

Uso de Otimização/Simulação e Previsão de Afluências na Operação Tática dos Reservatórios do Sistema Jaguaribe-Metropolitano - CE

Giovanni Brígido Bezerra Cardoso

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - UFCE

brigido@funceme.br

Eduardo Sávio P. R. Martins, Francisco de Assis de Souza Filho

Departamento de Recursos Hídricos - FUNCEME

martins@funceme.br, assisfilho@funceme.br

Recebido: 11/04/06 – revisado: 14/06/06 – aceito: 08/08/06

RESUMO

O Semi-Árido brasileiro apresenta um regime de chuvas caracterizado por uma alta variabilidade espacial e temporal; rios intermitentes; altas taxas de evaporação, e solos, em geral, rasos e sobre um substrato cristalino, resultando em uma menor capacidade de infiltração e armazenamento. Várias incertezas inerentes ao processo de gerenciamento dos recursos hídricos estão relacionadas à oferta hídrica do Nordeste Semi-Árido, tendo como causa a variabilidade natural do regime de deslúvios, o que caracteriza a incerteza na quantidade de água disponível, ao passo que o aumento da população, a urbanização e o uso ineficiente da água agravam o quadro de atendimento à demanda. Diante do exposto, devem-se buscar alternativas para um melhor gerenciamento de recursos hídricos. Assim, o uso de técnicas de análise sistêmica, como simulação e otimização, combinadas com o uso de previsão de afluências a reservatórios, podem reduzir o quadro de incerteza presente no gerenciamento de recursos hídricos. Essa pesquisa faz parte de um programa de ações visando incorporar a previsão/informação climática no processo de alocação de água no Estado do Ceará, processo este desempenhado pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – COGERH-CE. Neste artigo faz-se uso de técnicas de otimização/simulação para determinação de políticas ótimas na operação tática dos reservatórios do Sistema Jaguaribe-Metropolitano - Ceará, incorporando a previsão de afluências a partir de índices climáticos tais como El Niño e Dipolo do Atlântico. Como objetivos específicos, este artigo visa estabelecer Níveis Meta para operação dos reservatórios do sistema com base na climatologia (série histórica) e na informação climática (previsão); comparar os resultados obtidos a partir do conhecimento dos Níveis Meta (climatologia e previsão) e da operação adotada pela COGERH-CE, com aqueles correspondentes à melhor operação possível diante dos objetivos pré-estabelecidos (Futuro Conhecido) para o período de 1994 a 2001. Utilizando-se o método dos Vizinhos para a previsão de afluências e programação não linear com o algoritmo simplex Nelder-Mead como técnica de otimização, a metodologia proposta se mostrou adequada, atendendo aos objetivos pretendidos.

Palavras-chave: previsão; informação climática; reservatórios.

INTRODUÇÃO

O Estado do Ceará, com 7,3 milhões de habitantes, está dividido em duas regiões distintas (IBGE, 2000). A primeira tem acesso à água, ou seja, pertence ao hidrossistema (infra-estrutura hídrica) e a outra tem grande carência hídrica, não pertencendo ao mesmo. Diferenças marcantes separam estas duas regiões. Enquanto a primeira prática agricultura irrigada, tem 60% da População Economicamente Ativa (PEA), produz 95% do Produto Interno Bruto (PIB) e apresenta Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) médio igual a 0,67, a

outra prática agricultura de sequeiro, tem 40% da PEA, produz apenas 5% do PIB e apresenta IDH médio igual a 0,6.

O Semi-Árido brasileiro apresenta um regime de chuvas caracterizado por uma alta variabilidade espacial e temporal, esta última tanto intra- como inter-anual; rios intermitentes; alta taxa de evaporação, causando déficit hídrico e solos geralmente rasos e sobre um substrato cristalino, resultando em uma menor capacidade de infiltração e armazenamento.

Várias incertezas inerentes ao processo de gerenciamento dos recursos hídricos estão relacionadas à oferta hídrica do Nordeste Semi-Árido, ten-

do como causa a variabilidade natural do regime de deflúvios, o que caracteriza a incerteza na quantidade de água disponível, ao passo que o aumento da população, a urbanização e o uso ineficiente da água agravam o quadro de demanda da região nordestina. No Estado do Ceará, o regime de deflúvios se concentra no 1^a semestre, sendo o 2^a semestre caracterizado pela ausência do mesmo. Modelos de previsão de vazões em rios para horizonte de alguns meses podem ser úteis no processo de alocação de água entre usos conflitantes.

O Sistema Jaguaribe-Metropolitano, no Estado do Ceará, é composto pelos reservatórios Orós e Banabuiú na região Jaguaribana e pelos reservatórios Pacajus, Pacoti-Riachão e Gavião na região Metropolitana de Fortaleza. Estes são utilizados para atender às demandas de usuários industriais e de abastecimento humano e aqueles são utilizados para atender às demandas de usuários agrícolas. Comitês de Bacias realizam encontros várias vezes ao ano para tomada de decisões com base na análise de vários cenários de oferta e demanda apresentada por técnicos da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH-CE) para grupos de usuários. Esse processo decisório tem impactos sociais, políticos e econômicos, particularmente em anos secos. Cenários para o ano seguinte de disponibilidade hídrica em cada reservatório, de demanda para cada uso e potenciais impactos de diferentes propostas para alocação de água são críticos para decisões participativas da comunidade. Esse artigo faz uso da informação climática para determinar as afluências aos reservatórios do sistema e usá-las para operação dos mesmos por meio de técnica de otimização (programação não linear).

CONTEXTO HISTÓRICO

Dentre as técnicas utilizadas para resolver problemas de engenharia de recursos hídricos, merece destaque a análise de sistemas, cujo embasamento está na visão sistêmica e na utilização de técnicas computacionais agregadas à modelagem matemática. A engenharia de recursos hídricos objetiva promover mudança dos padrões qualitativos e quantitativos das disponibilidades de água de forma a adequá-los aos padrões correspondentes das demandas hídricas, havendo uma grande complexidade das decisões devido não somente às diferentes possibilidades de suprimento às demandas como também à variabilidade destas demandas.

As primeiras aplicações de programação linear (PL) na área de Recursos Hídricos acontecem na década de 60, no âmbito dos trabalhos do “*Harvard Water Resources Group*”, onde se fez uso de PL em um problema de gerenciamento de água subterrânea. A principal dificuldade do uso de PL em recursos hídricos é a ocorrência de não-linearidade nas restrições e/ou função objetivo. Uma maneira de superação desta dificuldade é a linearização das funções não-lineares por partes; contudo a cada segmento linearizado surge uma nova variável, aumentando sobremaneira o esforço computacional, esforço este que cresce com o cubo do número de restrições (Braga Jr., 1987).

