

GERAÇÃO DE VAZÕES DIÁRIAS II: PRESERVAÇÃO DA FORMA DOS HIDROGRAMAS EM GRANDES BACIAS

Fabricio Muller¹ & Eloy Kaviski²

RESUMO --- O artigo compara os resultados de alguns modelos de geração de vazões diárias na estação fluviométrica Seringal Fortaleza, no Rio Purus, que tem 1.580.166 km² de área de drenagem. Pelo fato de o fluviograma da estação não apresentar "pulsos" (ou seja, ascensões rápidas seguidas de recessões lentas, como normalmente ocorre em estações com áreas de drenagem menores), modelos baseados em "pulsos", como o *shot noise* (Weiss, 1977), não apresentaram bons resultados, enquanto que o modelo de Quimpo, baseado em séries auto-regressivas do tipo AR(1) e AR(2), saiu-se bem em termos de formato do hidrograma.

ABSTRACT --- The article compares the results of some daily outflows generation models in Seringal Fortaleza gauging site, at Rio Purus, with 1.580.166 km² drainage area. Because of the fact of the hydrographs there don't present "pulses" (fast ascensions followed by slow recessions, as normally occurs in stations with lesser areas of draining), models based on "pulses" as the *shot noise* model (Weiss, 1977) had not presented good results, whereas the Quimpo model, based on AR(1) and AR(2) auto-regressive type series, showed much better results in terms of form of the hydrograph.

Palavras-chave: séries temporais, geração de vazões diárias, grandes bacias.

1) Engenheiro civil e diretor da Tramo Sociedade Civil-Estruturas. Curitiba/PR. e-mail: fabricio_muller@yahoo.com

2) Professor do Departamento de Hidráulica e Saneamento da UFPR. e-mail: eloy.dhs@ufpr.br

1 - INTRODUÇÃO

Segundo Lawrence e Kottegoda (1977, *apud* Laio *et al.*, 2004), quando o tempo de agregação dos dados de vazão (por exemplo, a duração de um dia em séries diárias) tem ordem de grandeza semelhante ao tempo de concentração da bacia - caso, por exemplo, de vazões diárias em bacias de médio porte - a série temporal tem uma estrutura que lembra um processo estocástico de pulsos: a ocorrência intermitente de chuvas produz saltos que são seguidos de curvas de recessão. Esta série é irreversível e seu comportamento pode ser bem descrito por processos *shot noise* (Weiss, 1977) ou por modelos não-paramétricos como o Diana (Kelman *et al.*, 1983) ou o de Yakowitz (1979). Este autor gerou séries de vazão através dos modelos citados, com bons resultados, para a estação fluviográfica de Rio dos Patos, no Estado do Paraná (Müller, 1997; Müller, 1998; Müller & Kaviski, 2007), que tem 1.080 km².

Este comportamento de "pulsos" em séries diárias de vazão não costuma se verificar em bacias de grande porte, o que indica que outros tipos de modelos seriam mais adequados para a preservação da forma de hidrogramas neste tipo de bacia.

Tendo isto em vista, este artigo compara os resultados de alguns modelos, existentes na literatura de geração de vazões diárias, na estação fluviométrica Seringal Fortaleza, que tem 1.580.166 km² de área. Para verificar o comportamento de cada modelo, são utilizados modelos baseados, ou não, em "pulsos".

2 – DESCRIÇÃO DOS MODELOS

Todos os modelos utilizados neste trabalho estão descritos em detalhe em Müller (1997), e os modelos Diana e Yakowitz também estão detalhados em artigo paralelo a este (Müller & Kaviski, 2007). A descrição abaixo apenas apresenta algumas das características de cada um deles.

2.1 – Modelo de Quimpo (1968)

O modelo estocástico proposto por Quimpo (1968) é uma adaptação de modelos auto-regressivos, de ordens 1, 2 e 3 para o caso de modelagem diária. Como os modelos auto-regressivos geram séries com média nula e desvio-padrão unitário, que depois serão multiplicadas pelos desvios padrão e somadas às médias de longo período, isto tornou inviável a pura e simples aplicação de modelos auto-regressivos para o caso diário, tendo em vista a enorme variabilidade das médias e desvios padrão para cada dia do ano neste caso. Para sanar este problema, Quimpo ajustou uma função suave e verossímil, tanto para a média quanto para o desvio-padrão. Estas funções são as

médias e desvios-padrão periódicos (ou harmônicos) obtidos por séries de Fourier para séries diárias (Quimpo, 1968). Para bacias de médio porte, este modelo costuma apresentar os seguintes inconvenientes: a ascensão da hidrógrafa não apresenta uma ascensão abrupta comparada com recessão suave, como normalmente ocorre na série histórica; e não consegue reproduzir a alta assimetria e curtose das distribuições empíricas (Tao, 1973, *apud* Kelman, 1987).

2.2 – Modelos *shot noise*

Os modelos *shot noise* (Weiss, 1977) se compõem de uma série de eventos, obedecendo a uma lei de Poisson, cada um produzindo um pulso de altura aleatória, superposto a uma equação exponencial ajustada às recessões. Isto constitui um processo regressivo de primeira ordem contínuo no tempo, com distribuição gama dos valores instantâneos. O modelo pode ser ajustado aos dados disponíveis de tal modo a preservar a média, o desvio-padrão e as correlações seriais da série histórica. Weiss (1977) ainda criou os modelos de segunda ordem, onde o escoamento era dividido em duas parcelas: escoamentos de base e de superfície. Estes modelos têm a vantagem de gerar vazões diárias com a utilização de um número mínimo de parâmetros.

2.3 – Modelo de Sargent (1979)

Os métodos baseados na transição de probabilidades seco-chuvoso foram iniciados pelo modelo de simulação devido a Treiber e Plate (*apud* Sargent, 1979). Este modelo gera inicialmente vazões para os dias onde devam ou não ocorrer pulsos, ou seja, dias chuvosos ou não. Para cada dia chuvoso, um pulso é gerado utilizando uma distribuição exponencial modificada. O pulso é então adaptado a uma função de transferência para obter a seqüência de vazões para os dias onde não ocorrem pulsos. Esta função de transferência é calculada ajustando-se uma função polinomial às recessões, identificada na série histórica, pelo método dos mínimos quadrados. O modelo de Sargent (1979) utiliza a mesma abordagem básica utilizada por Treiber e Plate, mas utiliza métodos mais simples na obtenção das recessões das séries geradas.

