

**MAXIMIZAÇÃO DA RECEITA LÍQUIDA DO PERÍMETRO IRRIGADO DE  
CONDADO, ALIMENTADO POR RESERVATÓRIO E POÇOS AMAZONAS  
PARA DIVERSOS CENÁRIOS HIDRO-CLIMÁTICOS USANDO  
PROGRAMAÇÃO LINEAR RECURSIVA.**

Raimundo Glauber Lima Cunha<sup>1</sup>, Rosires Catão Curi<sup>2</sup> e Wilson Fadlo Curi<sup>3</sup>

**Resumo** - Um método de Programação Linear Recursiva é usado para maximizar a receita líquida de uma seleção de culturas já implantadas no perímetro irrigado do município de Condado considerando diversas situações hidro-climáticas. Os cenários são caracterizados como ciclo seco, normal e chuvoso, através de médias móveis de cinco anos, e por valores médios mensais. As variáveis de decisão do problema são as áreas irrigadas para cada cultura e a alocação de água superficial, fornecida pela operação ótima do reservatório Engenheiro Arcoverde, e de água subterrânea, devido a poços amazonas.

**Abstract** - A Recursive Linear Programming is used in this work to maximize the net profit of an existing cropping pattern located in the neighborhood of the town of Condado-PB taking into account several hydro-climate scenarios. These climate scenarios are based on a five years moving average among 20 years set of data and are classified as dry, normal and wet. Monthly average data were also used in the optimization problem. The decision variables are the areas of the selected set of crops and the monthly surface water and groundwater allocation. The surface water is obtained from an optimal operation of the Engenheiro Arcoverde reservoir while the groundwater is pumped from the local amazon type of wells.

**Palavras Chave** - Programação Linear, Culturas Irrigadas, Operação de Reservatório

---

<sup>1</sup>MSc Recursos Hídricos, Graduado em Engenharia Civil, UFPB, Campina Grande, PB, fone:(083)-331-53-13  
E-mail:[glaucunha@yahoo.com](mailto:glaucunha@yahoo.com)

<sup>2</sup>Professor Adjunto do Dept. de Eng. Civil, UFPB, Campina Grande, PB, fone: (083)-310-12-90, E-mail:  
[rcuri@rechid.ufpb.br](mailto:rcuri@rechid.ufpb.br) - fax: (083)-310-10-11

<sup>3</sup>Professor Adjunto do Dept. de Física, UFPB, Campina Grande, PB, fone: (083)-310-11-95, E-mail:  
[wcuri@df.ufpb.br](mailto:wcuri@df.ufpb.br)

## **INTRODUÇÃO**

Os recursos hídricos são bens de relevante valor para a promoção do bem estar de uma sociedade. A água é bem de consumo final ou intermediário na quase totalidade das atividades humanas. A importância do gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos, aumenta na proporção em que estes recursos se apresentam de forma escassa, como no semi-árido nordestino onde a baixa taxa de pluviometria, alta taxa de evaporação, e má distribuição espaço-temporal das chuvas fazem com que a água se torne elemento fundamental no quadro sócio-econômico da região, gerando a necessidade de racionalização do uso da mesma. Nestas regiões, o planejamento dos recursos hídricos ganha dimensão fundamental, através dele se estabelecem as diretrizes a serem seguidas para proporcionar um melhor aproveitamento, controle e conservação dos recursos hídricos.

Na tentativa de reduzir as consequências da ausência das chuvas no nordeste, o DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas) ao longo de sua existência, vem construindo açudes públicos no Nordeste Brasileiro. Segundo Molle e Cadier (1992), estima-se que a região nordeste tenha mais de 70.000 açudes de mais de 1.000 m<sup>2</sup> de espelho d'água. A grande açudagem pública apresenta um balanço de aproximadamente 1200 a 1500 açudes com capacidade superior a 100.000 m<sup>3</sup>, com cerca de 450 barragens de mais de 1.000.000 m<sup>3</sup>, o que coloca o nordeste brasileiro como a segunda região mais açudada do mundo, perdendo apenas para a Índia. O que ressalta a importância que as decisões pertinentes a operação destes reservatórios tem na manutenção e desenvolvimento das atividades sócio-econômicas da região. Estas atividades estão relacionadas aos usos a que o recurso hídrico está vinculado.

Entre as diversas formas de uso da água encontra-se o uso para a irrigação de terras agrícolas, objeto de estudo deste trabalho, a qual vem se intensificando ao longo dos anos. Devido ao aumento da escassez de água nas zonas semi-áridas, surge a urgente necessidade de racionalizar o uso desta, tornando-se indispensável para a irrigação o conhecimento das relações funcionais entre a água e o rendimento das culturas. Uma das mais eficientes maneiras de se racionalizar o uso da água de um manancial é através do uso de pesquisa operacional, a qual permite que a tomada de decisão em relação a alocação do uso d'água seja otimizada segundo o critério mais desejável pelos usuários.

## **CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO**

O sistema em estudo é composto pelo reservatório Engenheiro Arcoverde, poços amazonas e perímetro de irrigação os quais estão inseridos numa região do Nordeste do Brasil situada no chamado "polígono das secas", a noroeste do estado da Paraíba, numa altitude de 250 metros sob coordenadas geográficas de 6° 54' 30" de latitude sul e 37° 35' 50" de longitude a oeste de Greenwich; esta região é parte integrante da Bacia do Médio Piranhas (Fig. 1) a qual faz parte do conjunto das seis sub-bacias que compõe a bacia do rio Piranhas. A bacia hidrográfica de drenagem (BHD) do açude Engenheiro Arcoverde apresenta um área de 124 Km<sup>2</sup> a qual está representada na Figura 2 que mostra o açude

Engenheiro Arcoverde, seus afluentes que são de regime intermitente e a disposição de açudes a montante do reservatório Eng.Arcoverde.