A popularização dos computadores e a contínua melhoria da performance dos mesmos faz surgir novas técnicas de otimização como a programação não linear (PNL). A PNL surge com o trabalho pioneiro de Kuhn e Tucker (1951), e a partir da década de 70 aumentam as pesquisas e aplicações, devido principalmente ao grande desenvolvimento dos microcomputadores. A grande vantagem da PNL está na sua flexibilidade, todavia, havendo problemas relacionados à incerteza de que a solução ótima obtida é realmente um máximo global. As técnicas de PNL mais conhecidas são a programação quadrática e a geométrica.

Entre uma das mais importantes áreas de aplicação dos modelos de análise de sistemas hídricos se destaca a do planejamento e operação de sistemas de reservatórios. Diferenças fundamentais baseadas no tipo de informação fornecida aos modelos e nos objetivos a serem satisfeitos existem entre modelos voltados para planejamento e aqueles voltados para curto prazo ou operação de reservatórios em tempo real (Datta e Houck, 1984).

Outra técnica utilizada em engenharia de recursos hídricos é a simulação, que tem por objetivo aproximar o comportamento espacial e/ou temporal de um sistema em um computador, onde suas características mais importantes são descritas matematicamente ou algebricamente. Dentre os principais trabalhos, pode-se citar: Loucks *et al.* (1981), Yeh (1985), Braga Jr. (1987), Votruba (1988) e Wurbs (1996).

A mais importante aplicação de simulação em recursos hídricos tem sido no dimensionamento e operação de sistemas de múltiplos reservatórios. Contudo Jacoby e Loucks (1972) apresentam como grande desvantagem o fato de que o próprio analista tem que definir as políticas de operação que devem ser estudadas. Sistemas complexos apresentam uma grande gama de alternativas possíveis, complicando o uso de simulação. Procurando resolver esse

tipo de problema a partir da década de 80, a simulação tem sido utilizada aliada a técnicas de otimização (Yeh, 1985).

Souza Filho e Lall (2003) pesquisam um melhor gerenciamento de recursos hídricos no Ceará a partir das informações climáticas que são correlacionadas com as vazões afluentes aos reservatórios que abastecem a Região Metropolitana de Fortaleza. Os autores utilizam uma abordagem semi-paramétrica para previsão de vazões mensais. Nesta abordagem um modelo de regressão entre vazões anuais e indicadores climáticos (porção paramétrica deste modelo) é utilizada apenas para escolha dos anos mais próximos do ano da previsão (porção não-paramétrica deste modelo). Uma vez identificados estes anos pode-se estimar estatísticas da previsão, como, por exemplo, quantis.

SISTEMA JAGUARIBE-METROPOLITANO

O sistema de abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) é formado por cinco reservatórios: Pacoti, Riachão e Acarape do Meio na Bacia do Rio Pacoti; Pacajus na bacia do rio Choró e Gavião na bacia do rio Cocó, sendo esses reservatórios interligados por canais e adutoras. O Sistema Jaguaribe também pode contribuir para o abastecimento da RMF, através do Canal do Trabalhador, cuja captação acontece no município de Itaiçaba, na barragem de mesmo nome.

O presente artigo considera os cinco principais açudes do Sistema Jaguaribe-Metropolitano: Orós, Banabuiu, Pacajus, Pacoti/Riachão e Gavião. Foi assumido que o reservatório Pedras Brancas atende a demandas locais da bacia do Banabuiu, não sendo aqui considerado. O reservatório Castanhão não foi incluído pois, como já mencionado, o objetivo central desse artigo é fazer uso de técnicas de otimização/simulação para determinação de políticas ótimas na operação tática dos reservatórios do Sistema Jaguaribe-Metropolitano, incorporando a previsão de afluências a partir de índices climáticos. Para isto, são necessários os volumes iniciais dos reservatórios que compõem o sistema no dia 1º de julho durante os anos de 1993 a 2000, volumes estes que não existem para o Castanhão, já que ainda não havia sido construído.

Para o cálculo da precipitação média foram utilizados os postos da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME, e aplicada a metodologia de Polígonos de Thiessen através de um módulo de extensão do Arcview desenvolvido

por ocasião da elaboração do plano de gerenciamento da bacia do rio Jaguaribe (COGERH-CE, 2000).

Com exceção do reservatório Orós, foram utilizadas as séries de vazões afluentes aos reservatórios em estudo para o período de 1913 a 1996 obtidas nos planos de gerenciamento das águas das Bacias Jaguaribe e Metropolitana (COGERH-CE, 2000), sendo estas estendidas para o período de 1997 a 2001 através de valores simulados com o modelo chuva-deflúvio MODHAC (Lanna e Schwarzbach, 1989). No caso do reservatório Orós, a série de vazões afluentes foi obtida a partir do método de Proporção de Área, utilizando-se o posto de Iguatu como referência, e as falhas mensais sendo preenchidas com os valores simulados pelo MODHAC.

A disponibilidade de séries pluviométricas observadas é muito precária em toda a região Nordeste; assim, é comum fazer uso de metodologias de transformação chuva-deflúvio para a obtenção de séries de vazões afluentes aos reservatórios, uma vez que as séries pluviométricas são mais extensas e em maior número.

METODOLOGIA

Previsão de afluências

A utilização de métodos paramétricos para construir um modelo comum de regressão linear a fim de obter um modelo de previsão na escala anual e posterior desagregação mensal podem ser de difícil elaboração por causa da grande assimetria das distribuições mensais e anuais, da grande quantidade de vazões com valor zero e da relação de não-linearidade entre vazão e os índices climáticos. Os métodos não paramétricos para a regressão e estimativa da densidade de probabilidade são de difícil aplicação devido à grande amplitude dos dados de vazão, às dimensões do problema multivariado no espaço e à quantidade de dados disponíveis. Logo, foi utilizada uma abordagem semi-paramétrica (Lall e Sharma, 1996; Souza Filho e Lall, 2003), sendo dividida em três partes:

- uma transformação de raiz cúbica é feita nas vazões anuais, obtendo-se uma distribuição de probabilidade aproximadamente normal. Em seguida, faz-se uma normalização da vazão transformada, ou seja, diminui do valor da vazão transformada sua média e, em seguida, divide pelo desvio padrão;

$Q^S = (a_s^{1/3} - \text{média}(a_s^{1/3})) / (\text{desvio padrão}(a_s^{1/3}))$ (1)
em que a_s é o vetor que contém a série temporal de vazões anuais de 1913 a 1993 no local s.

