

ANÁLISE DE MÉTODOS PARA GERAÇÃO DE VAZÕES SINTÉTICAS NO AGRESTE SERGIPANO

Alcigeimes B. Celeste¹; David T. Feitosa²; Elson M. Correia²

RESUMO – A necessidade de séries temporais longas para o dimensionamento e operação de sistemas de recursos hídricos impulsionou a pesquisa sobre métodos de geração de vazões sintéticas. Tais métodos devem preservar, da melhor forma possível, as propriedades estatísticas dos registros históricos nos dados gerados. Este trabalho tem por objetivo comparar a aplicabilidade do método autoregressivo de Thomas-Fiering com o modelo de desagregação conhecido como Método dos Fragmentos na obtenção de séries de vazões mensais artificiais para uma estação fluviométrica localizada na região agreste do estado de Sergipe. Os resultados indicam que ambas as metodologias conseguem reproduzir satisfatoriamente as propriedades estatísticas da série histórica nos dados sintéticos.

ABSTRACT – The need for long time series for the design and operation of water resources systems spurred research into methods of generating synthetic streamflows. Such methods must preserve, to the greatest extent possible, the statistical properties of historical records in the data generated. This study aims to compare the applicability of the autoregressive method of Thomas-Fiering with the disaggregation model known as Method of Fragments in obtaining a series of monthly flows for a gauge station located in the *agreste* region of the state of Sergipe, Brazil. The results indicate that both approaches can satisfactorily reproduce the statistical properties of the historical time series in the synthetic data.

Palavras-chave: geração de vazão, modelo Thomas-Fiering, Método dos Fragmentos, Sergipe.

¹Professor Adjunto da Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Civil, Av. Mal. Rondon S/N, 49.100-000 São Cristovão – SE, E-mail: geimes@yahoo.com

²Engenheiro Civil graduado pela Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Civil, Av. Mal. Rondon S/N, 49.100-000 São Cristovão – SE

1 – INTRODUÇÃO

O dimensionamento e operação de sistemas de recursos hídricos, tais como de reservatórios resultantes da construção de barragens, requerem preferivelmente o registro de séries longas de vazões históricas. Isto é, porém, um dos grandes problemas existentes, particularmente no Nordeste brasileiro, tendo em vista que os registros históricos disponíveis são usualmente curtos e contêm um elevado número de falhas e de inconsistências. Além disso, técnicas que se limitam a utilizar apenas os dados históricos podem ser deficientes nos procedimentos de dimensionamento e/ou operação por somente admitirem uma possibilidade da série de afluições ao reservatório. Considerando-se a série histórica como um processo estocástico, várias outras realizações ou cenários teriam probabilidades iguais de ocorrer.

A geração de cenários alternativos de afluições pode ser realizada através dos chamados modelos estocásticos de geração de vazão, os quais constroem séries sintéticas com as mesmas propriedades estatísticas da histórica, preservando, por exemplo, média, desvio padrão, autocorrelação, assimetria, curtose, etc. Essa pode ser então uma ótima alternativa a ser utilizada no dimensionamento de obras hidráulicas, qual seja, o emprego de modelos matemáticos que “aprendem” com os dados históricos e que geram séries sintéticas maiores que a registrada, mantendo, porém, as características da mesma. No caso de reservatórios, isso pode favorecer a consideração das incertezas nos processos de dimensionamento e operação.

Os modelos de geração de vazões sintéticas podem ser classificados, de forma geral, em modelos de simulação direta e modelos de desagregação (Freitas 1996). Os primeiros geram vazões simultâneas para distintos intervalos de tempo enquanto que, nos segundos, as vazões são inicialmente geradas para intervalos de tempo maiores (e.g., anos) e então desfragmentadas em intervalos de tempo menores (e.g., meses) (Salas et al. 1980). Existem diversos métodos de geração de vazões e cada um possui características distintas, assim como aplicabilidade para diferentes tipos de clima. Por isso, não se pode dizer que um método é melhor ou pior do que outro.

O modelo Thomas-Fiering (Thomas e Fiering 1962) é um exemplo clássico de modelo de geração direta do tipo autoregressivo que tem sido aplicado com sucesso em regiões úmidas e temperadas (Celeste et al. 2004).

Srikanthan e McMahon (1980) testaram vários procedimentos para a geração de vazões mensais em rios efêmeros da Austrália e concluíram que o modelo de desagregação não paramétrico conhecido como Método dos Fragmentos (MF), introduzido por Svanidze (1980), foi o que obteve melhor desempenho na reprodução das estatísticas das séries históricas. Segundo Kjeldsen (2001), vários outros trabalhos (Takeuchi et al. 1998; Basson et al. 1994; Phien e Vithana 1983; Klemesš et al. 1981) recomendaram o uso do MF para a geração sintética de vazões. No Brasil, o método foi explorado em trabalhos como os de Celeste et al. (2007), Studart (2000), Freitas (1996), Araújo e Campos (1991), Groszewicz et al. (1991) e Sarmiento (1989).

Este artigo analisa e compara a aplicabilidade do modelo Thomas-Fiering e do Método dos Fragmentos na geração estocástica de vazões mensais a partir da série histórica de deflúvios do Rio Real registrada em uma estação fluviométrica de Tobias Barreto, município no agreste do estado de Sergipe.

2 – DESCRIÇÃO DOS MODELOS

2.1 – Modelo Thomas-Fiering

O modelo Thomas-Fiering (TF) pode ser visto como um modelo não-estacionário autoregressivo de primeira ordem (AR(1)). Modelos autoregressivos de primeira ordem são normalmente usados para descrever séries estacionárias como, por exemplo, séries anuais de vazão. Uma série é dita estacionária quando as leis probabilísticas que governam o processo não se alteram no tempo. Os modelos AR refletem adequadamente o fenômeno conhecido como *persistência*, ou dependência temporal, de acordo com o qual o escoamento no período atual é dependente da descarga no período anterior. Um modelo AR de primeira ordem é dado pela seguinte expressão:

$$Z_v - \mu = \beta (Z_{v-1} - \mu) + \xi_v \quad (1)$$

onde Z_v representa o processo estocástico em questão (e.g., vazão anual); v é o índice de tempo (ano); μ é a média do processo; e ξ_v é um processo independente. O modelo AR de primeira ordem assume, dessa forma, que o valor da variável no período atual (Z_v) depende do seu valor no período anterior (Z_{v-1}). Essa dependência é medida pelo coeficiente de regressão linear β . ξ_v representa um valor randômico independente que reflete a variância dos dados em relação a reta de regressão (Celeste et al. 2007).

Qualquer série hidrológica observada em intervalos menores que um ano terá uma estrutura não-estacionária devido ao componente cíclico com período de um ano resultante do ciclo astronômico. O modelo Thomas-Fiering foi desenvolvido para permitir implicitamente a não-estacionaridade de dados sazonais. A forma geral do modelo é a seguinte:

$$Z_{v,\tau} = \mu_\tau + \frac{\rho_\tau \sigma_\tau}{\sigma_{\tau-1}} (Z_{v,\tau-1} - \mu_{\tau-1}) + \xi_{v,\tau} \sigma_\tau \sqrt{1 - \rho_\tau^2} \quad (2)$$

em que $Z_{v,\tau}$ é a vazão sazonal no ano v e estação do ano τ (mês, no caso deste trabalho); $\tau = 1, \dots, 12$ e $v = 1, \dots, n$ onde n é o número de anos de dados; μ_τ é a vazão média no mês τ ; ρ_τ é o coeficiente de correlação entre as vazões dos meses τ e $\tau - 1$; σ_τ é o desvio padrão das vazões do mês τ ; e $\xi_{v,\tau}$ é um processo aleatório independente seguindo uma distribuição normal com média zero e variância unitária. Vazões cujos dados seguem uma distribuição assimétrica podem ser aproximadas com um ruído ($\xi_{v,\tau}$) de uma distribuição assimétrica semelhante (ver seção 3.3).

2.2 – Método dos Fragmentos

O Método dos Fragmentos é um modelo de desagregação, ou seja, a vazão anual é gerada inicialmente e depois desagregada em vazões mensais segundo uma forma padronizada.

As vazões mensais observadas são padronizadas ano a ano de modo que a soma das vazões mensais em um ano seja igual à unidade. Isso é feito por meio da divisão das vazões mensais em um ano pela vazão anual correspondente:

$$f_{v,\tau} = \frac{Z_{v,\tau}}{\sum_{\tau=1}^{12} Z_{v,\tau}} \quad (3)$$

onde $Z_{v,\tau}$ é a vazão mensal histórica no mês τ do ano v e $f_{v,\tau}$ é o fragmento correspondente. Dessa forma, uma série histórica de n anos fornece n fragmentos de doze meses.

Vazões anuais obtidas de um modelo anual podem então ser desagregadas selecionando-se um dos fragmentos. Svanidze (1980) propôs inicialmente que essa seleção fosse aleatória. Este trabalho emprega, entretanto, o procedimento indicado por Srikanthan e McMahon (1980). Neste procedimento, a série anual histórica é classificada em ordem crescente de seus valores de modo a formar n classes. A primeira classe tem limite inferior igual a zero e a última classe (classe n) não tem limite superior (i.e., limite infinito). Os limites das classes intermediárias são obtidos pela média de duas vazões anuais sucessivas da série ordenada. Por exemplo, o limite superior da primeira classe é a média entre a primeira e a segunda vazão ordenada. Este valor será também o limite inferior da segunda classe que terá, por sua vez, limite superior igual à média entre a segunda e terceira vazões ordenadas.