**Figura 1-** Mapa das Bacias Hidrográficas do Estado da Paraíba

#### **Reservatório Engenheiro Arcoverde**

O açude público Eng. Arcoverde localiza-se no município de Condado (PB), foi construído pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) num período de cinco anos (1932-1936) com uma capacidade de acumulação de 35.000.000 m<sup>3</sup> (trinta e cinco milhões de metros cúbicos) com a finalidade inicial de dotar o semi-árido nordestino de uma estrutura hidráulica para combater os efeitos das secas periódicas e das irregularidades das chuvas, visando atender a demanda das cidades de Condado e Malta e posteriormente ao perímetro de irrigação ali implantado.

O açude é atualmente administrado pela Companhia de Água e Esgotos do Estado da Paraíba (CAGEPA) e segundo a mesma a demanda das cidades de Condado e Malta totalizam uma vazão de 35.585,83 m<sup>3</sup>/mês ou 427.030 m<sup>3</sup>/ano.

#### **Perímetro de Irrigação de Condado**

Este perímetro abrange uma área de 459.3 ha, sendo que 230 ha é de agricultura irrigada e 229.3 ha de agricultura de sequeiro. O perímetro atende atualmente a 53 famílias (aproximadamente 200 pessoas), das quais 25 famílias (100 pessoas) dependem totalmente do abastecimento de água do açude para garantir o seu sustento. As demais contam com a água de poços amazonas construídos nos aluviões à jusante do citado açude num total de 92 poços, porém atualmente só 72 encontram-se em atividade utilizando bombas de 7.5 CV, 10 CV, 12.5CV, e 15 CV.as quais trabalham em média 8 horas por dia. As principais culturas encontradas no perímetro irrigado são as culturas



sementes, herbicidas, trabalho mecânico, mão de obra, impostos, etc. Logo, a função objetivo é dada por:

$$MAXRI = \sum_{t=1}^{na} \sum_{j=1}^{nc} Rb_{jt} - Cp_{jt} \quad (1)$$

sendo:

MAXRI – Função objetivo que define a maximização da receita líquida anual

t – o número de anos em estudo

j – tipo de cultura

Rb<sub>jt</sub> – renda bruta gerada com a cultura j no ano t em R\$/ano/cultura

Cp<sub>jt</sub> – custo para produção da cultura j no ano t em R\$/ano/cultura

Sendo:

$$Rb_{jt} = Prod_{jt} * Prc_j * Ac_j \quad (2)$$

onde:

Prod<sub>jt</sub> – produção da cultura j no ano t

Prc<sub>j</sub> – preço de comercialização da cultura j

Ac<sub>j</sub> – área plantada com a cultura j

$$Cp_{jt} = Cprod_{jt} * Ac_j \quad (3)$$

onde:

Cprod<sub>jt</sub> – custo para produção por unidade de área da cultura j no ano t

### SITUAÇÕES DE SIMULAÇÃO E DADOS DE ENTRADA PARA O MODELO

Foi criada a seguinte situação de simulação para aplicação do modelo: o perímetro é alimentado pelo reservatório e todos os poços em atividade existentes na área (72 poços) sujeito aos cenários dispostos abaixo.

Para este estudo utilizou-se a série histórica de 1973-1991 (19 anos) para entrada de dados no modelo. Utilizando dados de precipitação de 1973-1991, criou-se 19 séries de cinco anos sequenciais (séries móveis) e retirou-se a série de cinco anos com maior média anual de precipitação, menor média anual de precipitação e a série de cinco anos com média anual de precipitação que mais se aproximou da média anual do período de 1973-1991 (Tabela 1), caracterizando assim para efeitos de estudo os seguintes cenários:

**ciclo chuvoso (74-78)**- série de cinco anos consecutivos com maior média mensal de precipitação.

**ciclo seco (79-83)** - série de cinco anos consecutivos com menor média mensal de precipitação.

**ciclo normal (82-86)** - série de cinco anos consecutivos com média mensal de precipitação mais próxima do período de 1973-1991.

**ciclo médio** - média mensal de precipitação de 1973-1991.

**Tabela 1** – Precipitações médias mensais (Pméd) em mm que caracterizam os cenários.

		média pluviométrica (82-86) que caracteriza ciclo normal											
		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
<b>Pméd(mm)</b>		70,02	166,96	198,06	226,42	60,18	34,54	13,28	9,52	6,58	9,6	10,66	26,9
		média pluviométrica (79-83) que caracteriza ciclo seco											
		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
<b>Pméd(mm)</b>		51,1	104,6	170,1	100,9	29,8	15,6	8,7	6,9	11,5	15	21,1	18,5
		média pluviométrica (74-78) que caracteriza ciclo chuvoso											
		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
<b>Pméd(mm)</b>		88	196,3	227	253,6	106,2	37,5	36	5,9	6,1	12	17,4	23,9
		média pluviométrica (73-91) que caracteriza ciclo médio											
		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
<b>Pméd(mm)</b>		67,1	139,1	203,3	208,5	72,1	31,6	24,9	9,1	7,5	15	15	30,5

**Análises para as situações de simulação:**

- Variação da receita líquida e áreas cultivadas em relação a disponibilidade hídrica, ou seja, foi observado a receita líquida e quantidade de áreas irrigadas em situações de maior e menor reserva hídrica.
- Variação do retorno líquido devido ao uso de médias mensais e valores mensais, ou seja, comparou-se situações de simulação utilizando os dados de entrada com valores médios e dados de entrada com valores mensais.