2.4 – Modelos de Yakowitz (1979)

No modelo não-paramétrico proposto por Yakowitz (1979) a vazão num dia $j+1$ é obtida das N vazões nos dias anteriores, onde N é a ordem do modelo. Por exemplo, se a ordem do modelo for igual a dois, adota-se para o início da simulação duas vazões, q_{j-1} e q_j , aleatoriamente. A partir destas vazões o modelo de Yakowitz procura em qual "estado representativo" previamente obtido melhor se encaixa o vetor contendo as vazões q_j e q_{j-1} . A cada um destes "estados representativos"

corresponde uma função de distribuição empírica e, a partir desta, é gerada uma vazão para o dia $j+1$. De maneira similar, a partir das vazões dos dias j e $j+1$ é obtida a vazão do dia $j+2$, e assim por diante.

2.5 – Modelo Diana (Kelman *et al.*, 1983)

No modelo Diana a vazão é considerada como a soma de dois componentes:

$$Q(t) = U(t) + O(t), \text{ para } t = 1, 2, \dots \quad (1)$$

onde $U(t)$ depende de fatores externos, tais como precipitações, e $O(t)$ representa o contínuo esvaziamento da água armazenada na bacia hidrográfica. O processo $U(t)$ é obtido por métodos não-paramétricos e o processo $O(t)$, o contínuo esvaziamento da bacia hidrográfica, é igual a $Q(t-1)$ multiplicado por uma taxa de recessão.

2.6 – Modelo dos fragmentos (Svanidze, 1983)

No modelo dos fragmentos diário, inicialmente são calculados os fragmentos adimensionalizadas $q_{adm}(j,k)$, onde j é o ano e k o dia da série histórica. Estes fragmentos são obtidos através da divisão da série diária histórica de vazões $q(j,k)$ pela média anual $x(j)$ do ano em que estas vazões $q(j,k)$ ocorreram. Deste modo, para cada ano do histórico corresponderá um fragmento $q_{adm}(j,k)$, o qual é um vetor composto por 365 valores adimensionalizados tais que:

$$q_{adm}(j,k) = q(j,k) / x(j) \quad (2)$$

com j variando do ano inicial até o final do histórico, e $k = 1, \dots, 365$. Para se gerar a série $Q(j,k)$ de vazões mensais simuladas por este método, necessita-se inicialmente gerar a série $X(j)$ de vazões médias anuais, com j variando do primeiro ao último ano da geração e k variando de 1 a 365. Posteriormente, para cada vazão $X(j)$ média anual gerada, sorteia-se um ano do histórico para que se obtenha um fragmento correspondente, e então se multiplica os 365 valores $q_{adm}(j,k)$ deste fragmento pela vazão anual gerada $X(j)$, obtendo-se então os 365 valores correspondentes de $Q(j,k)$.

3 - HIDROLOGIA DA SEÇÃO ESCOLHIDA E TESTES

3.1 – Hidrologia da seção escolhida

A estação fluviométrica de Seringal Fortaleza (código: 13750000), no Rio Purus, município de Pauini, estado do Amazonas, está situado a 7,68° latitude sul, 66,93° longitude leste, e tem uma área de drenagem correspondente de 1.580.166 km². O ano hidrológico considerado para este trabalho inicia-se em setembro (mês de menor média mensal). Os dados de vazão foram obtidos no site *Hidroweb* (<http://hidroweb.ana.gov.br/>), da ANA (Agência Nacional de Águas).

O período histórico de dados utilizado neste trabalho vai de 01/09/1967 a 31/08/2005. Devido à ausência de observações na estação de maio a dezembro de 1997, optou-se por eliminar do período histórico de dados as vazões de 01/09/1996 até 31/08/1998, para que a série básica tivesse apenas anos hidrológicos completos, 36 no total. Na série assim escolhida observaram-se falhas apenas no período de 01/10/1995 a 02/11/1995. Estas falhas foram preenchidas por interpolação linear com as vazões de 30/09/1995 e 03/11/1995, método que, apesar de extremamente simplificado, é coerente com a suavidade dos hidrogramas observados no local. A média de vazões para todo o período considerado resultou em 3681 m³/s e a autocorrelação anual resultou num valor quase nulo, igual a -0,067.

A sazonalidade da estação é bastante pronunciada, com vazões mais altas nos meses de fevereiro a abril e mais baixas de agosto a outubro. A figura 1 apresenta as médias e desvios padrão mensais para os 12 meses do ano.

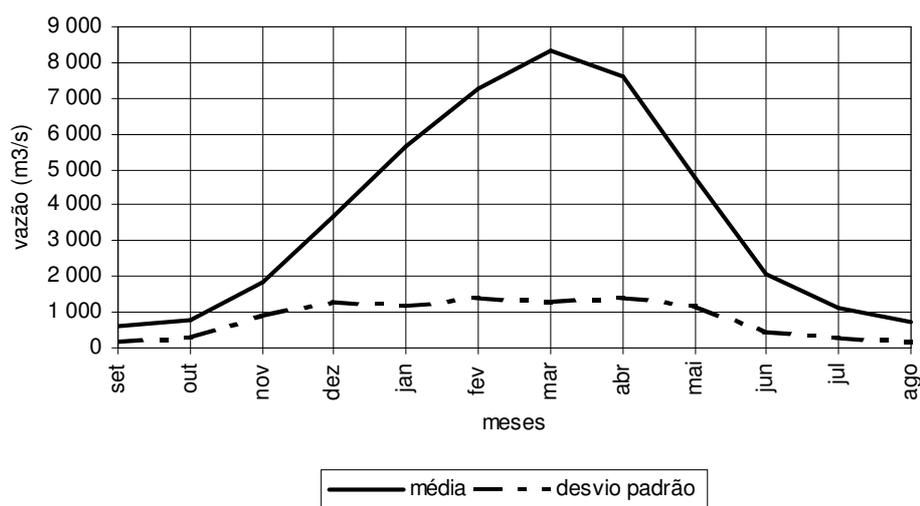


Figura 1 - Médias e desvios padrão mensais para a Seringal Fortaleza, no Rio Purus

Os hidrogramas de vazões diárias para a estação têm um formato bem característico, e refletem tanto a alta sazonalidade como a grande área de drenagem do local. A figura 2 apresenta o fluviograma de três anos de vazões do período histórico.

