

## Análise de Alterações na Receita Líquida Otimizada de um Perímetro Irrigado no Semi-Árido sob Condições de Variações Hídricas e Econômicas

Rosires Catão Curi, Wilson Fadlo Curi e Maria Betânia Almeida de Oliveira

Laboratório de Recursos Hídricos, Depto. Eng. Civil, CCT, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB

rosires@dec.ufcg.edu.br, wcuri@df.ufpb.br

Recebido: 05/08/02 - revisado: 10/10/03 - aceito: 20/08/04

### RESUMO

O sistema de reservatórios interligados Coremas e Mãe D'Água, que se localiza no extremo sudoeste do estado da Paraíba, é abastecido pelos rios Piancó, Emas e Aguiar, e, juntos, constituem o maior reservatório do estado da Paraíba e o terceiro maior reservatório do nordeste. A água deste sistema é utilizada para atender múltiplos usos que incluem: abastecimento humano, geração de energia elétrica, atividades de piscicultura, agricultura irrigada e regularização do rio Piancó para o estado do Rio Grande do Norte. Recentemente foi construído um canal aberto, ligado ao reservatório Mãe D'Água, com extensão de 37 Km e capacidade de vazão de  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ , para irrigar uma área de aproximadamente 5000 ha localizados nas várzeas da cidade de Sousa-PB. O objetivo deste trabalho é estudar a maximização dos benefícios econômicos da exploração do perímetro irrigado através da escolha de áreas de cultivo para cada um dos 13 tipos de frutas sazonais, semi-perenes e perenes pré-selecionados, com seus respectivos sistemas de irrigação, ressalvadas as demandas para os demais usos do reservatório. No desenvolvimento do modelo matemático é empregada a programação linear de forma sucessiva, a fim de levar em consideração as não-linearidades intrínsecas do problema, que tem 85 variáveis de decisão e 1479 restrições de comportamento físico e critérios operacionais impostos ao sistema, incluindo a sustentabilidade hídrica do mesmo. A análise foi feita usando séries de dados pluviométricos plurianuais de 6 anos, com base mensal, que estabelecem os cenários climáticos representativos de anos seco, normal, chuvoso e de valores médios. Análises de sensibilidade com relação ao custo da água, preço de venda dos produtos e de alterações na vazão captada e transportada pelo canal foram também realizadas.

**Palavras-chave:** Perímetro irrigado; áreas de cultivo.

### INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas a serem enfrentados no terceiro milênio será atender toda a população mundial com água de boa qualidade, alimento e emprego. Em algumas regiões do mundo, como o Nordeste brasileiro problemas desse tipo não são fatos distantes, já existem e tendem a se tornar cada vez mais graves. Para proporcionar melhorias no padrão econômico e social e, conseqüentemente, na qualidade de vida da população torna-se necessário a aplicação de tecnologias adequadas ao clima da região promovendo, dessa forma, o uso racional dos recursos naturais existentes, em especial a água e terras aptas ao plantio. Oliveira & Lanna (1997) citam que as causas do pouco desenvolvimento econômico nas áreas semi-áridas do Nordeste estão relacionadas aos baixos investimentos na infra-estrutura hídrica regional e à ineficiência no seu aproveitamento. Também argumentam que o uso de técnicas de otimização matemática no dimensionamento e operação da infra-estrutura hídrica regional é ainda modesto, em face das suas potencialidades.

A programação linear (PL) foi estabelecida em termos matemáticos formais por George. B. Dantzig, em 1947 (Dantzig, 1963), para resolver problemas de logística da Força Aérea Americana. Desde então, com a percepção da utilidade do método nos vários segmentos da economia e a sua conseqüente disseminação, tem-se verificado um significativo impacto na gestão e administração de empresas e de diferentes organizações. Segundo Barbosa (1997) as aplicações na área de recursos hídricos remontam a década de 60, no âmbito dos trabalhos do "Harvard Water Resources Group", onde se fez uma aplicação de PL a um problema de gerenciamento de água subterrânea. Desde então muitas aplicações nesta área têm sido registradas, tanto em PL quanto em programação não linear. Dentre elas pode-se citar: Becker & Yeh (1974), Braga & Barbosa (1987), Sheer (1979), Tao & Lennox (1991) e Yeh (1985). Nestes estudos, as aplicações variam desde problemas relativamente simples de alocação direta de recursos até situações complexas de gerenciamento e operação de reservatórios. Sob certas hipóteses, problemas não-lineares podem ser linearizados, ou seja, utilizam-se de procedi-

mentos de aproximação matemática que são resolvidos através de métodos iterativos.

Apesar de aplicado a diversos setores, foi no âmbito da operação de reservatórios que a PL, individualmente ou acoplada a outras técnicas como as programações dinâmica e inteira, tiveram maior utilização (Simonovic, 1992; Becker & Yeh, 1974; Braga & Barbosa, 1987; Medeiros & Occhipinti, 1987; Zahed, 1987; Santana & Lanna, 2000; Oliveira & Lanna, 1997; Yeh, 1985).

A PL, assim como outras técnicas de programação matemática, foram também usadas no desenvolvimento de trabalhos para otimizar sistemas de produção agrícola, considerando cultivo único ou múltiplos, submetidos ou não a programas de irrigação específicos (Trava et al., 1977; Matanga & Mariño, 1979; Kumar & Khepar, 1980; Neves et al., 1984; Tsai et al., 1987; Bernardo et al., 1988; Mannocchi & Mecarelli, 1994; Van Deman et al., 1976; Autran, 1980; Arce, 1990; Dantas Neto, 1994; Oliveira & Lanna, 1997; Curi et al., 1998; Carvalho et al., 2000; Rodrigues et al., 2000).

Neste trabalho é mostrado um modelo de otimização com base na PL para fornecer subsídios com vistas ao planejamento da utilização da água excedente do sistema de reservatórios Coremas e Mãe d'Água-PB, para um perímetro de irrigação localizado nas várzeas da cidade de Sousa-PB. São fornecidas estimativas otimizadas dos benefícios econômicos do uso da água desse sistema de reservatórios para irrigação no referido perímetro. A análise envolve o estudo das variações da resposta do sistema a séries temporais de períodos de seca e chuvoso com relação a níveis de anos considerados normais para a região. Também é estudado o efeito de variações no preço da água e das frutas no resultado da função objetivo.

Enquanto visa-se a maximização da receita líquida com a alocação de áreas para as culturas pré-selecionadas, procura-se, ao mesmo tempo, por uma solução que satisfaça os requerimentos relacionados aos limites físicos dos elementos do sistema, assim como aos critérios operacionais para os reservatórios e perímetros irrigados, que inclui o conceito de sustentabilidade hídrica. Aqui, sustentabilidade hídrica é definida como uma restrição que impõe que o volume de água do sistema de reservatórios ao final do período estudado seja igual ou superior ao seu volume inicial. Esta restrição procura assegurar que a seleção de culturas e a definição de áreas plantadas possam se repetir em anos que tiverem condições climáticas iguais ou melhores e em situações onde as demais demandas sejam, também, iguais ou menores que a vigente.

## DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A área em estudo contempla um sistema de reservatórios (composto pelos reservatórios Estevão Marinho, também denominado de Coremas, e Mãe D'Água), situa-

dos na bacia hidrográfica do Rio Piancó – PB, e um perímetro irrigado em implantação nas várzeas da cidade de Sousa – PB, situado na bacia sedimentar do rio do Peixe (Figura 1).

Os rios Piancó, Emas e Aguiar são os afluentes ao sistema de reservatórios com uma contribuição percentual de vazão afluente ao sistema de 89,19%, 4,19% e 6,62% respectivamente. O sistema de reservatórios tem uma capacidade máxima de  $1.368 \times 10^6 \text{ m}^3$ , na cota 245 metros, e volume mínimo de  $279 \times 10^6 \text{ m}^3$ , na cota 230 metros, que é a cota de interligação dos reservatórios. Suas águas são classificadas como do tipo C1-S1, que é considerada boa tanto para o consumo humano como para irrigar qualquer tipo de cultura. A água dos reservatórios vem sendo utilizada para múltiplos usos que incluem abastecimento humano, geração de energia elétrica, irrigação, piscicultura e regularização de vazão para o Estado do Rio Grande do Norte.

A Tabela 1 apresenta as vazões mensais médias afluentes ao sistema de reservatórios Coremas/Mãe d'Água. A vazão média defluente desse sistema é igual a 7,8  $\text{m}^3/\text{s}$ , considerando as seguintes demandas como fixas: abastecimento humano, regularização de vazão, geração de energia elétrica, piscicultura e uma pequena faixa de terra irrigada ao redor do açude. Neste estudo, o volume inicial do reservatório corresponde a 60% do seu volume máximo, no início do mês de janeiro, que é o volume usual do reservatório para esta época do ano.

