

A PREVISÃO DE SECAS E A GESTÃO HIDROENERGÉTICA: O CASO DA BACIA DO RIO PARNAIBA NO NORDESTE DO BRASIL

Marcos Airton de Sousa Freitas¹

Resumo - Na gestão de recursos hídricos em regiões semi-áridas, como, por exemplo, o Nordeste do Brasil, é fundamental dispor-se de instrumento prático de auxílio à tomada de decisão em períodos de secas. Foi desenvolvido um Sistema de Suporte à Decisão (SSD) para a previsão e o monitoramento de secas. Diversos índices foram adaptados e incorporados a um sistema de acompanhamento das características básicas dos períodos de seca (duração, severidade e intensidade), de modo que distintas ações mitigadoras pudessem ser implementadas, de acordo com os valores atingidos por esses parâmetros. Para a previsão de secas foram utilizados modelos estatísticos e redes neurais artificiais. No monitoramento da precipitação foram empregados os seguintes índices meteorológicos: o RAI (Rainfall Anomaly Index), o BMDI (Bhalme & Mooley Drought Index) e o LRDI (Lamb Rainfall Departure Index). Uma vantagem prática no uso desses índices é o acompanhamento direto do grau de severidade e duração dos períodos secos, permitindo, com isso, tomar medidas efetivas e em tempo hábil, objetivando minorar os impactos ocasionados por uma seca. Os modelos descritos foram aplicados aos Estados do Piauí (Bacia do rio Parnaíba) e ao Estado do Ceará.

Palavras-chaves: hidrometeorologia aplicada; operação de reservatórios; gestão hidroenergética.

1. INTRODUÇÃO

As secas podem ser caracterizadas como um fenômeno natural que se diferenciam nitidamente das demais catástrofes naturais. Ao contrário de outras ocorrências naturais como cheias, furacões e terremotos, as quais iniciam e terminam repentinamente, além de se restringirem, normalmente, a uma pequena região, o fenômeno das secas tem, quase sempre, um início lento, uma longa duração e espalha-se, na maioria das vezes, por uma extensa área. Bryant (1991) analisou 31 catástrofes naturais (furacões, cheias, terremotos, tsunamis, vulcões etc.), com base nos parâmetros característicos e efeitos causados (duração da catástrofe, área de atuação, número de vítimas fatais, prejuízo econômico etc.) e concluiu que as secas são, dentre as analisadas, a mais grave.

A seca é um fenômeno dito recorrente em regiões semi-áridas. Os efeitos de um duradouro período de seca em uma determinada região dependem, entretanto, não somente da duração e intensidade da seca, mas também das condições socio-econômicas e culturais da população atingida. A ocorrência de secas em regiões onde a demanda por água é maior do que a disponibilidade ou onde haja uma grande variabilidade da oferta d'água, trazem quase sempre conseqüências de larga escala. Grandes projetos de irrigação e concentrações urbanas densamente povoadas estão sujeitos a uma enorme vulnerabilidade no que diz respeito ao abastecimento d'água. Durante os períodos de secas há também uma relevante redução na produção de energia hidroelétrica.

Freitas (1996a) apresentou uma metodologia de análise regional integrada do fenômeno das secas, a qual resumidamente, compõe-se dos seguintes tópicos: (1) definição dos diversos tipos de secas; (2) previsão e monitoramento; (3) gerenciamento e otimização dos recursos hídricos; (4) avaliação dos efeitos e (5) planejamento das ações mitigadoras. Freitas (1996b), bem como Freitas & Billib (1997) demonstraram a viabilidade de utilização de modelos de previsão de secas para o Nordeste do Brasil: modelos estatístico-probabilísticos e modelos baseados em redes neurais.

No Nordeste Brasileiro a previsão e o monitoramento de períodos de secas são particularmente úteis, devido, dentre muitos outros, aos seguintes aspectos: (1) a existência de inúmeros projetos de irrigação implantados e a serem implantados ao longo dos principais rios; (2) o abastecimento d'água das grandes cidades é, em sua maioria, dependente direto do escoamento dos rios, ou indiretamente do volume acumulado nas barragens; (3) a maioria das culturas agrícolas depende exclusivamente da regularidade das chuvas; (4) a possibilidade de uso de água subterrânea é pequena quando comparada ao da água superficial e (5) a maior parte da produção energética da região tem como base a hidroeletricidade.

¹ Eng^o Civil; Prof. Universitário; Espec. em Rec. Hídricos da Agência Nacional de Águas (ANA); Diretor Técnico-Científico da Associação dos Servidores da Agência Nacional de Águas – ASÁGUAS; End. Prof.: SPS, Área 5, Quadra 3, Bl. L, Brasília–DF. Telef: +55-61-445-5348; E-mail: masfreitas@ana.gov.br

É fato notório a extrema necessidade de implementação de Sistemas de Suporte à Decisão - SSD com o objetivo de munir os *policy makers*, isto é, os tomadores de decisão (políticos, secretários estaduais, coordenadores, etc.) dos diversos órgãos governamentais (a nível federal, estadual e municipal) de instrumental hábil e prático, notadamente no diz que respeito à gestão de recursos hídricos, para a previsão e o monitoramento de períodos secos e úmidos em regiões semi-áridas.

2. A PREVISÃO DE SECAS

A previsão de anos secos e úmidos é de vital importância em regiões semi-áridas essencialmente agrícolas (Freitas & Billib, 1997). O semi-árido brasileiro, com área superior a 1 milhão de Km², é caracterizado por uma enorme variabilidade temporal e espacial de sua precipitação, acarretando um processo de intermitência em seus principais cursos d'água. É evidente, a urgência de implementação de modelos no sentido de se reduzir tais incertezas. A modelagem, portanto, inclui a análise das causas meteorológicas dinâmicas, ou seja, a análise do sistema de circulação global, especialmente o ENSO (El Niño - Southern Oscillation), bem como o desenvolvimento de um modelo de predição de secas.

Diversos métodos foram aplicados no decurso deste século com o intuito de se prever as secas no Nordeste do Brasil. Tentativas, por exemplo, foram feitas no sentido de se relacionar o número de manchas solares e o total precipitado. Correlações entre diversas variáveis, tais como a pressão do ar, a temperatura da superfície do mar e outras, de regiões distantes e a precipitação anual no Nordeste foram analisados, já no início do século passado (Walker, 1928). Essas conexões, entretanto, não foram suficientes para o desenvolvimento de um modelo de predição. Ghose (1971) não encontrou, por exemplo, nenhuma correlação expressiva entre a precipitação anual e as atividades solares, utilizando-se de duas séries de precipitação (Quixeramobim, no Estado do Ceará e Juazeiro, na Bahia).

A figura 1 apresenta um esquema simplificado, proposto por Freitas (1997a), para o monitoramento meteorológico. Este sub-componente do sistema de gestão compõe-se da aplicação de métodos estatísticos (análise de correlação, tabelas de contingência, análise de componentes principais etc.), bem como de sistemas 'inteligentes', tais como redes neurais artificiais, lógica nebulosa etc. para a previsão de precipitação. Um outro método possível seria a previsão, com 6 ou até 12 meses de antecedência (Chen et al., 1995) da temperatura da superfície do mar (SST) e posteriormente através de simulação por meio de um modelo de circulação global atmosférico-oceânico (Barnett et al., 1994) prevê o total pluviométrico numa determinada região. Este último caminho requer porém um custo computacional maior.