- uma regressão entre a variável transformada reduzida (Q^S) e os valores médios dos índices climáticos Niño3 e Dipolo de abril-maio-junho no período de 1912 a 1991, período para o qual a correlação entre a vazão afluente do ano seguinte aos reservatórios do sistema analisado e a média dos índices climáticos do mesmo período é significativa. Obtendo-se, então, os coeficientes lineares para os índices climáticos.

$$Q^S_{t \times 1} = X_{t \times 2} \cdot \beta_{2 \times 1} + \xi_{t \times 1} \quad (2)$$

$$X_{t \times 2} = \begin{bmatrix} \text{Niño3}_t & \text{Dipolo}_t \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \text{Niño3}_t & \text{Dipolo}_t \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\beta_{2 \times NR} = \begin{bmatrix} \beta_{\text{Niño3}} \\ \beta_{\text{Dipolo}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde ξ_t = resíduo da regressão; $\beta_{\text{Niño3}}$ = coeficiente de regressão correspondente ao fator climático Niño3; β_{Dipolo} = coeficiente de regressão correspondente ao fator climático Dipolo; X = matriz de preditores climáticos de 1912 a 1992; t = tempo em anos; NR = número de reservatórios.

Contudo a regressão acima não foi utilizada para gerar previsão, sendo utilizada somente para medida de distância entre o ano da previsão e os anos da série histórica (1913-1992).

- um modelo de previsão para a reamostragem não paramétrica do conjunto de dados anuais da série histórica, reamostragem esta obtida de valores atuais dos índices climáticos, cuja metodologia é explicada a seguir.

Utilizando uma metodologia não paramétrica, o procedimento do método dos Vizinhos (“K-Neighbors”) de estimativa da função de densidade descrito por Lall e Sharma (1996) é adaptado ao

problema atual conforme Souza Filho e Lall (2003). O método dos Vizinhos é descrito abaixo.

Para o ano i , calcula-se a distância d_i entre o valor do vetor dos preditores atuais \mathbf{x}^* e o valor dos preditores em sua série histórica, \mathbf{x}_i , na forma:

$$d_i^2 = \sum_{j=1}^2 \{(\mathbf{x}_j^* - \mathbf{x}_{i,j}) \cdot \gamma_j\}^2 \quad (5)$$

onde \mathbf{x}^* é um vetor 1×2 , \mathbf{x}_i é um vetor 1×2 de preditores durante o i -ésimo ano usado no modelo ajustado; $\gamma = [\beta_1 \ \beta_2]^T$ e β_i é o coeficiente de regressão entre a variável da vazão transformada e os índices climáticos Niño3 e Dipolo. As distâncias assinalam a similaridade da condição de preditor atual com cada uma das condições passadas. Com o vetor de distância d , determina-se o conjunto de valores mais próximos aos preditores atuais \mathbf{x}^* (correspondentes ao ano de previsão), identificando-se a posição em um ordenamento dos vizinhos mais próximos (o elemento j está associado ao j -ésimo x mais próximo de \mathbf{x}^*).

OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

Neste trabalho, Níveis Meta para operação dos reservatórios que compõem o Sistema Jaguaribe-Metropolitano foram estabelecidos. Estes podem ser interpretados como uma aproximação ao comportamento ótimo global do sistema, com base em toda a série histórica (1913 a 1992). Estes níveis podem ser utilizados como referência para operação dos reservatórios do sistema.

O cálculo dos Níveis Meta foi realizado com base no algoritmo simplex Nelder-Mead, sendo a estocasticidade considerada de forma implícita através da utilização de seqüências de vazões afluentes mensais de 18 meses (julho do ano corrente até dezembro do ano seguinte). Estas seqüências correspondem a seqüências de vazões afluentes com 18 meses de duração para o período de 1913 a 1992, uma vez que o período de 1994 a 2001 foi separado para a análise da performance da previsão. Assim sendo, para as demandas estabelecidas e níveis iniciais de armazenamento iguais aquele do ano de análise (final de junho do ano corrente), o algoritmo de otimização/simulação é executado para o sistema de reservatórios e para cada uma das seqüências de 18 meses neste período (jul-1913 a dez-1914, jul-1914 a dez-1915, ..., jul-1992 a dez-1993) obtendo-se as retiradas e os volumes armazenados para cada um

dos reservatórios, além das transferências entre bacias. Em seguida, faz-se o cálculo dos quantis de 25, 50 e 75% referentes aos volumes armazenados ótimos, definindo os Níveis Meta para operação com base na climatologia, este termo sendo utilizado para representar o uso de toda a série histórica de afluências.

Nesse artigo foi desenvolvido um programa de otimização/simulação, visando encontrar as liberações e transposições ótimas dos reservatórios do Sistema Jaguaribe-Metropolitano. Estas variáveis de decisão são determinadas pelo algoritmo Simplex Nelder-Mead que procura minimizar os custos de atendimento às demandas e bombeamentos considerados em uma função objetivo.

Os reservatórios, liberações, demandas e bombeamentos do Sistema Jaguaribe-Metropolitano estão representadas no desenho esquemático na Figura 1, sendo as variáveis definidas ao longo da metodologia.

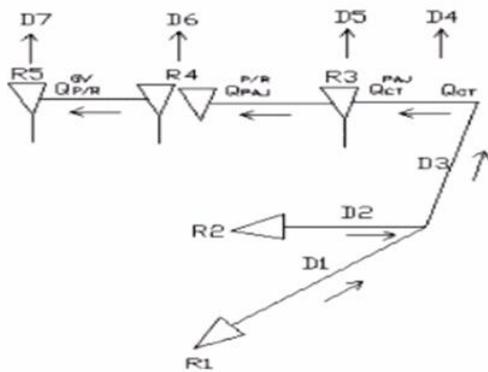


Figura 1 - Desenho esquemático do Sistema Jaguaribe-Metropolitano com os respectivos reservatórios, liberações, demandas e bombeamentos.

Inicialmente são lidos os dados de entrada dos reservatório Orós, Banabuiú, Pacajus, Pacoti-Riachão e Gavião: volume inicial em 1º de julho de 1993 a 2000, liberação máxima, demanda a ser atendida, capacidade máxima de armazenamento, total mensal médio evaporado durante 18 meses (julho do ano anterior a dezembro do ano seguinte), vazões afluentes de 1913 a 1992 e coeficientes da curva área x volume.

O algoritmo utilizado na otimização, como já mencionado, é o simplex Nelder-Mead, sendo utilizado os seguintes critérios de parada: número máximo de iterações, precisão da função objetivo e

das variáveis de decisão. O algoritmo procura as liberações ótimas para o período de 1992. Assim tem-se 80 curvas de armazenamento, para as quais podem-se calcular os Níveis Meta (quantis de 25, 50 e 75%) para todos eles ou somente para aqueles considerados próximos. Atenção especial deve ser dada aos seis primeiros meses de operação, uma vez que, a partir de dezembro, atualizações da previsão de afluências estarão disponíveis.