A distribuição das chuvas (média anual de 832mm) na bacia é bastante irregular, com início do período chuvoso em janeiro estendendo-se até o início de maio (Tabela 1). A evaporação nesta região é bastante elevada (Tabela 1).

O perímetro abrange uma área de 13.568 ha e localiza-se na confluência do rio do Peixe com o rio Piranhas, entre as cidades de Sousa ( $6^\circ 34'$  de latitude e  $38^\circ 13'$  de longitude) e Aparecida ( $6^\circ 46'$  de latitude e  $38^\circ 06'$  de longitude). Apresenta altitude média de 225 m, clima tipo semi-árido quente mediano, com 7 a 8 meses do ano seco, vegetação tipo caatinga e é caracterizado como um bioclima do tipo 4aTh, segundo classificação de Gaussen. Os solos são do tipo Vertisolos (26,60%), Aluviais Eutróficos (39,20%), Podzólico Vermelho-Amarelo Eutrófico (22,8%) e Litólicos Eutróficos (Chaves et al, 1998). Para efeito de estudo, nesta pesquisa, foi considerado como passível de irrigação, uma área em fase de loteamento com, aproximadamente, 5.000 ha de terras classificadas como aptas para irrigação (4.882ha e 117,07ha de solos da classe 2 e 3, respectivamente). Esta área é considerada um dos melhores solos para agricultura irrigada no Estado da Paraíba.

De acordo com o solo existente na região, assim como a prática de cultivo em outras áreas irrigadas no semi-árido nordestino, assumiu-se que as culturas mais adequadas para serem cultivadas no perímetro são: manga,

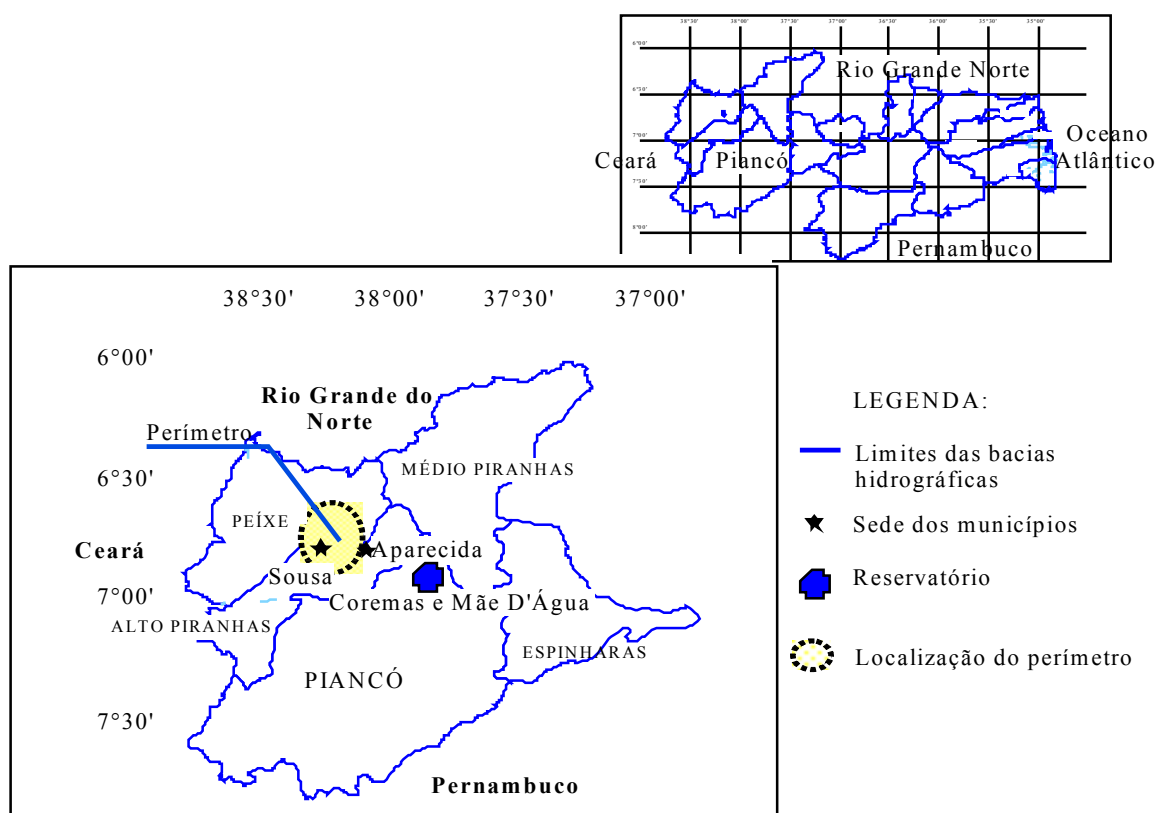


Figura 1 - Localização da Bacia do Rio Piancó e do perímetro irrigado nas Várzeas de Sousa-PB

Tabela 1 - Valores médios de precipitação e evaporação nas várzeas de Sousa e nos reservatórios e vazões médias afluentes aos reservatórios

	Sousa (médias)		Coremas (médias)		Vazões Médias <sup>(4)</sup> Afluentes aos reservatórios (m <sup>3</sup> /s)
	Precipitação <sup>(1)</sup> (mm)	Evaporação <sup>(2)</sup> (mm)	Precipitação <sup>(1)</sup> (mm)	Evaporação <sup>(3)</sup> (mm)	
Janeiro	86,3	249,0	79,1	224,0	7,94
Fevereiro	154,5	198,3	129,1	171,0	29,06
Março	234,1	196,5	208,5	154,0	48,99
Abril	170,6	169,2	169,3	140,0	71,05
Maio	80,3	175,2	65,3	140,0	30,00
Junho	28,6	181,4	28,7	139,0	7,31
Julho	14,8	212,5	15,6	168,0	3,49
Agosto	4,8	262,4	5,5	215,0	2,27
Setembro	3,7	275,6	5,8	233,0	1,29
Outubro	7,9	298,6	9,7	259,0	0,68
Novembro	15,3	283,4	18,9	251,0	0,72
Dezembro	31,8	277,0	34,9	232,0	2,53
Total	832,7	2.761,5	770,4	2326,0	Média=17,1

(1)- Precipitações: Fonte-SUDENE, 1998.

(2)- Evaporação em Sousa (Tanque Classe A): Fonte-SUDENE, 1998.

(3)- Evaporação em Coremas (Tanque Classe A): Fonte-Agrosolos Engenharia Ltda., 1993.

(4)- Vazões afluentes: Fonte-Oliveira, 1998.

**Tabela 2 - Dados relativos aos cultivares selecionados**

Cultura	Área máxima (ha)	Preço de Venda <sup>(1)</sup> R\$/kg R\$/fruto <sup>(2)</sup>	Coeficiente de Cultivo <sup>(3)</sup>				Sistema de irrigação <sup>(4)</sup>		
			1	2	3	4	Tipo	Eficiência(%)	Pressão requerida(mca)
Manga	3.749	0,48	0,45	0,80	1,20	0,80	Microaspersão	60	45
Goiaba	1.701	0,50	0,45	0,70	1,00	0,80	Microaspersão	60	45
Melancia s	1.735	0,21	0,45	0,75	1,00	0,75	Gotejamento	85	30
Melancia es	1.735	0,24	0,45	0,75	1,00	0,75	Gotejamento	85	30
Melão s	1.735	0,64	0,45	0,75	1,00	0,75	Gotejamento	85	30
Melão es	1.735	0,70	0,45	0,75	1,00	0,75	Gotejamento	85	30
Maracujá	210	1,31	0,55	0,70	0,90	0,70	Gotejamento	85	30
Limão	1.911	0,26	0,65	0,70	0,70	0,65	Microaspersão	60	45
Abacate	175	0,17	0,45	0,78	1,20	0,78	Microaspersão	60	45
Mamão	210	0,42	0,40	0,75	1,00	0,90	Microaspersão	60	45
Uva	1.735	0,65	0,25	0,60	0,90	0,30	Gotejamento	85	30
Coco*	1.735	0,42	0,50	1,00	1,00	1,00	Gotejamento	85	30
Graviola	3.714	1,40	0,45	0,80	1,20	1,20	Microaspersão	60	45

s- safra, es- entressafra;

(1)-Preço de venda do produto obtido de Paraíba (1998a) e CEASA-PE (18/06/1999) com aplicação de redutor de 30%;

(2)-Se refere apenas a cultura do coco onde o preço é dado em R\$/frutos;

(3)-Coeficiente de cultivo por período vegetativo segundo Doorenbos & Kassam (2000) e Gomes (1997);

(4)-Sistema de Irrigação segundo Gomes (1997) e Paraíba (1998b).