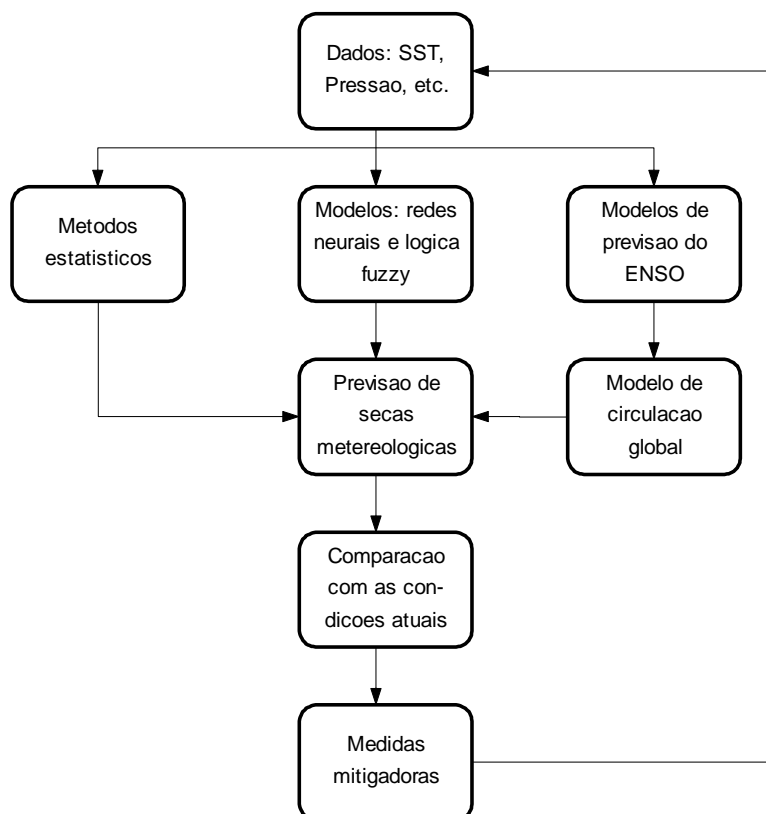


Figura 1: Sistema de Monitoramento Meteorológico de Secas

2.1 ENSO (El Niño - Southern Oscillation)

Ao lado da influência do posicionamento da Zona de Convergência Intertropical, dentre outros aspectos, diversos autores relataram possível teleconexão entre o fenômeno do El Niño e da Oscilação Sul (Southern Oscillation) e o comportamento pluviométrico no Nordeste do Brasil. Ropelewski & Halpert (1987) dentre outros autores abordaram tal relação.

Nas figuras 2 e 3, são apresentadas, respectivamente para os Estados do Ceará e do Piauí, as alternâncias entre períodos úmidos e secos e os anos ENSO – El Niño/ Southern Oscillation, conforme Rasmusson & Carpenter (1983). O índice de precipitação utilizado foi o LRDI (Lamb Rainfall Departure Index), que expressa em termos regionais o desvio da precipitação em relação à média, em termos de desvio padrão (Lamb et al., 1986).

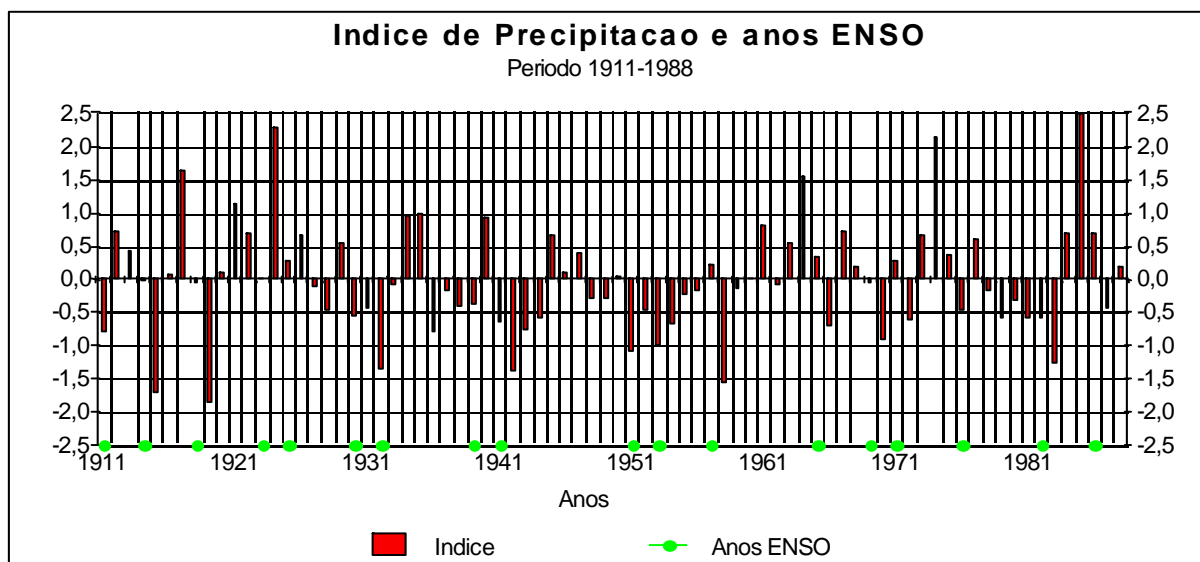


Figura 2: Alternância entre períodos úmidos e secos de 1911 a 1988, no Estado Ceará (NE-Brasil), e os anos ENSO, conforme Rasmusson & Carpenter (1983).

É fácil verificar que, de modo geral, ocorrem anos de secas após anos de ocorrência do fenômeno do El Niño. Isto aconteceu nos anos 1914, 1918, 1930, 1941, 1951, 1953, 1957, 1965, 1969, 1971, 1982, 1986, 1992 e 1997. O ano seguinte a um ano de El Niño, entretanto, nem sempre é um ano seco, como se pode ver em 1912, 1924 e 1926. Há também anos secos que não seguiram anos de El Niño, como por exemplo, 1936 e 1979.