As variáveis de decisão, determinadas pelo algoritmo, servem como dados de entrada para a simulação do balanço hídrico, onde são feitas as simulações e obtidos os armazenamentos por processo iterativo.

O valor retornado pela função objetivo é resultante da otimização/simulação a partir das condições iniciais pré-estabelecidas (volume inicial para o ano de análise ou previsão).

A simulação do balanço hídrico dos reservatórios do sistema começa a partir da definição do valor das variáveis de decisão pelo algoritmo de otimização. As variáveis de decisão são as retiradas semestrais dos cinco reservatórios do sistema e o volume mensal transferido do

Sistema Jaguaribe para o Metropolitano. As retiradas semestrais são transformadas em mensais a partir de coeficientes de demandas, os quais podem ser definidos como a razão entre a demanda mensal e a do correspondente semestre. No caso das demandas agrícolas, esta sazonalidade reflete as necessidades hídricas das culturas, o que garante, uma vez determinada a demanda semestral, a não interrupção do ciclo destas. Já no caso das demandas urbanas, os coeficientes são quase constantes, variando somente em função do número de dias do mês.

Assim, uma vez definidas as retiradas mensais de cada reservatório e o volume transferido do Sistema Jaguaribe para o Metropolitano (Q_{CT}^{PAJ}), pode-se proceder com o balanço hídrico mensal. O balanço hídrico é assim realizado:

Caso

$$(S_{(j,i-1)} + Afl_{(j,i)} - E_{(j,i)} \cdot \bar{A}_{(j,i)} - R_{(j,i)} + T_{(j,i)}) > K(j) \tag{6}$$

$$V_{(j,i)} = S_{(j,i-1)} + Afl_{(j,i)} - E_{(j,i)} \cdot \bar{A}_{(j,i)} - R_{(j,i)} + T_{(j,i)} - K(j) \tag{7}$$

$$S_{(j,i)} = K(j) \tag{8}$$

Senão

$$V(j,i) = 0 \quad (9)$$

$$S(j,i) = S(j,i-1) + \text{Afl}(j,i) - E(j,i) - \bar{A}(j,i) - R(j,i) - V(j,i) + T(j,i) \quad (10)$$

$$\text{com } \bar{A}(j,i) = 0,5 \cdot \alpha(j) \cdot (S(j,i-1))^{\beta(j)} + S(j,i)^{\beta(j)} \quad (11)$$

sendo a área média (\bar{A}) e o armazenamento final (S) obtidos por processo iterativo.

O volume de transposição é assim definido:

$$T(j,i) = 0 \text{ se } j=1 \text{ ou } 2 \quad (12)$$

$$T(3,i) = [Q_{CT}^{PAJ}(i) - Q_{PAJ}^{P/R}(i)] \quad (13)$$

$$T(4,i) = [Q_{PAJ}^{P/R}(i) - Q_{P/R}^{GV}(i)] \quad (14)$$

$$T(5,i) = Q_{P/R}^{GV}(i) \quad (15)$$

As variáveis e índices estão descritos a seguir:

| | |
|-------------|--|
| j: | Orós = 1, Banabuiú = 2, Pacajus = 3, Pacoti/Riachão = 4 e Gavião = 5 |
| i: | mês (18 meses de operação) |
| S: | armazenamento |
| Afl: | afluência |
| \bar{A} : | área média |
| R: | retirada |
| V: | vertimento |
| T: | Volume de transposição. Positivo se o volume transferido ao reservatório é maior que o volume transferido do reservatório j, e negativo se vice-versa. |
| K: | capacidade do reservatório |
| E: | evaporação mensal |

Os coeficientes α e β foram calculados para os reservatórios Orós, Banabuiú, Pacajus, Pacoti-

Riachão e Gavião através do ajuste do modelo aos dados da tabela Área x Volume de cada reservatório. Os coeficientes α e β foram identificados pelo método dos Mínimos Quadrados.

$$\text{Área Calculada} = \alpha \cdot \text{Volume}^\beta \quad (16)$$

A disponibilidade para atender às demandas agrícolas é dada por $(R_1 + R_2 - Q_{CT}^{PAJ})$, R_1 , R_2 e Q_{CT}^{PAJ} sendo as variáveis de decisão. A demanda difusa ao longo do Canal do Trabalhador é considerada totalmente atendida ($D_4 = D_{max_4}$; ver definição a seguir), e a disponibilidade restante $(R_1 + R_2 - Q_{CT}^{PAJ} - D_4)$ é rateada em função das demandas máximas a serem atendidas (demandas D_1 , D_2 e D_3). No atendimento às demandas no local j e no mês i considera-se que a demanda atendida é menor ou igual à demanda pretendida.

$$D_j^i \leq D_{max_j}^i \quad (17)$$

onde

$$D_j^i = \text{demanda atendida no local j e no mês i}$$

$$D_{max_j}^i = \text{demanda pretendida no local j e no mês i}$$

A vazão do Canal do Trabalhador é igual à vazão bombeada do Canal do Trabalhador para Pacajus mais as demandas agrícolas difusas ao longo do percurso do Canal do Trabalhador ($D_{max_4}^i = D_4^i$)

$$Q_{CT} = Q_{CT}^{PAJ} + D_4 \quad (18)$$

As demandas atendidas pelos reservatórios Pacajus e Pacoti/Riachão são iguais ao mínimo entre as liberações destes reservatórios e as demandas pretendidas pelos respectivos reservatórios.

$$D_5^i = \min(R_3^i, D_{max_5}^i) \quad (19)$$

$$D_6^i = \min(R_4^i, D_{max_6}^i) \quad (20)$$

As vazões bombeadas $Q_{P/R}^{GV}$ (Pacoti/Riachão: Gavião) e $Q_{PAJ}^{P/R}$ (Pacajus : Pacoti/Riachão) são iguais às suas liberações menos as demandas atendidas pelo reservatório de origem, Pacoti/Riachão e Pacajus, respectivamente.

$$Q_{P/R}^{GV} = R_4 - D_6 \quad (21)$$

$$Q_{PAJ}^{P/R} = R_3 - D_5 \quad (22)$$

A demanda atendida pelo reservatório Gavião é igual a liberação do reservatório Gavião.

$$D_7 = R_5 \quad (23)$$

A Função Objetivo, aqui utilizada, prioriza o abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), introduzindo uma grande penalidade quando as demandas da RMF não são atendidas. Penalidades no não atendimento às demandas agrícolas são também utilizadas, sendo estas bem inferiores às da RMF. As penalidades introduzidas e a Função Objetivo foram baseadas nos trabalhos de Souza Filho e Porto(1997) e Lima (2000).