**Tabela 3 - Produtividade e custo médio de produção anual de cultivares em implantação**

Cultura	Produtividade <sup>(1)</sup> (Unidade ou Kg/ha)						Custo médio de produção <sup>(1)</sup> (R\$/ano/ha)					
	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6
Manga	0	0	2000	5000	8000	15000	1.432	530	730	905	1.085	1.270
Goiaba	1000	4000	12000	16000	16000	16000	1.819	925	1.036	1.058	1.058	1.058
Melancia s	25000	25000	25000	25000	25000	25000	1.055	1.055	1.055	1.055	1.055	1.055
Melancia es	25000	25000	25000	25000	25000	25000	1.055	1.055	1.055	1.055	1.055	1.055
Melão s	15000	15000	15000	15000	15000	15000	1.485	1.485	1.485	1.485	1.485	1.485
Melão es	15000	15000	15000	15000	15000	15000	1.485	1.485	1.485	1.485	1.485	1.485
Maracujá	8000	15000	10000	8000	15000	10000	4.395	1.245	910	4.395	1.245	910
Limão	0	0	3000	10000	20000	30000	1.910	841	841	871	1.002	1.051
Abacate	0	0	2000	8000	15000	15000	1.977	1.556	1.802	1.901	1.135	1.135
Mamão	10000	30000	15000	10000	30000	15000	1.706	1.608	1.293	1.706	1.608	1.293
Uva	0	0	18000	30000	40000	40000	9.475	1.335	7.210	8.371	10.39	10.39
Coco*	0	0	20000	30000	40000	40000	1.257	584	810	860	910	1.510
Graviola	0	0	5.000	7000	7000	7000	1.907	653	773	893	893	893

(1)-Produtividade e Custo de Produção segundo Paraíba (1997); O custo da produção de abacate foi acrescido de R\$ 125,00 em tratamentos culturais correspondente ao manejo com irrigação. Para as outras culturas os custos referentes a manejo com irrigação já estão incluídos.

goiaba, melancia e melão, na safra (fevereiro a abril) e na entressafra (agosto a outubro), maracujá, limão taiati, abacate, mamão, uva, coco e graviola. Para cada uma das culturas acima citadas foi designada uma área máxima de cultivo (Tabela 2) em função da aptidão agrícola dos tipos de manchas de solo existentes. Não foram estabelecidas

áreas mínimas para os cultivares, de forma as que culturas que não dessem um retorno financeiro adequado pudessem ser excluídas na solução ótima. Os dados econômicos necessários para caracterização das culturas irrigadas no projeto, como: tipo de irrigação, tipo de cultura, coeficiente de cultivo para os quatro estádios de desenvolvimento das

culturas, produtividade e custo médio de produção (Tabelas 2 e 3) foram obtidos através da síntese do Projeto Várzeas de Sousa-PB, Paraíba (1998b), e Manual de Orçamento Agropecuários CENOP-CDE-COVAT/Banco do Nordeste, Paraíba (1997). Alguns dados foram estimados com base nos métodos e índices propostos por Doorenbos & Pruitt (1997). Os dados referentes ao sistema de irrigação (Tabela 2), sua eficiência de aplicação e distribuição e seus requerimentos de pressão estão de acordo com Doorenbos & Kassam (2000) e Gomes (1997). Assumiu-se que o sistema de bombeamento, formado por um conjunto de três bombas com capacidade de 1.600 l/s cada uma, trabalha, em média, 20 horas por dia. Ainda, estima-se que o custo da água bruta para irrigação é de R\$ 12,90/1.000 m<sup>3</sup> de água e o custo da energia é de R\$ 0,07/KwH.

O perímetro é abastecido por um canal de concreto de forma trapezoidal, com capacidade de 4 m<sup>3</sup>/s, que o liga ao sistema de reservatórios. A distância entre o perímetro irrigado e o ponto de captação nos reservatórios é de 37 km.

## MODELO DE OTIMIZAÇÃO

A função objetivo do modelo é especificada como a maximização da receita líquida,  $RI$ , que é dada pela diferença entre a renda bruta total obtida com a venda da produção das culturas e os custos de produção total que envolvem custos de energia, água, sementes, herbicidas, trabalho mecânico, mão-de-obra, impostos, etc. Logo, a função objetivo é dada por:

$$\max RI = \sum_{t=1}^{na} \prod_{l=1}^t (1 + d_l) * a \quad (1)$$

onde  $a = \sum_{j=1}^{nc} (\prod_{m=1}^t (1 + dc_{jm}) * Rb_{jt} - Cp_{jt} - Ca_{jt} - Cb_{jt})$ ,  $nc$  é o número de culturas,  $na$  é o número de anos em estudo,  $Rb_{jt}$  é a receita bruta da cultura  $j$  no ano  $t$ ,  $Cp_{jt}$  é o custo de produção da cultura  $j$  no ano  $t$ ,  $Ca_{jt}$  é o custo da água usada na cultura  $j$  no ano  $t$ ,  $Cb_{jt}$  é o custo de bombeamento de água para a cultura  $j$  no ano  $t$ ,  $\prod_{l=1}^t (1 + d_l)$  é o fator de atualização monetária referente a taxa de (inflação) desvalorização,  $d_l$ , da moeda no ano  $l$  e  $\prod_{m=1}^t (1 + dc_{jm})$  é o fator de atualização monetária referente a expectativa da taxa de crescimento ou decréscimo nos preços,  $dc_{jm}$ , além do nível da inflação, da cultura  $j$  no ano  $l$ , que pode ser positiva ou negativa.

A renda bruta anual,  $Rb_{jt}$  em R\$/ano/cultura é dado pela Equação (2).

$$Rb_{jt} = \sum_{k=1}^{nb} Prod_{jt} * Pr_{cj} * Ac_{jk} \quad (2)$$

onde,  $nb$  é o número de sistemas de bombeamento,  $Prod_{jt}$  é a produção da cultura  $j$  no ano  $t$ ,  $Pr_{cj}$  é o preço de comercialização da cultura  $j$  e  $Ac_{jk}$  é a área plantada com a cultura  $j$  e irrigada com o sistema  $k$  de bombeamento.

O custo anual de produção ( $Cp_{jt}$ ) em R\$/ano/cultura é relativo aos gastos com insumos, mão de obra e máquinas, que é dado por:

$$Cp_{jt} = \sum_{k=1}^{nb} Cprod_{jt} * Ac_{jk} \quad (3)$$

onde  $Cprod_{jt}$  é o custo da produção da cultura  $j$  no ano  $t$  em R\$/ha.

O custo anual da água ( $Ca_{jt}$ ) em R\$/ano/cultura, aduzida do reservatório é dado por:

$$Ca_{jt} = 10 \sum_{k=li=12*(t-1)+1}^{nb} \sum_{i=1}^{12*(t-1)+12} Pr a_k * Qirr_{ijk} * Ac_{jk} \quad (4)$$

onde  $Pr a_k$  é o preço atual da água em R\$/m<sup>3</sup> captado do reservatório e  $Qirr_{ijk}$  é a água requerida pela cultura  $j$  no mês  $i$  e bombeada pelo  $k$ -ésimo sistema de bombeamento. O cálculo da vazão requerida para a cultura  $j$  no mês  $i$  é dada por

$$Q_{ijk} = \frac{NI_{ij}}{(1 - LR_{ij}) * Ea_j * Ed_j} \quad (5)$$

onde

$$NI_{ij} = Etp_{ij} - Pe_i \\ = Kc_j * Eto_i * Pe_i, \quad (6)$$

$NI_{ij}$  é a necessidade de irrigação líquida da cultura  $j$ , em mm/mês, durante o mês  $i$ ,  $Etp_{ij}$  é a evapotranspiração da cultura  $j$  durante o mês  $i$  em mm/mês ou 10.m<sup>3</sup>/ha/mês,  $Kc_j$  é o coeficiente de cultivo da cultura  $j$ ,  $Eto_i$  é a evaporação durante o mês  $i$ ,  $Pe_i$  é a precipitação efetiva durante o mês  $i$  em mm/mês ou m<sup>3</sup>/ha/mês,  $LR_{ij}$  é a necessidade de lixiviação da cultura  $j$  durante o mês  $i$  e  $Ea_j$  e  $Ed_j$  são as eficiências da aplicação e distribuição do sistema de irrigação da cultura  $j$ , respectivamente.

O custo anual de bombeamento de água ( $Cb_{jt}$ ) em R\$/ano/cultura para as culturas irrigadas é dado através da Equação (7).

$$Cb_{jt} = \sum_{k=1}^{nb} \frac{12^{*(t-1)+12}}{\sum_{l=12^{*(t-1)+1}}^{12^{*(t-1)+12}} b / \eta_k} \quad (7)$$

onde  $b = 0,02726 * Prb_k * H_{jk} * (Qirr_{ijk} * Ac_{jk} * nh_k)$ ,  $nm$  é o número de meses,  $H_{jk}$  é a altura manométrica média, em metros de coluna de água (mca), requerido pelo sistema de irrigação da cultura  $j$  e aduzido pelo sistema  $k$  de bombeamento,  $\eta_k$  é a eficiência do sistema  $k$  de bombeamento,  $Prb_k$  é o preço da energia em R\$/Kwh e  $nh_k$  é o número de horas mensais de trabalho do sistema  $k$  de bombeamento.

