

DETERMINAÇÃO DE VAZÕES EXTREMAS PARA DIVERSOS PERÍODOS DE RETORNO PARA O RIO PARAGUAI UTILIZANDO MÉTODOS ESTATÍSTICOS

Alexandra Natalina de Oliveira SILVINO ¹, Alexandre SILVEIRA ¹, Carlo Ralph de MUSIS ¹, Carlos César WYREPKOWSKI ¹, Fabiano Tomazini da CONCEIÇÃO ²

(1) Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Rua 10, 455 – Boa Esperança. CEP 78068-727. Cuiabá, MT. Endereços eletrônicos: lekaesa@ufmt.br; alexandresilveira@ufmt.br; carloscw@yaho.com.br; carlo@unic.br.

(2) Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual Paulista (UNESP). Avenida Três de Março, 51 – Alto da Boa Vista. CEP 18087-180. Sorocaba, SP. Endereço eletrônico: ftomazini@sorocaba.unesp.br.

Introdução
Área de Estudo
Metodologia
Distribuições de Probabilidades Utilizadas
Distribuição Normal
Distribuição Log-Normal
Distribuição Exponencial
Distribuição Gama
Distribuição Weibull ou Extremo Tipo III
Probabilidade Empírica
Testes de Aderência
Resultados e Discussão
Previsão de Vazões Máximas
Previsão de Vazões Mínimas
Conclusões
Referências Bibliográficas

RESUMO – No presente trabalho foram analisadas as distribuições de probabilidade teórica Normal, Log-Normal, Exponencial, Gama e Weibull, para estimar as vazões máximas e mínimas anuais para o rio Paraguai, utilizando dados de uma estação fluviométrica localizado na cidade de Cáceres-MT. Os testes de Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado foram utilizados para verificar a aderência das probabilidades estimadas às frequências observadas. A série utilizada compreende vazões máximas e mínimas anuais dos anos de 1966 a 2003, excluindo-se dados com falhas. Verificou-se que o melhor ajuste dos valores anuais de vazão máximas e mínimas são referentes a distribuição Gama e Weibull, respectivamente, conforme demonstrado pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

Palavras-chave: Previsão de Vazão, teste de aderência.

ABSTRACT – *A.N. de O. Silvino, A. Silveira, C.R. de Musis, C.C. Wyrepkowski, F.T. da Conceição - The use of statistical methods to determine the return period of the extreme flow of Paraguai river.* In the present work the distributions of Normal theoretical probability, Log-Normal, Exponential, Gama and Weibull had been analyzed to estimate the annual maximum and minimum outflows for the river Paraguay, using details from a fluviometric station in the city of Cáceres, state of Mato Grosso. The tests distribution free of Kolmogorov-Smirnov and Chi-Square had been used to verify the tack of the estimated probabilities to the observed frequencies. The used series involves annual maximum and minimum outflows of the years of 1966 the 2003, abstaining imperfections. Was verified mainly a good adjustment of the maximum and minimum annual values of outflow to the distribution Gama and Weibull, respectively, by the test of Kolmogorov-Smirnov.

Keywords: Forecast of outflow, test goodness of fit.

INTRODUÇÃO

A região da bacia hidrográfica do Paraguai está compreendida entre os estados brasileiros de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, com importantes áreas em território paraguaio e boliviano. A região possui grande destaque por abrigar uma das maiores extensões úmidas do planeta: o pantanal mato-grossense, declarado como Patrimônio Nacional pela Constituição Federal de 1988 e, em 9 de novembro de 2000,

declarada pela Comissão Internacional do Programa “O Homem e a Biosfera” como Reserva da Biosfera da Unesco e como Patrimônio Natural da Humanidade, tornando-se a terceira maior reserva do mundo no gênero (ANA, 2006a). As questões ambientais da região do pantanal dependem das interações com a região do planalto, localizado no seu entorno, compreendendo as nascentes e os divisores da região hidrográfica

do Paraguai com as outras regiões hidrográficas brasileiras; neste contexto a mesma apresenta uma importante função, drenando as águas de seu entorno.