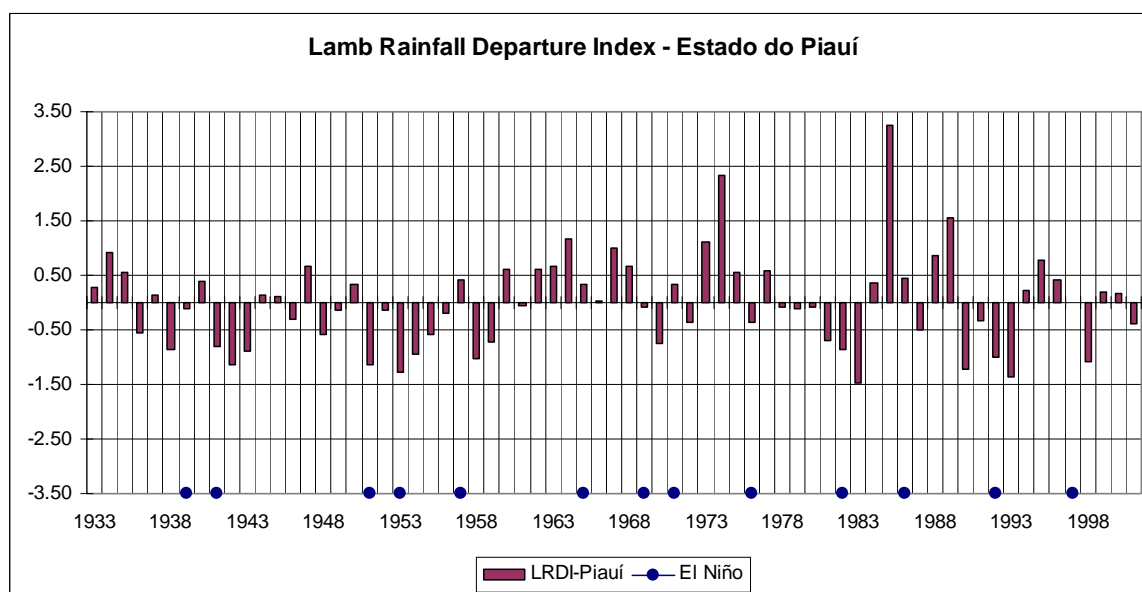


Figura 3: Alternância entre períodos úmidos e secos de 1933 a 2001, no Estado Piauí (NE-Brasil) e as ocorrências de El-Niño.

O El Niño diz respeito ao aquecimento, acima do normal, da temperatura da superfície do mar no Pacífico, próximo às costas do Peru e Equador. Já a Oscilação Sul está associada à diferença de pressão do ar entre as localidades de Darwin (12° 20'S, 130° 52'E) e Tahiti (17° 33'S, 149° 31'W).

2.1 Modelos Estatísticos

A identificação das causas meteorológicas e o desenvolvimento de métodos de previsão de secas no Nordeste do Brasil foram efetuados através da análise dos fenômenos de circulação global, especialmente o ENSO (El Niño-Southern Oscillation). Correlações entre a precipitação no Nordeste do Brasil e parâmetros relativos à circulação, como a temperatura da superfície do mar (Sea Surface Temperatura, SST) e diferença de pressão no Pacífico (Darwin-Tahiti), permitem uma estimativa da precipitação futura.

A análise de regressão e o uso de tabelas de probabilidades condicionadas foram empregados utilizando dados de precipitação do Nordeste do Brasil, além de dados de temperatura da superfície do mar e pressão do ar do Oceano Pacífico. Para o estabelecimento da modelagem se classificou, com base na probabilidade de excedência da precipitação, os anos em úmidos, normais e secos.

A análise estatística inicial foi feita com base em trinta (30) estações de precipitação, bem distribuídas espacialmente no Estado do Ceará, objetivando observar a severidade da dependência entre a incidência do fenômeno do El Niño e a ocorrência de secas no Ceará. Adicionalmente, foram estabelecidas tabelas de probabilidade condicionadas para as diferentes estações. Os quantis 33% e 67% das séries de precipitação foram usados para classificar os anos em seco, normal ou úmido. Os índices do ENSO foram, também, classificados em quente, normal ou frio (Freitas, 1996). Neste trabalho as fontes de dados usadas foram as seguintes: SST's e diferença de pressão do Pacífico, apresentados por Wright (1989). Esses dados foram homogeneizados por Wright de modo a levar em consideração possível mudança nos métodos de medição, densidade de dados ou local de estação.

As anomalias na temperatura da superfície do mar (SST) baseiam-se na variação desses valores em relação à média a longo prazo. Valores positivos dessa anomalia significam valores acima da média. Os dados foram multiplicados por 100, de maneira que um valor de +120, por exemplo, corresponde a uma temperatura de +1,2°C acima da média.

A diferença de pressão do ar (Darwin - Tahiti), doravante DT, descreve o gradiente de pressão entre esses pontos extremos do Pacífico e com isso a denominada Oscilação Sul (Southern Oscillation). Durante os anos "normais" a pressão em Darwin é menor do que no Tahiti, apresenta valores positivos, significando uma inversão da denominada Circulação Walker.

2.1.1 Análise de Regressão e Tabelas de Probabilidades Condicionadas

Para os postos pluviométricos em estudo foram computados os coeficientes de correlação para diversas combinações de dados: média mensal; média de três meses; média de seis meses e totais anuais. Isto foi efetuado de modo a estabelecer qual ou quais combinações de dados apresentavam melhores coeficientes de correlação.

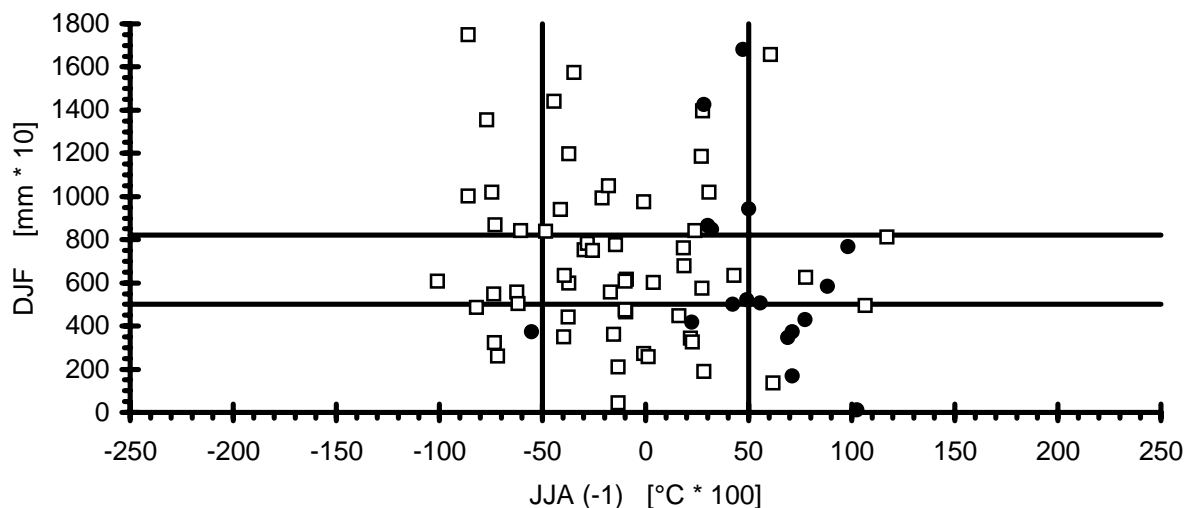
Para cada posto foram calculadas as probabilidades de excedência da precipitação correspondente à 33% e 67%. Esses patamares foram empregados para a classificação dos períodos analisados em secos, normais ou úmidos. Para as anomalias das SSTs foram escolhidos os limites -50 e +50, isto é, uma anomalia de -0,5° C e +0,5° C, os quais correspondem aproximadamente também aos quantis 33% e 67%.

