sudeste, até sua confluência com o Oceano Atlântico. As declividades mais acentuadas ocorrem no trecho inicial, onde apresenta um desnível de 160 m em um trecho de 25 km de extensão.

Esta bacia hidrográfica tem uma forma muito particular já que, na parte central, nas proximidades da cidade de Limoeiro de Anadia, a bacia sofre um pronunciado estreitamento, sendo o leito bastante encravado nesta região. Neste trecho, a bacia funciona praticamente como um canal condutor das precipitações ocorridas em suas cabeceiras, e possui cerca de 6 km de largura, enquanto que na sua parte superior a mesma chega até 30 km de largura. Sua forma é alongada, com extensão de cerca de 140 km.

4.1.2. Classificação do Solo

O estudo apresentado no PDRH (Plano diretor de recursos hídricos) da bacia do Coruripe apresenta os resultados dos estudos pedológicos, que tiveram como objetivo o reconhecimento das características físicas, químicas e agrológicas dos solos ocorrentes na bacia, compreendendo a descrição das unidades de mapeamento. Os solos foram classificados segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA/CNPS, 1999), onde foram destacados os seguintes critérios.

Quadro 4.3- Critérios para classificação do solo e seu uso para irrigação

Horizontes Diagnóstico Superficiais	Horizontes Diagnóstico Subsuperficiais	Atributos Diagnósticos
Grupamento de Classes de Textura	Conceito das Classes de Solos	Fases de Unidade de Mapeamento

Em função da sua diversidade de condições geológicas e geomorfológicas, a bacia do Coruripe apresenta uma grande variedade de tipos de solos. Os Latossolos Amarelos, de textura arenosa e média/argilosa, que ocupam os topos dos tabuleiros da parte média da bacia, e que penetram na região do Agreste, no trecho superior, são solos muito profundos, com bom potencial produtivo, predominantemente ocupados com culturas de cana de açúcar. Na parte superior da bacia e no trecho do Agreste predominam os Latossolos Vermelho-amarelos e os Planossolos, de textura arenosa e média/argilosa, podendo apresentar caráter solódico, utilizados para pecuária e cultivos de subsistência. Nas partes central e baixa da bacia ocorrem os Argissolos Amarelos, de textura arenosa, média ou argilosa, que formam os tabuleiros característicos da região, com bom potencial produtivo, também ocupados pelas culturas de cana de açúcar. Outras atividades são registradas na bacia como, por exemplo, a criação de animais e a produção de parte da bacia leiteira do estado de Alagoas.

A classificação do solo foi realizada em 20 diferentes tipos na classificação do solo. Porém, para a utilização destes dados foi necessária uma classificação posterior relacionada à drenagem do solo, sua infiltração e do conhecimento das características físicas da bacia, características fundamentais para o desenvolvimento do trabalho. A classificação foi feita em quatro diferentes características entre solo com infiltrações baixas, moderadas, altas e muito altas. Esta classificação é demonstrada no Quadro 4.4 e relaciona a classificação inicial apresentada no PDRH do Coruripe e a classificação realizada para o trabalho (Figura 4.4).

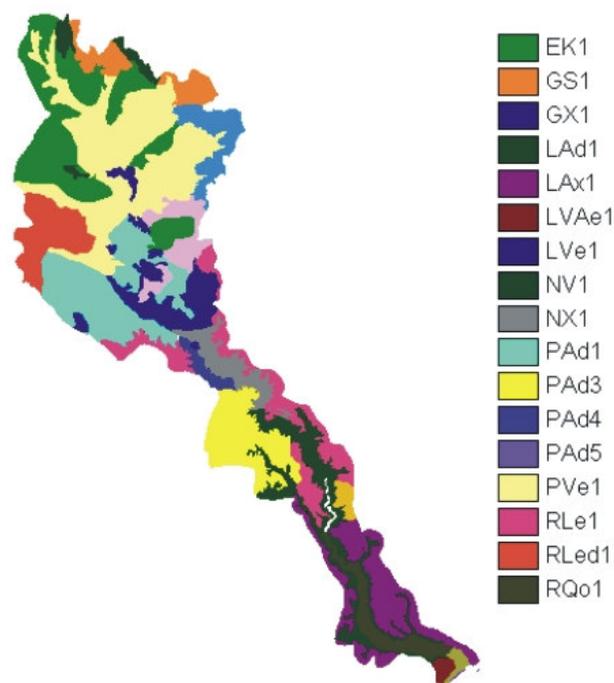
Quadro 4.4- Classificação do PDRH do rio Coruripe e a classificação para a pesquisa

Item	Classificação do PDRH	Classificação com relação a infiltração.
1	LVAe1	Alta
2	PVe1	Alta
3	RLed1	Muito Alta
4	PAd2	Alta
5	PAd1	Muito Alta
6	PAd4	Muito Alta
7	SXe1	Moderada
8	RLe1	Muito Alta
9	SXe2	Moderada
10	LVe2	Alta
11	PAd3	Muito Alta
12	NX1	Muito Alta
13	SXe3	Baixa
14	LAX1	Alta
15	LAd1	Alta
16	GX1	Baixa
17	EK1	Baixa
18	LVe1	Moderada
19	NV1	Alta
20	GS1	Muito Alta

4.1.3. Cobertura Vegetal

Na caracterização realizada pela SEMARHN / AL para o desenvolvimento do plano da bacia, a bacia do rio Coruripe apresenta três formações principais:

- 1) Floresta Estacional Semidecidual, dominante nas áreas de relevo mais movimentado a norte e a nordeste de Palmeiras dos Índios;
- 2) Caatinga, que predomina em toda a parte semi-árida da bacia e;



(a) classificação do solo

Figura 4.4 – Textura do Solo segundo PDRH do Coruripe

3) Floresta Ombrófila Densa, característica das partes média e baixa da bacia, sob domínio de clima semi-úmido, tendo sido substituída de forma quase total pelos canaviais.

De um modo geral, a bacia se caracteriza pela intensa ocupação antrópica, onde aparecem pouquíssimos remanescentes da vegetação original, com áreas contínuas pequenas e de forma fragmentada. A Figura 4.5 apresenta o uso do solo na bacia e a sua classificação. Estes dados serão utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, como critério de avaliação.

4.1.4. Climatologia

A bacia possui um clima de temperaturas elevadas, com amplitude térmica pouco superior a 5°C e temperaturas médias anuais sempre superiores a 18°C. As menores temperaturas são observadas no segundo semestre do ano, principalmente nos meses de setembro a novembro, na porção norte da área e entre junho e agosto na sua porção sul, próximo à cidade de Coruripe. As temperaturas mais elevadas, por sua vez, acontecem no início do ano, entre fevereiro e abril. Observa-se que as maiores médias anuais ocorrem no extremo sul da bacia, onde se aproximam de 27,2°C.

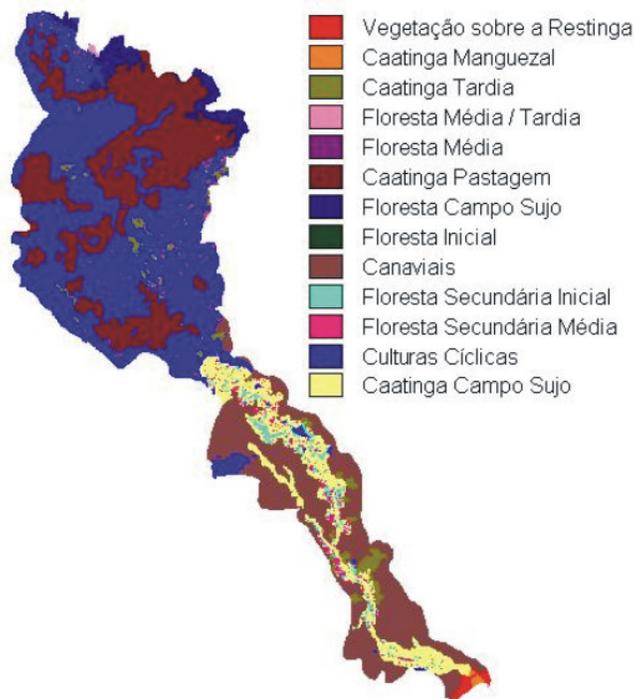


Figura 4.5 - Uso do Solo na Bacia do Coruripe no ano 2000

O regime pluviométrico da bacia se caracteriza por uma precipitação média anual da ordem de 1.100 mm, porém com grande variação espacial, oscilando entre um mínimo de 650 mm/ano na região de Arapiraca, na parte alta da bacia, e um máximo de até 1.500 mm/ano na região de Pindorama, na faixa litorânea. O trimestre mais chuvoso ocorre entre maio e julho, em praticamente toda a bacia, enquanto os meses menos chuvosos se concentram no período de verão, entre os meses de outubro a dezembro.

A evaporação anual média, na área em estudo, representada pelos dados da estação de Palmeira dos Índios foi de 1.673 mm/ano. Quanto à variação sazonal, essa estação apresenta níveis de evaporação mais elevados nos meses de verão, quando chegam a atingir valores médios da ordem de 232 mm.

4.2. Rede Hidrométrica

Na bacia do rio Coruripe e na região em seu entorno, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), conta apenas com uma estação Meteorológica completa em Palmeira dos Índios. Além dessa estação, foram utilizadas 12 estações pluviométricas, operadas por diversos órgãos (DNAEE, DNOCS, SUDENE) cujas medições já superavam os 20 anos. As localizações, períodos de observação e utilização no estudo das estações climatológicas e

pluviométricas são apresentadas no Quadro 4.5. Estes dados foram obtidos a partir do Plano Diretor dos Recursos Hídricos da bacia.

Quadro 4.5– Posto de bases meteorológicas e pluviométricas utilizados nos estudos

Postos	Município	Coordenadas		Período	Órgão	Utilização
Anadia	Anadia	36°20'	9°38'	1913-1997	OUTROS	P
Arapiraca	Arapiraca	36°39'	9°45'	1963-1991	SUDENE	P
Coruripe	Coruripe	36°10'	10°07'	1936-1985	OUTROS	P
Igaci	Igaci	36°38'	9°33'	1963-1999	SUDENE	P
Junqueiro	Junqueiro	36°29'	9°56'	1913-1987	DNOCS	P
Lagoa da Canoa	Lagoa da Canoa	36°44'	9°50'	1920-1999	DNOCS	P
Limoeiro de Anadia	Limoeiro de Anadia	36°30'	9°45'	1912-1999	DNOCS	P
Mar Vermelho	Mar Vermelho	36°23'	9°27'	1963-199	SUDENE	P
Minador do Negrão	Palmeira dos Índios	36°52'	9°19'	1963-1991	SUDENE	P
Palmeira dos Índios*	Palmeira dos Índios	36°39'	9°24'	1913-1985	DNOCS	P,T,N,E,U,V
Colônia Pindorama	Coruripe	36°24'	10°07'	1963-1995	SUDENE	P
Quebrangulo	Quebrangulo	36°29'	9°20'	1912-1994	DNOCS	P
Tanque D'Arca	Tanque D'Arca	36°26'	9°32'	1993-	SUDENE	P

* Estação meteorológica

** P - Pluviometria; T - Temperatura; V - Vento; N - Nebulosidade; U - Umidade Relativa; E - Evaporação.

Há somente uma única estação fluviométrica na Bacia, dispondo de informações de cotas médias diárias, descargas médias diárias, equações das curvas-chaves e resumos de medição de descarga líquida para o período disponível, qual seja, de 1978 a 1998. O PDRH apresenta os dados desta estação fluviométrica juntamente com seus dados para a sua identificação e a sua área de abrangência. O Quadro 4.6 apresenta o inventário das estações fluviométricas.

Quadro 4.6- Inventário das Estações Fluviométricas

Código	Nome da Estação	Curso d'água	Área de drenagem (Km ²)	Latitude	Longitude
39980000	Camaçari	Rio Coruripe	1.383	10° 01' 52"	36° 18' 18"

Na Figura 4.6 são representadas as localizações dos postos pluviométricos e estações meteorológicas utilizadas nos estudos climatológicos.



Figura 4.6 - Localização dos postos pluviométricos e fluviométricos

4.3. Usuários e Demandas Hídricas

A utilização do rio Coruripe para o atendimento das demandas ao longo da bacia é severamente restringida. Na parte superior da bacia, essas restrições decorrem do caráter intermitente do curso d'água, que apresenta vazões nulas durante vários meses do ano, além do alto teor de salinidade de suas águas. Nos trechos médio e baixo, onde as vazões já se apresentam disponíveis durante todo o ano, as restrições decorrem da degradação da qualidade das águas, provocada pelos lançamentos de efluentes de esgotos urbanos de diversas cidades, pelos lançamentos de efluentes das Usinas, e pelas águas de drenagem das áreas de irrigação da cana de açúcar. Já na parte baixa da bacia, sob influência da zona marítima, além dos descartes de efluentes das usinas e de esgotos urbanos, as águas do rio apresentam alto teor de salinidade, devido à intrusão das marés. Nesta área, tem-se informações sobre a existência de um dique com comportas, construído pelo extinto DNOS e atualmente fora de operação, destinado a controlar a intrusão da cunha salina.

Devido a essas condições, a qualidade das águas do rio Coruripe apresenta severas restrições para os usos considerados legalmente prioritários - abastecimento humano e a

dessedentação animal, servindo apenas, com restrições, para os usos na irrigação dos cultivos de cana de açúcar e nos processos industriais das usinas.

Em épocas fora do período de moagem, verificam-se usos restritos, para a dessedentação de animais, no trecho médio da bacia, situado entre as Usinas Seresta e Coruripe, onde o rio já apresenta boas condições de vazão da ordem de 7,1 m³/s.

Essas restrições de qualidade fazem com que nenhuma das sedes municipais localizadas na bacia seja abastecida pelas águas do rio Coruripe. Todos os demais núcleos urbanos de porte são atendidos através de adutoras, que importam água de outras bacias. Nessas condições, não deverá haver, em princípio, expectativas de demandas para abastecimento urbano a partir do rio Coruripe. No entanto, para a realização do trabalho serão analisadas as demandas urbanas da bacia.

Os principais usuários de água da bacia do rio Coruripe são os irrigantes, seguido da agro-indústria e do abastecimento público que na atualidade pode se considerar inexistente no que se refere ao uso do recurso do rio Coruripe.

Diante disso, nos estudos de demandas, são considerados os atendimentos das seguintes necessidades hídricas na bacia: a) abastecimento urbano das sedes municipais localizadas na bacia, abastecimento rural, para a população rural dispersa na parte dos municípios inserida na bacia e dessedentação de rebanhos; b) abastecimento do processo industrial das Usinas Coruripe e Seresta; c) irrigação da cana de açúcar.

Tendo em vista o caráter sazonal das principais demandas atualmente existentes na bacia - a irrigação da cana de açúcar e o abastecimento do processo industrial das Usinas - fortemente concentrados em alguns meses do ano, optou-se por estimar as necessidades hídricas em termos de volume anual demandado. Este valor pode ser facilmente convertido na vazão contínua equivalente, para efeito do cálculo do balanço hídrico.

Para um horizonte tendencial, segundo dados do Plano Diretor dos Recursos Hídricos da Bacia do Rio Coruripe, foram estimadas as demandas de água para a bacia do rio Coruripe. E considerando os usuários existentes na bacia, as demandas hídricas foram calculadas da seguinte maneira:

1) Para a estimativa da demanda anual para o abastecimento urbano, foram consideradas as sedes municipais inseridas na bacia, adotando-se os coeficientes de consumo variáveis com a população. O Quadro 4.7 apresenta a estimativa para todos os municípios da bacia.

Quadro 4.7- Demanda anual para abastecimento urbano

N	Cidades	População	Per-cápita (l/hab)/dia	Vol. anual
01	Belém	1.823	100	66.540
02	Coité do Nória	2.521	120	110.420
03	Coruripe	17.281	150	946.135
04	Igaci	5.884	150	322.149
05	Limoeiro de Anadia	2.110	120	92.418
06	Palmeira dos Índios	47.121	150	2.579.875
07	Taquarana	4.336	120	189.917
08	Teotônio Vilela	29.842	150	1.633.850
	Totais	110.918	-	5.941.304

2) A estimativa da demanda para o abastecimento rural difuso considera a população rural inserida na bacia, adotando um coeficiente de consumo de 80 (l/hab)/dia. Desta feita, a demanda rural = $97.073 \text{ hab} \times 80 \times 365 / 1.000 = 2.834.532 \text{ m}^3/\text{ano}$.

3) Para a estimativa das necessidades hídricas requeridas para a dessedentação de animais, foram adotados os seguintes procedimentos: a) estimativa da população animal por município; b) Conversão dos rebanhos em equivalente/bovino; c) Cálculo do rebanho por município, aplicando um percentual da área no município, resultando no Quadro 4.8

Quadro 4.8- Rebanhos inseridos na bacia

N	Municípios	Total em	% inserido	Rebanho na bacia
01	Arapiraca	18.556	37,30	6.921
02	Belém	7.497	63,30	4.746
03	Campo Alegre	3.341	0,50	17
04	Coité do Nória	6.736	100,00	6.736
05	Coruripe	9.309	19,50	1.815
06	Igaci	23.132	69,30	16.030
07	Junqueiro	5.349	68,90	3.685
08	Limoeiro de Anadia	10.171	42,30	4.302
09	Mar Vermelho	8.305	3,30	274
10	Palmeira dos Índios	42.483	76,00	32.287
11	Tanque d'Arca	7.961	10,70	852
12	Taquarana	10.170	65,30	6.641
13	Teotônio Vilela	4.229	51,10	2.161
	Totais	157.249		86.467

Fonte: Anuário Estatístico 2003

Deste modo, a necessidade hídrica anual para dessedentação dos rebanhos é de: Vol. anual = $86.467 \text{ equivalente/bovino} \times 50 \text{ l/dia} \times 365 / 1000 = 1.578.023 \text{ m}^3/\text{ano}$.

4) Para o abastecimento agro-industrial as informações foram colhidas junto as usinas e foram estabelecidas as seguintes demandas médias: a) 6.000 litros de água de lavagem da

cana de açúcar, por tonelada de cana processada, totalmente reaproveitada; b) 500 litros de água de evaporadores, por tonelada de cana processada; c) 12.000 litros de água de colunas barométricas, por tonelada de cana processada.

Com base nesses números, chega-se a uma demanda total de 12,5 m³ por tonelada de cana-de-açúcar. Para a avaliação da vazão retirada do manancial, foram considerados os seguintes pressupostos adicionais: a) processo de moagem é concentrado em um período de 06 meses; b) devido ao reaproveitamento e reciclagem das água de processo pelas usinas, foi admitida uma perda de 50%, o que significa uma retirada efetiva do manancial de apenas 50% da demanda estimada. A estimativa da vazão demandada está apresentada no Quadro 4.9.

Quadro 4.9- Demanda hídrica para o processo industrial das Usinas

Usinas	Cana processada (t/ano)*	Demanda total (m ³ /ano)	Vazão média (m ³ /s)	Vazão retirada (m ³ /s)
Coruripe	2.024.752	25.309.400	1,627	0,814
Seresta	437.618	5.470.225	0,352	0,176
TOTAL	2.462.370	30.779.625	1,979	0,989

*Fonte: ASSUCAL - Safra 1999/2000

5) Para a demanda da irrigação, várias etapas para o cálculo foram seguidas, sendo apresentadas no PDRH uma demanda variável em função da lâmina de irrigação efetivamente aplicada nas culturas. Para simular esse comportamento, foram determinadas as vazões para valores da lâmina mensal de 40 mm/mês, resultando valores de 3,29 m³/s e 5,84 m³/s, para dois cenários: atual e com áreas em expansão.

A partir dos elementos acima determinados, tem-se as demandas atuais de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Coruripe, com a distribuição apresentada no Quadro 4.10.

