

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

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

***OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE  
RESERVATÓRIOS PARA IRRIGAÇÃO E ABASTECIMENTO URBANO***

***JOSIMAR ALVES DE OLIVEIRA***

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

Porto Alegre, dezembro de 1995.

*Dedico este trabalho à meus pais e minha esposa, Ezilda Eduarda, pelo apoio, carinho e dedicação com que me acompanhou durante todo o período deste curso.*

## APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul sob orientação do Prof. Dr. Antônio Eduardo Leão Lanna e co-orientação do Prof. Dr. Raul Dorfman.

Desejo agradecer ao Prof. Antônio Eduardo Leão Lanna pelo enorme apoio prestado, e grande interesse com que tem se dedicado aos problemas brasileiros, em especial às causas nordestinas.

Ao Prof. Raul Dorfman, pela sua valiosa contribuição no esclarecimento de dúvidas sobre agricultura e irrigação.

Ao Dr. Antônio Ribeiro Zaranza (FUNCEME), pelo incentivo e apoio prestado, para a realização deste curso.

Ao Prof. Francisco de Souza (UFC), pelas informações e material cedido, durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço, em especial, a todos os professores do IPH que contribuíram para a minha formação em recursos hídricos.

Aos amigos do IPH pelo companheirismo, contribuições e sugestões prestadas durante a realização deste trabalho.

Às secretárias D. Lígia e Nadir, e as bibliotecárias Jussara Silva e Jussara Barbieri, pelos muitos serviços prestados e pela atenção dispensada durante as pesquisas de material bibliográfico.

Aos funcionários do CESUP, pela enorme ajuda e atenção que me foi dispensada para acesso aos computadores do centro.

## RESUMO

A correta operação de um conjunto de reservatórios, procurando otimizar vazão a ser liberada para atendimento da demanda, constitui-se num ponto particularmente importante dentro da operação de um projeto de irrigação, principalmente em locais como o Nordeste brasileiro, onde a água representa um recurso escasso e o poder evaporante é muito elevado.

Esta pesquisa procura encontrar uma regra de operação de um sistema composto de cinco reservatórios, para atendimento de demandas de irrigação e abastecimento urbano, na bacia do Rio Acaraú, no Estado do Ceará. Elege-se a programação linear determinística, aliada a técnicas de simulação, como ferramenta para solução do problema. A função objetivo adotada visa a maximização do valor presente dos benefícios líquidos do projeto, sujeita a restrições de balanço hídrico nos reservatórios, e de umidade no solo.

O modelo foi aplicado em duas abordagens separadamente: com área fixa e área variável. A abordagem com área variável, mostrou que o sistema tem capacidade de irrigar uma área maior que a originalmente definida no projeto. Na abordagem com área fixa, diversas regras operacionais foram obtidas e testadas por simulação, tendo as regras operacionais simples se mostrado mais eficientes. Os resultados mostram a eficiência de se irrigar uma área maior, com tolerância a déficits de umidade no solo, para se obter uma renda líquida maior.

## **ABSTRACT**

The appropriate operation of a set reservoirs attempting to optimize the flow to be released to fulfill demand is a particularly important point in operating an irrigation project, especially in places such as the Brazilian Northeast, where water is a scarce with intense evaporation.

This research study attempts to find a rule to operate a system consisting of five reservoirs for irrigation and water supply demands in the River Acaraú basin, state of Ceará. Deterministic linear programming is chosen, together with simulation techniques, as a problem-solving tool. The function adopted as an objective is to maximize the present value of net benefits of the project, subject to restrictions of water balance in the reservoirs and soil humidity.

The model was applied in two separate approaches, fixed area and variable area. The approach using a variable area showed that the system is able to irrigate a larger area than initially defined in the project. In the fixed-area approach, different operational rules were obtained and tested by simulation, when the simple operational rules proved more effective. The results show the efficiency of irrigating a larger area with tolerance for soil humidity deficits to obtain higher net income.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....	2
1.1 Introdução.....	2
1.2 Objetivos.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 Generalidades.....	6
2.2 Os Métodos de Otimização.....	8
2.2.1 Programação Linear (PL).....	9
2.2.2 Programação Não-Linear .....	11
2.2.3 Programação Dinâmica (PD).....	11
2.2.4 Técnicas de Simulação .....	13
2.3 Os Modelos de Rendimento.....	14
2.3.1 A Estimativa da Evapotranspiração .....	20
2.4 A Regra Ótima de Operação.....	21
2.5 Comentários.....	27
3. ÁREA DE ESTUDO.....	30
3.1 Descrição Geral.....	30
3.2 Dados Disponíveis.....	33
3.3 Análise dos Dados.....	36
4. METODOLOGIA.....	43
4.1 Formulação Matemática .....	43
4.1.1 Função Objetivo (F.O.) .....	44
4.1.2 Equações de Restrição .....	50
4.1.2.1 Balanço Hídrico no Solo.....	50
4.1.2.2 Balanço Hídrico nos Reservatórios.....	55
4.1.2.3 Balanço Hídrico no Ponto de Captação .....	57
4.2 A Solução do Problema de Otimização.....	58
4.2.1 O Método Primal-Dual.....	59
4.3 A Simulação do Sistema.....	61

5. APLICAÇÃO .....	67
5.1 Considerações .....	67
5.2 Função Objetivo .....	69
5.3 Restrições.....	78
5.3.1 Balanço Hídrico no Solo .....	78
5.3.2 Balanço Hídrico nos Reservatórios.....	83
5.4 A Aplicação Computacional .....	85
6. RESULTADOS.....	89
6.1 Primeiro Caso: Área Variável .....	89
6.2 Segundo Caso: Área Constante.....	92
6.2.1 Resultados da Otimização .....	92
6.2.2 Resultados da Simulação .....	94
6.2.3 O Efeito do Déficit Hídrico .....	98
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	106
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Grupos de cultivo .....	34
Tabela 3.2: Plano cultural .....	35
Tabela 3.3: Demanda hídrica mensal dos cultivos ( $m^3/ha$ ).....	38
Tabela 3.4: Taxa de evaporação mensal (mm).....	38
Tabela 3.5: Relação área-volume dos açudes.....	39
Tabela 3.6: Volumes operacionais dos açudes ( $hm^3$ ) .....	40
Tabela 3.7: Demanda mensal do projeto Araras Norte ( $hm^3/mês$ ).....	40
Tabela 3.8: Despesas das rotações com maquinário, insumo e mão-de-obra .....	41
Tabela 5.1: Lista de culturas representativas .....	67
Tabela 5.2: $ET_r/ET_m$ e $Y/Y_m$ para 35% e 70% de umidade do solo .....	72
Tabela 5.3: Produção, preço e áreas para cada cultivo selecionado.....	76
Tabela 5.4: Valores de $k_c$ , $k_y$ e $ET_m$ para as culturas selecionadas .....	77
Tabela 5.5: Profundidade do sistema radicular e período de desenvolvimento dos cultivos ....	81
Tabela 6.1: Frequência das áreas anuais alocadas na otimização: 1ª fase.....	90
Tabela 6.2: Garantias do sistema para cada regra de operação.....	96
Tabela 6.3: Regra operacional para cada açude simulado .....	98
Tabela 6.4: Percentual da demanda mensal a ser liberado por cada açude ( $fp_r$ ).....	103
Tabela 6.5: Volume mensal a ser liberado pelo conjunto de açudes ( $hm^3$ ).....	103
Tabela 6.6: Volume mensal a ser liberado pelo açude Poço Comprido ( $hm^3$ ).....	103
Tabela 6.7: Retorno e garantias obtidas com o aumento da área irrigada .....	104



## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Mapa de localização do Sistema de Irrigação Baixo Acaraú .....	31
Figura 4.1: Resultados de vários estudos mostrando a variação da ET relativa com a umidade do solo (Minhas et al., 1974).....	48
Figura 4.2: Evapotranspiração relativa x umidade do solo (Rhenals e Bras, 1981).....	48
Figura 4.3: Curva generalizada da ET relativa x umidade do solo .....	49
Figura 4.4: Fluxograma de cálculo da relação $ET_r/ET_m$ x umidade .....	51
Figura 4.5a: Fluxograma do programa SIBAC .....	63
Figura 4.5b: Fluxograma do programa SIBAC .....	64
Figura 4.5c: Fluxograma do programa SIBAC .....	65
Figura 5.1: Curvas de ET relativa x umidade do solo para as culturas selecionadas.....	70
Figura 5.2: Relação entre níveis de água disponível e potencial matricial para diferentes texturas do solo (Minhas et al., 1974).....	71
Figura 5.3: Curva ET relativa x umidade do solo.....	74
Figura 6.1: Histograma da área anual do projeto Baixo Acaraú .....	91
Figura 6.2: Variação da F.O. com a taxa de retorno (Área: 16.780 ha).....	93
Figura 6.3: Variação da F.O. com a área irrigada .....	93
Figura 6.4: Resultado da correlação entre defluência total e armazenamento total .....	95
Figura 6.5: Resultado da correlação entre $S_{t+1}$ e $(S + QA)_t$ .....	95
Figura 6.6: Defluência mensal total .....	100
Figura 6.7: Percentual mensal da vazão liberada por cada açude.....	101
Figura 6.7: Continuação.....	102
Figura 6.8: Variação do déficit hídrico mensal para diferentes áreas .....	105

## LISTA DE VARIÁVEIS E SÍMBOLOS

$\mu$	: parâmetro de barreira do modelo de otimização;
$\gamma$	: densidade aparente do solo;
$\varepsilon_i$	: evapotranspiração relativa para cada intervalo $i$ ;
$\alpha_k$	: coeficiente angular da reta $k$ no intervalo correspondente;
$\Delta U$	: variação da umidade do solo;
$\Delta V_{i,r}$	: volume efetivo precipitado;
$1/(1+d)^t$	: fator de atualização monetária;
$a_i$	: coeficiente de déficit hídrico no intervalo $i$ ;
$A_j$	: área cultivada da cultura $j$ ;
$A_{max,j}$	: área máxima de cada cultivo;
$A_{min,j}$	: área mínima de cada cultivo;
$a_r, b_r$	: coeficientes da regressão linear da curva área-volume;
$B$	: benefício total, dado pela soma das parcelas dos benefícios líquidos anuais;
$B_t$	: benefício total anual;
$C$	: custo da água por unidade de volume;
$CC$	: capacidade de campo em percentual gravimétrico;
$CV_t$	: custo anual variável para um ano $t$ ;
$d$	: taxa de descontos em percentual anual;
$Da, Dm$	: número de meses atual e de máximo crescimento das raízes;
$DEM_{i,r}$	: demanda direta do reservatório $r$ durante o mês $i$ ;
$e$	: matriz unidade;
$EFA$	: eficiência do sistema de irrigação da cultura;
$EFT_j$	: eficiência global de irrigação para a cultura $j$ ;
$E_{i,j}$	: evaporação do solo nu ou evapotranspiração da cultura $j$ no mês $i$ ;
$E_{max}$	: evaporação máxima do solo nu;
$ETm$	: evapotranspiração máxima da cultura;
$ETm_{i,j}$	: evapotranspiração potencial da cultura $j$ no mês $i$ ;
$ETr$	: evapotranspiração real da cultura;

- $ETr_{i,j}$  : evapotranspiração real da cultura  $j$  no mês  $i$ ;  
 $EV_{i,r}$  : total evaporado durante o mês  $i$  no reservatório  $r$ ;  
 $FS_{i,j}$  : fator de água no solo;  
 $h_k$  : parcela  $k$  de umidade do solo na zona das raízes;  
 $H_{i,j}$  : percentual total de umidade no solo;  
 $H_{min}, H_{max}$  : teor de umidade mínima e máxima do solo;  
 $i$  : índice representativo do mês  $i$ ;  
 $IRR_{i,j}$  : lâmina de irrigação aplicada à cultura  $j$  no mês  $i$ ;  
 $j$  : índice representativo da cultura  $j$ ;  
 $kc$  : coeficientes de cultivo;  
 $ky_{i,j}$  : fator de resposta ao déficit hídrico da cultura  $j$  no mês  $i$ ;  
 $m$  : número de intervalos de divisão da umidade do solo;  
 $n$  : número de intervalos de divisão do ciclo da planta, ou estágios de crescimento;  
 $nc$  : número total de culturas;  
 $n_j$  : período total, em meses, de desenvolvimento da cultura  $j$ ;  
 $N$  : número de anos de análise;  
 $P$  : precipitação total;  
 $PE_{i,j}$  : precipitação efetiva na cultura  $j$  no mês  $i$ ;  
 $PER_{i,j}$  : percolação de umidade do solo para a cultura  $j$  no mês  $i$ ;  
 $P_{i,r}$  : total precipitado durante o mês  $i$  no reservatório  $r$ ;  
 $PM$  : ponto de murcha da cultura, em percentual gravimétrico;  
 $Prad_{i,j}$  : profundidade do sistema radicular da cultura  $j$  no mês  $i$ ;  
 $Pr_{max,j}$  : profundidade máxima do sistema radicular da cultura  $j$ ;  
 $QA_{i,r}$  : volume afluente no reservatório  $r$  durante o mês  $i$ ;  
 $QE_{i,r}$  : volume defluente no reservatório  $r$  durante o mês  $i$ ;  
 $QJ_i$  : vazão de contribuição do Rio Jacurutu no mês  $i$ ;  
 $QP_i$  : vazão do perímetro de captação no mês  $i$ ;  
 $QTr_i$  : termo de contribuição de trecho;  
 $QX_i$  : perda total na vazão que chega até o ponto de captação no mês  $i$ ;  
 $r$  : índice representativo do reservatório  $r$ ;  
 $R_j$  : preço de comercialização do cultivo  $j$ ;  
 $Rf_{i,j}$  : fator de crescimento mensal das raízes;

- $S_{i,r}$  : volume do reservatório  $r$  no início do mês  $i$ ;  
 $SMD_i$  : nível de déficit de água no solo, no intervalo  $i$ ;  
 $Sr_{max}$  : volume máximo de acumulação do reservatório  $r$ ;  
 $Sr_{min}$  : volume mínimo de acumulação do reservatório  $r$ ;  
 $T_i$  : transpiração acumulada no período de crescimento  $i$ ;  
 $Tp_i$  : transpiração potencial acumulada no período de crescimento  $i$ ;  
 $U_{i+1,j}$  : umidade na profundidade das raízes da cultura  $j$  no mês  $i+1$ ;  
 $U_{i,j}$  : umidade na profundidade das raízes da cultura  $j$  no mês  $i$ ;  
 $VE_{i,r}$  : volume evaporado do reservatório  $r$  durante o mês  $i$ ;  
 $VP_{i,r}$  : volume precipitado sobre o reservatório  $r$  durante o mês  $i$ ;  
 $X, S, Z, W$  : matrizes diagonais do modelo de otimização;  
 $Y$  : rendimento real;  
 $Y/Ym$  : rendimento relativo;  
 $Y_j$  : rendimento real da cultura  $j$ ;  
 $Ym_j$  : rendimento máximo da cultura  $j$ ;

## Capítulo 1

# **Introdução e Objetivos**

---

# **1. Introdução e Objetivos:**

## **1.1 Introdução:**

O Estado do Ceará, assim como o nordeste brasileiro, é uma região constantemente castigada por secas periódicas que, para o homem nordestino, se traduzem em miséria e perda nas colheitas. Esse fenômeno tem influência direta sobre a baixa capacidade dos recursos hídricos da região, realidade essa, ainda mais agravada no Estado, pela estrutura geológica do solo predominantemente cristalino, a má distribuição espacial e temporal das chuvas, e pelo alto índice de evaporação, superando a faixa dos 3.300 mm anuais nos períodos mais secos.

A agricultura irrigada, que poderia elevar a produção, ainda é pouco difundida. Apesar disso a economia da região ainda depende muito da agricultura local, principalmente a de subsistência que, diante da escassez de recursos e tecnologia, realiza apenas uma colheita ao ano, condição também imposta pelo baixo índice pluviométrico.

Como resultado das medidas governamentais para promover o desenvolvimento econômico da região, muitos projetos e órgãos estaduais e federais foram criados. Dentre os projetos de irrigação previstos para o Estado do Ceará citam-se, além de outros já em operação, os projetos de irrigação do Baixo Acaraú e Araras Norte, situados na bacia do Rio Acaraú que tem cerca de 14.500 Km<sup>2</sup>. Dentre as sete barragens projetadas para operar o sistema, três delas já foram construídas. Uma delas, o Açude Ayres de Souza, irá também abastecer a cidade de Sobral, situada na mesma bacia.

Diante disso, torna-se evidente a necessidade da operação racional dos recursos hídricos do sistema, através de políticas de utilização e manejo dos recursos disponíveis nos reservatórios, de modo a assegurar o fornecimento d'água nos períodos mais críticos, para o abastecimento urbano e para as necessidades hídricas dos perímetros de irrigação.

## 1.2 Objetivos:

Em áreas carentes de recursos e alimentos, como ocorre no Nordeste brasileiro, o desenvolvimento econômico e social da região é um problema que afeta não só a economia regional como a de todo o país. Entretanto, o benefício gerado com o aumento da produtividade agrícola depende não só da quantidade de água disponível mas, também, do período em que esta é utilizada. Dessa forma é fundamental garantir o abastecimento nos períodos críticos do desenvolvimento das culturas, já que a relação “uso da água versus produtividade” é que comandará a variação dos benefícios econômicos do sistema.

A metodologia aqui proposta, é reforçada por abordagens semelhantes e já aplicadas em diversas partes do mundo em condições quase idênticas às da área de estudo. Na tentativa de melhorar o rendimento das culturas previstas nos projetos de irrigação, além de garantir o abastecimento urbano, procura-se a determinação de uma regra operacional ótima do sistema de reservatórios existentes.

A operação do conjunto de reservatórios visa atender às demandas das culturas irrigadas e de abastecimento urbano. O sistema é constituído de cinco reservatórios, um centro urbano, e dois perímetros irrigados considerados, para efeito de estudo, totalmente implantados. Surge então o problema de como operar o sistema de forma a garantir o abastecimento urbano e o atendimento das culturas, sem falhas excessivas no sistema, e com um mínimo de perdas na produção agrícola.

Para solução do problema, aplicou-se uma modelagem que é reforçada por diversos trabalhos científicos publicados nos últimos anos. A operação ótima do sistema de reservatórios terá como objetivo principal, a minimização dos efeitos da seca sobre a produção agrícola dos perímetros irrigados, através da maximização dos benefícios líquidos do sistema.

A metodologia proposta utiliza ferramentas de otimização matemática (programação linear e simulação) buscando o ponto ótimo entre dois extremos conflitantes: atender uma área menor e sem déficit hídrico, por um período maior; ou atender uma área maior, sob déficit hídrico, por um período de tempo mais curto. Adota-se, preliminarmente, uma abordagem determinística, onde a operação ótima do sistema será encontrada através de programação

linear supondo o futuro conhecido. Os resultados obtidos servem de fonte de análise para uma avaliação de diversas regras operacionais a serem testadas via simulação, na situação real, onde o futuro é incerto.

O modelo é aplicado na bacia do Rio Acaraú, no Estado do Ceará, para culturas tradicionais como feijão, milho, algodão, laranja, tomate e pimentão, com grande potencial de desenvolvimento sob irrigação.



## Capítulo 2

# **Revisão Bibliográfica**

---

## **2. Revisão Bibliográfica:**

### **2.1 Generalidades:**

Gerenciar um sistema de recursos hídricos significa atuar no sentido de assegurar uma distribuição temporal e espacial da água que melhor atenda as necessidades dos usuários, decidindo sobre que parte das reservas se deve usar no presente e que parte se deve preservar para uso futuro.

A tomada de decisão na operação de reservatórios envolve muitas considerações de caráter fundamental que podem afetar a qualidade e quantidade de água a ser liberada para atender a demanda. A aleatoriedade das variáveis hidrológicas envolvidas no processo, tais como precipitação, evapotranspiração e vazão afluente, tornam a questão ainda mais complexa.

No caso da operação de reservatórios para irrigação, são necessárias ainda algumas considerações sobre o tipo de cultura, nível de umidade do solo, intervalos de irrigação, estágios de crescimento, além da quantidade de água disponível e seus efeitos sobre o rendimento das culturas. Para o caso da irrigação de múltiplas culturas, a competição entre culturas e a quantidade d'água a ser liberada para cada uma delas é uma questão que também deve ser levada em conta quando da decisão da vazão a ser liberada para jusante.

Uma discussão detalhada sobre a operação de reservatórios para suprimento hídrico e controle de cheias é dada por Lanna (1982). O autor trata com clareza e coerência, o problema dos usos conflitantes, ou não, de tais reservatórios, abordando os conflitos operacionais que surgem da utilização dos mesmos, e mostrando um apanhado das mais importantes abordagens dadas, em diversas partes do mundo, à operação de tais sistemas.

Observa-se ainda que, nas últimas três décadas, houve um enorme avanço nas técnicas e modelos para a busca de soluções que apontem um correto dimensionamento e operação de sistemas de recursos hídricos. Sem o desenvolvimento paralelo de modernos computadores digitais, aliado às facilidades e à redução do custo de utilização dos mesmos, essas técnicas e modelos matemáticos teriam um interesse apenas acadêmico.

Assim, surgiram várias técnicas e instrumentos específicos que auxiliam o planejamento de tais sistemas. A título de exemplo, citam-se as técnicas de simulação, programação linear e não-linear, programação dinâmica, programação com inteiros, programação estocástica e a teoria de filas de espera, dentre outras que se encontram hoje como poderosas aliadas no campo da operação de reservatórios e da análise de sistemas de recursos hídricos.

Devido ao próprio caráter dinâmico inerente ao processo, a programação dinâmica, ao lado de outras técnicas, como a programação linear, tem surgido como uma ferramenta em potencial no desenvolvimento de modelos de operação de reservatórios (Labadie, 1987).

Aliados aos modelos computacionais, os modelos água-rendimento representam, atualmente, um poderoso aliado no campo de planejamento de cultivos e, apesar da complexidade dos fenômenos que regem as transformações no sistema solo-água-planta, podem ser de grande valia no planejamento de recursos hídricos.

No campo de planejamento e operação de projetos de irrigação onde, na maioria das vezes, a operação de reservatórios se configura como o principal meio de garantia do atendimento das demandas, os modelos água-rendimento representam, sob um ponto de vista mais amplo, um ponto de convergência dos objetivos comuns de tais projetos, que de uma forma ou de outra procuram obter uma safra agrícola produtiva rentável e garantida.

Sob este aspecto, os modelos de operação de reservatórios devem dar uma garantia ao sistema, de forma a decidir quando e quanta água deve ser liberada para o atendimento da demanda, e qual parcela deve ser reservada para as futuras demandas, sem que hajam perdas demasiadas no sistema. Vários modelos de operação de sistemas de reservatórios existem hoje em dia, desde os mais simples (como a regra de decisão padrão) aos mais elaborados (baseados na previsão das variáveis futuras), e sua aplicação depende da natureza do problema e dos objetivos em questão.

## 2.2 Os Métodos de Otimização:

O desequilíbrio entre oferta e demanda de recursos hídricos devido, principalmente, à escassez de capital e recursos naturais para implantação de novas obras e similares, tem merecido especial atenção dos engenheiros da área. Na busca de alternativas de soluções que reduzam os efeitos negativos futuros do não atendimento à demanda por água, as técnicas de otimização têm sido utilizadas para orientar a aplicação desses recursos.

No processo de escolha da alternativa ótima, muitas técnicas foram desenvolvidas ao longo dos anos, sendo mais conhecidas: a programação linear (PL), a programação dinâmica (PD) e a simulação matemática.

Entretanto, as técnicas matemáticas e de computação desenvolvidas para a análise de sistemas de recursos hídricos não podem, por si só, resolver estes e outros problemas, especialmente aqueles que exigem decisões públicas de linhas de ação. Deininger (1972) lembra que a solução ótima para modelos de poluição da água ou sistemas de recursos hídricos, muitas vezes não é a solução *ótima-real* para o problema. Provavelmente a razão mais significativa para isso é a falta de habilidade dos administradores em definir seus objetivos, aliada à dificuldade dos modelos em retratar a realidade do sistema.

Problemas que procuram maximizar (ou minimizar) uma função numérica com um certo número de variáveis (ou funções), com as variáveis (ou funções) sujeitas à certas restrições, formam uma classe geral que pode ser chamada de problemas de otimização (Buras, 1972). Problemas que tratam da alocação ótima de água para fins diversos, que procuram maximizar ou minimizar uma variável qualquer, como benefícios ou custos, acham-se inseridos nessa classe.

A meta de qualquer problema de otimização é expressa na chamada *função objetivo*, também chamada de *função critério*. O obtenção desta meta é limitada por um certo número de imposições, limitantes dos recursos disponíveis. A função objetivo é uma função que quantifica os benefícios conseguidos com a operação do sistema, e sua determinação é uma das etapas mais complexas na análise de sistemas (Braga Jr., 1987; Lanna, 1982).

A seguir procura-se descrever algumas das técnicas mais comuns de otimização usadas na análise de sistemas, largamente citadas e comentadas na literatura especializada. Procurou-se aqui apresentar apenas um breve resumo das abordagens mais utilizadas na operação de sistemas de reservatórios para suprimento hídrico sem entrar em detalhes de suas formulações.

### 2.2.1 Programação Linear (PL):

Dentre as técnicas de otimização a programação linear (PL) é, provavelmente, a que mais se desenvolveu e a que apresenta o maior número de aplicações. É utilizada para resolver um tipo especial de problema em que todas as restrições e a função objetivo são lineares ou linearizáveis.

Esse modelo fornece a solução para um sistema linear no qual o número de variáveis é igual ou superior ao número de equações, sendo frequentemente formulado em termos de inequações e resolvido pelo *método simplex* ou variações deste (Strobel, 1979). Seu formato geral, na forma matricial, é:

$$\text{Maximizar } \underline{Z} = \underline{C} \cdot \underline{X}$$

sujeito à:

$$\underline{A} \cdot \underline{X} \leq \underline{B}$$

$$\underline{X} \geq \underline{0}$$

onde  $\underline{A}$  é a matriz de coeficientes das restrições (matriz tecnológica),  $\underline{C}$  a matriz de coeficientes da função objetivo ( $\underline{Z}$ ),  $\underline{0}$  o vetor nulo,  $\underline{B}$  a matriz de parâmetros do modelo, e  $\underline{X}$  as variáveis de decisão.

A PL tem uma gama de aplicações muito vasta no campo dos recursos hídricos e tem sido estendida em diversas direções, tais como: programação paramétrica, programação inteira, programação convexa e programação linear estocástica. Na operação de reservatórios para usos múltiplos, irrigação, expansão da capacidade de sistemas de recursos hídricos, e diversas outras áreas, a sua aplicação tem tido, historicamente, muito sucesso (Buras, 1972).

A programação linear tem sido uma ferramenta poderosa na otimização da operação de reservatórios. Yeh (1985) descreve que suas principais vantagens, dentre outras, são: se adequar facilmente a problemas multi-dimensionais; a garantia de obtenção de ótimos globais; a facilidade de obtenção de pacotes computacionais comerciais prontos.

Sua principal desvantagem é a hipótese de linearidade da função objetivo e suas restrições. Entretanto isso não inviabiliza que sistemas complexos mesmo com função objetivo não-linear, possam ser facilmente resolvidos com esta técnica. Alguns autores lembram que em PD, as simplificações como discretização de variáveis e agregação de reservatórios, também podem, casualmente, levar a perda de informações importantes na operação do sistema (Crawley e Dandy, 1993; Karamouz e Houck, 1987).

Outra desvantagem é que o esforço computacional cresce com o número de restrições, o que pode ser facilmente contornado com o surgimento de modernos e rápidos computadores e novos métodos de solução com rápida convergência.

Na solução de grandes sistemas de equações, onde geralmente se encontram matrizes esparsas, o método de solução empregado na resolução de tais problemas influi muito no tempo de processamento. Além disso, dependendo da disposição dos elementos dentro da matriz tecnológica, os resultados podem exigir mais tempo de processamento até se chegar a uma solução ótima. Nesse sentido, os softwares mais recentes de programação linear têm buscado novos métodos de solução em que a eficiência depende não só do método empregado, mas também do pré-processamento efetuado antes da aplicação deste.

Uma conhecida variante do método simplex, o *método primal-dual*, tem se desenvolvido muito para solução de grandes problemas, principalmente aqueles que envolvem matrizes esparsas. Aliado às técnicas de pré-processamento e técnicas de procura sofisticadas, tem surgido novos softwares de programação linear muito rápidos e eficientes como o HOPDM (Gondzio e Makowski, 1995). Uma descrição detalhada de outras técnicas de solução de problemas de PL são vistos em detalhes em Künzi et al. (1971).

### 2.2.2 Programação Não-Linear:

O caso mais geral de um problema de otimização é aquele em que a função objetivo e as equações de restrição não são lineares. Para resolver esse tipo de problemas o tratamento é mais complexo e baseia-se nas chamadas condições de Kuhn-Tucker, que descrevem as condições necessárias e, sob certas condições, suficientes para uma solução ótima. Infelizmente, apesar das condições acima identificarem se um ponto é ótimo, elas não contribuem para achar uma técnica de busca da solução ótima (Deininger, 1972).

Quando a função objetivo é não-linear, mas pode ser escrita na forma de uma soma de funções  $f_i$  lineares, neste caso a função objetivo é dita *linearizável* ou *separável*. Na forma linearizada, o problema pode ser resolvido pelo método simplex. No entanto, Deininger (1972) lembra que o ótimo global somente é garantido se as funções  $f_i$  forem côncavas, se o objetivo for maximizar, ou convexas, caso contrário.