A água, devido a sua condição de escassez em quantidade ou qualidade, deixou de ser um bem livre e passou a ter valor econômico. Neste sentido é de primordial importância o conhecimento das variações das quantidades de água disponíveis nos mananciais ao longo dos anos, uma vez que as mudanças no meio ambiente como os desmatamentos, monoculturas, queimadas, afetam a disponibilidade hídrica.

As informações de quantidade de água são também de fundamental importância para o dimensionamento de canais; dimensionamento de proteções contra cheias (diques), pontes, vertedores, abastecimento de água de cidades, irrigação, projetos agrícolas, navegação, geração de energia, engenharia hidráulica, estudos de qualidade de água etc. Assim, as estimativas de vazões máximas e mínimas têm importância decisiva nos custos e segurança dos projetos de engenharia.

Muitas das obras citadas anteriormente necessitam do conhecimento dos períodos de retorno de vazões máximas ou mínimas, contudo a simples visualização dos dados amostrais em um histograma de frequência, não é suficiente para inferir entre as diversas funções de distribuição de probabilidade conhecidas, a que melhor se ajusta aos dados a serem estudados. Faz-se necessário verificar quais dessas distribuições que a representam melhor, e essa validação é dada pelos testes de aderência.

A verificação do ajuste entre os dados de um determinado elemento hidrológico a uma distribuição de probabilidade fornece um resumo dos dados de uma série de anos. A partir daí, cada distribuição de frequência apresenta uma forma, a qual pode ser

aproximada via a utilização da função densidade de probabilidade com os parâmetros extraídos da amostra em estudo. A utilização ou não de uma distribuição teórica reside no ajuste às distribuições reais, verificada com a aplicação de testes de aderência.

As comparações entre as probabilidades empíricas de uma variável com as probabilidades teóricas estimadas pela função da distribuição de probabilidade, em teste, podem ser verificadas pelos testes de aderência, como o de Qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov. Esses testes verificam se valores amostrais podem ser razoavelmente considerados como provenientes de uma população.

Nos dois testes, dado a hipótese H_0 de que a distribuição observada não difere da fornecida pela função densidade de probabilidade avaliada, é possível calcular o nível de significância destes.

Pelo exposto, entende-se que o aproveitamento otimizado dos recursos hídricos requer o conhecimento de técnicas de planejamento que se baseiam, entre outros, na estimativa das probabilidades associadas a determinadas variáveis hidrológicas, neste caso a vazão. Nesta atividade o principal interesse é prever, com base em funções de densidade de probabilidade aplicadas aos valores observados as vazões possíveis de ocorrer.

Com o presente trabalho foram estimadas, através de métodos estatísticos, as vazões máximas e mínimas para os diversos períodos de retorno, para o rio Paraguai na estação fluviométrica 66070004 localizada no município de Cáceres. Utilizou-se as distribuições de probabilidade Normal, Log-Normal, Exponencial, Gama, Weibull e, verificou-se dentre as distribuições escolhidas quais representam melhor os dados observados através da utilização dos testes Qui-Quadrado e Kolmogorov-Smirnov.

ÁREA DE ESTUDO

O Rio Paraguai é um rio internacional que nasce na Chapada dos Parecis, no interior do Estado de Mato Grosso e desemboca ao sul no rio Paraná, após receber vários tributários, principalmente da margem esquerda. É um rio que faz fronteira com a Bolívia e o Paraguai, com uma extensão de 2.621 km.

De acordo com Köppen, segundo ANA (2006a), o clima predominante da Região Hidrográfica do Paraguai é Aw – Clima de Savana –, com temperaturas médias anuais variando entre 22,5 e 26,5°C. O mês de novembro é o mais quente (média de 27°C) e o de julho, o mais frio (média de 21°C). A precipitação média anual é de 1.398 mm, variando entre 800 e 1.600 mm., o período chuvoso ocorre entre outubro e abril, devido

aos ventos de quadrante norte da massa equatorial continental.