Vários são os conjuntos de equações que especificam as restrições do problema, dentre eles tem-se:

### Crítérios agronômicos

$$A \min_j \leq \sum_{k=1}^{nb} Ac_{jk} \leq A \max_j \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^{nb} \sum_{j=1}^{nc} \alpha_{ij} * Ac_{jk} \leq Atot_i \quad (9)$$

### Não negatividade das variáveis

$$-Ac_{jk} \leq 0 \quad e \quad -Vext \leq 0 \quad (10)$$

### Reservatórios

$$Vr \min_i \leq Vr_i \leq Vr \max_i \quad (11)$$

$$Vext_i \leq Vext \max \quad (12)$$

### Capacidade do canal

$$10 \sum_{j=1}^{nc} Q_{ijk} Ac_{jk} \leq Va \max_i \quad (13)$$

### Capacidade sistema de bombeamento

$$10 \sum_{j=1}^{nc} Qirr_{ijk} * Ac_{jk} \leq \sum_{l=1}^{nb} Vb \max_{lk} \quad (14)$$

$$10 \sum_{\{j|0 < H_{jk} < Href\}} Qirr_{ijk} * Ac_{jk} \leq \sum_{\{l|Hb_{lk} \geq Href\}} Vb \max_l \quad (15)$$

onde  $Amin_j$  é a área mínima plantada com a cultura  $j$  em ha,  $Amax_j$  é a área máxima plantada com a cultura  $j$  em ha,  $Atot_i$  é o limite máximo de área total que pode ser plantada no mês  $i$  em ha,  $\alpha_{ij} = 1$  quando a cultura  $j$  é plantada no mês  $i$  e  $\alpha_{ij} = 0$  se a cultura  $j$  não é plantada no mês  $i$ ,  $Vr \max_i$  é o volume máximo do reservatório no mês  $i$  (m<sup>3</sup>),

$Vr \min_i$  é o volume mínimo do reservatório no mês  $i$  (m<sup>3</sup>),  $Vamax_i$  é a capacidade máxima mensal de vazão do canal que liga o reservatório a área irrigada,  $Vbmax_i$  é a capacidade do conjunto instalado de bomba  $l$  em m<sup>3</sup>/mês,  $Hb_{lk}$  é a capacidade de elevação da água pelos conjuntos de bombas  $l$  do sistema de bombeamento  $k$  (em m),  $H_{ref}$  é a referência variável para comparação entre as alturas requeridas pela cultura  $j$  e pela capacidade de elevação de água por um conjunto de bombas  $l$  (sugere-se que varie em ordem crescente e é dada em m) e  $Vext \max$  é o limite máximo da capacidade do extravasor em m<sup>3</sup>/mês.

O balanço hídrico do reservatório é dado pela Equação (16).

$$V_{i+1}^{l+1} = V_i^{l+1} + Vp_i^l + Va_i - Ve_i^l - Vdem_i^{l+1} \quad (16)$$

onde  $l$  é o número de vezes que esta sendo aplicada a programação linear,  $V_{i+1}^{l+1}$  é o volume de água no reservatório ao final do mês  $i$ ;  $V_i^{l+1}$  é o volume do reservatório no início do mês  $i$ ;  $Vp_i^l$  é o volume precipitado sobre o reservatório durante o mês  $i$ ;  $Va_i$  é o volume afluente ao reservatório durante o mês  $i$ ;  $Ve_i^l$  é o volume evaporado do reservatório durante o mês  $i$  e  $Vdem_i^{l+1}$  é o volume defluente do reservatório durante o mês  $i$ . Os volumes precipitados e evaporados do reservatório são calculados pelas equações:

$$Ve_i^l = \frac{(Ar_i^l + Ar_{i-1}^l)}{2} . Er_i \quad e \quad (17)$$

$$Vp_i^l = \frac{(Ar_i^l + Ar_{i-1}^l)}{2} . Pr_i \quad (18)$$

onde  $Ar_i^l$  é a área do espelho de água do reservatório, determinada a partir da relação área versus volume, no mês  $i$  na  $l$ -ésima aplicação da programação linear e  $Er_i$  e  $Pr_i$  é a evaporação e precipitação no mês  $i$ , respectivamente.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

As culturas utilizadas neste estudo foram classificadas como perenes, semi perenes (as que possuem um ciclo vegetativo de três anos) e sazonais (as temporárias que tem ciclo vegetativo inferior a um ano). A área plantada total será mostrada como áreas plantadas no primeiro e no segundo semestres. O intervalo de tempo para o qual será feita a otimização é de seis anos, uma vez que algumas culturas perenes levam quase este tempo para estabilizarem suas produções permitindo, assim, obter soluções bem

**Tabela 4 - Síntese dos cenários, destacando as diferenças entre os mesmos.**

Cenários	C1	C2	C3	C4	C5
Precipitação (mensal)	Média	Valores reais plurianuais	Valores reais plurianuais	Valores reais plurianuais	Valores reais plurianuais
Vazão do Canal (mensal)	Real	Real	Reduzido	Real	Real
Preço da fruta (R\$)	Real	Real	Real	Variado	Real
Preço da água (R\$)	Real	Real	Real	Real	Acrescido

**Tabela 5 - Precipitação mensal média em mm que caracteriza os períodos de ocorrência dos ciclos normal, seco e chuvoso.**

Ciclo	Período	Médias pluviométricas mensais (mm)											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Normal	1959-64	66,1	202,1	259,7	165,4	45,9	29,4	7,7	0,0	0,0	5,8	12,2	41,5
Seco	1957-62	72,3	110,9	240,6	90,7	37,4	11,6	2,3	0,0	0,0	0,0	1,0	18,7
Chuvoso	1973-78	124,9	220,7	229,4	259,4	104,0	37,5	26,1	0,5	12,9	20,8	8,8	38,5
Médio	1937-90	86,3	154,5	234,1	170,6	80,3	28,6	14,8	4,8	3,7	7,9	15,3	31,8

**Tabela 6 - Exemplo do cálculo das médias plurianuais**

Ano	Média anual	Média plurianual
1937	800,00	814,40
1938	645,60	
1939	909,90	
1940	1.288,50	
1941	844,50	
1942	397,90	
1943	427,10	
1944	683,00	
1945	804,90	
1946	729,80	
1947	1.270,10	718,80
...	...	
1990	567,70	979,50
<b>Média (mm)</b>	<b>832,70</b>	

realistas em função das variações propostas em cada cenário.

Para alcançar os objetivos propostos no início deste estudo foram elaborados cinco cenários. As diferenças entre eles são mostradas de forma resumida na Tabela 4. A seguir são descritos os pressupostos de cada cenário.

**Primeiro cenário (C1)** – É o cenário a partir do qual serão feitas comparações entre os demais cenários estudados neste trabalho, no que diz respeito a receita líquida oriunda da agricultura irrigada, área irrigada por cultura e total e a alocação dos volumes mensais de água. São utilizadas, para cada ano, as médias mensais de toda a série de precipitação, evaporação e vazões afluentes caracterizando, assim, este cenário como médio.

**Segundo cenário (C2)** – Em geral os modelos com base mensal para otimização do planejamento do uso da água em reservatórios, incluindo a seleção ótima de culturas e

áreas irrigadas, usam dados de vazões afluentes, precipitações e evaporações médias mensais. Tais dados, apesar de representarem o comportamento médio das variáveis hidrológicas de entrada do sistema, carecem da informação de suas variabilidades inter anuais que podem modificar a solução do problema. Para contornar este problema pode-se fazer uso de:

- 1- modelos de otimização com uma série de dados estendida, que é inviável por aumentar bastante o número de variáveis de decisão e restrições;
- 2- modelos de simulação que fazem uso da mesma série da qual foi extraída a média ou, se a série não for suficientemente longa, de uma série estendida, para analisar as falhas que podem advir das diretrizes operacionais obtidas por um modelo de otimização que utiliza valores médios mensais ou
- 3- modelos de otimização aplicados a cenários que representem ciclos climáticos e considerem um maior número de anos da série de dados.