Outra abordagem usada em casos semelhantes, nos quais a função objetivo tem a forma quadrática, é a *programação quadrática*. Künzi et al. (1971) tratam desta e outras técnicas de otimização de problemas não-lineares. Softwares computacionais para este tipo de problema não são muito comuns como os anteriores. Um conhecido software que pode ser aplicado para resolver problemas lineares e não-lineares é o MINOS (Murtagh e Saunders, 1987).

### 2.2.3 Programação Dinâmica (PD):

A programação dinâmica não chega a ser uma formulação matemática, mas uma técnica desenvolvida para solução de problemas que envolvem decisões sequenciais em múltiplos estágios (Vieira Neto, 1991).

A PD baseia-se no princípio da otimalidade de Bellman, seu criador, segundo o qual “uma política ótima tem a propriedade de que, seja qual for o estado inicial e a decisão inicial, as decisões subsequentes devem constituir uma política ótima com relação ao estado que resulta da primeira decisão”. Sua forma em um problema de alocação de  $X_i$  unidades de recursos entre  $N$  atividades é:

$$\text{Maximizar } F_k(X_k) = \text{Max}_{u_k} \{f_k(u_k) + F_{k+1}(X_{k+1})\}$$

sujeito à:

$$X_k = X_k - u_k$$

$$F_{N+1}(X_{N+1}) = 0$$

$$\text{Solução ótima} = F_1(X_1)$$

onde  $F_k(X_k)$  é o máximo retorno obtido da alocação de recursos entre as atividades  $k$  até  $N$ , restando  $X_k$  unidades de recursos a serem alocadas;  $f_k$  é a *função retorno* para a atividade  $k$ , e  $X_k$  é a variável de estado do sistema, representando os recursos remanescentes após a alocação entre as atividades  $l$  até  $k-1$ .

A PD tem muitas vantagens sobre as outras técnicas, entre elas: a facilidade de solucionar problemas com funções não-lineares; o esforço computacional se reduz muito com a adição de novas restrições; produz normas de decisão retro-alimentadas, o que permite a tomada de decisão em qualquer parte do sistema. A principal desvantagem da PD é a questão da dimensionalidade, que limita a sua aplicação computacional. Há enormes requerimentos de memória para problemas com muitas variáveis de estado (Labadie, 1987).

Muitos trabalhos desenvolvidos recentemente tem usado PD em combinação com técnicas de PL, chegando ao valor ótimo pela divisão do problema em partes, com bons resultados. A combinação de PL e/ou PD em conjunto com modelos de simulação, também tem sido empregada com sucesso em muitos casos, como será visto posteriormente. O modelo de PL e/ou PD é empregado em etapas preliminares do projeto garantindo um conjunto de alternativas ótimas, e o modelo de simulação trabalha com esse conjunto, apontando a melhor alternativa de decisão. Uma descrição sobre essa abordagem pode ser vista em detalhes no trabalho de Roefs (1968).

Duas abordagens, a programação dinâmica estocástica (PDS) e a programação dinâmica determinística (PDD), têm sido aplicadas em muitos trabalhos que visam encontrar uma política ótima de operação de reservatórios, seja para uso na irrigação, abastecimento ou geração de energia. A determinação de uma política de operação, levando em conta a aleatoriedade do processo (PDS), foi primeiramente proposta por Little (1955) (apud Butcher, 1971) para sistemas hidroelétricos.



Gablinger e Loucks (1970) revisaram alguns modelos de otimização estocástica que utilizam cadeias de Markov para operação de reservatórios. Os autores compararam suas similaridades e diferenças, bem como as soluções e sua eficiência computacional. Loucks e Falkson (1970) compararam diversos métodos estocásticos de otimização para operação de reservatórios, avaliando as vantagens, a eficiência e as limitações destes modelos. Segundo os autores, não se pode dizer que este ou aquele método é melhor; para cada aplicação específica existem métodos mais eficientes que outros.

Segundo Butcher (1971), o uso de PDD, com vazões futuras conhecidas, é muito útil se o projeto é baseado no conceito de período crítico, pois o mesmo é planejado para ter uma performance ideal em anos críticos (secos). Mas, apesar dessa técnica ser muito satisfatória e simples, ela não põe em questão o erro de amostragem que pode ocorrer nos valores da sequência de vazões usada. O autor cita ainda que esse problema pode ser resolvido através da geração de séries sintéticas de vazões para as quais são encontradas as regras de operação deterministicamente, sendo estas analisadas por análise de regressão para encontrar a regra ótima.

#### ***2.2.4 Técnicas de Simulação:***

A popularidade dos modelos de simulação reside nas suas flexibilidades e simplicidades características. A simulação não chega a ser uma técnica de otimização, mas tem sua importância dentro dos modelos de otimização por ser geralmente usada em conjunto com tais técnicas.

Yeh (1985) diferencia estes modelos, afirmando que os modelos de otimização encontram, se possível, a solução ótima para um sistema, enquanto os de simulação simplesmente avaliam um certo número finito de alternativas. Segundo Wurbs (1993), um modelo de simulação é uma representação do sistema físico, usado para avaliar as suas respostas sob um dado conjunto de restrições ou condições, como políticas de operação alternativas.

Os modelos de simulação vêm, deste muito tempo, sendo aplicados em sistemas de irrigação, abastecimento urbano e nos mais diversas campos da ciência (Darley et al., 1972). Howell (1983) revisou diversos modelos de simulação (Howell, 1969; Anderson e Maass, 1971; Dudley et al., 1971; Ahmed et al., 1976; Hearn e Constable, 1981; Samad e Howell, 1982) para operação de sistemas de reservatórios com fins de irrigação. Segundo o autor, o caminho para se chegar a uma otimalidade em irrigação passa pela simulação.

Wurbs (1993) revisou vários modelos existentes para otimização e simulação de sistemas de reservatórios, dividindo estes em modelos de sistemas específicos, aqueles desenvolvidos para uma localidade específica (como o CRSS e PRISM) e modelos de uso geral, aplicáveis a qualquer localidade, com parâmetros calibráveis em função das condições locais (como o HEC-3, HEC-5).

Como dito anteriormente, a simulação é geralmente aplicada em conjunto com modelos de otimização. Na otimização são esboçadas regras operacionais que são testadas e aprimoradas por simulação.

### **2.3 Os Modelos de Rendimento:**

Sabe-se que o excesso ou a deficiência de água, em certos períodos de crescimento de uma cultura, podem ter efeitos negativos sobre o tamanho e o rendimento dos grãos. Para se estimar os benefícios sobre o aumento de produtividade de uma cultura é necessário conhecer o efeito quantitativo da água, proveniente da chuva ou irrigação, sobre o rendimento dos grãos da cultura ao longo de seu ciclo vital.

Os modelos conhecidos como *modelos água-rendimento* auxiliam nesse processo, permitindo quantificar a resposta da cultura à aplicação de uma lâmina de água, de modo a fornecer uma avaliação da produção de uma área ou região, em termos de grãos ou matéria seca.

Entretanto, para o sequenciamento ótimo dos déficits de água aplicados a uma cultura, o período em que a irrigação é aplicada é muito importante. Rao et al. (1988) definem como *modelos água-rendimento datados* aqueles modelos água-rendimento que incluem os efeitos

do tempo e quantidades de irrigação aplicados. Somente os *modelos água-rendimento datados* serão considerados para efeito deste estudo por considerarem o efeito do estresse hídrico sobre as culturas. Estes modelos serão citados aqui, para simplificação de notação, simplesmente como *modelos água-rendimento*.

A importância de tais modelos é devida a sua aplicação, tanto em áreas de agricultura irrigada, quanto naquelas sem irrigação, para a quantificação da resposta das culturas. Em regiões de agricultura irrigada, tais modelos são muito utilizados na otimização do uso racional da água, seja para obter uma máxima produção ou maior eficiência de uso, ou ainda, para maximizar os benefícios líquidos. Em regiões onde não é aplicada a irrigação, o rendimento das culturas depende, principalmente, do regime pluviométrico durante sua fase de crescimento. A previsão de produção com base na distribuição das chuvas é, então, efetuada através dos modelos água-rendimento (Parfitt, 1991).

Nestes modelos, os efeitos do estresse, são relacionados com índices específicos, como evapotranspiração relativa e déficit de umidade do solo, os quais interagem de diferentes formas nos diferentes períodos de crescimento dos cultivos. Por isso muitas simplificações tem sido introduzidas para representar tais processos.

Muitas pesquisas foram desenvolvidas, em diversas partes do mundo, com o objetivo de fornecer um modo eficiente de responder a essa questão. Cada vez mais tem-se chegado à conclusão de que a taxa de evapotranspiração é um bom fator para medir o rendimento de uma cultura (Doorenbos e Pruitt, 1975). A característica principal dos muitos modelos aqui revistos é que, em alguns casos, essa função pode ser multiplicativa ou aditiva.

Doorenbos e Kassam (1979) propuseram, a partir de pesquisas realizadas, relacionar a redução de rendimento de um estágio qualquer do período de desenvolvimento da cultura com a taxa de evapotranspiração relativa ( $ET_r/ET_m$ ), pela seguinte equação:

$$1 - \frac{Y}{Y_m} = k_y \left( 1 - \frac{ET_r}{ET_m} \right) \quad (2.1)$$

onde:

$Y$  = rendimento real;

$Y_m$  = rendimento máximo obtido em condições ótimas;

$ET_r$  = evapotranspiração real da cultura;

$ET_m$  = evapotranspiração máxima da cultura;

$k_y$  = fator empírico de efeito do déficit sobre o rendimento.

Os valores de  $k_y$  foram deduzidos para diversos períodos de crescimento de uma série de culturas, supondo uma relação linear entre o rendimento relativo ( $Y/Y_m$ ) e a evapotranspiração relativa ( $ET_r/ET_m$ ). Estes valores são válidos para uma deficiência hídrica de até 50%, ou seja, o modelo só é aplicável para  $ET_r/ET_m \geq 0,5$ .

A falta ou excesso de umidade disponível para o desenvolvimento de um cultivo depende não apenas das características da cultura e do solo, mas também das características meteorológicas do local. Uma questão discutida por muitos pesquisadores é a suposição de linearidade entre o rendimento dos grãos e a evapotranspiração real. Stewart e Hagan (1973) apresentaram uma função água-rendimento linear para a cultura do milho. Estes mesmos autores mostraram uma relação curvilínea de forma convexa para o trigo (Stewart e Hagan, 1969).

Jensen e Sletten (1968) (apud Stewart e Hagan, 1973) encontraram uma relação linear entre o rendimento relativo e a evapotranspiração relativa para o sorgo. English e Nuss (1982) (apud Dorfman, 1985) derivaram para o trigo e cevada uma função quadrática.

Como se nota, a influência da água no processo de desenvolvimento das culturas é muito complexo. A aleatoriedade que envolve tais processos tem exigido dos pesquisadores a elaboração de modelos cada vez mais bem representativos dessa complexa realidade. Procurou-se citar abaixo, em seqüência cronológica, um resumo dos principais modelos amplamente conhecidos e citados na literatura científica.

Hall e Butcher (1968) desenvolveram um modelo de rendimento com a seguinte equação:

$$\frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \alpha_i (SMD_i) \quad (2.2)$$

onde:

$Y/Y_m$  = rendimento relativo;

$\alpha_i$  = coeficiente de déficit hídrico no intervalo  $i$ ;

$SMD_i$  = nível de déficit de água no solo, no intervalo  $i$ ;

$n$  = número de intervalos de divisão do ciclo da planta, ou estágios de crescimento.

No trabalho de Jensen (1968), citado por Rao et al. (1988), o autor elaborou um modelo multiplicativo cujo rendimento relativo é dado por:

$$\frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n (ETr / ETm)^{b_i} \quad (2.3)$$

onde  $b_i$  é a constante de sensibilidade no intervalo  $i$ , e os demais parâmetros definidos na equação 2.2.

Cita-se ainda o modelo proposto por Minhas et al. (1974) para estimar o rendimento do trigo. A formulação apresentada foi a seguinte:

$$\frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n (1 - (1 - ETr / ETm)_i^2)^{b_i} \quad (2.4)$$

com seus termos definidos anteriormente.

Outros autores apresentaram modelos que tentam relacionar o rendimento relativo com a taxa de transpiração relativa ( $T/T_p$ ), como o proposto por Hanks (1974), citado em Rao et al. (1988), cuja equação é dada abaixo:

$$\frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n (T / T_p)_i^{a_i} \quad (2.5)$$

onde:

$T$  = Transpiração acumulada no período de crescimento  $i$ ;

$Tp$  = Transpiração potencial acumulada no período de crescimento  $i$ ;

$a_i$  = coeficiente para o  $i$ -ésimo intervalo do ciclo da planta.

Blank (1975), também citado por Rao et al. (1988), apresentou um modelo aditivo, semelhante ao modelo de Jensen (1968), dado por:

$$\frac{Y}{Y_m} = \sum_{i=1}^n a_i (ETr / ETm)_i \quad (2.6)$$

onde  $a_i$  é um coeficiente estimado para cada intervalo  $i$  e cada cultura.

Stewart et al. (1976) (apud Rao et al. 1988) desenvolveu um modelo que supõe que os efeitos da evapotranspiração relativa são aditivos, dado abaixo:

$$\frac{Y}{Y_m} = 1 - \sum_{i=1}^n k_i (1 - ETr / ETm)_i \quad (2.7)$$

onde  $k_i$  é um índice de sensibilidade à deficiência hídrica dependente da espécie cultivada e da fase de crescimento da mesma.

Howell (1983) revisou diversos modelos sobre a influência do estresse hídrico sobre a produtividade das culturas.

Partindo da análise dos modelos de Jensen (1968) e Stewart et al. (1976), anteriormente citados, Rao et al. (1988) propuseram um modelo multiplicativo, semelhante modelo aditivo de Doorenbos e Kassam (1979), dado pela seguinte equação:

$$\frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n (1 - k_i (1 - ETr / ETm)_i) \quad (2.8)$$

Outros relacionam o rendimento com a chuva acumulada nos diferentes estados de crescimento da cultura. Dorfman (1985) revisou muitos modelos de rendimento e, para fazer face à falta de dados, usou um modelo que correlaciona o total precipitado com o rendimento. Aginsky et al. (1988) também aplicou essa modelagem analisando, em dois modelos, o efeito multiplicativo e aditivo da precipitação sobre as diferentes fase de desenvolvimento da cultura do milho encontrando bons resultados (Parfitt, 1991).

Parfitt (1991) modificou os modelos de Blank (1989), Jensen (1968), Stewart et al. (1976), Minhas et al. (1974) e Aginsky et al. (1988) adicionando um termo para levar em consideração o estresse provocado também pelo excesso hídrico, encontrando bons resultados com a cultura da soja.

Outras modelagens tentam contornar a falta de dados e a dificuldade de se obter em campo variáveis como evapotranspiração real, transpiração ou déficit de umidade no solo. Neste sentido, Rajput (1993) propôs um modelo multiplicativo de rendimento de cultivos semelhante ao modelo de Rao et al. (1988), baseado no conceito de tanque de evaporação. O autor tentou correlacionar o rendimento relativo com a variação relativa de um parâmetro *Ra* definido como “a razão entre uma quantidade fixa de irrigação e a evaporação acumulativa de um tanque de evaporação”. O autor obteve, para o trigo, resultados tão bons quanto os modelos baseados na evapotranspiração relativa.

Enfim, ressalta-se aqui a existência de inúmeros métodos de estimativa de rendimento de culturas com base nos mais diversos parâmetros, de forma que não existe atualmente um modelo universalmente aplicável a todas as culturas. Procurou-se apresentar aqui uma breve amostra das metodologias e das principais abordagens utilizadas, visto que uma pesquisa aprofundada sobre o tema não é o objetivo principal desta pesquisa. O que pretende-se mostrar é que a principal diferença entre estas abordagens está na forma de considerar os efeitos, aditivo ou multiplicativo, do déficit ou excesso de água nas diferentes fases de desenvolvimento.

### **2.3.1 A Estimativa da Evapotranspiração:**

Vê-se na literatura científica que muitos modelos de operação de reservatórios ligados à irrigação fazem uso das funções de rendimento, sejam multiplicativas ou aditivas. A preferência por uma ou outra função depende, entre outras coisas, da experiência do planejador, da disponibilidade de dados, da variedade de cultivo e das características climáticas do local.

A insuficiência de dados é uma questão relevante em muitos países, principalmente no Brasil, o que tem levado pesquisadores a procurar outras formas de estimativa das variáveis hidrológicas quando na ausência ou dificuldade de obtenção destas. Com a aplicação de modelos de rendimento de cultivos, a principal dificuldade é a disponibilidade de dados de rendimento e evapotranspiração real dos cultivos, em número suficiente para a calibragem e aplicação destes modelos.

Minhas et al. (1974) utilizaram curvas de “umidade do solo versus evapotranspiração relativa” como uma forma para estimar a ETr. Tais curvas tiveram seus parâmetros estimados com base em dados de campo.

Doorenbos e Kassam (1979) fornecem um método de estimativa da produção real e potencial de cultivos que pode ser aplicado na falta destas variáveis. Os autores também propuseram um modelo de estimativa da ETr diária e mensal com base na umidade do solo e na evapotranspiração potencial. Esta modelagem foi aplicada por Vedula e Mujumdar (1992) na operação de reservatórios para irrigação.

Rhenals e Bras (1981) utilizaram uma função de variação linear com a umidade do solo para estimar a ETr. O modelo difere dos modelos de Thornthwaite e Matther (1955) e Yarn et al. (1973) (apud Rhenals e Bras, 1981) por incluir a ETm explicitamente. Outros autores como Denmead e Shaw (1962) e Negashi (1974), citados por Rhenals e Bras (1981), têm modelado a transpiração, ao invés da evapotranspiração, com relação a umidade do solo, obtendo relações não-lineares nestes casos.



Singh e Wolkewitz (1988) aplicaram uma função não linear para estimar ETr do trigo em diferentes fases de seu desenvolvimento. A função proposta foi:

$$\frac{ETr}{ETm} = a_i \cdot \left(1 - \frac{H}{Hm}\right)^{b_i} \quad (2.9)$$

onde  $a_i$  e  $b_i$  são constantes empíricas,  $H$  e  $Hm$  são as umidades atual e potencial disponível no solo.

Dariane e Hughes (1991) correlacionaram a evapotranspiração relativa e a transpiração relativa dos modelos de Jensen(1968) e Hanks(1974) (apud Rao et al., 1988), com a razão entre a demanda atendida e a demanda potencial, para derivar regras de operação de um reservatório em Utah. A demanda suprida é dada pelas defluências do reservatório e pela chuva, e a demanda potencial pela evapotranspiração potencial.

Shanholtz e Younos (1994) usaram no modelo de balanço hídrico do solo, curvas de umidade disponível versus evapotranspiração relativa, para cada nível de evapotranspiração potencial. Norero et al. (1972) (apud Schmidt e Plate, 1983) propôs abordagem semelhante a esta.

Schmidt e Plate (1983) usaram os modelos de Minhas e Norero obtendo bons resultados em ambos os casos.

Enfim vê-se que há uma tendência em se utilizar a umidade do solo como um parâmetro para estimativa da ETr. Tal fato se deve, principalmente, em virtude da facilidade de obtenção desta variável. Esta linha também será seguida na formulação matemática proposta neste trabalho.

#### **2.4 A Regra Ótima de Operação:**

A literatura disponível na área de planejamento e operação de reservatórios é muito vasta. Diversos trabalhos têm sido apresentados em muitas partes do mundo propondo

metodologias de operação de reservatórios para planejamento de irrigação e abastecimento urbano sob as mais diversas restrições. Muitos destes trabalhos procuram retratar o efeito do déficit, bem como o efeito do estresse hídrico, sobre muitas das culturas existentes, procurando uma seqüência ótima de operações que diminuam os riscos de uma baixa produtividade. A seguir procura-se fazer uma referência a alguns trabalhos que merecem ser citados devido a importância que muitos pesquisadores têm dado ao tema.

A procura e desenvolvimento de novos modelos para gerenciamento de sistemas na área de irrigação não é recente. Desde a década de sessenta, quando surgiram os primeiros trabalhos, o desenvolvimento nesta área de pesquisa tem sido enorme. Deve-se muito ao trabalho de Hall e Butcher (1968), onde foi apresentado um modelo de programação dinâmica determinística com duas variáveis de estado para a alocação ótima de água para uma estação irrigada. A principal característica deste modelo foi o uso de uma função de produção multiplicativa ao invés da forma aditiva usual.

Posteriormente De Lucia (1969), apud Dudley et al. (1971), também abordou o problema da irrigação usando um modelo de PDS no qual incorporou a relação entre crescimento por estágio e nível de umidade no solo.

Dudley et al. (1971) também usou um modelo de simulação-PD para abordar o problema da alocação de água. Na ausência de dados experimentais, um modelo de simulação de umidade do solo e crescimento vegetal foi usado dentro de um modelo de PDS com duas variáveis de estado (umidade e nível do reservatório), para derivar a quantidade intrasazonal a ser alocada para irrigação. Uma limitação do modelo de simulação, segundo o autor, é que a suposição de que o crescimento da cultura em estágios anteriores não afetam os estados posteriores é, provavelmente, irrealista. Hoje sabe-se que ambas as formas (aditiva e multiplicativa), podem produzir resultados satisfatórios. A irrigação foi aplicada para elevar a umidade do solo até a capacidade de campo. Entretanto o autor lembra que algumas vezes podem existir razões econômicas para se aplicar uma quantidade menor de água, ao contrário do que se adotou.

Em um segundo trabalho, Dudley (1972) expandiu seu estudo anterior e tratou do problema da alocação intersazonal. Os resultados nitidamente superiores da aplicação do

modelo permitiram concluir que pode haver um ganho razoável de produção com o uso de uma otimização intersazonal.

Um modelo integrado intersazonal e intrasazonal usando PDS, foi apresentado por Dudley e Burt (1973) para determinar a regra de operação ótima para decidir a taxa de aplicação de água e o tamanho da área cultivável para uma simples cultura. A área disponível para irrigação, o nível de umidade do solo, água disponível e a função de produção da cultura foram tratadas como variáveis de estado.

Sigvaldason (1976) revisou diversos modelos de otimização e cita que eles são muito úteis mas que, para grandes sistemas, a simulação ainda é indispensável. O autor aplicou um modelo de simulação acoplado com PL a um conjunto de 48 reservatórios no Canadá. O modelo opera de forma semelhante ao HEC-5, onde o conceito de zoneamento e curvas guia, são aplicados. O autor conclui que a inclusão de um sub-modelo de otimização na simulação pode produzir melhores resultados que a abordagem tradicional. A maior vantagem do modelo é a sua flexibilidade para representação de qualquer configuração do sistema. Uma abordagem semelhante, e mais simplificada, foi aplicada no projeto de irrigação Curu-Paraipaba, no Estado do Ceará, por Gondim Filho (1988).

Dudley et al. (1976) apresentaram uma variedade de modelos para orientar a tomada de decisões dando um tratamento determinístico à demanda hídrica das culturas. Esses modelos foram desenvolvidos usando uma combinação de PL, para escolher a melhor combinação de culturas; simulação, no balanço hídrico do reservatório; e PD para otimizar a alocação intersazonal d'água para cada cultivo.

Bhaskar e Whitlatch (1980) compararam diversas regras de operação de reservatórios, correlacionando as defluências com o armazenamento e a afluência em períodos anteriores, e concluíram que as regras de operação simples (lineares) podem ser tão boas quanto as regras de operação complexas (não-lineares).

Rhenals e Bras (1981) estudaram o efeito da variabilidade da evapotranspiração sobre as necessidades hídricas das culturas. Os autores usaram PDS para maximizar o benefício líquido total esperado, usando umidade, ETm e água disponível, como variáveis de estado. A

evapotranspiração real foi estimada com base na umidade do solo e a função de rendimento adotada foi a de Blank (1975). Os autores concluíram que a pouca influência da evapotranspiração nos resultados finais não justifica o esforço para sua aplicação. Posteriormente, Loftis e Houghtalen (1987) usaram uma abordagem semelhante onde incluíram o método de Monte Carlo na simulação e concluíram pela superioridade do modelo de PDS sobre a PDD. Os autores justificam a diferença com o trabalho de Rhenals e Bras (1981), dizendo que, aparentemente, o uso de um modelo mais realístico para o problema tende a obscurecer o valor de se tratar as demandas como uma variável estocástica.

Bras e Cordova (1981) usaram a maximização dos benefícios líquidos como critério para alocação ótima de água para irrigação através de PDS. Os autores usaram a função de Blank (1975) para avaliar os efeitos do estresse hídrico. A ETr foi obtida a partir da umidade do solo. Os autores concluíram pela viabilidade de se obter uma regra ótima de aplicação de água com o modelo proposto.

Karamouz e Houck (1982) aplicaram simulação e PDD para encontrar regras mensais e anuais de operação de um reservatório. Uma função de perdas quadrática foi usada na função objetivo. A regra de operação foi derivada iterativamente por regressão linear múltipla entre armazenamento e aflúências para diversos tamanhos de reservatórios. Segundo os autores, não há garantia de convergência desta abordagem, mas os resultados obtidos foram satisfatórios. Posteriormente os autores estenderam esta abordagem com o uso de PDS e concluíram pela superioridade desta apenas para pequenas capacidades, sendo que para médios e grandes reservatórios, a PDD foi superior (Karamouz e Houck, 1987). Karamouz et al. (1992) mostraram que o modelo com PDD aplicado para múltiplos reservatórios pode fornecer resultados melhores que as regras de decisão padrão (RDP). Nesse tipo de regra a estratégia operacional é atender totalmente a demanda enquanto houver água disponível no sistema.

Schmidt e Plate (1983) utilizaram um modelo de simulação-PDS para maximizar a produção e encontrar o tamanho ótimo de uma área irrigada. A ETr foi obtida a partir do modelo de Minhas et al. (1974). As defluências mensais foram obtidas por regressão linear múltipla entre vazões afluentes e o armazenamento a partir dos resultados da otimização. Uma modificação foi introduzida para permitir a redução da área irrigada durante o período de irrigação. O modelo, que usa previsão das aflúências futuras, foi comparado com outro

baseado apenas no armazenamento no início do período, tendo o primeiro apresentado melhores resultados. Os autores concluíram também que pode ser mais produtivo irrigar uma área maior com déficit de água do que uma área menor sem déficit, independente de se considerar uma área fixa, ou variável, ao longo dos anos.

Rees e Hamlim (1983) reafirmaram as vantagens de se aplicar, junto com PDD, um modelo de previsão de chuva e evaporação ao planejamento de cultivos. O método, quando comparado à abordagem determinística, permitiu obter pequenas perdas de produção.

Em trabalhos posteriores Dudley (1988a, 1988b) e Dudley e Musgrave (1988) refinaram seus modelos anteriores aplicando PDS em conjunto com um modelo de simulação solo-água-plantas mais sofisticado a um simples reservatório para irrigação de algodão. Os autores buscavam avaliar a variação da média e variância do retorno obtido sob diferentes pontos de vista (operação do reservatório e operação do sistema de irrigação), isoladamente e conjuntamente, em função da área irrigada. O modelo decide em qualquer estágio se uma determinada área irrigada deixará de ser irrigada para reservar mais água para os períodos posteriores. Isto ocorre toda vez que não se dispor de água para manter o déficit de umidade do solo no período posterior abaixo de 50%.

Martin et al. (1989) usaram programação dinâmica para determinar a regra de distribuição anual de um volume limitado de água, sobre um período multisazonal. Usaram um modelo de otimização-simulação e uma função de rendimento linear com a evapotranspiração relativa foi usada para determinar a distribuição que maximiza o benefício líquido anual ou o mínimo retorno líquido anual.

Rao et al. (1990) aplicaram, na Índia, um modelo de PD-PD, em duas fases (intra e intersazonal) que procurava resolver o problema da competição entre culturas sob déficit hídrico. Sob deficiência hídrica as culturas mais produtivas foram priorizadas. Os autores usaram a função de rendimento dada por Rao et al. (1988) e três modelos adicionais: um para planejamento de irrigação de uma cultura isolada; outro para fazer alocação sazonal; e outro responsável pela alocação intrasazonal. Concluem que a decomposição do problema em partes contribui para resolver o problema da dimensionalidade existente quando se lida com muitas culturas, além de diminuir o esforço computacional.

Na formulação apresentada por Dariane e Hughes (1991), os autores compararam a eficiência de um modelo que usava PD sobre os modelos baseados na regra de decisão padrão (RDP). Utilizaram uma função de rendimento apresentada por Jensen (1968) e Hanks (1974) (apud Dariane e Hughes, 1991) para maximizar os benefícios líquidos das culturas de alfafa, trigo e milho num reservatório sobre o rio Sevier em Utah. Concluíram pela superioridade das regras de operação otimizadas sobre qualquer modelo que use a regra formal.

Recentemente, Vedula e Mujumdar (1992) apresentaram um modelo aplicado ao reservatório de Malaprabla, na Índia, para irrigação de múltiplas culturas. Neste modelo consideraram as vazões afluentes como estocásticas e a chuva e evapotranspiração como determinísticas. Usaram a função de rendimento de Doorenbos e Kassam (1979) para minimizar os efeitos do déficit hídrico sobre o rendimento das culturas. Os autores consideraram no modelo duas fases: usaram PDD para encontrar o volume a ser alocado para todas as culturas e PDS para otimizar a parcela a ser alocada para cada cultura individualmente. Os autores encontraram bons resultados, apesar de reconhecerem a limitação da formulação causada pelo uso de PD, e que o mesmo não refletia bem a interdependência da produção das culturas sobre a alocação nos períodos seguintes.