Para cada valor de vazão anual gerado por um método anual apropriado, encontra-se a classe correspondente e geram-se as vazões mensais pela multiplicação dos fragmentos daquela classe pelo valor anual sintético. Seja $Z_v^{k,(sint)}$ a vazão anual do ano v correspondente à classe k gerada por um método anual. A vazão mensal sintética para o mês τ do ano v , $Z_{v,\tau}^{k,(sint)}$, será então calculada pela multiplicação do valor anual pelo fragmento de desagregação no mês τ associado à classe k , f_τ^k :

$$Z_{v,\tau}^{k,(sint)} = Z_v^{k,(sint)} f_\tau^k \quad (4)$$

A geração de vazões anuais pode ser feita por qualquer método clássico da literatura. Contudo, segundo Campos (1996), as vazões anuais de rios intermitentes do Nordeste brasileiro são em geral serialmente independentes e podem ser, portanto, geradas a partir de números aleatórios seguindo uma função de densidade de probabilidade do tipo Gama ou Log-Normal.

3 – APLICAÇÃO E RESULTADOS

3.1 – Estudo de Caso

Com o objetivo de verificar a eficiência dos modelos TF e MF escolheu-se a estação fluviométrica Fazenda Tourão no município de Tobias Barreto, localizado na região agreste do estado de Sergipe, dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Real (Figura 1). O posto está situado nas coordenadas geográficas $-11^\circ 11' 35''$ de latitude sul e $-37^\circ 58' 30''$ de longitude oeste e o seu código junto a Agência Nacional de Águas (ANA) é 50250000, sendo o mesmo operado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

A Bacia Hidrográfica do Rio Real (área total de 4.658,40 km²) drena águas dos estados da Bahia e Sergipe (2.372,96 km² neste estado). Este rio corta o estado sergipano no sentido oeste-leste configurando três regiões climáticas distintas, dentre as quais está a Região de Agreste, que contempla o município de Tobias Barreto, com temperatura que varia de 32 °C na máxima a 18 °C na mínima, evapotranspiração anual de 1.200 mm e pluviometria média anual de 900 mm (Governo do Estado de Sergipe 2010).

A série fluviométrica (Tabela 1) foi obtida a partir do banco de dados do Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas (HidroWeb – hidroweb.ana.gov.br). Neste trabalho,



Figura 1 – Bacias hidrográficas do estado de Sergipe e localização da estação fluviométrica Fazenda Tourão na Bacia Hidrográfica do Rio Real (Fonte: Atlas Digital sobre Recursos Hídricos do Estado de Sergipe (Governo do Estado de Sergipe 2006)).

foram utilizados apenas os dados consistidos incluindo o período de janeiro de 1978 até dezembro de 2005, formando uma série histórica de 28 anos de dados mensais.

Entre os anos de 1982 e 1984, pouquíssimos dados foram coletados e, dessa forma, esse período foi descartados das análises. Além disso, as falhas dos meses sem dados foram preenchidas com a média mensal correspondente (ver Tabela 1).

A Tabela 2 mostra as estatísticas principais da série histórica trabalhada e a Figura 2 ilustra o desenho esquemático (*boxplot*) dos seus dados.

3.2 – Ferramenta computacional utilizada

A modelagem desenvolvida neste trabalho foi conduzida com a utilização do software de computação numérica GNU Octave (www.octave.org) combinado com rotinas de domínio público. O Octave é um software livre que possui compatibilidade com o correspondente comercial MATLAB (www.mathworks.com).

3.3 – Aplicação do modelo Thomas-Fiering

A variável aleatória independente $\xi_{v,\tau}$ do modelo Thomas-Fiering (Equação (2)) tem média zero e variância unitária apenas se a distribuição das vazões mensais for normal. Através dos testes de aderência de Anderson-Darling e de Kolmogorov-Smirnov, verificou-se que os os mesmos seguiam uma distribuição assimétrica do tipo Gama. Quando os valores de vazões seguem uma distribuição de probabilidades com alguma assimetria, certas modificações precisam ser feitas no componente aleatório $\xi_{v,\tau}$ para que a assimetria verificada na amostra seja preservada nos valores sintéticos a serem gerados. No caso da distribuição Gama, $\xi_{v,\tau}$ deve ser substituído por $\tilde{\xi}_{v,\tau}$ o qual, segundo

Tabela 1 – Dados registrados (m³/s) na estação fluviométrica Fazenda Tourão (Fonte: HidroWeb). As células em cinza destacam os dados com falhas. Os números em itálico representam o preenchimento das falhas com a média do mês correspondente. Os dados do período 1982–1984 foram descartados.

Ano	Mês											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1978	0,580	4,070	4,640	2,720	<i>5,481</i>	6,090	8,280	<i>4,457</i>	0,277	0,130	0,060	0,754
1979	0,046	0,040	0,133	2,770	1,730	6,040	4,080	0,164	0,080	0,016	<i>0,855</i>	4,440
1980	3,480	<i>2,501</i>	0,465	0,028	0,027	0,546	3,920	0,108	0,028	<i>0,349</i>	<i>0,855</i>	0,297
1981	<i>0,890</i>	<i>2,501</i>	<i>1,035</i>	2,710	0,468	0,169	0,562	0,519	0,041	<i>0,349</i>	<i>0,855</i>	<i>2,570</i>
1982					2,130			1,850	2,180	0,734		
1983								0,021				
1984					1,740	2,620	1,580	0,270	1,840			
1985	0,222	2,510	0,402	25,300	23,500	24,900	27,500	15,600	1,020	0,126	0,656	1,940
1986	0,235	0,105	0,234	1,630	6,490	0,572	<i>7,503</i>	<i>4,457</i>	<i>0,815</i>	<i>0,349</i>	<i>0,855</i>	0,091
1987	0,080	0,052	0,543	0,513	0,880	0,425	6,750	0,248	0,030	0,014	0,016	0,017
1988	0,023	0,070	2,100	2,400	4,980	12,600	14,900	2,700	3,970	0,896	1,110	18,100
1989	0,505	0,297	0,667	4,290	38,200	22,600	45,600	31,000	2,330	1,560	2,070	18,500
1990	1,570	0,547	0,392	0,399	0,382	0,521	0,737	0,617	0,375	0,516	0,245	0,226
1991	0,067	0,240	4,070	0,260	0,368	3,460	3,880	1,160	0,614	0,013	1,050	0,011
1992	1,130	17,300	1,470	0,801	0,011	0,056	4,240	0,460	0,434	0,047	0,003	0,317
1993	0,016	0,008	<i>1,035</i>	<i>3,252</i>	0,015	0,024	0,023	0,063	0,016	0,098	0,995	0,256
1994	<i>0,890</i>	<i>2,501</i>	1,290	1,830	0,826	5,020	16,200	1,360	0,802	0,332	<i>0,855</i>	<i>2,570</i>
1995	0,117	0,036	<i>1,035</i>	2,620	0,176	0,163	1,760	1,380	0,239	0,016	3,580	2,480
1996	0,544	0,015	<i>1,035</i>	<i>3,252</i>	0,364	8,210	0,105	1,280	0,123	0,021	1,220	0,794
1997	6,610	1,560	<i>1,035</i>	14,100	44,100	4,180	1,430	0,742	0,020	0,010	<i>0,855</i>	<i>2,570</i>
1998	<i>0,890</i>	<i>2,501</i>	<i>1,035</i>	0,622	0,221	4,070	9,540	1,480	0,663	0,028	0,013	0,244
1999	0,006	0,055	0,015	0,032	0,261	3,110	3,890	27,800	0,379	0,710	2,820	0,576
2000	0,720	2,050	0,385	0,815	0,250	2,090	1,020	5,440	5,570	0,414	0,384	1,920
2001	0,047	<i>2,501</i>	0,049	0,085	0,058	0,136	0,535	0,728	1,150	2,240	<i>0,855</i>	0,200
2002	1,750	2,510	0,117	0,106	0,437	1,580	1,900	0,560	0,200	<i>0,349</i>	<i>0,855</i>	<i>2,570</i>
2003	<i>0,890</i>	<i>2,501</i>	<i>1,035</i>	<i>3,252</i>	<i>5,481</i>	0,683	10,200	2,360	1,070	0,059	0,178	<i>2,570</i>
2004	<i>0,890</i>	8,030	<i>1,035</i>	0,063	0,139	0,088	0,131	1,200	0,064	0,040	0,118	0,032
2005	0,057	8,030	0,619	7,460	2,190	0,828	12,900	5,540	0,064	0,035	0,014	0,203

Tabela 2 – Propriedades estatísticas da série histórica (m³/s).

Mês	Estatística									
	Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação	Assimetria	Curtose	Quartil Inferior	Mediana	Quartil Superior	Mín.	Máx.
Jan	0,890	1,419	1,594	2,794	8,072	0,067	0,544	0,890	0,006	6,610
Fev	2,501	3,795	1,517	2,513	6,680	0,070	2,050	2,501	0,008	17,300
Mar	1,035	1,118	1,081	2,026	3,639	0,392	1,035	1,035	0,015	4,640
Abr	3,252	5,490	1,688	2,847	8,062	0,399	1,830	3,252	0,028	25,300
Mai	5,481	11,801	2,153	2,340	4,192	0,221	0,437	4,980	0,011	44,100
Jun	4,326	6,623	1,531	2,017	3,212	0,425	1,580	5,020	0,024	24,900
Jul	7,503	10,278	1,370	2,256	5,235	1,020	3,920	9,540	0,023	45,600
Ago	4,457	8,181	1,836	2,333	4,252	0,560	1,280	4,457	0,063	31,000
Set	0,815	1,322	1,622	2,384	5,116	0,064	0,375	0,815	0,016	5,570
Out	0,349	0,533	1,527	2,212	4,550	0,028	0,126	0,349	0,010	2,240
Nov	0,855	0,869	1,017	1,568	2,283	0,178	0,855	0,995	0,003	3,580
Dez	2,570	4,887	1,901	2,613	5,628	0,226	0,754	2,570	0,011	18,500
Anual	34,035	38,252	1,124	2,193	4,298	12,669	21,058	37,539	5,801	167,619