Os custos de bombeamento nos canais que compõem o sistema são também levados em consideração. Estes custos referem-se aos do Canal do Trabalhador para o reservatório Pacajus, do reservatório Pacajus para o reservatório Pacoti, do reservatório Pacoti-Riachão para o reservatório Gavião e do reservatório Gavião para a Estação de Tratamento de Água. Matematicamente, os custos podem ser expressos por:

$$CB = \alpha_{CT}^{PAJ} \cdot Q_{CT}^{PAJ} + \alpha_{PAJ}^{P/R} \cdot Q_{PAJ}^{P/R} + \alpha_{P/R}^{GV} \cdot Q_{P/R}^{GV} + \alpha_{GV}^{ETA} \cdot Q_{GV}^{ETA} \quad (24)$$

em que CB é o custo total de bombeamento, os α 's são coeficientes de custos por unidade de vazão transferida, e Q_{CT}^{PAJ} , $Q_{PAJ}^{P/R}$, $Q_{P/R}^{GV}$ e Q_{GV}^{ETA} são, respectivamente, as vazões bombeadas do Canal do Trabalhador para o reservatório Pacajus, do reservatório Pacajus para o reservatório Pacoti-Riachão, do reservatório Pacoti-Riachão para o reservatório Gavião e do reservatório Gavião para a Estação de Tratamento de Água.

Os dois últimos termos da equação somente são considerados quando os volumes dos reservatórios Pacoti/Riachão e Gavião estão, respectivamente,

abaixo de 45 hm³ e 49 hm³, uma vez que, acima destes volumes, as transferências são feitas sem a necessidade de bombeamento, através da operação das comportas.

Como já mencionado anteriormente, na Função Objetivo são incluídas penalidades pelo não atendimento às demandas pré-estabelecidas. No caso do abastecimento de Fortaleza, estas são:

$$CF1 = \alpha_{falha1} \cdot |Dmax_7 - Q_{GV}^{ETA}| \quad (25)$$

em que Q_{GV}^{ETA} é a vazão do reservatório Gavião para a Estação de Tratamento de Água, $Dmax_7$ é a demanda de Fortaleza, a qual deveria ter sido fornecida pelo reservatório Gavião à Estação de Tratamento de Água e α_{falha1} é a penalidade atribuída pela diferença entre a vazão a ser atendida e a fornecida.

As penalidades de não atendimento às demandas agrícolas são expressas por:

$$CF2 = \alpha_{falha2} \cdot | (Q_{Orós} + Q_{Banabuiú} - Q_{CT}^{PAJ}) - \sum_{j=1}^4 Dmax_j | \quad (26)$$

$Q_{Orós}$, $Q_{Banabuiú}$, Q_{CT}^{PAJ} são, respectivamente, as vazões do Orós, Banabuiú e do Canal do Trabalhador para o reservatório Pacajus. $Dmax_1$, $Dmax_2$, $Dmax_3$ e $Dmax_4$ são demandas agrícolas a serem atendidas pelos reservatórios Orós e Banabuiú. O coeficiente α_{falha2} é a penalidade atribuída por diferença entre a vazão a ser atendida e a fornecida, sendo nulo quando a demanda pré-estabelecida é totalmente atendida.

Os coeficientes de custo por unidade de vazão para o abastecimento de água da RMF são os mesmos considerados por Lima (2000), ou seja $\alpha_{CT} = 0,045$; $\alpha_{Pj} = 0,015$; $\alpha_{PR} = 0,01$; $\alpha_{GV} = 0,01$ e $\alpha_{falha1} = 100$. Adicionalmente, foi definido $\alpha_{falha2} = 5$.

Logo, a Função Objetivo pode ser expressa por:

$$\sum_{t=1}^{18} (CB_t + CF1_t + CF2_t) \quad (27)$$

em que t é o intervalo de tempo da simulação.

A estatística utilizada como critério de comparação entre a climatologia e a previsão é o Erro Quadrado Médio (EQM). A equação 28 é o EQM para a climatologia e a equação 29 é EQM para a previsão.

$$EQM_j = \frac{\sum_{i \in A} (x_i^j - \theta_j)^2}{n - 1} \quad (28)$$

$$\wedge \quad EQM_j = \sum_{i \in B} p_i (x_i^j)^2 - 2 \cdot \theta_j \cdot \sum_{i \in B} (p_i \cdot x_i^j) + \theta_j^2 \quad (29)$$

onde

| | |
|----------|---|
| θ | - Armazenamento na condição de Futuro Conhecido |
| p_i | - Peso (ou probabilidade) |
| x | - Volume Armazenado |
| n | - Número de anos |
| i | - Ano |
| j | - Mês |
| A | - Anos do período de 1913 a 1992 |
| B | - Anos próximos do ano de análise |

RESULTADOS

A análise de proximidade pelo método dos Vizinhos (Souza Filho e Lall, 2003) foi realizada para o Sistema Jaguaribe-Metropolitano dos anos de 1993 a 2001, estando ilustrado o ano de 1995 na Figura 3. O que ficou definido como a distância em relação ao 30º ano mais próximo, ou seja, o raio que representa a maior distância entre o ano de previsão e os anos próximos. Esses raios estão apresentados na Tabela 1.

A Figura 2 mostra o gráfico de dispersão entre o produto dos coeficientes β pelos preditores climáticos para o Sistema Jaguaribe-Metropolitano. O ponto quadrado no centro do círculo denota a condição climática da previsão e todos os outros pontos denotam os valores históricos de 1912 a 1991, sendo que os trinta vizinhos mais próximos ao ponto quadrado encontram-se marcados por círculos. Ainda neste gráfico pode-se observar um círculo que envolve todos os anos próximos.

Conforme as análises de proximidade realizadas, os anos de 1993, 1994, 1998 e 1999 são considerados anos extremos, dado que apresentam algumas características tais como raios grandes rela-

tivamente aos outros anos de análise e o ponto formado pelo gráfico de dispersão do produto dos coeficientes β pelos respectivos preditores climáticos para o ano de análise está próximo à fronteira de nuvem de pontos.

Nestes anos, observa-se que a partir do 2º ano mais próximo a distância é maior que 0,1, e que para o ano de 1998 as distâncias chegam a valores próximos aos limites de proximidades (raios) dos outros anos de análise muito rapidamente, apresentando uma menor uniformidade no crescimento das mesmas. Isto vem corroborar o fato de que o ano de 1998 é muito extremo o tanto em relação aos anos próximos como em relação aos anos da climatologia (1913-1992).

Tabela 1 - Distância (raio) do ano de análise (1993 a 2001) ao 30º ano mais próximo

| Ano | Raio |
|------|-------|
| 1998 | 0,452 |
| 1993 | 0,372 |
| 1999 | 0,343 |
| 1994 | 0,340 |
| 2000 | 0,322 |
| 1995 | 0,305 |
| 1997 | 0,279 |
| 2001 | 0,272 |
| 1996 | 0,229 |

Já o ano de 1995 encontra-se no centro da nuvem de pontos caracterizando não ser um ano extremo e sendo bem representado pelos anos próximos.