Valdés et al. (1992) trataram da operação de um conjunto de quatro reservatórios para geração de energia elétrica na Venezuela. Usaram PD e técnicas de programação linear para encontrar as defluências diárias e mensais que minimizavam os custos de produção de energia. O problema da dimensionalidade foi contornado através da agregação/desagregação de vazões. Aqui as restrições de demanda mínima foram decrementadas quando se obteve uma inviabilidade devido às baixas afluências ao sistema.

Na China, Saixing et al. (1993) aplicaram programação linear determinística e PDD para encontrar o padrão ótimo de cultivo sujeito a restrições de disponibilidade hídrica, e intrusão salina. Os autores reafirmam as vantagens de se utilizar otimização para resolver problemas de planejamento em recursos hídricos.

Outras técnicas derivadas da PL têm sido aplicadas a problemas de recursos hídricos com sucesso (Crawley e Dandy, 1993; Tao e Lennox, 1991). Zessler e Shamir (1989) sugeriram o método da *otimalidade progressiva*, um método de programação dinâmica

iterativa, como alternativa para contornar o problema da dimensionalidade em um sistema composto por dez reservatórios de um sistema de distribuição de água na Austrália.

Problemas que envolvem reservatórios múltiplos, eventualmente, servem para propósitos diversos e muitas vezes conflitantes. Aqui somente uma função objetivo pode ser insuficiente para retratar os reais objetivos do sistema. Para resolver este tipo de problemas, técnicas de solução de problemas multi-objetivos tem sido aplicadas com sucesso (Ko et al., 1992; Loganathan e Bhattacharya, 1990; Mohan e Keskar, 1991; Yeh e Becker, 1982).

## **2.5 Comentários:**

Vê-se que nos trabalhos aqui revisados, os modelos desenvolvidos foram aplicados, na maioria das vezes, a pequenos sistemas formados por um único reservatório e apenas para uma ou duas culturas. No caso da operação de sistemas complexos formados por várias culturas e múltiplos reservatórios existe ainda uma lacuna literária à qual se espera, com o presente trabalho, dar uma contribuição para seu preenchimento.

A existência de um sistema complexo (múltiplos reservatórios e culturas) descarta, no presente estudo, a aplicação de modelos baseados em programação dinâmica (PD), pela já citada questão da dimensionalidade, e mais uma vez ressalta a importância dos modelos mais simples baseados na programação linear (PL). Estes modelos, apesar de suas simplificações, podem fornecer resultados satisfatórios para muitos problemas em recursos hídricos.

Vê-se ainda que os modelos água-rendimento baseados na evapotranspiração, foram os mais utilizados. Muitos modelos estimam esta variável através de correlação com o teor de umidade do solo, isto se deve principalmente pela facilidade de obtenção desta variável. Ressalta-se aqui que isto não significa que o desenvolvimento de novos modelos de cálculo de rendimento de cultivos, que utilizem outras variáveis, como a evapotranspiração, seja desmerecido.

Em grande parte dos modelos revisados vê-se que a utilização de metodologias determinísticas tem sido preferida por muitos pesquisadores apesar de haver alguns estudos, anteriormente citados, que citem a abordagem estocástica como mais precisa que esta. O

presente modelo fará uso de uma abordagem determinística, por acreditar que para os propósitos do estudo em foco, esta abordagem tenha uma precisão aceitável.



## Capítulo 3

# Área de Estudio

---

### **3. Área de Estudo:**

#### **3.1 Descrição Geral:**

A área de estudo situa-se na bacia do Rio Acaraú, localizada na região noroeste do Estado do Ceará (longitude 40°W) e abrange, com sua bacia hidrográfica, uma área de aproximadamente 14.500 km<sup>2</sup>. Nela situa-se a cidade de Sobral, um dos três maiores centros urbanos do Estado, e os projetos de irrigação Baixo Acaraú e Araras Norte.

O Rio Acaraú nasce na Serra das Matas (latitude 5°S), na região centro-oeste do Estado, e percorre o sentido sul-norte por cerca de 315 km, até o Oceano Atlântico (latitude 3°S). Seus afluentes principais, pela margem direita, são os Rios dos Macacos, Groaíras, e o Jacurutu; pela margem esquerda o Rio Jaibara é o de maior destaque (ver mapa de localização na figura 3.1). Nele situa-se o açude Ayres de Souza que abastece a cidade de Sobral com cerca de 124.000 habitantes (estimativa para 1989).

A bacia, que representa cerca de 10% da área total do Estado, é caracterizada por um clima predominantemente quente e estável, com elevada temperatura (média de 26°C), acentuada taxa de insolação, um forte poder evaporante, além de apresentar um regime pluviométrico mensal e anual muito irregular.

O período chuvoso, ocorrendo entre os meses de janeiro e maio, é denominado regionalmente de “inverno”. Nele se concentra um percentual superior de 70% do total anual, enquanto no resto do ano praticamente não chove. A nível interanual são verificadas secas periódicas, com frequência média estimada de 15% sobre longos períodos (CEARÁ, 1992). Para o agricultor, a ocorrência de baixas pluviosidades, ou da má distribuição da chuva, gera como consequência um decréscimo da produção agrícola, ou mesmo a falência, razão pela qual vê-se na irrigação um grande passo para o desenvolvimento econômico e social da região.

A umidade relativa do ar situa-se na faixa de 80% a 90% no período chuvoso, e diminui bastante nos períodos de estiagem, podendo chegar à faixa de 50% a 60%. Uma das principais características do clima é a favorável taxa de insolação variando de 6,0 horas/dia (inverno) a 9,0 horas/dia (verão). Os ventos só tem representatividade no segundo semestre, onde a velocidade média é da ordem de 3,0 m/s a 4,0 m/s (CEARÁ, 1992).

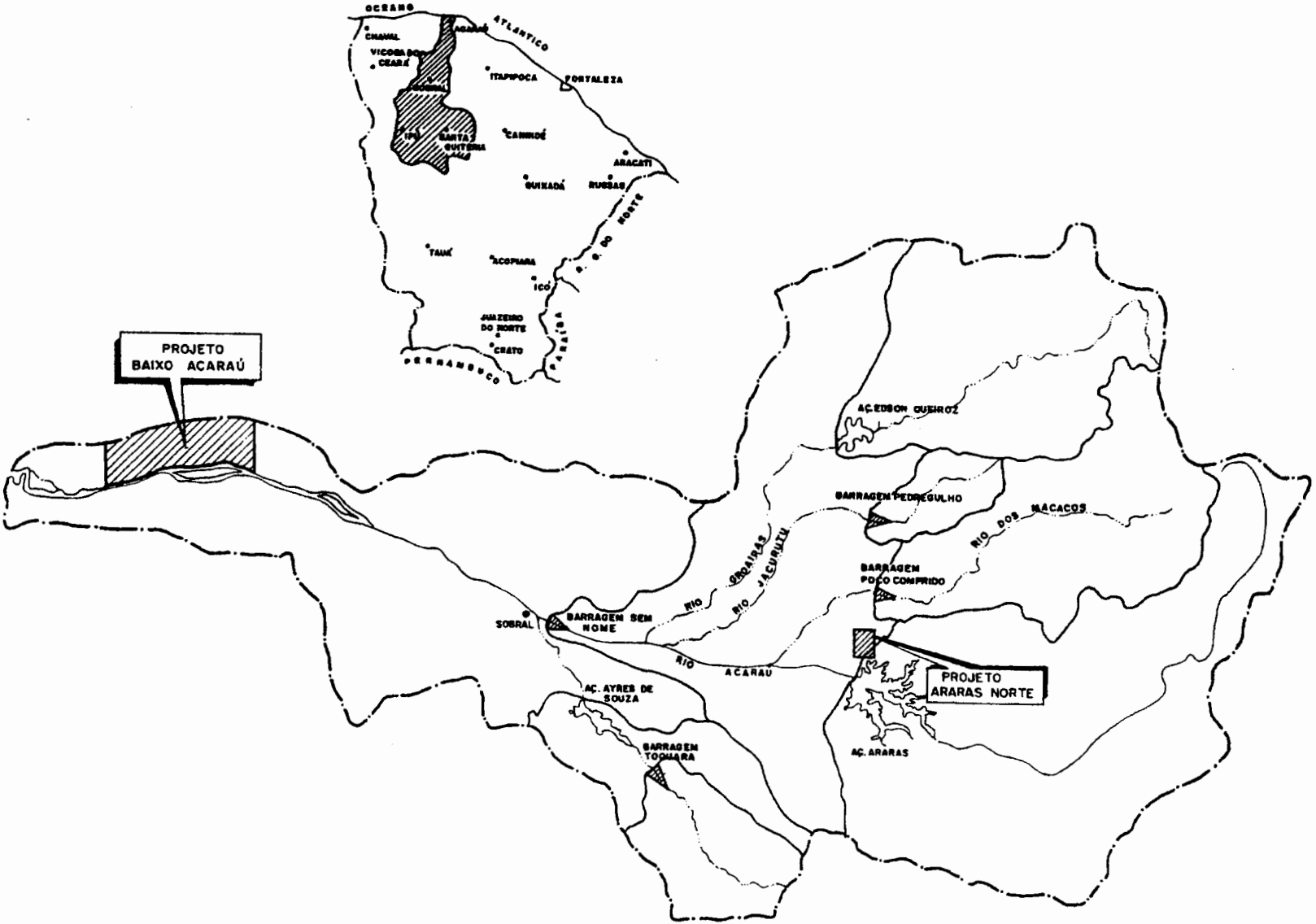


Figura 3.1: Mapa de localização do Sistema de Irrigação Baixo Acaraú (Fonte: Vieira Neto, 1991)

Todo esse conjunto de fatores favorece muito o fenômeno da evaporação que, em valores médios anuais, situa-se no litoral, em torno de 2.300 mm, e no interior é de 2.800 mm (tanque classe A); o trimestre setembro/novembro concentra quase 1/3 do total anual. A média diária situa-se entre 3,5 mm/dia a 4,5 mm/dia, podendo alcançar a taxa de 12,0 mm/dia nos períodos mais quentes.

Por ocasião do Plano Estadual de Recursos Hídricos (CEARÁ, 1992), conta-se com uma boa série de vazões mensais afluentes aos reservatórios, obtidas através de modelo chuva-vazão - MODHAC, para um período de 77 anos (1912 a 1988) para a maioria dos açudes do Estado. Por ocasião do mesmo estudo, conta-se também com uma série razoável de precipitações mensais, consistidas através do método do vetor-regional, para um grande número de postos pluviométricos distribuídos pelo Estado.

Uma visão global da área, mostrando a relação dos açudes existentes e previstos para implantação, bem como a localização dos dois projetos de irrigação, pode ser vista no mapa da figura 3.1. Nele observa-se a localização dos sete açudes existentes para suprimento dos projetos previstos, três deles já construídos (Açude Araras, Ayres de Souza e Edson Queiroz), e quatro previstos para implantação (Açude Poço Comprido, Taquara, Pedregulho e Sem Nome).

Em um trabalho anterior Vieira Neto (1991) estudou, na mesma bacia, o problema da expansão da capacidade deste sistema de açudes. O sistema foi dimensionado e simulado de modo a garantir o abastecimento dos perímetros irrigados e da cidade de Sobral, com um risco de falha inferior a 10%. Desse modo o sistema atenderia às demandas com uma garantia não inferior a 90%.

O autor obteve como resultado, além da sequência ótima de implantação do sistema, que os açudes Pedregulho e Sem Nome seriam desnecessários à obtenção dessa garantia. Além disso, seus resultados apontaram que o açude Poço Comprido estava superdimensionado e poderia ter seu volume reduzido para 85 hm<sup>3</sup>, ao invés dos 560 hm<sup>3</sup> inicialmente propostos.

Tomando por base os resultados daquele trabalho e admitindo-se, ainda, que seus resultados sejam perfeitamente viáveis e implementados num futuro próximo, o mesmo servirá

de caso-estudo para a idealização da metodologia aqui proposta. Cumpre salientar que esta não é uma limitação do modelo de otimização e tão pouco da metodologia aqui utilizada, uma vez que ela pode ser aplicada em qualquer sistema de reservatórios. O que há, na verdade, é uma adequação à realidade do problema, cuja real configuração do sistema depende ainda das decisões governamentais.

Para tanto, tomou-se por base que os açudes Pedregulho e Sem Nome serão desconsiderados no presente trabalho, sendo a configuração deste novo sistema, para efeito de estudo, formada por apenas cinco açudes. E quanto ao açude Poço Comprido, será adotada para o mesmo uma capacidade máxima de acumulação de 85 hm<sup>3</sup>.

### **3.2 Dados Disponíveis:**

Os principais motivos que motivaram a escolha da bacia como local de estudo, foram:

- a disponibilidade de dados para a região, obtidos por conta de estudos anteriores;
- os estudos já realizados na região: Plano Estadual de Recursos Hídricos (CEARÁ, 1992), e do Estudo de Viabilidade Técnico Econômica do Vale do Baixo Acaraú (DNOCS, 1987) que, além de outras coisas, servirão também como base de comparação para os resultados obtidos aqui.

Os dados econômicos e agronômicos necessários para caracterização das culturas, como tipo de irrigação, tipo de cultura, calendário agrícola, coeficientes de cultivo e produtividade, foram obtidos a partir do estudo de viabilidade. Na falta de dados para o local, os mesmos foram estimados com base nos métodos e índices propostos pela FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations).

Os cultivos propostos no planejamento agrícola do projeto Baixo Acaraú são divididos em quatro grupos mostrados na tabela 3.1. A irrigação dos cultivos adota dois métodos: a irrigação localizada, aplicada às culturas do grupo III, e aspersão, aplicada aos demais grupos. A colheita mecanizada é somente feita para as culturas de milho e forragens, sendo as demais colhidas manualmente, inclusive o feijão e o algodão.

**Tabela 3.1: Grupos de Cultivo**

<b>Grupo</b>	<b>Cultivos</b>
I. Tradicionais	feijão, milho e algodão
II. Hortícolas	pimentão, tomate, melão, melancia, cenoura e cebola
III. Frutícolas	laranja
IV. Forrageiras	capim elefante e leucena

Fonte: DNOCS (1987)

No Estudo de Viabilidade o planejamento foi efetuado a nível de rotação de culturas. Para efeito de simplificação, até mesmo as culturas individuais foram consideradas como rotações. A conveniência de se fazer rotações de cultivos está baseada, fundamentalmente, no melhor aproveitamento dos solos, tendo em conta as diferentes características e exigências das diversas espécies. Em zonas como a de Acaraú, onde o custo de insumos é elevado e a qualidade dos solos inferior, resulta de grande importância o planejamento adequado das rotações (DNOCS, 1987).

Com respeito à área cultivada, cerca de 35% da mesma será ocupada por frutais, predominando o cultivo da laranja; 3% por hortaliças; 32% por forrageiras; 24% pela rotação feijão/algodão e 6% pela rotação milho/algodão. Este plano cultural foi obtido no estudo de viabilidade por programação linear de maneira a maximizar a renda líquida de comercialização dos produtos e dos colonos, e pode ser visto na tabela 3.2.

Ainda no estudo de viabilidade, a demanda hídrica dos cultivos foi estimada a partir da simulação com os dados da série hidrológica existente, obtendo a média mensal para cada cultivo (ver tabela 3.3). Os coeficientes de cultivo (kc) e de resposta da cultura (ky) foram estimados conforme as recomendações da FAO (Doorenbos e Kassam, 1979), e serão comentados oportunamente no capítulo 5 (tabela 5.4). Estes fatores serão posteriormente indispensáveis para se ter uma estimativa da evapotranspiração real, o rendimento relativo dos cultivos e, conseqüentemente, o benefício líquido obtido com os mesmos.

**Tabela 3.2: Plano Cultural**

<b>Rotação</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
1. Forragem	[ Forragem ]											
2. Milho/Algodão	[ Milho ]						[ Algodão ]					
3. Feijão/Algodão	[ Feijão ]						[ Algodão ]					
4. Hortaliça	[ Hortaliça 1 ]						[ Hortaliça 2 ]					
5. Fruteiras	[ Laranja ]											

Fonte: DNOCS (1987)

Os dados hidroclimatológicos tais como pluviometria, vazões afluentes e curvas cota-área-volume foram coletados ou gerados através dos estudos realizados no Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (CEARÁ, 1992). Os dados de evaporação nos açudes, e seus volumes operacionais, encontram-se resumidos nas tabelas 3.4 e 3.6, respectivamente.

A função de variação área-volume,  $A = f(S)$ , para os açudes existentes e previstos, foram obtidas por regressão linear simples a partir das curvas cota-área-volume conhecidas. As funções obtidas serão úteis nos cálculos do balanço hídrico nos reservatórios, e os volumes evaporados e precipitados sobre o espelho d'água.

Os resultados obtidos podem ser vistos na tabela 3.5. Como pode-se observar na última coluna, os ajustes foram muito satisfatórios tendo coeficientes de correlação superiores a 98%. O primeiro parâmetro da equação (coluna 2), refere-se a área de mínima de acumulação do açude (volume morto) em hectares, e o segundo parâmetro (coluna 3) ao volume em  $\text{hm}^3$ .

Para a cidade de Sobral, abastecida pelo açude Ayres de Souza, foi estimada uma demanda mensal de água da ordem de  $2,592 \text{ hm}^3/\text{mês}$  ( $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

O projeto Araras Norte, abastecido pelo açude Araras, foi considerado para efeito de estudo, totalmente implantado. O mesmo tem suas demandas hídricas conhecidas e apresentadas, em valores mensais, na tabela 3.7.

A tabela 3.8 nos mostra as despesas anuais por hectare com mão-de-obra, maquinário, e insumos para cada uma das rotações propostas no plano de cultivo. Estes dados serão úteis no cálculo da área máxima que se pode irrigar sem que haja déficit hídrico nos cultivos, ou seja, com evapotranspiração real igual a evapotranspiração potencial.

### **3.3 Análise dos Dados:**

Numa análise prévia dos dados coletados, foi possível verificar a mesma inconsistência nos dados de vazão afluente aos açudes Ayres de Souza e Taquara anteriormente verificada no trabalho de Viera Neto (1991). O fato é que estando o primeiro reservatório distante cerca de 16 km à jusante do segundo, e existindo uma diferença de área controlada de aproximadamente 518 km<sup>2</sup> entre os dois, a vazão afluente ao açude Ayres de Souza deveria ser maior que em Taquara. Entretanto, durante vários anos, isso não ocorre, caracterizando inconsistência nos mesmos.

As vazões terão então de ser corrigidas, o que pode ser feito de dois modos: através de correlação com os postos vizinhos, ou por proporção de áreas. Optou-se pelo segundo processo, também adotado por Vieira Neto (1991), onde utilizou-se de um coeficiente de proporção obtido por ponderação área-isoietas e equivalente a 1,655 que, multiplicado às vazões de Taquara fornece as vazões em Ayres de Souza.

A mesma inconsistência foi verificada, também, com as vazões geradas para o posto fluviométrico Sobral situado a jusante do sistema de reservatórios e próximo ao Açude Sem Nome, em que na maior parte dos anos as vazões eram inferiores às vazões do sistema de reservatórios localizado a montante. Como a diferença de áreas entre os dois pontos é de aproximadamente 5.064 km<sup>2</sup>, o fato de que as vazões à jusante sejam inferiores caracteriza uma inconsistência nos dados.

Como não existem postos fluviométricos próximos ao ponto de captação, tentou-se inicialmente estimá-la com base na proporção de áreas entre o ponto de captação e o sistema de reservatórios utilizando o posto fluviométrico Sobral, o que foi logo descartado pela inconsistência verificada anteriormente. Então, a vazão no ponto de captação foi estimada



usando um coeficiente de proporcionalidade de área de 1,62 que multiplicado à vazão afluyente dos trechos à montante nos fornece a vazão no ponto de captação do projeto Baixo Acaraú.

Ressalta-se que a importância deste fator se deve pela necessidade de se estimar com uma boa margem de segurança a contribuição de percurso que ocorre entre os dois pontos, uma vez que esta é considerável no período de inverno e portanto não pode ser descartada.

Uma questão importante ocorreu quando da aplicação da função área-volume obtidas por Vieira Neto (1991) para a nova capacidade proposta para o açude Poço Comprido. O fato é que como foi feita uma linearização da curva área-volume,  $A = f(S)$ , que é uma função não linear, não é estranho se esperar que a curva subestime a área do espelho líquido nos pontos centrais da curva, e a superestime nos pontos extremos próximos à capacidade máxima e ao volume mínimo (volume morto).

Para uma capacidade igual ou próxima àquela inicialmente utilizada para a obtenção da regressão ( $560 \text{ hm}^3$ ), as entradas ou saídas na superfície líquida (precipitação ou evaporação) podem não ser muito significativas. Para um volume muito menor que este podem haver erros consideráveis como, por exemplo, superestimando as perdas por evaporação de água nos reservatórios. Isto pode, nos anos severos de seca, esvaziar totalmente o reservatório, o que realmente ocorreu durante a simulação no período de 1979/1983.

Adotou-se, portanto, uma nova curva de regressão que, se não eliminasse, pelo menos diminuísse este erro. Para tal chegou-se aos seguintes coeficientes para o açude Poço Comprido:  $a_r = 263,100$  e  $b_r = 14,469$ .

**Tabela 3.3: Demanda Hídrica Mensal dos Cultivos (m<sup>3</sup>/ha)**

<b>Rotação</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
1. Feijão/Algodão	0	809	360	212	648	0	2114	2679	2898	3103	2912	2733
2. Forrageiras	2235	1055	585	416	859	1653	2376	2981	3222	3452	2434	2298
3. Fruteiras	797	37	0	0	0	624	1094	1494	1592	1701	1581	1435
4. Hortaliças	0	0	286	144	578	1357	0	0	2736	2929	2746	2567
5. Milho/Algodão	0	809	360	212	648	1431	2114	2679	2898	3103	2912	2733

Fonte: DNOCS (1987)

**Tabela 3.4: Taxa de Evaporação Mensal (mm)**

<b>Açude <sup>1</sup></b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jun</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
1, 2, 3	167	137	138	128	132	135	167	203	220	232	215	198
4, 5	158	120	127	108	101	108	133	178	192	217	189	174

<sup>1</sup> Açude: Araras (1), Poço Comprido (2), Edson Queiroz (3), Taquara (4) e Ayres de Souza (5)

Fonte: CEARÁ (1992)

**Tabela 3.5: Relação área-volume dos açudes**

Açude	Relação Área-Volume		Coef.
	$A_r = a_r + b_r \cdot S^1$		Correlação
	( $a_r$ )	( $b_r$ )	( $r^2$ )
1. Araras	523,328	10,946	0,990
2. Poço Comprido <sup>2</sup>	764,632	8,569	0,984
3. Edson Queiroz	331,525	8,925	0,993
4. Taquara	239,971	12,943	0,994
5. Ayres de Souza	294,305	9,180	0,982

<sup>1</sup> Sendo  $A_r$  dado em  $ha$ , e  $S$  em  $hm^3$ .

<sup>2</sup> Parâmetros estimados para a capacidade máxima de  $560 \text{ hm}^3$ .

Fonte: DNOCS (1987) e Vieira Neto (1991)

**Tabela 3.6: Volumes Operacionais dos Açudes (hm<sup>3</sup>)**

	<b>Araras</b>	<b>P. Comprido</b>	<b>E. Queiroz</b>	<b>Taquara</b>	<b>A. Souza</b>
<b>Volume Máximo</b>	891,1	85,0 <sup>1</sup>	248,6	278,8	104,4
<b>Volume Mínimo</b>	30,1	11,7	24,6	6,1	12,2

<sup>1</sup> Volume proposto por Vieira Neto (1991).

Fonte: CEARÁ (1982)

**Tabela 3.7: Demanda Mensal do Projeto Araras Norte (hm<sup>3</sup>/mês)**

<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jun</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
6,294	3,629	2,116	1,555	3,616	3,577	5,223	6,026	6,402	7,017	4,743	4,875

Fonte: DNOCS (1987)

**Tabela 3.8: Despesas das rotações com maquinário,  
insumos e mão-de-obra**

<b>Rotação</b>	<b>Despesas das Rotações (US\$/ha/ano)</b>
1. Feijão/Algodão	825,0
2. Forrageiras	973,0
3. Fruteiras	1.181,0
4. Hortaliças <sup>1</sup>	1.700,0
5. Milho/Algodão	795,0

<sup>1</sup> Valor correspondente apenas às culturas consideradas neste estudo: tomate e pimentão.

Fonte: DNOCS (1987)

## Capítulo 4

# **Metodología**

---

## **4. Metodologia:**

### **4.1 Formulação Matemática:**

O processo de otimização dos recursos disponíveis pode ser encarado de duas formas: a maximização dos benefícios líquidos obtidos (otimização custo-benefício), ou a minimização do custo de operação e manutenção do sistema para atingir determinada meta (otimização custo-efetividade).

Optou-se aqui pela otimização custo-benefício, visando a maximização dos benefícios líquidos provenientes da comercialização dos produtos por considerar-se uma abordagem adequada sob o ponto de vista social e econômico, e também pela disponibilidade de dados para obtenção da mesma.

O problema foi abordado em dois enfoques, considerando:

1. área variável, com suprimento total à demanda, e
2. área fixa, com com suprimento à demanda variável.

Um terceiro enfoque, com suprimento e área variáveis, introduziria uma não-linearidade ao problema de difícil consideração, já que alegou-se a programação linear como ferramenta de otimização.

Para a solução do problema, a programação linear foi considerada adequada para o sistema em questão, uma vez que possibilita a simplificação do problema por linearização das funções não lineares, e por ser adequada ao número de reservatórios existentes, o que seria inviável por outros métodos como por exemplo a programação dinâmica.

As hipóteses adicionais usadas na modelagem do problema são descritas a seguir:

1. O intervalo temporal de operação do sistema que refletirá variações de demanda e disponibilidade hídrica será o mensal;
2. As séries de variáveis hidrológicas e hidroeconômicas (vazões, demandas hídricas, etc.) serão consideradas determinísticas;

3. As demandas hídricas serão atendidas dentro das disponibilidades hídricas do sistema e o benefício proveniente do atendimento à demanda hídrica são considerados fixos;
4. A evaporação dos reservatórios é uma função linear de seus armazenamentos;
5. Os custos de mão-de-obra, insumos, e maquinário são considerados fixos;
6. O total de água aplicada durante uma seção de irrigação é somente o necessário para elevar a umidade à capacidade de campo;
7. Todos os açudes encontram-se construídos;
8. Todos os perímetros de irrigação acham-se implantados.

#### 4.1.1 Função Objetivo (F.O.):

Conforme citado anteriormente, a função objetivo a ser utilizada é a que maximiza os benefícios líquidos do perímetro de irrigação. Assim a F.O. pode ser definida por:

$$F.O. = \text{Max} \{ \text{Benefícios} - \text{Custos} \}$$

Os benefícios são representados pela renda obtida da comercialização da produção agrícola, e os custos são representados pelos custos variáveis de captação, transporte e destinação da água a ser usada na irrigação. Os custos de insumos, mão-de-obra e maquinário, quando se tratando de uma área fixa, serão considerados invariantes, não entrando portanto na otimização.

O benefício total anual ( $B_t$ ) para um ano qualquer  $t$ , expresso pela soma das parcelas de rendimento real de cada cultivo, pode ser dado pela seguinte equação:

$$B_t = \frac{1}{(1+d)^t} \cdot \sum_{j=1}^{nc} Y_j \cdot R_j \cdot A_j \quad (4.1)$$



onde:

$Y_j$  = rendimento real do cultivo  $j$ , em kg/ha;

$R_j$  = preço de comercialização do cultivo  $j$ , em US\$/kg;

$A_j$  = área da cultura  $j$ , em ha (variável na formulação 1; fixa na formulação 2);

$nc$  = número total de culturas;

$d$  = taxa de descontos em percentual anual;

$1/(1+d)^t$  = fator de atualização monetária.

O custo anual variável ( $CV_t$ ) para um ano qualquer  $t$ , pode ser expresso pela soma das parcelas de custo, relativo a cada mês, sendo representado por:

$$CV_t = \frac{1}{(1+d)^t} \cdot \sum_{j=1}^{nc} \sum_{i=1}^{12} IRR_{i,j} \cdot C \cdot A_j \cdot \frac{1}{EFT_j} \cdot 10 \quad (4.2)$$

onde:

$IRR_{i,j}$  = irrigação aplicada à cultura  $j$  no mês  $i$ , em mm;

$C$  = custo da água por unidade de volume, em US\$/m<sup>3</sup>;

$EFT_j$  = eficiência total de irrigação para a cultura  $j$ ;

$10$  = fator de conversão de unidades de mm para m<sup>3</sup>/ha.

Para a irrigação por aspersão a eficiência de aplicação considerada é da ordem de 64%, e para a eficiência em canais e adutoras é de 90%, resultando numa eficiência global de 58%. Para a irrigação localizada (frutais) a eficiência global de aplicação é de 69%, sendo 90% para eficiência de aplicação e também de transporte em canais e adutoras (DNOCS, 1987). Procurou-se neste trabalho, manter os mesmos valores propostos inicialmente pelo Estudo de Viabilidade, uma vez que pretende-se comparar os resultados obtidos aqui com os apontados por aquele estudo.

Para se adotar uma função de rendimento que melhor refletisse a realidade em estudo, com um embasamento físico, adotou-se o modelo proposto por Doorenbos e Kassam (1979), apresentado no capítulo 2, que considera o rendimento relativo linearmente proporcional à taxa de evapotranspiração.