Para incluir a variabilidade dos dados neste estudo, optou-se por verificar qual o comportamento do sistema, em termos de área irrigada e padrão de escolha das culturas para períodos de 6 anos consecutivos representando três diferentes ciclos de precipitações denominados de normal, seco e chuvoso. O primeiro ciclo considera os anos da série pluviométrica cuja média anual seja a mais próxima do correspondente valor médio de toda a série. No segundo ciclo, ao invés de fornecer o percentual de falhas do sistema ao longo do tempo, preferiu-se estabelecer um cenário que representasse as condições de seca severa mais usuais que podem ser atenuados, neste período de 6 anos, quando são seguidos ou antecipados por anos com precipitações mais usuais. A análise deste cenário possibilita aos administradores do perímetro, se fosse o caso, instituir limites de plantio para as culturas perenes, uma vez que a implantação destes pomares é onerosa e a perda deles, por falta de água, constitui-se em grande prejuízo. Finalmente, o ciclo chuvoso pretendeu estabelecer se haveria grande diferença nos resultados caso houvesse uma situação ideal de períodos de precipitação acima da média.

Para obtenção destas séries, calculou-se as médias plurianuais com períodos de seis anos sobrepostos, ou seja, o primeiro período abrangendo os primeiros seis anos, de 1937 a 1942, o segundo período de seis anos abrangendo os últimos cinco anos do primeiro período mais o ano subsequente, de 1938 a 1943, e assim por diante até varrer uma série de 54 anos de dados. Este procedimento pode ser visualizado na Tabela 6. As médias pluviométricas mensais destes ciclos para o cenário C2 estão apresentadas na Tabela 5 e se distinguem umas das outras por serem os seis anos consecutivos mais chuvosos, mais secos e mais próximos da média de toda a série. Suas médias anuais foram de 979,50 mm, 647,90 e 814,40 mm, respectivamente.

Na Tabela 7 encontram-se os resultados referentes ao primeiro e segundo cenários onde se estudou o desempenho do sistema para diferentes séries pluviométricas, caracterizadas como ciclos médio, normal, seco e chuvoso. Os resultados mostrados nesta tabela permitem observar que a seleção de culturas com suas respectivas áreas de cultivo foram iguais entre os ciclos médio, normal, seco e chuvoso. Observa-se que, mesmo apresentando as mesmas culturas como também as mesmas áreas cultivadas, tanto no primeiro quanto no segundo semestre, o volume de água utilizado foi diferente entre os ciclos. Verificou-se a utilização de um menor volume de água do reservatório para o ciclo chuvoso ( $235,38 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), como era de se esperar, em função de uma maior oferta hídrica decorrente da pluviometria natural. O segundo menor consumo deu-se para o ciclo médio ( $238,51 \times 10^6 \text{ m}^3$ ). A Figura 2 mostra a vazão utilizada para cada um dos cenários hidroclimáticos durante todo

o período de seis anos. Nesta figura observa-se um padrão de uso da água para o ciclo seco diferenciado dos demais, principalmente nos meses em que tradicionalmente ocorre o período chuvoso. Apesar de, neste ciclo, ter sido irrigada a mesma quantidade de área que os demais ciclos, usou-se de mais água, redundando em uma queda na receita líquida de 2,08% em relação ao ciclo médio. Em relação a receita líquida gerada pelo primeiro cenário ciclo médio e segundo cenário ciclo normal, observa-se um pequeno decréscimo (0,74%), evidenciando o efeito que a utilização de valores de precipitação mensais reais ao invés de valores mensais médios tem na necessidade hídrica do perímetro irrigado, com relação ao balanço hídrico de solo. Analogamente, com relação ao ciclo chuvoso houve um acréscimo de 0,16% da receita líquida com relação ao ciclo médio.

É interessante observar que a maior receita líquida é 2,28% superior a menor e que, para os cenários onde ocorreu esta maior diferença de receita líquida, a diferença de uso de água é de 15,7%. No entanto, a diferença de uso de água entre os cenários de maior e menor consumo hídrico foi de 18,6%. Portanto, pode-se inferir que a escolha do ciclo hidroclimático, quer seja usando médias mensais ou valores reais de dados de precipitação, tem bastante influência no volume global de apropriação de água e, neste caso, pouca influência na geração da receita líquida e na área cultivada. Neste problema o fator mais limitante (restrição ativa) foi a capacidade do canal, que foi atingida em determinados meses para todos os cenários, conforme pode ser visualizado na Figura 2.

Por não haver variação de área cultivada nem no 1º semestre nem no 2º semestre, para todos os cenários climáticos estudados pode-se concluir que uma análise tradicional da verificação do risco de falhas através de um modelo de simulação seria desnecessário por não haver falhas. As falhas, neste caso, não aconteceriam em razão do grande volume de água do sistema hídrico fornecedor: os reservatórios Coremas e Mãe D'água. Nas condições de volume inicial e demandas vigentes o sistema Coremas-Mãe D'Água dificilmente ficaria em condições de fornecer menos que  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  que é a capacidade do canal. Portanto, em função dos resultados obtidos com os cenários C1 e C2, ficou constatado que os riscos de não atendimento às necessidades dos irrigantes adviria de captações indevidas em vários pontos do canal adutor. Fato que já se verifica mesmo antes do perímetro de irrigação estar completamente implantado, constituindo-se numa preocupação vigente dos administradores do empreendimento.

**Terceiro cenário (C3)** – O objetivo deste cenário é verificar o comportamento do sistema, para as situações climáticas descritas nos dois primeiros cenários, quando



Tabela 7 - Áreas (ha), receitas líquidas obtidas e volume de água usado para o primeiro, segundo (normal, seco e chuvoso) e terceiro (normal com redução de vazão máxima do canal) cenários

Culturas	1º cenário	2º cenário			3º Cenário ciclo normal				
	Ciclo médio	Ciclo normal	Ciclo seco	Ciclo chuvoso	10%	20%	30%	40%	50%
Melancia s	1.735	1.735	1.735	1.735	1.735	1.735	1.735	1.735	1.655
Melancia es	592	592	592	592	209	0	0	0	0
Melão s	1.735	1.735	1.735	1.735	1.735	1.735	1.735	1.735	1.735
Melão es	1.735	1.735	1.735	1.735	1.735	1.735	1.735	1.735	1.735
Maracujá	210	210	210	210	210	210	210	210	202
Coco	1.318	1.318	1.318	1.318	1.318	1.144	760	377	0
Rec.líquida (10 <sup>6</sup> R\$)	285,51	283,40	279,57	285,97	273,63	262,52	249,81	237,08	222,19
Superávit (%)		-0,74	-2,08	+0,16	-4,16	-8,05	-12,50	-16,96	-22,18
Volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	238,51	253,01	279,27	235,38	287,95	257,16	208,23	159,29	110,03
Área em ha (1º semestre)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	4.825	4.442	4.058	3.594
% Redução Área 1º semest.					0,0	3,50	11,16	18,84	28,12
Área em ha (2º semestre)	3.857	3.857	3.857	3.857	3.474	3.090	2.706	2.323	1.939
% Redução Área 2º semest.					9,90	19,88	29,84	39,53	49,72

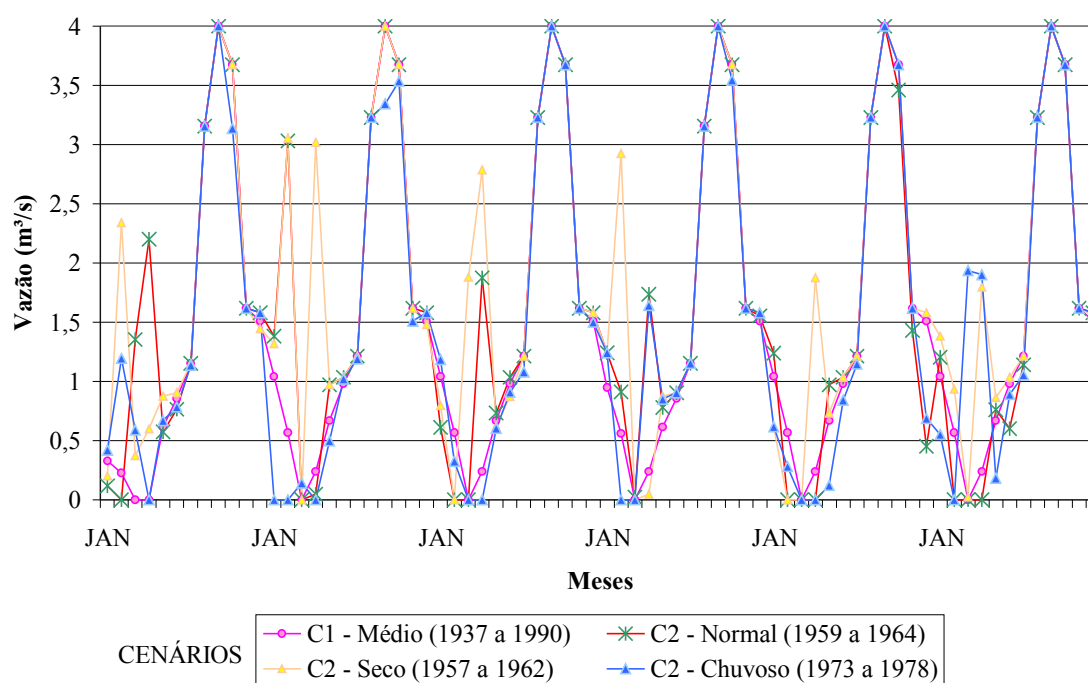


Figura 2 - Vazão utilizada em todo período de otimização para o primeiro e segundo cenário