De acordo com trabalho desenvolvido no âmbito do Plano Ambiental Estratégico - PAE (2004, segundo ANA, 2006a) os resultados da análise do uso e da ocupação do solo nas seguintes classes e percentuais em relação à área física da região são: pastagem (16%), agricultura (10%), campos naturais (25%), floresta (27%), água (15%), cerrado (6%), núcleos urbanos e outros (1%). Com respeito a ocupação das terras, a atividade mais intensa é a pecuária, seguida pela atividade agrícola.

A área em estudo representa uma parcela de aproximadamente 9,1% da região hidrográfica do

Paraguai, abrangendo vinte e cinco municípios, em que a localização é apresentada na Figura 1. A área de drenagem a montante da estação fluviométrica do município de Cáceres – MT, representa uma importante contribuição para a região pantaneira.

Os dados utilizados foram obtidos da estação fluviométrica localizada na cidade de Cáceres, através

do sistema de informações hidrológicas da Agência Nacional das Águas (ANA). A estação de código 66070004 está localizada na latitude $-16^{\circ}3'47''$ e longitude $-57^{\circ}41'16''$, com uma altitude de 262 m, drenando uma área de 32774 km², tendo como operadora a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, e responsável a ANA.

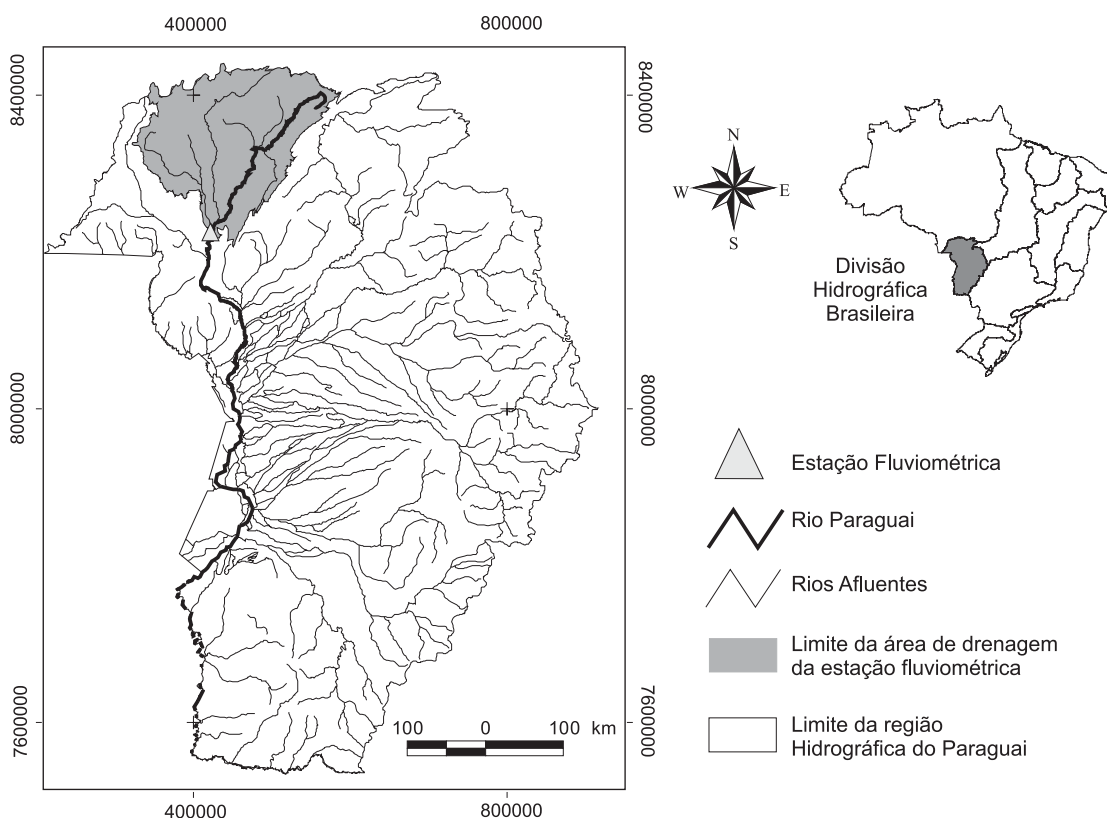


FIGURA 1. Localização da estação fluviométrica no rio Paraguai.