**Considerações para as situações de simulação:**

- Garantia de sustentabilidade hídrica do reservatório – para as situações de simulação foi condicionado que o volume no final do último mês de simulação teria que ser maior ou igual ao volume do início da simulação, garantindo assim a sustentabilidade hídrica.
- A irrigação das culturas no processo de simulação será feita para um período de 5 anos e é assumido que a irrigação inicia-se no mês de janeiro.
- Será considerado um volume mínimo para o reservatório que não poderá ser utilizado na irrigação como medida de garantia para períodos de estiagem, já que o reservatório também abastece os municípios de Condado e Malta.

**Dados de entrada para as situações de simulação.**

O perímetro é alimentado pelo reservatório e poços amazonas, o modelo simulou e maximizou a função objetivo para os ciclos médio, normal, seco e chuvoso. Inseriu-se no modelo um padrão de culturas já existentes no perímetro em estudo. O modelo trabalhou com lâmina de rega fixa, área irrigada variável e buscou alocar a área de cada cultura que maximizasse a função objetivo a qual visa o maior retorno financeiro líquido. Para o

início do processo de simulação e otimização, é necessário os dados de entrada do reservatório, dos poços e das culturas adotadas, conforme descreveremos abaixo fazendo um breve comentário sobre cada variável.

**Ciclo médio (73-91) - dados de entrada para o reservatório.**

**a) Qa - Vazão média mensal afluyente ao reservatório ( $m^3/mês$ )** - estes dados tiveram origem com base nas lâminas escoadas na bacia de drenagem do açude Eng. Arcoverde no período 1973-1991.

**b) Qd - Vazão média mensal defluente do reservatório ( $m^3/mês$ )** - esta variável refere-se a vazão média que sai do reservatório para suprir as demandas dos municípios de Condado e Malta, O valor utilizado para todas as situações de simulação foi **36.000  $m^3/mês$** .

**c) Pr - Precipitação média mensal na área do reservatório (mm/mês)** - obtida a partir dos dados de precipitação do posto pluviométrico de Condado, os quais passaram pelo processo de preenchimento de falhas e homogeneização

**d) Evr - Evaporação média mensal do tanque na área do reservatório (mm/mês)** - o modelo utiliza a evaporação medida no tanque classe A.

**e) Kt - Coeficiente de evaporação do tanque** - é um fator que relaciona a lâmina evaporada no tanque classe A com o volume perdido no açude por evaporação. Foi adotado para todas as situações simuladas o valor **0,75**.

**f) Vi - Volume inicial do reservatório no processo iterativo ( $m^3$ )** - o volume inicial no reservatório para as simulações é assumido como **17.000.000  $m^3$** .

**g) Vmax - Volumes mensais máximos do reservatório ( $m^3$ )** - é a capacidade máxima mensal de armazenamento do reservatório. Neste estudo adotou-se a capacidade de **35.000.000  $m^3$**  com base em dados técnicos fornecidos pelo DNOCS.

**h) Vmin - Volumes mensais mínimos do reservatório ( $m^3$ )** - deve-se adotar um volume mínimo por garantia de reserva, tendo em vista que o reservatório também abastece dois municípios. Para este estudo adotamos **10.000.000  $m^3$**  que atende 2 anos consecutivos de abastecimento.

**i) Qmxs - Vazão extravasada máxima permitida pelo extravasor do reservatório ( $m^3/s$ )** - é a máxima vazão que o extravasor ou sangradouro do açude comporta, é de **3  $m^3/s$** .

**j) Ar - Área inicial da superfície líquida do reservatório em cada mês ( $m^2$ )** - é a área da bacia hidráulica no início de cada mês, obtida através da curva cota-área-volume do reservatório.

**k) Coeficientes da relação área x volume do reservatório:  $Ar(i)=km \times Vr(i)^{mm}$**  - no seu processo iterativo o modelo determina a área do espelho d'água do reservatório em cada mês utilizando a função descrita acima. Os coeficientes desta função foram determinados através do Programa Ajuste (Silva e Silva, 1997), que ajusta os pontos de funções lineares, linearizáveis e não lineares. Os valores obtidos foram **km=83.6 e mm=0.637**. De posse dos coeficientes, o modelo atualiza as áreas médias do espelho

d'água do reservatório a partir de uma área média inicial obtida através da curva cota-área do reservatório.

**l) Q<sub>mxcanal</sub> – máxima vazão que o canal pode transportar** – este dado foi obtido com a administração do perímetro irrigado, onde de acordo com as características técnicas dos canal, o mesmo permite um vazão de até **0.6 m<sup>3</sup>/s**.

**Tabela 2** - Valores de dados de entrada para o reservatório.

Meses	Qa (m <sup>3</sup> /mês)	Pr(mm/mês)	Evr(mm/mês)	Ar(m <sup>2</sup> )
Jan	1.106.211	67.1	289.1	2.706.200
Fev	3.284.695	139.1	209.4	2.739.700
Mar	4.935.200	203.3	170.6	2.976.000
Abr	5.701.389	208.5	163.0	3.308.800
Mai	1.359.432	72.1	145.1	3.526.600
Jun	314.568	31.6	191.8	3.533.600
Jul	227.116	24.9	214.3	3.435.400
Ago	9.137	9.1	272.6	3.296.500
Set	0	7.5	301.1	3.141.300
Out	89.411	14.8	346.2	2.978.900
Nov	59.389	15.0	283.6	2.815.500
Dez	306.737	30	297.1	2.966.300

**Ciclo médio (73-91) - dados de entrada para os poços** - no perímetro irrigado existem 72 poços Amazonas utilizando variados tipos de bombas que descreveremos mais detalhadamente a seguir.