**Tabela 8 – Áreas cultivadas (ha), receitas líquidas e volume de água usado para o primeiro e terceiro cenário (seco e chuvoso) considerando reduções na vazão máxima do canal**

Culturas	1º Cenário	3º Cenário ciclo seco					3º Cenário ciclo chuvoso				
	Ciclo médio	10%	20%	30%	40%	50%	10%	20%	30%	40%	50%
Melancia s	1735	1735	1735	1735	1735	1629	1735	1735	1735	1735	1735
Melancia es	592	205	0	0	0	0	209	0	0	0	0
Melão s	1735	1735	1735	1735	1735	1735	1735	1735	1735	1735	1735
Melão es	1735	1735	1735	1735	1735	1735	1735	1735	1735	1735	1735
Maracujá	210	210	210	210	210	202	210	210	210	210	210
Coco	1318	1.318	1.144	760	377	0	1318	1144	760	377	0
Rec.líquida (10 <sup>6</sup> R\$)	285,5	269,7	258,9	246,6	234,4	219,3	276,1	264,8	251,7	238,6	225,4
Superávit (%)		-5,53	-9,32	-13,62	-17,91	-23,18	-3,27	-7,24	-11,83	-16,42	-21,05
Volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	238,5	319,4	286,9	234,3	181,8	128,2	267,1	238,0	192,3	146,7	101,5
Área em ha (1º semestre)	5000	5000	4825	4442	4058	3568	5000	4825	4442	4058	3681
% Red. Área 1º semestre		0,0	3,5	11,1	18,8	28,6	0,0	3,5	11,1	18,8	26,4
Área em ha (2º semestre)	3857	3470	3090	2706	2323	1939	3474	3090	2706	2323	1939
% Red. Área 2º semestre		10,0	19,9	29,8	39,7	49,7	9,9	19,9	29,8	39,7	49,7

submetidos a retiradas de água do canal para atender demandas difusas. foram testadas retiradas de água do canal adutor com incrementos de 10% em 10% até o limite de 50% da vazão máxima do canal. Simula-se retiradas difusas de água do canal da ordem de 0,4 m<sup>3</sup>/s, 0,8 m<sup>3</sup>/s, 1,2 m<sup>3</sup>/s, 1,6 m<sup>3</sup>/s e 2,0 m<sup>3</sup>/s. Na Tabela 7 encontram-se os resultados para as culturas com áreas alocadas diferentes de zero referentes ao terceiro cenário ciclo normal, nos quais foram efetuadas reduções na vazão do canal de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Observa-se que em todas as circunstâncias, tanto para o ciclo médio como para os demais percentuais do ciclo normal, não houve alocação de área para as culturas de manga, goiaba, limão, abacate, mamão, uva e graviola. Apenas o melão, quando plantado na época da safra e entressafra, manteve áreas iguais a do primeiro cenário, para todas as circunstâncias do terceiro cenário. Observa-se uma redução gradual na receita líquida a medida que aumentam-se os percentuais de retirada de água do canal, a uma taxa de aproximadamente 4% de redução na receita líquida para cada 10% de redução da vazão máxima aduzida pelo canal. A Tabela 8 mostra os resultados para as culturas com áreas alocadas diferentes de zero referentes ao terceiro cenário envolvendo os ciclos seco e chuvoso nos quais foram efetuadas reduções na vazão do canal de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Observa-se um comportamento semelhante ao da Tabela 7, com relação a escolha

de culturas com áreas não nulas e as taxas de redução de receita líquida.

Os resultados mostraram reduções consideráveis nas áreas irrigadas no 1º e 2º semestres (Tabelas 7 e 8). Observa-se a não proporcionalidade entre a redução na área irrigada e na receita líquida. O percentual de redução na área irrigada é bem maior que o da receita líquida. Este comportamento mostra a importância da aplicação dos modelos de otimização na redução dos prejuízos por déficits no fornecimento hídrico em um planejamento agrícola. Isto se torna mais importante no período de estiagem da região, que é o 2º semestre, quando culturas inteiras deixaram de ser selecionadas para plantio como a melancia cultivada no período de entressafra. Mais importante, é a redução na área cultivada com coco, já que a mesma é cultura perene de alto custo de implantação e, portanto, alto prejuízo no caso de perdas. Portanto, fica caracterizado o cuidado e preocupação que os administradores do projeto precisam ter com o problema de captações indevidas da água ao longo do canal, podendo comprometer completamente o planejamento agrícola das culturas perenes e reduzindo a eficácia do perímetro em razão da redução da variabilidade do mix de culturas que poder-se-ia trabalhar. Da mesma forma que as variações entre os resultados de receita líquida e área irrigada foram pequenas em relação a variações nos cenários climáticos, era de se esperar que as variações de área irrigada e receita líquida para

**Tabela 9 – Áreas cultivadas (ha), receitas líquidas e volume de água usado para o primeiro e quarto cenário, que contempla variações percentuais no preço das frutas.**

Culturas	1º Cenário	4º Cenário Ciclo Normal			
	Ciclo normal	- 20%	+ 20%	- 30%	+ 30%
Melancia s (ha)	1.735	1.735	1.735	1.735	1.735
Melancia es (ha)	592	592	724	592	724
Melão s (ha)	1.735	1.735	1.735	1.735	1.735
Melão es (ha)	1.735	1.735	1.735	1.735	1.735
Maracujá (ha)	210	210	210	210	210
Uva (ha)	0	0	1.318	0	1.318
Coco (ha)	1.318	1.318	0	1.318	0
Receita líquida (10 <sup>6</sup> R\$)	279,57	208,09	359,55	170,43	401,57
Superávit (%)		-25,56	28,6	-39,03	43,63
Volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	238,51	303,61	273,02	303,61	273,02
Área (primeiro semestre)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Área (Segundo semestre)	3.857	3.857	3.989	3.857	4.031

(+) significa incremento e (-) significa redução

condições similares de redução de vazão no canal entre ciclos climáticos distintos também não proporcionassem diferenças muito grandes, conforme apresentado nas Tabelas 7 e 8.

**Quarto cenário (C4)** – Neste cenário tenta-se simular situações de variação no preço dos produtos cultivados, as quais são inerentes a uma economia de mercado. O objetivo deste cenário é, portanto, verificar o comportamento do sistema quando submetido a reduções e incrementos nos preços das frutas. Foram feitas reduções e aumentos nos preços de venda das frutas, que variaram de -20%, +20%, -30% e +30%, para cada cultura.

A Tabela 9 fornece os resultados obtidos com o quarto cenário. Verifica-se que existiram variações significativas no valor da receita líquida. Estas variações na receita líquida foram causadas por alterações nas alocações de áreas cultivadas com as culturas de melancia entressafra, uva e coco. Para uma redução de 20% e de 30% no preço de venda das frutas, não houve alteração tanto na seleção das culturas como na área alocada para cada uma delas. No entanto, em função do decréscimo de 20% e 30% no preço de venda das frutas a receita líquida reduziu-se em 25,56% e 39,03% respectivamente. Para um incremento de 20% e de 30% no preço de venda das frutas observou-se tanto uma mudança na seleção das culturas, com a inclusão da uva e exclusão do coco, como também variações na alocação de área destinada ao cultivo da melancia plantada no período de entressafra, que passou de 592ha para 724ha. Estas alterações de seleção de cultura, assim como áreas cultivadas, associadas ao novo preço de venda das culturas, produziram um incremento de receita líquida de 28,60% e 43,63%, respectivamente. Estes resultados demonstram que, ao aumentar ou diminuir o preço de venda das culturas e não alterar os custos de produção (insumos, mão de

obra, água, energia, etc.), a receita líquida para cada cultura não aumentou na mesma proporção, como se poderia esperar. Além disso, dependendo da grandeza do preço de venda e dos custos de produção, estas alterações podem provocar mudanças na escolha das culturas ou definição de suas áreas. Neste trabalho, observa-se que, quando há redução no preço de venda das frutas, o modelo de otimização produz um ótimo alocando área para a cultura do coco e nenhuma área para a cultura da uva, ocorrendo exatamente o inverso quando se aumenta o preço das culturas.