METODOLOGIA

Os dados de vazão utilizados foram obtidos da estação fluviométrica localizada no município de Cáceres, obtidos no banco de dados do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) da Agência Nacional das Águas (ANA).

Segundo ANA (2006a), os dados diários de vazão representam a média entre os valores medidos durante o dia, e o método de obtenção utilizado foi o da curva descarga. Entre os dados disponíveis foram selecionados os dados que já haviam passado por uma análise de consistência.

A série compreende as vazões máximas e mínimas anuais entre 1966 a 2003, com exceção dos anos de 1998 e 2000 que possuíam falhas, resultando em uma série histórica de 36 anos. O tamanho da série histórica está de acordo com o que preconiza a World

Meteorological Organization (WMO), em sua Nota Técnica número 82, Thom (1966, segundo Catalunha et al., 2002), em que o número mínimo de anos de dados climáticos deve ser igual a 30 anos.

Utilizou-se as distribuições de probabilidade Normal, Log-normal, Gama, Weibull e Exponencial para estimar as vazões máximas e mínimas para os diversos períodos de retorno. E para verificar a validade das distribuições, foram utilizados os testes de Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado. Estes testes foram escolhidos, por serem os mais comumente utilizados na literatura e considerados como os mais apropriados para variáveis aleatórias contínuas como vazões.

O programa computacional utilizado como auxiliar nas análises estatísticas foi o *Statgraphics Plus versão 5.1*.

DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADES UTILIZADAS

Distribuição Normal

A distribuição de probabilidade contínua mais utilizada é a distribuição normal, também chamada de distribuição Gaussiana, que possui grande importância em análise matemática, pois técnicas estatísticas como análise de variância, de regressão e alguns testes de hipótese, assumem ou exigem a normalidade dos dados. No entanto, a heterogeneidade dos dados climatológicos podem não seguir a distribuição de Gauss (Essenwanger, 1986).

A distribuição normal é uma distribuição de dois parâmetros e sua função densidade de probabilidade é dada pela seguinte expressão:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

para $-\infty < x < +\infty$

em que μ é a média e σ o desvio-padrão da variável aleatória.

Distribuição Log-Normal

Pode-se dizer que uma amostra obedece a distribuição log-normal quando o logaritmo dos seus valores obedecem a distribuição normal. Essa distribuição foi testada por Huf & Neili (1959, segundo Catalunha et al., 2002) em um trabalho de comparação entre vários métodos para analisar a frequência de precipitação. Essa distribuição tem sido largamente utilizada em hidrologia com a finalidade de modelar cheias anuais (Clarke, 1993).

A função densidade de probabilidade de três parâmetros é representada pela seguinte equação:

$$f(x) = \frac{1}{(x-a)\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[\ln(x-a)-\mu]^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

em que $f(x)$ é a função densidade de probabilidade da variável; e a base dos logaritmos neperianos; a o valor da variável aleatória; μ a média dos logaritmos da variável; σ o desvio-padrão dos logaritmos da variável x ; e α o limite inferior da amostra.

Distribuição Exponencial

É verificado que a distribuição exponencial aproxima-se da forma da distribuição de frequência de certos eventos hidrológicos como as cheias máximas anuais (Lanna, 1993).

Sua função densidade de probabilidade é dada por:

$$\begin{aligned} f(x) &= \lambda e^{-\lambda x}; x > 0 \\ f(x) &= 0; x < 0 \end{aligned} \quad (3)$$

O parâmetro da distribuição (λ) é estimado pelo inverso da média.

Distribuição Gama

De acordo com Clarke (1993) essa distribuição tem sido largamente utilizada em hidrologia com a finalidade de modelar cheias anuais. Segundo o mesmo autor, tanto a distribuição Gama quanto a Log-normal são similares na forma da assimetria, com uma longa cauda superior. Esta é a característica que permite as distribuições representarem as cheias anuais e outros extremos hidrológicos, onde a assimetria está invariavelmente presente.