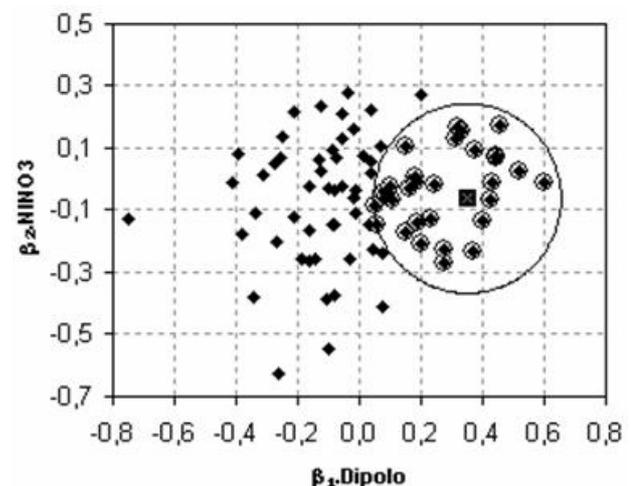


Figura 2 – Análise de Proximidade – 1995.

No que se refere a performance do modelo de previsão de afluências, uma análise qualitativa dos quantis de 50 e 75% da previsão e da climatologia revela uma evidência de menor incerteza da previsão com relação à climatologia para os anos de 1993, 1994, 1998 e 1999 considerando o quantil de 50% e 1993, 1998 e 1999 considerando o quantil de 75%. Observa-se que as vazões anuais observadas seguem a tendência da mediana da previsão, fato que só não ocorreu para o ano de 2001 como mostra a Figura 3.

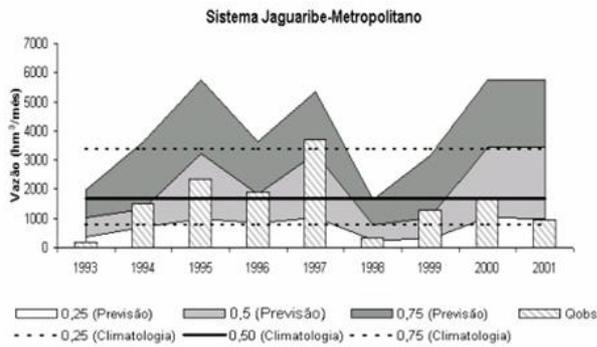


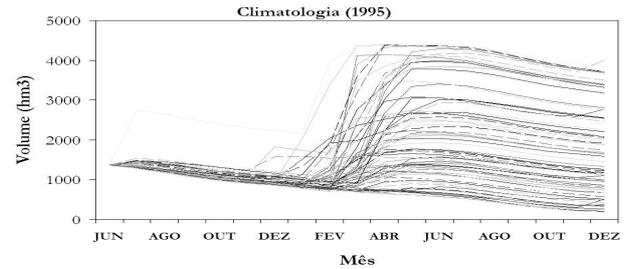
Figura 3 – Previsão de Afluências.

Por exemplo, para o ano de previsão (ou análise) de 1995, a Figura 4 (a) mostra a evolução do armazenamento durante os 18 meses de operação para os 80 anos da série histórica de afluências dos reservatório do Sistema Jaguaribe-Metropolitano, partindo-se do volume inicial do final de junho de 1994, aqui representado por V_i^{95} . Na Figura 4 (b) são apresentadas apenas as curvas de armazenamento correspondentes aos 30 anos mais próximos aquele da previsão. Nas Figuras 4(c) e 4(d) são apresentados os Níveis Meta dados pelos quantis correspondentes à climatologia e previsão, calculados a partir das curvas apresentadas nas Figuras 4(a) e 4(b), respectivamente.

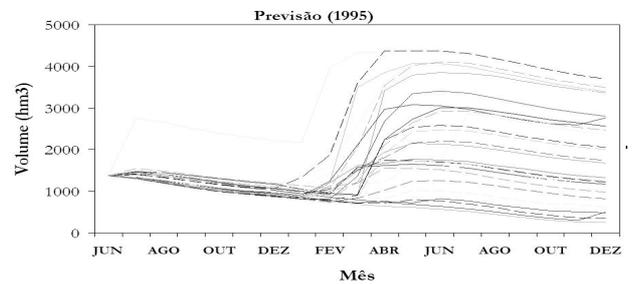
No caso da previsão, o método dos Vizinhos (Souza Filho e Lall, 2003) foi utilizado para identificar os 30 anos da série histórica (1913 a 1992) mais próximos ao ano de análise, sendo somente estes utilizados para determinação dos Níveis Meta.

Como, para cada um dos anos de análise (1994 a 2001), as afluências são conhecidas, pode-se identificar a melhor operação possível dos reservatórios do sistema para atendimento das demandas pré-estabelecidas. Esta operação será denominada

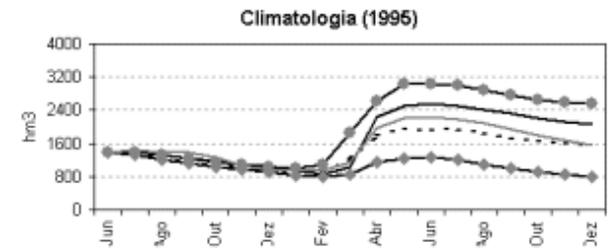
Operação com Futuro Conhecido (FC) e será utilizada como parâmetro de comparação da performance da operação estabelecida com base na climatologia, na previsão e a operação adotada pela COGERH-CE. O Futuro Conhecido e a operação feita pela COGERH-CE para o Sistema Jaguaribe-Metropolitano são também apresentados nas Figuras 4(c) e 4(d).



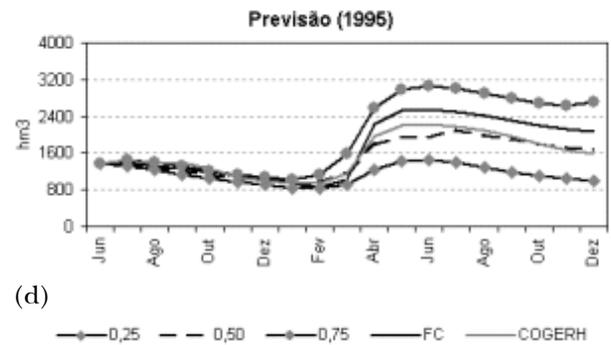
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4 - Determinação dos Níveis Meta, Futuro Conhecido (FC) e operação da COGERH-CE a partir da climatologia (a, c) e previsão (b, d) para o Sistema Jaguaribe-Metropolitano em 1995.