**Quinto cenário (C5)** – A inspiração para este cenário é a questão da cobrança pela água bruta, que é bastante polêmica, para uma atividade que é a de maior uso consuntivo no mundo, notadamente numa região semi-árida com altas taxas de evaporação e evapotranspiração. O valor cobrado pela água bruta nos perímetros irrigados sob a direção do DNOCS, na Paraíba, é de R\$0,0129/m<sup>3</sup>, valor adotado neste estudo. No entanto, questões referentes à cobrança da água para cobrir os custos de manutenção e operação do sistema de captação e amortizar total ou parcialmente os custos de construção são sempre levantadas. Neste sentido, é importante verificar, preliminarmente, o nível de cobrança para o qual o retorno do investimento ainda poderia ser aceitável para o irrigante. Portanto, o objetivo deste cenário é verificar o comportamento do sistema para variações no preço da água cobrado aos irrigantes. Foram testados valores de R\$ 0,20/m<sup>3</sup> à R\$ 1,40/m<sup>3</sup>, com incrementos de R\$ 0,10/m<sup>3</sup>. Estes valores são inferiores ao cobrado para abastecimento industrial do Ceará, por exemplo, que é de R\$ 1,40/m<sup>3</sup>.

A Tabela 10 mostra os resultados com referência a variações no preço da água. Foram testados apenas as

**Tabela 10 – Áreas cultivadas (ha), receitas líquidas e volume de água usado referentes ao quinto cenário, que contempla variações no preço da água**

Culturas	Preço do m³ de água em R\$													
	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	
Melancia s	0	0	0	0	0	0	0	1735	1735	1735	1735	1735	1735	
Melão s	1735	1735	1735	1735	1735	1735	1735	1735	1735	1735	1735	1735	1735	
Melão es	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1735	
Rec Líquida (10⁶R\$)	0,135	6,170	12,21	18,24	24,28	30,31	36,35	43,33	55,35	67,47	79,54	91,61	109,1	
Acréscimo sucessivo RL		6,03	6,04	6,03	6,04	6,03	6,04	6,9	12,0	12,1	12,0	12,0	17,5	
% que R\$0,10 representa de ganho na RL		4470	97,8	49,38	33,1	24,83	19,92	19,20	27,74	21,89	17,88	15,17	19,09	
% que R\$0,10 representa de perda na RL	97,81	49,46	33,05	24,87	19,89	16,61	16,10	21,71	17,96	15,17	13,17	16,03		
Volume (10⁶ m³)	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	20,12	20,12	20,12	20,12	20,12	90,97	
Área (ha)	1735	1735	1735	1735	1735	1735	1735	3470	3470	3470	3470	3470	3470	
1º semestre														
Área (ha)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1735	
2º semestre														
RL/ha.ano	12,96	592,6	1173	1752	2332	2912	3492	2129	2658	3241	3820	4400	3513	

culturas sazonais de melão e melancia safra e entressafra. Para a melancia cultivada no período de safra houve alocação de uma área de 1735 ha para preços de água bruta inferiores a R\$ 0,70 por m<sup>3</sup>. Acima deste valor não houve alocação de área para esta cultura. A melancia safra, mesmo cultivada na época do período chuvoso da região deixa de ser economicamente atrativa a partir de um valor de cobrança de R\$0,80/m<sup>3</sup>.

Independente do preço da água cobrada não houve alterações nas áreas ótimas alocadas para o melão safra, uma vez que esta cultura é plantada na época das chuvas e tem pouca dependência da irrigação. No entanto, se cultivado no período de estiagem, só tem atratividade econômica para valores inferiores a R\$0,20/m<sup>3</sup>, devido ao altíssimo consumo de água, de 40835,7 m<sup>3</sup>/ha, neste período, ou seja, quase que quadruplicando o volume de água usado.

Observa-se que decréscimos de R\$ 0,10/m<sup>3</sup> aplicados ao preço da água, quando esta varia de R\$ 1,40/m<sup>3</sup> a R\$ 0,70/m<sup>3</sup>, proporcionam um aumento de receita líquida de aproximadamente R\$6,04x10<sup>6</sup>. Quando a variação vai de R\$ 0,60/m<sup>3</sup> a R\$ 0,30/m<sup>3</sup>, o aumento é de R\$ 12x10<sup>6</sup> para cada decréscimo de 10% no preço da água. Abaixo de R\$ 0,20/m<sup>3</sup> o aumento na receita líquida é de R\$17x10<sup>6</sup>. O valor limite para o preço da água, a partir do qual a receita líquida será negativa é de R\$1,40/m<sup>3</sup>. Portanto, até

um valor de R\$1,20/m<sup>3</sup> de água bruta, a receita líquida por ha seria superior a R\$1000,00/ano. No entanto, as incertezas inerentes a quase todos os processos que envolvem a agricultura de uma maneira geral, bem como as flutuações nos preços de mercado devem exigir uma variabilidade maior de cenários e condições simuladas para que se possa concluir qual o preço adequado a ser cobrado pela disponibilização de água bruta em quantidade e qualidade compatíveis com as necessidades da agricultura irrigada.

## CONCLUSÃO

Na avaliação da influência da utilização de dados pluviométricos mensais médios ou reais no desempenho do sistema, foi verificado que:

⇒ Quase nenhuma variação ocorreu nas variáveis: área total utilizada; culturas selecionadas; áreas alocadas para cada uma das culturas.

⇒ Ocorreram grandes variações no volume de água usado.

⇒ Ocorreram pequenas variações na receita líquida como resultado dos diferentes volumes de água usados.

⇒ O principal fator limitante para o sistema foi a vazão limite de 4m<sup>3</sup>/s, aduzida pelo canal.

Com relação à variação da resposta do sistema a séries temporais extremas de seca e chuva com relação a níveis de anos normais foi observado que:

⇒ A receita líquida variou pouco em função da grande disponibilidade hídrica do sistema. A maior receita líquida ocorreu para o ciclo chuvoso seguida dos ciclos médio, normal e seco.

⇒ As culturas selecionadas como também as áreas por cultura foram iguais em todos os ciclos.

O projeto de irrigação nas várzeas de Sousa se mostrou viável podendo, no máximo, ser utilizado 5000 ha de terra no primeiro semestre e 3857 ha no segundo semestre, levando em consideração a seleção de culturas propostas.

No entanto, para a escolha de outras culturas, principalmente se forem perenes ou semi perenes, deve-se fazer um estudo mais criterioso, visto que as culturas perenes só contemplaram 30,56% da área total de 5.000ha que pode ser utilizada com a água do canal. Este índice poderia ser reduzido ainda mais, até para a mesma seleção de culturas se ocorrerem apropriações hídricas difusas ao longo do canal, podendo alterar substancialmente a vazão que chega ao perímetro irrigado.

Com relação ao comportamento do sistema quando sujeito a apropriações indevidas de água no canal adutor, observa-se que para todos os ciclos ocorreram reduções na receita líquida de aproximadamente 4% para cada 10% de redução na vazão máxima transportada pelo canal. Observa-se também que não houve variação na escolha das culturas nem na área irrigada designada para cada uma delas, quando se comparam iguais níveis de redução de vazão máxima no canal para diferentes ciclos hidroclimáticos.

Quando se contempla variações no preço das frutas se observa alterações na escolha ótima das culturas e suas respectivas áreas alocadas quando há aumento no preço das frutas. Mais especificamente, um aumento percentual geral de 20% e 30% no preço das frutas, produz uma inversão na escolha das culturas perenes do coco pela uva.

No que diz respeito aos testes realizados com diferentes preços para o metro cúbico de água observa-se que, a medida que se aumenta o preço da água, algumas culturas, como o melão entressafra e a melancia safra a partir de R\$0,30/m<sup>3</sup> e R\$0,80/m<sup>3</sup>, respectivamente, passam a não ser lucrativas. Para valores maiores que R\$1,00/m<sup>3</sup>, considerando-se as demais incertezas inerentes ao processo produtivo agrícola, a atividade pode se tornar não atrativa do ponto de vista de retorno econômico para os irrigantes. Neste caso, o projeto de fruticultura irrigada nas várzeas da cidade de Sousa, aonde já foram feitos altos investimentos em sua implantação, se tornaria inviável.