Se x for uma variável aleatória contínua, tal que ($0 < x < \infty$), com distribuição Gama de parâmetros $\alpha > 0$ e $\beta > 0$, então a sua função densidade de probabilidade é definida como (Araújo et al., 2001; Catalunha et al., 2002; Dourado Neto et al., 2005):

(4)

para $0 < x < \infty$

A função Gama de probabilidade possui dois parâmetros, o de forma (α) e o de escala (β) (Catalunha et al., 2002).

Distribuição Weibull ou Extremo Tipo III

A distribuição de Weibull ou extremo tipo III, foi proposta primeiramente por Fisher e Tippet em 1928, tendo sido desenvolvida independentemente por Walodi Weibull, em 1939. O trabalho de Weibull se destacou e a distribuição passou a ser chamada pelo seu nome, Johnson & Kotz (1970, segundo Catalunha et al., 2002).

Essa distribuição pertence a família da distribuição de Gumbel, e é útil para representar a distribuição de vazões mínimas anuais (Clarke, 1993).

Sua função de densidade de probabilidade é apresentada de diversas formas, sendo a mais comum:

$$f(x) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^\gamma\right] \quad (5)$$

para $x \geq a$

em que $f(x) = 0$ para outros intervalos, x é a variável aleatória e $\alpha \geq 0$, $\beta > 0$ e $\gamma > 0$ são os parâmetros da distribuição.

Probabilidade Empírica

Uma maneira simples para obtenção das vazões máximas e mínimas associada a um determinado período de retorno, é por intermédio da análise de frequência. Para efetuar a análise de frequência, que

é mais simples que as distribuições de probabilidades teóricas mencionadas anteriormente, o período de retorno a ser analisado deve ser bem menor do que o número de anos de dados da série. Caso o número de anos da série fosse menor que o período de retorno desejado, a repartição de frequências deveria ser ajustada a uma lei probabilística teórica para permitir o cálculo mais correto da probabilidade.

Para determinar a frequência com que determinada vazão ocorre, deve-se ordenar os dados observados em ordem crescente, para vazões máximas em ordem decrescente para vazões mínimas, e a cada um atribuir um número de ordem. Feito isso se pode calcular a frequência conforme equação 6.

$$F = \frac{m}{n+1} \quad (6)$$

em que: F = frequência de ocorrência de um evento maior ou igual ao de ordem “m” em uma amostra ordenada; m = ordem do evento (número de ocorrências de vazão menor ou igual à do evento de ordem “m” em “n” anos); n = número de anos de observação.

E o tempo de retorno é obtido através da seguinte expressão:

$$T = \frac{1}{F} \quad (7)$$

em que: T = tempo ou período de retorno (período de tempo médio, em anos, que ocorre um evento menor ou igual ao de ordem “m”).

TESTES DE ADERÊNCIA

Quando se ajusta uma distribuição de probabilidade teórica a uma série de dados observados, trabalha-se com a hipótese de que a distribuição pode representar de forma adequada aquele conjunto de informações. Então a hipótese nula é a de que os valores de vazões apresentam a condição de igualdade com os valores simulados.

Uma forma de comparar as probabilidades empíricas de uma variável com as probabilidades teóricas estimadas pela função de distribuição em teste é através dos testes de aderência. Assim se for obtida

uma boa aderência e a amostra for razoavelmente grande, pode-se, em princípio, admitir que o modelo possa representar adequadamente o conjunto de informações.

Entre os testes de aderência disponíveis, um dos mais populares é a de Qui-quadrado - χ^2 . Este foi desenvolvido por Karl Pearson e tem uma estatística baseada no somatório do quadrado dos desvios das frequências, favorecendo o aspecto cumulativo dos erros (Catalunha et al., 2002). A comparação entre as frequências observadas e as frequências teóricas, em cada classe de frequência da amostra, é efetuada através da estatística do χ^2 dada por:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \left(\frac{(FO_i - Fe_i)^2}{Fe_i} \right) \quad (8)$$

em que: k é o número de classes, FO_i a frequência observada e Fe_i a frequência esperada. Os valores críticos de χ^2 para alguns níveis de significância são descritos por tabelas próprias.