Essa análise foi efetuada para os valores médios de precipitação de MAM(-1), de JJA(-1) e de SON(-1) e as anomalias SSTs (DJF do ano seguinte), isto é, para 9 e 6 meses de antecedência, respectivamente. A figura 4 mostra os resultados para o posto de Mombaça. Os pontos negros indicam anos em que houve El Niño de moderado a extremo, conforme classificação de Rasmusson & Carpenter (1983). Nos quadros são mostrados as probabilidades condicionadas para as categorias de precipitação (úmido, normal e seco) contra as anomalias SSTs (frio, normal e quente). Para esse posto, por exemplo, tem-se que uma anomalia maior do que 0,5° C em MAM(-1) indica uma probabilidade de cerca de 54% de apresentar precipitação (DJF) abaixo do quantil 33% (período seco), ou ainda, uma probabilidade de 85% de apresentar um total precipitado abaixo de 67%.

Para a aplicação dos diagramas de contingências e das tabelas de probabilidades condicionadas em um modelo de previsão de secas, usando-se somente dados do Oceano Pacífico, fez-se uma

verificação em forma de previsão para o Estado do Ceará. Para isso, implementou-se tabelas de probabilidades com os valores médios de todas as tabelas (postos) para o período de 9, 6 e 3 meses antes do período a ser previsto (DJF). A tabela 1 mostra esse resultado para o período de 6 meses de antecedência. Supõe-se serem essas tabelas representativas para o Estado do Ceará.

SSTs vs. Precipitação em Mombaça



JJA (-1)	Frio SST (14 Eventos)	Normal SST (47 Eventos)	Quente SST (13 Eventos)
DJF			
Período Úmido	42 %	36 %	8 %
Período Normal	29 %	34 %	38 %
Período Seco	29 %	30 %	54 %

Quente SST : $x > 50$; Ano úmido : $y > 820$
 Normal SST : $-50 \leq x \leq 50$; Ano normal : $500 \leq y \leq 820$
 Frio SST : $x < -50$; Ano seco : $y < 500$

Anos de ENSO : 1911, 1914, 1918, 1923, 1925, 1930, 1932, 1939, 1941, 1951, 1953, 1957, 1965, 1969, 1971, 1976, 1982 (Rasmusson & Carpenter, 1983)

Figura 4: Diagrama de Contingência e Tabela de Probabilidade Condicionada; SSTs de JJA(-1) vs. Precipitação em Mombaça (Estado do Ceará)

Tabela 1: Tabela de Probabilidade Condicionada Média: SSTs de JJA(-1) vs. Precipitação (DJF)

JJA (-1)	Frio SST	Normal SST	Quente SST
DJF			
Período Úmido	31 %	39 %	12 %
Período Normal	35 %	33 %	22 %
Período Seco	34 %	28 %	66 %

Verifica-se da tabela 1 que há uma probabilidade de 66% de haver um período seco (djf) quando o índice sst é maior do que +50 (isto é, +0,5°C). Períodos secos e normais apresentam juntos uma probabilidade de 88%, em tais circunstâncias, para uma previsão seis meses antes do evento.

As previsões com base nas SSTs de JJA(-1) mostram que períodos secos em DJF no Estado do Ceará podem ser previstos com cerca de 6 (seis) meses de antecedência. De um total de doze (12) valores, em seis postos empregados para a validação, para os anos de 1983 e 1984, oito (8) foram estimados como secos, o que corresponde à cerca de 67%, conforme tabela de probabilidade condicionada. Da mesma maneira, onze (11) de um total de doze (12) tratavam-se de oito (8) secos e três (3) normais, o que corresponde à cerca de 88% de probabilidade da tabela.

2.2 Redes Neurais Artificiais

Significativo progresso nos campos do reconhecimento do padrão e teoria de sistemas foi conseguido com o uso de redes neurais artificiais. As redes neurais têm uma estrutura matemática bastante flexível e são capazes de identificar relações não-lineares e de descrever processos complexos. A denominação redes neurais artificiais é dada aos modelos, que tentam reproduzir a estrutura e o funcionamento das redes biológicas, ou seja, do cérebro (Kosko, 1992). Uma rede neural compõe-se de um elevado número de elementos, denominados neurônios (*cells, units*) e um grande número de ligações, conhecidas como sinapses. A cada ligação (*links, connections*) é associado um peso, que está intrinsecamente relacionado à capacidade de aprendizado da rede. Trata-se, portanto, de um sistema dito inteligente. Uma característica fundamental das redes neurais é a capacidade de aprendizado.

Diferentes topologias de redes e várias combinações dos dados de entrada (intervalo de tempo anual, trimestral e mensal; dados do Atlântico e do Pacífico) foram analisados. A vantagem primordial desta metodologia recai no uso de técnicas matemáticas avançadas, as quais permitem obter, com um determinado nível de acuidade e antecedência, uma estimativa do total a ser precipitado ou escoado numa determinada região durante o período chuvoso. Tal prognóstico é de grande valia para a otimização da operação de reservatórios, em especial, quando acoplado aos modelos de geração de vazão (Freitas & Bilib, 1997).

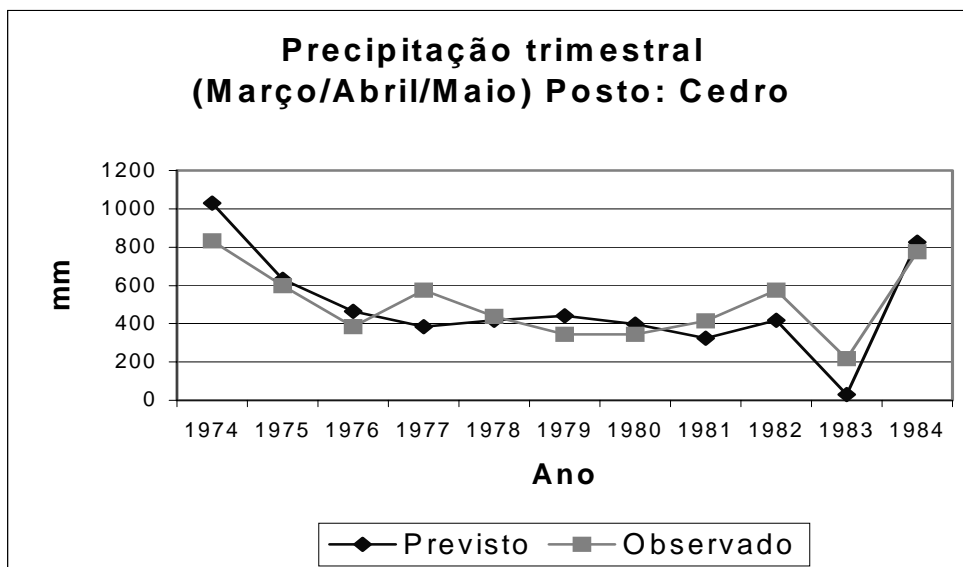


Figura 5: Precipitação trimestra prevista e observada para o Posto de Cedro.

Foram testados basicamente dois procedimentos: a modelagem das próprias séries de precipitação para cada posto pluviométrico e o uso dos SSTs dos oceanos Pacífico e Atlântico através de redes neurais. Para os trinta postos pluviométricos escolhidos do Estado do Ceará foi calculado um índice de seca: o Lamb Rainfall Departure Index (LRDI) de acordo Lamb et al. (1986) para o semestre chuvoso (janeiro a junho) e correlacionado com o SST do Atlântico. Apenas os dados das regiões que apresentaram uma correlação maior que 0.3 foram, então, utilizados como entrada para a modelagem das redes neurais.