## AGRADECIMENTOS

O segundo autor gostaria de externar o seu agradecimento pelo apoio financeiro do CNPq para desenvolver esta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- AGROSOLOS ENGENHARIA LTDA. (1993). *Revista das Águas do Conjunto Coremas/Mãe d'Água para as Várzeas de Sousa – Projeto Básico Volume I* – DNOCS, Fortaleza.
- ARCE, R.A.B. (1990). *Otimização de um projeto hidroagrícola, no município de Guaiúba (SP), utilizando programação linear*. Dissertação de Mestrado em Agronomia. Área de Concentração em Irrigação e Drenagem. Piracicaba:USP, 76p.
- AUTRAN, H.R.C. (1980). *Planejamento agropecuário para o perímetro irrigado de Morada Nova, Ceará, através da programação linear: estudo de caso para um lote típico*. In: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 5,1980, São Paulo. Anais...São Paulo: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, p.295-334.
- BARBOSA, P.S.F. (1997). Modelos de Programação Linear em Recursos Hídricos. In: Porto et al., *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*, Cap.3, Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- BECKER, L., YEH, W. W-G. (1974). Optimization of real time operation of multiple reservoir systems. *Water Resources Research*, v.10, n ° 6, p.1107-1112.
- BERNARDO, D.J.; WHITTLESEY, N.K.; SAXTON, K.E.; BASSET, D.L. (1988). Irrigation optimization under limited water supply. *Transactions of ASAE* (Am. Soc. Agric. Eng.), St. Joseph, v.31, p.712-719.
- BRAGA, B.P.F., BARBOSA, P.S.F. (1987). Otimização da operação em tempo real de um sistema de reservatórios múltiplos. *Revista Latino-Americana de Hidráulica*, v.1, n.1, p. 105-120, São Paulo.
- CARVALHO, D.F.; SOARES, A. A. ; RIBEIRO, C.A.A. S.; SEDIYAMA, G.C.; PRUSKI, F.F. (2000). Otimização do uso da água no perímetro irrigado do Gorutuba, utilizando-se a técnica da programação linear. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.4, n.2, p.203-209.
- CHAVES,L.H.G., MENINO, I.B., ARAUJO, I.A. e CHAVES, I.B. (1998). Avaliação da Fertilidade dos Solos das Várzeas do Município de Sousa. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Vol. 2, No. 3, pp. 262-267.

- CURI, R. C.; CURI, W. F.; OLIVEIRA, E. F. C.C. (1998). *Simulação da Operação dos Reservatórios Coremas e Mãe D'Água Sujeitos a Múltiplos Usos*. Anais do IV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, ABRH, Campina Grande-PB, CD-ROM.
- DANTAS NETO, J. (1994). *Modelos de decisão para otimização do padrão de cultivo, em áreas irrigadas, baseados nas funções de resposta das culturas à água*. 125p. Tese de Doutorado. Botucatu: UNESP.
- DANTZIG, G. B. (1963). *Linear Programming and Extensions*. Princeton University Press, New Jersey.
- DOORENBOS, J. & KASSAM, A. H. (2000). Tradução de H. R. Gheyi, A. A. de Sousa, F. A. V. Damasceno, J. F. de Medeiros. *Efeito da Água no Rendimento das Culturas*. Estudos FAO Irrigação e Drenagem, v33, UFPB, Campina Grande.
- DOORENBOS, J. & PRUITT, W. O. (1997). Tradução de H. R. Gheyi, J. E. C. Metri, F. A. V. Damasceno. *Efeito da Água no Rendimento das Culturas*. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, v24, UFPB, Campina Grande.
- GOMES, H. P. (1997). *Engenharia de Irrigação: Hidráulica dos Sistemas Pressurizados Aspersão e Gotejamento*. Editora Universitária da Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 2a. Edição.
- KUMAR, R.; KHEPAR, S.D. (1980). Decision models for optimal cropping patterns in irrigations based on crop water production functions. *Agriculture Water Management*, Amsterdam, v.3, p.65-76.
- MANNOCCI, F.; MECARELLI, P. (1994). Optimization analysis of deficit irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.120, n.3, p.484-503.
- MATANGA, G.B.; MARIÑO, M.A. (1979). Irrigation planning 1. Cropping pattern. *Water Resources Research*, V.15, n.3, p.672-8.
- MEDEIROS, Y.P. e OCCHIPINTI, A.G. (1987). *Aplicação da Programação Linear Inteira 0 (zero) e 1 (um) na otimização de sistemas de recursos hídricos a múltiplos propósitos*. VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos e III Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos. ABRH, Salvador, v.1.
- NEVES, E.M.; GRAÇA, R.L.; McCARL, B. (1984). Programação matemática aplicada a dados experimentais no Brasil: problemas atuais, limitações e sugestões. In: CONTIN, E. et al. *Planejamento da propriedade agrícola: modelos de decisão*. Brasília, EMBRAPA, P.101-109.
- OLIVEIRA, E. F. C. C. (1998). *Simulação da Operação e Estimativa dos Benefícios Sócio-Econômicos do Reservatório Coremas/Mãe d'Água Sujeita a Múltiplos Usos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UFPB, Campina Grande.
- OLIVEIRA, J.A.; LANNA, A.E.L. (1997). Otimização de um sistema de reservatórios atendendo a múltiplos usos no nordeste brasileiro. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.2, n.2, p.123-141, Jul/Dez.
- PARAÍBA, GOVERNO DO ESTADO (1997). *Manual de Orçamentos Agropecuários*. CENOP-CDECOVAT/Banco do Nordeste. Campina Grande, PB.
- PARAÍBA, GOVERNO DO ESTADO (1998a). *Relatório das Várzeas de Sousa*. Secretária Extraordinária do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e Minerais. EMEPA – João Pessoa.
- PARAÍBA, GOVERNO DO ESTADO (1998b). *Síntese do Projeto de Irrigação das Várzeas de Sousa*. Secretária Extraordinária do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e Minerais – João Pessoa, 43 p.
- RODRIGUES, J.A. L.; COSTA, R.N.T.; FRIZZONE, J.A.; AGUIAR, J.V. (2000). Plano ótimo de cultivo no projeto de irrigação morada nova, Ceará, utilizando modelo de programação linear. *Revista Irriga*, v.5, n.3, ISSN 1413-7895, UNESP-Botucatu, SP, p. 199-221.
- SANTANA, A. G.; LANNA, A. E. L. (2000). Dimensionamento ótimo de um sistema de recursos hídricos de grande porte: O Projeto Arco-Íris, Nordeste do Brasil. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.5, n.º 4.
- SHEER, D.P. (1979). *A nontechnical introduction to linear programming and its use in reservoir operations*. National Workshop on Reservoir Systems Operations, ed. G. H. Toebe & A. A. Sheppard, p.100-109, Boulder, CO.
- SIMONOVIC, S.P. (1992). Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v.118, n. 3, p.262-280.
- SUDENE/DPO/EEP/RMH. (1998). *Dados hidroclimatológicos da Paraíba*. Recife, PE.
- TAO, T.; LENNOX, W.C. (1991). Reservoir operation by successive linear programming. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v.117, n.2, p.274-286.
- TRAVA, J.; HEERMAN, D.F.; LABADIE, J.W. (1977). Optimal on-farm allocation of irrigation water. *Transactions of ASAE*, v.20, n.1, p.85-8.
- TSAI, Y.J.; JONES, J.W.; MISHOE, J.W. (1987). Optimizing multiple cropping systems: a systems approach. *Transactions of ASAE*, v.30, n.6, p.1554-61.
- Van DEMAN, J.M.; SOWELL, R.S.; SNEED, R.E. (1976). Optimization of water use for irrigation. *ASAE-American Society of Agricultural Engineering*, paper 76-2526.

- YEH, W. W-G. (1985). Reservoir management and operation models: A state-of-the-art review. *Water Resources Research*, v.21, n. 12, p. 1797-1818.
- ZAHED, K.F. (1987). *Modelos aplicados à operação de sistemas de reservatórios: Discussão sobre a utilização de modelos gerais*. Anais VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos e III Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos. ABRH, Salvador.

***Analysis of change in the Optimized Net Income of an Irrigated Perimeter in the Semi-Arid under Conditions of Water and Economic Variations***

**ABSTRACT**

*A system of two interconnected reservoirs, Coremas and Mãe D'Água, is located in the southwest of Paraíba state and fed by three rivers: Piancó, Emas and Aguiar. Together they are the largest reservoir of the Paraíba state and the third largest in the northeast of Brazil. Its water is used for human supply, hydroelectric power generation, irrigation and fishing activities and to meet downstream*

*water demands from the Rio Grande do Norte state. Recently, an open channel, which is connected to the Mãe D'Água reservoir and has a 4 m<sup>3</sup>/s water carrying capacity and a length of 37 Km, was built to supply water to a nearly 5000 ha irrigation site in the neighborhood of the city of Sousa-PB. The aim of this work is to study the behavior of the system and ways to maximize the economical benefits by choosing irrigation areas for 13 selected types of fruits and their corresponding irrigation systems while covering all water demands for the reservoirs. The mathematical model uses a successive linear programming method, in order to take into account problem nonlinearities. The system is modeled using 85 decision variables and 1479 constraints that represent the physical and operational behavior of the system, including reservoir sustainability. The analyses were performed using sets of 6 years of hydro-climate data series, as well as their monthly mean values, which represent dry, normal, wet and average scenarios. Sensitivity analyses were also performed taking into account the variability of water costs, crop sale prices and the maximum amount of water that may reach the irrigated perimeter through the open channel.*

*Key-words: Irrigated perimeter; irrigation areas.*