Este teste foi desenvolvido por Karl Pearson e é baseado na soma dos erros absolutos das frequências, que é comparada com um valor tabelado de acordo com o nível de significância desejado e os graus de liberdade da distribuição. Isto favorece o aspecto cumulativo dos erros pela somatória (Catalunha et al., 2002).

O Teste de Aderência por Kolmogorov- Smirnov foi introduzido em 1933, citado por Assis et al. (2004), sua estatística pode ser observada na equação 9:

$$D_{obs} = \text{Max} |F(x) - S(x)| \quad (9)$$

em que F(x) e S(x) são as funções de distribuição teórica, ou de referência, e observada, respectivamente.

Para isto compara-se o maior valor D_{obs} com D_{tab} (D_{tab} é o desvio máximo tabelado, encontrado em tabelas adequadas);

Caso $D_{obs} < D_{tab}$, não se rejeita a hipótese nula (hipótese de que a distribuição de probabilidade teórica pode representar os dados observados), ou seja, existe concordância entre as frequências observadas e as esperadas, e a amostra provém de uma população que segue a distribuição de probabilidade sob teste.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A série de vazões máximas e mínimas anuais relativas aos anos estudados são apresentadas na Figura 2. De acordo com a série fluviométrica

observou-se, para a estação em estudo, vazões mínimas variando de 397 a 1376 m³/s e vazões máximas variando de 472,8 a 2659 m³/s. Pode-se observar

também na Figura 2 que, em 1971 foi o período em que ocorreu a menor vazão e o ano de 1982, o maior valor, para a série hidrológica em questão.

Na Figura 3 observa-se a amplitude (definida neste trabalho como a diferença entre o maior e o

menor valor de vazão anual) das vazões do rio Paraguai na estação localizada em Cáceres-MT, onde nota-se no ano de 1973 a menor amplitude de vazões, da ordem de 54,5m³/s e o ano de 1995, o de maior amplitude igual a 1439,8m³/s.

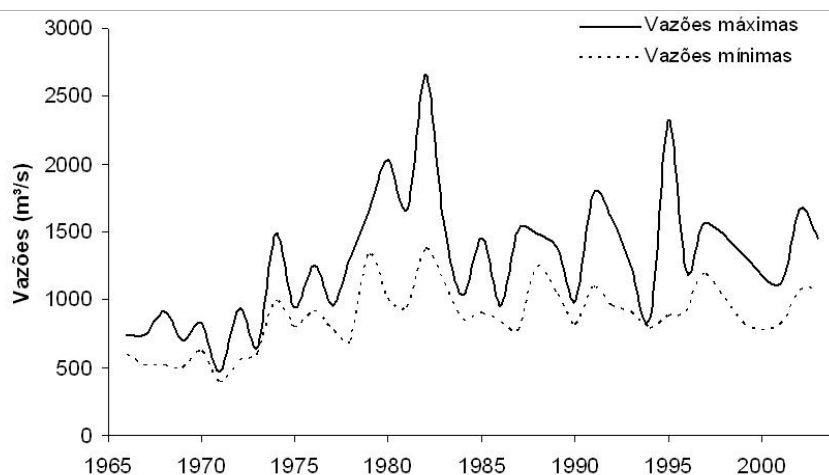


FIGURA 2. Variação temporal das vazões máximas e mínimas para a estação fluviométrica do município de Cáceres-MT.