**a) N<sub>sb</sub> - Número de sistemas de bombas dos poços** – cada sistema é representado pelo tipo de potência da bomba. Foi adotado **4 sistemas** de bombas com base em dados reais fornecidos pela administração do perímetro irrigado, uma vez que a potência das bombas usadas nos poços variam de 7.5 CV, 10 CV, 12.5 CV e 15 CV.

**b) N<sub>b</sub> - Número de bombas em cada tipo de sistema de bombas** - fornecido pela administração do perímetro irrigado como:

- b.1) 20 bombas de 7.5 CV
- b.2) 20 bombas de 10 CV
- b.3) 20 bombas de 12.5 CV
- b.4) 12 bombas de 15 CV

**c) N<sub>hb</sub> - Número de horas diárias de bombeamento** - as bombas instaladas nos poços trabalham em média 8 horas por dia.

**d) Q<sub>b</sub> - Capacidade de bombeamento média ( litros/seg)** - as bombas trabalham com as seguintes vazões:

- d.1) bombas de 7.5 CV - vazão de 4.16 l/s
- d.2) bombas de 10 CV - vazão de 5.56 l/s
- d.3) bombas de 12.5 CV - vazão de 6.94 l/s
- d.4) bombas de 15 CV - vazão de 8.33 l/s

**e) Hman - Altura de recalque mais sucção** - esta variável depende do tipo de bomba utilizada, pois esta relacionada diretamente com sua potência.

- e.1) bombas de 7.5 CV - altura máxima de 65 m
- e.2) bombas de 10 CV - altura máxima de 83 m
- e.3) bombas de 12.5 CV - altura máxima de 94 m
- e.4) bombas de 15 CV - altura máxima de 107 m

**f)  $\eta$  - Rendimento do sistema moto-bomba de irrigação** - foi adotado para o sistema de bombas implantado um rendimento de **70%**

**g) Pkwh - Preço médio do Kwh para aduzir água dos poços p/ cada sistema (R\$/KWH)** - com base em dados de projetos de irrigação estabeleceu-se um custo de **0.07 R\$/Kwh**.

**h) Hs - Altura dinâmica de sucção (m)** - os poços instalados no perímetro tem uma altura média de recalque de **5 m** até o nível do solo.

**i) Pra - Preço médio do m<sup>3</sup> de água aduzido dos poços para o sistema de irrigação (R\$/m<sup>3</sup>)** - no perímetro em estudo a água dos poços não tem custo para os irrigantes, por isso adotou-se valor zero no modelo.

**j) Qmxea - Vazão máxima de exploração do aquífero (m<sup>3</sup>/mês)** - de acordo com estudos levantados pela ATECEL (Associação Técnica Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior) o aquífero tem capacidade de exploração de **200.000 m<sup>3</sup>/mês**.

### Ciclo médio (73-91) - dados de entrada para as culturas implantadas no modelo.

Para seleção do tipo de culturas estabelecidas no modelo tomou-se por base as culturas irrigadas no perímetro de Condado e suas respectivas áreas de plantação. Estas culturas foram dispostas durante o ano levando-se em consideração períodos de safra e entressafra. A seguir mostramos um esquema de como as culturas foram irrigadas durante o ano obedecendo seu ciclo vegetativo .

**Tabela 3** - Plano cultural anual.

meses

Culturas	jan	fev	Mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
banana	x	x	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x
tomate		x	X	x	x			x	x	x	x	
goiaba	x	x	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x
melancia		x	X	x				x	x	x		
melão		x	X	x				x	x	x		
feijão		x	X	x				x	x	x		
milho		x	X	x	x			x	x	x	x	
algodão		x	X	x	x			x	x	x	x	
arroz		x	X	x				x	x	x		

Obs: As culturas de banana e goiaba são irrigadas durante todo o ano, as demais são

irrigadas no período de safra ( primeiros meses do ano) e períodos de entresafra ( últimos meses do ano)

**a) Nc - Número de culturas fixadas para simulação** - na realidade temos 9 tipos diferentes de culturas, porém se uma cultura é plantada duas ou mais vezes durante o ano, considera-se cada uma delas independente da outra, ou seja, é contada como se fosse outro tipo de cultura, pois fornece um retorno financeiro diferente, logo, de acordo com o esquema descrito acima, teremos como dado de entrada para o modelo o número de culturas sendo **16**.

**b) Na - Número de anos fixados para a simulação** – foi adotado **5 anos**

**c) Prod - Produtividade da cultura por ano (Kg/ha).**

**d) Prv - Preço médio unitário da cultura (Kg/ha)** - adotamos os seguintes preços com base em dados fornecidos pelo DIRGA ( Diretoria de Irrigação do DNOCS):

- 1) 0.32 R\$/Kg - banana nanicão
- 2) 0.25 R\$/Kg – tomate( safra)
- 3) 0.35 R\$/Kg – tomate(entresafra)
- 4) 0.27 R\$/Kg - goiaba
- 5) 0.20 R\$/Kg – melancia(safra)
- 6) 0.28 R\$/Kg – melancia(entresafra)
- 7) 0.50 R\$/Kg - melão japonês(safra)
- 8) 0.50 R\$/Kg - melão japonês(entresafra)
- 9) 0.95 R\$/Kg - feijão (safra)
- 10) 1.33R\$/Kg - feijão(entresafra)
- 11) 0.24 R\$/Kg - milho(safra)
- 12) 0.34 R\$/Kg - milho (entresafra)
- 13) 0.57 R\$/Kg – algodão(safra)
- 14) ) 0.78 R\$/Kg – algodão(entresafra)
- 15) 0.33 R\$/Kg - arroz (safra)
- 16) 0.46 R\$/Kg - arroz (entresafra)

**e) Cpro - Custo médio de produção da cultura (R\$/ha).**

**f) txdm - taxa anual de desvalorização da moeda** - não foi considerado inflação neste estudo, logo assumimos valor zero para este parâmetro.