Quadro 4.10- Demandas totais na bacia do Coruripe

N	Discriminação	Volume anual (m ³ /ano)	Q _{méd} (m ³ /s)	%
01	Abastecimento urbano	5.941.304	0,188	4,10
02	Abastecimento rural	2.834.532	0,090	1,96
03	Dessedentação de rebanhos	1.578.023	0,050	1,09
04	Abastecimento agro-industrial	30.779.625	0,976	21,24
05	Irrigação da cana de açúcar	103.753.440	3,290	71,61
	Totais	144.886.924	4,594	100,00

Fonte: PDRH Coruripe

4.4. Plano atual de reservatórios na bacia

Este item se refere aos estudos desenvolvidos e apresentados no PDRH da bacia do rio Coruripe os quais representam o planejamento, num futuro próximo, para o aproveitamento

dos recursos hídricos desta bacia. Estes estudos indicam que o melhor aproveitamento dependerá da implantação de barragens de regularização. A partir dessa constatação, foram desenvolvidos estudos hidrológicos e de reconhecimento, que indicaram a viabilidade preliminar da implantação de dois barramentos: o primeiro, identificado como Barragem Coruripe I, situado em sítio já estudado, localizado no rio Coruripe a montante da ponte do Poção, onde se poderia dispor de volume de acumulação estimado em 50,00 hm³; a outra barragem, identificada como Coruripe II, seria implantada também no rio Coruripe, no trecho a montante da ponte da BR-101, com um volume de acumulação da ordem de 30,00 hm³ (Figura 4.7).

A Barragem Coruripe I poderá atender às necessidades de irrigação da Usina Coruripe e dos fornecedores de cana dessa região, além do abastecimento industrial da própria Usina Coruripe, podendo também atender ao abastecimento da cidade de Coruripe e dos demais núcleos urbanos da sua área de influência.

A Barragem Coruripe II terá como objetivo o abastecimento da cidade de Teotônio Vilela, que enfrenta atualmente sérias deficiências no seu sistema de abastecimento, e dos demais núcleos urbanos da sua área de influência, bem como a irrigação da Usina Seresta e de fornecedores de cana da região, além de atender à demanda industrial da mesma.

A implantação desses barramentos é condicionada pelos problemas de degradação da qualidade das águas, que atualmente se verificam na bacia do Coruripe. Neste sentido, a viabilização do sistema hídrico proposto dependerá do controle das fontes de poluição, através da implementação do Programa de Monitoramento da Qualidade das Águas, do licenciamento ambiental e do respectivo monitoramento, bem como da implementação de um rigoroso programa de outorga de uso para o lançamento de efluentes.

A implantação desses barramentos representa a única alternativa viável para o atendimento das demandas reprimidas existentes na bacia, para abastecimento urbano, irrigação da cana de açúcar e suprimento industrial. Por este motivo, a implantação desses barramentos despertou grande interesse em todos os segmentos usuários da bacia, e nas lideranças políticas da região.

Nesta perspectiva, o sistema de gerenciamento da bacia deve levar em consideração a nova configuração do sistema hídrico do rio Coruripe, decorrente da implantação dos barramentos. Nessa nova situação, praticamente 100% das disponibilidades hídricas da bacia estarão sendo controladas pelas duas barragens, que deverão, conseqüentemente, serem concebidas dentro do enfoque de "usos múltiplos".

A Figura 4.7 apresenta a localização proposta no PDRH do rio Coruripe.



Figura 4.7 - Localização das barragens Coruripe I e Coruripe II previstas no PDRH

Fonte: PDRH Coruripe.

5. Aplicação e Resultados

O presente trabalho foi aplicado à bacia do Rio Coruripe, em Alagoas, já descrita no Capítulo 4. Esta bacia foi escolhida por se tratar de uma bacia com características que possibilitam a aplicação da metodologia. Além disso, verifica-se a necessidade de estudos para a localização de reservatórios, principalmente, no que tange o atendimento à demanda gerada pelas áreas irrigadas e as indústrias de açúcar e álcool, levando em as demandas prioritárias segundo as Leis Federal e Estadual.

O desenvolvimento da pesquisa se deu em três etapas. Na primeira etapa foram identificados os objetivos, critérios e as restrições a serem utilizadas, e conseqüentemente, a formulação das funções objetivo referentes a cada objetivo a ser atingido. Esta etapa visa apresentar, com base nos dados oficiais e nas peculiaridades da bacia, os principais critérios na escolha da melhor alternativa para a localização de reservatórios de regularização de vazões.

A segunda etapa consiste na formulação de diferentes alternativas e na obtenção dos resultados das funções objetivos para que, na terceira etapa, seja verificada a aplicabilidade da Programação Compromisso e a sensibilidade de seus parâmetros, como proposto metodologicamente.

5.1. Usuários e prioridades

De acordo com a Lei Estadual 5.965 de 10 de novembro de 1997, são 5(cinco) as prioridades para o uso da água no Estado de Alagoas. Estas prioridades estão apresentadas no Quadro 5.1.

Quadro 5.1– Prioridades de uso para as águas em Alagoas

Prioridade de atendimento	
1º	Os serviços públicos de abastecimento coletivo de água;
2º	O abastecimento coletivo destinado a hospitais, quartéis, presídios, colégios e outros a serem regulamentados;
3º	Outros abastecimentos coletivos não residenciais, compreendendo entidades públicas, da indústria, do comércio e serviços;
4º	O abastecimento para fins agropecuários
5º	Outros usos permitidos.

No presente trabalho foram adotados 4 (quatro) ordens de prioridades para as demandas que, tacitamente, se adequam às apresentadas anteriormente, seguindo, desta

forma, as legislações federal e estadual. O Quadro 5.2 apresenta as ordens de prioridades adotadas na pesquisa.

Quadro 5.2– Ordem de prioridade adotada para a bacia do rio Coruripe

Prioridade de atendimento	
1º	Abastecimento humano
2º	Abastecimento animal
3º	Abastecimento industrial
4º	Abastecimento para agricultura

Definidas as prioridades desta pesquisa, foi necessária a identificação dos usuários e dos Pontos de Captação na bacia, sendo definidos de acordo com a característica da demanda e de sua localização geográfica na bacia. Estas demandas estão apresentadas no Quadro 5.3 (Figura 5.1).

Quadro 5.3. – Pontos de Captação (Controle)

Ponto de Captação	Nome do Ponto de Captação	Vol.anual (hm³)	Ponto de Captação	Nome do Ponto de Captação	Vol.anual (hm³)
Demanda Humana			Demanda para a Irrigação		
PC-1	Limoeiro de Anadia	0.739	PC-15	Campo Alegre-	3.127
PC-2	Teotônio Vilela	1.839	PC-16	Campo Alegre-	6.255
PC-3	Coruripe	1.993	PC-17	Campo Alegre-	0.991
Demanda para a dessedentação animal			PC-18	Junqueiro – 01	0.662
PC-4	Limoeiro de	0.044	PC-19	Teotônio Vilela-	4.289
PC-5	Limoeiro de	0.035	PC-20	Teotônio Vilela-	2.617
PC-6	Junqueiro	0.067	PC-21	Junqueiro – 01	2.617
PC-7	Teotônio Vilela	0.039	PC-22	Junqueiro – 02	2.617
PC-8	Coruripe_01	0.001	PC-23	Junqueiro – 03	1.009
PC-9	Coruripe_02	0.006	PC-24	Teotônio Vilela-	26.175
PC-10	Coruripe_03	0.027	PC-25	Teotônio Vilela-	4.384
Demanda para a indústria			PC-26	Coruripe – 01	2.807
PC-11	Usina Coruripe 01	6.370	PC-27	Junqueiro – 04	1.104
PC-12	Usina Coruripe 02	13.245	PC-28	Junqueiro – 05	1.261
PC-13	Usina Coruripe 03	6.181	PC-29	Junqueiro – 06	1.930
PC-14	Reunidas Seresta S/A	5.471	PC-30	Coruripe – 02	16.083

5.2. Identificação dos objetivos, variáveis decisórias e restrições para a localização de reservatórios.

A identificação dos objetivos depende diretamente dos conflitos existentes na bacia em estudo. No entanto, a dúvida freqüente é se o uso múltiplo das águas é uma causa ou consequência dos conflitos de usos. O consenso é que somente o atendimento

resultado da função objetivo das alternativas é o somatório das funções objetivo aplicadas aos reservatórios.

5.2.1. Atendimento ao abastecimento humano

Cada objetivo possui uma gama de critérios a serem levados em conta para que o mesmo seja atendido. Dentre os inúmeros critérios possíveis, foram escolhidos aqueles considerados plausíveis e que influenciam diretamente na determinação do local escolhido para a implantação do reservatório, sendo escolhidos os seguintes critérios para atingir o objetivo do atendimento a demanda humana:

$X_1 \rightarrow$ O desnível geométrico do reservatório em relação aos núcleos de demanda que serão abastecidos pelo reservatório;

$X_2 \rightarrow$ Distância entre o reservatório e os núcleos de demanda;

$X_3 \rightarrow$ Demanda das cidades abastecidas pelo reservatório.

Assim sendo, o equacionamento da função objetivo para o objetivo de atendimento ao abastecimento humano é:

$$FO.1 = a \cdot X_1 + b \cdot X_2 + c \cdot X_3 \quad 5.1$$

5.2.2. Atendimento à demanda para dessedentação animal.

Assim como o atendimento à demanda humana, é prevista na Lei Federal 9.433/97 a prioridade para a dessedentação de animais, em relação aos demais usos. Portanto, faz parte dos objetivos a serem alcançados com a implantação de reservatórios o atendimento a esta demanda. No entanto, para que esta demanda, tão incerta, seja estimada, foram determinados ponderadores que relacionam a área de pastagem e a área total do município.

Para tanto, foram considerados como critérios deste objetivo, na formulação da Função Objetivo, as demandas necessárias para suprir as necessidades de água dos animais, a distância entre o reservatório e a localização dos animais representados nos campos de pastagens.

$X_4 \rightarrow$ O desnível geométrico do reservatório em relação ao ponto de controle a ser abastecido pelo reservatório;

$X_5 \rightarrow$ Distância entre o reservatório e a localização dos animais;

$X_6 \rightarrow$ Demanda dos animais dos municípios abastecidos pelo reservatório.

$$FO.2 = d \cdot X_4 + e \cdot X_5 + f \cdot X_6 \quad 5.2$$

5.2.3. Atendimento à demanda para Agroindústria

Obedecendo à escala de prioridades das legislações Federal e Estadual, além dos fatores observados nos demais dados oficiais do Estado como, por exemplo, o Plano Diretor de Recursos Hídricos, o próximo objetivo é atender à demanda referente ao atendimento da Agroindústria na bacia em estudo.

A precisão dos dados referentes ao consumo industrial de água é muito restrita. Uma das razões desta imprecisão é o receio de disponibilizar estes dados. No entanto, os dados de demanda são computados à partir dos dados disponibilizados pelas indústrias localizadas na bacia e que constam na principal fonte de informações desta pesquisa.

Neste objetivo os critérios adotados foram os mesmos para os demais objetivos que seguem:

$X_7 \rightarrow$ O desnível geométrico do reservatório em relação às usinas de açúcar e álcool que serão abastecidos pelo reservatório;

$X_8 \rightarrow$ Distância entre o reservatório e as usinas;

$X_9 \rightarrow$ Demanda das usinas abastecidas pelos reservatórios.

$$FO.3 = g \cdot X_7 + h \cdot X_8 + i \cdot X_9 \quad 5.3$$

5.2.4. Atendimento à irrigação

A prática da irrigação se constitui no maior usuário de água no País. No entanto, a falta de chuva induz à necessidade de reservatórios para viabilizar a agricultura em parte do nordeste, suprimindo, desta maneira, a necessidade de irrigação nos meses secos.

Desta feita, para o desenvolvimento da pesquisa foram considerados os três critérios analisados para a determinação da função-objetivo referente aos demais objetivos, são eles:

$X_{10} \rightarrow$ O desnível geométrico do reservatório em relação aos pontos necessários para a irrigação da cana-de-açúcar e que serão abastecidos pelo reservatório;

$X_{11} \rightarrow$ Distância entre o reservatório e os pontos com necessidade de irrigação;

$X_{12} \rightarrow$ Demanda das áreas irrigadas que serão abastecidas pelos reservatórios.

$$FO.4 = j \cdot X_{10} + k \cdot X_{11} + l \cdot X_{12} \quad 5.4$$

5.2.5. Restrições de Ordem Física

Naturalmente, para a determinação da localização ótima de reservatório, faz-se necessário que o tomador de decisão obedeça às restrições de natureza física. Algumas destas restrições são chamadas de restrições absolutas, pois estas impossibilitam o

posicionamento de reservatório em determinada área. Nesta pesquisa foram consideradas como restrições absolutas:

- Áreas urbanas;
- Áreas de conservação;
- Áreas sujeitas a estradas e pontes;
- Intrusão salina.

Estas restrições foram representadas por mapas de restrições absolutas.

Entretanto, outras restrições de ordem física foram consideradas como critérios na determinação da função objetivo representativa dessas restrições, foram elas:

X_{13} → Índice de aridez;

X_{14} → Infiltração no solo (capacidade de infiltração);

X_{15} → Uso do solo;

X_{16} → Relação volume armazenado/área inundada;

X_{17} → Altura média dos reservatórios da alternativa i ;

$$FO.5 = m \cdot X_{13} + n \cdot X_{14} + o \cdot X_{15} + p \cdot X_{16} + q \cdot X_{17} \quad 5.5$$

Observa-se uma importante consideração com relação aos ponderadores das Funções objetivo(FO), pois os mesmos nas FO1, FO2, FO3, FO4, foram todos (individualmente) variados para que ficasse com uma importância 2(duas) vezes maior que os demais. Ou seja, foram avaliados 4(quatro) situações: a) com pesos iguais; b) X_1 , X_4 e X_7 com valores de 0,5 e os demais com valores 0,25; c) idem ao (b) para os critérios de distância e; d) idem a (b) e (c) com relação as demandas.

No entanto, na FO5 foi necessária uma variação que testasse seu resultado, o que veio a mostrar que a melhor solução para o entendimento da pesquisa foi que todos os ponderadores possuíssem valores iguais.

5.3. Formulação das alternativas de *layout* de reservatórios - Cenários

Foram escolhidos dois cenários para aplicar a metodologia proposta. Estas escolhas se devem ao fato de não serem analisados os estudos de oferta do recurso hídrico, portanto, a pesquisa não servirá totalmente como uma solução para os problemas referentes ao déficit hídrico da bacia, mas como uma ferramenta para o planejamento da bacia do rio Coruripe. Portanto, foram escolhidos os dois cenários apresentados:

Cenário I – Reservatórios com a capacidade de armazenamento igual à demanda total anual.

Cenário II – Reservatórios com a capacidade de armazenamento igual à metade da demanda total anual.

Dentre estes cenários foram analisadas 13 (treze) alternativas com diferentes combinações entre reservatórios para a bacia. As análises preliminares indicaram que os melhores *layouts* foram aqueles situados no médio Coruripe e no baixo Coruripe, pois os pontos com as maiores demandas e mais importantes economicamente para a bacia estão situadas nesta região.

Portanto, dentre todas as alternativas analisadas, foram selecionadas 5 (cinco) possíveis alternativas para a melhor localização de reservatórios. É importante ressaltar que as alternativas foram concebidas levando em consideração que todas elas devem aproveitar ao máximo as instalações existentes ou em construção, assim como as características topográficas, climatológicas e as ocupações urbanas da bacia, conduzindo para as melhores alternativas aquelas situadas no médio e no baixo Coruripe, como citado anteriormente.

Apresenta-se, a seguir, uma descrição das características das alternativas formuladas.

Alternativa I:

Nesta alternativa é apresentada a alternativa de *layout* proposta no PDRH da bacia do rio Coruripe, ou seja, um aproveitamento de todas as instalações existentes e dos estudos realizados para a construção de reservatórios. Esta alternativa, apresentada no Quadro 5.4, possui 2 (dois) reservatórios em série no rio principal da bacia, o rio Coruripe. No Quadro 5.5 são apresentados os pontos de captação (controle) que serão atendidos por cada reservatório.

O primeiro reservatório, chamado de Coruripe II, tem como objetivo o abastecimento da cidade de Teotônio Vilela, que enfrenta sérias deficiências no seu sistema de abastecimento, e dos demais núcleos urbanos da sua área de influência, bem como a irrigação da Usina Seresta e de fornecedores de cana da região. Além disto, deve atender à demanda industrial da Usina Seresta, abastecimento urbano da cidade de Limoeiro de Anadia e a dessedentação dos animais dos municípios de Limoeiro de Anadia, Junqueiro e Teotônio Vilela.

No segundo reservatório, chamado de Coruripe I, o objetivo é atender às necessidades de irrigação da Usina Coruripe e dos fornecedores de cana dessa região,

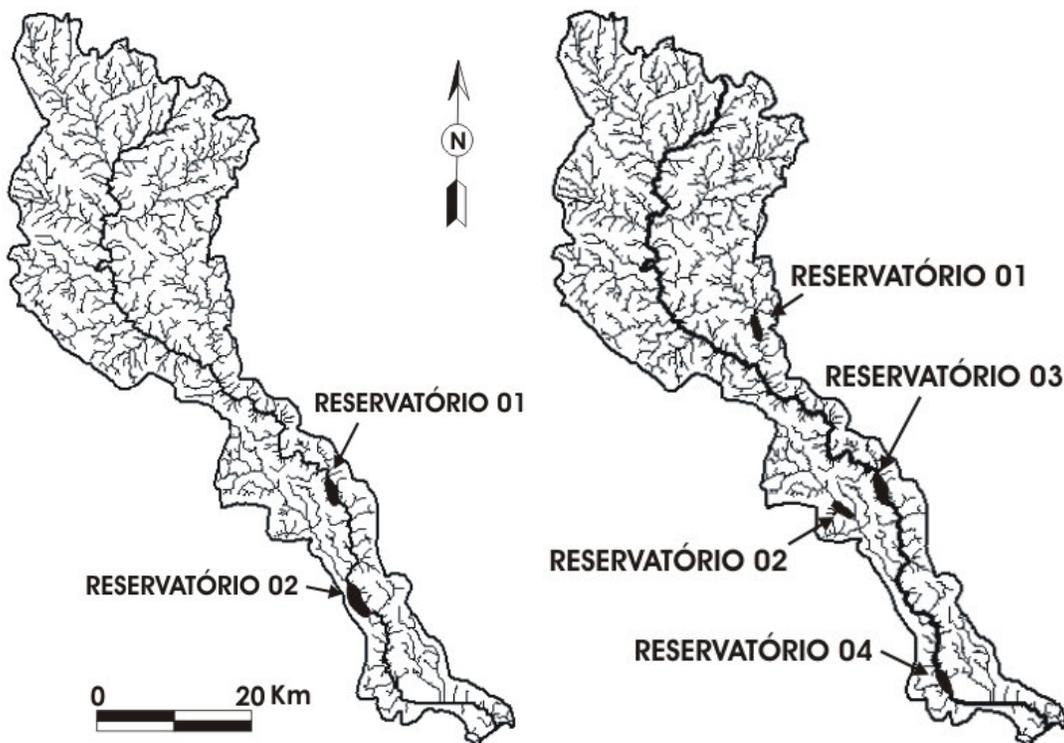
além do abastecimento industrial da própria Usina Coruripe, do abastecimento urbano da cidade de Coruripe, dos demais núcleos urbanos da sua área de influência e da dessedentação animal deste município. A Figura 5.2(a) representa esquematicamente a posição dos reservatórios apresentados nesta alternativa I.