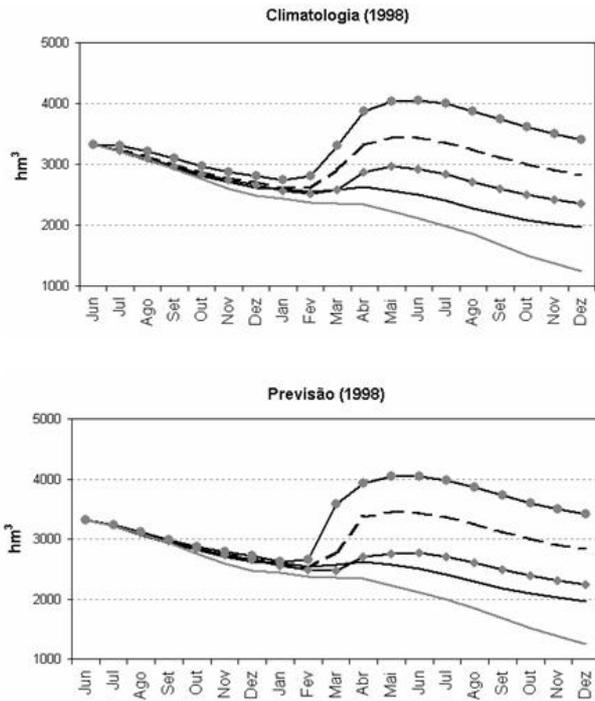
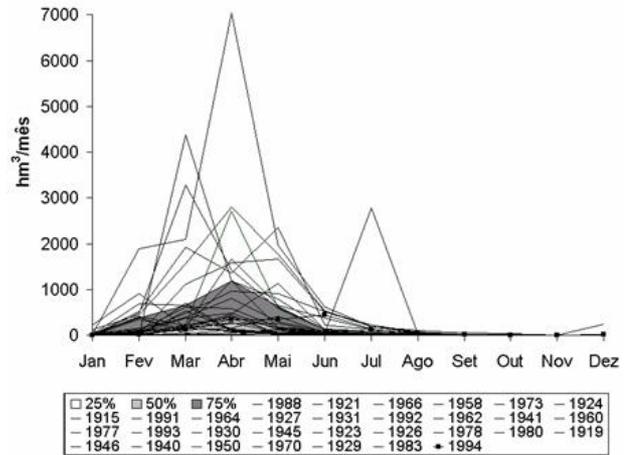


Figura 5 - Determinação dos Níveis Meta, Futuro Conhecido (FC) e operação da COGERH-CE a partir da climatologia e previsão para o Sistema Jaguaribe-Metropolitano em 1998.

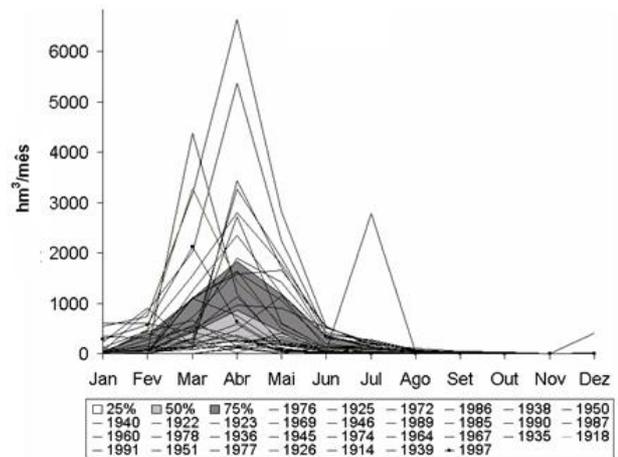
Já no ano de 1998, o Futuro Conhecido ficou abaixo dos Níveis Meta da climatologia e previsão, o que pode ser explicado pelo fato deste ano ser um ano muito extremo quando comparado com a série histórica de 1913-1992, o que pode ser visto na Figura 5.

De acordo com os resultados dos Níveis Meta, Futuro Conhecido e Operação da COGERH-CE, observa-se que a mediana da previsão é menor que a mediana da climatologia para os anos de 1994, 1996, 1997, 1999 e 2000; a amplitude da previsão é menor que a da climatologia para os anos de 1995, 1996, 1997, 1998, 2000 e 2001 (últimos 12 meses de operação); o Futuro Conhecido está mais próximo da mediana da previsão que da mediana da climatologia para os anos de 1994, 1995 e 1999. A COGERH-CE operou abaixo dos quantis nos seis primeiros meses em 1994, 1997 e 2000 e durante toda a operação em 1998, 1999 e 2001. Nestes últimos anos, a

correção no procedimento de operação a partir de janeiro não foi suficiente para trazer os níveis operados pela COGERH-CE na região dos Níveis Meta, sejam estes determinados a partir da climatologia ou previsão.



(a)



(b)

Figura 6 - Variabilidade Intra-Anual das Vazões Afluentes ao Sistema Jaguaribe-Metropolitano para os anos próximos ao ano de 1994 (a) e 1997 (b).

A análise de variabilidade intra-anual mostra as vazões mensais referentes aos 30 anos mais próximos ao ano de análise, e por fim os quantis de 25, 50 e 75% das vazões mensais dos anos próximos (gráfico de área). A análise destas figuras mostra que para todos os anos de análise há uma grande variabilidade intra-anual. Para o anos de 1994 observava-se que os picos de vazões mensais observados estão fora da região definida pelos quantis 25, 50 e

75% das vazões mensais dos anos próximos (Região dos Quantis da Previsão - RQP), estando este pico postergado com relação a RQP para o ano de 1994 e antecipado para o de 1997. Com exceção destes anos, as vazões mensais observadas estão totalmente dentro desta referida região. O ano de 1997 é bem atípico no tocante ao padrão de vazão intra-anual observado, assim como também com a variabilidade espacial das chuvas. Os anos de 1994 e 1997 são apresentados nas Figuras 6(a) e 6(b) respectivamente.

Nos resultados da análise do Erro Quadrado Médio para climatologia e previsão do Sistema Jaguaribe-Metropolitano, verificou-se que os anos de 1995, 1996, 1998, 2000 e 2001 apresentam EQM da previsão menor que o da climatologia, sendo apresentado na Figura 7 o gráfico do EQM para o ano de 1995. Nesta análise, não foram realizados testes de hipótese sobre a significância da diferença entre os EQM's, mas apenas uma avaliação qualitativa. Os anos de 1994 e 1999, anos com mudanças significativas na previsão de julho para dezembro, apresentam EQM da previsão maior que o da climatologia. Adicionalmente, o ano de 1997 também apresenta EQM da previsão maior que o da climatologia, podendo isto ser devido a mudanças na previsão de julho para dezembro, aliada a um padrão intra-anual de aflúncias característico de 1997, como já mencionado (Figura 6-b).