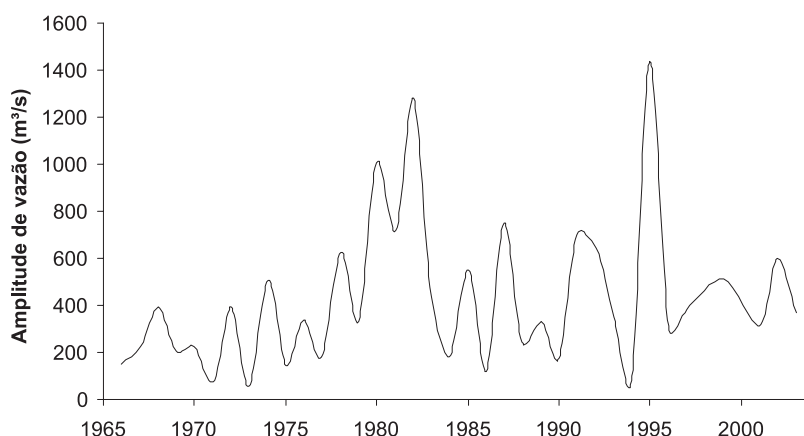


FIGURA 3. Variação temporal da amplitude de vazões para a estação fluviométrica do município de Cáceres-MT.

Os anos em que não existem grandes diferenças visuais entre os valores máximos e mínimos, indicam a pouca variabilidade da vazão no decorrer do ano.

A diferença na amplitude pode revelar como a bacia está se comportando perante os períodos de estiagem e de cheias, uma vez que locais impactados com mudanças do uso do solo apresentam uma tendência de possuir picos de vazões extremas cada vez mais pronunciadas.

PREVISÃO DE VAZÕES MÁXIMAS

As vazões máximas do rio Paraguai, para os diversos períodos de retorno, foram determinadas através

das distribuições de probabilidade Normal, Log-normal, Gama, Weibull, Exponencial e probabilidade empírica.

A Figura 4 apresenta os valores das vazões máximas observadas (probabilidade empírica) e períodos de retorno de 1 a 37 anos (série histórica) e os eventos simulados para os respectivos períodos de retorno. Observa-se a proximidade ou a coincidência dos referidos pontos, significando um bom ajuste dado pela distribuição Normal, Log-normal, Gama e Weibull no caso das máximas vazões anuais.

Segundo (Lanna, 1993) a distribuição exponencial é adequada para certos eventos hidrológicos extremos como cheias máximas anuais. No entanto, como pode

ser observado na Figura 4, a distribuição exponencial não representou de forma adequada a probabilidade empírica, exceção dada a pequenos períodos de retorno (inferiores a 5 anos), superestimando as vazões previstas.

Na Tabela 1 são apresentadas as vazões máximas obtidas através das diferentes distribuições de probabilidade para os diversos períodos de retorno.

Para verificar qual modelo representa melhor os dados observados, foi necessário recorrer aos testes de aderência, que tem por objetivo comparar as probabilidades empíricas de uma variável com as probabilidades teóricas estimadas pela função de distribuição do teste.

Para isso utilizou-se dois testes de aderência comumente citados na literatura, o teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e o teste de Qui-Quadrado, e seus resultados são apresentados na Tabela 2.

Na Tabela 2, verifica-se que as distribuições que obtiveram maior aderência foram a Gama, Weibull, Normal e a Log-Normal segundo o teste de Kolmogorov-Smirnov.

Observa-se que a distribuições que apresentaram maior aderência para vazões máximas são aquelas que normalmente representam vazões de cheia, no caso as distribuições Gama e Log-normal, como cita Clarke (1993).