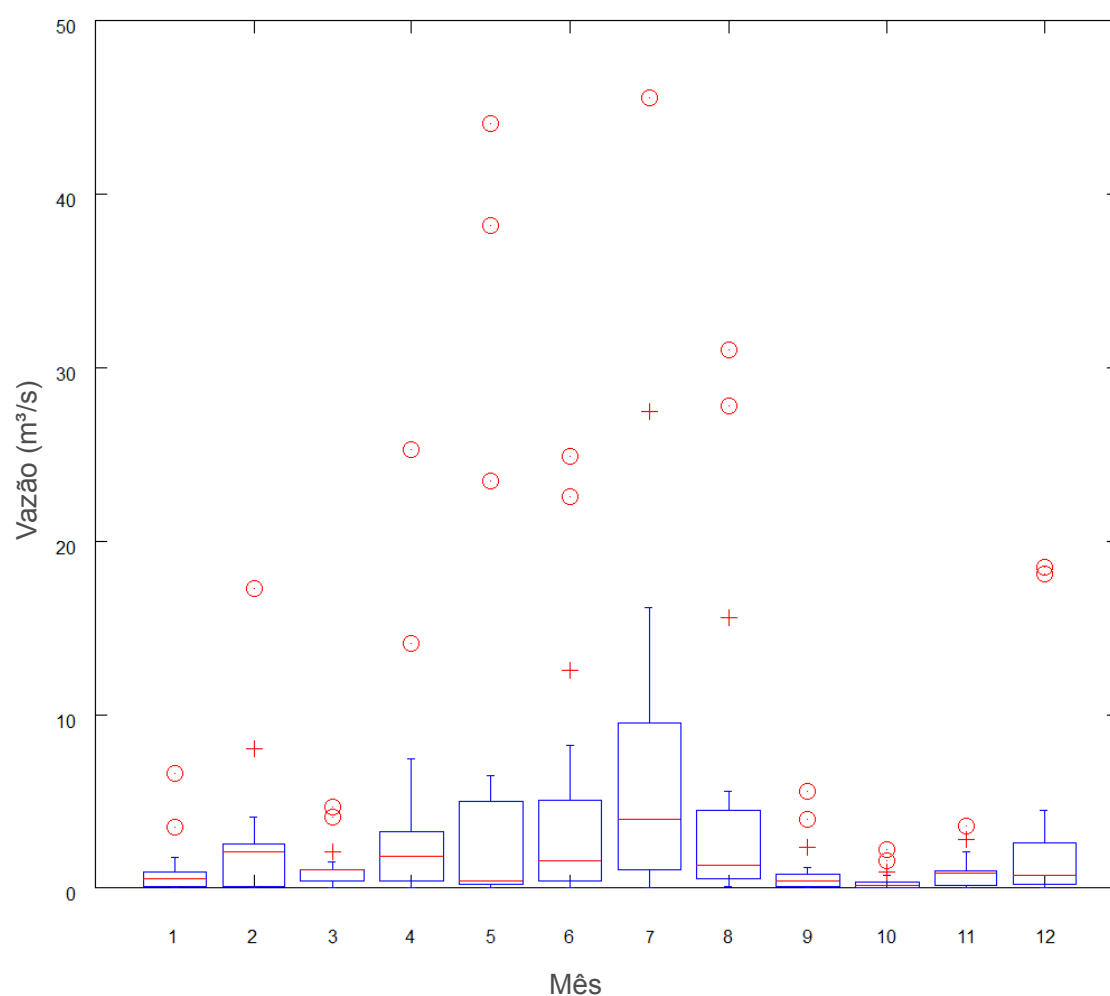


Figura 2 – Desenho esquemático da série histórica.

Tabela 3 – Propriedades estatísticas da série sintética gerada pelo TF (m³/s).

Mês	Estatística									
	Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação	Assimetria	Curtose	Quartil Inferior	Mediana	Quartil Superior	Mín.	Máx.
Jan	0,909	1,372	1,509	2,837	11,490	0,020	0,370	1,195	0,000	15,260
Fev	2,578	3,707	1,438	2,636	9,678	0,000	1,660	3,571	0,000	32,650
Mar	1,031	1,105	1,071	2,077	6,388	0,251	0,692	1,439	0,000	10,070
Abr	3,329	5,395	1,621	3,141	15,191	0,000	1,176	4,246	0,000	68,300
Mai	6,508	10,960	1,684	3,028	14,097	0,000	1,341	9,018	0,000	130,110
Jun	4,639	6,369	1,373	2,310	7,573	0,000	2,260	6,632	0,000	64,720
Jul	6,612	9,498	1,436	2,594	10,898	0,000	2,914	9,625	0,000	118,900
Ago	4,392	7,449	1,696	3,430	20,401	0,000	0,980	6,056	0,000	111,340
Set	0,843	1,252	1,486	2,635	9,932	0,000	0,346	1,174	0,000	11,620
Out	0,362	0,499	1,380	2,626	11,282	0,000	0,181	0,520	0,000	6,280
Nov	0,857	0,841	0,981	1,783	6,087	0,232	0,647	1,235	0,000	11,590
Dez	2,971	4,591	1,545	3,077	14,965	0,000	1,183	4,040	0,000	54,770
Anual	35,033	31,857	0,909	2,074	6,585	13,022	24,297	46,981	0,120	304,530

Reddy (1987), é dado por:

$$\tilde{\xi}_{v,\tau} = \frac{2}{\hat{g}_\tau} \left(1 + \frac{\hat{g}_\tau \xi_{v,\tau}}{6} - \frac{\hat{g}_\tau^2}{36} \right) - \frac{2}{\hat{g}_\tau} \quad (5)$$

onde $\xi_{v,\tau}$ é uma $N(0, 1)$, como usual, e $\hat{g}_\tau$ é chamado de coeficiente de assimetria modificado, calculado da forma:

$$\hat{g}_\tau = \frac{g_\tau - \rho_\tau^3 g_{\tau-1}}{(1 - \rho_\tau^2)^{1,5}} \quad (6)$$

em que g_τ é o coeficiente de assimetria dos dados de vazões observadas.

A fim de validar o modelo, 10.000 anos de vazões sintéticas foram gerados. Como o método é autoregressivo, para gerar o primeiro valor, faz-se necessário o uso de uma “semente”. Adotou-se, para tal, a média da série histórica do mês de dezembro. Com o intuito de extinguir possíveis induções causadas pela semente, 100 anos de dados iniciais foram gerados e posteriormente descartados da série sintética final. A Tabela 3 mostra as estatísticas principais da série sintética obtida e a Figura 3 ilustra o desenho esquemático dos seus dados.

3.4 – Aplicação do Método dos Fragmentos

Os fragmentos gerados da série histórica são mostrados na Tabela 4. Como mencionado anteriormente, a geração de vazões anuais foi realizada a partir de números aleatórios seguindo uma função de densidade de probabilidade do tipo Gama. Isso é baseado no princípio de que as vazões anuais do rio são processos independentes. Essa afirmativa é confirmada pela análise de independência da série de vazões anuais históricas, mostrada na Figura 4. A figura compara o correlograma da amostra com os limites de tolerância para processos independentes (para um nível de tolerância de 5%) que,

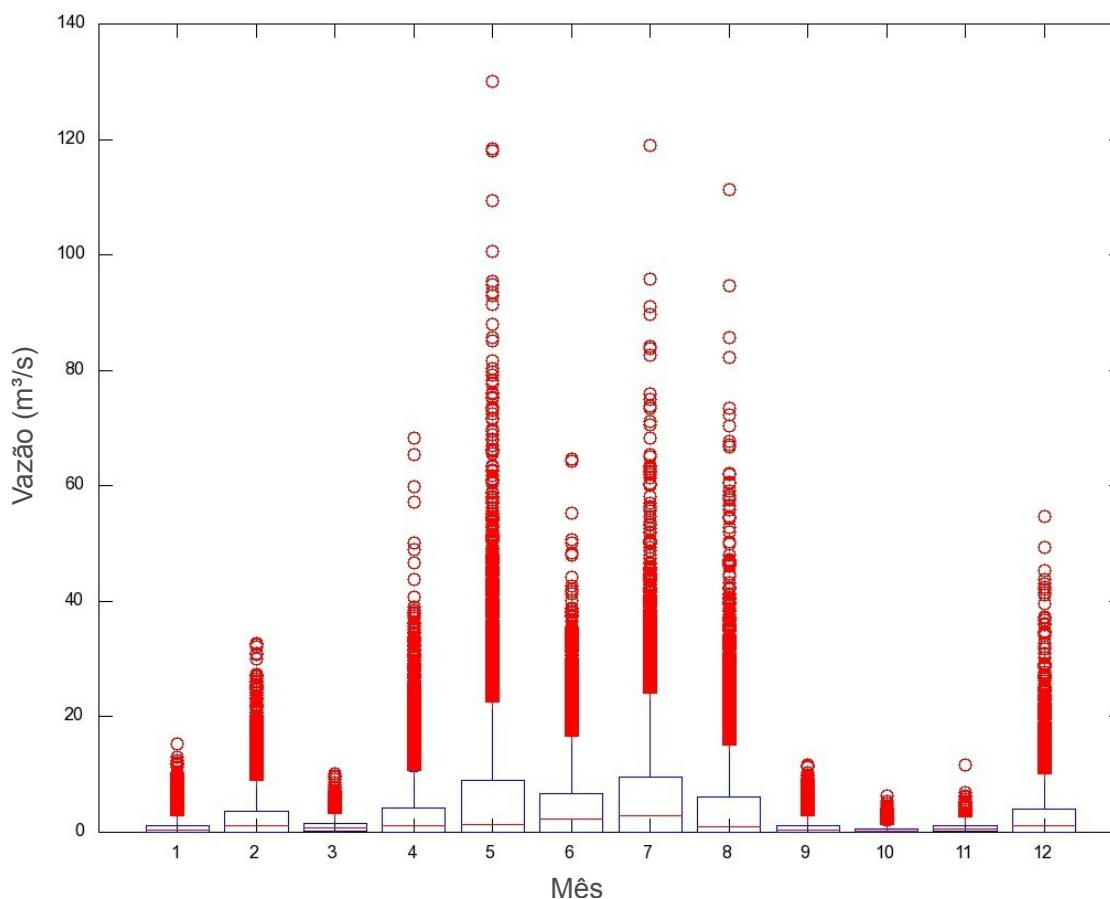


Figura 3 – Desenho esquemático da série sintética gerada pelo TF.

segundo Reddy (1987), são dados por:

$$\rho_l (5\%) = \frac{-1 \pm 1,645\sqrt{n-l-1}}{n-l} \quad (7)$$

em que ρ_l é o coeficiente de autocorrelação de *lag l* e *n* é o tamanho da amostra.