Quadro 5.4- Alternativa I

CENÁRIO I						
RESERV.	COORDENADAS-UTM		COTA TERRENO	ALTURA	COTA DO RESERVATÓRIO	CODINOME
	E	N	(m)	(m)	(m)	
R ₁	791300	8904400	50.00	22.00	72.00	Coruripe II
R ₂	795500	8890100	20.00	17.00	37.00	Coruripe I
CENÁRIO II						
RESERV.	COORDENADAS-UTM		COTA TERRENO	ALTURA	COTA DO RESERVATÓRIO	CODINOME
	E	N	(m)	(m)	(m)	
R ₁	791300	8904400	50.00	16.00	66.00	Coruripe II
R ₂	795500	8890100	20.00	11.00	31.00	Coruripe I

Quadro 5.5- Pontos de captação (controle) atendidos

ALTERNATIVA I	
Reservatório	Ponto de Captação (Controle)
Coruripe II(R ₁)	PCs: 01,02,04,05,06,07,08,14,15,16,17,18,24,25,27,28,29
Coruripe I(R ₂)	PCs: 03,09,10,11,12,13,19,20,21,22,23,26,30



(a) Esquema da Alternativa I

(b) Esquema da Alternativa II

Figura 5.2 – Esquema das Alternativas I e II

Alternativa II:

Nesta alternativa é previsto um aproveitamento parcial das instalações previstas no PDRH da bacia do rio Coruripe. Esta alternativa, apresentada no Quadro 5.6, possui 4 (quatro) reservatórios.

O primeiro reservatório, chamado de Taquarana, atenderia às demandas de irrigação do médio Coruripe, à demanda industrial da Usina Seresta, a dessedentação animal dos municípios de Limoeiro, Junqueiro e Teotônio Vilela, assim como as demandas humanas destes municípios.

O reservatório Canabrava está situado em um afluente importante do Rio Coruripe. Este reservatório atenderia às demandas de irrigação dos fornecedores de cana-de-açúcar da Usina Seresta, a segunda mais importante usina de açúcar e álcool da bacia.

O terceiro reservatório, o Coruripe II, já foi descrito anteriormente. No entanto, este reservatório atenderia uma demanda menor que a demanda apresentada na alternativa I, pois uma quantia parcial da demanda seria atendida pelo reservatório Canabrava.

Por último, o reservatório situado próximo à Usina Coruripe, chamado Usina Coruripe, atenderia às demandas desta Usina, às demandas humanas e a dessedentação animal dos municípios próximos.

No Quadro 5.7 são apresentados os pontos de captação (controle) que serão atendidos por cada reservatório. A Figura 5.2(b) representa esquematicamente a posição dos reservatórios da alternativa II.

Quadro 5.6 - Alternativa II

CENÁRIO I						
RESER.	COORDENADAS-UTM		COTA TERRENO (m)	ALTURA (m)	COTA DO RESERVATÓRIO (m)	CODINOME
	E	N				
R ₁	775200	8925700	148.00	7.00	155.00	Taquarana
R ₂	787000	8902600	110.00	12.00	122.00	Canabrava
R ₃	791300	8904400	50.00	21.00	71.00	Coruripe II
R ₄	799700	8880000	5.00	8.00	13.00	Usina Coruripe
CENÁRIO II						
RESER.	COORDENADAS-UTM		COTA TERRENO (m)	ALTURA (m)	COTA DO RESERVATÓRIO (m)	CODINOME
	E	N				
R ₁	775200	8925700	148.00	4.00	152.00	Taquarana
R ₂	787000	8902600	110.00	7.00	117.00	Canabrava
R ₃	791300	8904400	50.00	16.00	66.00	Coruripe II
R ₄	799700	8880000	5.00	5.00	10.00	Usina Coruripe

Quadro 5.7 - Pontos de captação (controle) atendidos

ALTERNATIVA II	
Reservatório	Ponto de Captação(Controle)
Taquarana	PCs: 01,04,05,18,27,28
Canabrava	PCs: 19,20,21,22,23
Coruripe II	PCs: 02,03,06,07,14,15,16,17,24,25,29
Usina Coruripe	PCs: 08,09,10,11,12,13,26,30

Alternativa III:

Nesta alternativa, são acrescidos dois reservatórios à alternativa I, buscando um melhor atendimento em paralelo com poucos gastos com o transporte do recurso. É importante destacar que todas as instalações existentes e estudos realizados para a construção de reservatórios no PDRH da bacia do rio Coruripe são aproveitados. Esta alternativa, apresentada no Quadro 5.8 Quadro 5.9 e, possui 4 (quatro) reservatórios.

À exceção do reservatório Limoeiro, todos os demais já foram apresentados anteriormente. No entanto, as demandas atendidas pelos reservatórios Coruripe I e Coruripe II seriam menores por causa da parcela de demanda que os reservatórios Limoeiro e Canabrava atenderiam. A demanda atendida pelo reservatório Canabrava seria idêntica à alternativa II. No caso do reservatório Limoeiro a demanda atendida pelo mesmo seria correspondente ao reservatório Taquarana na alternativa II. No Quadro 5.10 são apresentados os pontos de captação(controle) que serão atendidos por cada reservatório. A Figura 5.3 (a) representa esquematicamente a posição dos reservatórios da alternativa III.

Quadro 5.8- Alternativa III (Cenário I)

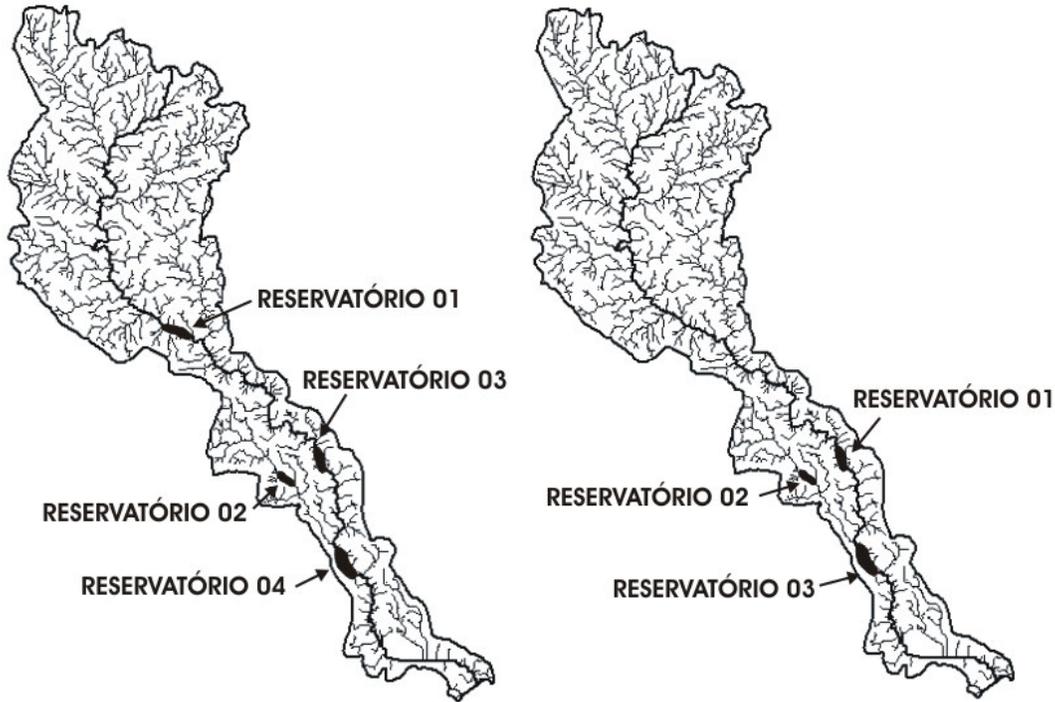
CENÁRIO I						
RESER.	COORDENADAS-UTM		COTA TERRENO	ALTURA	COTA DO RESERVATÓRIO	CODINOME
	E	N	(m)	(m)	(m)	
R ₁	772900	8922700	125.00	9.00	134.00	Limoeiro
R ₂	787000	8902600	110.00	12.00	122.00	Canabrava
R ₃	791300	8904400	50.00	20.00	70.00	Coruripe II
R ₄	795500	8890100	20.00	15.00	35.00	Coruripe I

Quadro 5.9- Alternativa III (Cenário II)

CENÁRIO II						
RESERV.	COORDENADAS-UTM		COTA TERRENO	ALTURA	COTA DO RESERVATÓRIO	CODINOME
	E	N	(m)	(m)	(m)	
R ₁	772900	8922700	125.00	7.00	132.00	Limoeiro
R ₂	787000	8902600	110.00	7.00	117.00	Canabrava
R ₃	791300	8904400	50.00	15.00	65.00	Coruripe II
R ₄	795500	8890100	20.00	10.00	30.00	Coruripe I

Quadro 5.10- Pontos de captação (controle) atendidos

ALTERNATIVA III	
Reservatório	Ponto de Captação(Controle)
Limoeiro	PCs: 01,05,18,27,28
Canabrava	PCs: 19,20,21,22,23
Coruripe II	PCs: 02,03,06,07,14,15,16,17,24,25,29
Coruripe I	PCs: 04,08,09,10,11,12,13,26,30



(a) Esquema da Alternativa III

(b) Esquema da Alternativa IV

Figura 5.3 – Esquema das Alternativa III e IV

Alternativa IV:

Esta alternativa possui apenas 3 (três) reservatórios. A grande diferença entre esta alternativa e a anterior seria que o reservatório Coruripe II assumiria toda a demanda atendida pelo reservatório Limoeiro. . No Quadro 5.11 são apresentados os pontos de captação(controle) que serão atendidos por cada reservatório.O Quadro 5.12 apresenta os valores físicos desta alternativa, assim como a Figura 4.2(b) representa esquematicamente a posição dos reservatórios da alternativa IV

Quadro 5.11 - Pontos de captação (controle) atendidos

ALTERNATIVA IV	
Reservatório	Ponto de Captação(Controle)
Coruripe II	PCs: 01,02,04,05,06,07,14,15,16,17,18,24,25,27,28,29
Canabrava	PCs: 19,20,21,22,23
Coruripe I	PCs: 03,08,09,10,11,12,13,26,30

Alternativa V:

Assim como a alternativa IV, esta alternativa possui apenas 3 (três) reservatórios, onde é aproveitada o esquema da alternativa I acrescentando-se apenas um próximo à Usina Coruripe para atender parte da demanda para a irrigação do reservatório Coruripe I. O Quadro 5.13 apresenta os valores físicos desta alternativa, assim como a Figura 5.4 representa esquematicamente a posição dos reservatórios da alternativa V. No

Quadro 5.14 são apresentados os pontos de captação (controle) que serão atendidos por cada reservatório.

Quadro 5.12- Alternativa III

CENÁRIO I						
RESER.	COORDENADAS-UTM		COTA TERRENO (m)	ALTURA (m)	COTA DO RESERVATÓRIO (m)	CODINOME
	E	N				
R1	791300	8904400	50.00	22.00	72.00	Coruripe II
R2	787000	8902600	110.00	12.00	122.00	Canabrava
R3	795500	8890100	20.00	15.00	35.00	Coruripe I
CENÁRIO II						
RESERV.	COORDENADAS-UTM		COTA TERRENO (m)	ALTURA (m)	COTA DO RESERVATÓRIO (m)	CODINOME
	E	N				
R1	791300	8904400	50.00	17.00	67.00	Coruripe II
R2	787000	8902600	110.00	7.00	117.00	Canabrava
R3	795500	8890100	20.00	10.00	30.00	Coruripe I

Quadro 5.13- Alternativa V

CENÁRIO I						
RESER.	COORDENADAS-UTM		COTA TERRENO (m)	ALTURA (m)	COTA DO RESERVATÓRIO (m)	CODINOME
	E	N				
R1	790100	8908600	55.00	26.00	81.00	Meio Seresta
R2	795500	8890100	20.00	9.00	29.00	Coruripe I
R3	799700	8880000	5.00	8.00	13.00	Usina Coruripe
CENÁRIO II						
RESERV.	COORDENADAS-UTM		COTA TERRENO (m)	ALTURA (m)	COTA DO RESERVATÓRIO (m)	CODINOME
	E	N				
R1	790100	8908600	55.00	19.00	74.00	Meio Seresta
R2	795500	8890100	20.00	6.00	26.00	Coruripe I
R3	799700	8880000	5.00	5.00	10.00	Usina Coruripe

Quadro 5.14- Pontos de captação (controle) atendidos

ALTERNATIVA V	
Reservatório	Ponto de Captação(Controle)
Coruripe II	PCs: 01,02,04,05,06,07,14,15,16,17,18,24,25,27,28,29
Canabrava	PCs: 08,09,19,20,21,22,23
Coruripe I	PCs: 03,10,11,12,13,26,30



Figura 5.4– Esquema da Alternativa V

Para uma melhor visualização a Figura 4.4 apresenta todas as alternativas escolhidas para o teste metodológico.

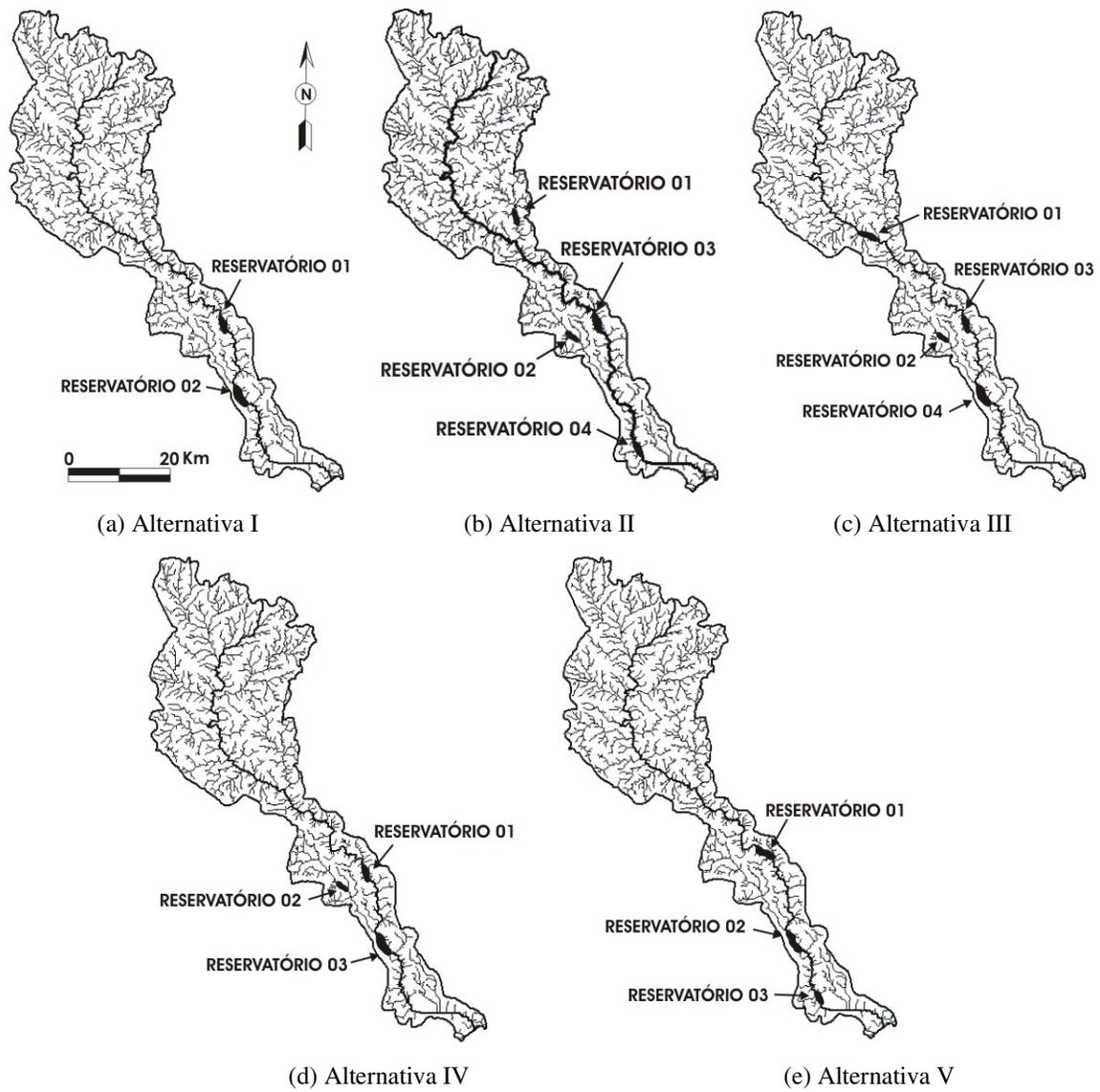


Figura 5.5 – Esquema das cinco alternativas analisadas

5.4. Preparação dos dados e mapas

À exceção dos dados de cota x área x volume, os dados relevantes para esta pesquisa foram apresentados ou retirados, em sua grande maioria, em forma de mapas, num formato *raster*, utilizando uma resolução espacial de 1 ha.

5.4.1. MNT

O Modelo Numérico do Terreno utilizado na pesquisa foi obtido com resolução de 90 x 90 m, junto ao Laboratório de Geoprocessamento do Centro de Ecologia da UFRGS e está disponível publicamente na forma digital. No entanto, foi feita uma reformatação para que o MNT ficasse com uma resolução de 100x100m, resolução que

facilitou no manuseio com as coordenadas. O MNT serviu, nesta etapa, para a aquisição dos dados dos critérios referentes ao desnível geométrico do reservatório em relação aos núcleos de demanda (X_1 , X_4 , X_7 , X_{10}).

5.4.2. Mapas de demandas

As demandas a serem atendidas com a aplicação da pesquisa foram colocadas na forma de mapas, sendo representadas espacialmente. No entanto, para fins de visualização, a Figura 5.6 apresenta pontualmente estas demandas. Este mapa foi utilizado para a aquisição dos dados dos critérios referentes às demandas totais de cada reservatório (X_3 , X_6 , X_9 , X_{12}).



Figura 5.6– Demandas da bacia

5.4.3. Mapas de distâncias

Com a formulação das alternativas de *layouts* se buscou, neste item, as informações referentes aos critérios referentes às distâncias aos reservatórios (X_2 , X_5 , X_8 , X_{11}). Estas informações foram adquiridas com a formulação de mapas de distâncias dos reservatórios com funções próprias do IDRISI, a partir das coordenadas dos reservatórios. Estes mapas foram criados para cada alternativa separadamente. A Figura 4.6 apresenta os mapas de distâncias em planta.