Entretanto para levar em consideração do efeito temporal do déficit hídrico sobre as culturas, adotou-se a função de rendimento de forma semelhante a proposta por Stewart et al. (1976), apud Rao et al. (1988), escolhida por possibilitar a linearização do problema e a sua utilização no modelo de programação linear, além de já ter sido aplicada com sucesso em condições semelhantes às do Nordeste brasileiro. Ela foi modificada para considerar o período de tempo mensal, sendo dada por:

$$\frac{Y_j}{Ym_j} = 1 - \sum_{i=1}^{n_j} ky_{i,j} \cdot \left(1 - \frac{ETr}{ETm}\right)_{i,j} \quad (4.3)$$

onde:

- $Y_j$  = rendimento real da cultura  $j$ ;
- $Ym_j$  = rendimento máximo da cultura  $j$ ;
- $ky_{i,j}$  = fator de resposta ao déficit hídrico da cultura  $j$  no mês  $i$ ;
- $ETr_{i,j}$  = evapotranspiração real da cultura  $j$  no mês  $i$ ;
- $ETm_{i,j}$  = evapotranspiração potencial da cultura  $j$  no mês  $i$ ;
- $n_j$  = período total, em meses, de desenvolvimento da cultura  $j$ .

Uma questão relevante é que por considerar-se nesta abordagem um intervalo de tempo mensal, e os valores dos diversos parâmetros dos cultivos serem dados para cada estágio de crescimento dos cultivos, estes também terão de ser reavaliados. Para se estimar estes parâmetros para este novo intervalo de tempo (mensal), divide-se os mesmos proporcionalmente ao número de meses correspondentes a cada período.

Da equação anterior a função de rendimento total ( $Y_j$ ) para cada cultivo (em kg/ha), pode ser rescrita para o intervalo de validade da equação, ou seja, para  $ETr/ETm \geq 0.5$ , como:

$$Y_j = Ym_j - \sum_{i=1}^{n_j} Ym_j \cdot ky_{i,j} \cdot \left(1 - \frac{ETr}{ETm}\right)_{i,j} \quad (4.4)$$

Sendo os demais termos da equação conhecidos, o problema agora consiste em estimar a evapotranspiração real em cada intervalo de tempo. Como se sabe há várias metodologias na

literatura sobre o assunto. Uma abordagem comum, que é a adotada neste trabalho, é aquela que procura expressar a evapotranspiração relativa em função do teor de umidade no solo. Um ponto particularmente importante dessa abordagem é que o conhecimento dessa função permite estimar a evapotranspiração real do cultivo, tendo apenas a umidade do solo ( $H$ ) e a evapotranspiração potencial ( $ETp$ ) no período.

No trabalho de Minhas et al. (1974), onde foram apresentadas várias funções de evapotranspiração relativa versus umidade do solo, ficou demonstrado que esta relação é nitidamente não-linear (figura 4.1), à exceção das funções de Thorntwaite e Matther, e Veihmeyer e Hendrickson.

A não linearidade da função não significa um empecilho ao modelo. Rhenals e Bras (1981) apresentou em seu trabalho uma função linear por segmentos da forma mostrada abaixo (figura 4.2).

Dessa forma, adotando-se uma função com a mesma tendência daquela usada por Minhas et al. (1974), a mesma pode ser utilizada, porém antes aplicando o artifício de PL separável para uso no modelo. A função pode ser linearizada por segmentos, desmembrando-se o termo de umidade ( $H$ ) em um número  $m$  de intervalos  $h_k$  para  $k = 1, \dots, m$  (figura 4.3). A evapotranspiração relativa como função da umidade do solo, pode ser escrita como:

$$\frac{ETr}{ETm} = f(H) = \alpha_1 h_1 + \alpha_2 h_2 + \dots + \alpha_m h_m = \sum_{k=1}^m \alpha_k h_k \quad (4.5)$$

sendo:

$h_k$  = parcela  $k$  de umidade do solo na zona das raízes, em mm;

$\alpha_k$  = coeficiente angular da reta  $k$  no intervalo correspondente ( $k = 1, \dots, m$ );

$m$  = número de intervalos de divisão da umidade.

E assim a produtividade anual real (kg/ha) pode ser rescrita, para  $m$  parcelas de umidade do solo e as  $nc$  culturas, como:

$$Y_i = \sum_{j=1}^{nc} \sum_{i=1}^{n_j} Ym_j \cdot (1 - ky_{i,j}) + \sum_{j=1}^{nc} \sum_{i=1}^{n_j} \left( Ym_j \cdot \sum_{k=1}^m (\alpha_k h_k)_{i,j} \right) \quad (4.6)$$

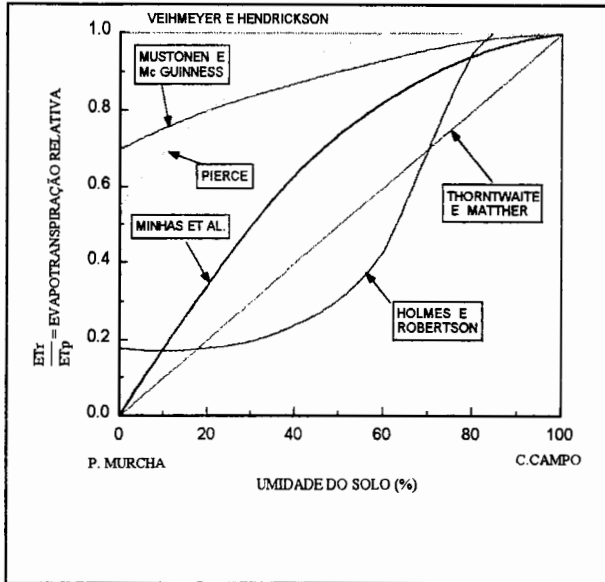


Figura 4.1: Resultados de vários estudos mostrando a variação da ET relativa com a umidade do solo (Minhas et al., 1974).

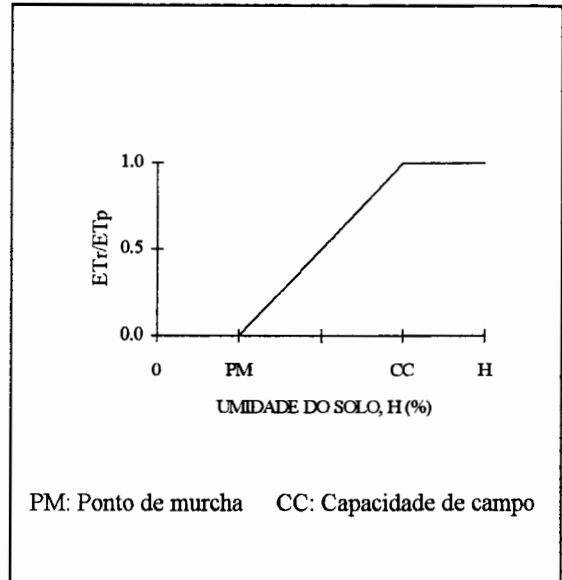


Figura 4.2: Evapotranspiração relativa x Umidade do solo (Rhenals e Bras, 1981).  
PM: Ponto de murcha CC: Capacidade de campo

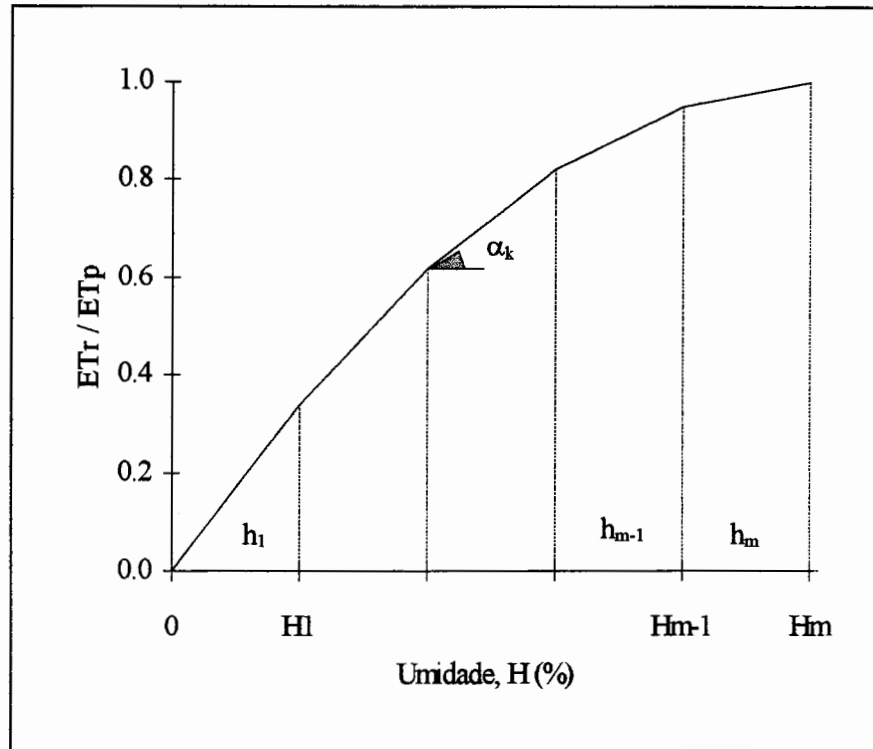
O benefício total anual ( $B_t$ ) será alcançado multiplicando-se a produtividade real (kg/ha) pela área plantada (ha) e pela rentabilidade de cada cultivo (US\$/kg), resultando em:

$$\begin{aligned}
 B_t = & \frac{1}{(1+d)^t} \cdot \sum_{j=1}^{nc} \sum_{i=1}^{n_j} Ym_j \cdot A_j \cdot R_j - \frac{1}{(1+d)^t} \cdot \sum_{j=1}^{nc} \sum_{i=1}^{n_j} Ym_j \cdot ky_{i,j} \cdot A_j \cdot R_j \\
 & + \frac{1}{(1+d)^t} \cdot \sum_{j=1}^{nc} \sum_{i=1}^{n_j} Ym_j \cdot ky_{i,j} \cdot A_j \cdot R_j \cdot \sum_{k=1}^m (\alpha_k h_k)_{i,j}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

O benefício total ( $B$ ) será dado pela soma das parcelas dos benefícios líquidos anuais ( $B_t - CV_t$ ), isto é:

$$B = \sum_{t=1}^N (B_t - CV_t) \tag{4.8}$$

com  $t = 1, \dots, N$ , sendo  $N$  o número de anos de análise.



**Figura 4.3: Curva generalizada de ET relativa x Umidade do solo (Minhas et al., 1974)**

Um ponto particularmente importante para que esta formulação possa ser aplicada é o conhecimento das curvas de evapotranspiração relativa versus umidade do solo de cada cultura. A mesma pode ser obtida a partir de experimentos de campo realizados na área de estudo, ou em regiões próximas e com características semelhantes, o que nem sempre é possível de se obter devido aos custos e tempo necessários para tal serem muitas vezes restritivos.

Entretanto propõe-se aqui que, na inexistência destes, esta relação pode também ser estimada com base nas curvas de rendimento relativo de cada cultivo, caso existam. Essa metodologia pode ser aplicada desde que se conheça a variação do rendimento relativo com a umidade, ou potencial matricial do solo para cada cultura.

Caso se tenha a curva de “rendimento relativo versus umidade do solo” para cada cultura a curva “*ET* relativa versus umidade” pode ser obtida facilmente, através da equação de Doorenbos e Kassam (1979), para cada teor de umidade, pela equação abaixo:

$$\frac{ET_r}{ET_m} = 1 - \frac{1 - Y/Y_m}{ky} \quad (4.9)$$

sendo *ky* o fator de resposta da cultura.

Caso se tenha a curva de “*ET<sub>r</sub>* versus potencial matricial do solo” para cada cultura, o processo passa a ser descrito da seguinte forma:

- Com a curva de retenção de água no solo estima-se a curva de rendimento relativo versus umidade do solo, a partir da curva de rendimento relativo;
- Então procede-se como no caso anterior, aplicando-se a fórmula 4.9 para obter a *ET* relativa para cada teor de umidade.

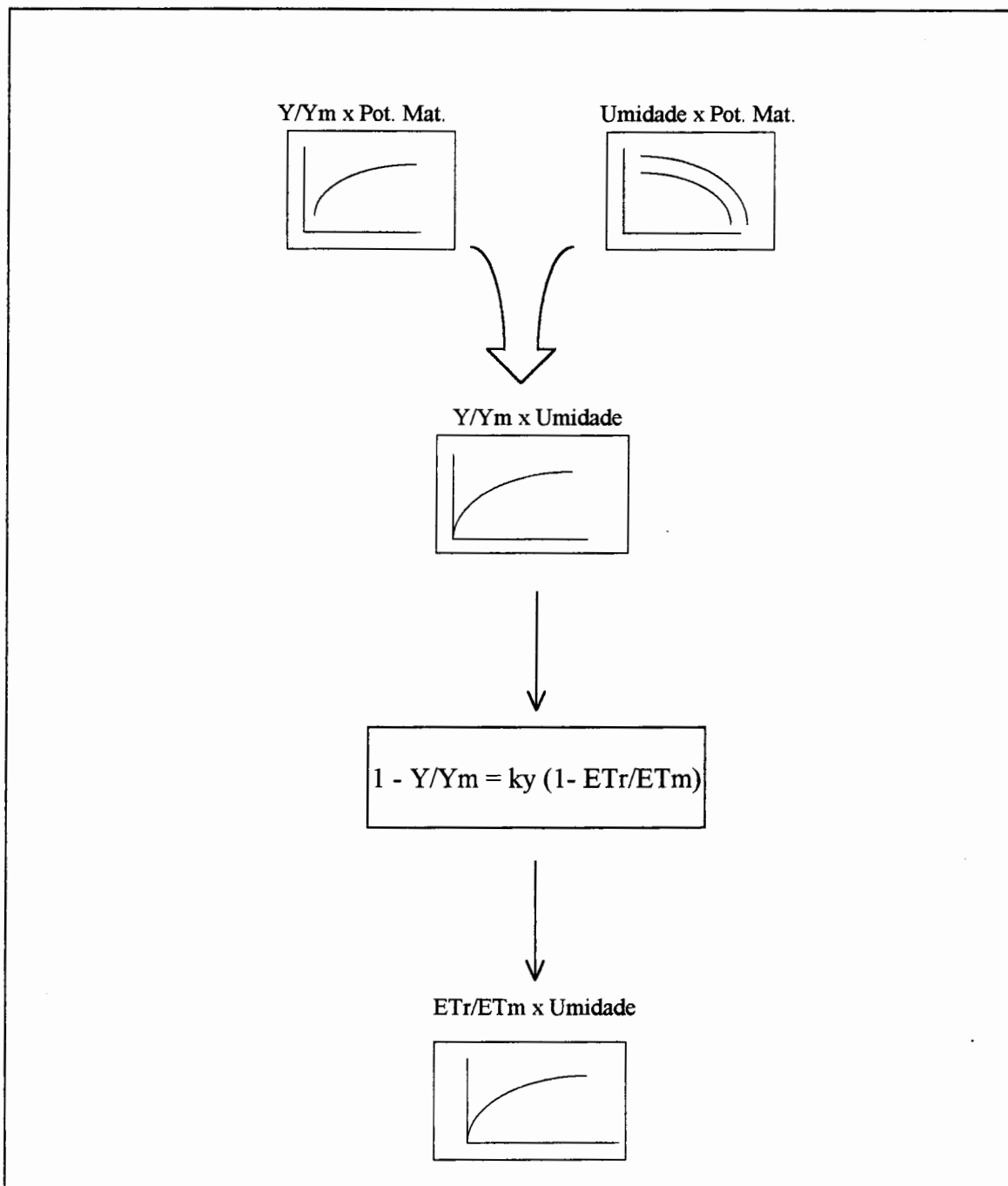
Um fluxograma deste processo pode ser visto na figura 4.4.

#### **4.1.2 Equações de Restrição:**

##### **4.1.2.1 Balanço Hídrico no Solo:**

As equações de restrição a serem impostas ao modelo são dadas, basicamente, pelas equações de balanço hídrico nos reservatórios que compõem o sistema, e pela equação de balanço hídrico no solo.

O balanço hídrico no solo representa as variações de umidade do solo, no decorrer do período de tempo, considerando-se as entradas e saídas do mesmo. As entradas no sistema, são dadas pela precipitação efetiva e lâmina de irrigação; as saídas são devidas à evaporação do solo e percolação. A variação de armazenamento no solo, para um ano qualquer, pode ser representado pela seguinte equação:



**Figura 4.4: Fluxograma de cálculo da relação  $E_{Tr}/E_{Tm}$  x Umidade**

$$U_{i+1,j} = U_{i,j} + IRR_{i,j} + PE_{i,j} - E_{i,j} - PER_{i,j} \quad (4.10)$$

onde:

$U_{i,j}$  = umidade na profundidade das raízes da cultura  $j$  no mês  $i$ , em mm;

$U_{i+1,j}$  = umidade na profundidade das raízes da cultura  $j$  no mês  $i+1$ , em mm;

$IRR_{i,j}$  = lâmina de irrigação aplicada à cultura  $j$  no mês  $i$ , em mm;

$PE_{i,j}$  = precipitação efetiva na cultura  $j$  no mês  $i$ , em mm;

$E_{i,j}$  = evaporação do solo nu ou evapotranspiração da cultura  $j$  no mês  $i$ , em mm;

$PER_{i,j}$  = percolação de umidade do solo para a cultura  $j$  no mês  $i$ , em mm;

A umidade do solo na zona das raízes, em um período qualquer é dada por:

$$U_{i,j} = H_{i,j} \cdot FS_{i,j} \quad (4.11)$$

com:

$H_{i,j}$  = percentual total de umidade no solo;

$FS_{i,j}$  = fator de água no solo.

O percentual total de umidade do solo ( $H_{i,j}$ ) para uma dada cultura  $j$  e um período qualquer  $i$ , é dado por:

$$H_{i,j} = \sum_{k=1}^m (h_k)_{i,j} \quad (4.12)$$

com  $H_{min} \leq H_{i,j} \leq H_{max}$ . O termo  $H_{min}$  seria a umidade correspondente a  $E_{Tr}/E_{Tm} = 0,5$ , para um mês cultivado, por limitação do modelo água-rendimento utilizado, e podendo chegar a zero nos meses sem cultivo.

O fator de água no solo ( $FS_{i,j}$ ) é dado, em  $mm$ , por:

$$FS_{i,j} = (CC - PM) \cdot \gamma \cdot Prad_{i,j} \cdot 10 \quad (4.13)$$



com:

$Prad_{i,j}$  = profundidade do sistema radicular da cultura  $j$  no mês  $i$ , em cm;

$CC$  = capacidade de campo em percentual gravimétrico;

$PM$  = ponto de murcha em percentual gravimétrico;

$\gamma$  = densidade aparente do solo, em  $g/cm^3$ ;

$10$  = fator de conversão para  $mm$ .

Lembra-se aqui a diferença existente entre o conceito de precipitação efetiva no senso agrônômico e no senso hidrológico. Em seu sentido hidrológico a precipitação efetiva representa a parte da precipitação total que é responsável pela geração de escoamento superficial. O termo de precipitação efetiva ( $PE_{i,j}$ ) é tratado aqui em seu sentido agrônômico, diferentemente do sentido hidrológico, como a parte da precipitação total que efetivamente se infiltra no solo, mais especificamente na zona das raízes, e contribui para o suprimento das necessidades das culturas.

A precipitação efetiva, para efeito de simplificação, pode ser considerada à princípio como 75% da precipitação mensal. Esta metodologia tem sido aplicada em muitos estudos efetuados no Ceará, inclusive no estudo de viabilidade.

Uma abordagem mais precisa pode ser utilizada, como a do modelo SCS (Soil Conservation Service) ou o modelo proposto pelo manual 3 da FAO (FAO, 1988). Entretanto deve-se ter em conta que é comum a ocorrência de veranicos prolongados na região e no período chuvoso não é comum a ocorrência de precipitações muito elevadas, conforme foi comentado anteriormente.

O termo percolação no solo pode ser, em princípio, desprezado em regiões como o Nordeste brasileiro, por não representar uma parcela considerável no processo. Apesar disso este termo foi mantido por ser considerado uma parcela importante nos períodos de inverno, em que a umidade do solo pode, inclusive, ultrapassar a capacidade de campo.

A profundidade do sistema radicular pode ser obtido de dados experimentais para cada cultivo, ou pode também, na inexistência destes, ser estimado através de modelos de crescimento de cultivos, ou através de dados empíricos.

A lâmina de irrigação, em cada período ou estágio de cultivo, é na realidade uma variável dependente da umidade do solo ( $\Delta U$ ), da evapotranspiração ( $ETm$ ), da chuva efetiva ( $PE$ ) e da eficiência do sistema de irrigação da cultura ( $EFA$ ). Da equação de balanço hídrico (4.10), desprezando o termo de percolação ( $PER$ ), temos que a lâmina de irrigação necessária para elevar a umidade à capacidade de campo é dada por:

$$IRR_{i,j} = \frac{ETm_{i,j} - (PE_{i,j} + \Delta U_{i,j})}{EFA_j} \quad (4.14)$$

sendo  $i$  o índice correspondente ao mês  $i$ , e  $j$  o índice correspondente a cultura  $j$ .

Como a evapotranspiração real é tratada aqui como função da umidade do solo, conclui-se que a lâmina de irrigação, em outras palavras, é dependente da umidade do solo e da precipitação efetiva.

Observa-se na equação anterior que o termo de irrigação pode matematicamente assumir valores negativos ao longo do tempo quando  $PE_{i,j} \geq ETr_{i,j}$ . A aplicação direta desta equação pode se constituir num problema em programação linear, uma vez que neste modo de otimização não se dispõe de restrições condicionais que anulariam  $IRR_{i,j}$  nessa situação, ao contrário do que ocorre com a programação dinâmica.

Uma alternativa para evitar esse problema seria a utilização dos dados de demanda hídrica, obtidos e listados no capítulo 3 (ver tabela 3.3). Estes dados mensais médios foram obtidos pelo estudo de viabilidade, através de simulação hidrológica e podem ser usados como valores médios para estimar a lâmina de irrigação mensal de cada cultivo.

Outra forma de abordar o problema seria a utilização da lâmina de irrigação como uma variável limitada por seus valores positivos ( $IRR_{i,j} \geq 0$ ). Para efeito de simplificação e viabilidade matemática optou-se por utilizar esta abordagem, considerando a lâmina de irrigação como uma variável de decisão indiretamente limitada pela equação de balanço hídrico no solo, e pela função de custos utilizada na função objetivo.

Com estes dados a matriz com os coeficientes das equações de balanço hídrico no solo pode ser criada, para cada cultivo ( $j$ ) e para cada mês ( $i$ ), sendo respeitadas as devidas restrições impostas ao modelo.

#### 4.1.2.2 Balanço Hídrico nos Reservatórios:

O balanço hídrico nos reservatórios representa as variações de seus armazenamentos e pode ser expresso pela seguinte equação geral:

$$S_{i+1,r} = S_{i,r} + VP_{i,r} - VE_{i,r} + QA_{i,r} - QE_{i,r} - DEM_{i,r} \quad (4.15)$$

onde:

- $S_{i,r}$  = volume do reservatório  $r$  no início do mês  $i$ , em  $\text{hm}^3$ ;
- $VP_{i,r}$  = volume precipitado sobre o reservatório  $r$  durante o mês  $i$ , em  $\text{hm}^3$ ;
- $VE_{i,r}$  = volume evaporado do reservatório  $r$  durante o mês  $i$ , em  $\text{hm}^3$ ;
- $QA_{i,r}$  = volume afluente no reservatório  $r$  durante o mês  $i$ , em  $\text{hm}^3$ ;
- $QE_{i,r}$  = volume defluente no reservatório  $r$  durante o mês  $i$ , em  $\text{hm}^3$ ;
- $DEM_{i,r}$  = demanda direta do reservatório  $r$  durante o mês  $i$ , em  $\text{hm}^3$ ;
- $r$  = índice representativo do reservatório  $r$  ( $r = 1, \dots, 5$ );

Como limite à faixa de variação de  $S_{i,r}$ , é estabelecido que:

$$Sr_{min} \leq S_{i,r} \leq Sr_{max}$$

sendo  $Sr_{min}$  e  $Sr_{max}$  o volume mínimo e máximo de acumulação do reservatório  $r$ .

O termo demanda direta é introduzido aqui para referenciar a demanda diretamente atendida por um reservatório, através de captação direta no mesmo. São considerados como demanda direta as demandas para abastecimento da cidade de Sobral e do perímetro de irrigação Araras Norte, atendidas pelos reservatórios Ayres de Souza e Araras, respectivamente.

A função mostra-se versátil para contemplar todo o conjunto de reservatórios existente. Nos açudes Taquara, Poço Comprido e Edson Queiroz, em especial, o termo de demanda mensal direta ( $DEM_{i,r}$ ) é nulo uma vez que inexistente demanda para estes açudes. Para os açudes Araras e Ayres de Souza o termo representa, respectivamente, a demanda do projeto Araras Norte e de abastecimento da cidade de Sobral.

O sistema é constituído por cinco açudes sendo dois em série, e os restantes em paralelo, conforme pode ser verificado na figura 3.1. Para os reservatórios em série Ayres de Souza e Taquara, observa-se que a vazão afluente ao primeiro é igual à vazão defluente do segundo.

Os volumes precipitados e evaporados sobre o espelho d'água do reservatório em cada mês serão determinados como uma função linear da área média do período. Considerando que o volume efetivo precipitado ( $\Delta V_{i,r}$ ), em  $hm^3$ , é dado pela diferença entre o total precipitado ( $P_{i,r}$ ) e o total evaporado no período ( $EV_{i,r}$ ), pode-se expressá-lo por:

$$\Delta V_{i,r} = VP_{i,r} - VE_{i,r} = (P_{i,r} - EV_{i,r}) \left[ \frac{A_{i,r} + A_{i+1,r}}{2} \right] 10^{-5} \quad (4.16)$$

onde os termos  $A_{i,r}$  e  $A_{i+1,r}$  são as áreas, em ha, da superfície líquida do reservatório  $r$  no início e no final do mês  $i$ ; e os termos  $P_{i,r}$  e  $EV_{i,r}$  dados em mm, são a precipitação e a evaporação sobre o reservatório.

Assim substituindo a equação 4.16 na equação 4.10 obtém-se:

$$S_{i+1,r} = S_{i,r} + \Delta V_{i,r} + QA_{i,r} - QE_{i,r} - DEM_{i,r} \quad (4.17)$$

Como as relações área-volume de cada reservatório são conhecidas (ver tabela 3.5, capítulo 3), então significa dizer que os mesmos são também uma função linear do volume médio do período.

#### 4.1.2.3 Balanço Hídrico no Ponto de Captação:

A demanda nos pontos de captação para os perímetros irrigados é uma função dependente da área irrigada e da lâmina aplicada a cada cultivo. Para o perímetro Araras Norte as mesmas são conhecidas, uma vez que o mesmo já está em operação. A demanda mensal para o perímetro Baixo Acaraú pode ser estimada pela equação abaixo:

$$QP_i = \sum_j IRR_{i,j} \cdot A_j \cdot \frac{1}{EFT_j} \cdot 10^{-5} \quad (4.18)$$

onde:

$QP_i$  = vazão do perímetro de captação no mês  $i$ , em  $\text{hm}^3/\text{mês}$ ;

$EFT_j$  = eficiência global de irrigação para a cultura  $j$ ;

A eficiência global de irrigação abrange as perdas por adução, distribuição e aplicação ao longo do percurso, sendo dependente do tipo de irrigação aplicada, e assumindo valores maiores para irrigação localizada (0,69) que para a irrigação convencional (0,64) (DNOCS, 1987). A forma de derivação destes valores, obtidos do estudo de viabilidade, foi comentado anteriormente (item 4.1.1).

A demanda do projeto Baixo Acaraú é atendida pelas defluências do conjunto de reservatórios à montante do perímetro. Deve-se, contudo, garantir que a vazão total que é liberada pelos reservatórios seja suficiente para atender a demanda, uma vez que sendo os pontos de captação localizados em locais distantes dos reservatórios, podem haver perdas adicionais significativas entre os pontos de captação e de armazenamento. Estas perdas podem ser devidas à evaporação, percolação, ou a outros pontos de captação ao longo do percurso.

Admitindo uma perda total de  $QX_i$  (em  $\text{hm}^3$ ) na vazão que chega até o ponto de captação no mês  $i$ , devido às perdas por evaporação, percolação, e abastecimento das populações ribeirinhas, e uma contribuição de trecho  $QTr_i$  (em  $\text{hm}^3$ ), devido as demais entradas ao sistema, a equação de balanço no ponto de derivação, passa a ser dada por:

$$\sum_r QE_{r,i} + QTr_i - QX_i \geq QP_i \quad (4.19)$$

sendo  $QE_{r,i}$  a vazão defluente do reservatório  $r$  no mês  $i$ , em  $\text{hm}^3$ .

Nessa forma, o modelo geral aqui descrito pode ser aplicado em muitas variações deste tipo de problema, sendo ainda necessário definir as restrições elementares para cada caso específico. As restrições elementares como limites de variação de volume (máximo e mínimo), ou de umidade do solo, não foram aqui explicitamente definidas por se querer apresentar um modelo geral. Deixa-se estas definições para o próximo capítulo, onde aplica-se o modelo apresentado.

#### **4.2 A Solução do Problema de Otimização:**

A solução da parte de otimização do problema será feita através do software computacional aqui denominado HOPDM, que faz parte da biblioteca de rotinas HOPDM (Higher Order Primal-Dual Method) para solução de problemas de programação linear.

O HOPDM é um software polonês muito recente desenvolvido por Jacek Gondzio, do Systems Research Institute ( Polish Academy of Sciences, Poland), e pode ser considerado como o que há de mais recente nos avanços em PL no mundo. Referências sobre este modelo podem ser obtidas em Altman e Gondzio (1993) e Gondzio e Makowski (1995).