O correlograma da amostra representa os coeficientes de autocorrelação para vários *lags*. É geralmente sugerido (Reddy 1987) que o número máximo de *lags* para os quais os coeficientes devem ser calculados seja igual a 1/4 do tamanho da amostra (neste caso $25/4 \approx 6$). Por definição dos limites de tolerância, se pelo menos 95% dos coeficientes estão dentro destes limites, a série é considerada independente. Portanto, como todos os coeficientes calculados estão dentro dos limites definidos pela Equação (7), a hipótese de que a série é um processo independente é aceita.

Novamente, uma série sintética anual de 10.000 anos foi gerada e os seus valores foram fragmentados em vazões mensais por meio da metodologia descrita na seção 2.2. A Tabela 5 mostra as estatísticas principais da série sintética obtida e a Figura 5 ilustra o desenho esquemático dos seus dados.

3.5 – Discussão dos Resultados

A Figura 6 mostra os gráficos de comparação mensal entre média, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria, curtose, quartil inferior, mediana e quartil superior da série histórica em

Tabela 4 – Fragmentos gerados a partir da série histórica.

Ano	Mês											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1978	0,016	0,108	0,124	0,073	0,146	0,162	0,221	0,119	0,007	0,004	0,002	0,020
1979	0,002	0,002	0,007	0,136	0,085	0,296	0,200	0,008	0,004	0,001	0,042	0,218
1980	0,276	0,198	0,037	0,002	0,002	0,043	0,311	0,009	0,002	0,028	0,068	0,024
1981	0,070	0,197	0,082	0,214	0,037	0,013	0,044	0,041	0,003	0,028	0,068	0,203
1985	0,002	0,020	0,003	0,205	0,190	0,201	0,222	0,126	0,008	0,001	0,005	0,016
1986	0,010	0,005	0,010	0,070	0,278	0,025	0,322	0,191	0,035	0,015	0,037	0,004
1987	0,008	0,005	0,057	0,054	0,092	0,044	0,706	0,026	0,003	0,002	0,002	0,002
1988	0,000	0,001	0,033	0,038	0,078	0,197	0,233	0,042	0,062	0,014	0,017	0,284
1989	0,003	0,002	0,004	0,026	0,228	0,135	0,272	0,185	0,014	0,009	0,012	0,110
1990	0,241	0,084	0,060	0,061	0,059	0,080	0,113	0,095	0,058	0,079	0,038	0,035
1991	0,004	0,016	0,268	0,017	0,024	0,228	0,255	0,076	0,040	0,001	0,069	0,001
1992	0,043	0,659	0,056	0,031	0,000	0,002	0,161	0,018	0,017	0,002	0,000	0,012
1993	0,003	0,001	0,178	0,561	0,003	0,004	0,004	0,011	0,003	0,017	0,172	0,044
1994	0,026	0,073	0,037	0,053	0,024	0,146	0,470	0,039	0,023	0,010	0,025	0,075
1995	0,009	0,003	0,076	0,193	0,013	0,012	0,129	0,102	0,018	0,001	0,263	0,182
1996	0,032	0,001	0,061	0,192	0,022	0,484	0,006	0,076	0,007	0,001	0,072	0,047
1997	0,086	0,020	0,013	0,183	0,571	0,054	0,019	0,010	0,000	0,000	0,011	0,033
1998	0,042	0,117	0,049	0,029	0,010	0,191	0,448	0,070	0,031	0,001	0,001	0,012
1999	0,000	0,001	0,000	0,001	0,007	0,078	0,098	0,701	0,010	0,018	0,071	0,015
2000	0,034	0,097	0,018	0,039	0,012	0,099	0,048	0,258	0,265	0,020	0,018	0,091
2001	0,006	0,291	0,006	0,010	0,007	0,016	0,062	0,085	0,134	0,261	0,100	0,023
2002	0,135	0,194	0,009	0,008	0,034	0,122	0,147	0,043	0,016	0,027	0,066	0,199
2003	0,029	0,083	0,034	0,107	0,181	0,023	0,337	0,078	0,035	0,002	0,006	0,085
2004	0,075	0,679	0,088	0,005	0,012	0,007	0,011	0,101	0,005	0,003	0,010	0,003
2005	0,002	0,212	0,016	0,197	0,058	0,022	0,340	0,146	0,002	0,001	0,000	0,005

Tabela 5 – Propriedades estatísticas da série sintética gerada pelo MF (m³/s).

Mês	Estatística									
	Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação	Assimetria	Curtose	Quartil Inferior	Mediana	Quartil Superior	Mín.	Máx.
Jan	0,926	1,869	2,018	2,844	6,964	0,020	0,124	0,891	0,000	8,590
Fev	2,043	4,016	1,966	2,987	8,477	0,055	0,106	2,440	0,000	18,610
Mar	0,989	0,965	0,976	1,906	4,367	0,244	0,988	1,250	0,004	4,660
Abr	3,258	5,213	1,600	2,672	6,755	0,407	1,841	3,050	0,014	29,750
Mai	5,957	12,991	2,181	2,707	6,013	0,185	0,401	5,150	0,000	57,310
Jun	4,151	5,180	1,248	2,057	5,095	0,412	3,341	5,280	0,000	33,080
Jul	6,251	6,890	1,102	2,206	8,856	0,849	4,137	9,830	0,000	66,750
Ago	5,642	10,218	1,811	2,068	2,601	0,574	1,332	2,890	0,000	45,380
Set	0,795	1,171	1,473	2,202	3,987	0,064	0,418	0,836	0,000	5,600
Out	0,344	0,472	1,373	2,065	4,987	0,022	0,074	0,709	0,000	2,370
Nov	1,029	1,014	0,985	1,426	1,052	0,241	0,849	1,080	0,003	3,790
Dez	2,852	5,103	1,789	2,370	4,190	0,206	0,712	2,590	0,001	27,080
Anual	34,235	28,887	0,844	1,683	4,261	13,201	26,561	46,992	0,024	245,360

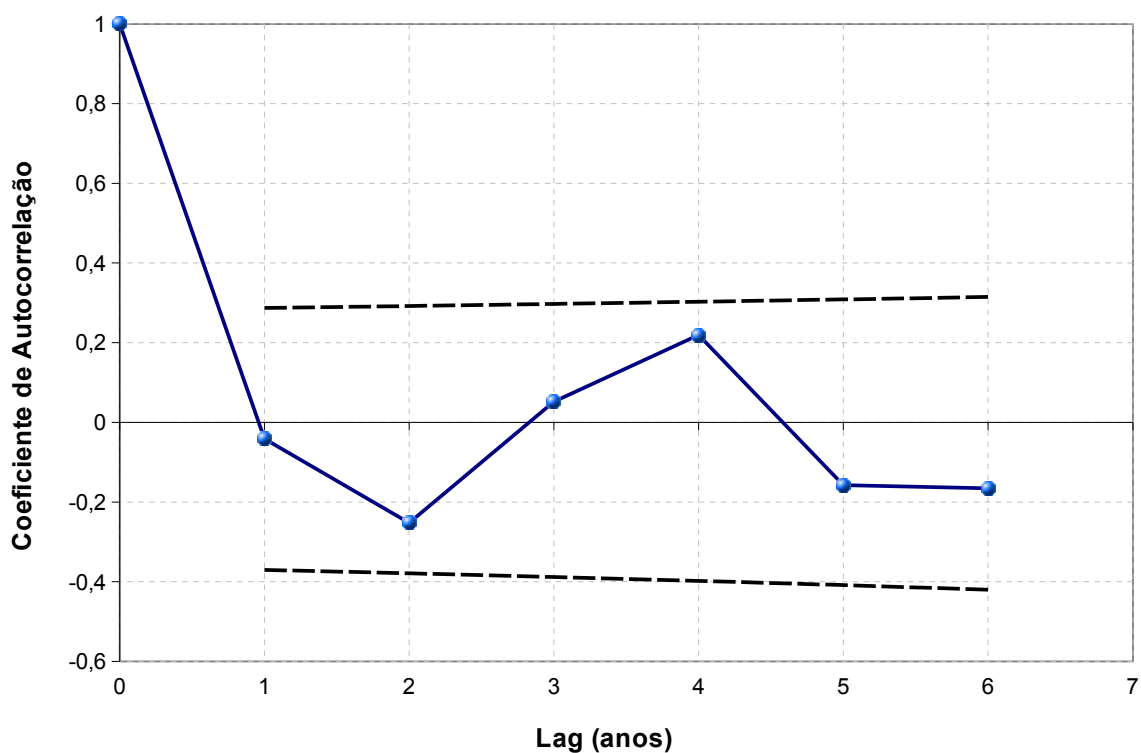


Figura 4 – Correlograma da série histórica anual mostrando que os coeficientes de autocorrelação estão todos dentro dos limites de tolerância (linhas tracejadas) para um processo independente.