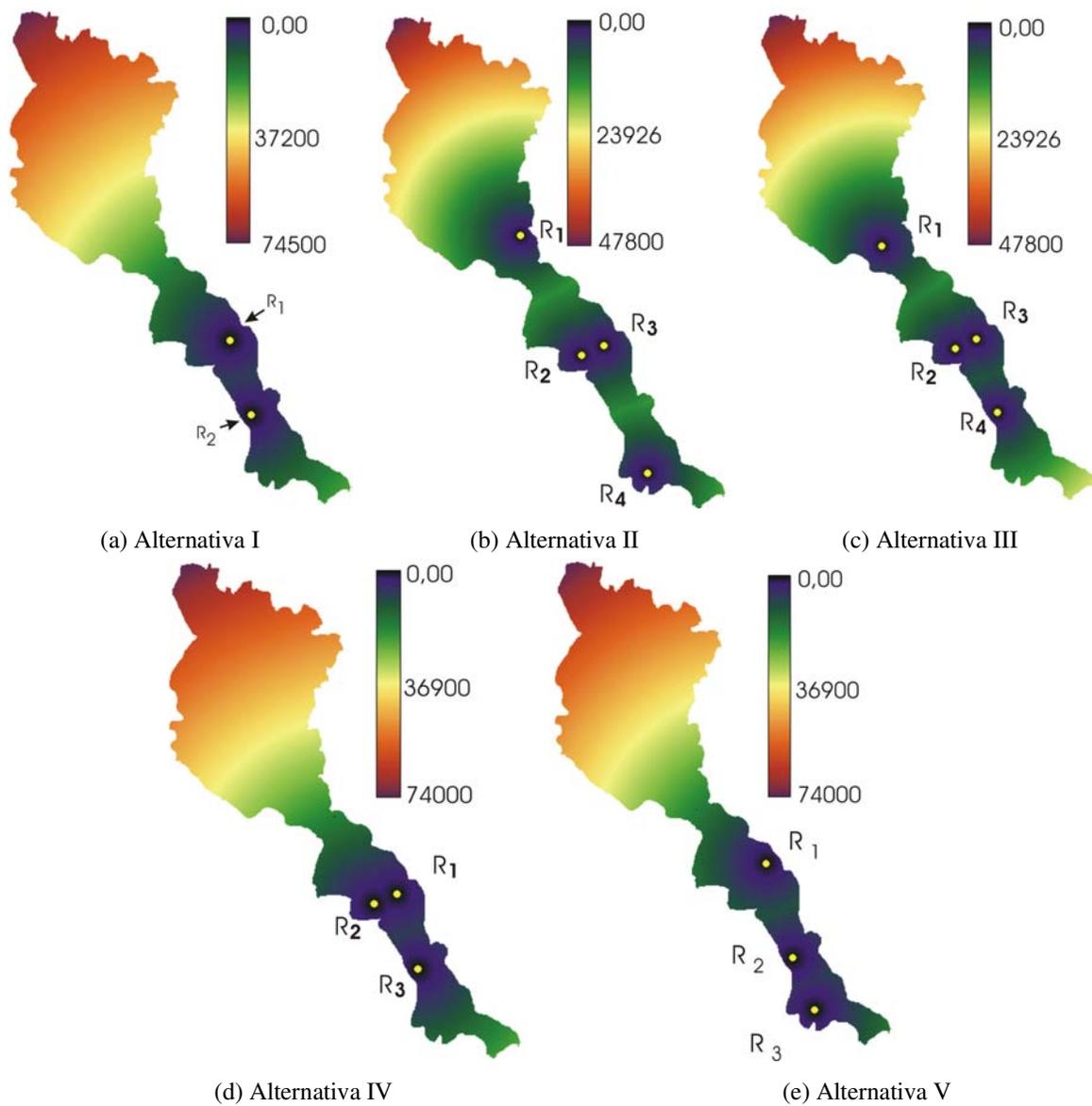
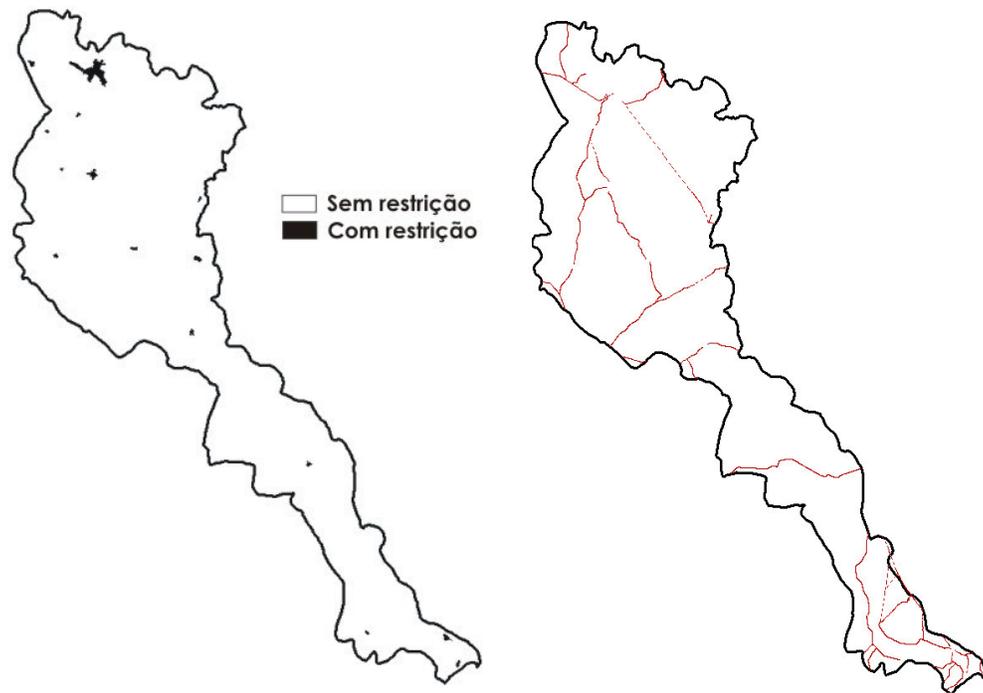


Figura 5.7– Mapas de distância dos reservatórios

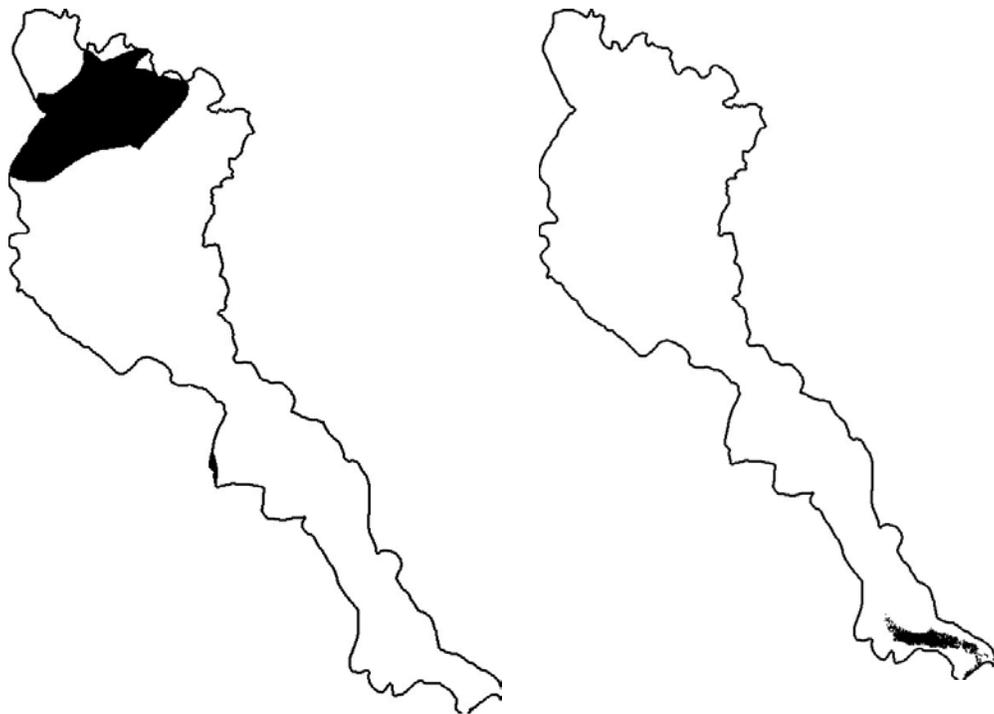
5.4.4. Mapas de restrições absolutas

Os mapas de restrições absolutas apresentam a espacialização de áreas onde poderão ou não ser empreendidas as construções dos reservatórios. Deste modo, são apresentados em escala *booleana*, ou seja, valor 0(zero) para as áreas onde não podem ser localizados os reservatórios, e 1(um) para os locais onde podem ser localizados. A Figura 5.8 apresenta as restrições consideradas na bacia (cidades, áreas indígenas, estradas e rodovias e intrusão salina).



(a) áreas urbanas

(b) Estradas e rodovias



(c) Áreas de conservação

(d) Áreas sujeitas à intrusão Salina

Figura 5.8 – Restrições absolutas

5.4.5. Mapas de índice de aridez

O índice de aridez é a razão entre a precipitação e a evapotranspiração potencial de um local, servindo como parâmetro, em todo o mundo, para a definição de zonas áridas. Portanto, os mapas de índice de aridez foram elaborados com base nas superfícies de precipitação e de evaporação.

A Figura 5.9 apresenta o resultado mensal desta operação. Os valores de cada reservatório são computados mensalmente e o somatório das médias de todos os resultados da alternativa *i* representa a variável X_{13} na Equação 4.5. Estes valores estão apresentados no Quadro 5.15.

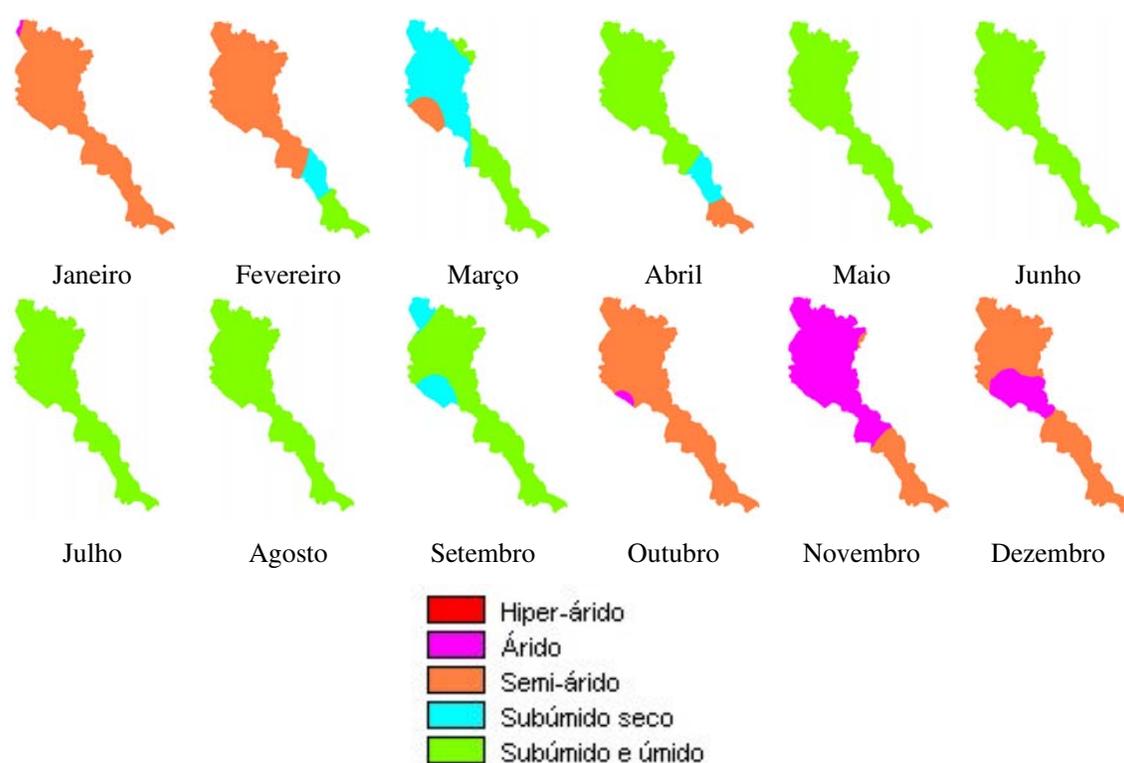


Figura 5.9 – Índice de Aridez Mensal

Quadro 5.15 – Valores referentes à posição dos reservatórios no mapa de aridez

Índice de Aridez					
	I	II	III	IV	V
R ₁	4.17	3.92	3.92	4.17	4.17
R ₂	4.25	4.17	4.25	4.17	4.25
R ₃	-	4.17	4.17	4.25	4.17
R ₄	-	4.17	4.25	-	-

5.4.6. Mapas de uso do solo e infiltração

O mapeamento do uso do solo foi elaborado a partir dos dados disponíveis no PDRH. Posteriormente, foi feita, uma reclassificação com aptidões físicas para a implantação de reservatórios apresentadas na Figura 5.10(a). O Quadro 5.16 apresenta a reclassificação do uso do solo utilizada na pesquisa.

Assim como no uso do solo, o mapa de capacidade de infiltração do solo foi elaborado com base naqueles disponíveis no PDRH. Foi feita uma reclassificação conforme indicado no Quadro 5.16 segundo 4 (quatro) intervalos. A Figura 5.10 (b) apresenta a reclassificação do mapa de capacidade de infiltração no solo.

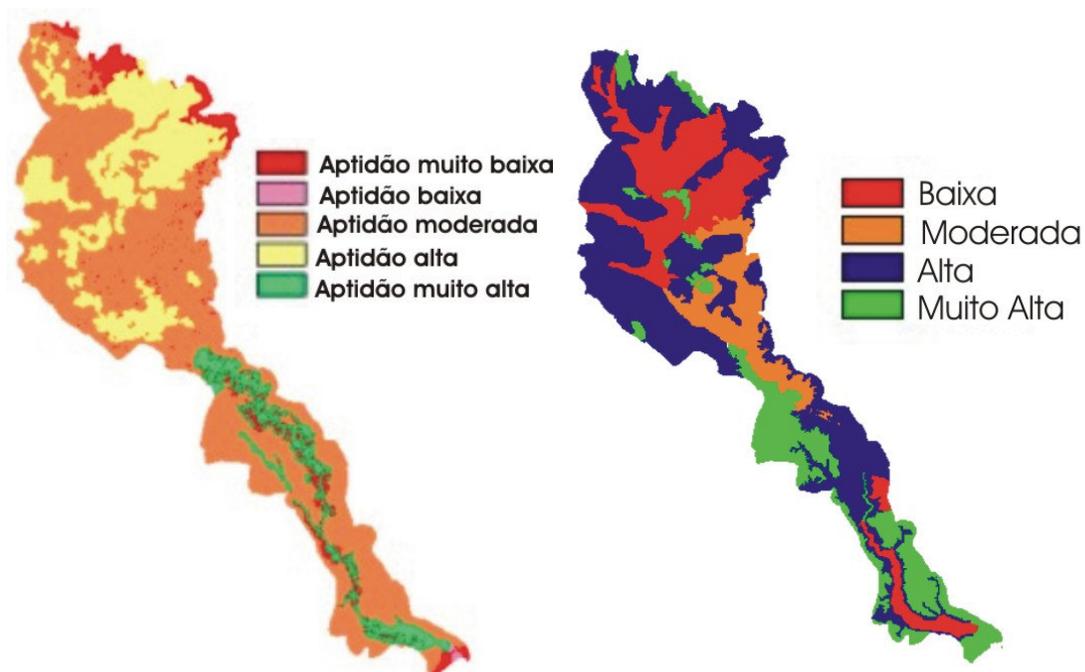


Figura 5.10 – (a) Mapas de uso do solo e (b) Infiltração

Quadro 5.16- Valores referentes à posição dos reservatórios nos mapas de uso do solo e infiltração

Infiltração no solo						Uso do solo					
	I	II	III	IV	V		I	II	III	IV	V
R ₁	4.17	3.92	3.92	4.17	4.17	R ₁	5.00	3.00	3.00	5.00	5.00
R ₂	4.25	4.17	4.25	4.17	4.25	R ₂	4.00	5.00	5.00	5.00	5.00
R ₃	-	4.17	4.17	4.25	4.17	R ₃	-	5.00	5.00	4.00	3.00
R ₄	-	4.17	4.25	-	-	R ₄	-	5.00	3.00	-	-

5.4.7. Relação Cota x Área x Volume

Para a aquisição dos dados referentes a este critério foi feita uma pequena rotina em VISUAL FORTRAN. Esta rotina tem como dados de entrada o MNT da bacia, a rede de fluxo, as coordenadas e a altura do reservatório. A rotina iniciava na coordenada indicada e inundava todas as células, ao seu redor, que possuíam valores menores que ela. No entanto, esta inundação só acontecia se o fluxo das células vizinhas convergissem para a célula analisada, caso contrário a célula não seria considerada contida no reservatório. A rotina continuava até que não existisse célula a ser inundada. O último passo desta rotina se deu com o cálculo da área e do volume do reservatório para a altura simulada. Esta rotina foi desenvolvida com base no artigo de Jenson & Domingue, 1988.

Desta feita, ao fim do uso desta rotina obteve-se a relação entre cota, área e volume, sendo feita a curva Cota x Área x Volume. Foi feita então a relação entre área e volume para cada reservatório da alternativa *i*. Estes valores são apresentados nos Quadro 5.17 e 5.18.

Quadro 5.17 - Valores referentes à relação área/volume para alternativas

ALTERNATIVA I			
Cenário I		Cenário II	
R ₁	0.098	R ₁	0.122
R ₂	0.103	R ₂	0.152
R ₃	-	R ₃	-
R ₄	-	R ₄	-

ALTERNATIVA II			
Cenário I		Cenário II	
R ₁	0.168	R ₁	0.205
R ₂	0.121	R ₂	0.153
R ₃	0.103	R ₃	0.122
R ₄	0.192	R ₄	0.290

ALTERNATIVA III			
Cenário I		Cenário II	
R ₁	0.243	R ₁	0.295
R ₂	0.121	R ₂	0.153
R ₃	0.108	R ₃	0.117
R ₄	0.119	R ₄	0.162

ALTERNATIVA IV			
Cenário I		Cenário II	
R ₁	0.098	R ₁	0.117
R ₂	0.121	R ₂	0.153
R ₃	0.119	R ₃	0.162
R ₄	-	R ₄	-

ALTERNATIVA V			
Cenário I		Cenário II	
R ₁	0.085	R ₁	0.108
R ₂	0.174	R ₂	0.246
R ₃	0.192	R ₃	0.290
R ₄		R ₄	

5.4.8. Resultados das Funções Objetivo

Com base nos mapas e dados adquiridos, foram aplicadas as Funções Objetivo indicadas nas Equações 5.1 a 5.5. Como dito anteriormente, estes dados foram padronizados e seus resultados são apresentados no Quadro 5.18 a 5.20.

Quadro 5.18 – Resultado das Funções Objetivo para ponderadores iguais

ALTERNATIVA I											
Cenário I						Cenário II					
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5
R ₁	0,697	2,253	0,558	3,486	0,800	R ₁	0,699	2,253	0,558	3,486	0,800
R ₂	0,758	1,685	1,128	2,294	1,200	R ₂	0,758	1,685	1,128	2,294	1,200
R ₃	-	-	-	-	-	R ₃	-	-	-	-	-
R ₄	-	-	-	-	-	R ₄	-	-	-	-	-
	1,455	3,938	1,686	5,780	2,000		1,457	3,938	1,686	5,780	2,000
ALTERNATIVA II											
Cenário I						Cenário II					
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5
R ₁	0,566	0,712	0,000	0,840	0,350	R ₁	0,566	0,714	0,000	0,843	0,400
R ₂	0,000	0,000	0,000	1,700	0,690	R ₂	0,000	0,000	0,000	1,691	0,710
R ₃	0,628	1,465	0,423	2,692	0,600	R ₃	0,628	1,462	0,423	2,678	0,600
R ₄	0,658	0,699	1,245	1,066	0,790	R ₄	0,655	0,688	1,264	1,070	0,780
	1,852	2,876	1,668	5,458	2,430		1,849	2,863	1,687	5,439	2,500
ALTERNATIVA III											
Cenário I						Cenário II					
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5
R ₁	0,598	1,029	0,000	0,909	0,300	R ₁	0,608	1,066	0,000	0,930	0,300
R ₂	0,000	0,570	0,000	1,766	0,730	R ₂	0,000	0,570	0,000	1,766	0,760
R ₃	0,628	0,858	0,558	2,777	0,550	R ₃	0,628	0,858	0,558	2,777	0,550
R ₄	0,670	1,161	1,128	0,893	0,670	R ₄	0,670	1,161	1,128	0,893	0,680
	1,897	3,618	1,686	6,344	2,250		1,906	3,656	1,686	6,365	2,290
ALTERNATIVA IV											
Cenário I						Cenário II					
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5
R ₁	0,699	2,253	0,000	3,442	0,400	R ₁	0,699	2,253	0,000	3,442	0,400
R ₂	0,000	0,000	0,609	2,017	0,400	R ₂	0,000	0,000	0,609	2,017	0,440
R ₃	0,758	1,668	1,128	0,962	0,560	R ₃	0,758	1,668	1,128	0,962	0,540
R ₄	-	-	-	-	-	R ₄	-	-	-	-	-
	1,456	3,921	1,737	6,421	1,813		1,456	3,921	1,737	6,421	1,840
ALTERNATIVA V											
Cenário I						Cenário II					
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5
R ₁	0,729	0,614	0,000	1,000	0,400	R ₁	0,724	0,614	0,000	0,990	0,400
R ₂	0,000	1,645	0,330	3,681	0,820	R ₂	0,000	1,645	0,330	3,670	0,830
R ₃	0,896	1,630	1,556	1,303	0,200	R ₃	0,896	1,664	1,577	1,312	0,200
R ₄	-	-	-	-	-	R ₄	-	-	-	-	-
	1,625	3,889	1,886	5,984	1,900		1,620	3,923	1,907	5,973	1,910

Quadro 5.19 – Resultado das F.O. dando maior importância ao desnível geométrico.