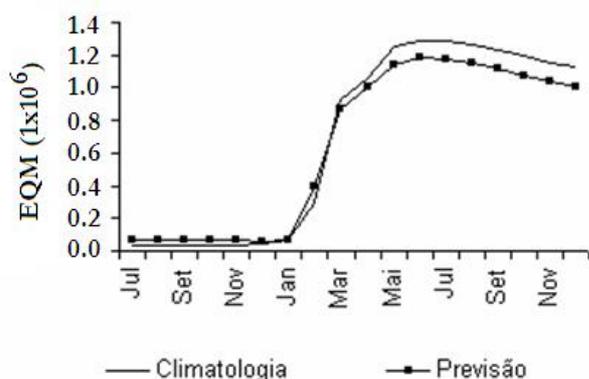


Figura 7 - Erro Quadrado Médio para a previsão e climatologia em 1995.

CONCLUSÃO

O gerenciamento de recursos hídricos necessita definir o volume de água a ser utilizado para

os diferentes usos e pelos diferentes usuários, isto é, a definição do volume alocável. A variabilidade climática introduz incertezas associadas ao desconhecimento dos volumes afluentes futuros. Uma forma de reduzir estas incertezas é através da utilização de previsão de vazões sazonais, sendo apresentada uma alternativa simples de como incorporar a previsão de aflúncias a partir de índices climáticos na operação do sistema de reservatórios que abastecem Fortaleza (Sistema Jaguaribe-Metropolitano), constituindo um bom exemplo de como gerenciar incertezas.

Resultados promissores foram obtidos quanto ao uso da previsão de aflúncias na operação de reservatórios do Sistema Jaguaribe-Metropolitano, observando-se uma tendência da mediana da previsão em relação às vazões observadas entre os anos de 1994 a 2001 de acordo com o método dos Vizinhos.

A operação de reservatórios ao longo do Sistema Jaguaribe-Metropolitano, na qual utilizou-se a programação não linear como técnica de otimização aliada à simulação do balanço hídrico, teve como parâmetros comparativos tanto a operação da COGERH-CE como o futuro conhecido; podendo servir como uma ferramenta de suporte à decisão no gerenciamento de recursos hídricos no Estado do Ceará.

A tendência é que pesquisas nesta área continuem com o intuito de haver um melhor uso de previsão de aflúncias e otimização na operação de sistemas de reservatórios.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil.

REFERÊNCIAS

- BRAGA JUNIOR, B. P. F., "Técnicas de otimização e simulação aplicadas em Sistemas de Recursos Hídricos", em: Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos. São Paulo: Nobel: ABRH. Cap.5, 427-517, 1987.
- COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (COGERH) - CE, Plano de Gerenciamento das Águas da Bacia do Jaguaribe e Bacia Metropolitana, 2000.

- DATTA, B. and HOUCK, M. H., "A Stochastic Optimization Model for Real-Time Operation of Reservoir Systems", *Water Resources Research* 6 (1): 22-31, 1984.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), <http://www.ibge.gov.br>, Censo, 2000.
- JACOBY, H. D., and LOUCKS, D. P., "Combined use of optimization models in river base planning", *Water Resources Research*, 8(6), 1401-1414, 1972.
- KUHN, H. W. and TUCKER, A. W., "Nonlinear Programming", Proc. 2nd Berkeley Symp. Math. Statistics Probabilities, J. Neyman (ed.), University of California Press, Berkeley, 1951.
- LALL, U. and SHARMA, A., "A Nearest Neighbor Bootstrap for Resampling Hydrologic Time Series", *Water Resources Research*, 32(3), 679-693, 1996.
- LANNA, A. E. e SCHWARBACH, M., "MODHAC – Modelo Hidrológico Auto-Calibrável", Recursos Hídricos, Publicação 21. Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1989.
- LOUCKS, D. P., STEDINGER, J. R., and HAITH, D. A., "Water Resource Systems Planning and Management", Prentice Hall, N. J., 118(4): 356-370, 1981.
- SIGVALDASON, O. T., "A simulation model for operating a multireservoir system", *Water Resources Research*, 12(2), 263-278, 1976.
- SOUZA FILHO, F. A. e PORTO, R. L. L., "Definições dos Níveis Meta do Sistema de Abastecimento de Fortaleza", Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 12., 1997, Vitória. Anais. São Paulo: ABRH. V.2, 351-357, 1997.
- SOUZA FILHO, F. A. and LALL, U., "Seasonal to Interannual Streamflow Forecasts for Ceara, Brazil: Applications of a Multivariate, Semi-Parametric Algorithm", *Water Resources Research*, Vol. 39, nº 11, 1307, 2003.
- VOTRUBA, L., "Analysis of water resources systems", Amsterdam: Elsevier, 1988.
- WURBS, R. A., "Modeling and analysis of reservoir system operations", Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1996.
- YAKOWITZ, S., "Constrained differential dynamic programming", submitted to *Math. Anal. Appl.*, 1982.
- YEH, W. W. -G., "Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review", *Water Resources Research*, 21(12), 1797-1818, 1985.

The rainfall regime of the Brazilian Semi Arid presents high spatial and temporal variability, the latter within- and over-year; intermittent rivers; high evaporation and soils, generally shallow and over crystalline rock, resulting in low infiltration and storage capacity. Uncertainty in water resources management is related to the water supply of the Northeast Semi Arid, due mainly to the natural variability of the runoff regime, which characterizes the amount of available water. At the same time, population growth, urbanization and the inefficient use of water increase demand in the Northeast Region. Thus it is necessary to seek alternatives to improve water resources management. Therefore, the use of systems analysis techniques, such as simulation and optimization, combined with the use of inflow forecasts, can help reduce the uncertainty in water resources management. This research is part of an action program that aims at incorporating forecast/climatic information in the water allocation process performed by COGERH-CE. In this paper optimization/simulation techniques are used to establish optimal operation policies in the Jaguaribe-Metropolitano System reservoirs using inflows forecast from climate indexes (El Nino, Atlantic Dipole). The specific objectives are: to establish Target Levels to operate the system reservoirs based on the historical series (climatology) and climatic information (forecast); to perform the inflow forecast of the Jaguaribe-Metropolitano System reservoirs; to compare the results obtained with Target Levels from climatology and forecasting and operation adopted by COGERH-CE with the best possible operation (The Known Future) for the years 1994 to 2001. Using The Neighbors Method for the inflow forecast and non-linear algorithm as an optimization technique, the methodology proposed presented successful results, according to the proposed objectives.

Key-words: forecast; climatic information; reservoirs

Use of Optimization/Simulation and Inflow Forecasting in Reservoir Operation in The Jaguaribe-Metropolitano System

ABSTRACT