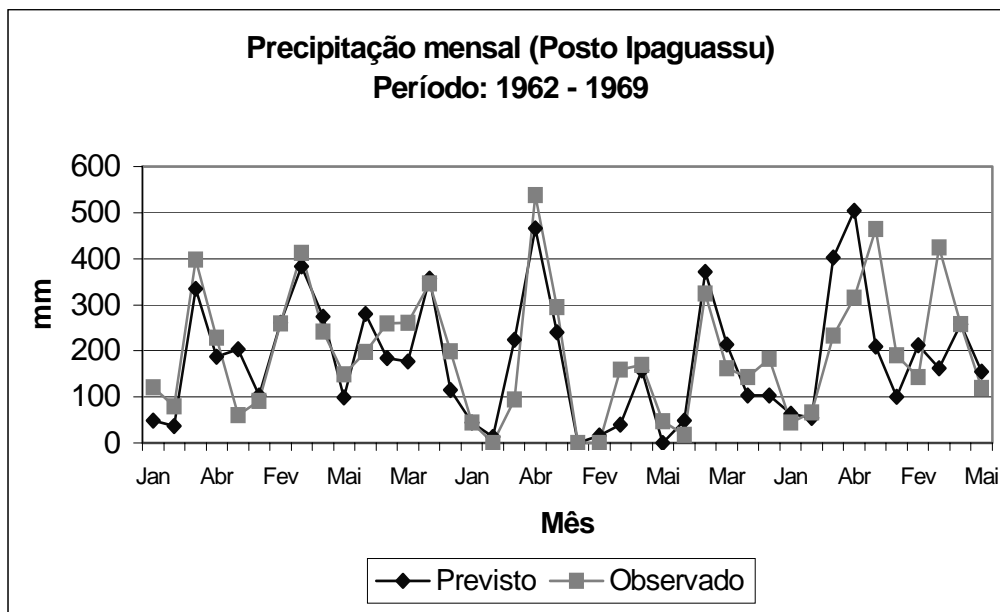


Figura 6: Precipitação mensal prevista e observada para o Posto de Ipaguassu.

3. O MONITORAMENTO DE SECAS

O monitoramento de períodos de secas pode ser efetuado através do emprego de índices. Com base neles, pode-se desenvolver um sistema de acompanhamento das características dos períodos de seca, assim como as diferenciadas medidas a serem efetivadas de acordo com os valores atingidos por tais parâmetros. O método mais conhecido e largamente empregado para a investigação da distribuição espacial e temporal dos períodos de secas é o da determinação de certo índice de seca. Este pode, em geral, ser definido como um valor, que representa o efeito acumulado ocasionado por um longo período de déficit de umidade.

Em decorrência da dificuldade de se ter uma definição única para o fenômeno da seca, a determinação de um índice de seca é também problemática. A severidade de um período de seca é normalmente expressa como uma anomalia de um ou de vários parâmetros climáticos, de seu valor médio. O mais usual dos índices de seca é expressar o total precipitado em determinada região em termos de porcentagem do valor médio dos dados conhecidos (Li & Makarau, 1994). Dessa forma, pode-se comparar o valor atual com o valor médio da série histórica, em termos semanal, mensal, semestral ou anual.

3.1 Índices de Secas

Transeau (1905) determinou um índice para a precipitação efetiva com base em dados de 150 postos pluviométricos dos Estados Unidos, o qual expressava a relação entre a precipitação e a evaporação anuais. À guisa de simplificação substituiu-se posteriormente a componente da evaporação pela da temperatura. Um exemplo disso é o denominado **Lang Rain Factor (LRF)**. Esse índice corresponde à relação entre a precipitação e a temperatura médias anuais. Um outro índice, conhecido por **Martonne Index of Aridity (MIA)**, nada mais é do que uma pequena alteração do anterior, dado pela equação a seguir: $MIA = N / (T + 10)$. A posteriori, percebeu-se que a evapotranspiração, ao invés da evaporação, era um parâmetro decisivo na classificação do clima de uma região. Um índice por demais conhecido, que já leva em consideração a evapotranspiração é o denominado **Aridity Index (AI)** ou índice de aridez, formulado por Thornthwaite (1948), isto é, uma medida do déficit de água como porcentagem da evapotranspiração potencial anual. Conforme o desvio em relação à condição normal, pode-se enquadrar o AI em diversas classes.

3.1.1 Rainfall Anomaly Index (RAI)

Um primeiro índice, contudo, que pudesse ser incorporado a um sistema de monitoramento é o chamado **Rainfall Anomaly Index (RAI)**, descrito por Rooy (1965) visando tornar o desvio da precipitação em relação à condição normal de diversas regiões passíveis de comparação.

A figura 7 apresenta, a título de exemplificação, a aplicação desse índice a 185 postos pluviométricos do Estado do Piauí. É fácil reconhecer o ano de 1974 como um ano úmido e ano de 1993 como um ano tipicamente seco, para praticamente todos os postos analisados.

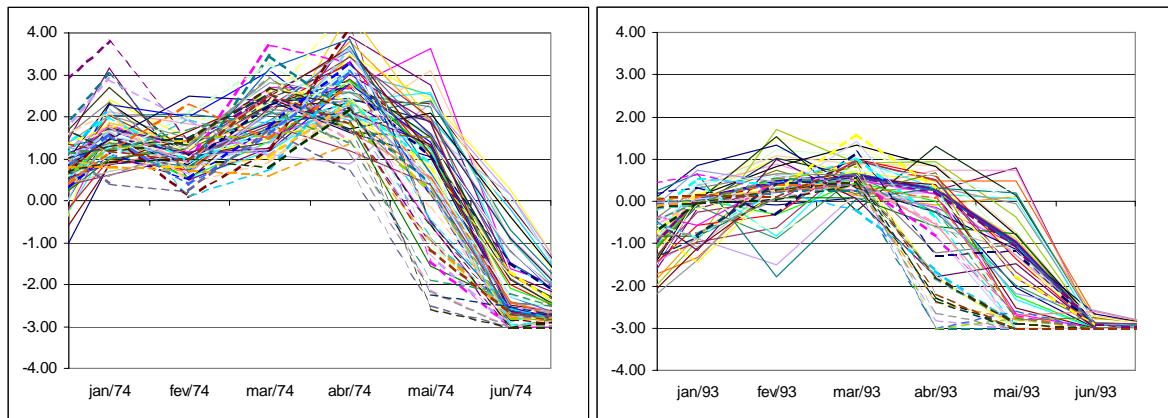


Figura 7: Rainfall Anomaly Index (RAI) aplicado a 185 postos pluviométricos do Estado do Piauí, para o ano úmido de 1974 e para o ano seco de 1993.

3.1.2 Bhalme & Mooley Drought Index (BMDI)

Palmer (1965) apresentou um procedimento de balanço de água, que ficou depois conhecido como **Palmer Drought Severity Index (PDSI)**, para a região semi-árida do oeste do Estado do Kansas e para a região sub-úmida de Iowa, nos Estados Unidos. O PDSI é calculado tendo como base os dados de evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial eventual etc. e expressa uma medida para a diferença acumulada entre a precipitação normal e a precipitação necessária à evapotranspiração. Essa análise é feita em nível semanal ou mensal. Resulta desse procedimento um índice que varia de -4 (secas extremas), passando por zero (condições normais) a +4 (períodos muito úmidos). Esse índice é não apenas uma função da diferença acumulada entre as condições atuais e a denominada evapotranspiração CAFEC (Climatically Appropriate For Existing Conditions), como também de outros componentes do balanço hídrico. A evaporação é estimada pelo método de Thornthwaite (1948). Vazão, infiltração e nível do lençol freático são estimados por meio de um modelo de balanço da água no solo (McMahon, 1993). Mapas dos Estados Unidos contendo os valores desse índice são publicados semanalmente no 'Weekly Weather and Crop Bulletin'.