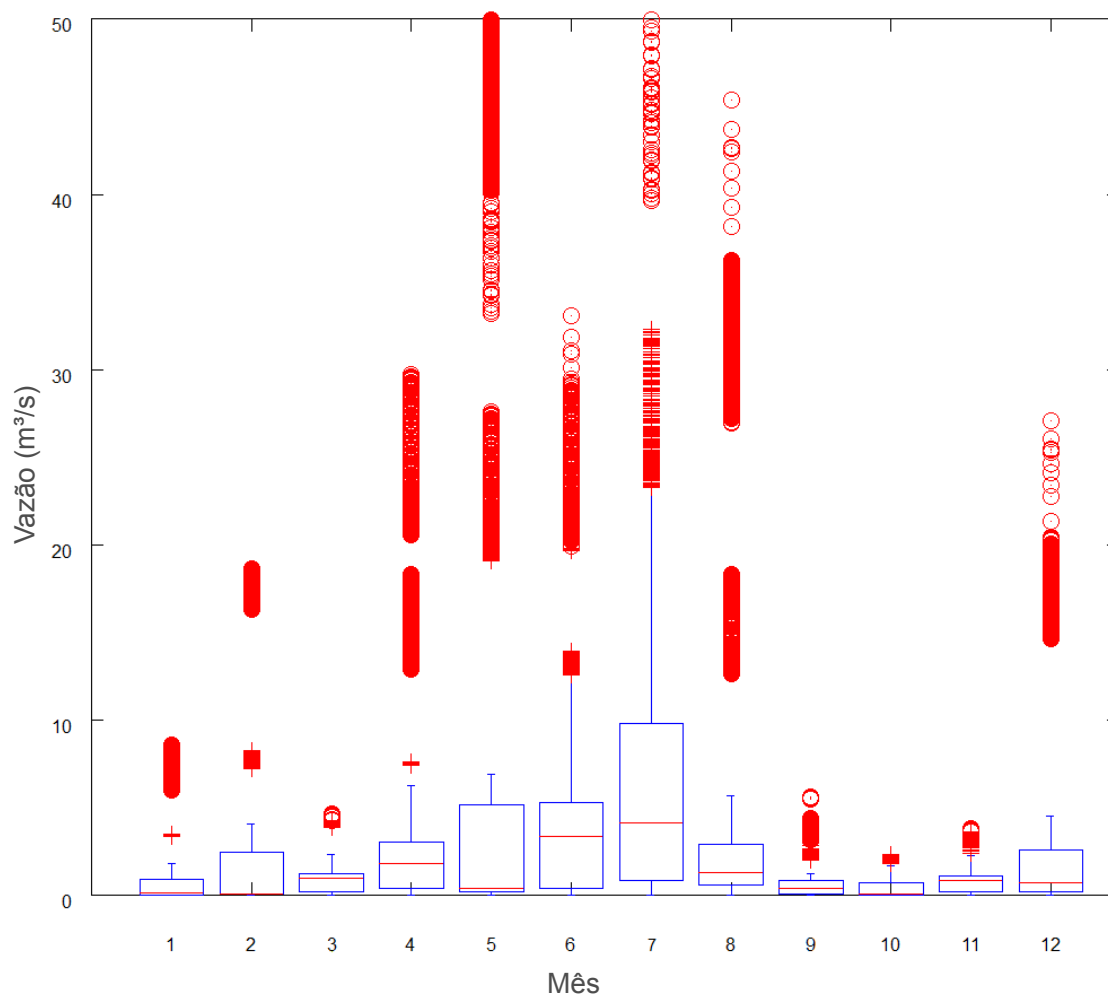


Figura 5 – Desenho esquemático da série sintética gerada pelo MF.

relação às geradas pelo TF e MF. A Figura 7 ilustra as mesmas comparações com as estatísticas das séries anuais. Estes gráficos, juntamente com os dados mostrados nas tabelas 2, 3 e 5, ilustram que as principais estatísticas, tanto anuais quanto mensais, dos registros históricos foram preservadas de forma satisfatória pelos dois modelos.

Observa-se que, particularmente nas séries mensais, o TF foi um pouco melhor em termos de média e desvio padrão enquanto que o MF obteve melhores resultados para assimetria, curtose, mediana e quartis. Isso significa que não há um método melhor do que o outro, i.e., um modelo ótimo que fornece ajuste melhor de todas as estatísticas em relação às históricas. Vale salientar, no entanto, que o MF tem se mostrado capaz de preservar a percentagem de vazões nulas de dados de rios intermitentes de forma melhor do que o TF e, portanto, seria mais apropriado para ser utilizado em dados de regiões áridas e semiáridas (Celeste et al. 2007). Neste estudo, isso não foi investigado por não haver vazões nulas nos dados históricos da região do agreste considerada (ver tabelas 1 e 2).

4 – CONCLUSÃO

Este artigo avaliou a aplicação do modelo Thomas-Fiering e do Método dos Fragmentos para a geração de vazões mensais de um curso d'água no agreste do estado de Sergipe. A partir de uma série histórica de 25 anos de dados foram geradas séries sintéticas mensais de 10.000 anos. Tanto o TF quanto o MF mantiveram satisfatoriamente as principais estatísticas históricas anuais e mensais nos dados gerados, sendo o TF um pouco melhor em termos de média e desvio padrão e o MF superior nas outras propriedades estatísticas mensais.

BIBLIOGRAFIA

ARAÚJO, J.K.; CAMPOS, J.N.B. (1991). “Utilização do método dos fragmentos no estudo da disponibilidade hídrica de açudes no semi-árido” in Anais do IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, Vol. 1., pp. 467-474.

BASSON, M.S.; ALLEN, R.B.; PEGRAM, G.G.S.; VAN ROOYEN, J.A. (1994). *Probabilistic Management of Water Resources and Hydropower Systems*. Water Resources Publications, Colorado.

CAMPOS, J.N.B. (1996). *Dimensionamento de Reservatórios: O Método do Diagrama Triangular de Regularização*. Edições UFC, Fortaleza.

CELESTE, A.B.; CURI, W.F.; CURI, R.C. (2007). “Análise de métodos para geração sintética de vazões em rios intermitentes” in Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, CD-ROM.

CELESTE, A.B.; SUZUKI, K.; KADOTA, A.; FARIAS, C.A.S. (2004). “Stochastic generation of inflow scenarios to be used by optimal reservoir operation models”. *Annual Journal of Engineering – JSCE*, 48, pp. 451-456.

FREITAS, M.A.S. (1996). “O modelo GAR(1)/método dos fragmentos aplicado na geração sinté-