O programa utiliza-se de arquivos de entrada no formato padrão MPS (Mathematical Programming Systems) e pode ser executado em sistemas UNIX ou DOS, para solução de problemas de programação linear de larga escala que possuem matrizes esparsas. O código, escrito em linguagem FORTRAN, implementa o método polinomial “Mehrotra's predictor-corrector”, uma variante do método primal-dual com barreira logarítmica.

Gondzio e Makowski (1995), mostram que uma análise deste novo método, comparativamente aos métodos não polinomiais, como o método Simplex, pode ser feita da seguinte forma: “em teoria, os métodos não polinomiais como o Simplex necessitam de  $m+n$  iterações para chegar à otimalidade do problema (onde  $m$  e  $n$  são as dimensões da matriz tecnológica), enquanto o algoritmo primal-dual de ponto interior quase nunca necessita de mais que 100 iterações, independentemente das dimensões do problema”. Entretanto esta superioridade somente se verifica em problemas de grandes dimensões, onde este método se mostra muito superior aos demais métodos conhecidos.

#### 4.2.1 O Método Primal-Dual:

Apresenta-se nesta seção uma idéia básica do método primal-dual com restrição logarítmica, uma vez que uma descrição detalhada sobre a formulação matemática do método foge ao escopo deste trabalho. Maiores detalhes sobre a formulação teórica podem ser obtidos nos trabalhos de Kojima et al. (1986) e Megiddo (1986) (apud Gondzio e Makowski, 1995).

O método trata ao mesmo tempo com um par de problemas LP, o primal:

$$\min c^t \cdot x,$$

sujeito a:

$$A \cdot x = b$$

$$x + s = u$$

$$x, s \geq 0,$$

onde  $c, x, s, u \in \mathbb{R}^n$ ,  $b \in \mathbb{R}^m$ ,  $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ , e o dual:

$$\max b^t \cdot y - u^t \cdot w,$$

sujeito a:

$$A^t \cdot y + z - w = c$$

$$z, w \geq 0,$$

onde  $y \in \mathbb{R}^m$ , e  $z, w \in \mathbb{R}^n$ .

A idéia básica método é tratar as restrições tipo inequações por meio de funções de barreira logarítmica, que conduz à seguinte forma lagrangeana:

$$\begin{aligned} L(x, s, y, w, \mu) = & c^t \cdot x - \mu \sum_{i=1}^n \ln(x_i) - \mu \sum_{j=1}^n \ln(s_j) \\ & - y^t \cdot (A \cdot x - b) - w^t \cdot (u - x - s) \end{aligned} \quad (4.20)$$

onde  $\mu$  é o parâmetro de barreira.

As condições de primeira ordem necessárias para o ponto  $(x^*, s^*, y^*, z^*, w^*)$  ser ótimo são:

$$A \cdot x = b,$$

$$x + s = u,$$

$$A^t \cdot y + z - w = c,$$

$$X \cdot Z = \mu \cdot e,$$

$$S \cdot W = \mu \cdot e,$$

$$x, s, z, w > 0,$$

onde  $X, S, Z,$  e  $W$  são as matrizes diagonais com elementos  $x_j, s_j, z_j,$  e  $w_j,$  respectivamente, e  $e \in \mathbb{R}^n$  é uma matriz unidade.

O algoritmo primal-dual básico usa o método de Newton para encontrar uma solução aproximada para os condições de otimalidade anteriores para um valor inicial de  $\mu$  e modifica  $\mu$  (usualmente decrementando) conforme o progresso obtido na redução do intervalo da dualidade. O algoritmo termina quando esta redução atinge uma tolerância predeterminada.

Mehrotra (1991) (apud Gondzio e Makowski, 1995) propôs uma modificação computacionalmente atrativa no método básico, que incorpora a informação de alta ordem dentro do método primal-dual, isto é, computa a aproximação de  $k$ -ésima ordem da trajetória ótima que inicia em um dado ponto e conduz ao ponto ótimo. O número de iterações do primal-dual pode ser reduzido significativamente pois, como a ordem do polinômio de Taylor não é muito grande, isto dá enorme ganhos computacionais. A eficiência do método Mehrotra se deve ao fato deste poder reduzir o número de fatorizações efetuadas com as matrizes, e aproveitar melhor a informação com uma simples iteração.

Outra grande inovação deste método, e também responsável pelo seu extraordinário desempenho, é a sua capacidade de eliminar drasticamente uma fração considerável das restrições do problema antes de chegar ao ótimo, o que é impossível nos métodos tradicionais como aqueles que usam o algoritmo Simplex.



### 4.3 A Simulação do Sistema:

A etapa de simulação dos processos foi executada com o software computacional SIBAC (Simulação Integrada da Bacia do Acaraú), desenvolvido pelo autor especialmente para simular o sistema em foco.

O modelo foi desenvolvido em linguagem de programação C, e é composto basicamente por três rotinas, responsáveis pela leitura dos arquivos de entrada (dados de cultivos e açudes), processamento interno (simulação do balanço hídrico) e gravação dos resultados. A rotina de processamento interno constitui-se de subrotinas responsáveis pelo balanço hídrico dos reservatórios e do solo, além do cálculo do benefício líquido obtido.

Não é demais lembrar que o modelo SIBAC não faz parte do modelo de otimização propriamente dito. Ele será aplicado somente na fase final do problema, onde fornecerá os resultados para se avaliar a garantia do sistema sob diferentes formas de operação.

Durante a simulação consideram-se como ocorrência de falhas de atendimento à demanda, toda vez que a vazão total liberada for insuficiente para atender a demanda dos pontos de captação direta (demanda do projeto Araras Norte e de Sobral) ou indireta (demandas do projeto Baixo Acaraú).

Diversas metodologias de operação do conjunto de reservatórios, obtidas a partir dos resultados da otimização, são testadas. O programa fornece, ao final do processamento, o balanço hídrico mensal dos reservatórios, indicando os respectivos períodos e percentuais em que houve falhas no atendimento, bem como a garantia do sistema no atendimento às demandas.

Uma vez que seria inviável apresentar a listagem completa do programa devido a suas proporções, optou-se por apresentar aqui apenas o fluxograma de cálculo do programa, o qual pode ser visto nas figuras 4.5a., 4.5b. e 4.5c.

Um comentário especial merece ser feito com relação a subrotina que calcula a lâmina de irrigação a ser aplicada em cada cultura (subrotina *Lâm\_Irrig*). Em condições normais, sem

déficit hídrico, e havendo disponibilidade de água, a lâmina de irrigação requerida pela cultura é atendida em sua totalidade.

Havendo a impossibilidade de se aplicar a lâmina total de irrigação requerida, utilizou-se como critério de aplicação de irrigação, a variável "preço de comercialização" da cultura. Dessa forma, a cultura que tivessem maior preço de comercialização teriam a prioridade de atendimento sobre as que tivessem menor preço, independente dos demais parâmetros envolvidos no processo.

Outros critérios de atendimento a demanda hídrica dos cultivos poderiam ser verificados, mas para o estudo em foco somente um critério foi adotado, podendo os demais métodos de atendimento serem considerados em estudos posteriores e complementares a este trabalho.

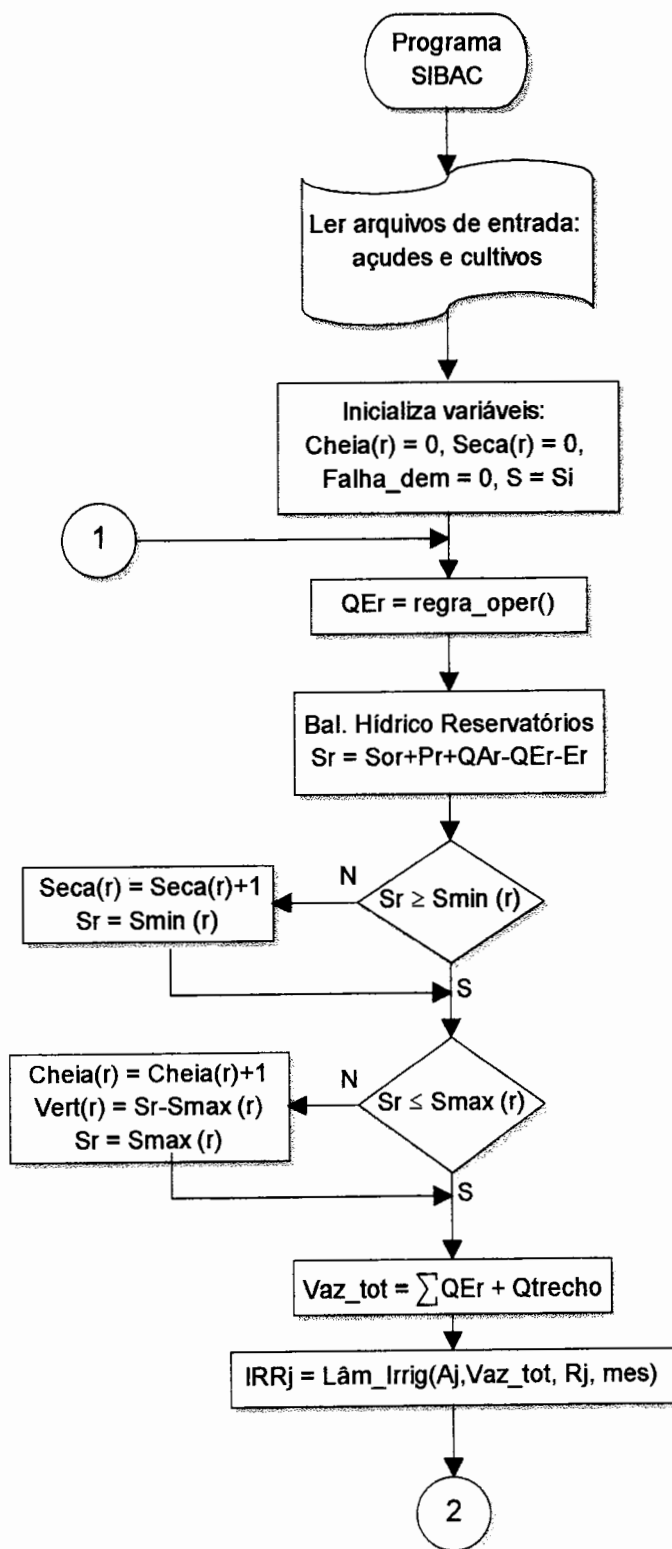


Figura 4.5a: Fluxograma do programa SIBAC

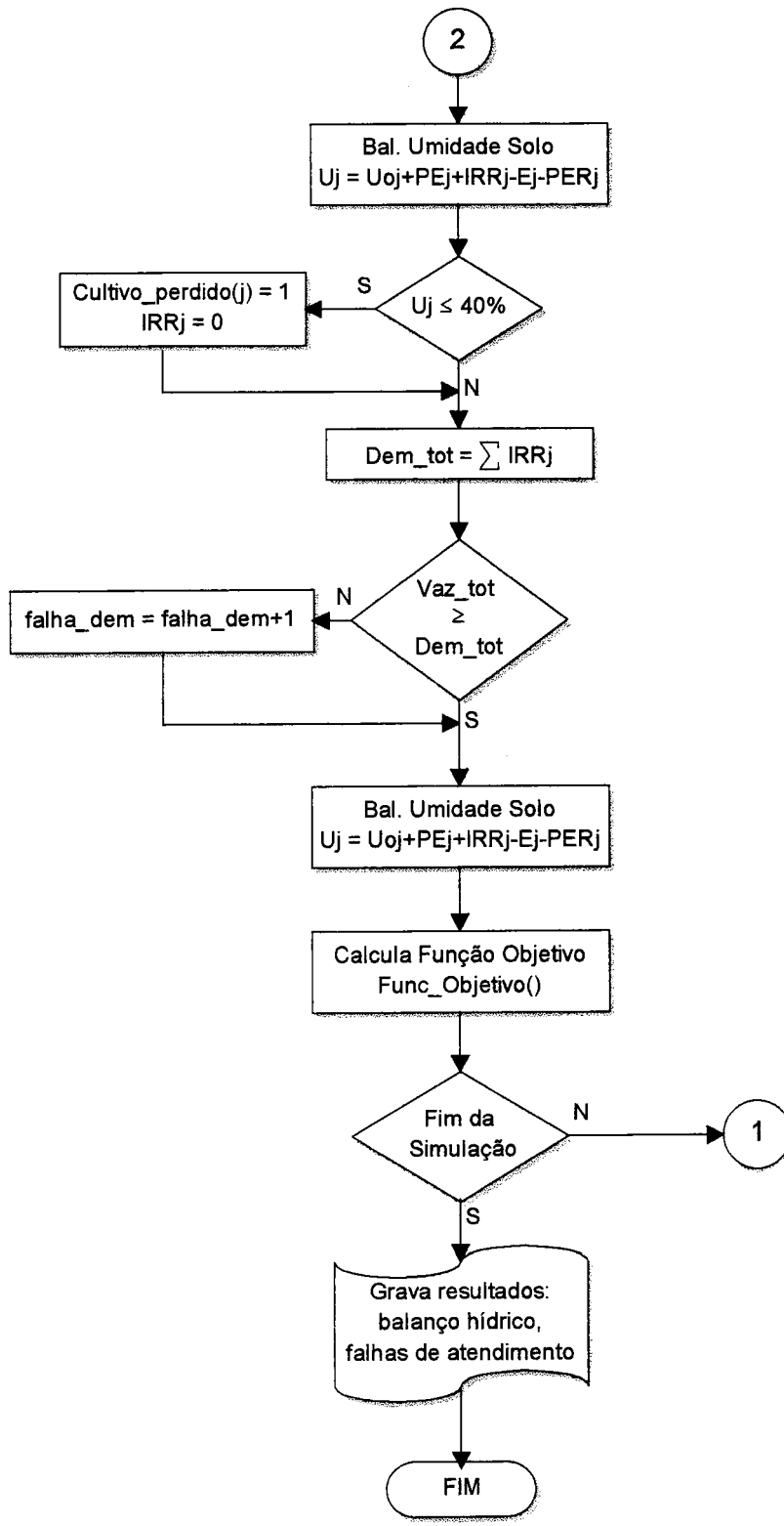


Figura 4.5b. Fluxograma do programa SIBAC

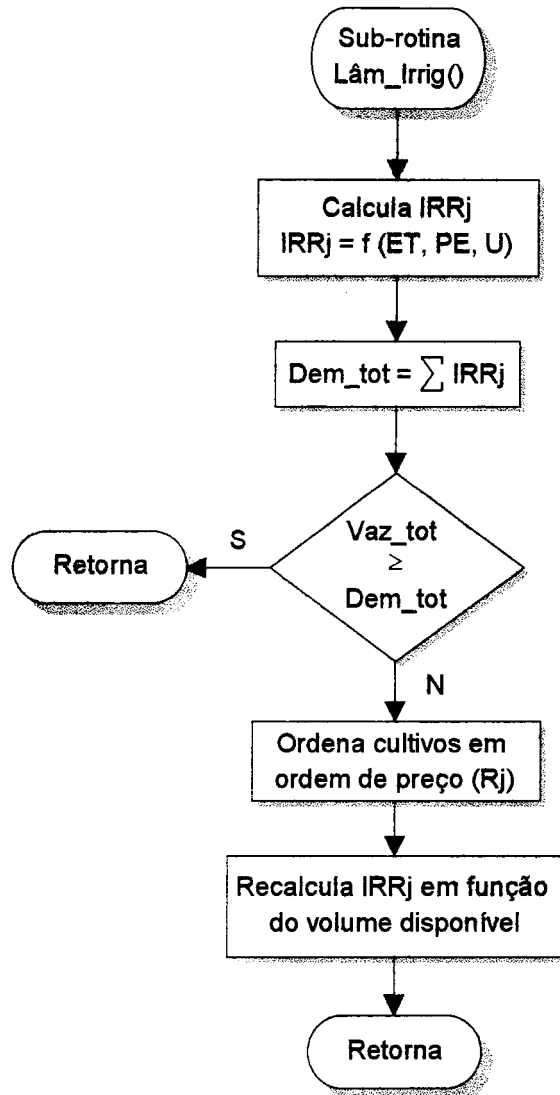


Figura 4.5c. Fluxograma do programa SIBAC

## Capítulo 5

# **Aplicação**

---

## 5. Aplicação:

### 5.1 Considerações:

Antes de proceder à aplicação do modelo na bacia em foco, é necessário ainda enfatizar algumas considerações para efeito de simplificação do problema, que passam a ser enumeradas abaixo:

1. Serão consideradas na otimização apenas aquelas culturas mais representativas dos grupos a que pertencem, sendo as culturas anuais (laranja e capim) consideradas em pleno desenvolvimento. Assim tem-se um total de sete culturas e cinco rotações que passam a ser descritas na tabela 5.1.
2. A precipitação a ser considerada na área dos cultivos será dada pela pluviometria do posto Açude Ipaguaçu (código 2779047) pertencente ao DNOCS. A precipitação sobre os reservatórios será dada pelos postos de medição instalados nos respectivos açudes.
3. Um modelo linear de crescimento de raízes será adotado, sendo o crescimento relativo dado mensalmente para cada cultivo. O comprimento máximo das raízes foi estimado com base nas recomendações da FAO.

**Tabela 5.1: Lista das culturas representativas**

<b>Grupo</b>	<b>Cultivos Representativos</b>	<b>Rotações</b>
1. Tradicionais	feijão, milho e algodão	Feijão/Algodão e Milho/Algodão
2. Hortícolas	pimentão e tomate	Tomate/Pimentão
3. Frutícolas	laranja	laranja
4. Forrageiras	capim	capim

Fonte: DNOCS (1987)

Tendo em vista que para se manter a compatibilidade com o modelo de programação linear, a função objetivo e suas restrições devem ser lineares, optou-se por abordar problema de otimização em duas fases: uma de otimização e outra de simulação. A otimização será aplicada no mesmo conjunto de dados considerando o futuro conhecido, em dois casos:

- 1º caso:
- A área cultivada será considerada uma variável de decisão, sendo limitada a valores positivos ( $A_j \geq 0$ ).
  - A lâmina de irrigação será considerada suficiente para atender totalmente a demanda agrícola ( $ETr_{i,j} = ETm_{i,j}$ ).
- 2º caso:
- A área cultivada será considerada constante e igual a área definida para cada cultura ( $A_j = A_j^*$ ).
  - A lâmina de irrigação será considerada uma variável de decisão, sendo limitada por seus valores positivos ( $IRR_{i,j} \geq 0$ ) e pela relação  $ETr/ETm \geq 0,5$ , restrição esta necessária para permitir a validade dos coeficientes de rendimento apresentados por Doorenbos e Kassam (1979).

Para o ambos os casos a função objetivo é semelhante. O que deve-se observar é que no 1º caso a relação  $ETr/ETm = 1$ , e portanto não há necessidade de se estimar a relação evapotranspiração relativa versus umidade do solo.

Os resultados obtidos com a otimização serão usados para esboçar regras de operação que serão testadas no modelo de simulação do processo (SIBAC) considerando desconhecidas as vazões futuras, de maneira a se obter uma sintonia fina dos resultados, e poder avaliar as regras com maior confiança. A simulação procurará o ponto ótimo entre os dois extremos obtidos na otimização, irrigar atendendo integralmente a demanda em uma área menor ou atender parcialmente a demanda em uma área maior.



## 5.2 Função Objetivo:

Como foi visto anteriormente a função objetivo é a que maximiza os benefícios líquidos do projeto. A função benefício expressa na equação 4.1, tem seu termo de rendimento ( $Y_{ij}$ ) dependente da evapotranspiração relativa e da umidade do solo. Dessa forma, antes de se definir a função objetivo, é necessário determinar a função de variação da evapotranspiração relativa com a umidade do solo.

Para simplificação do problema, adotou-se a linearização da função de Minhas et al. (1974). Considerou-se a função dividida em três trechos lineares, estimados como 0-35%, 35-70% e 70-100% da umidade do solo (figura 5.1), para os quais se determinou a evapotranspiração relativa ( $\epsilon_i$ ) para cada intervalo. Esta curva é utilizada para estimar a evapotranspiração real conhecendo-se a umidade do solo no período.

Pela dificuldade de obtenção da relação  $E_{Tr}/E_{Tm}$  como função da umidade do solo para as culturas da região, a mesma foi estimada com base no processo descrito no capítulo anterior (figura 4.4). Entretanto, como a curva de retenção de água no solo para a área do projeto (arenoso) não era conhecida, a mesma foi estimada através da curva de Haise e Hagan (1975) (apud Millar, 1989), que relaciona os níveis de água disponível e potencial matricial para diferentes texturas de solo. Com a curva de retenção do solo pode-se estimar a curva de “rendimento relativo versus umidade do solo”. A curva de Haise e Hagan é apresentada na figura 5.2.

A evapotranspiração relativa ( $\epsilon_i$ ) foi estimada para cada cultivo e para umidades inferiores a capacidade de campo, conforme descrito anteriormente (item 4.1), com base na equação 4.9. Considerou-se um fator de resposta da cultura ( $k_y$ ) correspondente ao período total de crescimento das culturas (tabela 5.2). Estes dados, para as diversas culturas, podem ser encontrados no manual 33 da FAO (Doorenbos e Kassam, 1979).

Os resultados podem ser vistos na tabela 5.2 e na figura 5.1.

Os erros que podem ser gerados com esta metodologia são devidos aos seguintes fatores:

- a estimativa da curva de retenção, obtida através de uma curva média, pode não ser representativa para as características do solo da região;
- o fator de resposta da cultura ao déficit hídrico ( $k_y$ ) é uma questão complexa e podem haver diferenças entre os valores estimados e o valor real deste coeficiente;
- as características dos cultivos e as condições climáticas reinantes na região podem gerar valores de rendimento relativo diferentes daqueles estimados pelas curvas de Millar (1989).

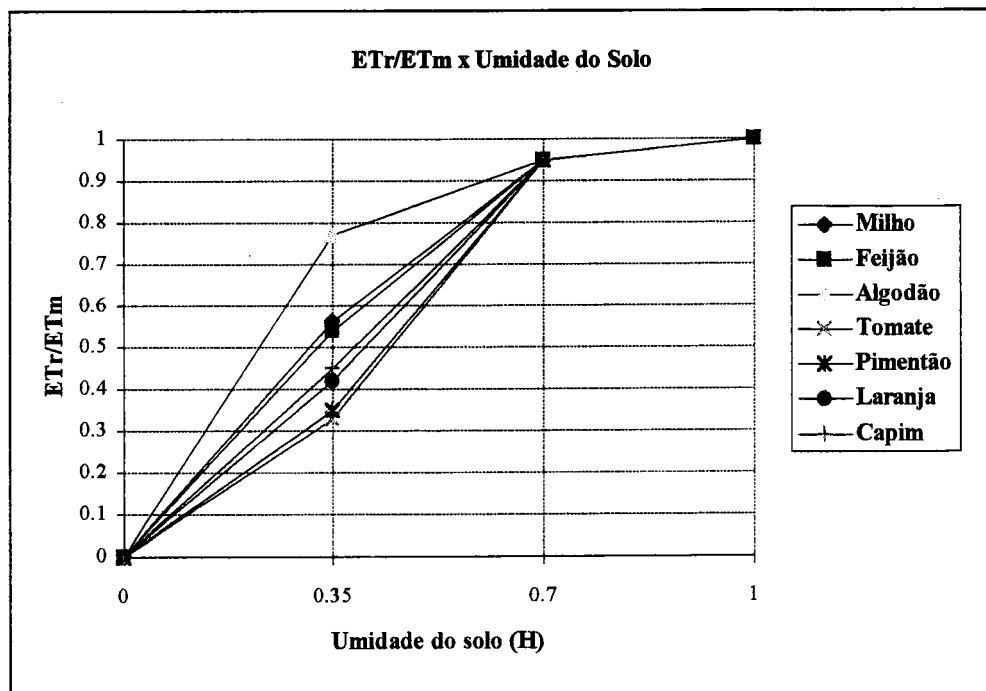


Figura 5.1: Curvas de ET relativa x umidade do solo para as culturas selecionadas

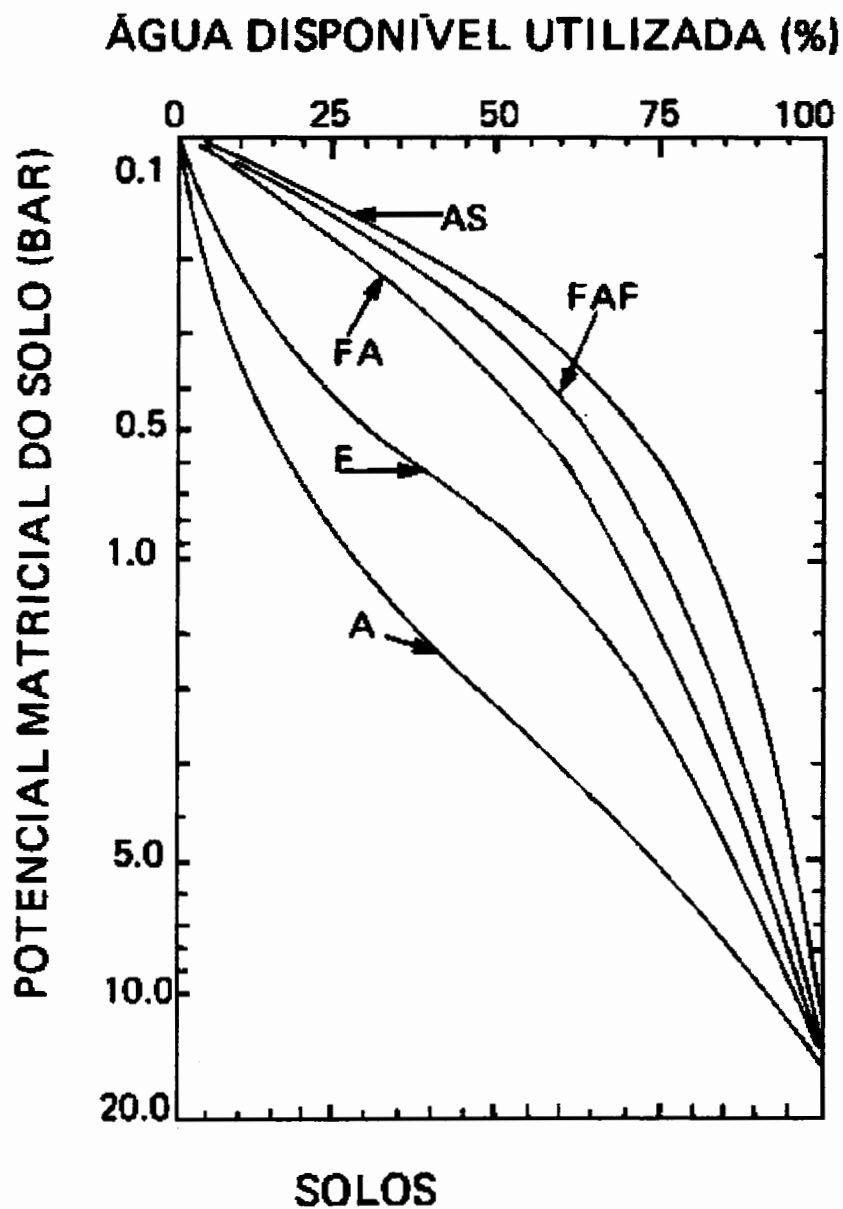


Figura 5.2: Relação entre níveis de água disponível e potencial matricial para diferentes texturas de solo (Fonte: Millar, 1989)

**Tabela 5.2: ETr/ETm e Y/Ym para 35% e 70% de umidade de solo**

<b>Cultura</b>	<b>Fator de Resposta (<i>ky</i>)</b>	<b>Rend. Relativo <i>Y/Ym</i> (35%)</b>	<b>Rend. Relativo <i>Y/Ym</i> (70%)</b>	<b><i>ET</i> Relativa <i>ETr/ETm</i><sup>1</sup> (35%)</b>	<b><i>ET</i> Relativa <i>ETr/ETm</i> (70%)</b>
1. Feijão	1.15	47%	98%	54% (55) <sup>2</sup>	98% (95)
2. Milho	1.25	45%	98%	56% (55)	98% (95)
3. Algodão	0.85	81%	98%	77% (75)	98% (95)
4. Tomate	1.05	30%	98%	33% (35)	98% (95)
5. Pimentão	1.05	30%	98%	35% (35)	98% (95)
6. Laranja	0.95	45%	98%	42% (40)	98% (95)
7. Capim	0.95	50%	98%	47% (45)	98% (95)
Média	-	47%	98%	48% (50)	98% (95)

<sup>1</sup> valores calculados com a equação:  $1 - Y/Ym = ky \cdot (1 - ETr/ETm)$ .

<sup>2</sup> os valores constantes entre parênteses são percentuais arredondados.

Apesar dos erros intrínsecos ao processo pode-se considerar que, na inexistência de dados para o local, essa metodologia é bastante razoável, uma vez que contorna as dificuldades técnicas e econômicas que as medições de campo destas variáveis podem demandar.

Considerando que os valores obtidos foram bastante próximos para as diversas culturas (ver figura 5.1), e levando em conta as imprecisões inerentes às estimativas, adotou-se como simplificação, para efeito de cálculo, uma curva única para todas as culturas, apresentada na figura 5.3.

O trecho da curva correspondente ao termo  $h_3$  não faz parte da função original de Minhas et al. (1974) e representa apenas uma penalização imposta na função objetivo a fim de limitar o excesso de água além da capacidade de campo ( $H > 100\%$ ), uma vez que esta não será utilizada pela planta. Este tipo de procedimento foi anteriormente aplicado por Dorfman (1985) quando da aplicação de um modelo de produtividade relativa versus umidade de solo.