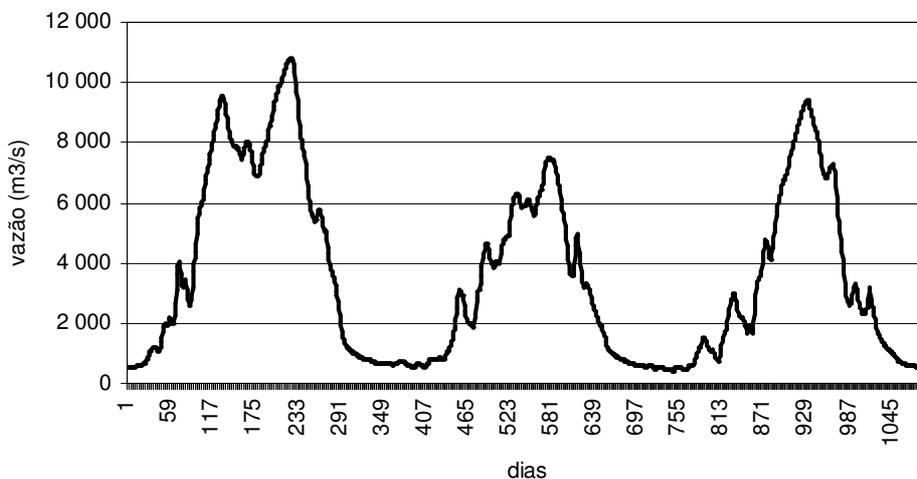


Figura 2 - Vazões diárias em Seringal Fortaleza de 01/09/1978 a 31/08/1981

3.2 – Testes comparativos

Conforme Müller (1997), alguns dos modelos utilizados neste trabalho preservam a sazonalidade local, enquanto que outros não o fazem. Para comparar os modelos em relação à sazonalidade, será empregado o método do erro absoluto médio (*EAM*), detalhado adiante.

O índice de avaliação global de O'Connel (*apud* Barbosa, 1980 e Kelman et al, 1983) consiste em calcular para a série histórica e para diversas séries sintéticas com o mesmo comprimento do histórico, estatísticas específicas ou índices. Disto resulta uma distribuição de probabilidades para os índices e a coerência entre as séries sintéticas pelo modelo e a série histórica pode ser medida pela posição do índice histórico nesta distribuição. Os índices escolhidos para a aplicação neste trabalho, 10 no total, estão apresentados no quadro 1.

Quadro 1 - Índices testados na avaliação global desenvolvida por O'Connell

| Número | Índice |
|--------|--|
| 1 | Média da vazão diária |
| 2 | Desvio-padrão da vazão diária |
| 3 | Assimetria da vazão diária |
| 4 | Curtose da vazão diária |
| 5 | Média da vazão máxima anual |
| 6 | Desvio-padrão da vazão máxima anual |
| 7 | Assimetria da vazão máxima anual |
| 8 | Curtose da vazão máxima anual |
| 9 | Vazão máxima de todo o período |
| 10 | Correlação lag 1 da vazão média diária |

Em artigo paralelo a este (Müller & Kaviski, 2007) a obtenção do índice global de O'Connell está apresentada com detalhes. De todo o modo, é importante ressaltar aqui que para este índice, quanto mais a probabilidade $P(d_j > d_{hist})$ - onde a d_j é distância ao centro da distribuição das estatísticas das vazões geradas pelos modelos e d_{hist} é o resultado equivalente para as vazões históricas - se aproximar de 0,5 e quanto menor o valor absoluto da nota Ψ , melhor o desempenho do modelo.

Serão testadas também as seguintes grandezas que dão uma idéia da preservação da forma dos hidrogramas:

1. *ascensões*: porcentagem de dias em que a hidrógrafa subiu;
2. *porcentagem acima*: porcentagem de dias em que a vazão foi maior que a média mensal;
3. *saltos*: porcentagem de dias em que $Q(i-1) < Q(i) > Q(i+1)$, onde $Q(i)$ é a vazão para um dia i .

Também neste sentido é feito o teste visual: escolhe-se ao acaso dois anos de vazões diárias geradas pelo modelo e analisa-se de maneira expedita se ele "se parece" com a série histórica apresentada na figura 1.

4 – APLICAÇÃO DOS MODELOS EM SERINGAL FORTALEZA

4.1 – Modelo de Quimpo

Assim como em Müller (1997), considerou-se suficiente aqui a simulação de vazões pelo modelo de Quimpo (1968) apenas para modelos auto-regressivos de ordem 1 e 2, que serão chamados daqui por diante de modelos QUI1 e QUI2. Em uma rápida pesquisa de harmônicos, concluiu-se que a utilização de sete harmônicos para as médias e desvios diários reproduz bem o comportamento das vazões em Seringal Fortaleza.

4.2 – Modelos *shot noise*

Para este trabalho foram geradas vazões por dois modelos *shot noise* de primeira ordem, o contínuo e o médio (chamados daqui por diante de SHT1 e SHT2).

Em outras simulações feitas pelo autor, os modelos *shot noise* de segunda ordem apresentaram grande dificuldade para simulação e não apresentaram resultados significativamente melhores (Müller, 1997), e por isto não foram utilizados neste trabalho.

4.3 – Modelo de Sargent

Assim como no artigo original de Sargent (1979), neste trabalho também os parâmetros do modelo foram calculados mês a mês. O modelo também prevê um ajuste entre as vazões diárias, mensais e anuais. Para gerar vazões anuais, utilizou-se um modelo auto-regressivo de ordem 1 (bastante coerente com a baixa autocorrelação das vazões anuais no local) e para a geração mensal utilizou-se o modelo de Mejía & Rousselle (1976). O modelo de Sargent será chamado SARG daqui por diante.

4.4 – Modelo de Yakowitz

O modelo de Yakowitz (1979), ao contrário de simulações feitas em bacias menores (Barbosa, 1981; Müller, 1997), não apresentou bons resultados para a estação de Seringal Fortaleza. Foram feitas diversas simulações variando N - a ordem do modelo -, m - o número de vetores de estados representativos - e $B(\min)$ (ver explicação destes termos no artigo paralelo Müller & Kaviski., 2007) e todas apresentaram o mesmo comportamento: as vazões geradas normalmente chegavam a valores baixos e não conseguiam mais reproduzir vazões altas. Em alguns poucos casos a vazão alta

"atraía" outras vazões altas, e as vazões não conseguiam mais atingir valores baixos. Para dar uma idéia deste comportamento, a figura 3 apresenta oito anos de vazões geradas por Yakowitz em Seringal Fortaleza. Na simulação não foi empregada a fórmula de Barbosa - que apresentou uma séria perturbação nos hidrogramas para este caso - e foram utilizados os seguintes parâmetros: $N = 3$; $B(\min) = 112$; $m = 112$.