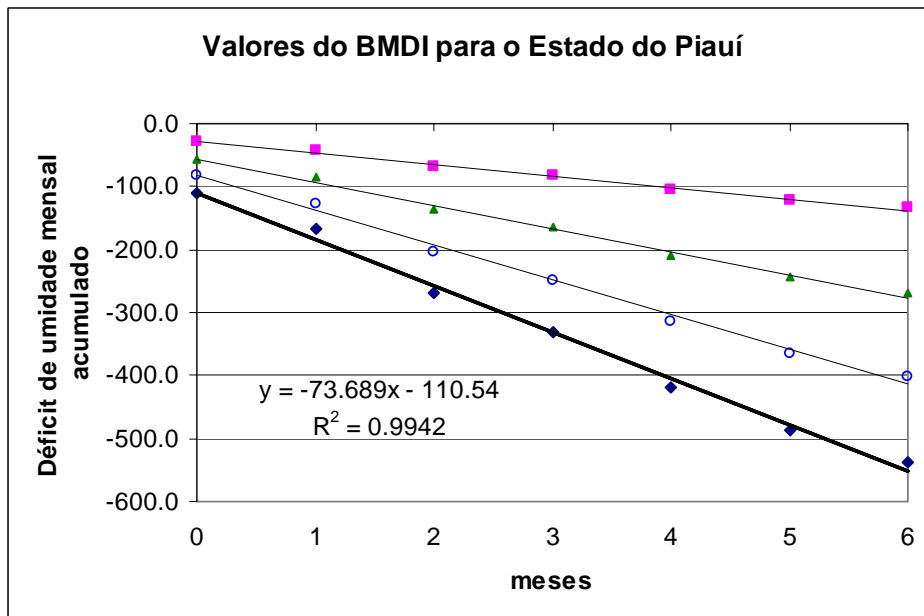


Figura 8: Bhalme & Mooley Drought Index (BMDI) aplicado a 185 postos pluviométricos do Estado do Piauí.

Diversos autores (Havens, 1969; Steila, 1971; Alley, 1985; Guttman, 1991) demonstraram que o PDSI não era um bom indicador das condições de umidade, particularmente, nos períodos secos. Uma outra desvantagem do PDSI é que a regularização da vazão superficial não é considerada. Em um estudo nas regiões tropicais da Índia, Bhalme & Mooley (1979, 1980) também evidenciaram esses mesmos problemas. Eles, então, propuseram uma modificação do índice original, de modo a incorporar as condições climáticas vigentes na Índia. Tal índice ficou conhecido por **Bhalme & Mooley Drought Index (BMDI)**. A figura 8 traz a aplicação desse índice para o Estado do Piauí.

Devido ao fato de esse índice apresentar tanto valores positivos quanto negativos ele pode ser utilizado na avaliação de períodos de secas e de cheias. O valor atual, mensal, acumulado do BMDI durante o período de crescimento das culturas ou do período chuvoso (janeiro a junho) pode ser, então, comparado com os valores históricos da região, de modo a se ter um controle permanente da condição de umidade.

3.1.3 Lamb Rainfall Departure Index (LRDI):

O cálculo desse índice (Lamb et al., 1986) consiste de um procedimento de normalização, através do qual os desvios médios da precipitação de diversos postos de uma dada região são agrupados na determinação de um índice único, dado por:

$$LRDI = \frac{1}{t_j} \cdot \sum_{i=1}^{t_j} \frac{N_{i,j} - \bar{N}_i}{S_i} \quad (1)$$

$N_{i,j}$ = precipitação no ano j do posto i;

\bar{N}_i = precipitação média anual do posto i;

S_i = desvio padrão da precipitação anual do posto i;

t_j = número de postos com precipitação no ano j.

Uma vantagem capital desse método é que todas as séries de precipitação, as quais normalmente apresentam muitas falhas, podem ser assim mesmas usadas na determinação de um índice regional. A figura 2 apresenta o resultado da precipitação dessa metodologia a 185 postos pluviométricos analisados, no Estado do Piauí.

4. A OPERAÇÃO DO RESERVATÓRIO DE BOA ESPERANÇA NA BACIA DO RIO PARNAÍBA

O mais importante reservatório da Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba, para fins de produção energética, é sem dúvida o Reservatório de Boa Esperança. Para a simulação da operação do reservatório foi empregado o modelo de rede de fluxo AcquaNet, desenvolvido pelo LabSid, da Universidade de São Paulo. O referido modelo foi desenvolvido a partir do MODSIM (Labadie, 1988), da Universidade do Colorado, nos Estados Unidos. A figura 9 mostra os valores dos volumes armazenados no reservatório de Boa Esperança para o período simulado de 1931 a 1998.

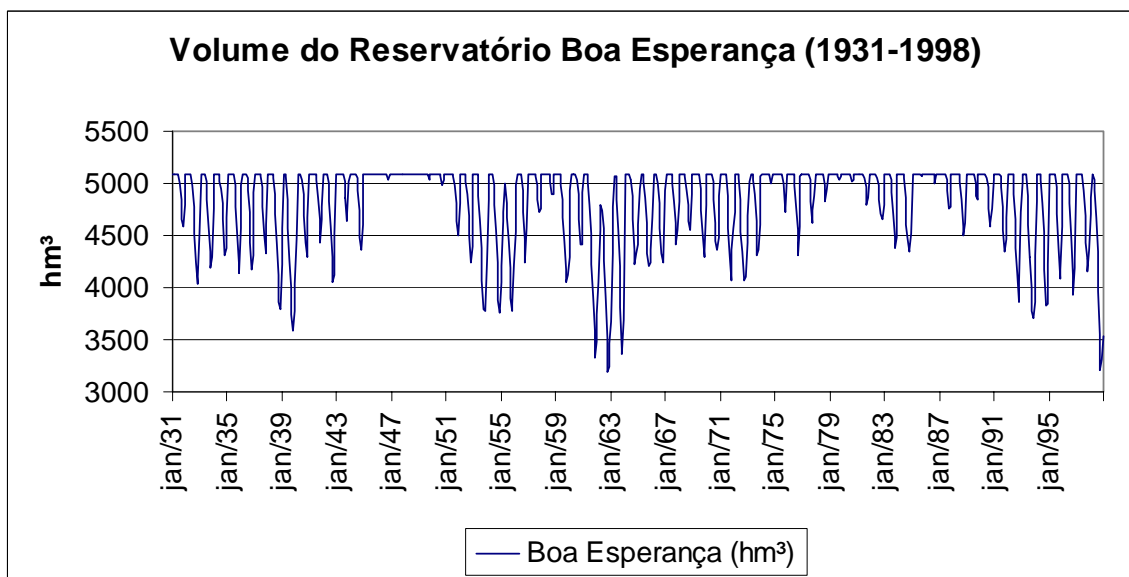


Figura 9: Volume do Reservatório de Boa Esperança para o período simulado de 1931 a 1998.