Estimados os parâmetros  $\varepsilon_i$ , os parâmetros  $\alpha_i$  podem ser estimados com base nas relações:

$$\alpha_1 = (\varepsilon_1 - 0,50) / 0,33 = (0,95 - 0,50) / 0,33 = 1,364 \quad (5.1)$$

$$\alpha_2 = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) / 0,30 = (1,0 - 0,95) / 0,30 = 0,167 \quad (5.2)$$

$$\alpha_3 = (\varepsilon_3 - 1,0) / 0,25 = (0,5 - 1,0) / 0,25 = -2,00 \quad (5.3)$$

Dessa forma, para cada cultura vem:

$$0 \leq H_{ij} \leq 0,70 \quad \longrightarrow \quad 0 \leq ETr/ETm \leq \varepsilon_1 = 0,95$$

$$0,70 < H_{ij} \leq 1,00 \quad \longrightarrow \quad \varepsilon_1 < ETr/ETm \leq \varepsilon_2 = 1,00$$

$$1,00 < H_{ij} \leq 1,25 \quad \longrightarrow \quad \varepsilon_2 < ETr/ETm \leq \varepsilon_3 = 0,50$$

sendo  $H$  o percentual de umidade disponível no solo, e  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  e  $\varepsilon_3$  a evapotranspiração relativa para os trechos 1, 2 e 3 respectivamente, sendo  $\varepsilon_1 = 0,95$ ,  $\varepsilon_2 = 1,00$  e  $\varepsilon_3 = 0,50$  (ver figura 5.3).

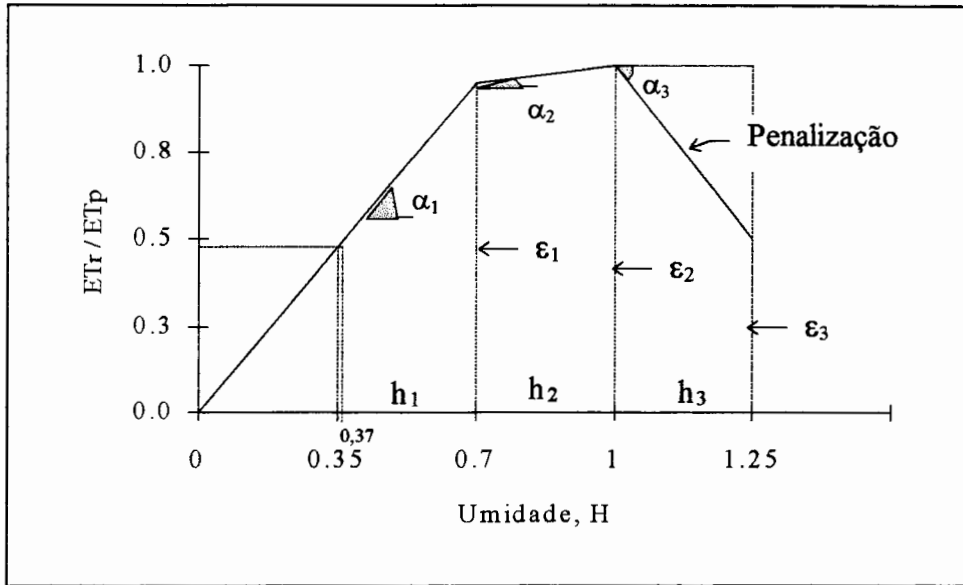


Figura 5.3: Curva ET relativa x umidade do solo

Com a linearização, a função “evapotranspiração relativa versus umidade do solo” passa a ser escrita como:

$$\begin{aligned}
 ETr/ETm_{ij} &= \alpha_1(j) \cdot h_1(i,j) + \alpha_2(j) \cdot h_2(i,j) + \alpha_3(j) \cdot h_3(i,j) \\
 &= 1,364 \cdot h_1(i,j) + 0,167 \cdot h_2(i,j) - 2,00 \cdot h_3(i,j)
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

sendo  $\alpha_1(j) > \alpha_2(j) > \alpha_3(j)$ .

O percentual de umidade disponível no solo passa a ser representado pela soma das três variáveis auxiliares:

$$H(i,j) = h_1(i,j) + h_2(i,j) + h_3(i,j)
 \tag{5.5}$$

sendo:

$$0,37 \leq h_1(i,j) \leq 0,70$$

$$0 \leq h_2(i,j) \leq 0,30$$

$$0 \leq h_3(i,j) \leq 0,25$$

e  $h_{p+1} > 0$  quando  $H_q = h_q$  para  $q \leq p$ .

Cabe ressaltar aqui que a função de produção utilizada só é válida para valores de  $ETr/ETm \geq 0,5$ , desta forma só são consideradas no modelo umidades de solo superiores a 37%.

A função benefício anual resultante para o 2º caso, é dada por:

$$\begin{aligned}
 B_t = & \frac{1}{(1+d)^t} \cdot \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^{12} Ym_j \cdot A_j \cdot R_j - \frac{1}{(1+d)^t} \cdot \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^{12} Ym_j \cdot ky_{i,j} \cdot A_j \cdot R_j \\
 & + \frac{1}{(1+d)^t} \cdot \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^{12} Ym_j \cdot ky_{i,j} \cdot A_j \cdot R_j \cdot (1,364 \cdot h_1)_{i,j} \\
 & + \frac{1}{(1+d)^t} \cdot \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^{12} Ym_j \cdot ky_{i,j} \cdot A_j \cdot R_j \cdot (0,167 \cdot h_2)_{i,j} \\
 & - \frac{1}{(1+d)^t} \cdot \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^{12} Ym_j \cdot ky_{i,j} \cdot A_j \cdot R_j \cdot (2,00 \cdot h_3)_{i,j}
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

Como para o 1º caso, a relação  $ETr/ETm = 1$ , a função benefício anual resultante é dada por:

$$B_t = \frac{1}{(1+d)^t} \cdot \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^{12} Ym_j \cdot A_j \cdot R_j \tag{5.7}$$

Observa-se aqui que a variação do índice  $j$  refere-se ao número de rotações que são cinco, ao invés do número de cultivos que são sete. O fato de considerar-se o número de rotações e não de cultivos, é simplesmente uma simplificação computacional adotada para facilitar a formulação, e não altera em nada a concepção do problema

Os dados de produção máxima ( $Ym$ ), preço de venda ( $R_j$ ) e a área máxima ( $Amax_j$ ) e mínima ( $Amin_j$ ) de cada cultivo são apresentados na tabela 5.3.

A determinação do fator de resposta da cultura ( $ky$ ), bem como dos coeficientes de cultivo ( $kc$ ) necessários para a determinar a evapotranspiração potencial, foram efetuadas, para cada mês, em conformidade com as recomendações constantes no manual 3 da FAO (FAO, 1988). Os valores utilizados neste trabalho são apresentados na tabela 5.4.

O custo total de irrigação (captação, transporte e destinação) é dependente da lâmina de irrigação, da área irrigada, da eficiência de aplicação e do custo da água. A função de custo anual ( $CV_t$ ), dada pela equação 5.8, é representado no 2º caso por:

$$CV_t = \frac{1}{(1+d)^t} \cdot \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^{12} IRR_{i,j} \cdot 0,16 \cdot A_j \cdot \frac{1}{EFT_j} \quad (5.8)$$

onde  $IRR_{i,j}$  a lâmina de irrigação aplicada à cultura  $j$  no mês  $i$ (mm);  $EFT_j$  a eficiência de total de irrigação para a cultura  $j$ ;  $A_j$  a área de irrigação da cultura  $j$  no mês  $i$  (ha).

Para o 1º caso entretanto, deve-se adicionar à equação 5.8 os custos variáveis de maquinário, mão-de-obra, e insumos por hectare, dados na tabela 3.8 (capítulo 3).

**Tabela 5.3: Produção, preço e áreas para cada cultivo selecionado**

<b>Cultura</b>	<b>Ym</b>	<b>Preço (R<sub>j</sub>)<sup>1</sup></b>	<b>Área Máx.</b>	<b>Área Min.</b>
	<b>(kg/ha)</b>	<b>(Cz\$/kg)</b>	<b>(ha)</b>	<b>(ha)</b>
1. Feijão	1.500	22,0 (\$ 0.45)	10.137	1.170
2. Milho	4.000	4,7 (\$ 0.10)	20.210	360
3. Algodão	2.500	30,0 (\$ 0.60)	6.512	810
4. Tomate	10.000	5,7 (\$ 0.11)	1.058	558
5. Pimentão	4.000	20,0 (\$ 0.40)	1.058	558
6. Laranja	14.320	9,5 (\$ 0.20)	6.255	255
7. Capim	111.250	0,988 (\$ 0.02)	10.710	600

<sup>1</sup> Os valores entre parênteses correspondem ao valores em dólar: US\$ 1,0 = Cz\$ 50,0

Fonte: DNOCS (1987)



**Tabela 5.4: Valores de  $kc$ ,  $ky$  e  $ETm$  para as culturas selecionadas**

Cultura		Mês											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Feijão	kc		0,40	0,80	1,05	0,20							
	ky	-	0,20	0,50	1,10	0,50	-	-	-	-	-	-	-
	ETm		57	104	124	24							
2. Milho	kc		0,50	0,80	1,10	0,75	0,15						
	ky	-	0,40	0,58	1,50	0,66	0,08	-	-	-	-	-	-
	ETm		71	104	130	92	19						
3. Algodão	kc							0,20	0,70	0,95	1,15	0,65	0,40
	ky	-	-	-	-	-	-	0,10	0,20	0,35	0,50	0,30	0,12
	ETm							30	123	179	233	125	77
4. Tomate	kc			0,50	0,85	1,10	0,80						
	ky	-	-	0,40	0,63	1,10	0,85	-	-	-	-	-	-
	ETm			65	100	134	103						
5. Pimentão	kc								0,50	0,85	1,10	0,75	
	ky	-	-	-	-	-	-	-	0,40	0,63	1,10	0,85	
	ETm								94	171	212	144	
6. Laranja	kc	0,70	0,65	0,65	0,65	0,65	0,70	0,70	0,70	0,75	0,75	0,70	0,70
	ky	0,85	0,80	0,70	0,40	0,30	0,30	0,40	0,50	0,50	0,95	1,10	0,95
	ETm	127	93	85	77	80	90	106	123	141	152	135	134
7. Capim	kc	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	ky	0,90	0,90	0,90	0,95	0,90	0,95	0,90	0,95	0,90	0,90	0,90	0,95
	ETm	182	143	130	118	122	129	152	175	188	202	193	192

Para a irrigação por aspersão a eficiência de aplicação foi adotada como 58%, e para a irrigação localizada (frutais) como 69%. Já o custo unitário da água foi estimado, no estudo de viabilidade, em torno de US\$ 0,016 o metro cúbico, para cobrir despesas de manutenção e conservação das obras, equipamentos e instalações, bem como o consumo de energia, sem recuperar os investimentos.

O custo de irrigação depende também, além destes fatores, de uma política governamental de cobrança pelo uso da água. Há vários países, como a França, onde essa política já foi implementada com sucesso. Não queremos aqui nos deter aos princípios modernos que regem essa cobrança, já conhecidos e citados na literatura especializada, mas somente lembrar que em muitos estados brasileiros já há movimentos nesse sentido. No Ceará, a Companhia Estadual de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) se encontra hoje efetuando estudos no sentido de se estabelecer uma política estadual nesse sentido, mas até o momento da realização deste trabalho não se tinha um valor estabelecido.

### 5.3 Restrições:

#### 5.3.1 *Balanço Hídrico no Solo:*

O balanço hídrico no solo é obtido pela equação geral 4.10.

Em estudos anteriores, como no estudo de viabilidade, é comum se considerar a precipitação efetiva como 75% da precipitação total, o que é bastante razoável para a região, devido às suas características pluviométricas, já descritas anteriormente.

Entretanto, considerou-se esta metodologia pouco satisfatória para a realização deste estudo, e foi adotada a metodologia proposta pela FAO (1988) que especifica a seguinte equação para terrenos com declividade entre (4 e 5%):

$$\begin{aligned} PE_{ij} &= 0,8 \cdot P - 25, \quad \text{se } P \geq 75 \text{ mm} \\ &= 0,6 \cdot P - 10, \quad \text{se } P < 75 \text{ mm} \end{aligned} \tag{5.9}$$

sendo  $P$  a precipitação total (mm) e  $PE_{ij}$  a precipitação efetiva (em mm).

A umidade do solo, em *mm*, é dada por:

$$U_{ij} = (h_1 + h_2 + h_3)_{ij} \cdot FS_{ij} \quad (5.10)$$

sendo  $FS_{ij}$  o fator de água no solo, em *mm*, dado pela equação 4.13.

Considerando *CC*, a capacidade de campo, igual a 12,62 %; *PM*, o ponto de murcha, igual a 3,08 %, e  $\gamma$ , a densidade aparente do solo, igual a 1,72 g/cm<sup>3</sup>, e substituindo na equação 4.13, resulta em:

$$FS_{ij} = 1,64 \cdot Prad_{ij} \quad (5.11)$$

sendo  $Prad_{ij}$  a profundidade média do sistema radicular da cultura *j* no mês *i* (cm).

Pela falta de informações sobre a profundidade das raízes em cada mês a mesma foi estimada com base num modelo de crescimento linear. Para tal, foi necessário estimar a profundidade máxima do sistema radicular com base nas recomendações da FAO e estimar a profundidade do sistema pela equação:

$$Prad_{ij} = Pr_{max\ j} \cdot Rf_{ij} \quad (5.12)$$

sendo  $Pr_{max\ j}$  a profundidade máxima do sistema radicular da cultura *j*,  $Rf_{ij}$  o fator de crescimento mensal das raízes dado por:

$$Rf_{ij} = \left( \frac{Da}{Dm} \right)_{i,j} \quad (5.13)$$

sendo *Da* e *Dm* o número de meses atual e de máximo crescimento das raízes.

Os valores da profundidade radicular máxima e mensal, bem como a duração de cada fase do ciclo fenológico para cada cultura são apresentados na tabela 5.5.

Entende-se aqui que uma cultura em pleno desenvolvimento tem seu sistema radicular totalmente formado e a sua produção seja a máxima permitida. Na tabela acima observa-se que para as culturas anuais (laranja e capim) não se considerou variação de comprimento das raízes, uma vez que foi suposto que estas culturas se encontram na fase de pleno desenvolvimento. Esta suposição foi incorporada ao modelo devido ao fato de que, cultivos anuais de citros como a laranja, podem atingir seu pleno desenvolvimento somente depois de 8 a 10 anos de vida (Dooenbos e Kassam, 1979), tendo sua produção variando crescentemente ao longo deste período. Com esta simplificação evita-se que se tenha de considerar no modelo valores da produção máxima ( $Ym$ ) variáveis ao longo dos anos.

Os projetos de irrigação no Nordeste ainda não são monitorados a ponto de irrigar em função da umidade do solo e da precipitação em cada instante. Na prática tem-se um “programa de irrigação” baseado no calendário agrícola e nas vazões de projeto. As lâminas de irrigação são pré-estabelecidas e somente não serão fornecidas caso haja falta de recurso hídrico disponível (regra padrão de decisão).

Uma consideração a ser feita sobre o termo de evaporação ou evapotranspiração, ( $E_{i,j}$ ), é que analisando o plano de cultivo apresentado na tabela 3.2 (capítulo 3) verifica-se a existência ao longo do ano, de meses cultivados e outros em que não se tem cultivo. Para os meses sem cultivo considerou-se que a evaporação do solo nu será proporcional ao volume de água disponível na profundidade radicular de 10 cm ( $FS = 16,4$  mm). Assim:

$$E_{i,j} = [ h_1(i,j) + h_2(i,j) ] \cdot 16,4 \quad (5.14)$$

válida para  $H_{i,j} \leq 1,0$ . Para  $H_{i,j} > 1,0$  temos:  $E_{i,j} = E_{max} = 16,4$  mm/mês.

A evaporação de cada área cultivada é dada pela evapotranspiração real ( $ETr$ ) do cultivo:

$$\begin{aligned} ETr_{i,j} &= [ \alpha_1(j) \cdot h_1(i,j) + \alpha_2(j) \cdot h_2(i,j) ] \cdot ETm_{i,j} \\ &= [ 1,364 \cdot h_1(i,j) + 0,167 \cdot h_2(i,j) ] \cdot ETm_{i,j} \end{aligned} \quad (5.15)$$

válida para  $H_{i,j} \leq 1,0$ . Para  $H_{i,j} > 1,0$  temos:  $ETr_{i,j} = ETm_{i,j}$ .

**Tabela 5.5: Profundidade do sistema radicular e período de desenvolvimento dos cultivos**

<b>Cultura</b>	<b>Desenvolvimento <sup>1</sup> (dias)</b>	<b>Profundidade Radicular Máxima (<math>Pr_{max}</math>) <sup>2</sup> (cm)</b>	<b>Profundidade das Raízes <sup>3</sup> (cm)</b>
1. Feijão	20, 30, 40, 20 (110)	50	15, 30, 50, 50
2. Milho	20, 35, 40, 30 (125)	70	20, 40, 60, 70, 70
3. Algodão	20, 40, 50, 40 (150)	70	15, 35, 55, 65, 70, 70
4. Tomate	20, 30, 45, 25 (120)	60	20, 40, 60, 60
5. Pimentão	20, 30, 45, 25 (120)	50	15, 35, 50, 50
6. Laranja	(365)	100	100
7. Capim	(365)	100	100

<sup>1</sup> Dias correspondentes às fases: inicial, desenvolvimento, intermediária, final, e total.

<sup>2</sup> Profundidade máxima alcançada para efeito de irrigação (cerca de 2/3 da profundidade real máxima)

<sup>3</sup> Profundidade em cada mês do ciclo fenológico da cultura.

Fonte: FAO (1988)

Uma consideração importante é que deve-se prever no modelo matemático o termo de irrigação um mês antes do início do plantio, para que se garanta a umidade mínima para o primeiro mês de cultivo necessária para a germinação da cultura.

Desse modo, há quatro situações analisadas, baseadas no calendário agrícola, em que é diferenciado o uso da equação de balanço do solo:

- caso 1: quando há dois meses consecutivos sem cultivo;
- caso 2: quando apenas o segundo mês é cultivado;
- caso 3: quando dois meses consecutivos são cultivados;
- caso 4: quando apenas o primeiro mês é cultivado;

Assim as equações de balanço no solo para cada caso passam a ser:

- caso 1:

$$\begin{aligned}
 &FS_{i+1,j} \cdot h_1(i+1,j) + FS_{i+1,j} \cdot h_2(i+1,j) + FS_{i+1,j} \cdot h_3(i+1,j) = \\
 &[FS_{i,j} - 16,4] \cdot h_1(i,j) + [FS_{i,j} - 16,4] \cdot h_2(i,j) \\
 &+ FS_{i,j} \cdot h_3(i,j) + PE_{i,j} - PER_{i,j}
 \end{aligned} \tag{5.16}$$

- caso 2:

$$\begin{aligned}
 &FS_{i+1,j} \cdot h_1(i+1,j) + FS_{i+1,j} \cdot h_2(i+1,j) + FS_{i+1,j} \cdot h_3(i+1,j) = \\
 &[FS_{i,j} - 16,4] \cdot h_1(i,j) + [FS_{i,j} - 16,4] \cdot h_2(i,j) + \\
 &+ FS_{i,j} \cdot h_3(i,j) + PE_{i,j} + IRR_{i,j} - PER_{i,j}
 \end{aligned} \tag{5.17}$$

- caso 3 e 4:

$$\begin{aligned}
 &FS_{i+1,j} \cdot h_1(i+1,j) + FS_{i+1,j} \cdot h_2(i+1,j) + FS_{i+1,j} \cdot h_3(i+1,j) = \\
 &[FS_{i,j} - 1,364 \cdot ETm_{i,j}] \cdot h_1(i,j) + [FS_{i,j} - 0,167 \cdot ETm_{i,j}] \cdot h_2(i,j) + \\
 &[FS_{i,j} + 2,0 \cdot ETm_{i,j}] \cdot h_3(i,j) + PE_{i,j} + IRR_{i,j} - PER_{i,j}
 \end{aligned} \tag{5.18}$$

### 5.3.2 Balanço Hídrico nos Reservatórios:

O balanço hídrico nos reservatórios é expresso pela equação geral dada pela equação 4.17.

A diferença entre o volume precipitado e evaporado, aqui denominado de volume efetivo precipitado, é dado por:

$$\Delta V_{i,r} = (P_{i,r} - EV_{i,r}) \cdot \left[ a_r + b_r \cdot \frac{S_{i,r} + S_{i,r}}{2} \right] 10^{-5} \quad (5.19)$$

onde os termos  $a_r$  e  $b_r$  são os coeficientes da regressão linear aplicada à curva área-volume do reservatório sendo dados na tabela 3.5 (capítulo 3), e os termos  $P_{i,r}$  e  $EV_{i,r}$  dados em mm, são a precipitação e a evaporação sobre os reservatórios.

Para o açude Poço Comprido inicialmente usou-se os coeficientes da tabela 3.5, posteriormente observou-se que estes superestimam a área da superfície líquida para pequenos volumes acumulados, quando aplicados a uma capacidade máxima de 85 hm<sup>3</sup>. Então, os mesmos foram reformulados. Os novos coeficientes obtidos foram:  $a_r = 263,100$  e  $b_r = 14,469$ .

Substituindo e simplificando a equação 5.19 na equação do balanço, tem-se para cada reservatório a equação correspondente:

- Balanço no reservatório Araras ( $r = 1$ ):

$$S_{i+1,1} \cdot C_1(i,1) - S_{i,1} \cdot C_2(i,1) + QE_{i,1} = C_3(i,1) \quad (5.20)$$

- Balanço no reservatório Poço Comprido ( $r = 2$ ):

$$S_{i+1,2} \cdot C_1(i,2) - S_{i,2} \cdot C_2(i,2) + QE_{i,2} = C_3(i,2) \quad (5.21)$$

- Balanço no reservatório Edson Queiroz ( $r = 3$ ):

$$S_{i+1,3} \cdot C_1(i,3) - S_{i,3} \cdot C_2(i,3) + QE_{i,3} = C_3(i,3) \quad (5.22)$$

- Balanço no reservatório Taquara ( $r = 4$ ):

$$S_{i+1,4} \cdot C_1(i,4) - S_{i,4} \cdot C_2(i,4) + QE_{i,4} = C_3(i,4) \quad (5.23)$$

- Balanço no reservatório Ayres de Souza ( $r = 5$ ):

$$S_{i+1,5} \cdot C_1(i,5) - S_{i,5} \cdot C_2(i,5) + QE_{i,5} = C_3(i,5) \quad (5.24)$$

onde:

$$C_1(i,r) = 1 - \frac{P_{i,r} - EV_{i,r}}{2} \cdot 10^{-5} \cdot b_r \quad (5.25)$$

$$C_2(i,r) = 1 + \frac{P_{i,r} - EV_{i,r}}{2} \cdot 10^{-5} \cdot b_r \quad (5.26)$$

$$C_3(i,r) = (P_{i,r} - EV_{i,r}) \cdot 10^{-5} \cdot a_r + QA_{i,r} - DEM_{i,r} \quad (5.27)$$

Os termos  $DEM_{i,1}$  e  $DEM_{i,5}$  representam a demanda do projeto Araras Norte e do abastecimento da cidade de Sobral ( $DEM_{i,5} = 2,592 \text{ hm}^3/\text{mês}$ ) aos açudes Araras e Ayres de Sousa, respectivamente, inexistindo para os demais açudes. A demanda para o projeto Araras Norte foi dada no capítulo 3 (tabela 3.7).

Deve-se observar, ainda, que as vazões afluentes ao reservatório Ayres de Sousa são iguais às vazões defluentes do açude Taquara ( $QA_{i,5} = QE_{i,4}$ ).

A vazão mensal no ponto de captação deve ser suficiente para atender a demanda do perímetro Baixo Acaraú. Esta vazão é estimada pela equação 4.18.

A eficiência global de irrigação caracteriza as perdas por adução, distribuição e aplicação ao longo do percurso, sendo considerada 0,58 para aspersão e 0,69 para gotejamento.



Admitindo uma perda total de 10% da vazão que chega até o ponto de captação, devido às perdas por evaporação, percolação e abastecimento das populações ribeirinhas; a equação de balanço no ponto de derivação passa a ser dada por:

$$0,9 \cdot [QE_{1,i} + QE_{2,i} + QE_{3,i} + QE_{4,i} + QJ_i + QTr_i] \geq QP_i \quad (5.28)$$

sendo  $QE_{r,i}$  a vazão defluente do reservatório  $r$  no mês  $i$  ( $\text{hm}^3$ );  $QJ_i$  a vazão de contribuição do Rio Jacurutu no mês  $i$  ( $\text{hm}^3$ ); e  $QTr_i$  a contribuição do trecho, em  $\text{hm}^3$ , entre o ponto de captação e o sistema a montante.

Com relação à equação anterior, duas considerações devem ser feitas:

- o termo de vazão relativa à contribuição do Rio Jacurutu foi introduzida devido ao açude Pedregulho, previsto para este rio, não fazer parte do sistema adotado para o estudo;
- na equação de balanço no ponto de derivação somente são considerados quatro açudes, uma vez que, mesmo o sistema possuindo cinco açudes, os açudes Taquara e Ayres de Sousa estão localizados no mesmo afluente havendo, portando, somente quatro afluentes ao rio Acaraú.

#### 5.4 A Aplicação Computacional:

A solução da parte de otimização do problema foi feita através do software computacional HOPDM, que faz parte da biblioteca de rotinas HOPDM (Higher Order Primal-Dual Method) para solução de problemas de programação linear.

Foram gerados os arquivos de entrada no formato padrão MPS (Mathematical Programming Systems) para cada um dos dois casos em estudo (área fixa e área variável) usando uma abordagem determinística, ou seja, com futuro totalmente conhecido. Isto servirá como ponto de partida para uma avaliação da operação do sistema, sob este âmbito, e posteriormente se obter uma regra de operação do sistema para um futuro desconhecido.

Para geração dos arquivos, foi considerada um série de 54 anos (1935 a 1988). Pensou-se a princípio na utilização do supercomputador da marca CRAY para otimizar o modelo. Entretanto, devido a rapidez de convergência do programa, o mesmo foi otimizado usando-se apenas uma estação de trabalho Silicon Graphics, com 64 MB de memória, localizada no Centro de Supercomputação da UFRGS.

Para o 1º caso, em que se considera área variável, um único arquivo foi gerado. Aqui procura-se saber qual a maior área que se poderia irrigar sem que haja estresse hídrico em qualquer das culturas, ou seja, atendendo toda a demanda e ao mesmo tempo mantendo o solo sempre na capacidade de campo.

Para o 2º caso foram consideradas 4 taxas de descontos anuais 0%, 5%, 8% e 12% a.a., para se avaliar os resultados do modelo sob estes quatro cenários. Cada taxa de desconto foi aplicada em 5 outras situações diferentes, com as áreas cultivadas variando em 25%, 50%, 75%, 100% da área total disponível para o projeto de irrigação Baixo Acaraú (cerca de 31.064 ha), além da área ótima proposta pelo estudo de viabilidade (cerca de 16.780 ha), estimada em cerca de 54% da área potencial disponível.

Existem portanto, nesta segunda hipótese, 20 cenários diferentes para os quais foram gerados os arquivos de entrada do programa. Objetiva-se nesta etapa conhecer como os reservatórios do sistema são operados sob futuro conhecido e tentar fazer uma avaliação do comportamento do mesmo, procurando algum padrão de operação que possa servir de base para a derivação da regra de operação de todo o sistema, na situação real, em que o futuro é incerto.

Durante a etapa de otimização, uma modificação nas restrição de balanço hídrico do açude Poço Comprido fez-se necessária para evitar uma inviabilidade no processo de otimização. Mesmo com a reformulação da curva área-volume, anteriormente comentada, o reservatório atingiu durante o período de 79 a 84, caracterizado como uma das mais severas secas já ocorridas no Estado do Ceará, seu período mais crítico.

Nesse período, o açude chegou a atingir cotas inferiores a cota mínima de operação do sistema onde, mesmo sem qualquer retirada de água do reservatório, este secou quase que totalmente, pela ação exclusiva da evaporação d'água, o que causava uma inviabilidade devido à restrição de volume mínimo ( $S \geq S_{min}$ ).

Para que a inviabilidade pudesse ser contornada, a restrição de volume mínimo foi modificada para ( $S \geq 0$ ) e, além disso, as retiradas do reservatório foram evitadas, adicionando-se a restrição ( $QE = 0$ ). Procedimento semelhante foi também adotado por Valdés et al. (1992).

Após a otimização determinística do sistema, o modelo de simulação passou a ser aplicado para se avaliar a resposta do sistema sob futuro incerto. A simulação foi feita durante um período de 77 anos (1912 a 1988) com intervalos mensais, onde se avaliou as garantias do sistema. O custo da incerteza foi avaliado pelo número de falhas no atendimento das demandas.

Os resultados podem ser vistos no capítulo seguinte.

## Capítulo 6

# Resultados

---

## **6. Resultados:**

### **6.1 Primeiro Caso: Área Variável**

Neste caso o modelo de otimização procura encontrar a máxima área anual que pode ser alocada atendendo-se integralmente as demandas hídricas. Entende-se como máxima área anual, aquela correspondente a maior área que pode ser alocada para irrigação no projeto Baixo Acaraú, com a água que fica disponível após o atendimento das demandas pontuais de Sobral e Araras Norte.

O problema resultante, neste caso, consta de 4.109 restrições e cerca de 7.403 variáveis, sendo a otimização realizada em cerca de 39 segundos e um total de 43 iterações. Como pode-se verificar aqui, a eficiência do método de otimização fica comprovada pela sua rápida convergência, e rapidez de execução, o que é essencial em problemas de grande dimensões.