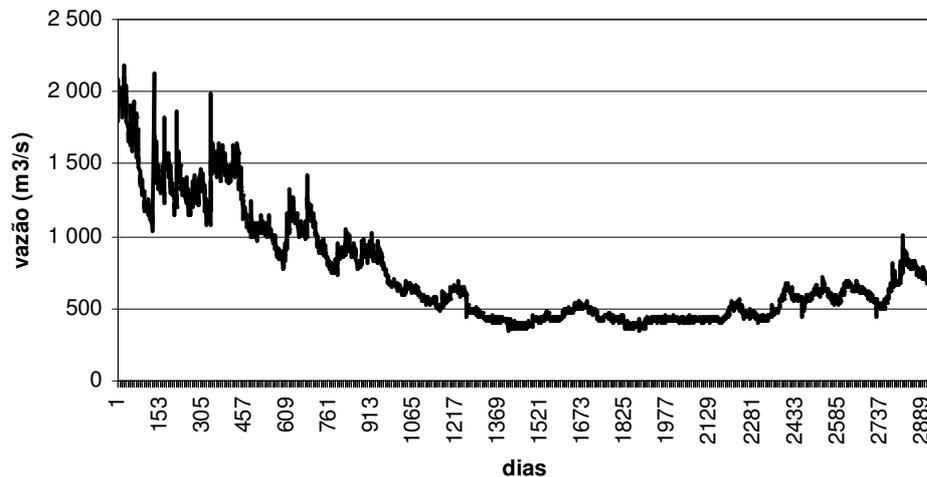


Figura 3 - Oito anos de vazões geradas em Seringal Fortaleza pelo modelo de Yakowitz

Devido a este mau comportamento, o modelo de Yakowitz não foi utilizado na seção de testes do final deste trabalho. De todo modo, pesquisas futuras podem ser feitas para descobrir o motivo deste comportamento do modelo - incluindo análises dentro da teoria do caos -, assim como a utilização futura de grupos representativos sazonais pode ser tentada para evitar este tipo de problema.

4.5 – Modelo Diana (Kelman *et al.*, 1983)

Para a aplicação do modelo em Seringal Fortaleza, foram calculadas 10 gerações de séries de vazão do tamanho do histórico para cada um dos 20 quantis de $F_{\Delta}[(\tau)]$ (o 5^o, 10^o, ... até o 100^o), correspondendo, a cada uma, um novo valor para λ (a taxa de recessão característica). O valor escolhido foi aquele que gerou séries com médias, ao mesmo tempo, próximas às do período histórico e com baixo erro médio quadrático.

O valor escolhido de λ foi aquele obtido com o 85^o quantil de $F_{\Delta}[(\tau)]$. O modelo Diana será chamado DIAN no restante do trabalho.

4.6 – Modelo dos fragmentos (Svanidze, 1983)

Para a geração da série de vazões anual foi empregado, como para o caso do modelo de Sargent (1979), um modelo auto-regressivo de ordem 1. O modelo dos fragmentos será chamado simplesmente FRAG daqui por diante.

4.7 – Geração de séries

Escolhidos os parâmetros de geração foram geradas 100 séries de vazões diárias do tamanho das do histórico para comparação entre os dois modelos.

5 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

5.1 – Análise da sazonalidade

Seja $M(i)$ o valor que assume uma grandeza mensal (média, desvio, etc.) para o mês i , gerada por um modelo de simulação diária, e $H(i)$ o valor desta mesma grandeza para o período histórico. O valor do erro absoluto médio (EAM) é então dado por:

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^{12} |M(i) - H(i)|}{12} \quad (3)$$

Foram realizadas três simulações para as grandezas $M(i)$: na primeira $M(i)$ representou a média mensal para o mês i ; na segunda o desvio-padrão mensal para o mês i ; e na última, a correlação entre os meses i e $i+1$. O quadro 2 apresenta os valores da EAM para estas três simulações, para todos os modelos simulados, por ordem crescente de valor (quanto melhor o modelo, mais alta sua posição na tabela).

Pelo quadro 2, nota-se que os modelos QUI2 e QUI1 são os que melhor reproduzem as médias e desvios sazonais, seguidos dos modelos FRAG e SARG: este resultado é pouco surpreendente, já que estes quatro modelos utilizam estatísticas sazonais em sua elaboração. A correlação mensal sazonal segue a mesma tendência, exceto pela boa e surpreendente posição obtida pelo modelo DIAN: este resultado deve-se ao fato de que este índice varia pouco durante o ano para a série histórica de Seringal Fortaleza, e o DIAN, sem sazonalidade, também apresentou uma correlação

mensal sazonal estável. A figura 4, que apresenta a série de correlações mensais sazonais para o período histórico, apresenta este comportamento.

Quadro 2 - Valores do erro absoluto médio (EAM) para a média, o desvio padrão e a correlação mensal sazonal (valores em ordem crescente)

| Média (m ³ /s) | | Desvio-Padrão (m ³ /s) | | Correlação | |
|---------------------------|--------|-----------------------------------|--------|------------|--------|
| Valor | Modelo | Valor | Modelo | Valor | Modelo |
| 19,3 | QUI2 | 40,1 | QUI2 | 0,093 | DIAN |
| 23,8 | QUI1 | 55,3 | QUI1 | 0,118 | FRAG |
| 38,1 | FRAG | 66,9 | FRAG | 0,149 | SARG |
| 291,9 | SARG | 351,2 | SARG | 0,217 | QUI2 |
| 2514,0 | SHT1 | 939,3 | DIAN | 0,284 | QUI1 |
| 2515,0 | DIAN | 1633,6 | SHT2 | 0,365 | SHT2 |
| 2532,8 | SHT2 | 2258,4 | SHT1 | 0,369 | SHT1 |

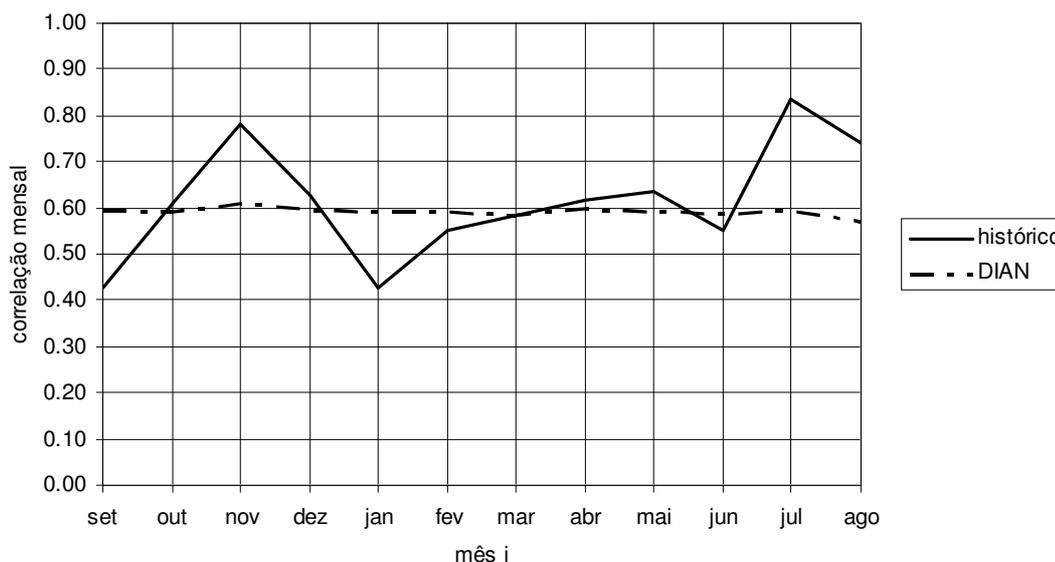


Figura 4 – Correlação mensal entre os meses i (o mês das abcissas) e $i+1$ para a estação de Seringal Fortaleza, para o período histórico e pelo modelo DIAN