**g) Atot - Área total mensal que poderá ser plantada (ha) em cada mês** - área total adotada para irrigação foi de **230 ha**.

**h) Agmax - Área máxima mensal que pode ser irrigada por gravidade (ha)** - neste estudo toda área pode ser irrigada por gravidade, logo adotamos para o modelo **230 ha**.

**i) Amax - Área máxima plantada de cada cultura (ha)** - com base nos dados do próprio perímetro foram adotadas as seguintes áreas máximas para as culturas selecionadas:

- 1) 30 ha - banana nanicão
  - 2) 30 ha - tomate (safra)
-

- 3) 30 ha - tomate (entresafra)
- 4) 20 ha - goiaba
- 5) 20 ha – melancia (safra)
- 6) 20 ha – melancia (entresafra)
- 7) 20 ha – melão japonês (safra)
- 8) 20 ha - melão japonês (entresafra)
- 9) 40 ha – feijão (safra)
- 10) 40 ha – feijão (entresafra)
- 11) 30 ha – milho (safra)
- 12) 30 ha – milho (entresafra)
- 13) 20 ha – algodão (safra)
- 14) 20 ha – algodão (entresafra)
- 15) 20 ha – arroz (safra)
- 16) 20 ha – arroz (entresafra)

**Tabela 4.-** Produção das culturas em Kg/ha para o período considerado.

<b>culturas</b>	<b>1º ano</b>	<b>2º ano</b>	<b>3º ano</b>	<b>4º ano</b>	<b>5º ano</b>
<b>Banana</b>	0	50.000	60.000	60.000	60.000
<b>Tomate</b>	40.000	40.000	40.000	40.000	40.000
<b>Goiaba</b>	0	7.000	15.000	20.000	20.000
<b>Melancia</b>	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
<b>Melão</b>	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
<b>Feijão</b>	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
<b>Milho</b>	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
<b>Algodão</b>	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
<b>Arroz</b>	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000

**Tabela 5 -** Custo para produção de cada cultura em R\$/ha para o período considerado.

<b>Culturas</b>	<b>1º ano</b>	<b>2º ano</b>	<b>3º ano</b>	<b>4º ano</b>	<b>5º ano</b>
<b>Banana</b>	4589.26	3816.16	3890.31	3890.31	3890.31
<b>Tomate</b>	2656.58	2656.58	2656.58	2656.58	2656.58
<b>Goiaba</b>	1998.47	1293.14	1359.94	1420.11	1412.02
<b>Melancia</b>	1676.03	1676.03	1676.03	1676.03	1676.03
<b>Melão</b>	1848.96	1848.96	1848.96	1848.96	1848.96
<b>Feijão</b>	642.87	642.87	642.87	642.87	642.87
<b>Milho</b>	842.72	842.72	842.72	842.72	842.72
<b>Algodão</b>	982.49	982.49	982.49	982.49	982.49
<b>Arroz</b>	977.12	977.12	977.12	977.12	977.12

**l) Amin - Área mínima plantada de cada cultura (ha)** - o modelo na sua formulação permite fixarmos uma área mínima para cada cultura e fará o processo de otimização considerando que as áreas mínimas fixadas serão irrigadas.

**m) Kc - Coeficiente de cultivo das culturas de acordo com seu ciclo fenológico** - o modelo simula o balanço hídrico das culturas, por isso temos que estabelecer os coeficientes de cultivo para cada cultura, de acordo com seu estágio de desenvolvimento. Na tabela abaixo está representado as culturas implantadas no modelo com o seu respectivo coeficiente de cultivo durante o ciclo vegetativo.

**Tabela 6** - Coeficiente de cultivo das culturas.

Culturas	jan	fev	Mar	abr	mai	jun	jul	Ago	set	out	nov	dez
Banana	0.7	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Tomate		0.45	0.75	1.15	0.8			0.45	0.75	1.15	0.8	
Goiaba	0.45	0.45	0.45	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7
Melancia		0.7	1	0.75				0.7	1	0.75		
Melão		0.7	1	0.75				0.7	1	0.75		
Feijão		0.7	1.1	0.9				0.7	1.1	0.9		
Milho		0.4	0.8	1.15				0.4	0.8	1.15		
Algodão		0.5	0.75	1.15	0.75			0.5	0.75	1.15	0.75	
Arroz		1.1	1.1	1.1	0.95			1.1	1.1	1.1	0.95	

**n) Pc - Precipitação média mensal na área irrigável (mm/mês)** - Adotamos para este estudo a mesma precipitação ocorrida na área do reservatório.

**o) Evc - Evaporação média mensal medida no tanque de evaporação classe A na área irrigável em cada mês i (mm/mês)** - Para este estudo foi adotada a mesma evaporação medida na área do reservatório com o mesmo coeficiente de tanque.

**p) Eapl - Valor percentual da eficiência da aplicação da irrigação por cultura** - de acordo com o sistema de irrigação adotado para a cultura é que se identifica sua eficiência. Por exemplo, a irrigação por gotejamento tem eficiência em torno de 95%, a irrigação por aspersão tem eficiência em torno de 75%, a irrigação por sulco tem eficiência em torno de 50%. A seguir descrevemos as culturas selecionadas para o modelo e o sistema de irrigação utilizado.