ALTERNATIVA I											
Cenário I						Cenário II					
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5
R ₁	0.574	2.162	0.596	3.876	0.800	R ₁	0.576	2.162	0.596	3.876	0.800
R ₂	0.816	1.818	1.345	2.454	1.200	R ₂	0.816	1.818	1.345	2.454	1.200
R ₃	-	-	-	-	-	R ₃	-	-	-	-	-
R ₄	-	-	-	-	-	R ₄	-	-	-	-	-
	1.391	3.981	1.941	6.330	2.000		1.393	3.981	1.941	6.330	2.000
ALTERNATIVA II											
Cenário I						Cenário II					
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5
R ₁	0.679	0.000	0.000	1.225	0.350	R ₁	0.679	0.606	0.000	1.229	0.400
R ₂	0.000	1.493	0.000	1.836	0.690	R ₂	0.000	0.000	0.000	1.836	0.710
R ₃	0.469	0.671	0.570	2.821	0.600	R ₃	0.469	1.487	0.570	2.821	0.600
R ₄	0.732	2.766	1.143	1.075	0.790	R ₄	0.727	0.653	1.172	1.075	0.780
	1.880	0.603	1.714	6.958	2.430		1.875	2.747	1.743	6.962	2.500
ALTERNATIVA III											
Cenário I						Cenário II					
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5
R ₁	0.658	0.893	0.000	1.229	0.300	R ₁	0.672	0.950	0.000	1.261	0.300
R ₂	0.000	0.509	0.000	1.950	0.730	R ₂	0.000	0.509	0.000	1.950	0.760
R ₃	0.469	0.896	0.596	2.965	0.550	R ₃	0.469	0.896	0.596	2.965	0.550
R ₄	0.750	1.178	1.345	1.052	0.670	R ₄	0.750	1.178	1.345	1.052	0.680
	1.877	3.476	1.941	7.196	2.250		1.892	3.533	1.941	7.228	2.290
ALTERNATIVA IV											
Cenário I						Cenário II					
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5
R ₁	0.576	2.162	0.000	3.669	0.400	R ₁	0.576	2.162	0.000	3.669	0.400
R ₂	0.000	0.000	0.673	2.122	0.400	R ₂	0.000	0.000	0.673	2.122	0.440
R ₃	0.816	1.792	1.345	1.098	0.560	R ₃	0.816	1.792	1.345	1.098	0.540
R ₄	-	-	-	-	-	R ₄	-	-	-	-	-
	1.393	3.955	2.018	6.889	1.813		1.393	3.955	2.018	6.889	1.840
ALTERNATIVA V											
Cenário I						Cenário II					
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5
R ₁	0.641	0.859	0.000	1.642	0.400	R ₁	0.662	0.915	0.000	1.678	0.400
R ₂	0.417	1.447	0.558	3.902	0.820	R ₂	0.417	1.438	0.596	3.902	0.830
R ₃	0.750	1.132	1.382	1.335	0.200	R ₃	0.750	1.125	1.382	1.335	0.200
R ₄	-	-	-	-	-	R ₄	-	-	-	-	-
	1.808	3.439	1.940	6.878	1.900		1.830	3.478	1.979	6.914	1.910

Quadro 5.20 – Resultado das F.O. dando maior importância a distância (c)

ALTERNATIVA I												
Cenário I						Cenário II						
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5	
R ₁	0.772	2.211	0.673	4.045	0.800	R ₁	0.773	2.211	0.673	4.045	0.800	
R ₂	0.633	1.884	0.889	2.486	1.200	R ₂	0.633	1.884	0.889	2.486	1.200	
R ₃	-	-	-	-	-	R ₃	-	-	-	-	-	
R ₄	-	-	-	-	-	R ₄	-	-	-	-	-	
	1.405	4.095	1.562	6.531	2.000		1.406	4.095	1.562	6.531	2.000	
ALTERNATIVA II												
Cenário I						Cenário II						
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5	
R ₁	0.607	0.699	0.000	0.674	0.350	R ₁	0.607	0.701	0.000	0.676	0.400	
R ₂	0.000	0.000	0.000	1.922	0.690	R ₂	0.000	0.000	0.000	1.915	0.710	
R ₃	0.719	1.406	0.391	2.881	0.600	R ₃	0.719	1.403	0.391	2.870	0.600	
R ₄	0.491	0.791	1.356	1.160	0.790	R ₄	0.489	0.782	1.370	1.163	0.780	
	1.818	2.895	1.747	6.636	2.430		1.815	2.886	1.761	6.624	2.500	
ALTERNATIVA III												
Cenário I						Cenário II						
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5	
R ₁	0.702	1.128	0.000	0.825	0.300	R ₁	0.709	1.157	0.000	0.841	0.300	
R ₂	0.000	0.514	0.000	1.959	0.730	R ₂	0.000	0.514	0.000	1.959	0.760	
R ₃	0.719	0.896	0.673	2.931	0.550	R ₃	0.719	0.896	0.673	2.931	0.550	
R ₄	0.500	1.333	0.889	0.789	0.670	R ₄	0.500	1.333	0.889	0.789	0.680	
	1.921	3.871	1.562	6.503	2.250		1.928	3.900	1.562	6.519	2.290	
ALTERNATIVA IV												
Cenário I						Cenário II						
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5	
R ₁	0.773	2.211	0.000	3.728	0.400	R ₁	0.773	2.211	0.000	3.728	0.400	
R ₂	0.000	0.000	0.712	2.356	0.400	R ₂	0.000	0.000	0.712	2.356	0.440	
R ₃	0.633	1.871	0.889	0.901	0.560	R ₃	0.633	1.871	0.889	0.901	0.540	
R ₄	-	-	-	-	-	R ₄	-	-	-	-	-	
	1.406	4.082	1.600	6.985	1.813		1.406	4.082	1.600	6.985	1.840	
ALTERNATIVA V												
Cenário I						Cenário II						
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5	
R ₁	0.695	1.143	0.000	1.590	0.400	R ₁	0.706	1.171	0.000	1.608	0.400	
R ₂	0.615	1.415	0.654	4.250	0.820	R ₂	0.615	1.410	0.673	4.248	0.830	
R ₃	0.500	1.350	0.963	1.340	0.200	R ₃	0.500	1.347	0.963	1.342	0.200	
R ₄	-	-	-	-	-	R ₄	-	-	-	-	-	
	1.810	3.908	1.617	7.180	1.900		1.821	3.928	1.636	7.198	1.910	

Quadro 5.21 – Resultado das F.O. dando maior importância a demanda (d)

ALTERNATIVA I												
Cenário I						Cenário II						
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5	
R ₁	0.741	2.372	0.423	2.642	0.800	R ₁	0.742	2.372	0.423	2.642	0.800	
R ₂	0.816	1.390	1.147	1.981	1.200	R ₂	0.816	1.390	1.147	1.981	1.200	
R ₃	-	-	-	-	-	R ₃	-	-	-	-	-	
R ₄	-	-	-	-	-	R ₄	-	-	-	-	-	
	1.557	3.761	1.570	4.622	2.000		1.558	3.761	1.570	4.622	2.000	
ALTERNATIVA II												
Cenário I						Cenário II						
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5	
R ₁	0.429	0.820	0.000	0.646	0.350	R ₁	0.429	0.822	0.000	0.649	0.400	
R ₂	0.000	0.000	0.000	1.381	0.690	R ₂	0.000	0.000	0.000	1.374	0.710	
R ₃	0.689	1.494	0.320	2.409	0.600	R ₃	0.689	1.491	0.320	2.399	0.600	
R ₄	0.741	0.643	1.235	0.974	0.790	R ₄	0.739	0.634	1.250	0.977	0.780	
	1.858	2.957	1.556	5.411	2.430		1.856	2.947	1.570	5.399	2.500	
ALTERNATIVA III												
Cenário I						Cenário II						
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5	
R ₁	0.453	1.060	0.000	0.698	0.300	R ₁	0.460	1.089	0.000	0.714	0.300	
R ₂	0.000	0.675	0.000	1.432	0.730	R ₂	0.000	0.675	0.000	1.432	0.760	
R ₃	0.689	0.791	0.423	2.473	0.550	R ₃	0.689	0.791	0.423	2.473	0.550	
R ₄	0.750	0.994	1.147	0.843	0.670	R ₄	0.750	0.994	1.147	0.843	0.680	
	1.892	3.520	1.570	5.446	2.250		1.899	3.548	1.570	5.462	2.290	
ALTERNATIVA IV												
Cenário I						Cenário II						
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5	
R ₁	0.742	2.372	0.000	2.987	0.400	R ₁	0.742	2.372	0.000	2.987	0.400	
R ₂	0.000	0.000	0.462	1.621	0.400	R ₂	0.000	0.000	0.462	1.621	0.440	
R ₃	0.816	1.377	1.147	0.896	0.560	R ₃	0.816	1.377	1.147	0.896	0.540	
R ₄	-	-	-	-	-	R ₄	-	-	-	-	-	
	1.558	3.749	1.608	5.504	1.813		1.558	3.749	1.608	5.504	1.840	
ALTERNATIVA V												
Cenário I						Cenário II						
	FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5		FO.1	FO.2	FO.3	FO.4	FO.5	
R ₁	0.445	1.054	0.000	1.091	0.400	R ₁	0.456	1.082	0.000	1.109	0.400	
R ₂	0.637	1.481	0.404	3.225	0.820	R ₂	0.637	1.477	0.423	3.223	0.830	
R ₃	0.750	0.983	1.184	1.048	0.200	R ₃	0.750	0.980	1.184	1.050	0.200	
R ₄	-	-	-	-	-	R ₄	-	-	-	-	-	
	1.832	3.519	1.588	5.364	1.900		1.843	3.538	1.607	5.382	1.910	

5.5. Análise dos dados

Como já foi mencionado, para poder comparar numa mesma escala os critérios, foram realizadas padronizações que assumiam pesos de acordo com o seu próprio valor em relação aos demais, sendo variados os ponderadores das Funções Objetivo. Pode-se considerar uma sensível mudança nos resultados encontrados com essas variações. Isto aconteceu principalmente quando foi dada maior importância aos ponderadores referentes às demandas dos pontos de captação e da distância dos reservatórios a eles. Pode-se observar que esta diferença é sensível na análise dos Quadros 5.18 a 5.21. É tácito que existisse uma mudança no produto final das Funções Objetivo, no entanto, estas mudanças são apresentadas de forma semelhantes para todas alternativas. Vale a pena ressaltar que não foram variados os ponderadores referentes às restrições físicas, pois todas elas representam uma importância de igual valor.

O motivo de analisar dois cenários se deve ao fato de que não é interessante que os reservatórios implantados sejam considerados “buracos” no sertão e que nunca irão verter. No entanto, os resultados das funções objetivo analisadas indicam uma indiferença entre os resultados finais, ou seja, não é relevante para a pesquisa uma aplicação para os dois cenários, mas isso não exclui a importância das análises e dos estudos realizados preliminarmente.

Uma explicação para essa igualdade nos resultados das funções objetivo é que com a consideração de um reservatório com a metade da necessidade de demanda, a altura do reservatório também diminui, assim como o desnível entre o reservatório e o ponto de controle. E como essas diferenças entre as alturas não são grandes e os valores para os demais critérios continuam os mesmos, a diferença entre os resultados finais das FO não existe.

Uma dificuldade surgida para a aquisição dos dados e da análise dos resultados da FO5 foi o fato de que nos demais critérios as FOs eram aplicadas a cada ponto de controle e somados para cada reservatório que o abastecia e posteriormente somado para todo o sistema. No caso das restrições físicas não foi feito desta maneira: foram adquiridos os valores referentes a cada reservatório e somado ao sistema. Isso acarretaria um problema para os sistemas com 2 ou 3 reservatórios. Para contornar esta dificuldade, os resultados das FO5 foram multiplicados por fatores iguais a 2 e 4/3, para os sistemas com 2 e 3 reservatórios respectivamente.

5.6. Aplicação da programação compromisso

Para melhor entendimento, esta aplicação será apresentada passo a passo apenas para a situação em que os ponderadores possuem pesos iguais. No entanto, os resultados finais de todas as demais situações estarão apresentados ainda neste item.

Diante dos resultados das Funções Objetivo, a metodologia proposta na pesquisa pôde ser aplicada. Desta feita, seguiram-se plenamente as etapas descritas no Capítulo 3., ou seja:

→ Parte 1:

1º) Passo: Apresentação da matriz alternativa de projetos *versus* objetivos

Os Quadro 5.22 apresentam a matriz alternativa de projetos *versus* objetivos para os dois cenários em estudo.

Quadro 5.22 - Matriz de entrada alternativa de projetos *versus* objetivos

Objetivos	Alternativas				
	I	II	III	IV	V
Atendimento à demanda humana	1,455	1,852	1,897	1,456	1,625
Atendimento à dessedentação animal	3,938	2,876	3,618	3,921	3,889
Atendimento à demanda industrial	1,686	1,668	1,686	1,737	1,886
Atendimento à Irrigação	5,780	5,458	6,344	6,421	5,984
Atendimento às restrições de ordens físicas	2,000	2,428	2,250	1,813	1,897

2º) Passo: Determinar os melhores e piores valores das alternativas (Quadro 5.23).

Quadro 5.23 - Matriz de avaliação adicionada aos valores extremos dos sistemas

Objetivos	Alternativas						
	I	II	III	IV	V	f_i^{\min}	f_i^{\max}
Demanda humana	1,455	1,852	1,897	1,456	1,625	1,455	1,897
Dessedentação animal	3,938	2,876	3,618	3,921	3,889	2,876	3,938
Demanda industrial	1,686	1,668	1,686	1,737	1,886	1,668	1,886
Irrigação	5,780	5,458	6,344	6,421	5,984	5,458	6,421
Restrições de ordens físicas	2,000	2,428	2,250	1,813	1,897	1,813	2,428

3ª) Passo: a) Padronização dos valores utilizando a equação 3.3(Quadro 5.24 e 5.25):

Quadro 5.24 - Padronização da matriz de entrada para $p = 1$ e $p = 2$

$p = 1$					$p = 2$				
d_I	d_{II}	d_I	d_I	d_I	d_I	d_{II}	d_{III}	d_{IV}	d_V
1,000	0,101	0,000	0,997	0,615	1,000	0,010	0,000	0,994	0,379
0,000	1,000	0,301	0,016	0,046	0,000	1,000	0,091	0,000	0,002
0,915	1,000	0,915	0,682	0,000	0,837	1,000	0,837	0,465	0,000
0,666	1,000	0,080	0,000	0,454	0,443	1,000	0,006	0,000	0,206
0,696	0,000	0,289	1,000	0,864	0,485	0,000	0,084	1,000	0,746

Quadro 5.25 - Padronização da matriz de entrada para $p = \infty$

p = ∞				
d_I	d_{II}	d_{III}	d_{IV}	d_V
1,0E+00	3,7E-100	0,0E+00	7,4E-01	8,3E-22
0,0E+00	1,0E+00	7,5E-53	4,0E-180	4,3E-134
1,3E-04	1,0E+00	1,3E-04	2,3E-17	0,0E+00
2,1E-18	1,0E+00	1,3E-110	0,0E+00	4,9E-35
4,9E+59	4,9E+59	4,9E+59	4,9E+59	4,9E+59

b) Cálculo de l_p^j a partir da Equação 2.4 (Quadro 5.26):

Quadro 5.26 – Cálculo de l_p^j

	L_p^I	L_p^{II}	L_p^{III}	L_p^{IV}	L_p^V
p = 1	3,276	3,101	1,584	2,695	1,979
p = 2	1,663	1,735	1,009	1,568	1,154
p = ∞	3,953	3,953	3,953	3,953	3,953

4ª) Passo: Determinar as menores distâncias entre as soluções ideais e suficientes, a partir da Equação 2.5 (Quadro 5.27):

Quadro 5.27 - Menores distâncias entre as soluções ideais e suficientes

	l_p^i	Menor distância
p = 1	l_p^{III}	Alternativa III
p = 2	l_p^{III}	Alternativa III
p = ∞	l_p^{III}	Alternativa III

5ª) Passo: Procura a solução minimax ($p = \infty$), a partir da Equação 3.6 (Quadro 5.28):

Quadro 5.28 – Solução minimax

p = ∞					Max
d_I	d_{II}	d_{III}	d_{IV}	d_V	
1,000	3,7E-100	0,000	7,4E-01	8,3E-22	1,000
0,000	1,000	7,5E-53	4,0E-180	4,3E-134	1,000
1,3E-04	1,000	1,3E-04	2,3E-17	0,000	1,000
2,1E-18	1,000	1,3E-110	0,000	4,9E-35	1,000
4,9E+59	4,9E+59	4,9E+59	4,9E+59	4,9E+59	4,9E+59
Min max					1,000

6ª) Passo: Comparação entre os valores resultantes, ou seja, uma análise dos Quadros 5.25 a 5.27.

7ª) Passo: Apresentação da melhor solução para os tomadores de decisão. Desta feita, os tomadores de decisão podem optar em dar o mesmo peso a todas as discrepâncias ou não. Numa análise preliminar, os resultados apresentados pelos Quadros 5.25 a 5.27, levam a crer que a melhor alternativa a ser escolhida será a Alternativa III. No entanto, foram dados pesos

diferentes para que estes resultados pudessem ser confirmados ou não, pois uma outra alternativa poderia ser apontada como a melhor solução ao final.

→ **Parte 2:**

Esta análise é importante para uma avaliação dos pesos que são dados às discrepâncias entre os valores ideais e possíveis. Porém, nesta etapa todos os passos da primeira parte serão repetidos, com utilização da Equação 3.7, ao invés da Equação 3.3, pois será realizada uma análise para $\alpha = 1, 2$ e ∞ . São apresentados os seguintes resultados após a seqüência entre os passos 3 e 7.