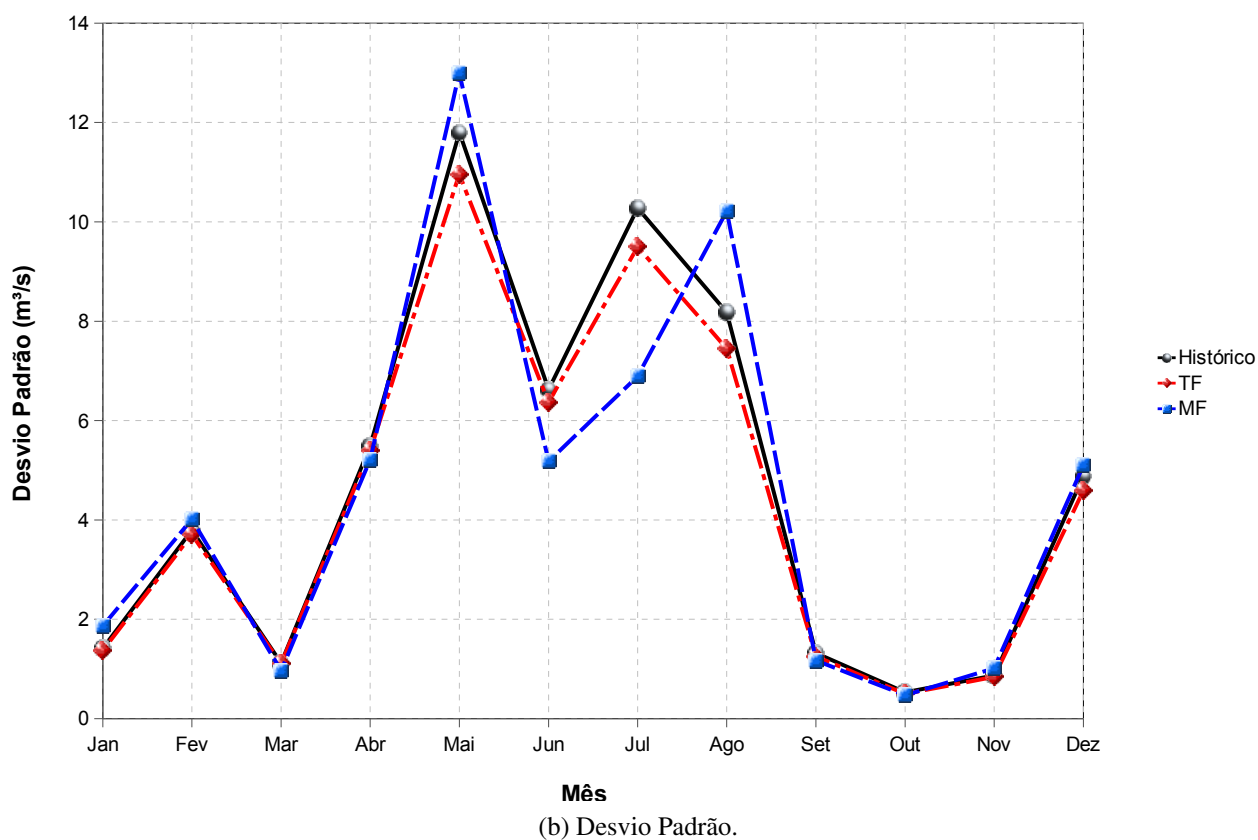
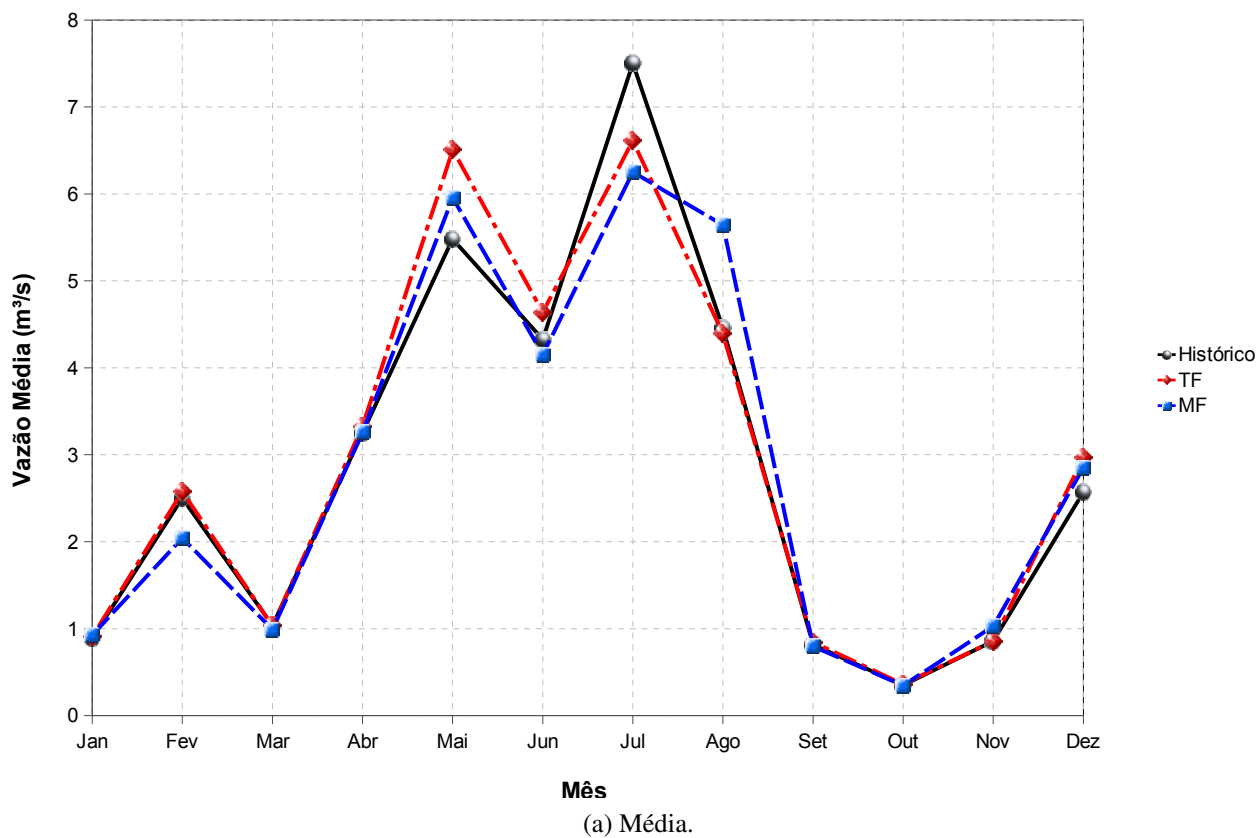
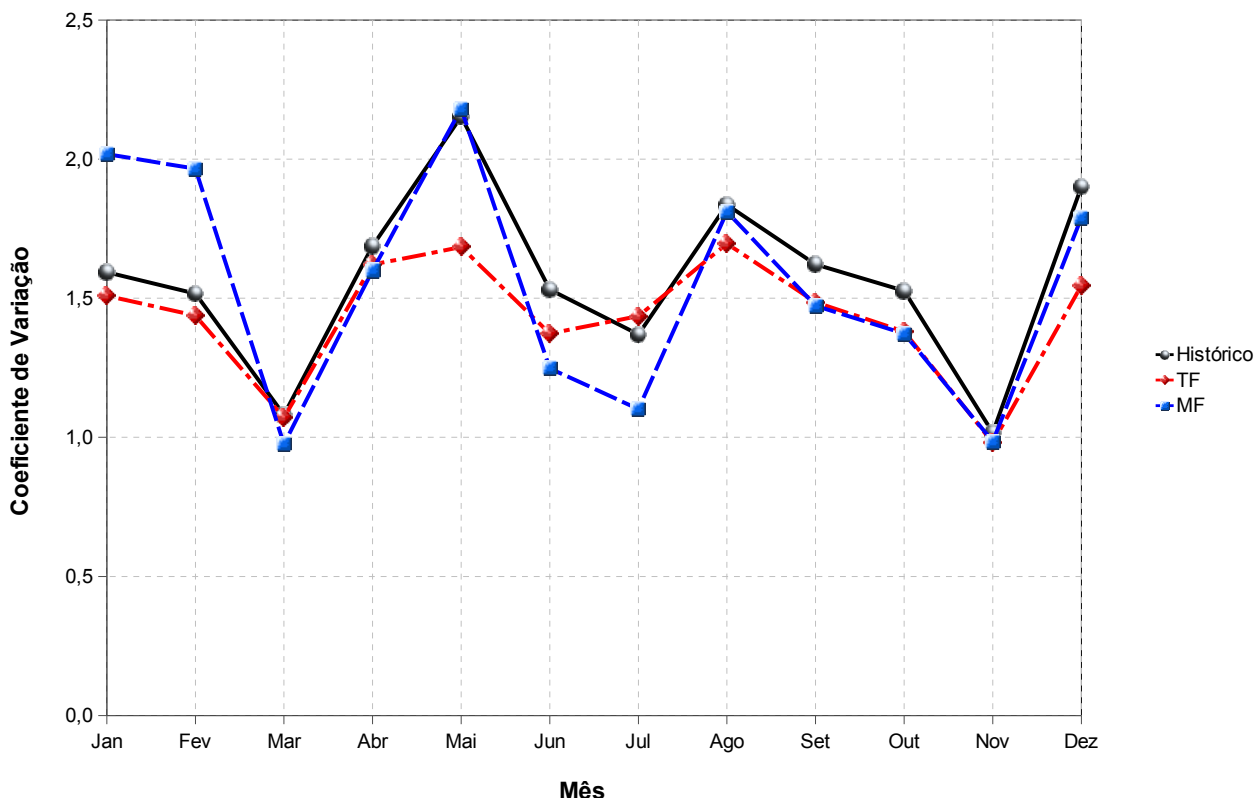
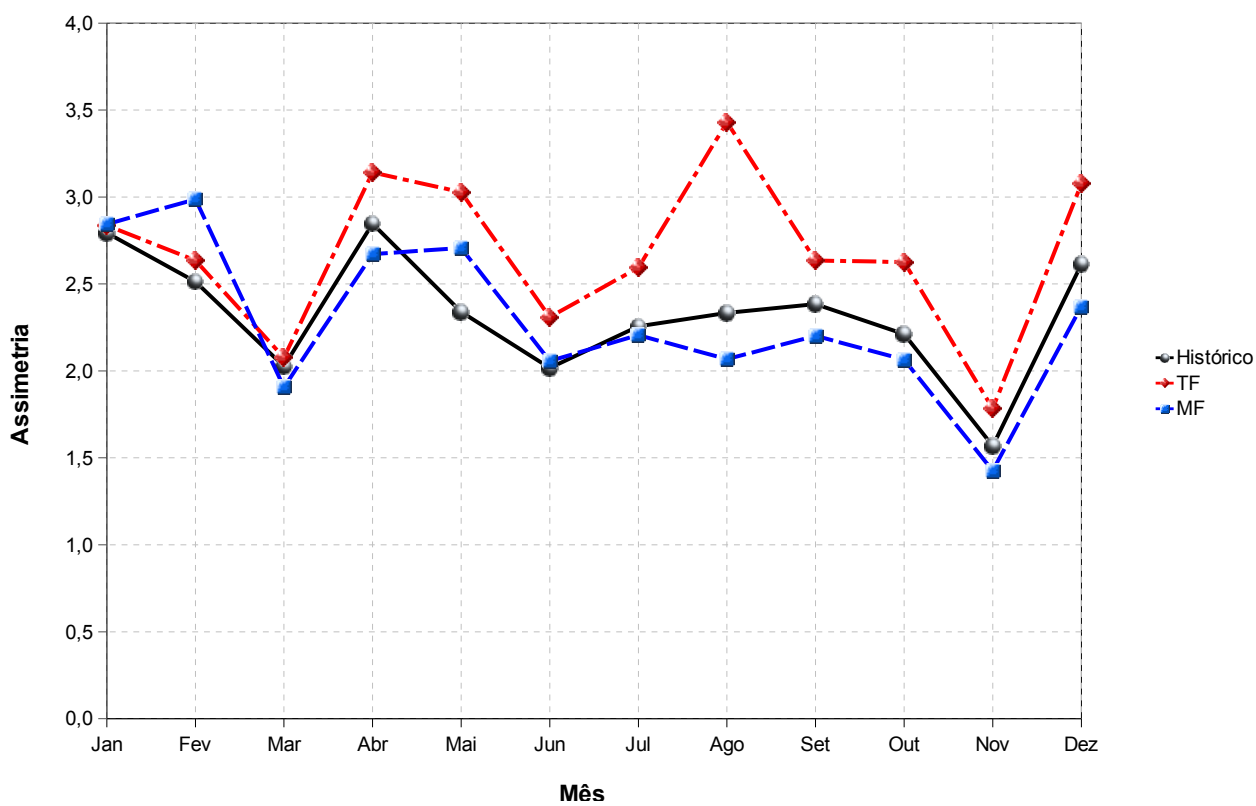


Figura 6 – Comparação entre os parâmetros estatísticos das séries sintéticas mensais geradas pelo TF e MF com os da série histórica.



(c) Coeficiente de variação.



(d) Assimetria.

Figura 6 – (cont.) Comparação entre os parâmetros estatísticos das séries sintéticas mensais geradas pelo TF e MF com os da série histórica.