**q) Esis - Valor percentual da eficiência do sistema de distribuição (canais e tubulações) para irrigação por cultura** - como o sistema de distribuição de água do reservatório Engenheiro Arcoverde é através de tubulações e canais, fixamos uma eficiência de **70%** para o sistema.

**r) Hc - Pressão requerida pelo sistema de irrigação da cultura (mca)** - de acordo com o sistema de irrigação adotado, pode haver necessidade de pressão nas tubulações para que o sistema de irrigação utilizado em determinada cultura funcione

adequadamente, logo, o modelo necessita que se registre esta pressão em mca. Adotou-se os seguintes valores de entrada de acordo com o tipo de irrigação utilizada:

Aspersão – 50 mca

Gotejamento – 30 mca

q) Sulco ou gravidade – 0 mca

**Tabela 7** - Sistema de irrigação adotado para as culturas

<b>Culturas</b>	<b>Sistema de irrigação</b>
1) banana nanicão	gotejamento
2) tomate	sulco
3) goiaba	gotejamento
4) melancia	sulco
5) melão japonês	sulco
6) feijão	aspersão
7) milho	aspersão
8) algodão	aspersão
9) arroz	sulco

**Ciclo Normal (82-86) - dados de entrada para o reservatório** – como a diferença entre os ciclos no que se refere aos dados de entrada está na precipitação, vazão afluente, área do espelho d'água e evaporação, mostraremos para os demais ciclos somente os valores de entrada que forem diferentes, já que os outros são iguais ao do ciclo médio.

**Tabela 8** - Dados de entrada para o reservatório no período ciclo normal

<b>meses</b>	<b>Qa (m<sup>3</sup>/mês)</b>	<b>Pr(mm/mês)</b>	<b>Evr(mm/mês)</b>	<b>Ar(m<sup>2</sup>)</b>
<b>Jan</b>	1.185.440	70.02	289.10	2.706.200
<b>Fev</b>	4.575.600	166.96	209.4	2.739.700
<b>Mar</b>	4.637.600	198.06	170.6	2.976.000
<b>Abr</b>	5.795.760	226.42	163.0	3.308.800
<b>Mai</b>	491.040	60.18	145.1	3.526.600
<b>Jun</b>	0	34.54	191.8	3.533.600
<b>Jul</b>	0	13.28	214.3	3.435.400
<b>Ago</b>	0	9.52	272.6	3.296.500
<b>Set</b>	0	6.58	301.1	3.141.300
<b>Out</b>	0	9.60	346.2	2.978.900
<b>Nov</b>	0	10.68	283.6	2.815.500
<b>Dez</b>	305.040	26.68	297.1	2.966.300

**Ciclo normal (82-86) - dados de entrada dos poços** - iguais ao ciclo médio.

**Ciclo normal (82-86)- dados de entrada para as culturas implantadas no modelo - iguais ao ciclo médio.**

**Ciclo seco (79-83)- dados de entrada para o reservatório - São os mesmos do ciclo médio, com exceção da tabela abaixo.**

**Tabela. 9** - Dados de entrada para o reservatório no período ciclo seco.

meses	Qa (m <sup>3</sup> /mês)	Pr(mm/mês)	Evr(mm/mês)	Ar(m <sup>2</sup> )
Jan	679.520	51.1	289.10	2.706.200
Fev	2.112.960	104.6	209.4	2.739.700
Mar	4.434.240	170.1	170.6	2.976.000
Abr	1.991.440	100.9	163.0	3.308.800
Mai	349.680	29.8	145.1	3.526.600
Jun	0	15.6	191.8	3.533.600
Jul	0	8.7	214.3	3.435.400
Ago	0	6.9	272.6	3.296.500
Set	0	11.5	301.1	3.141.300
Out	32.240	15.	346.2	2.978.900
Nov	91.760	21.1	283.6	2.815.500
Dez	56.480	18.5	297.1	2.966.300

**Ciclo seco (79-83)- dados de entrada para os poços** - iguais ao ciclo médio.

**Ciclo seco (79-83)- dados de entrada para as culturas implantadas no modelo** - iguais ao ciclo médio.

**Ciclo chuvoso (74-78)- dados de entrada para o reservatório** - os valores de entrada para o reservatório no período ciclo chuvoso são os mesmos do ciclo médio, com exceção dos dados da tabela abaixo.

**Ciclo chuvoso (74-78)- dados de entrada para os poços** - iguais ao ciclo médio.

**Ciclo chuvoso (74-78)- dados de entrada para as culturas implantadas no modelo** - iguais ao ciclo médio.

**Tabela 10** - Dados de entrada para o reservatório no período ciclo chuvoso.

meses	Qa (m <sup>3</sup> /mês)	Pr(mm/mês)	Evr(mm/mês)	Ar(m <sup>2</sup> )
Jan	1.289.600	88	289.10	2.706.200
Fev	4674.800	196.3	209.4	2.739.700
Mar	4.755.400	227	170.6	2.976.000
Abr	6.295.480	253.6	163.0	3.308.800
Mai	1.609.520	106.2	145.1	3.526.600
Jun	110.200	37.5	191.8	3.533.600
Jul	197.160	36	214.3	3.435.400
Ago	0	5.9	272.6	3.296.500
Set	0	6.1	301.1	3.141.300
Out	37.200	12.1	346.2	2.978.900
Nov	96.720	17.4	283.6	2.815.500
Dez	341.000	23.9	297.1	2.966.300

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tabelas abaixo mostram os resultados da otimização para as situações criadas, onde foi maximizado o retorno financeiro líquido e obtido a área das culturas selecionadas para o modelo. Além disso será fornecido gráficos do comportamento do reservatório ao longo dos meses de simulação par os ciclos médio e normal.