3º) Passo: a) Padronização dos valores utilizando a equação 3.3 (Quadro 5.29 a 5.32):

Quadro 5.29 – Padronização da matriz de entrada para $\alpha = 2, p = 1$ e $\alpha = 2, p = 2$

p = 1						p = 2				
d_I	d_{II}	d_{III}	d_{IV}	d_{IV}		d_I	d_{II}	d_{III}	d_{IV}	d_V
2,000	0,203	0,000	1,994	1,231		2,000	0,021	0,000	1,988	0,758
0,000	2,000	0,602	0,032	0,093		0,000	2,000	0,181	0,001	0,004
1,829	2,000	1,829	1,364	0,000		1,673	2,000	1,673	0,930	0,000
1,331	2,000	0,159	0,000	0,908		0,886	2,000	0,013	0,000	0,412
1,392	0,000	0,578	2,000	1,727		0,969	0,000	0,167	2,000	1,492

Quadro 5.30 - Padronização da matriz de entrada para $\alpha = 2$ e $p = \infty$

p = ∞				
d_I	d_{II}	d_{III}	d_{IV}	d_V
2,0E+00	7,3E-100	0,0E+00	1,5E+00	1,7E-21
0,0E+00	2,0E+00	1,5E-52	8,0E-180	8,7E-134
2,7E-04	2,0E+00	2,7E-04	4,7E-17	0,0E+00
4,1E-18	2,0E+00	2,5E-110	0,0E+00	9,8E-35
3,8E-16	0,0E+00	2,5E-54	2,0E+00	8,6E-07

Quadro 5.31 - Padronização da matriz de entrada para $\alpha = \infty, p = 1$ e $\alpha = \infty, p = 2$

p = 1						p = 2				
d_I	d_{II}	d_{III}	d_{IV}	d_{IV}		d_I	d_{II}	d_{III}	d_{IV}	d_V
500,00	50,654	500,00	500,00	500,00		500,00	63,472	0,000	500,00	318,57
0,000	500,00	0,000	0,000	0,000		0,000	500,00	131,41	7,940	7,039
457,32	500,00	418,29	418,29	418,29		418,29	498,91	500,00	385,11	0,000
332,75	500,00	221,45	221,45	221,45		221,45	500,00	28,328	0,000	228,23
348,11	0,000	242,36	242,36	242,36		242,36	0,000	161,24	500,00	445,38

Quadro 5.32 - Padronização da matriz de entrada para $\alpha = \infty$ e $p = \infty$

p = ∞				
d_I	d_{II}	d_{III}	d_{IV}	d_V
1,0E+02	3,7E-98	0,0E+00	7,4E+01	8,3E-20
0,0E+00	1,0E+02	7,5E-51	4,0E-178	4,3E-132
1,3E-02	1,0E+02	1,3E-02	2,3E-15	0,0E+00
2,1E-16	1,0E+02	1,3E-108	0,0E+00	4,9E-33
1,9E-14	0,0E+00	1,3E-52	1,0E+02	4,3E-05

b) Cálculo de l_p^j a partir da Equação 3.4 (Quadro 5.33 e 5.34):

Quadro 5.33 – Cálculo de l_p^j para $\alpha = 2$

$\alpha=2$					
	L_p^I	L_p^{II}	L_p^{III}	L_p^{IV}	L_p^V
p = 1	6,553	6,203	3,169	5,390	3,959
p = 2	2,351	2,454	1,426	2,218	1,633
p = ∞	1,007	1,018	0,921	1,013	0,870

Quadro 5.34 – Cálculo de l_p^j para $\alpha=\infty$

$\alpha=\infty$					
	L_p^I	L_p^{II}	L_p^{III}	L_p^{IV}	L_p^V
p = 1	1638,195	1550,654	792,228	1347,429	989,659
p = 2	33,760	38,796	21,606	27,010	17,131
p = ∞	1,047	1,059	0,958	1,053	0,904

4ª) Passo: Determinar as menores distâncias entre as soluções ideais e suficientes, a partir da Equação 3.5 (Quadro 5.35):

Quadro 5.35 - Menores distâncias entre as soluções ideais e suficientes

$\alpha=2$	l_p^i	$\alpha=\infty$	l_p^i
P = 1	l_p^{III}	P = 1	l_p^{III}
P = 2	l_p^{III}	P = 2	l_p^V
P = ∞	l_p^V	P = ∞	l_p^V

5ª) Passo: Busca da solução minimax (p = ∞), a partir da Equação 3.6 (Quadro 5.36):

Quadro 5.36 – Solução minimax para $\alpha=2$ e $\alpha=\infty$

$\alpha = 2$					Max
d_I	d_{II}	d_{III}	d_{IV}	d_V	
2,0E+00	7,3E-100	0,0E+00	1,5E+00	1,7E-21	2,000
0,0E+00	2,0E+00	1,5E-52	8,0E-180	8,7E-134	2,000
2,7E-04	2,0E+00	2,7E-04	4,7E-17	0,0E+00	2,000
4,1E-18	2,0E+00	2,5E-110	0,0E+00	9,8E-35	2,000
3,8E-16	0,0E+00	2,5E-54	2,0E+00	8,6E-07	2,000
Min max					2,000
$\alpha = \infty$					Max
d_I	d_{II}	d_{III}	d_{IV}	d_V	
1,0E+02	3,7E-98	0,0E+00	7,4E+01	8,3E-20	1,0E+02
0,0E+00	1,0E+02	7,5E-51	4,0E-178	4,3E-132	0,0E+00
1,3E-02	1,0E+02	1,3E-02	2,3E-15	0,0E+00	1,3E-02
2,1E-16	1,0E+02	1,3E-108	0,0E+00	4,9E-33	2,1E-16
1,9E-14	0,0E+00	1,3E-52	1,0E+02	4,3E-05	1,9E-14
Min max					1,000

Os passos 6 e 7 são discutidos e melhor explicados no próximo item, na discussão dos resultados, porém, é evidente que o melhor esquema de reservatório é representado pela alternativa III, pois apresenta menores valores para a Função Objetivo apresentada como teste metodológico da pesquisa. Em seguida, a **alternativa V** aparece como uma boa opção, por representar em algumas ocasiões os menores valores para a Programação Compromisso.

A aplicação às demais situações, onde os ponderadores foram variados, são apresentados de forma simplificada com os dados de entrada na matriz de avaliação e o seu resultado (3º passo). Primeiramente são apresentados os resultados da aplicação da Programação Compromisso para a situação em que a maior importância é dada para os critérios referentes ao desnível geométrico. Para tanto são apresentados os Quadros 5.37 a 5.39.

Quadro 5.37 - Matriz de avaliação acrescidos dos valores extremos dos sistemas

Objetivos	Alternativas						
	I	II	III	IV	V	f_i^{\min}	f_i^{\max}
Demanda humana	1,393	1,875	1,892	1,393	1,535	1,393	1,892
Dessedentação animal	3,981	2,766	3,476	3,955	3,799	2,766	3,981
Demanda industrial	1,941	1,714	1,941	2,018	1,824	1,714	2,018
Irrigação	6,330	5,733	7,196	6,889	6,339	5,733	7,196
Restrições de ordens físicas	2,000	2,428	2,250	1,813	1,897	1,813	2,428

São apresentados também os resultados da Equação 3.8 e o cálculo de l_p^j .

Quadro 5.38 – Cálculo de l_p^j

$\alpha=1$					
	L_p^I	L_p^{II}	L_p^{III}	L_p^{IV}	L_p^V
p = 1	2,54	3,03	0,96	2,23	2,95
p = 2	1,38	1,73	0,57	1,43	1,42
p = ∞	3,95	3,95	3,95	3,95	3,95
$\alpha=2$					
	L_p^I	L_p^{II}	L_p^{III}	L_p^{IV}	L_p^V
p = 1	5,081	6,066	1,914	4,462	5,902
p = 2	1,949	2,450	0,800	2,022	2,014
p = ∞	1,007	1,018	0,418	1,014	0,870
$\alpha = \infty$					
	L_p^I	L_p^{II}	L_p^{III}	L_p^{IV}	L_p^V
p = 1	254,03	303,31	95,70	223,12	295,11
p = 2	13,778	17,324	5,655	14,299	14,242
p = ∞	1,590	1,769	0,660	1,699	1,396

Quadro 5.39 - Menores distâncias entre as soluções ideais e suficientes

$\alpha = 1$		
p = 1	0,96	l_p^{III}
p = 2	0,57	l_p^{III}
p = ∞	3,95	l_p^{III}
$\alpha=2$		
p = 1	1,914	l_p^{III}
p = 2	0,800	l_p^{III}
p = ∞	0,418	l_p^{III}
$\alpha=\infty$		
p = 1	95,70	l_p^{III}
p = 2	5,655	l_p^{III}
p = ∞	0,660	l_p^{III}

Em seguida são apresentados os resultados da aplicação da Programação Compromisso para a situação em que a maior importância é dada para os critérios referentes à distância aos pontos de captação. Para tanto são apresentados os Quadros 5.40 a 5.42.

Quadro 5.40 - Matriz de avaliação acrescidos dos valores extremos dos sistemas

Objetivos	Alternativas						
	I	II	III	IV	V	f_i^{\min}	f_i^{\max}
Demanda humana	1,406	1,815	1,928	1,406	1,634	1,406	1,928
Dessedentação animal	4,095	2,886	3,900	4,082	4,190	2,886	4,190
Demanda industrial	1,562	1,761	1,562	1,600	2,148	1,562	2,148
Irrigação	6,531	5,948	6,519	6,985	6,697	5,948	6,985
Restrições de ordens físicas	2,000	2,428	2,250	1,813	1,897	1,813	2,428

Os resultados da Equação 3.24, ou seja, o cálculo de l_p^j a partir da Equação 3.4 são apresentados nos Quadros 5.41 e 5.42.

Quadro 5.41 – Cálculo de l_p^j

$\alpha=1$					
	L_p^I	L_p^{II}	L_p^{III}	L_p^{IV}	L_p^V
p = 1	3,21	2,88	1,96	3,02	1,70
p = 2	1,64	1,58	1,16	1,70	1,07
p = ∞	3,95	3,95	3,95	3,95	3,95
$\alpha=2$					
	L_p^I	L_p^{II}	L_p^{III}	L_p^{IV}	L_p^V
p = 1	6,414	5,753	3,922	6,035	3,408
p = 2	2,316	2,228	1,634	2,400	1,510
p = ∞	1,014	1,014	1,007	1,014	0,870
$\alpha = \infty$					
	L_p^I	L_p^{II}	L_p^{III}	L_p^{IV}	L_p^V
p = 1	320,68	287,63	196,08	301,77	170,42
p = 2	16,375	15,755	11,553	16,971	10,678
p = ∞	1,701	1,700	1,585	1,738	1,371

Quadro 5.42 - Menores distâncias entre as soluções ideais e suficientes

$\alpha = 1$		
p = 1	1,704	l_p^V
p = 2	1,068	l_p^V
p = ∞	3,953	l_p^V
$\alpha=2$		
p = 1	3,408	l_p^V
p = 2	1,510	l_p^V
p = ∞	0,870	l_p^V
$\alpha=\infty$		
p = 1	170,42	l_p^V
p = 2	10,678	l_p^V
p = ∞	1,371	l_p^V

Finalizando a aplicação da Programação Compromisso, são apresentados os resultados para a situação em que a maior importância é dada para aos valores de demandas dos pontos de captação (Quadros 5.43 a 5.45).

Quadro 5.43 - Matriz de avaliação acrescidos dos valores extremos dos sistemas

Objetivos	Alternativas						
	I	II	III	IV	V	f_i^{\min}	f_i^{\max}
Demanda humana	1,558	1,856	1,899	1,558	1,682	1,558	1,899
Dessedentação animal	3,761	2,947	3,548	3,749	3,750	2,947	3,761
Demanda industrial	1,570	1,570	1,570	1,608	1,737	1,570	1,737
Irrigação	4,622	4,750	5,462	5,504	5,018	4,622	5,504
Restrições de ordem física	2,000	2,428	2,250	1,813	1,897	1,813	2,428

Os resultados da Equação 2.24, ou seja, o cálculo de l_p^j a partir da Equação 3.4 são apresentados nos Quadros 5.44 e 5.45.

Quadro 5.44 – Cálculo de l_p^j

$\alpha=1$					
	L_p^I	L_p^{II}	L_p^{III}	L_p^{IV}	L_p^V
p = 1	3,70	2,98	1,60	2,79	2,07
p = 2	1,87	1,66	1,07	1,61	1,21
p = ∞	3,95	3,95	3,95	3,95	3,95
$\alpha=2$					
	L_p^I	L_p^{II}	L_p^{III}	L_p^{IV}	L_p^V
p = 1	7,392	5,960	3,198	5,572	4,132
p = 2	2,640	2,342	1,520	2,277	1,706
p = ∞	1,018	1,013	1,007	1,014	0,870
$\alpha = \infty$					
	L_p^I	L_p^{II}	L_p^{III}	L_p^{IV}	L_p^V
p = 1	369,62	297,98	159,88	278,61	206,61
p = 2	18,667	16,561	10,745	16,104	12,066
p = ∞	1,771	1,714	1,585	1,705	1,377

Quadro 5.45 - Menores distâncias entre as soluções ideais e suficientes

$\alpha = 1$		
p = 1	1,60	l_p^{III}
p = 2	1,07	l_p^{III}
p = ∞	3,95	l_p^{III}
$\alpha=2$		
p = 1	3,198	l_p^{III}
p = 2	1,520	l_p^{III}
p = ∞	0,870	l_p^V
$\alpha=\infty$		
p = 1	159,88	l_p^V
p = 2	10,745	l_p^V
p = ∞	1,371	l_p^V

5.7. Discussão dos resultados

Uma vez aplicada a metodologia proposta foram feitas comparações entre os resultados encontrados. Numa análise realizada na primeira parte da metodologia, ou seja, com os pesos referentes às alternativas de *layout* para reservatórios com valores unitários ($\alpha = 1$), e dando a mesma importância para todos os critérios nas FO1 a FO4, observou-se que as menores distâncias indicam que a **alternativa III**, com 4 (quatro) reservatórios, representa a melhor alternativa para a localização de reservatórios na bacia.

Já a **alternativa V**, com apenas 3 (três) reservatórios, aparece em segundo lugar como melhor alternativa para implantação dos reservatórios esquematizados nela. Esta análise foi aplicada aos três possíveis valores de pesos referentes aos desvios máximos, ou seja, $p = 1$, $p=2$ e por último $p = \infty$.

Entretanto, analisando o passo 5 da metodologia proposta, ou seja uma comparação dos valores de minimax, nenhuma das alternativas sobressai sobre as demais, sendo mais coerente se forem adotados como melhores resultados aqueles analisados pelas menores distâncias, visto que a busca pelo minimax é apenas uma tentativa de confirmação dos resultados obtidos anteriormente. A Figura 5.11 apresenta esta superioridade da alternativa III como a melhor alternativa para a implantação de um possível *layout* de reservatório para a bacia do Rio Coruripe.

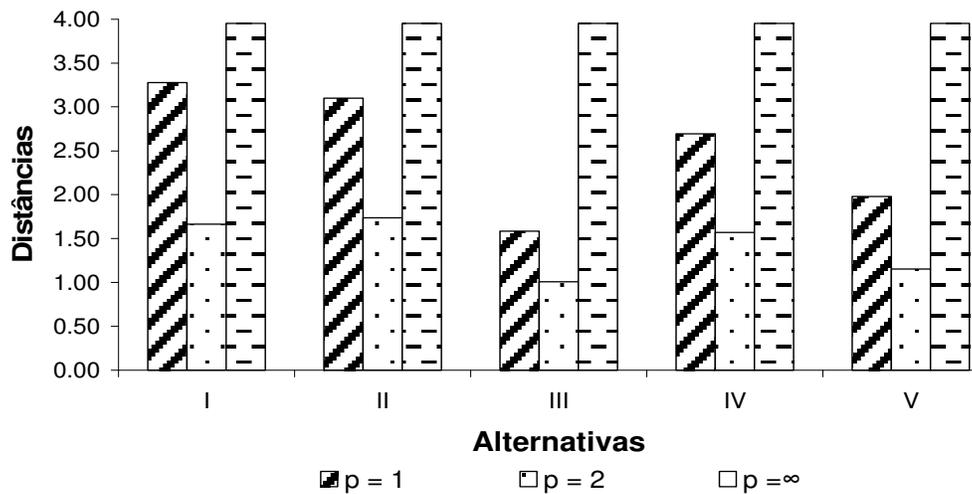


Figura 5.11– Comparação dos resultados para $\alpha = 1$ e $p = 1$.

Teoricamente, se a análise fosse concluída apenas com essa primeira parte, a alternativa III seria indiscutivelmente indicada como a melhor alternativa dentre as estudadas, porém foi necessária a continuação da pesquisa com a aplicação da segunda parte.

Foi realizada na segunda parte, uma variação nos valores de α . O valor assumido foi igual a 2 ($\alpha = 2$) e com os pesos referente aos desvios máximos iguais a 1, 2 e ∞ , ou seja, $p = 1$, $p = 2$ e $p = \infty$, a menor distância aconteceu ainda na alternativa III.

Em seguida, como segunda alternativa para a distribuição dos reservatórios na bacia, a alternativa V aparece como uma boa opção, pois a diferença entre as alternativas III e V são muito pequenas. No entanto, quando o valor de p é testado com um valor infinito, as classificações se alternam, ou seja, a melhor alternativa passa a ser a alternativa V com uma diferença pequena para a segunda melhor alternativa, a alternativa III. Estas comparações são apresentadas na Figura 5.12.

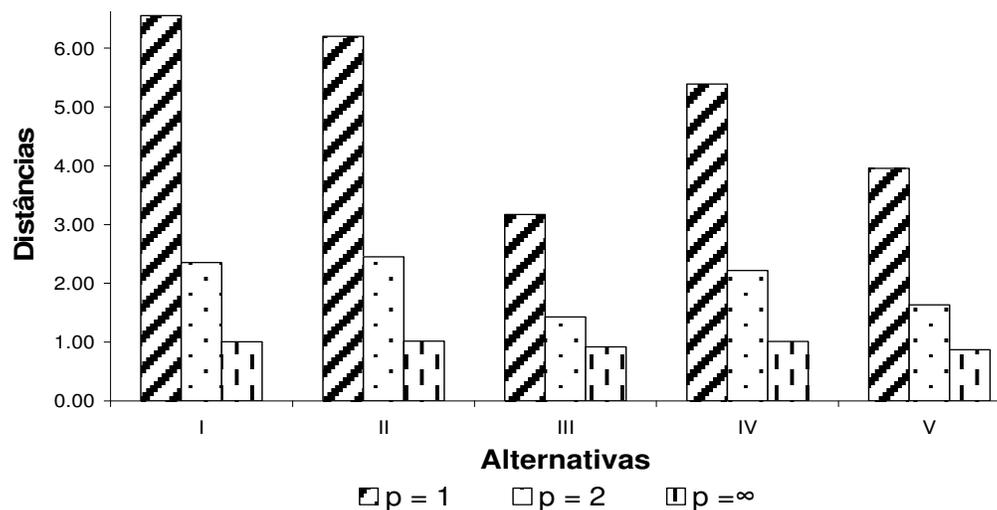
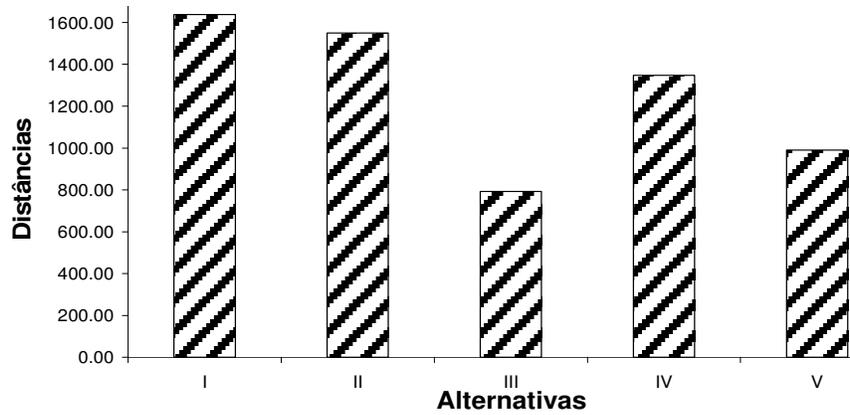
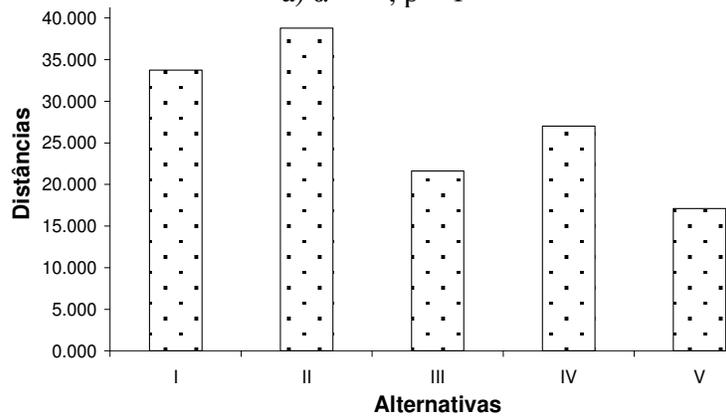


Figura 5.12 - Comparação dos resultados para $\alpha = 2$ e $p=1$

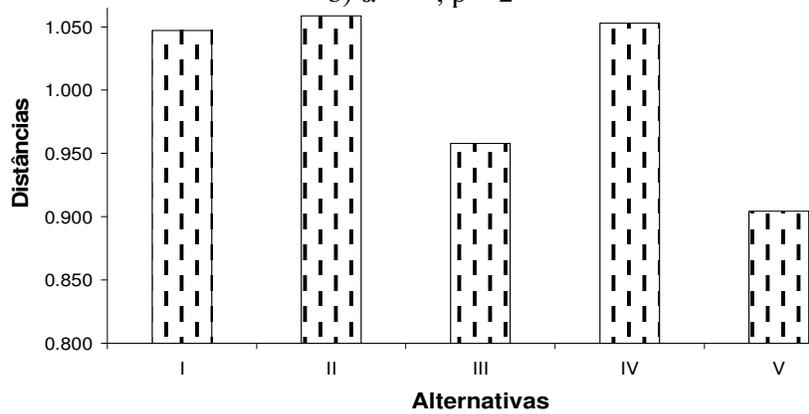
Quando foi aplicado $\alpha = \infty$ os resultados indicaram que a melhor alternativa de *layout* foi a alternativa III quando o valor de $p = 1$. No entanto, quando o desvio máximo possui valor igual a 2 e ∞ a melhor alternativa a ser adotada foi a alternativa V. As Figuras 5.13 a, b e c apresentam esta análise.



a) $\alpha = \infty$, $p = 1$



b) $\alpha = \infty$, $p = 2$



c) $\alpha = \infty$, $p = \infty$

Figura 5.13 - Comparação dos resultados para $\alpha = \infty$ e ponderadores iguais

Quando os valores dos ponderadores das FO1 a FO4 foram variados dando uma importância maior aos critérios referentes aos desníveis geométricos, os resultados apresentaram como melhor escolha a alternativa III, confirmando o que foi apresentado anteriormente. Estes resultados são apresentados nas Figuras 5.14 e 5.15.