Com os resultados desta etapa da otimização pode-se verificar que o sistema tem capacidade de atender um projeto de irrigação com área maior que aquela proposto pelo estudo de viabilidade. Na tabela 6.1 pode-se ver o histograma das áreas máximas que podem ser irrigadas anualmente, considerando-se o mesmo plano de cultivo adotado no Estudo de Viabilidade. Alerta-se aqui que, em face do grande volume de dados resultante, evitou-se apresentá-los em sua totalidade, e preferiu-se apenas apresentar os resultados das avaliações efetuadas neste trabalho.

Pode-se verificar que em mais de 60% dos anos se pode irrigar uma área superior aos 16.780 ha propostos pelo estudo, o que leva à conclusão que o sistema encontra-se, na maior parte do tempo, superdimensionado para o atendimento unicamente da demanda do projeto Baixo Acaraú.

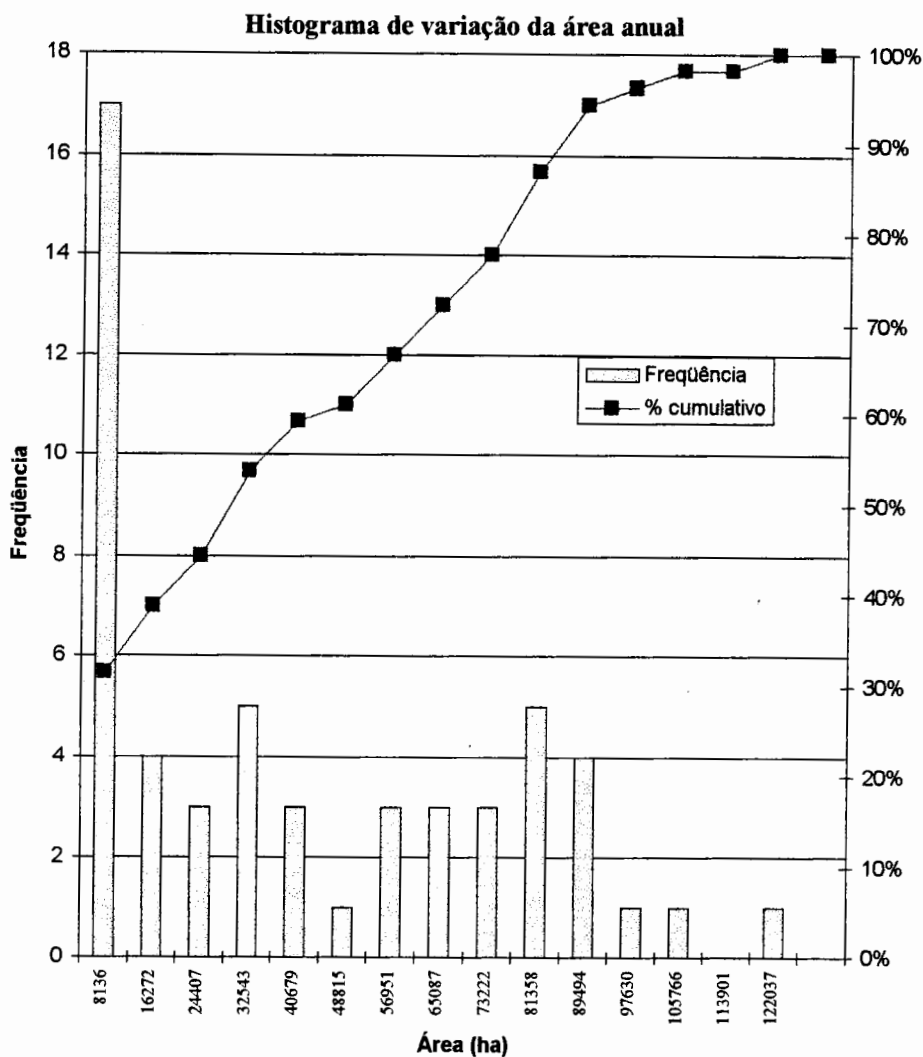
Neste modelo a área é geralmente alocada anualmente para usar toda a água disponível, e pouco se reserva para o ano seguinte. Isso levou, durante a otimização, a uma inviabilidade que ocorreu durante os anos de seca mais intensa, em que os cultivos não puderam ser atendidos com a área mínima imposta, pois com essa área não se podia atender a demanda com a água disponível. Uma explicação para este resultado é a alta evaporação dos reservatórios

que determina ser melhor o uso da água no presente que armazená-la para uso futuro, e assim perdê-la por evaporação. O problema foi resolvido, através da redução da área mínima em 60%.

**Tabela 6.1: Freqüência das áreas anuais alocadas na otimização: 1ª fase**

	Área Anual (ha)	Freqüência <sup>1</sup>	Percentual Acumulado	
	8.135,81	17	31,48%	
<i>área</i>	16.271,62	4	38,89%	<i>16.780 ha</i>
<i>proposta</i>	24.407,44	3	44,44%	
	32.543,25	5	53,70%	
	40.679,06	3	59,26%	
	48.814,88	1	61,11%	
	56.950,69	3	66,67%	
	65.086,50	3	72,22%	
	73.222,32	3	77,78%	
	81.358,13	5	87,04%	
	89.493,94	4	94,44%	
	97.629,76	1	96,30%	
	105.765,57	1	98,15%	
	122.037,20	1	100,00%	

<sup>1</sup> Aqui os valores representam o número de vezes em que a área foi menor ou igual a área indicada.



**Figura 6.1: Histograma da área anual do projeto Baixo Acaraú**

Procurou-se, com os resultados da otimização, obter uma correlação entre a máxima área alocada e volume total armazenado no início do período, para se ter uma previsão da área que deveria ser alocada no início de cada ano. Entretanto, os resultados não foram satisfatórios e não se verificou qualquer correlação com o volume armazenado.

Embora não se tenha conseguido fazer uma previsão da área que se deve irrigar a cada ano, os resultados serviram, essencialmente, para se ter avaliação das potencialidades do sistema, e sua configuração dentro do cenário proposto para implementação.

Vê-se que uma situação como essa, que resulta em grande instabilidade no sistema agrícola, dificilmente teria viabilidade social e política. Afinal, um dos objetivos da irrigação no Nordeste é estabelecer uma maior estabilidade nos sistemas de uso da água.

## **6.2 Segundo Caso: Área Constante**

### **6.2.1 Resultados da Otimização:**

Aqui o modelo de otimização procura encontrar a vazão mensal a ser liberada de cada açude para atender as demandas de irrigação e abastecimento urbano. Os resultados deste modelo foram profundamente estudados para avaliação e derivação das regras de operação do sistema.

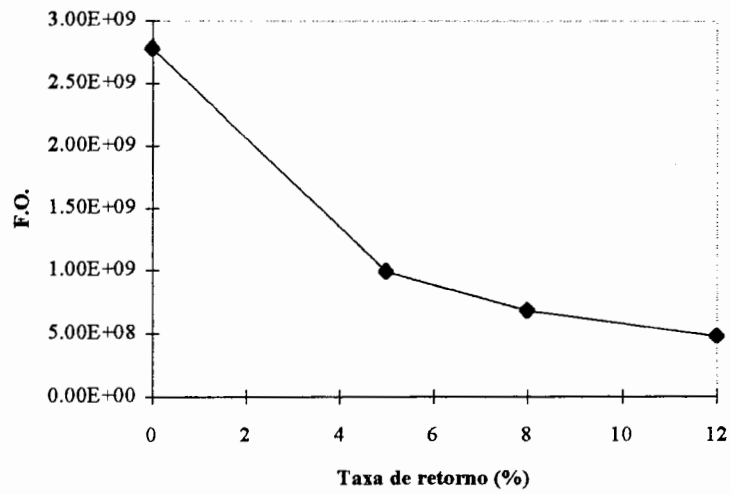
O problema resultante consta de 7.133 restrições e cerca de 23.240 variáveis. A otimização foi concluída em pouco mais de 460 segundos (7,6 minutos) e levou 140 iterações em média, onde novamente comprova-se a eficiência do método de otimização aplicado.

Uma avaliação da resposta do modelo para as diferentes taxas de retorno adotadas e diferentes percentuais de área irrigada, foi efetuada. Para taxas de retorno maiores que zero, esperava-se que o modelo preferisse alocar água para o atendimento da demanda nos primeiros anos, onde o valor presente dos benefícios é maior, ao invés dos anos mais distantes, com valor relativamente menor. Entretanto, verificou-se pouca, ou quase nenhuma, diferença nos resultados da operação do sistema, mostrando que a aversão à evaporação é dominante no processo. Na figura 6.2 observa-se a variação do benefício líquido, representada pela função objetivo (F.O.), para cada taxa de desconto adotada.

Uma avaliação também foi efetuada para se obter a variação do retorno líquido em função da área irrigada e os resultados podem ser vistos na figura 6.3. Verifica-se na curva, de tendência parabólica, que mesmo o projeto Baixo Acaraú com a área máxima disponível totalmente irrigada (31.064 ha), os benefícios são ainda crescentes. Daí se poder concluir que é possível investir na irrigação de áreas maiores, sem que se tenha uma perda no retorno econômico.

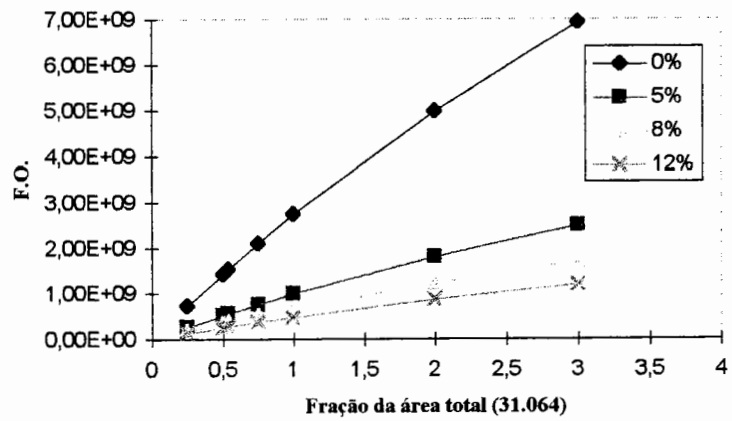


**Varição da F.O. com a taxa de retorno: área constante**



**Figura 6.2: Variação da F.O. com a taxa de retorno (Área: 16.780 ha)**

**Varição da F.O. com a área irrigada**



**Figura 6.3: Variação da F.O. com a área irrigada**

Com os resultados da otimização verificou-se que para a área fixa de 16.780 ha, quase não há estresse hídrico nas culturas, mesmo em períodos excepcionais de seca como o período de 1979 a 1983. Este fato pode ser explicado pelos resultados da tabela 6.1, mostrando que o sistema tem capacidade de atender uma área superior durante grande parte do tempo.

### **6.2.2 Resultados da Simulação:**

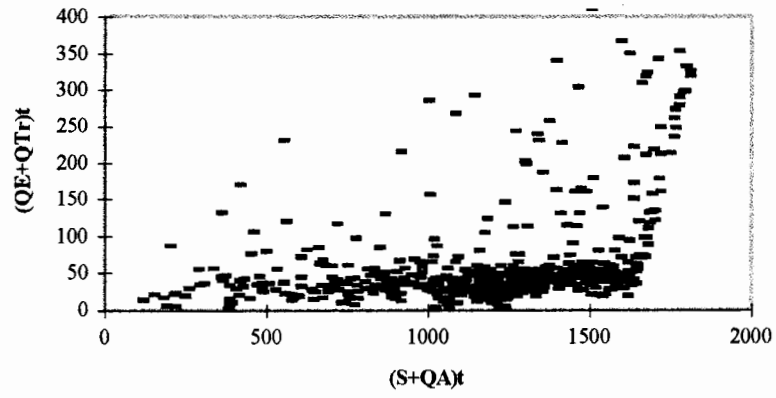
Na análise da operação do sistema, tentou-se aplicar o conceito de reservatório equivalente muito usado em sistemas hidroelétricos. Para tal, procurou-se inicialmente uma correlação entre o volume total defluente dos reservatórios e o armazenamento total disponível para uso (volume atual + volume atual afluyente), ou seja,  $QE_t = f(S_t + QA_t)$ , considerando o sistema agregado como um único reservatório de capacidade equivalente a soma das capacidades individuais de cada açude. Entretanto, os resultados obtidos não forneceram qualquer indicativo de uma boa correlação, inclusive descartando a hipótese de equivalência. O gráfico mostrando essa correlação pode ser visto na figura 6.4.

Partiu-se, então, para a procura de uma correlação entre o armazenamento total final e o volume total disponível para uso, ou seja,  $S_{t+1} = f(S_t + QA_t)$ , considerando o sistema agregado. Os gráficos podem ser vistos na figura 6.5. Entretanto, apesar do bom ajuste visual, não há garantia de que o sistema possa fornecer bons resultados sob esta regra de operação. Um modelo de simulação, aplicado ao sistema, indicou que os desvios em relação ao ótimo podem ser muito grandes, devido aos grandes volumes com que se trabalha, com dimensão substancialmente maior que as descargas. A hipótese de equivalência de volumes, foi então descartada.

A operação com futuro conhecido permitiu esboçar as regras da tabela 6.2 que fora, aprimoradas com o SIBAC.

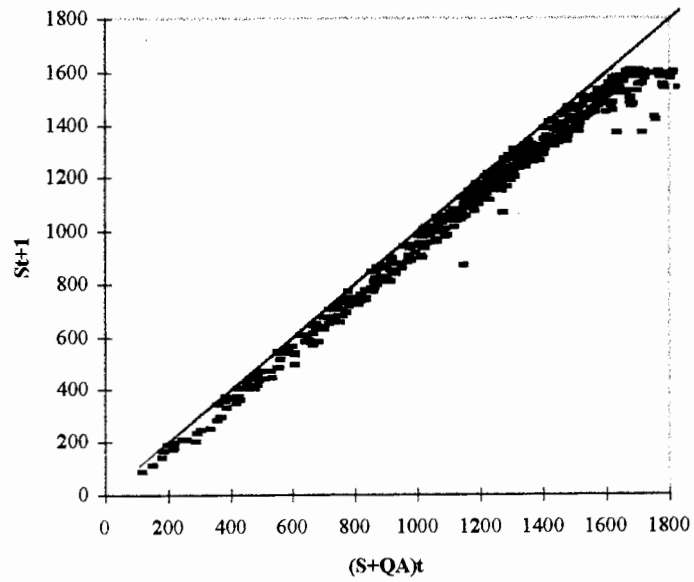
Outras regras foram então avaliadas, através do modelo de simulação (SIBAC) desenvolvido para testar a operação do sistema. Essas regras visam a operação do sistema de reservatórios de forma individual, mas ao mesmo tempo servindo ao objetivo comum de atender à demanda dos cultivos.

**Defluência Total x Armazenamento Total**



**Figura 6.4: Resultado da correlação entre defluência total e armazenamento total**

**Relação  $S_{t+1}$  x  $(S+QA)_t$**



**Figura 6.5: Resultado da correlação entre  $S_{t+1}$  e  $(S + QA)_t$**

Tabela 6.2: Garantias do sistema para cada regra de operação

Regra Operacional <sup>1</sup>	Garantia (%)			
	A. Souza (Sobral)	Araras Norte	Baixo Acarauá	> 50% Demanda <sup>2</sup>
1 $QE_t = \alpha \cdot S_t + \beta \cdot QA_t + \gamma$	85,9	98,1	81,5	48,0
2 $QE_t = \alpha \cdot S_t + \beta \cdot QA_t$	86,6	99,4	81,3	45,7
3 $QE_t = \alpha \cdot S_t + \beta \cdot QA_t$ Jan-Jun	84,5	99,4	77,9	47,1
$QE_t = \alpha \cdot S_t + \beta \cdot QA_t + \gamma$ Jul-Dez				
4 $QE_t = \alpha \cdot (S_t + QA_t)$	100,0	100,0	81,8	42,3
5 $QE_t = \alpha \cdot (S_t + QA_t) + \beta \cdot P_t$	100,0	100,0	82,3	39,0
6 $QE_t = \alpha \cdot (S_t + QA_t) + \beta \cdot P_t$ $QE_t \geq QE_{min,t}$	98,8	96,6	88,0	49,5
7 $QE_t \geq QE_{min,t}$	99,7	96,0	76,6	57,9
8 $QE_t = f(demanda)$	95,0	93,9	91,7	63,6

<sup>1</sup> onde:  $QE_t$  é o volume mensal a ser liberado, por cada açude, para atender à demanda;

$QE_{min,t}$  é o volume mensal mínimo a ser liberado, por cada açude, para atender à demanda;

$S_t$  é o armazenamento no início do mês t, para um açude qualquer;

$QA_t$  é o volume afluente durante o mês t, para um açude qualquer;

$P_t$  é a precipitação total durante o mês t, sobre a área cultivada;

<sup>2</sup> Esta coluna representa o percentual das vezes em que a regra de operação atendeu mais de 50% da demanda.

Considerou-se também uma análise da garantia do sistema, para saber-se qual o percentual dos meses em que houve falhas, em que a demanda dos cultivos foi atendida em no mínimo de 50%. A tabela 6.2 mostra os resultados obtidos com a simulação do sistema, para cada regra operacional adotada; para a regra 1, por exemplo, em 48% dos meses de falha, a vazão liberada foi suficiente para atender mais de 50% da demanda.

Observou-se nas três primeiras regras que relacionam o volume defluente com o armazenamento inicial e afluência durante o mês, bons resultados para o projeto Araras Norte, mas a garantia de abastecimento de Sobral e do projeto Baixo Acaraú foram inferiores a 86%.

A regra 4, que relaciona a defluência com o volume disponível ( $S_t + QA_t$ ) apresenta resultados melhores, mas ainda fornece garantia inferior a 82% ao projeto Baixo Acaraú.

Sabendo-se que as demandas dos cultivos são uma função da precipitação mensal ( $P_t$ ), procurou-se correlacionar as defluências com a precipitação mensal sobre as culturas, o que foi feito com a regra 5. Observou-se entretanto que a melhora não foi muito significativa. Uma garantia melhor foi conseguida na regra 6, através de uma modificação que, limita a defluência a um valor mínimo mensal ( $QE_{min}$ ), ajustado por tentativas. Nota-se que os resultados foram melhores, mas garantia para o projeto ficou em torno de 88%.

Na tentativa de encontrar melhores garantias no projeto Baixo Acaraú, procurou-se então uma regra, através da análise das demandas mensais do modelo de otimização. Procurou-se determinar uma vazão fixa mensal que atendesse a demanda das culturas na maior parte do tempo, e ao mesmo tempo pudesse ser fornecida pelo sistema sem prejuízo dos outros usuários.

Com a regra 7 limitou-se a descarga de uma vazão mínima, obtida como na regra anterior, sem fazer qualquer correlação com o armazenamento ou volume afluente, mas também não se obteve resultados satisfatórios.

Partiu-se então para a análise das vazões mensais liberadas, exclusivamente para complementar a demanda mensal, que é parcialmente suprida pela contribuição de trecho ( $QTr$ ). A variação temporal desta defluência pode ser vista na figura 6.6.

Entretanto, é importante não só saber quanto de água se deve liberar, mas que parcela desta será fornecida por cada açude. Na análise dos resultados da otimização, constatou-se que a demanda foi, preferencialmente, atendida pelos açudes Araras, Ayres de Souza e Edson Queiroz, respectivamente. O açude Taquara contribuiu de forma a suprir o açude Ayres de Souza, e o açude Poço Comprido pouca contribuição oferece ao sistema. A figura 6.7 mostra a distribuição espacial da água entre os quatro açudes que contribuem diretamente para o atendimento da demanda.

Uma estimativa do percentual de contribuição de cada açude, foi obtida da análise dos resultados da otimização, e aplicada na regra 7. Na tabela 6.2 pode se vista a resposta do sistema, onde as garantias foram superiores a 90%.

A demanda mensal a ser liberada em cada mês é dada na tabela 6.4. A regra de operação do sistema foi estabelecida da seguinte forma: caso haja disponibilidade de água, cada açude deve liberar um volume ( $QE_t$ ), que pode ser ultrapassado nos meses de vertimento; caso contrário somente o que houver disponível deve ser liberado. O termo  $QE_t$  para cada açude é dado abaixo pela tabela 6.3:

**Tabela 6.3: Regra operacional para cada açude simulado**

<b>Açude</b>	<b>Volume a ser liberado</b>
Edson Queiroz	$QE_{t,r} = fp_r \cdot QM / 0.9$
Ayres de Souza e Araras	$QE_{t,r} = fp_r \cdot QM / 0.9 + DEM_{t,r}$
Taquara	$QE_{t,r} = fp_r \cdot QM / 0.9 + 3.64$
Poço Comprido	<i>dado na tabela 6.6.</i>

sendo  $fp_r$  o percentual que cada açude deve liberar para atender a demanda (tabela 6.4),  $DEM_{t,r}$  é a demanda pontual a ser atendida pelos dois açudes,  $QM$  é o volume mensal a ser liberado para atendimento da demanda (tabela 6.5).

### **6.2.3 O Efeito do Déficit Hídrico:**

Outro estudo foi conduzido considerando o efeito do estresse hídrico sobre o benefício líquido total dos cultivos. Por isto a simulação foi executada aumentando-se a área irrigada progressivamente e avaliando-se, através de simulação, a resposta do modelo às novas condições impostas.

Considerou-se a área adotada pelo Estudo de Viabilidade (16.780 ha) como área inicial, e a mesma foi progressivamente aumentada de um fator multiplicativo  $p$ , limitado pela área máxima permitida que é de 31.064 ha. A simulação foi efetuada usando uma única regra de operação (regra 8) e os resultados são dados na tabela 6.7.

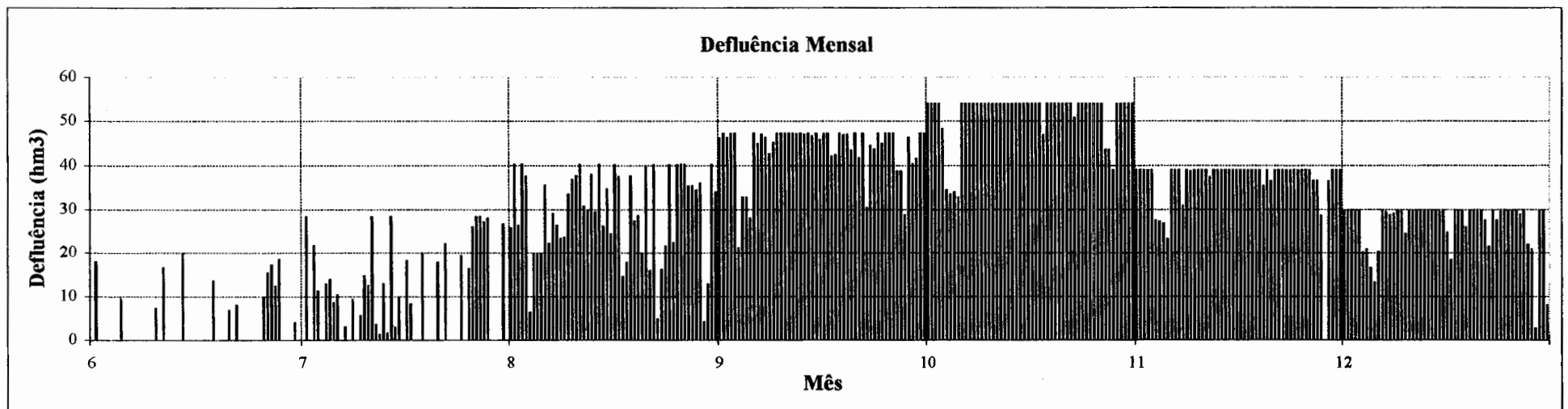
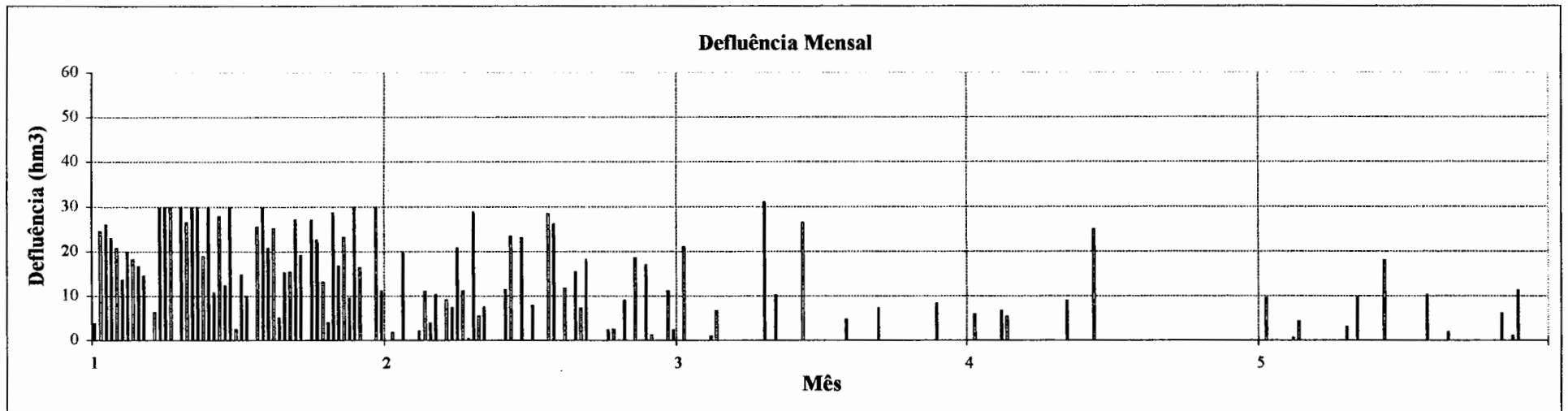
Através dos resultados observa-se que o benefício líquido obtido pode ser elevado, mantendo-se as culturas sob déficit hídrico, e a área irrigada pôde ser elevada em cerca de 80%. Entretanto não só o fator econômico deve ser levado em conta, caso se deseje uma garantia de atendimento do projeto Baixo Acaraú acima de 80%, o ponto ideal é irrigar uma área 10% superior.

Os resultados mostraram que o problema operacional tratado tem, pelo menos, dois objetivos: a maximização dos benefícios líquidos e a maximização das garantias de suprimento. O primeiro é essencialmente econômico; o segundo social e político.

O que se nota na prática de engenharia no semi-árido nordestino é que se estabelece uma meta de garantia de 90% da demanda, e se maximiza os benefícios líquidos, quando a análise é realizada em maiores detalhes. Os resultados mostraram que essa garantia tem um custo, e que nem sempre é justificável assumi-lo.

A figura 6.8 apresenta os resultados do déficit hídrico sobre as culturas para três áreas diferentes ( $p = 1,0$  ;  $p = 1,3$  e  $p = 1,9$ ) para o período de 1965 a 1988. As ordenadas representam o déficit hídrico ocorrido, ou seja, o percentual da demanda total que deixou de ser atendida pela regra de operação do sistema ao longo do tempo. No gráfico pode-se confirmar os resultados apresentados na tabela 6.7, com a diminuição das garantias do sistema em função da diminuição do percentual da demanda total que foi atendida.

Entende-se que para o cálculo dos benefícios líquidos deve-se considerar tanto os custos operacionais anuais quanto os custos de investimentos em implementação e expansão da área irrigada. Entretanto não considerou-se, nesta análise, os custos de expansão da área irrigada, por não se dispor desta informação, ficando esta análise condicionada a futuras complementações deste trabalho.