5.2 – Índice de O'Connel

O quadro 3 apresenta os resultados dos parâmetros estatísticos relacionados anteriormente no quadro 1, tanto para a série histórica de vazões, quanto para os 100 períodos do tamanho do histórico gerados pelos diversos modelos de geração de séries diárias. O quadro 4 apresenta os índices já comentados, $Prob(d > dist)$ e $nota$, para todos os modelos simulados. Este quadro também

apresenta o resultado, em cada modelo e para cada uma das dez estatísticas mostradas no quadro 1, o valor de $Prob (sint>hist)$, ou seja, qual a porcentagem de vezes, nas 100 séries do tamanho do histórico geradas, em que o valor da estatística simulada resultou maior que a correspondente estatística histórica: quanto mais próximo este valor estiver de 50%, melhor o resultado do modelo.

Quadro 3 - Resultados dos parâmetros estatísticos (apresentados no Quadro 1) utilizados no teste de O'Connel

| N. | Histórico | DIAN | SARG | FRAG | QUI1 | QUI2 | SHT1 | SHT2 |
|----|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 3681 | 3680 | 3662 | 3694 | 3701 | 3681 | 3687 | 3775 |
| 2 | 3022 | 1910 | 4216 | 3062 | 3029 | 3027 | 2602 | 2171 |
| 3 | 0,607 | 0,672 | 1,828 | 0,678 | 0,602 | 0,615 | 1,034 | 0,923 |
| 4 | 2,004 | 3,186 | 6,926 | 2,223 | 2,056 | 2,074 | 3,926 | 3,750 |
| 5 | 9395 | 7665 | 19934 | 9448 | 8958 | 9773 | 4532 | 4732 |
| 6 | 1124 | 1501 | 4519 | 1544 | 1426 | 1174 | 3084 | 2579 |
| 7 | -0,219 | 0,186 | 0,048 | 0,159 | 0,030 | 0,084 | 0,827 | 0,700 |
| 8 | 2,001 | 2,810 | 2,500 | 2,540 | 2,720 | 2,589 | 3,171 | 3,021 |
| 9 | 11259 | 11113 | 29542 | 12894 | 12057 | 12344 | 12506 | 11262 |
| 10 | 0,999 | 0,997 | 0,948 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 |

Quadro 4 - Resultados do índice de O'Connel (apresentados no Quadro 1)

| N. | | DIAN | SARG | FRAG | QUI1 | QUI2 | SHT1 | SHT2 |
|----|--------------------|--------|-------|------|------|------|------|------|
| 1 | Prob (sint>hist) = | 45% | 37% | 56% | 53% | 54% | 52% | 56% |
| 2 | Prob (sint>hist) = | 0% | 100% | 65% | 55% | 54% | 29% | 12% |
| 3 | Prob (sint>hist) = | 67% | 100% | 92% | 43% | 60% | 77% | 76% |
| 4 | Prob (sint>hist) = | 100% | 100% | 98% | 61% | 77% | 96% | 99% |
| 5 | Prob (sint>hist) = | 0% | 100% | 63% | 7% | 98% | 0% | 0% |
| 6 | Prob (sint>hist) = | 97% | 100% | 99% | 94% | 66% | 98% | 98% |
| 7 | Prob (sint>hist) = | 86% | 85% | 92% | 76% | 86% | 99% | 96% |
| 8 | Prob (sint>hist) = | 91% | 85% | 89% | 93% | 86% | 81% | 84% |
| 9 | Prob (sint>hist) = | 36% | 100% | 100% | 88% | 100% | 56% | 45% |
| 10 | Prob (sint>hist) = | 0% | 0% | 1% | 0% | 0% | 9% | 4% |
| | Prob (d>dhist) = | 100% | 0% | 23% | 2% | 3% | 0% | 0% |
| | Nota = | -131,7 | 101,3 | 0,6 | 2,3 | 2,9 | 13,7 | 11,2 |

Uma análise dos quadros 3 e 4 permite as seguintes conclusões:

- as melhores notas foram, na ordem, dos modelos FRAG, QUI1 e QUI2;
- o modelo que resultou em $Prob (d>dhist)$ mais próximo de 50% foi o modelo FRAG;
- todos os modelos reproduziram bem as vazões médias (índice n. 1) de longo período;
- os melhores modelos para o desvio padrão, a assimetria e a curtose das vazões diárias (índices n. 2 a 4) foram os modelos QUI1 e QUI2, seguidos pelo modelo FRAG;
- o modelo FRAG, QUI1 e, principalmente, QUI2, foram os que melhor se comportaram nas estatísticas média das máximas anuais e desvio padrão das máximas anuais (índices n. 5 e 6); para

estas duas grandezas, os modelos SHT1 e SHT2 apresentaram médias muito baixas e desvios muito altos;

- o resultado de todos os modelos não conseguiu reproduzir a assimetria das vazões máximas anuais (índice n. 7), e resultaram em curtose das máximas anuais (índice n.8) maiores que a do histórico;

- de modo geral, as vazões máximas de todo o período (índice n. 9) e a correlação lag 1 (índice n. 10) ficaram próximas das do histórico, com exceção do resultado do modelo SARG;

- o modelo SARG não teve bons resultados em nenhum dos índices, à exceção da média de longo período (índice n. 1).

5.3 – Índices que levam em conta a forma da hidrograma

Para análise dos índices que levam em conta a forma do hidrograma, foi calculado inicialmente o valor do erro absoluto médio (*EAM*) sazonal. Deste modo, foram feitas novas aplicações da fórmula (3): na primeira, $M(i)$ representou a grandeza *ascensões* o mês i ; na segunda, $M(i)$ é a grandeza *porcentagem acima* para o mês i ; e na terceira, $M(i)$ representa a grandeza *saltos* para o mês i . O quadro 5 apresenta os valores da *EAM* para estas três simulações, para todos os modelos simulados, por ordem crescente de valor (quanto melhor o modelo, mais alta sua posição na tabela).