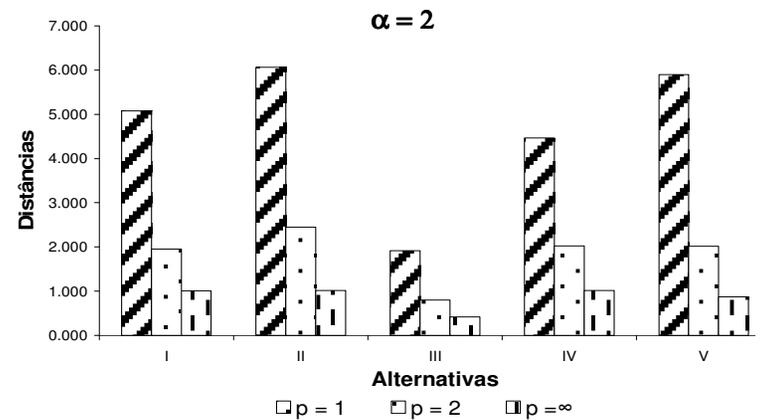
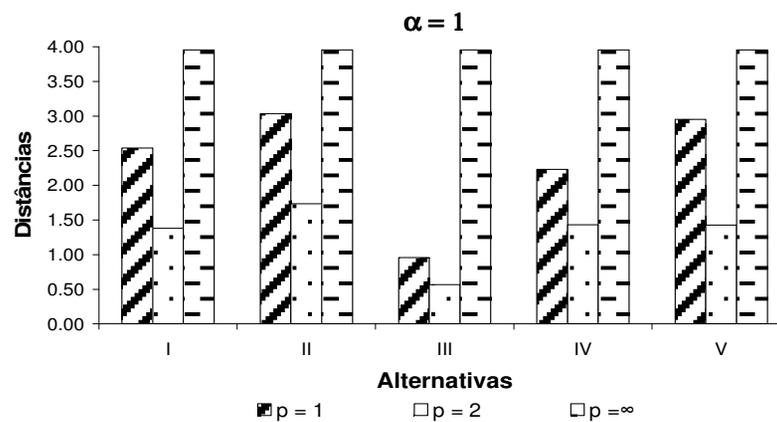
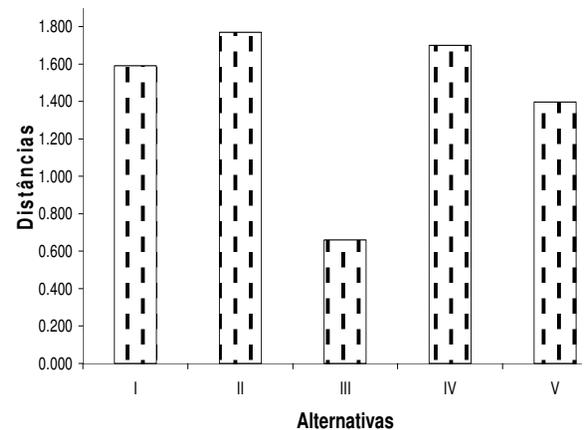
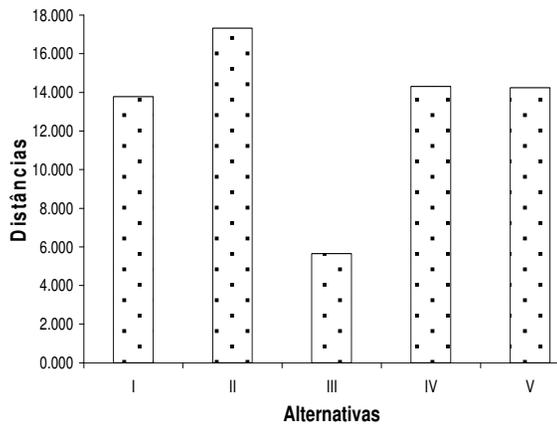
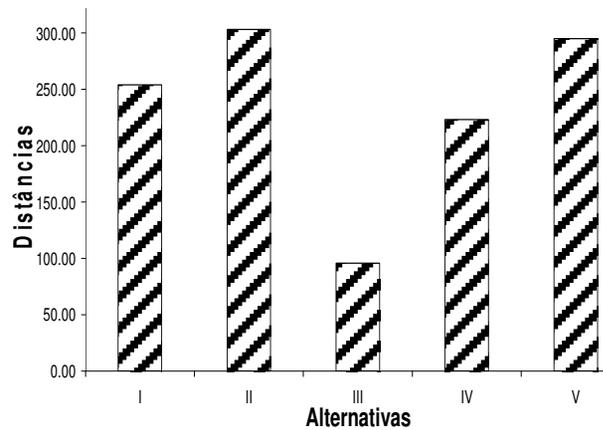


Figura 5.14 - Comparação dos resultados para $\alpha = 1$ e $\alpha = 2$, dando maior importância ao desnível geométrico (b)



(a) $p = 1$

(b) $p = 2$

(c) $p = \infty$

Figura 5.15 - Comparação dos resultados para $\alpha = \infty$, dando maior importância ao desnível geométrico (b)

Quando os valores dos ponderadores das FO1 a FO4 são variados dando uma importância maior aos critérios referentes a distância aos Programação Compromisso apresentam como melhor escolha a alternativa V, fazendo com que a segunda alternativa, nas demais, alterne com a alternativa III nesta análise. Estes resultados são apresentados nas Figuras 5.16 e 5.17.

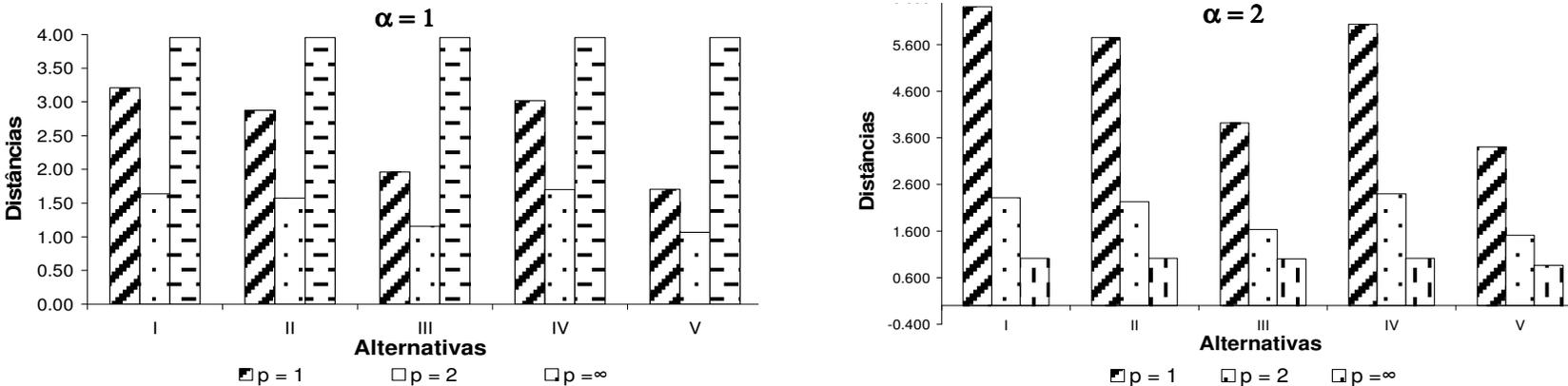


Figura 5.16 - Comparação dos resultados para $\alpha = 1$ e $\alpha = 2$ (dando maior importância a distância (c))

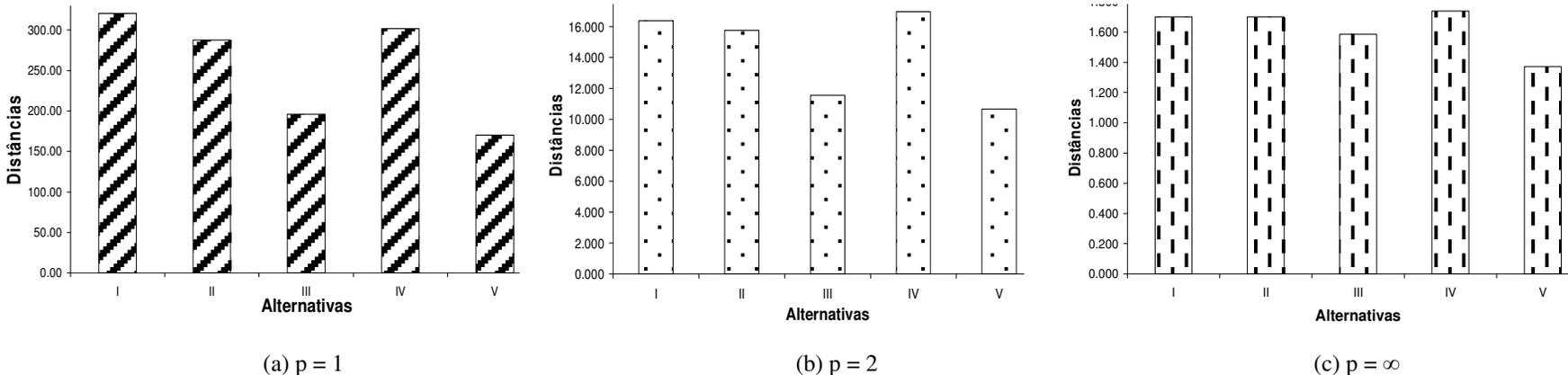


Figura 5.17 - Comparação dos resultados para $\alpha = \infty$ (dando maior importância a distância (c))

Quando os valores dos ponderadores das FO1 a FO4 são variados dando uma importância maior aos critérios referentes à demanda ao ponto de captação apresentam como melhor escolha a alternativa III, confirmando o que foi apresentado anteriormente. Estes resultados são apresentados nas Figuras 5.18 e 5.19.

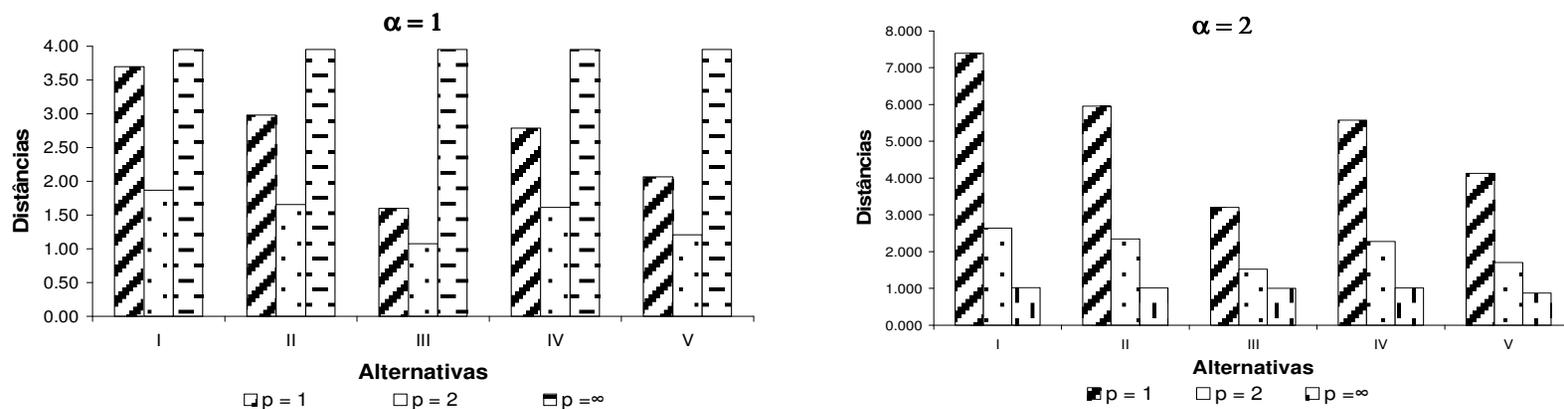


Figura 5.18 - Comparação dos resultados para $\alpha = 1$ e $\alpha = 2$ (dando maior importância a demanda (d))

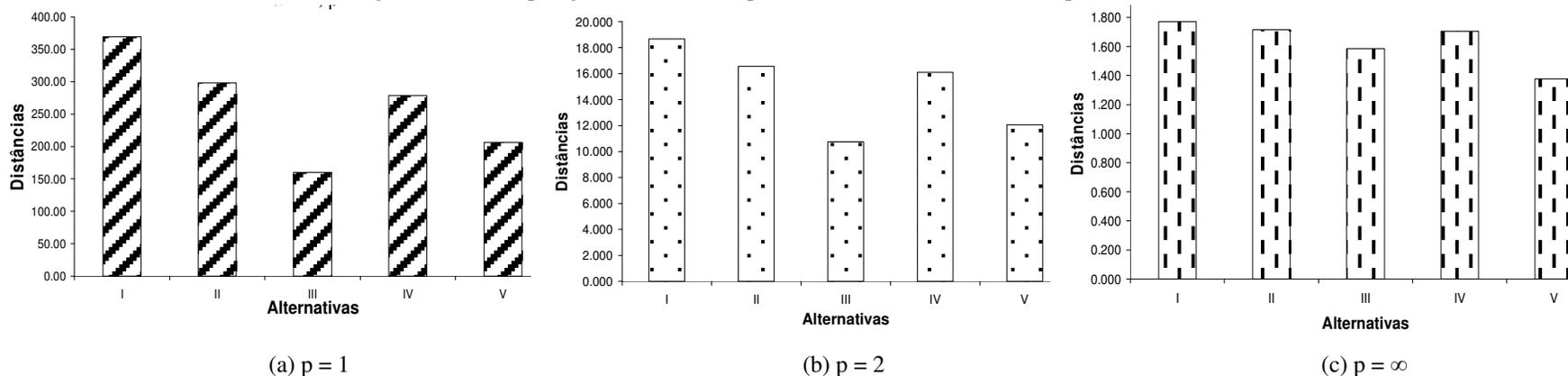


Figura 5.19 - Comparação dos resultados para $\alpha = \infty$ (dando maior importância a demanda(d))

Como em qualquer caso de estudo, faz-se necessário uma análise da aplicação metodológica aliada ao conhecimento da bacia do rio Coruripe. Algumas particularidades da bacia, como por exemplo: o afunilamento na parte média até seu exultório; o índice de aridez da bacia; os mapas de uso do solo e de infiltração; dentre outros, indicam que as melhores alternativas para a implantação de reservatórios estão apresentadas nas partes média e baixa da bacia. Aliada a isso está localizada nesta bacia uma das maiores produtoras de açúcar e álcool do Estado de Alagoas, a Usina Coruripe, seguida da Usina Seresta e dos demais usuários da bacia e que também estão localizadas nas partes médias e baixa da bacia.

Diante disso, a análise dos resultados das variações realizadas nas funções FO1 a FO4, indicam que, quando foi dada, maior importância ao desnível geométrico, o resultado final da aplicação da Programação Compromisso, e, conseqüentemente, a escolha da alternativa de *layout* de reservatório não se alteraram. Isto se deve ao fato da declividade da bacia, em sua parte baixa e média, não ser muito alta, demonstrando este critério não ter muita importância na alteração do resultado final da pesquisa.

Era esperado que acontecesse o mesmo quando fosse dada maior importância para o critério da distância, pois a bacia possui um afunilamento em sua parte central e continua estreita até seu exultório, mas isso não aconteceu, pois mesmo diante de tal fato a alternativa V se mostrou melhor distribuída em relação aos pontos de captação. Este resultado não é decisivo na análise, pois vale a pena verificar todos os resultados de acordo com a intenção dos decisores.

Quando foi dada maior importância ao critério das demandas, o resultado foi o esperado por se tratar de um critério que seria atendido de qualquer maneira, no entanto, foi testada nesta aplicação se fosse dada maior importância para a demanda

Portanto, as alternativas desenvolvidas nesta pesquisa poderiam e têm condições de serem utilizadas como um bom esquema de reservatórios. Entretanto, a melhor decisão acontecerá após uma discussão em que os motivos de um grupo de decisores sobressaiam a outro grupo.

Diante dos resultados analisados, cada potencial tomador de decisões pode assumir aquela alternativa que melhor se apresentou ou, se for o caso, uma alternativa que possa ser melhor aproveitada de acordo com as necessidades dos tomadores de decisão.

No entanto, a pesquisa não se completa se o analista não indicar aquela alternativa que mais o satisfaz. Portanto, apesar dos resultados indicarem duas possíveis alternativas para a escolha do tomador de decisões, suas variações indicam uma reação similar para todos os pesos referentes aos desvios máximos, ou seja, apesar das variações, as duas alternativas estão sempre com valores similares, sendo decisivamente uma posição em favor da **alternativa III** por aparecer um número maior de vezes como a melhor escolha. Além disso, nesta alternativa de *layout*, as demandas podem ser atendidas com menores custos de transporte da água, pois existe, nesta opção, um reservatório localizado no rio Canabrava, o que não ocorre na segunda melhor proposta, a **alternativa V**. Isto faz com que as principais demandas de cana-de-açúcar da Usina Seresta, a segunda maior usuária da bacia, sejam atendidas sem muito custo de transporte do recurso hídrico.

Vale a pena ressaltar que nesta bacia a economia se baseia no cultivo da cana-de-açúcar e que estes reservatórios são bastante importantes na regularização das vazões para a irrigação desta cultura, e por conseqüência no planejamento dos recursos hídricos.