**Figura 6.6: Defluência Mensal Total**



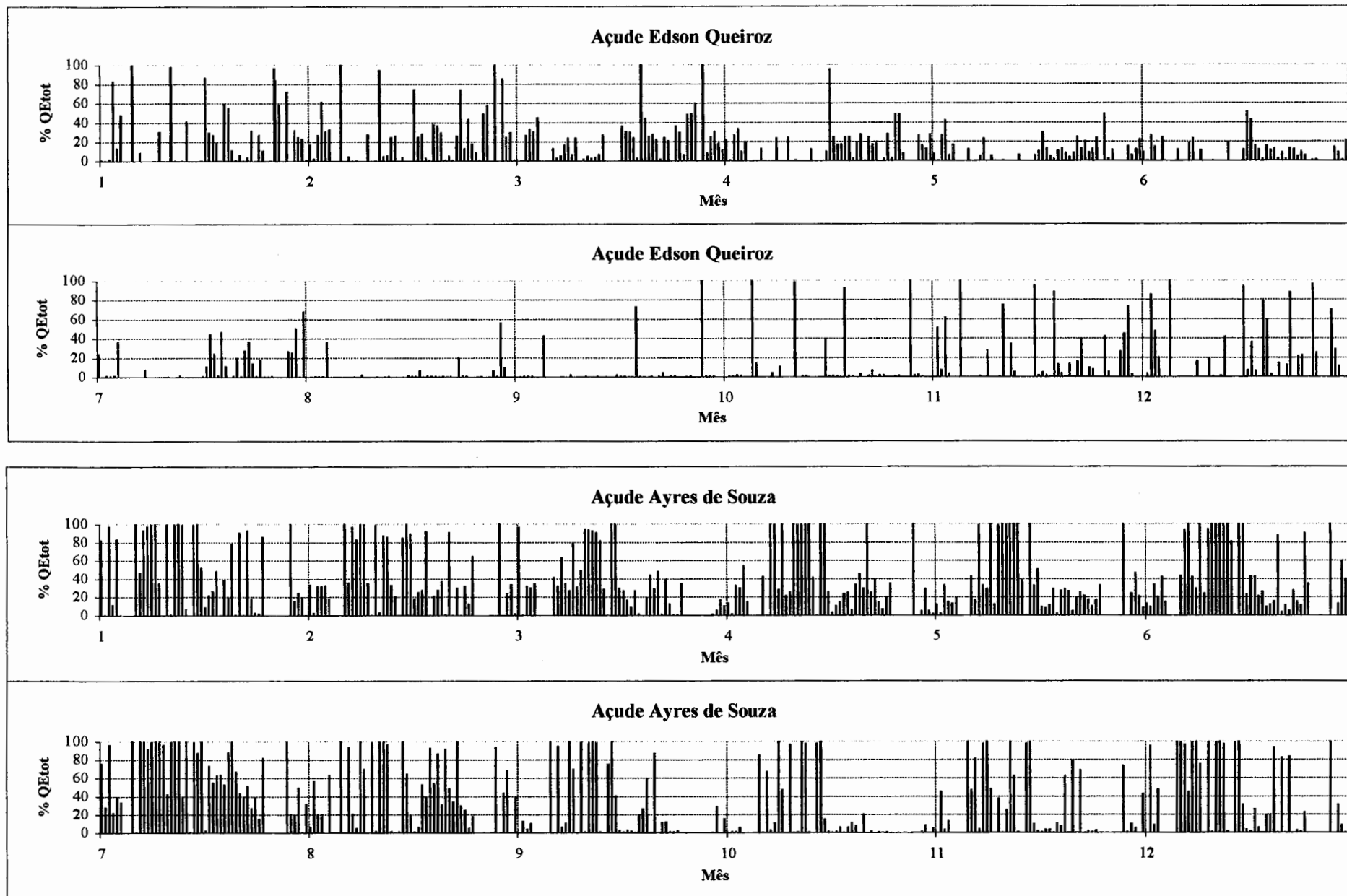


Figura 6.7: Variação mensal do percentual da vazão total liberada por cada açude

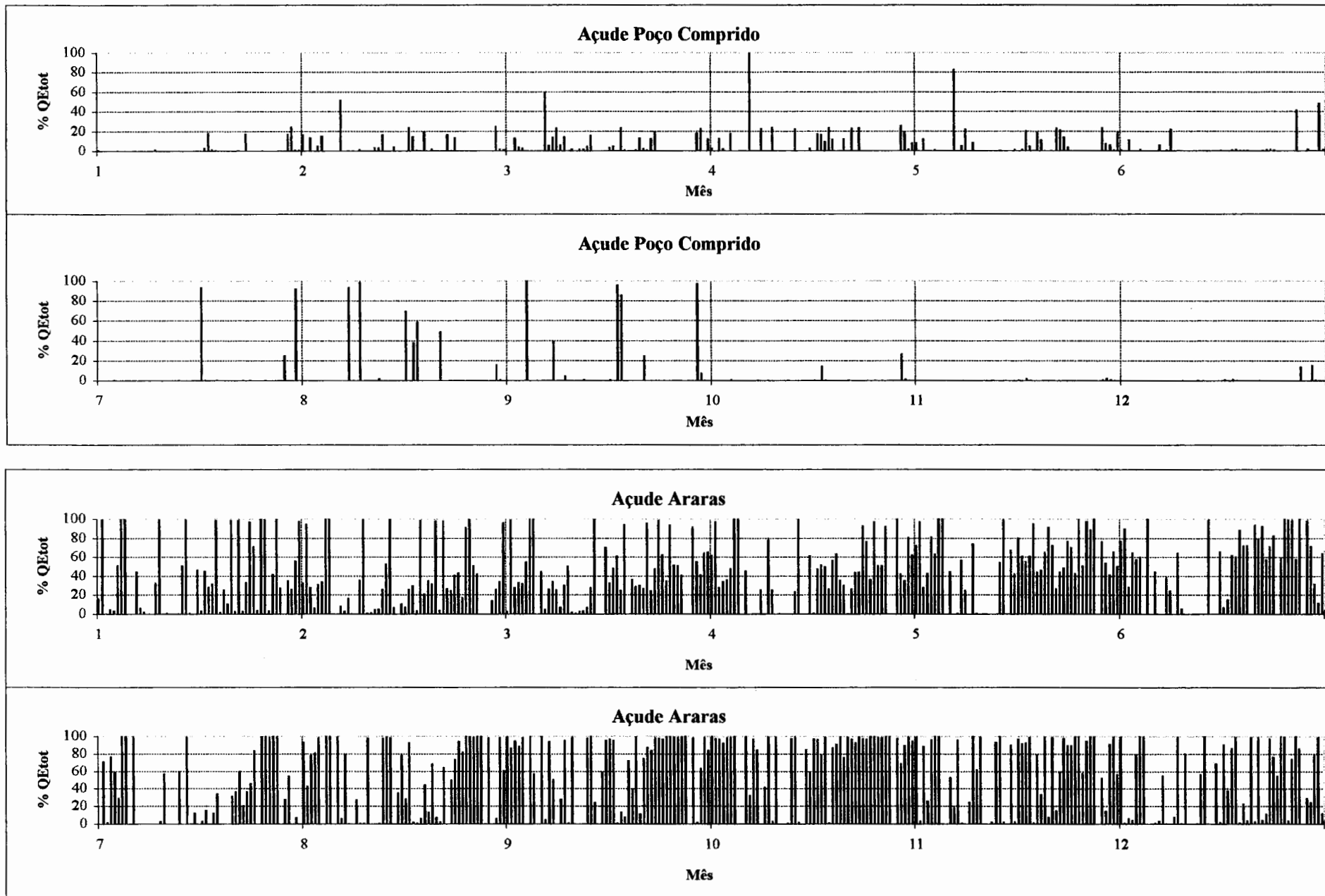


Figura 6.7: Continuação

**Tabela 6.4: Percentual da demanda mensal a ser liberado por cada açude (*fp<sub>r</sub>*)**

<b>Açude</b>	<b>Mês</b>											
	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
E. Queiroz	25	20	20	20	20	20	10	10	10	05	10	10
A. Souza	35	40	30	30	20	40	50	45	20	15	10	15
Araras	40	40	50	50	60	40	40	45	70	80	80	75
Taquara	25	20	20	20	20	20	10	10	10	05	10	10

**Tabela 6.5: Volume mensal a ser liberado pelo conjunto de açudes (hm<sup>3</sup>)**

<b>Mês</b>												
<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>	
31	25	10	6	13	20	30	41	50	55	41	36	

**Tabela 6.6: Volume mensal a ser liberado pelo açude Poço Comprido (hm<sup>3</sup>)**

<b>Mês</b>												
<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>	
0,5	1,5	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	

**Tabela 6.7: Retorno e garantias obtidas com aumento da área irrigada**

<b>Multiplicador de Área (<i>p</i>)</b>	<b>Retorno Líquido ( x 10<sup>8</sup> US\$ )</b>	<b>Garantia (%)</b>			
		<b>A. Souza (Sobral)</b>	<b>Araras Norte</b>	<b>Baixo Acarauú</b>	<b>&gt; 50% Demanda</b>
1,00	1,8079	94,8	93,2	91,7	63,6
1,10	1,9802	94,8	93,2	84,4	74,3
1,20	2,0979	94,8	93,2	77,1	84,4
1,30	2,1513	94,8	93,2	79,3	79,1
1,40	2,2216	94,8	93,2	75,5	80,5
1,60	2,4329	94,8	93,2	69,9	77,3
1,70	2,4685	94,8	93,2	66,9	74,8
1,80	2,5317	94,8	93,2	61,8	75,9
1,90	2,5046	94,8	93,2	67,1	74,3

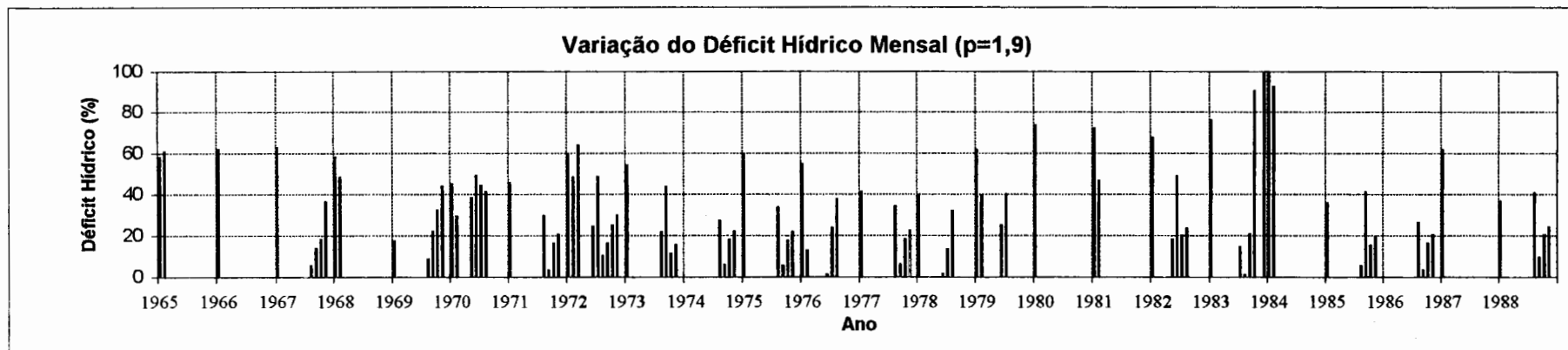
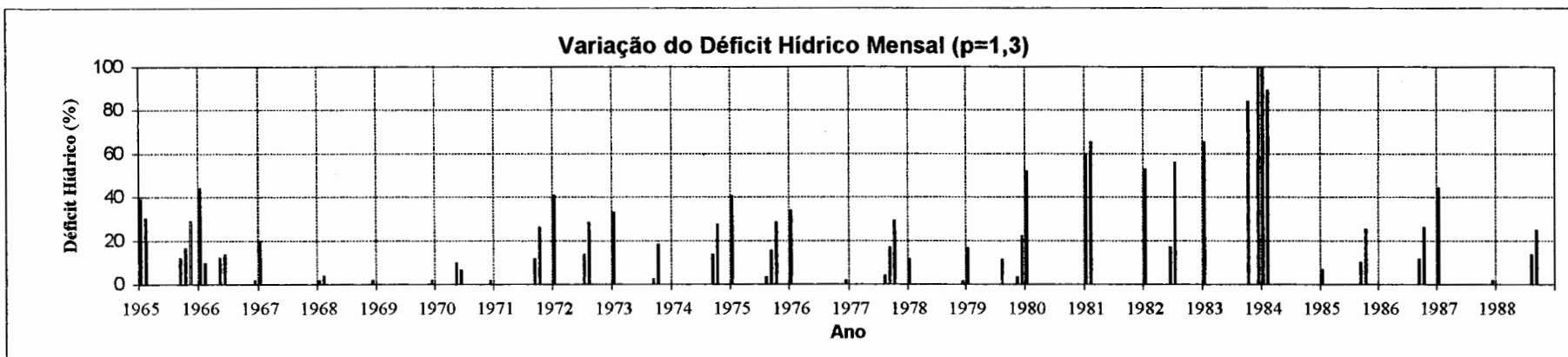
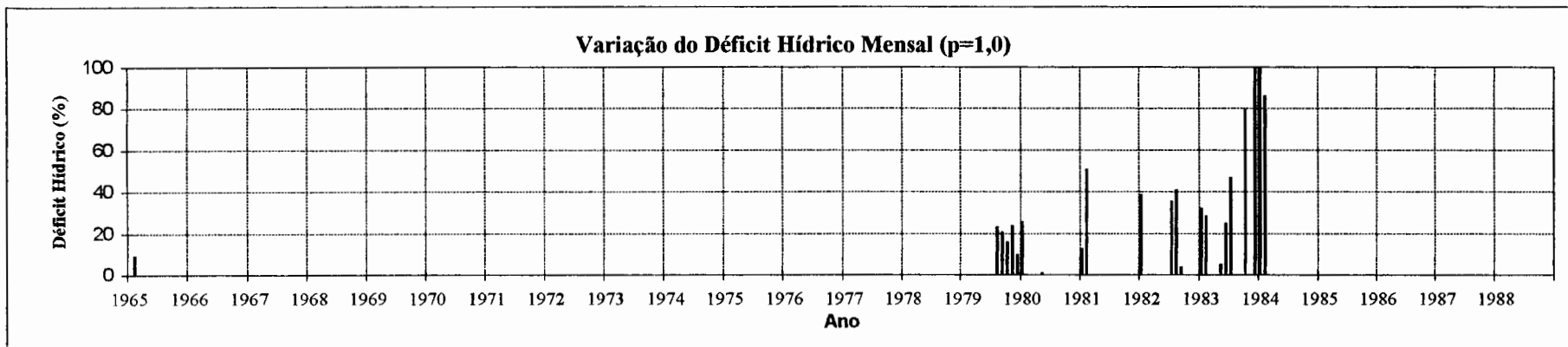


Figura 6.8: Variação do déficit hídrico mensal para diferentes áreas

## **Capítulo 7**

# **Conclusões e Recomendações**

---

## 7. Conclusões e Recomendações:

A metodologia aqui apresentada mostrou-se muito versátil e eficiente. Possuindo a vantagem de ser facilmente adaptada a qualquer configuração do sistema de reservatórios.

O uso de técnicas de simulação, isoladamente, para derivar regras operacionais de reservatórios pode ser inviável no caso de operação de grandes sistemas, em virtude do grande número de opções a analisar. Aliada a técnicas de otimização matemática sob futuro conhecido, a simulação mostrou-se ser muito útil na resolução de problemas de recursos hídricos, que envolvem múltiplas escolhas. A sua principal vantagem é que a mesma pode representar o sistema de forma mais realista sem a necessidade de simplificações demasiadas. A otimização determinística mostrou-se ser de grande ajuda durante o processo de derivação das regras de operação do sistema. Uma análise dos resultados da otimização permitiu derivar as quantidades mensais a serem liberadas por cada açude, bem como o percentual que deve ser fornecido por cada reservatório.

A análise dos resultados do modelo de otimização permitiu concluir que a área adotada pelo estudo de viabilidade representa cerca de 40% da área potencialmente irrigável, com a configuração proposta neste estudo. Conclui-se que irrigar uma área maior sob déficit hídrico pode oferecer maior retorno econômico que uma área menor com suprimento adequado de água. A área inicialmente proposta pelo estudo de viabilidade, poderia ser elevada em 80% caso o único fim fosse a maximização do retorno econômico, entretanto a garantia do sistema seria sacrificada em 39%. Considerando que uma garantia maior de suprimento seja exigida, a melhor opção poderia ser irrigar uma área 10% maior, com uma garantia de suprimento superior a 84%.

Os resultados obtidos com a otimização não mostraram qualquer influência da taxa de retorno sobre a operação do sistema, ou seja, a água foi aplicada de maneira uniforme durante todo o período de tempo. Isso talvez se deva pelo fato de não ter havido estresse hídrico de forma acentuada em nenhum período de tempo, pois o modelo de otimização trabalha com uma garantia de 100%. Outra explicação para isso é que a alta evaporação dos reservatórios governa o processo, determinando ser melhor o uso da água no presente que reservá-la para uso futuro.

Verificou-se que o açude Poço Comprido com a dimensão adotada, pouco regulariza. Recomenda-se que a decisão de sua dimensão fique a critério de estudos mais aprofundados sobre a viabilidade, ou não, de sua construção.

É conhecido que a falta de dados pode levar a erros de estimativa das variáveis hidrológicas usadas neste estudo. A falta de dados de umidade do solo e sua relação com a evapotranspiração das diversas culturas foi a principal simplificação usada neste trabalho. Para aplicações teóricas pode-se admitir que o erro desta simplificação esteja dentro de um limite aceitável; entretanto é fundamental que se proceda a estudos e testes experimentais de campo para que se conheça estas relações para as diversas culturas.

O efeito do estresse hídrico sobre a produção dos cultivos foi estimado com base em dados e recomendações técnicas mundiais; entretanto estudos experimentais também devem ser realizados para se ter uma avaliação confiável destes efeitos, em culturas típicas do clima tropical brasileiro.

Recomenda-se a pesquisa e aplicação de outras técnicas de otimização que permitam considerar a variação simultânea da área irrigada e suprimento, já que em programação linear isto se configura em uma não-linearidade de difícil consideração.

Recomenda-se, ainda, a consideração no modelo de simulação de outros critérios de atendimento à demanda hídrica, como o efeito do déficit hídrico ( $ky$ ), além do critério do preço máximo de comercialização adotado neste estudo.

Sugere-se, também, que em trabalhos futuros seja levado em consideração a possibilidade de inclusão dos custos de expansão da área irrigada, além dos custos operacionais anuais já considerados.



## Capítulo 8

# **Referências Bibliográficas**

---

## 8. Referências Bibliográficas:

- 1 AGUINSKY, S.D.; DORFMAN, R.; MATZENAUER, R. 1988. Modelos para prognóstico e otimização do rendimento do milho (Lea mays, L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8, 1988, Florianópolis. Anais. Florianópolis: ABID. v.1, p. 161-182.
- 2 ALTMAN, A., GONDZIO, J. 1993. HOPDM - A higher order primal-dual method for large scale linear programming. European Journal of Operational Research, Poland, v.66, p. 158-160.
- 3 BHASKAR, N.R., WHITLATCH, E.E. 1980. Derivation of monthly reservoir release policies. Water Resources Research, Washington. v.16, n.6, p. 987-993.
- 4 BRAGA JR., B.P.F. 1987. Técnicas de otimização e simulação aplicadas em sistemas de recursos hídricos. In: MODELOS para gerenciamento de recursos hídricos. São Paulo: Nobel: ABRH. cap. 5, pp. 427-518.
- 5 BRAS, R.L., CORDOVA, J.R. 1981. Intraseasonal water allocation in deficit irrigation. Water Resources Research, Washington, v.17, n.4, p. 866-874.
- 6 BURAS, N. 1972. Scientific allocation of water resources, American Elsevier, Environmental Science Series, New York.
- 7 BUTCHER, W.S. 1971. Stochastic dynamic programming for optimum reservoir operation, Water Resources Bulletin, Bethesda, v.7,n.1, pp. 115-123.
- 8 CEARÁ. Secretaria de Recursos Hídricos. 1992. Plano Estadual de Recursos Hídricos: Ceará. Fortaleza. 5v. em 4.
- 9 CRAWLEY, P.D., DANDY, G.C. 1993. Optimal operation of multiple-reservoir system. Journal of Water Resources Planning and Management, v.119, n.1, p. 1-17.
- 10 DARIANE, A.B., HUGHES T.C. 1991. Application of crop yield functions in reservoir operation, Water Resources Bulletin, Bethesda, v.27, n.4, p. 649-656.
- 11 DARLEY, P.R., RYDZEWSKI, J.R., CLARK, W.M. 1972. A simulation model for the optimal design and operation of irrigation systems based on yield-water deficit relationships. In: INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE SYMPOSIUM, 1972, Varna. p. 135-167.
- 12 DEININGER, R.A. 1972. Introdução à análise de sistemas aplicada ao desenvolvimento de recursos hídricos. In: SEMINÁRIO DE PLANEJAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS, 1972, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre:UFRGS:UNESCO. p. 128-365.
- 13 DNOCS. 1987. Estudo de viabilidade técnico-econômica do Baixo Acaraú, Fortaleza.
- 14 DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. 1979. Yield response to water. Rome: FAO. 193p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33).
- 15 DOORENBOS, J., PRUITT, W.O. 1975. Crop water requirements. Rome: FAO. 179p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).

- 16 DORFMAN, R. 1985. Planning of irrigation systems under conditions of scarce data. Haifa: Technion Israel Institute of Technology. 114f. Tese (Doutorado) (Recursos Hídricos Publicação n.16).
- 17 DUDLEY, N.J. 1972. Irrigation planning 4. Optimal interseasonal water allocation. Water Resources Research, Washington, v.8, n.3, p. 587-594.
- 18 DUDLEY, N.J. 1988a. A single decision-maker approach to irrigation reservoir and farm management decision making. Water Resources Research, Washington, v.24, n.5, p. 633-640.
- 19 DUDLEY, N.J. 1988b. Volume sharing of reservoir water. Water Resources Research, Washington, v.24, n.5, p. 641-648.
- 20 DUDLEY, N.J., BURT, O.R. 1973. Stochastic reservoir management and system design for irrigation. Water Resources Research, v.9, n.3, p. 507-522.
- 21 DUDLEY, N.J., HOWELL, D.T., MUSGRAVE, W.F. 1971. Optimal intraseasonal irrigation water allocation. Water Resources Research, v.7, n.4, p. 771-788.
- 22 DUDLEY, N.J., MUSGRAVE, W.F. 1988. Capacity sharing of water reservoirs. Water Resources Research, Washington, v.24, n.5, p. 649-658.
- 23 DUDLEY, N.J., REKLIS, D., BURT, O.R. 1976. Reliability, trade-offs and water resource development modeling in multiple crops. Water Resources Research, Washington, v.12, n.6, p. 1101-1108.
- 24 FAO [1988?]. Irrigation water needs. Rome. Paginação irregular. (Irrigation Water Management Training Manual 3).
- 25 GABLINGER, M., LOUCKS, D.P. 1970. Markov models for flow regulation. Journal of the Hydraulics Division. American Society of Civil Engineers, New York, v.96, n.1, p. 165-181.
- 26 GONDIM FILHO, J.G.C. 1988. Gestão integrada dos reservatórios da Bacia do Rio Curu. Fortaleza: UFC-Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos. 114f. Dissertação (Mestrado).
- 27 GONDZIO, J., MAKOWSKI, M. 1995. Solving a class of LP problems with a primal-dual logarithmic barrier method. European Journal of Operational Research, Poland, v.80, p. 184-192.
- 28 HALL, W.A., BUTCHER, W.S. 1968. Optimal timing of irrigation. Journal of the Irrigation and Drainage Division. American Society of Civil Engineers, New York, v.94, n.2, p. 267-275.
- 29 HOWELL, D.T. 1983. Steps towards optimality in irrigation. In: HAMBURG SYMPOSIUM, 1983. Scientific Procedures Applied to the Planning, Design and Management of Water Resources Systems, Wallingford: IAHS. p. 425-435. (International Association of Hydrological Sciences. Publication n. 147)

- 30 KARAMOUZ, M., HOUCK, M.H. 1982. Annual and monthly reservoir operating rules generated by deterministic optimization. Water Resources Research, v.18, n.5, p. 1337-1344.
- 31 KARAMOUZ, M., HOUCK, M.H. 1987. Comparison of stochastic and deterministic dynamic programming for reservoir operating rule generation. Water Resources Bulletin, v.23, n.1, p. 1-9.
- 32 KARAMOUZ, M., HOUCK, M.H, DELLEUR, J.W. 1992. Optimization and simulation of multiple reservoir systems. Journal of Water Resources Planning and Management, v.118, n.1, p. 71-81.
- 33 KO, S.K., FONTANE, D.G., LABADIE, J.W. 1992. Multiobjective optimization of reservoir systems operation. Water Resources Bulletin, v.28, n.1, p. 111-127.
- 34 KÜNZI, H.P., TZSCHACH, H.G, ZEHNDER, C.A. 1971. Numerical methods of mathematical optimization with ALGOL and FORTRAN programs, Academic Press, New York.
- 35 LABADIE, J.W. 1987. Otimização da operação de projetos hidroagrícolas. [s.l.:s.n] [Resumo de Aulas].
- 36 LANNA, A. 1982. Operação estratégica de reservatórios para suprimento hídrico e controle de cheias. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 123p. (Recursos Hídricos Publicação n. 4).
- 37 LOFTIS, J.C., HOUGHTALEN, R.J. 1987. Optimizing temporal water allocation by irrigation ditch companies. Transactions of the ASAE, Saint Joseph, v.30, n.4, p. 1075-1082.
- 38 LOGANATHAN, G.V., BHATTACHARYA, D. 1990. Goal-programming techniques for optimal reservoir operations. Journal of Water Resources Planning and Management, v.116, n.6, p. 820-838.
- 39 LOUCKS, D.P., FALKSON, L.M. 1970. A comparison of some dynamic, linear and policy iteration methods for reservoir operation. Water Resources Bulletin, v.6, n.3, p. 384-399.
- 40 MARTIN, D.L., BROCKLIN, J., WILMES,G. 1989. Operating rules for deficit irrigation management. Transactions of the ASAE, Saint Joseph, v.32, n.4, p. 1207-1215.
- 41 MILLAR, A.A. 1989. Manejo racional da irrigação: uso de informações básicas sobre diferentes culturas, PRONI/IICA, 2a. Ed., Brasília, 57f.
- 42 MINHAS, B.S., PARIKH, K.S., SRINIVASAN, T.N. 1974. Toward the structure of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water. Water Resources Research, v.10, n.3, p. 383-393.
- 43 MOHAN, S., KESKAR, J.B. 1991. Optimization of multipurpose reservoir system operation. Water Resources Bulletin, v.27, n.4, p. 621-629.
- 44 MURTAGH, B.A., SAUNDERS, M.A. 1987. "MINOS 5.1 User's Guide", Technical Report SOL 83-20R, Department of Operations Research, Stanford University, Stanford, CA.

- 45 PARFITT, J.M.B. 1991. Modelos água-rendimento para a cultura da soja (Glycine Max L. Merrill) em Planossolos Pelotas. Porto Alegre: UFRGS-Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 102f. Dissertação (Mestrado).
- 46 RAJPUT, G.S. 1993. Irrigation management through use of crop yield functions based on pan evaporation concept. In: INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE CONGRESS 15, 1993, The Hague. Q.44, R. 3, p. 33-42.
- 47 RAO, N.H., SARMA, P.B., CHANDER, S. 1988. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. Agricultural Water Management, Amsterdam, v.13, n.1, p. 25-32.
- 48 RAO, N.H., SARMA, P.B., CHANDER, S. 1990. Optimal multicrop allocation of seasonal and intraseasonal irrigation water. Water Resources Research, Washington, v.26, n.4, p. 551-559.
- 49 REES, D.H., HAMLIN, M.J. 1983. The allocation of water for irrigation in times of shortage. In: HAMBURG SYMPOSIUM, 1983. Scientific Procedures Applied to the Planning, Design and Management of Water Resources Systems, Wallingford: IAHS. p. 437-449. (International Association of Hydrological Sciences. Publication n. 147)
- 50 RHENALS, A.E., BRAS, R.L. 1981. The Irrigation Scheduling Problem and Evapotranspiration Uncertain. Water Resources Research, Washington, v.17, n.5, p. 1328-1338.
- 51 ROEFS, T.G. 1968. Reservoir managment: the state of the art. Washington: IBM. 85p.
- 52 SAIXING, Z., SHOUSHENG, L., QINGHUA, L. 1993. A large system optimum model for irrigation planning. In: INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE SYMPOSIUM, 1993, Varna. p. 743-753.
- 53 SCHMIDT, O., PLATE, E.J. 1983. Optimization of reservoir operation for irrigation and determination of the optimum size of the irrigation area. In: HAMBURG SYMPOSIUM, 1983. Scientific Procedures Applied to the Planning, Design and Management of Water Resources Systems, Wallingford: IAHS. p. 451-461. (International Association of Hydrological Sciences. Publication n. 147)
- 54 SHANHOLTZ, V.O., YOUNOS, T.M. 1994. A soil water balance model for no-tillage and conventional till systems. Agricultural Water Management, Amsterdam, v.26, n.1, p. 155-168.
- 55 SIGVALDASON, O.T. 1976. A simulation model for operating a multipurpose multireservoir system. Water Resources Research, Washington. v.12, n.2, p. 263-278.
- 56 SINGH, P., WOLKEWITZ, H. 1988. Evapotranspiration, pan evaporation and soil water relationships for wheat (*Triticum aestivum*). Agricultural Water Management, Amsterdam, v.13, n.1, p. 65-81.
- 57 STEWART, J.I, HAGAN, R.M. 1969. Predicting effects of water shortage on crop yield. Journal of the Irrigation and Drainage Division. American Society of Civil Engineers, New York, v.95, n.1, p. 91-104.

- 58 STEWART, J.I, HAGAN, R.M. 1973. Functions to predicts of crop water deficits. Journal of the Irrigation and Drainage Division. American Society of Civil Engineers, New York, v.99, n.4, p. 421-437.
- 59 STROBEL, O.M. 1979. Dimensionamento e operação de reservatórios através de método de restrições probabilísticas e regras de decisão linear. São Paulo-EPUSP. 163p. Dissertação (Mestrado).
- 60 TAO, T., LENNOX, W.C. 1991. Reservoir operations by successive linear programming. Journal of Water Resources Planning and Management, v.117, n.2, p. 274-280.
- 61 VALDÉS, J.B., FILIPPO, J.M., STRZEPEK, K.M., RESTREPO, P.J. 1992. Aggregation-disaggregation approach to multireservoir operation. Journal of Water Resources Planning and Management, v.118, n.4, p. 423-444.
- 62 VEDULA, S., MUJUMDAR, P.P. 1992. Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops. Water Resources Research, Washington. v.28, n.1, p. 1-9.
- 63 VIEIRA NETO, J.F. 1991. Dimensionamento ótimo do sistema de irrigação e barragens da Bacia do Rio Acaraú-Ceará. Porto Alegre: UFRGS-Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 113f. Dissertação (Mestrado).
- 64 WURBS, R.A. 1993. Reservoir-system simulation and optimization models. Journal of Water Resources Planning and Management, v.119, n.4, p. 455-472.
- 65 YEH, W.W.G. 1985. Reservoir management and operation models: A state-of-art review. Water Resources Research, Washington. v.21, n.12, p. 1797-1818.
- 66 YEH, W.W.G., BECKER, L. 1982. Multiobjective analysis of multireservoir operations. Water Resources Research, Washington. v.18, n.5, p. 1326-1336.
- 67 ZESSLER, U., SHAMIR, U. 1989. Optimal operation of water distribution systems. Journal of Water Resources Planning and Management, v.115, n.6, p. 735-753.