Observa-se na tabela.12 que o ciclo chuvoso teve a maior quantidade de área irrigada, gerando a maior produção e consequentemente originando o maior lucro, isto justifica-se pelo fato do índice de pluviometria e vazões afluentes neste período serem maiores que nos outros ciclos, possibilitando ao reservatório e ao aquífero que alimenta os poços uma maior reserva de água que irrigará, sem problema de restrição hídrica, o perímetro. Caso contrário ocorre com o ciclo seco onde o índice de pluviometria durante o ciclo é baixo, deixando o reservatório e os poços com menor potencialidade hídrica para irrigação. Os ciclos médio e normal se aproximam nos seus resultados em virtude das médias mensais de pluviometria e vazões afluentes serem bem próximas, entretanto o ciclo médio obteve resultados melhores, pois seus dados de entrada foram médios enquanto que o ciclo normal teve os dados de entrada com valores mensais de vazão afluyente e precipitação .

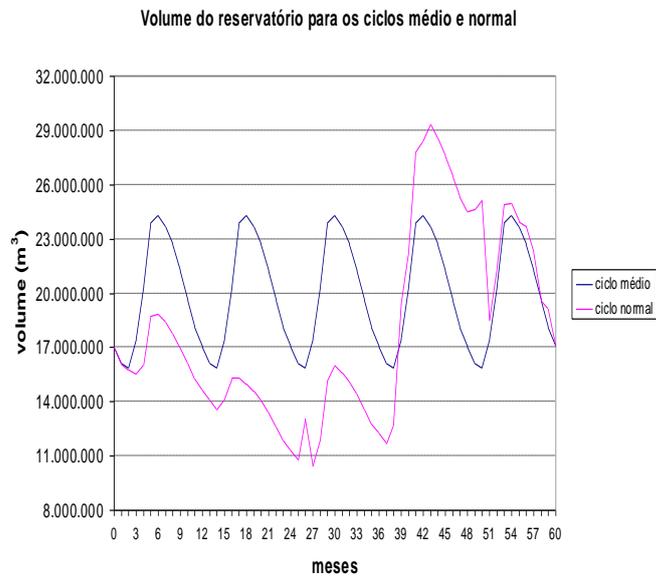
A tabela 12 mostra que os ciclos normal e seco tiveram uma queda na receita líquida de 7,4% e 35% respectivamente em relação ao ciclo médio e que o ciclo chuvoso teve um acréscimo de 12% em relação ao ciclo médio. Isto se justifica pela disponibilidade hídrica de cada ciclo, e mostra também que quando o modelo trabalha com dados médios os resultados obtidos são diferentes dos obtidos com dados mensais, já que a média mantém uma certa uniformidade durante o período de simulação, enquanto que os dados mensais são bastante oscilantes, em torno do valor médio.

**Tabela 11** - Valores das áreas (ha) a serem cultivadas com cada cultura para a maximização do retorno líquido utilizando dados de entrada com valores médios para o ciclo médio e dados de entrada com valores mensais para os ciclos normal, seco e chuvoso.

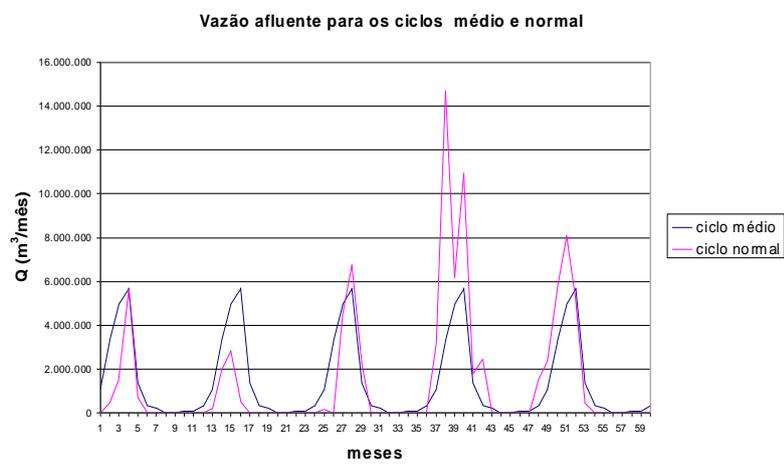
<b>Culturas</b>	<b>ciclo médio</b>	<b>ciclo normal</b>	<b>ciclo seco</b>	<b>ciclo chuvoso</b>
<b>Banana</b>	7,46	2,22	0	9,43
<b>Tomate (s)</b>	30	30	30	30
<b>Tomate(es)</b>	30	30	0	30
<b>Goiba</b>	0	0	0	0
<b>Melancia(s)</b>	20	20	13,2	20
<b>Melancia(es)</b>	0	0	0	9,29
<b>Melão(s)</b>	20	20	20	20
<b>Melão(es)</b>	20	20	20	20
<b>Feijão(s)</b>	40	0	0	40
<b>Feijão(es)</b>	0	0	0	0
<b>Milho(s)</b>	0	0	0	30
<b>Milho(es)</b>	0	0	0	0
<b>Algodão(s)</b>	4,24	0	0	20
<b>Algodão(es)</b>	0	0	0	0
<b>Arroz(s)</b>	0	0	0	20
<b>Arroz(es)</b>	0	0	0	0
<b>Ret.fin.liq(R\$)</b>	1.415.200	1.309.800	917.980	1.580.200
<b>Déficit ou superavit(%)</b>		7,4	35	12
<b>total safra</b>	121,7	72,22	63,2	189,43
<b>total entresafra</b>	57,46	52,22	20	68,72

Pela figura 3 observa-se que no ciclo médio o volume do reservatório teve um comportamento semelhante durante o período de simulação (5 anos), isto se deve ao fato de ter se trabalhado com dados de entrada médios para este ciclo, ou seja, os resultados obtidos no primeiro ano de simulação repetem-se para os anos seguintes. Observa-se também que o volume do reservatório até o 39º mês neste ciclo está acima do volume do reservatório do ciclo normal, logo após, o ciclo normal apresentou volume no reservatório maior, isto se justifica pelo fato das vazões afluentes serem maiores nos 36 meses iniciais para o ciclo médio e menores nos 24 meses finais, conforme mostrado na figura 4.