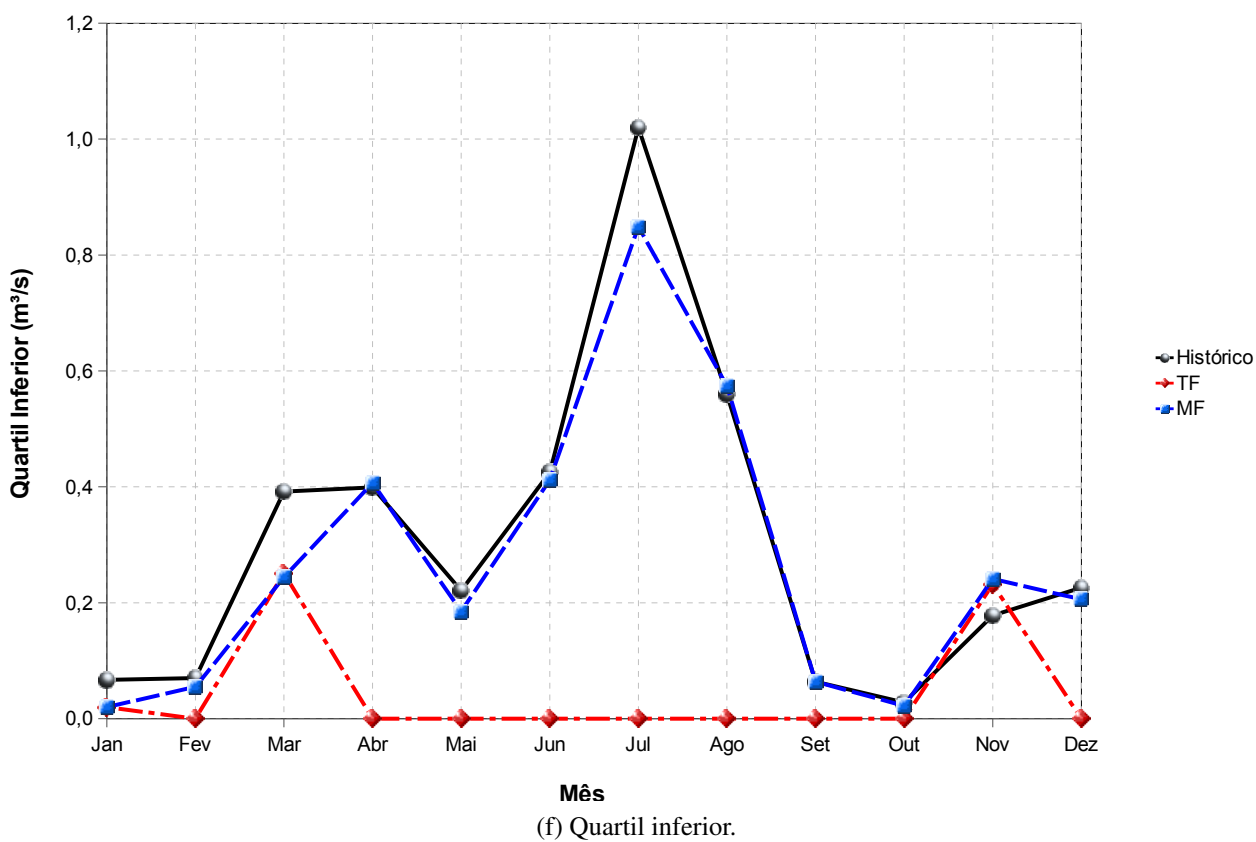
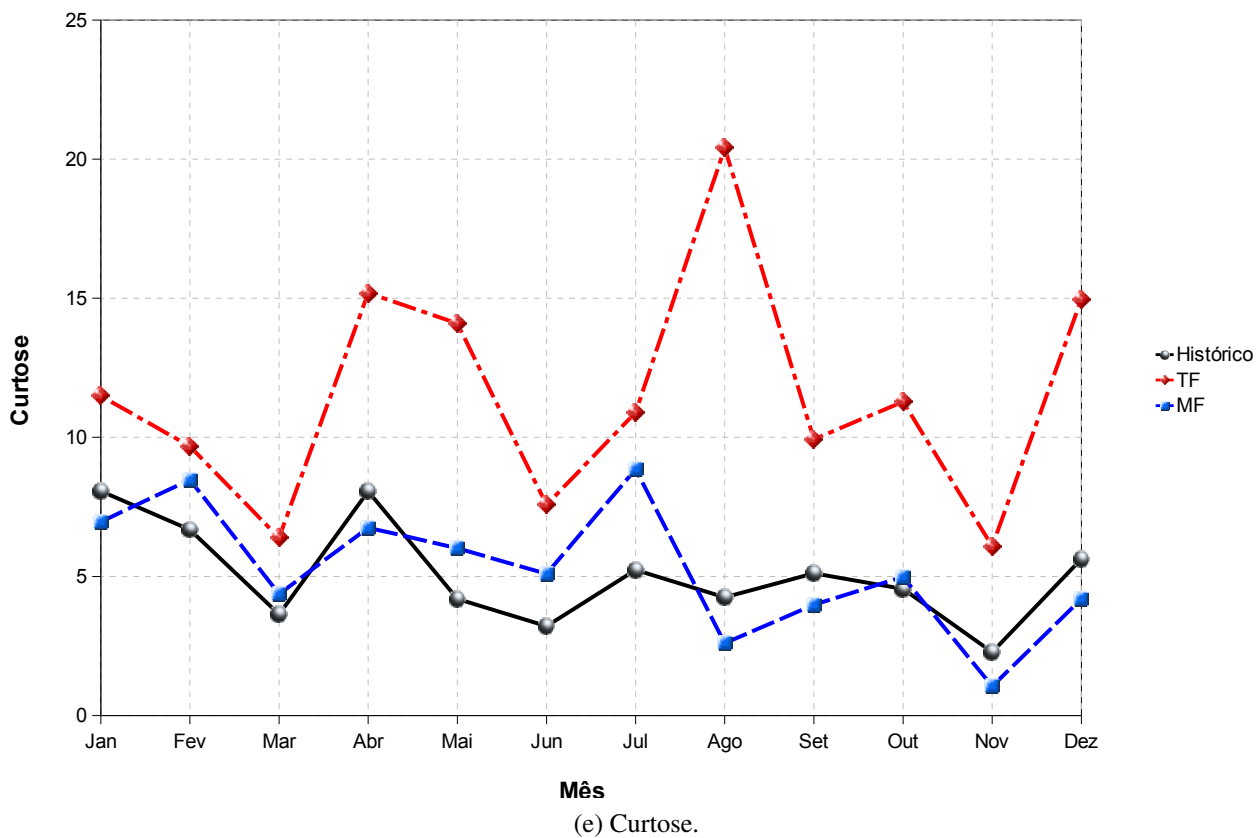


Figura 6 – (cont.) Comparação entre os parâmetros estatísticos das séries sintéticas mensais geradas pelo TF e MF com os da série histórica.