A figura 10 apresenta as vazões naturais afluentes ao reservatório de Boa Esperança para o período de 1931 a 1998 (SIPOT, 2003). A vazão média mensal é de 445 m³/s. É fácil verificar os anos secos e úmidos na série de vazão.

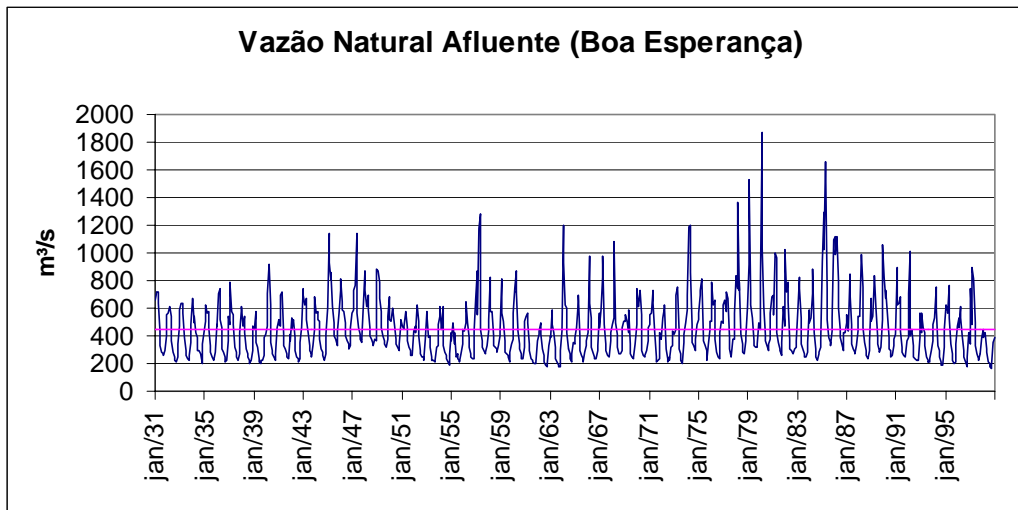


Figura 10: Vazão natural afluyente ao reservatório de Boa Esperança para o período de 1931 a 1998.

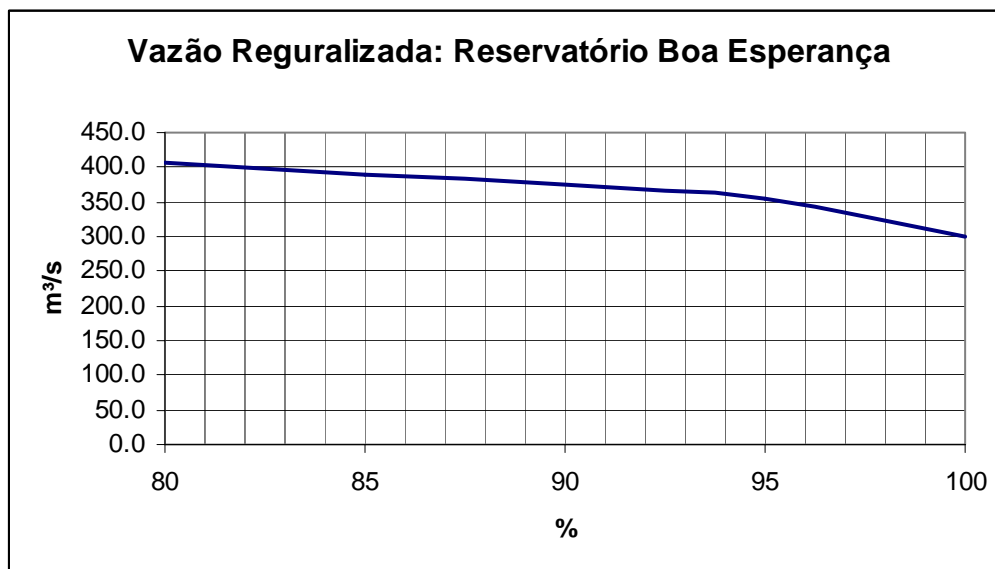


Figura 11: Vazão regularizada pelo reservatório de Boa Esperança para diversos níveis de garantia.

Na simulação da operação do reservatório, o processo foi iniciado considerando como volume inicial a capacidade máxima da barragem. Foram, então, feitas várias simulações para definição de volumes regularizados, associados às diversas garantias ou riscos. O resultado dessa simulação encontra-se na figura 11. A representação esquemática de parte da bacia hidrográfica do rio Parnaíba, na qual está inserida a Barragem de Boa Esperança, usando o modelo AcquaNet, encontra-se na figura 12.

Além da Barragem de Boa Esperança a alternativa de divisão de queda considerada como a mais atrativa na fase dos Estudos Finais de Inventário para a Bacia do Rio Parnaíba é composta por 8 aproveitamentos, sendo 7 no curso do rio Parnaíba e um no curso do rio Balsas (CHESF, 2003). São eles o aproveitamento Taquara (43MW), Canto do Rio (65MW), Ribeiro Gonçalves (174MW), Taboa (98MW), Uruçuí (164MW), Cachoeira (93MW), Estreito (86MW) e Castelhana (94MW).

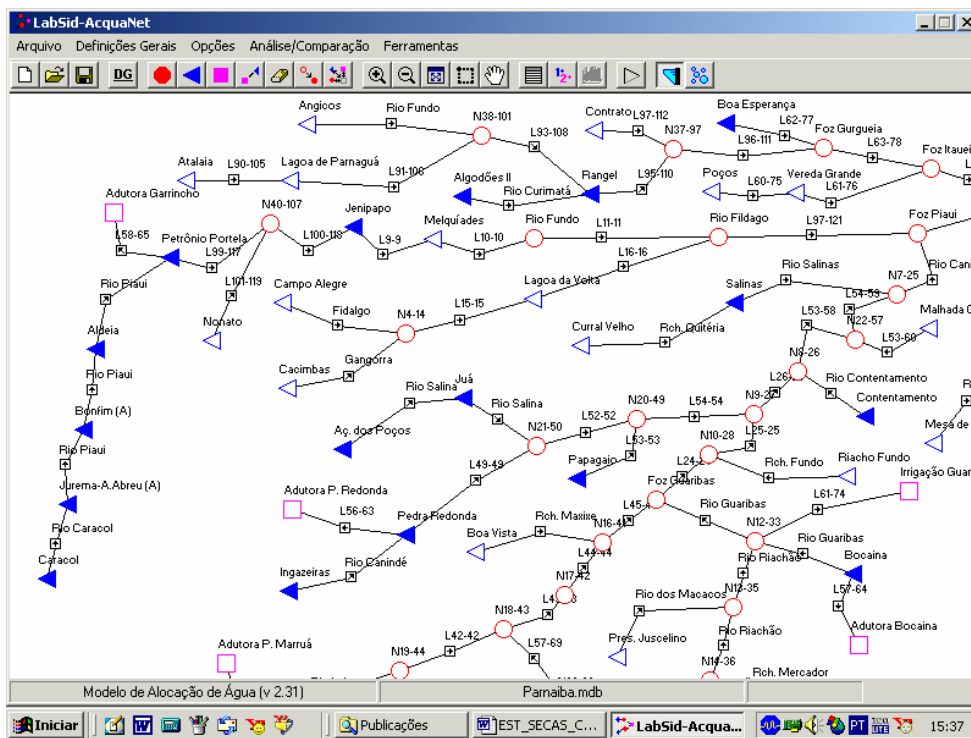


Figura 12: Representação esquemática de parte da Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba usando o Modelo AcquaNet.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os modelos propostos oferecem uma perspectiva prática de previsão da precipitação entre 6 e 3 meses de antecedência do período chuvoso. O uso dos métodos descritos acima para a previsão de secas, bem como dos diversos índices de seca, aliados aos modelos de geração de vazões (Freitas, 1995), abrem uma nova perspectiva na gestão e otimização de sistemas de recursos hídricos em regiões semi-áridas, como o Nordeste do Brasil.