6. Conclusões e Recomendações

Historicamente a localização de reservatórios, seja para o controle de cheias ou para a regularização de vazões, tem levado em conta apenas o objetivo da maximização da eficiência econômica. No entanto, atualmente o grande desafio é buscar um equilíbrio entre os demais objetivos a serem atingidos com a implantação de reservatórios, sendo a análise multiobjetivo uma possível alternativa para solucionar os impasses encontrados no trabalho.

Nesse contexto, este estudo avaliou a possível aplicação da Programação Compromisso como técnica multiobjetivo para a localização de reservatórios. Além disso, o trabalho deverá suprir, em partes, a carência de estudos científicos no planejamento de recursos hídricos no Estado de Alagoas, pois dispõe de uma comparação entre possíveis alternativas de reservatórios de regularização de vazão na bacia do Rio Coruripe, em Alagoas, assunto ainda muito discutido pelos tomadores de decisão.

6.1. Conclusões

A técnica multiobjetivo proposta metodologicamente para a determinação do melhor local para a implantação de reservatório foi a Programação Compromisso. A aplicação desta técnica mostrou ser viável e eficiente por se tratar de uma técnica que necessita de um mínimo de informações por parte do analista e decisor além de exigir pouco tempo na computação e conseqüentemente das análises dos resultados. Além disso, a presente pesquisa permite aos usuários e tomadores de decisão uma melhor compreensão nas análises das propostas, devido às facilidades de entendimento dos programas utilizados, possibilitando aos mesmos a inserção de novas alternativas.

Aliado a isso, a aplicação desta técnica em ambiente de geoprocessamento possibilitou a integração de diferentes tipos de dados, distribuídos espacialmente, agregando informações hidrologicamente relevantes que puderam ser comparadas e feitos cruzamentos de maneiras efetivas. Em geral a possibilidade de planejamento de reservatório aumenta significativamente com a integração de técnicas multiobjetivos e o uso dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

Para a aplicação da técnica foram identificados os objetivos a serem alcançados com a pesquisa e, posteriormente, formuladas funções objetivo com critérios definidos para atingir os mesmos. Estes objetivos foram estabelecidos com base na Política Estadual de Recursos Hídricos, nos documentos oficiais da bacia disponibilizados por órgãos do Estado e na experiência do analista. Vale a pena ressaltar que foi atingida a meta de identificar os objetivos com base na metodologia proposta na pesquisa. No entanto, eles podem ser alterados a qualquer momento pelos tomadores de decisão (membros do comitê de bacia), dependendo apenas do julgamento e dos interesses dos mesmos.

Portanto, ficou claro que o problema pode ser composto por novos objetivos, critérios e novas restrições, adaptando-o a novas condições. Para tanto, faz-se necessária a atuação dos tomadores de decisões da bacia, fornecendo os elementos necessários para definir quais as melhores funções objetivo que englobam os critérios e suas restrições.

Com a realização da pesquisa tornou-se indispensável à análise dos parâmetros da metodologia proposta. Buscou-se testar a influência de cada um dos parâmetros, concluindo que para a variação dos valores de α dar-se-á preferência a um determinado conjunto de reservatórios em relação aos demais. Entretanto, no ajuste matemático, função principal do parâmetro p , possibilitou uma pequena mudança nos resultados a medida que o mesmo aumentava, ou seja, quando o valor de p tende para o infinito a

É razoável e correto afirmar ter-se cumprido, ao final deste trabalho, o principal objetivo que foi o de analisar a aplicabilidade da Programação Compromisso, em ambiente de geoprocessamento, para a determinação de locais para a implantação de reservatórios.

Entretanto, não cabe ao analista apontar uma solução imediatamente, ficando facultativo aos tomadores de decisão a melhor solução a partir de um consenso entre os mesmos. Isto ocorre porque o problema analisado não possui apenas uma solução, pois a compreensão do mesmo não é única. Caberá a cada potencial tomador de decisões a função de privilegiar um aspecto a outro que considere menos importante.

Espera-se que este trabalho sirva de ferramentas para auxiliar os tomadores de decisões da bacia, e que possa influenciar de forma significativa nas análises dos mesmos,

fazendo com que sejam alcançados, da melhor maneira, os objetivos de todos os usuários da bacia.

6.2. Recomendações:

A partir de todas as questões e de toda a complexidade da escolha de locais para reservatórios, percebe-se que há bastante a se avançar em estudos e trabalhos que busquem discutir a respeito do tema, que é por natureza multidisciplinar envolvendo ciências diversas como engenharias, economia, ciências sociais, etc.

Recomenda-se que sejam analisados os valores quantitativos do escoamento superficial, fazendo um estudo mais complexo para a real localização de reservatórios em uma bacia. Estes se mostram ainda mais importantes se os reservatórios a serem implantados sejam de cheias, pois se faz necessária uma análise minuciosa do escoamento superficial e de fatores que nele interferem. Por outro lado, nos casos em que o reservatório seria utilizado para a regularização de vazões, a pesquisa auxiliaria aos tomadores de decisões nas concessões de outorgas na bacia hidrográfica, fazendo, deste modo, um cruzamento dos dados de Oferta x Demanda em toda a bacia. Recomenda-se ainda que sejam avaliadas as operações destes reservatórios, fazendo com que o estudo se torne o mais abrangente possível.

Recomenda-se também uma investigação maior sobre a questão dos objetivos a serem alcançados com a implantação de reservatórios. Mostra-se bastante aplicável uma amostragem com os tomadores de decisão e com os usuários da bacia sobre estes objetivos. Este estudo poderia levar a uma aproximação maior da realidade de carência de água na bacia.

A pesquisa mostrou-se bastante aplicável, no entanto, poder-se-ia aprofundar o trabalho fazendo uma comparação da técnica multiobjetivo utilizada com outras comumente utilizadas no planejamento dos recursos hídricos. Uma boa opção poderia ser as técnicas que utilizam uma articulação antecipada das preferências.

7. Referências Bibliográficas

- ALAGOAS. Lei Estadual nº 5.965 de Novembro de 1997. Política Estadual de Recursos Hídricos. **Diário Oficial do Estado de Alagoas**. Maceió, 11 de novembro de 1997.
- ALAGOAS. Lei nº 6.126 de Dezembro de 1999. Criação da Secretaria Estadual de Recursos Hídricos e Irrigação. **Diário Oficial do Estado de Alagoas**. Maceió, 17 de dezembro de 1999.
- ARAÚJO, E. J. R. de. 2002. **Zoneamento Hidrometeorológico como subsídio para o desenvolvimento agrícola do Estado de Alagoas**. Natal. UFRN, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 96 p.
- ASSUCAL, 2000 . Produção de Cana de Açúcar - Safra 1999/2000. Maceió.
- BARBOSA, P.S.F. 1997. O emprego da análise multiobjetivo no gerenciamento dos recursos hídricos. **Água em Revista**. v 8. p 42-46.
- BELLA, A. , Duckstein, L. & Szidarovszky, F. 1996 A Multicriterion Analysis of the Water Allocation Conflict in the Upper Rio Grande Basin. **Applied Mathematics and computation**, New York, p 245-265.
- BRAGA, B.P.F. & ROCHA, J. M.M. 1988. Localização do Pólo Petroquímico do Rio de Janeiro – uma análise multiobjetivo. **Revista Águas e Energia Elétrica**. São Paulo. v 5, n 13, p 54-60.
- BRAGA, B.P.F & GOBBETTI, L.E.C. 2002. **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos**.In: PORTO, R.L.L. Porto Alegre: Ed. UFRGS/ABRH, p 361-418.
- BRASIL. Lei nº 9.433 de 08 de Janeiro de 1997. Política Nacional de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília, 09 de Janeiro de 1997.
- COHON, J. L. & MARKS, D.H. 1973. Multiobjective Screening Models and Water Resource Investment. **Water Resources Research**. v 9, n 4, p 826-836.
- COHON, J. L.. & MARKS, D.H. 1975. A review and evaluation of multiobjective programming techniques. **Water Resources Research**. v 11, n 2, p 208-220.
- COHON, J. L. 1978. Multiobjective programming and planning. New York. Academic Press. 233p.

- CRUZ, R.C. & PEREIRA FILHO, W. 2005. **Seleção Ambiental de Barragens: Análise de favorabilidades ambientais em escala de bacia hidrográfica.** In CRUZ, J.C. & SILVEIRA, G.L. 1ed, Santa Maria – RS, p57-90.
- DNOCS, Departamento Nacional de Obras Contra Secas. **Ministério da Integração Nacional.** 2004.[Disponível em <http://www.dnocs.gov.br>] , em 08/04/2005.
- DUCKSTEIN, L. & OPRICOVIC, S., 1980. Multiobjective optimization in river basin development. **Water Resources Reseach.** v 16. n 1, p 14-20.
- ESAB, 2003/2004. Sistemas de Informação Geográfica: Apontamentos das Aulas Práticas. Escola Superior Agrária de Beja. Beja, Portugal. Disponível em: [www.esab.ipbeja.pt/~luisluz/SIG/exames/pratico2.pdf], em 12/04/2005. 99p
- EMBRAPA/CNPS, 1999. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília.
- EASTMAN, J.R. 1998. **IDRISI for Windows: Introdução e Exercícios Tutoriais:** J.Ronald Eastman. Editores em versão português: Heirinchi Hasemack e Eliseu Weber. Porto Alegre, UFRGS. Centro de Recursos Idrisi, 240p.
- GARRIDO, J.R., 1999. **O combate à Seca e a Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil.** In: **O estado das águas no Brasil**, Ministério de Minas e Energia – MME, Ministério no Meio Ambiente – MMA/SRH, p287-319.
- GERSHON, M. & DUCKSTEIN, L. 1984. A procedure for selection of a multiobjctive technique with application to water and mineral resources. **Applied Mathematics and computation.** v 14, p 245-271.
- GOBBETTI, L.E.C. 1993. **Análise Multiobjetivo Aplicada ao Planejamento de Sistema de Recursos Hídricos.** São Paulo: 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 131 p.
- IBGE, 2000. Censo Demográfico 2000. Rio de Janeiro, Brasil.
- JENSON, S.K & DOMINGUE, J.O. 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. **PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING AND REMOTE SENSING**, Vol. 54, No. 11, November 1988, pp. 1593-1600.
- LANNA, A. E. L. 1997. Modelos de Gerenciamento das Águas. In: **A água em revista** – Revista técnica da CPRM, ano V, n. 8.
- LANNA, A.E.L. 2002. **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos.**In: PORTO, R.L.L ,Porto Alegre: Ed. UFRGS/ABRH, p15-43.

- LOUCKS, D. P., Stedinger, J.R. & Hall, D.A. 1981. **Water Resources Systems Planning and Analysis**. Prentice-Hall Inc. 559p
- LUZ, L. D. 1994. **Análise de critérios simplificados para outorga de direitos de uso da água na bacia do Rio Grande, Bahia: Uma análise multiobjetivo**. Porto Alegre: UFRGS, 1994. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 124 p.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. 2005; Disponível em: [<http://www.mma.gov.br/port/redesert/seca.html>] em 08/04/2005.
- MENDES, C.A.B, & CIRILO, J.A. 2001. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, integração e aplicação**. ABRH, 536p.
- OLIVEIRA, J.A. & LANNA, A. E. L. 1997. Otimização de um sistema de múltiplos usos no nordeste brasileiro, **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V. 2. n.2, Jul/Dez p 123-141.
- PHUA, M.& MINOWA, M., 2005. A GIS-based multi-criteria decision making approach to forest conservation planning at a landscape scale: a case study in the Kinabalu Area, Sabah, Malaysia. **Landscape and Urban Planning**. p 207–222.
- PILAR, J.V. 2003. **Desenvolvimento de um sistema de apoio a decisão para a otimização de traçados de obras de engenharia civil: o caso do sistema de defesa contra inundações da cidade de Resistência, Argentina**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 113 p.
- PORTO, R.L.L. 2002. **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos**. Porto Alegre: Ed. UFRGS/ABRH, 419 p.
- PRUSKI, F.F & SILVA, D.D. 2000. **Gestão de Recursos Hídricos: Aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais**. Brasília, DF. Secretaria de Recursos Hídricos; Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa; Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 659p.
- RADAMBRASIL, 1983.. **Levantamento de Recursos Naturais - Folha Aracaju / Recife – Volume 30**. Ministério das Minas e Energia, Secretaria Geral. 852 p. Brasília.

- RODRIGUES, F. A. 2002. **Inclusão de dimensões social e ecológica em planos de manejo para floresta de rápido crescimento.** Piracicaba: USP, 2002. Dissertação (Mestrado Recursos Florestais, Área de Concentração: Recursos Florestais, com opção em Manejo de Florestas de Produção.) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 110 p.
- SANTANA, A.G. 1998. **Dimensionamento ótimo de um sistema de recursos hídricos de grande porte.** Porto Alegre: UFRGS, 1998. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 159 p.
- SHCHUMANN, A. H., & GEYER, J. 1997. Hydrological desing of flood reservoirs by utilization of GIS and remote sensing. **Remote Sensing and Geographic Information for Design and Operation of Water Resources Systems** (Proceedings of Rabat Symposium 53, April 1997 IAHS Publ. n 242, p 173-180.
- SILVA, E. R de. 1998. **O curso da água na história: simbologia, moralidade e a gestão de recursos hídricos.** Rio de Janeiro: 1998. Tese de Doutorado – Pós-graduação em saúde pública, Fundação Oswaldo Cruz – Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro. 48p.
- VIANNA, JR. 1998. W. P. **Operação ótima do sistema de reservatórios da bacia do Rio Curu-CE.** Porto Alegre: UFRGS, 1998. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 119 p.

ANEXOS


```

! WRITE(*,*) ' ENTRE COM O NOME DO ARQUIVO DA REDE DE FLUXO(SEM EXTENSAO) '
! READ(*,*)ARQFLUXO
! WRITE(*,*) ' ENTRE COM O NOME DO ARQUIVO DO MNT (SEM EXTENSAO) '
! READ(*,*)ARQMNT
! WRITE(*,*) 'ESCREVA AS COORDENADAS (X,Y) '
! READ(*,*)COORDX,COORDY
  !WRITE(*,*) ' QUAL O ARQUIVO COM O LOCAL EXATO DO RESERVATÓRIO? (SEM
  EXTENSAO) '
  !READ(*,*)ARQINUNDA
  WRITE(*,*) ' ENTRE COM O NOME DO ARQUIVO DE SAIDA RASTER E RDC(SEM
  EXTENSAO) '
  READ(*,*)ARQSAIL
  WRITE(*,*) ' ENTRE COM A ALTURA DA BARRAGEM'
  READ(*,*)BAH
  !WRITE(*,*) ' ENTRE COM O VOLUME MÁXIMO'
  !READ(*,*)VOLMAX
  OPEN(1,file = 'd.txt')
!Esse arquivo deve conter os seguintes dados:
!Tipo de dados: inteiro, real ou byte
!Tipo de arquivo:binario
!Número de Colunas - NL
!Numero de Linhas - NC
!sistema de referência: UTM_24S(por exemplo)
!Unidade de referência: m, km,...
!Unidade de distância
!DX - Incremento em X (100 m)
!DY - Incremento em Y (100 m)
  READ(1,10)ENT1
  READ(1,10)ENT2
  READ(1,12)NC
  READ(1,12)NL
  READ(1,10)ENT3
  READ(1,12)ENT4
  READ(1,12)DX
  READ(1,12)DY
  READ(1,'(F15.2)')XMIN
  READ(1,'(F15.2)')XMAX
  READ(1,'(F15.2)')YMIN
  READ(1,'(F15.2)')YMAX
  É preciso definir a coordenada exata da célula que ficará o
  reservatório, ou seja, (coordx,coordy).
  COORDX=790100
  COORDY=8908600
10 format (a14)
12 FORMAT (I4)
WRITE(*,*)NL,NC
WRITE(*,*)DX,DY
WRITE(*,*)BAH
ALLOCATE (FLU(NL,NC))

```

```

ALLOCATE (XFLU(NL,NC))
ALLOCATE (YFLU(NL,NC))
ALLOCATE (MNT(NL,NC))
ALLOCATE (XMNT(NL,NC))
ALLOCATE (YMNT(NL,NC))
ALLOCATE (XINUNDA(NL,NC))
ALLOCATE (YINUNDA(NL,NC))
ALLOCATE (ZINUNDA(NL,NC))
OPEN(2,FILE='FLUXOXYZ.TXT',ACTION='READ')
OPEN(3,FILE='MNTXYZ.TXT',ACTION='READ')
DO I=1,NL
  DO K=1,NC
    READ(2,*)XFLU(I,K),YFLU(I,K),FLU(I,K)
    READ(3,*)XMNT(I,K),YMNT(I,K),MNT(I,K)
  ENDDO
ENDDO
DO I=1,NL
  DO K=1,NC
    IF((XMNT(I,K)==COORDX).AND.(YMNT(I,K)==COORDY)) THEN
      !XINUNDA(I,K)=XMNT(I,K)
      !YINUNDA(I,K)=YINUNDA(I,K)
      ZINUNDA(I,K)=1
    ELSE
      !XINUNDA(I,K)=XMNT(I,K)
      !YINUNDA(I,K)=YINUNDA(I,K)
      ZINUNDA(I,K)=0
    ENDIF
  ENDDO
ENDDO
CLOSE(1)
CLOSE(2)
CLOSE(3)
ALLOCATE (VOT(NL,NC))
ALLOCATE (HMNT(NL,NC))
ALLOCATE (HBAH(NL,NC))
CALL INUNDA
!CÁLCULO DO VOLUME DO RESERVATÓRIO
OPEN(14,FILE='VOLUME.TXT')
HT=0
DO I=1,NL
  DO K=1,NC
    HMNT(I,K)=MNT(I,K)*ZINUNDA(I,K)
    HBAH(I,K)=COTAH*ZINUNDA(I,K)
    VOT(I,K)=HBAH(I,K)-HMNT(I,K)
    !WRITE(14,*)XMNT(I,K),YMNT(I,K),VOT(I,K)
  ENDDO
  H1=VOT(I,K)
  HT=H1+HT
ENDDO
ENDDO

```



```

ddaux(8)=128
!definicao da posicao relativa dos pixels vizinhos
! lin viz = lin centro + dlin(i)
! col viz = col centro + dcol(i)
dlin(A)=-1
dcol(A)=1
dlin(B)=0
dcol(B)=1
dlin(C)=1
dcol(C)=1
dlin(D)=1
dcol(D)=0
dlin(E)=1
dcol(E)=-1
dlin(F)=0
dcol(F)=-1
dlin(G)=-1
dcol(G)=-1
dlin(H)=-1
dcol(H)=0
!definicao das direcoes opostas
inv(1)=E
inv(2)=F
inv(4)=G
inv(8)=H
inv(16)=A
inv(32)=B
inv(64)=C
inv(128)=D
!INUNDA(L,C) É A MATRIZ REPRESENTADO COM 1 SOMENTE NA CÉLULA QUE TERÁ O
  RESERVATÓRIO
!MNT(L,C) É A MATRIZ COM O MODELO NUMERICO DO TERRENO
!FLU(L,C) É A MATRIZ RCOM A DIREÇÃO DE FLUXO DO RIO.
! OPEN(10,FILE='INUNDAXYZ.TXT',ACTION='READ')
! OPEN(11,FILE='MNTXYZ.TXT',ACTION='READ')
DO I=1,NL
  DO K=1,NC
    !READ(10,'(F15.2,F15.2,I15)')XINUNDA(I,K),YINUNDA(I,K),ZINUNDA(I,K)
      !READ(11,*)XMNT(I,K),YMNT(I,K),MNT(I,K)
      IF (ZINUNDA(I,K)==1) THEN
        WRITE(*,*)I,K
        COTA=MNT(I,K)
      ENDIF
  ENDDO
ENDDO
COTAH=COTA+BAH
ENTROU=1
WRITE(*,*)COTAH
!OPEN(12,FILE='FLUXOXYZ.TXT',ACTION='READ')

```