Quadro 5 - Valores do erro absoluto médio (EAM) para as grandezas que levam em conta a forma do hidrograma (valores em ordem crescente)

| Ascensões (%) | | Porcentagem Acima (%) | | Saltos (%) | |
|---------------|--------|-----------------------|--------|------------|--------|
| Valor | Modelo | Valor | Modelo | Valor | Modelo |
| 0,367 | FRAG | 3,242 | FRAG | 0,160 | FRAG |
| 7,277 | QUI2 | 3,922 | QUI2 | 3,720 | SARG |
| 7,402 | QUI1 | 3,931 | QUI1 | 4,035 | SHT2 |
| 9,078 | SARG | 5,904 | DIAN | 4,039 | DIAN |
| 21,739 | DIAN | 6,997 | SHT2 | 4,202 | SHT1 |
| 41,871 | SHT2 | 7,370 | SARG | 4,492 | QUI2 |
| 42,038 | SHT1 | 8,528 | SHT1 | 16,316 | QUI1 |

Pelo quadro 5, nota-se o modelo que melhor se comportou quanto ao formato do hidrograma é o modelo FRAG – o que não chega a ser surpreendente, já que este modelo praticamente repete as seqüências de vazões encontradas na série histórica, mas multiplicadas por um coeficiente que leva em conta as vazões anuais geradas. Os modelos QUI2 e QUI1 tiveram ótimos resultados para as grandezas *ascensões* e *porcentagem acima*, mas não reproduziram a grandeza *saltos* muito bem,

possivelmente porque as séries geradas por estes modelos são um pouco mais instáveis que as do histórico, como se verá adiante.

Os resultados dos modelos DIAN, SHT1 e SHT2 não levam em conta a sazonalidade e, por isto, previsivelmente resultaram em más colocações para o quadro 5. Para levar em conta índices relacionados com a forma do hidrograma independentemente da sazonalidade, o quadro 6 apresenta as médias totais das 100 séries geradas do tamanho do histórico para as mesmas grandezas analisadas no quadro 5.

Quadro 6 - Resultados médios para as grandezas que levam em conta a forma do hidrograma, tanto para o período histórico quanto para 100 gerações de séries do tamanho do histórico

| | Ascensões (%) | Porcentagem Acima (%) | Saltos (%) |
|-----------|---------------|-----------------------|------------|
| Histórico | 42,15 | 46,58 | 4,31 |
| DIAN | 39,02 | 44,69 | 8,35 |
| SARG | 33,07 | 42,08 | 0,59 |
| FRAG | 42,31 | 44,42 | 4,39 |
| QUI1 | 47,44 | 48,16 | 20,63 |
| QUI2 | 47,45 | 47,88 | 8,81 |
| SHT1 | 0,11 | 38,70 | 0,11 |
| SHT2 | 0,28 | 41,03 | 0,28 |

Conforme esperado, dado a análise anterior, no quadro 6 o modelo FRAG também teve os melhores resultados para as grandezas envolvendo a forma do hidrograma. O modelo DIAN, quando se retirou o fator de sazonalidade, apresentou bons resultados, ao contrário do ocorrido com a maior parte dos resultados dos modelos SHT1, SHT2 e SARG. Os resultados dos modelos QUI1 e QUI2 também apresentaram resultados próximos do histórico, a não ser para a grandeza *saltos*, que apresentaram resultados acima dos do histórico (melhor para o QUI2 do que para o QUI1).

5.4 – Teste visual

Para o teste visual, as figuras 5 a apresentam, cada uma, três anos de vazões geradas pelos modelos descritos anteriormente, com o início do ano hidrológico em setembro. Estas figuras devem ser comparadas com o hidrograma de vazões diárias de três anos de Seringal Fortaleza, apresentado na figura 3. As figuras 5 e 6 apresentam os hidrogramas para os modelos QUI1 e QUI2; a figura 7 apresenta o mesmo resultado para modelo DIAN; as figuras 8 e 9, para os modelos SHT1 e SHT2 respectivamente; a figura 10, para o modelo FRAG; e, finalmente, a figura 11 apresenta o hidrograma para o modelo SARG.