Objetivou-se com a análise de correlação verificar o grau de relação existente entre o fenômeno do El Niño e a incidência de secas no Nordeste do Brasil. Na análise de correlação os dados foram inicialmente agrupados de diversas formas, por exemplo, em médias de 3 (três) e 6 (seis) meses e posteriormente correlacionados com os índices do ENSO, isto é, com o El Niño (SSTs) e com a Southern Oscillation (DTs).

Secas extremas no Nordeste do Brasil, particularmente nos Estados do Piauí e do Ceará, ocorrem freqüentemente, quando da existência do fenômeno conhecido como ENSO. As teleconecções entre os índices do ENSO (Pacífico) e a precipitação interanual nesses estados podem ser utilizadas em modelos de previsão de secas, com base em tabelas de probabilidades condicionadas e redes neurais. Essas previsões, uma vez incorporadas aos modelos chuva-vazão e aos modelos de geração de vazão podem contribuir para o gerenciamento e a otimização da operação de reservatórios no Nordeste do Brasil.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEY, W.M., 1984: The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 1100-1109.
- ALLEY, W.M., 1985: The Palmer Drought Severity Index as a Measure of Hydrologic Drought, *Water Resources Bulletin*, 21(1), 105-114.
- BARNETT, T.P. et al., 1994: Forecasting global ENSO-related climate anomalies, *Tellus*, 46A, 351-366.
- BHALME, H.N., D.A. MOOLEY, 1979: On the Performance of Modified Palmer Index, *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology, Ser. B*, 27, 281-295.
- BHALME, H.N., D.A. MOOLEY, 1980: Large-Scale Drought/Floods and Monsoon Circulation, *Monthly Weather Review*, 108, 1197-1211.
- BRYANT, E., 1991: *Natural Hazards*, Cambridge University Press, 294 pag.
- CHEN, D., S. E. ZEBIAK, A. J. BUSALACCHI, M.A. CANE, 1995: An Improved Procedure for El Niño Forecasting: Implications for Predictability, *Science*, vol. 269, 1699-1702.

- CHESF, 2003: Estudos de Inventário Hidrelétrico da Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba, Relatório Final.
- FREITAS, M.A.S., 1996a: Aspectos a Serem Considerados Quando de uma Análise Regional Integrada de Secas, Revista Tecnologia - UNIFOR, vol. 17, 9-17.
- FREITAS, M.A.S., 1996b: Previsão de Secas por Meio de Métodos Estatísticos e Redes Neurais e Análise de Suas Características Através de Diversos Índices (Ceará - Nordeste do Brasil), IX Congresso Brasileiro de Meteorologia, Campos do Jordão, 6 a 13 de novembro de 1996.
- FREITAS, M.A.S., 1997a: Regionale Dürreanalyse anhand statistischer Methoden und Neuro-Fuzzy-Systemen mit Anwendung für Nordost-Brasilien, Doctoral Dissertation, University Hannover, Germany.
- FREITAS, M. A.S., 1997b: Análise Estatística da Relação entre o Fenômeno do El-Niño e a Seca no Estado do Ceará, III Encontro de Iniciação à Pesquisa, de 15 a 17 de setembro de 1997, Resumos, Universidade de Fortaleza - UNIFOR.
- FREITAS, M.A.S. & M.H.A. BILLIB, 1997: Drought Prediction and Characteristic Analysis in Semi-Arid Ceará / Northeast Brazil, Symposium "Sustainability of Water Resources Under Increasing Uncertainty", IAHS Publ. No. 240, 105-112, Rabat, Marrocos.
- GHOSE, S.K., 1971: Hyrometeorological Studies in Northeastern Brazil, Report No 2, SUDENE/DEMET/WMO.
- GUTTMAN, N.B., 1991: A Sensitivity Analysis of the Palmer Hydrologic Drought Index, Water Resources Bulletin, 27(5), 797-807.
- HAVENS, A. V., 1969: Economic Impact of Drought on Water Systems in Passaic River Basin, n. J., New Brunswick, New Jersey Agricultural Experiment Station.
- KOSKO, 1992 KOSKO, B., 1992: Neural Networks and Fuzzy Systems, A Dynamical Systems Approach To Machine Intelligence, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., USA.
- LABADIE, J. W. - Program Modsim: River Basin Network Flow Model For The Microcomputer, Department of Civil Engineering, Colorado State University, 1988.
- LAMB, P.J., R.A. PEPPLER & S. HASTENRATH, 1986: Interannual Variability in the Atlantic, Nature, 322, 238-240.
- LI, K., A. MAKARAU, 1994: Drought and Desertification, Reports to the Eleventh Session of the Commission for Climatology, WCASP-28, WMO.
- McMAHON, T.A., 1993: Hydrologic Design for Water Use. In: Handbook of Hydrology, D. R. Maidment (ed.), McGraw-Hill, Inc.
- PALMER, W.C., 1965: Meteorological Drought, Weather Bureau, U.S. Department of Commerce, Washigton, D.C., Research Paper nº 45, 1-58.
- RASMUSSEN, E.M., T.H. CARPENTER, 1983: The Relationship between Eastern Equatorial Pacific Sea Surface Temperatures and Rainfall over India and Sri Lanka, Mon. Wea. Rev., 111, 517-528.
- ROPELEWSKI, C.F., M.S. HALPERT, 1987: Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño / Southern Oscillation, Monthly Weather Review, 115, 1606-1626.
- ROOY, M.P. van, 1965: A Rainfall Anomaly Index Independent of Time and Space, Notas, 14, 43.
- SIPOT, 2003 – Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro, Versão 4.0, ELETROBRÁS.
- STEILA, D., 1971: Drought Analysis in Four Southern States by a New Index, PhD Diss., Athens, Ga., The University of Georgia.
- THORNTHWAITE, C.W., 1948: An Approach towards a Rational Classification of Climate, Geogr. Ver., 38, 55-94.
- TRANSEAU, E.N., 1905: Forest Center of Eastern America, Amer. Naturalist, 39, 875-889.
- WALKER, G.T., 1928: Ceará (Brazil) Famines and the General Air Movement, Beiträge zur Physik der Atmosphäre, 14, 88-93.
- WRIGHT, P.B., 1989: Homogenized Long-Period Southern Oscillations Indices, Int. Journal of Climatology, 9, 33-54.