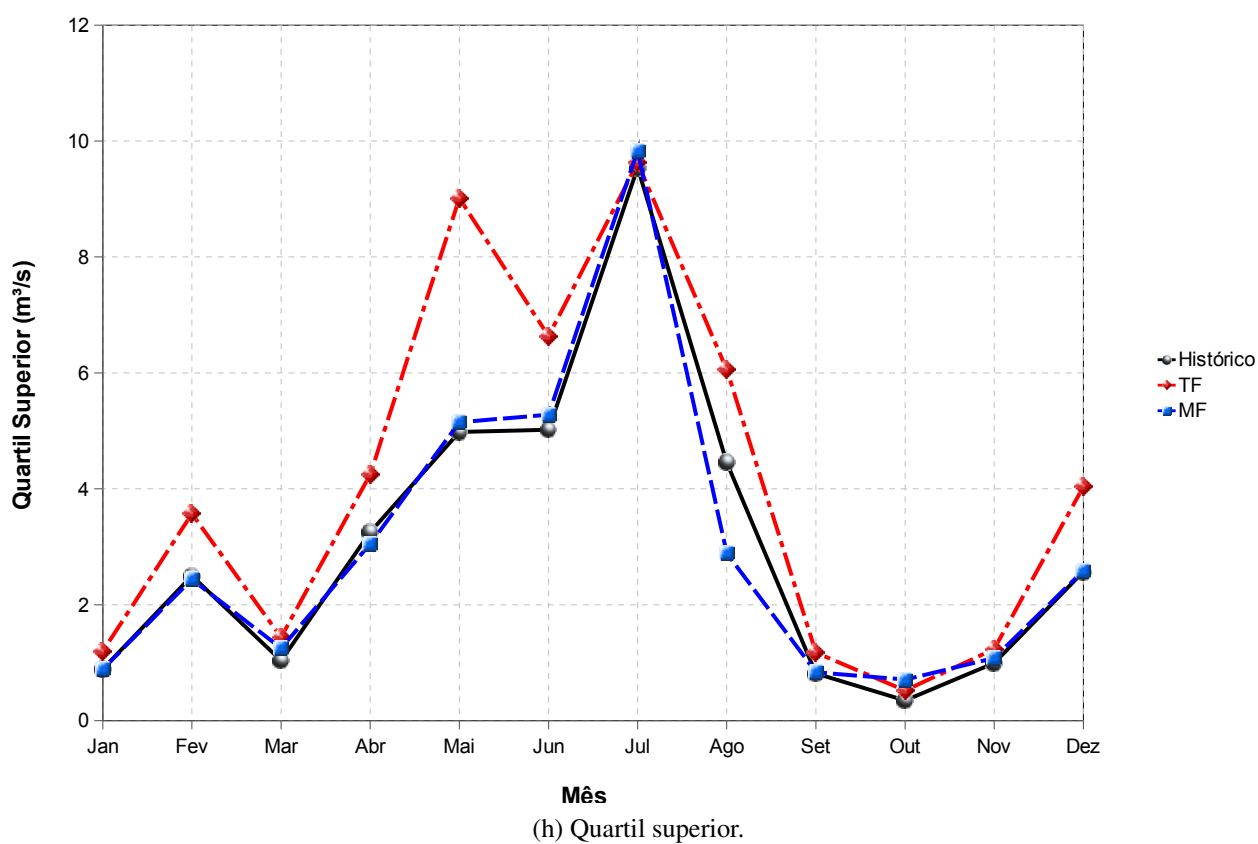
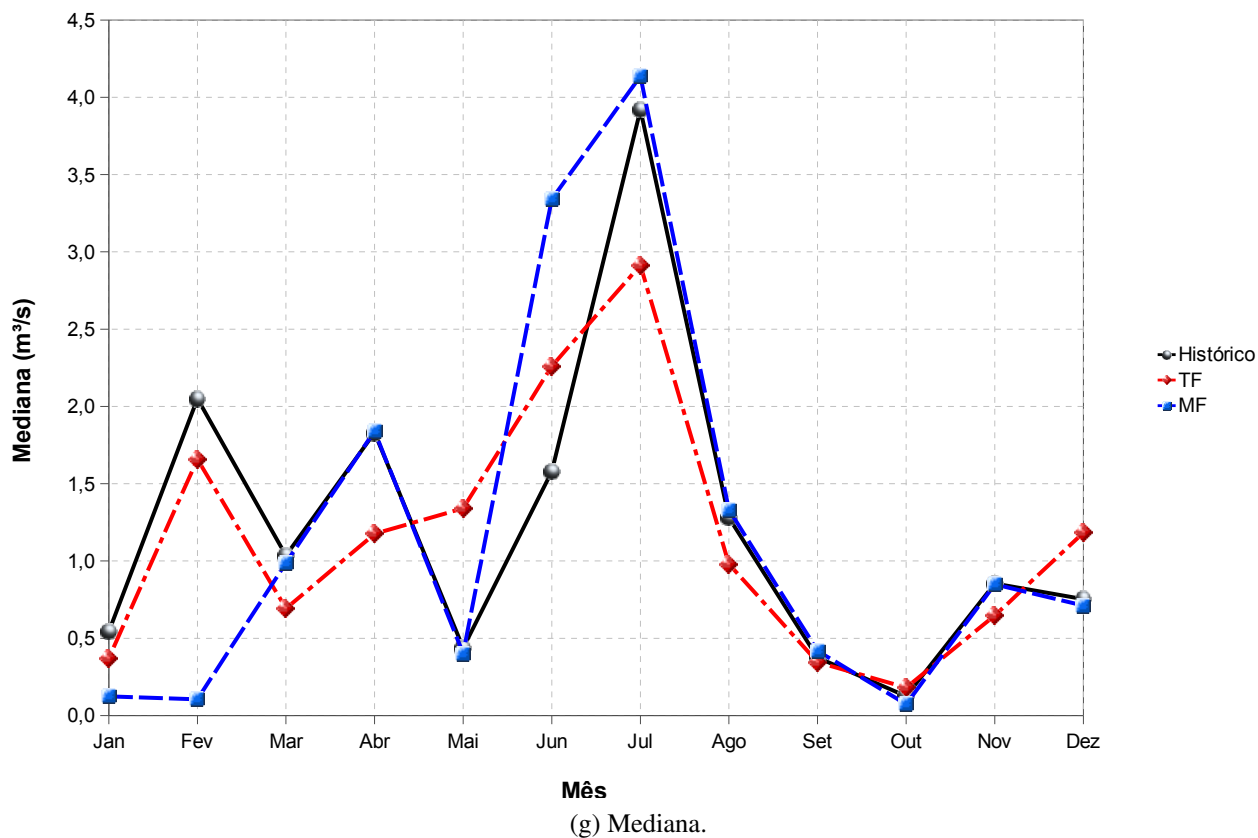


Figura 6 – (cont.) Comparação entre os parâmetros estatísticos das séries sintéticas mensais geradas pelo TF e MF com os da série histórica.

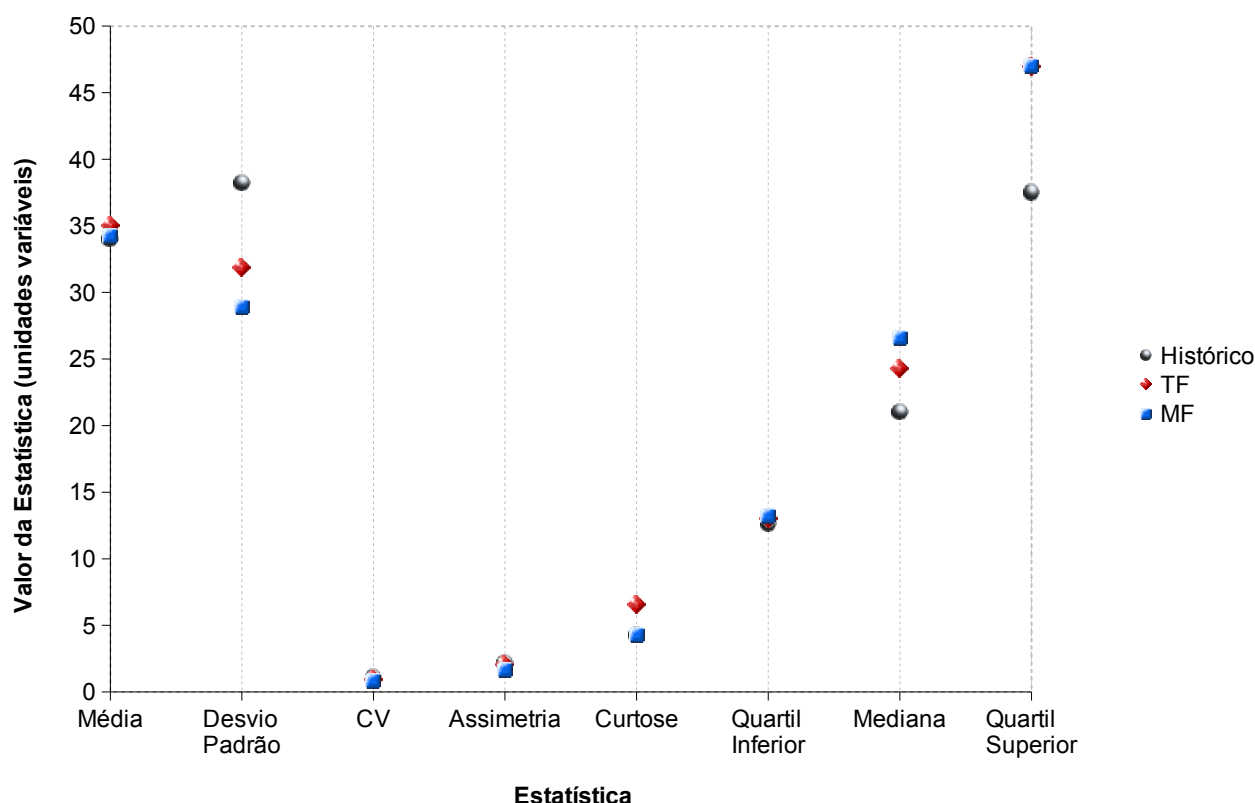


Figura 7 – Comparação entre os parâmetros estatísticos das séries sintéticas anuais geradas pelo TF e MF com os da série histórica (a unidade de vazão é m³/s).

tica de vazão em rios intermitentes do semi-árido brasileiro” in Anais do III Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Salvador, Vol. 1.

GROSZEWICZ, R.C.; KAVISKI, E; ILLICH, I; MACHADO, J.F.P. (1991). “*Avaliação de três métodos de desagregação de afluências*” in Anais do IX Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Vol. 1, pp. 437-446.

KJELDSSEN, T.R. (2001). *Sustainability Assessment of Water Resources Systems*. Tese de Doutorado, Technical University of Denmark, Dinamarca.

KLEMEŠ, V.; SRIKANTHAN, R.; MCMAHON, T.A. (1981). “*Long-memory flow models in reservoir analysis: what is their practical value?*”. Water Resources Research, 17(3), pp. 737-751.

GOVERNO DO ESTADO DE SERGIPE (2010). *Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos*, Volume 1, Tomo V, Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas Superficiais e Subterrâneas, Considerando a Qualidade e Quantidade de Água (RE-6). Aracaju.

GOVERNO DO ESTADO DE SERGIPE (2006). Secretaria de Estado do Planejamento e da Ciência e Tecnologia. *Atlas Digital sobre Recursos Hídricos*. CD-ROM.

PHIEN, H.N.; VITHANA, H.K.M. (1983). “*Streamflow generation regarding storage components and runs’ characteristics*”. Journal of Hydrology, 60, pp. 1-12.

REDDY, P.J. (1987). *Stochastic Hydrology*. Laxmi Publications, Deli, Índia.

- SALAS, J.D., DELLEUR, J.W., YEVJEVICH, V.; LANE, W.L. (1980). *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado.
- SARMENTO, F.J. (1989). *Aplicabilidade de Modelos de Geração de Vazão no Semi-Árido do Nordeste do Brasil*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- SRIKANTHAN, R.; MCMAHON, T.A. (1980). “Stochastic generation of monthly flows for ephemeral streams”. *Journal of Hydrology*, 47, pp. 19-40.
- STUDART, T.M.C. (2000). *Análise de Incertezas na Determinação de Vazões Regularizadas em Climas Semi-Áridos*. Tede de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- SVANIDZE, G.G. (1980). *Mathematical Modeling of Hydrologic Series (for Hydroelectric and Water Resources Computations)*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado.
- TAKEUCHI, K.; HAMLIN, M.; KUNDZEWICZ, Z.W.; ROSBJERG, D; SIMINOVIC, S. P. (1998). *Sustainable Reservoir Development and Management*. IAHS Publications.
- THOMAS, H.A.; FIERING, M.B. (1962). “Mathematical synthesis of stream-flow sequences for the analysis of river basins by simulation”, in *Design of Water Resource Systems*. Org. por Maass et al., Harvard Univ. Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 459-493.