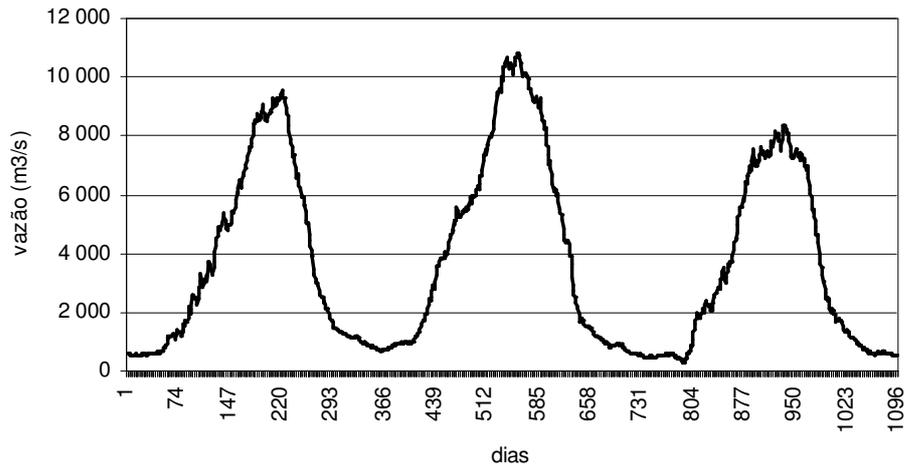


Figura 5 – Três anos de vazões diárias geradas pelo modelo QUI1

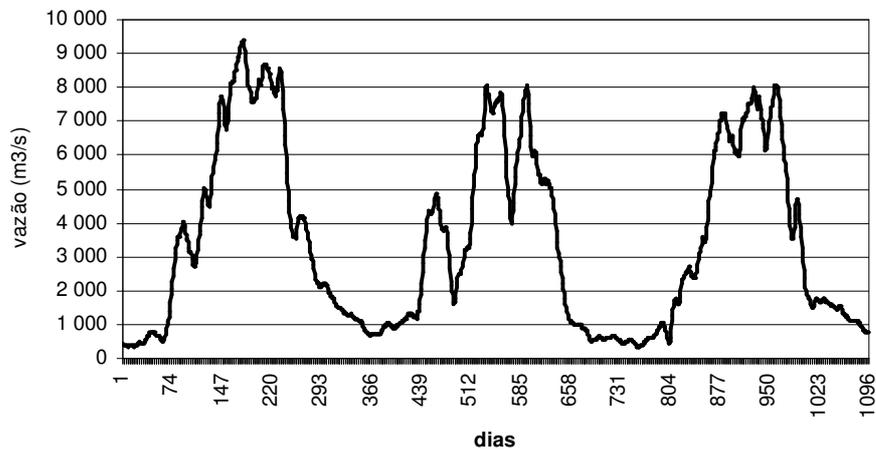


Figura 6 – Três anos de vazões diárias geradas pelo modelo QUI2

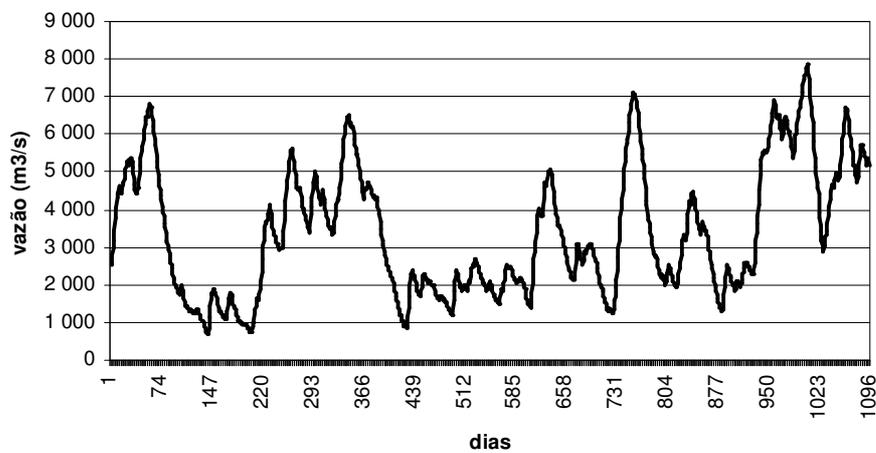


Figura 7 – Três anos de vazões diárias geradas pelo modelo DIAN

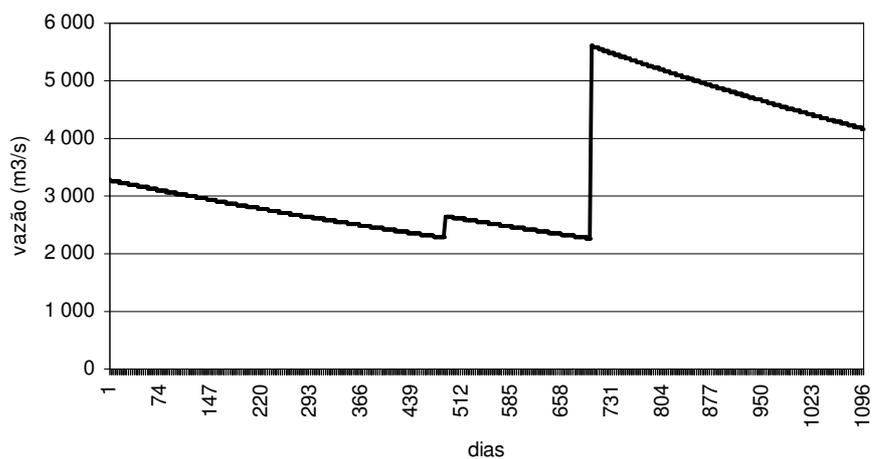


Figura 8 – Três anos de vazões diárias geradas pelo modelo SHT1

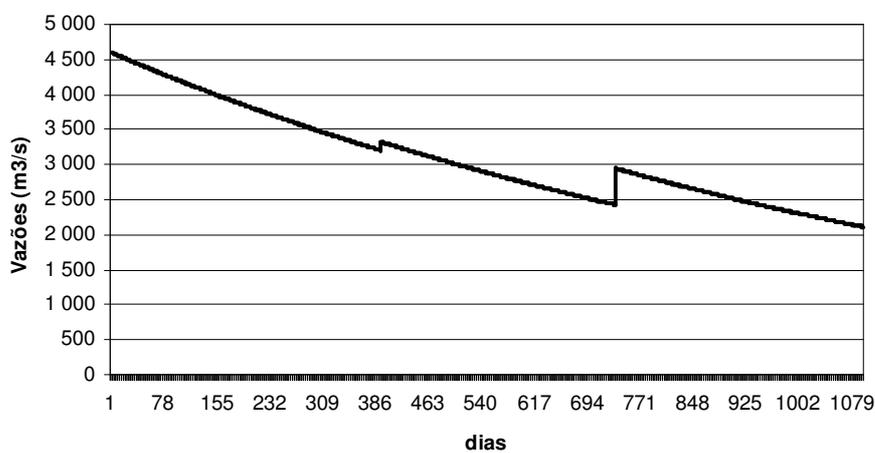


Figura 9 – Três anos de vazões diárias geradas pelo modelo SHT2

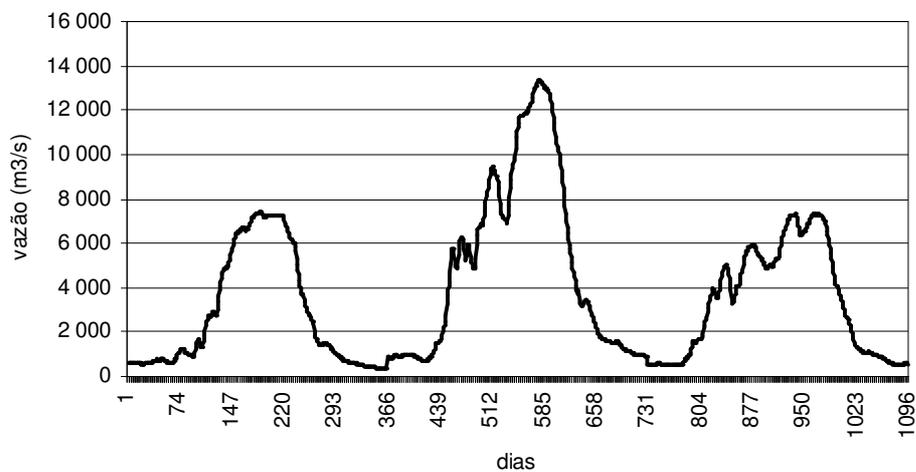


Figura 10 – Três anos de vazões diárias geradas pelo modelo FRAG

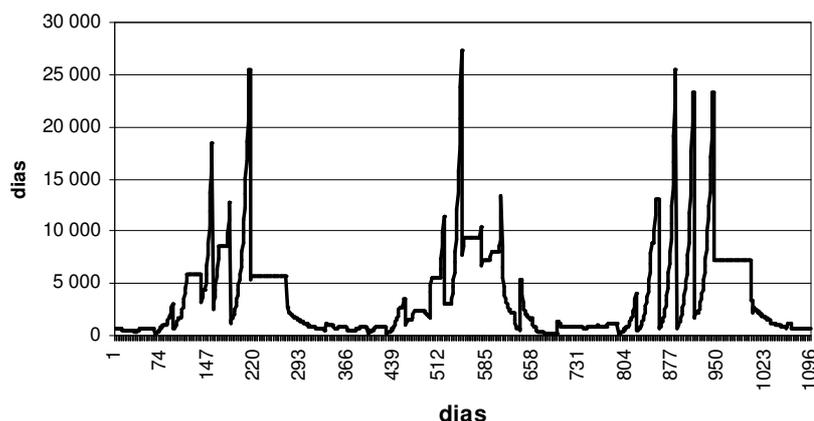


Figura 11 – Três anos de vazões diárias geradas pelo modelo SARG

As figuras 8, 9 e 11, respectivamente dos modelos SHT1, SHT2 e SARG, mostram que estes modelos geram fluviogramas significativamente diferentes daqueles do histórico. Conforme comentado anteriormente, estes modelos são baseados em "pulsos" – que representam rápidas ascensões seguidas por lentas recessões –, que acontecem normalmente em bacias de pequenas ou médias dimensões, o que não é o caso da estação de Seringal Fortaleza.