O gráfico da figura 3 também deixa bem claro que para os dois ciclos foi garantida a sustentabilidade hídrica do reservatório, ou seja o volume do reservatório no último mês do período de simulação ficou igual ao volume que se iniciou, 17.000.000 m<sup>3</sup>, garantindo assim a repetição do processo. Fica bem nítido também no gráfico que o volume mínimo estipulado de 10.000.000 m<sup>3</sup> não foi utilizado durante a simulação garantindo uma possível situação de estiagem, e o volume máximo de 35.000.000 m<sup>3</sup> não foi extrapolado, significando que não houve extravasamento na barragem durante o período de simulação considerado.



**Figura 3** – Volume mensal do reservatório para os ciclos médio e normal.



**Figura 4** - Vazão afluente para os ciclos médio e normal.

## CONCLUSÃO

O presente artigo mostra a grande viabilidade dos modelos matemáticos de programação linear envolvendo operação de reservatórios e aspectos de agricultura irrigada, permitindo informações ótimas sobre diversos cenários de simulação. O modelo de programação linear recursiva desenvolvido por Curi e Curi (1998) aplicado neste estudo mostra a interligação entre modelos de simulação e otimização tirando partido das vantagens inerentes a cada um destes modelos.

Os resultados apresentados foram consistentes com a formulação do problema e além de explorar a eficiência da programação linear, esta técnica incorpora na sua solução a natureza intrínseca não-linear do problema.

## BIBLIOGRAFIA

- CUNHA, R. G. L. Operação Integrada do Reservatório Engenheiro Arcoverde, Poços Amazonas e Perímetro Irrigado de Condado utilizando-se de Pesquisa Operacional, tese de mestrado, agosto, 1999.
- CURI, W. F. e CURI, R.C. “Um Modelo de Simulação para o Sistema de Reservatórios Coremas e Mãe D’Água”, ANAIS do 4º Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, CD-Rom, C. Grande, PB, Nov. 1998.
- CURI, R. C., CURI, W. F. e OLIVEIRA, E. F. C. C., “Simulação da Operação dos Reservatórios Coremas e Mãe D’Água Sujeito a Múltiplos Usos”, ANAIS do 4o. Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, CR-Rom, C. Grande, PB, 1998.
- CURI, W. F. e CURI, R. C., “Otimização integrada do reservatório Eng. Arcoverde e do perímetro irrigado de Condado-PB”, ANAIS do 4o. Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, CD-Rom, C. Grande, PB, Nov. 1998.
- CURI, W.F., CURI, R.C e CELESTE, A.B. Um modelo de Operação Ótima de Reservatórios sujeito a múltiplos usos. III Simpósio de Recursos Hidricos do Nordeste, Salvador-BA, Dez.1996.
- CURI, W.F., CURI, R.C e CELESTE, A.B. Alocação Ótima da água do Reservatório Engenheiro Arcoverde para Irrigação via Programação Não Linear. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória-ES. Nov.1997
- CURI, W.F. e CURI, R.C., Operação Integrada de reservatório, poços e área irrigada via programação linear recursiva. ANAIS do 4º Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, CD-Rom, C. Grande, PB, Nov. 1998.
- DESTANE, N.G., “Effective rainfall in agriculture”, Roma, FAO, 1974, Irrigation and Drainage Paper, No. 25.
- DOORENBOS, J. E PRUITT, W.O., “Crop Water Requirements”, Roma, FAO, 1977, Irrigation and Drainage Paper, No. 24.
- GOMES, H. P., “Engenharia de Irrigação: Hidráulica dos Sistemas Pressurizados Aspersão e Gotejamento”, Editora Universitária da Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 2a. Edição, 1997.
- GOVERNO DO ESTADO DA PARAÍBA, “Hidroinforme: Boletim de Monitoramento de Açudes da Paraíba”, LMRS, C. Grande, PB, Vol. 1,2 e 3, 1995-1997.

- GOVERNO DO ESTADO DA PARAÍBA, Manual de Orçamentos Agropecuários, CENOP-CDE-COVAT/Banco do Nordeste, C. Grande, PB, Junho 1997.
- LANNA, A. E., Análise de Sistemas e Engenharia de Recursos Hídricos, In: PORTO, RUBEM LA LAINA. Técnicas Quantitativas para Gerenciamento de Recursos Hídricos. Editora Universidade, UFRGS:ABRH, 1997.
- MOLLE, F. “Marcos históricos e Reflexões sobre Açudagem e seu Aproveitamento”, SUDENE, DPG, PRN, Recife, 1992.
- PUCCINI, A L. PIZZOLATO, N.D. Programação Linear - Editora Livros Técnicos - Rio de Janeiro, 1987.
- WURBS, R. A., Reservoir-System simulation and optimization models. Texas: Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 119(4), pp.455-472, 1993.
- YEH, W.G. , “Reservoir Management and Operation Models: a State of Art Review”, Water Resources Research, 21(2), pp.1797-1818, 1985.