O modelo não-paramétrico DIAN (figura 7) apresenta um resultado bastante diferente daquele do histórico, mas um pouco mais parecido com este do que os fluviogramas gerados por SARG, SHT1 e SHT2, que simulam pulsos de maneira paramétrica. Além disso, os problemas encontrados no formato do fluviograma são relacionados também à falta de sazonalidade na geração de vazões, o que obviamente prejudica o desempenho do modelo em uma estação com sazonalidade muito pronunciada, como é o caso de Seringal Fortaleza.

A figura 10 mostra que o modelo FRAG reproduz muito bem o formato do fluviograma histórico, o que não surpreende dada a base teórica do modelo.

Os modelos QUI1 e QUI2, que tinham tido um mau desempenho quanto ao formato dos hidrogramas em uma estação fluviométrica com 1080 km² de drenagem (Müller, 1997; Müller, 1998), saiu-se bastante bem para uma estação com área de drenagem muito maior, como é o caso da estação estudada neste trabalho, conforme mostram as figuras 6 e 7. Este bom resultado está relacionado, entre outros motivos, ao fato de que QUI1 e QUI2 são baseados em um esquema auto-regressivo que não supõe que a série temporal tenha rápidas ascensões seguidas de lentas recessões. A vantagem destes modelos em relação ao outro que também apresentou bons resultados, o modelo FRAG, é que QUI1 e QUI2 não são baseados em um número limitado de fragmentos adimensionais do tamanho de um ano de vazões diárias e, portanto, possibilitam séries geradas com maior flexibilidade. Pode-se apontar como uma desvantagem dos modelos QUI1 e QUI2, que estes apresentaram fluviogramas um pouco mais instáveis que os do histórico - o que resultou em uma

porcentagem de *saltos* maior, inclusive. De todo modo, esta instabilidade é pouco pronunciada e em modelos auto-regressivos de ordem maior, não estudados neste trabalho, ela pode mesmo diminuir (um sinal de que isto possa vir a acontecer é que a grandeza *saltos* resultou maior - e mais distante do histórico - para QUI1 do que para QUI2).

5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De modo geral, os modelos FRAG (Svanidze, 1983), QUI1 e QUI2 (Quimpo, 1968) foram os que tiveram melhor resultado em todas as análises, envolvessem elas sazonalidade ou não. Pelo fato de o modelo FRAG utilizar um número limitado de séries adimensionais, QUI1 e QUI2 conseguem gerar séries com uma flexibilidade maior. Este resultado para o modelo de Quimpo mostra que, apesar de não reproduzirem bem os hidrogramas em estações com área de drenagem menor (Müller, 1997; Müller, 1998), modelos auto-regressivos do tipo utilizado por Quimpo – sem "pulsos", ou seja, sem ascensões rápidas seguidas de recessões lentas – podem ser uma ótima opção para gerar vazões em estações com área de drenagem grande. Trabalhos posteriores devem ser feitos aplicando o modelo de Quimpo para modelos auto-regressivos de ordem maior do que apenas o AR(1) e o AR(2), utilizados neste trabalho, para analisar, entre outras questões, se os hidrogramas ficarão mais estáveis.

Por outro lado, os modelos SARG (1979) e SHT1 e SHT2 (modelos "*shot noise*", Weiss, 1977), por se basearem explicitamente em "pulsos", não se comportaram bem na estação de Seringal Fortaleza, em que este tipo de comportamento não ocorre.

Os modelos não-paramétricos Diana (Kelman *et al.*, 1983) e Yakowitz (1979) tiveram problemas por não incluírem sazonalidade em sua elaboração, e estudos posteriores envolvendo grupos não-paramétricos sazonais podem ser feitos para tentar aprimorar o comportamento deles. Quanto ao modelo de Yakowitz, este também pode ser analisado posteriormente se teve algum tipo de comportamento caótico nesta simulação.

BIBLIOGRAFIA

BARBOSA, P. R. D. J. *Modelagem estocástica de vazões diárias*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1981. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro.

- MULLER, F. *Geração univariada de vazões diárias por métodos diretos*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica). Universidade Federal do Paraná.
- MULLER, F. "*Dois modelos de desagregação de vazões mensais em diárias*". Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.3, n.2, 1998. p.23-46.
- MULLER, F e KAVISKI, E. "*Geração de vazões diárias i: comparação entre dois modelos não-paramétricos*". Artigo enviado para publicação para o XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e 8º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. ABRH, São Paulo, Nov. 2007.
- KAVISKI, E.. *Métodos de regionalização de eventos e parâmetros hidrológicos*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica). Universidade Federal do Paraná.
- KELMAN, J., DAMÁZIO, J.M. e COSTA, J.P. "*Geração de séries sintéticas de vazões diárias - modelo Diana*". Revista Brasileira de Eng., v.1, n.2, 1983. p.5-22.
- KELMAN, J. *Controle de cheias e aproveitamentos hidrelétricos*. Rio de Janeiro: ABRH, 1987. 175p.
- LAIO, F., PORPORATO, A., RIDOLFI, L., e TAMEA, S. "*Detecting nonlinearity in time series driven by non-Gaussian noise: the case of river flows*". Nonlinear Processes in Geophysics. v.11., Oct. 2004. p.463-470.
- MEJÍA, J. M. e ROUSSELLE, J. "*Disaggregation models in hydrology revisited*". Water Resources Res., v.12, n.2, Apr. 1976. p.185-186.
- QUIMPO, R. G. *Stochastic analysis of daily river flows*. J. of Hydraulics Div., HY1, Jan. 1968. p.43-57.
- SARGENT, D. M. *A simplified model for the generation of daily streamflows*. Hydrological Sciences - Bulletin - des Sciences Hydrologiques, v.24, n.4, Dec. 1979. p.509-527.
- WEISS, G. "*Shot noise models for the generation of synthetic streamflow data*". Water Resources Res., v.13, n.1, Feb. 1977. p.101-108.
- YAKOWITZ, S. J. "*A nonparametric Markov model for daily river flow*". Water Resources Res., v.15, n.5, Oct. 1979. p.1035-1043.