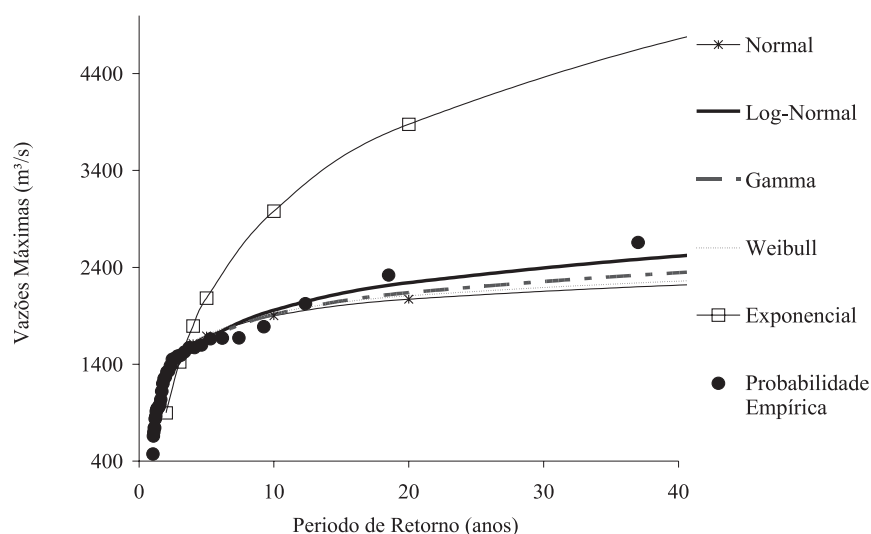


FIGURA 4. Representação da variação das vazões máximas em função do período de retorno.

TABELA 1. Estimativa das Vazões máximas (m^3/s) para diferentes períodos de retorno (em anos) obtido através das distribuições probabilidades teóricas.

Período de retorno	Normal	Log-Normal	Gama	Weibull	Exponencial	Probabilidade empírica
500	2653	3554	3033	2699	8045	*
200	2510	3174	2796	2557	6859	*
100	2393	2892	2609	2438	5961	*
50	2264	2612	2414	2306	5064	*
20	2071	2242	2139	2107	3878	1253
10	1899	1957	1913	1926	2981	1571
5	1692	1660	1660	1706	2083	1672
4	1613	1560	1570	1621	1795	1788
3	1498	1425	1445	1498	1423	2026
2	1295	1212	1240	1281	897	2320

* valor não possível de determinação pela probabilidade empírica pois a extensão da série histórica é de 37 anos.

TABELA 2. Valores de probabilidade dos testes de Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado para distribuições de vazões máximas em relação às funções densidade de probabilidade Normal, Log-Normal, Gama, Weibull e Exponencial.

Testes	Normal	Log-Normal	Gama	Weibull	Exponencial
K-S	0,8379	0,8567	0,9457	0,7960	0,00009
Qui-Quadrado	0,3491	0,2301	0,3048	0,2652	0,0074

Beard (1974, segundo Tucci, 1993) examinou enchentes de 300 estações nos Estados Unidos comparando diferentes métodos, e concluiu que as distribuições Log-Normal e Log-Pearson Tipo III foram as únicas distribuições que não apresentaram resultados tendenciosos.

Ao utilizar o teste de Qui-Quadrado para verificar o ajuste da distribuição teórica à distribuição empírica, o teste revela a distribuição Normal, Weibull, Gama e Log-Normal como as que melhor representam os dados observados, assim como mostrado pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

Contudo, o teste de aderência de Qui-quadrado apresenta limitações. Por exemplo, a frequência de uma classe não pode ser inferior a 5 e os dados são agrupados em classes, perdendo informações, o que não ocorre no teste de Kolmogorov-Smirnov, que além de poder ser realizado com os dados agrupados, pode também ser realizado com os dados isoladamente, sendo normalmente mais eficiente que o Qui-quadrado em pequenas amostras, ou seja, menos de 30 observações (Campos, 1983, segundo Cargnelutti Filho et al., 2004). O teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) de uma amostra trata as observações individuais separadamente e, assim, ao contrário da prova do χ^2 , não perde informações em decorrência da combinação de categorias. Assim o Teste de Kolmogorov-Smirnov pode apresentar maior poder de discriminação que o do Qui-Quadrado.

Sabendo que o valor da estatística D máximo, do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov informa a máxima distância entre as probabilidades empíricas e as teóricas obtidas sob a função de distribuição de probabilidade em teste, sabe-se que os menores valores da estatística fornecem maiores valores de p-valor e, conseqüentemente, maior evidência de não-rejeição da hipótese nula, ou seja, maior aderência dos dados à distribuição em teste.

A literatura existente não contém muita informação sobre a função de poder da prova χ^2 . Como essa prova é mais comumente empregada quando não se dispõe de uma alternativa bem definida, não se pode,

em geral, determinar com exatidão o poder de prova (Siegel, 1975).

PREVISÃO DE VAZÕES MÍNIMAS

Na Figura 5 é apresentada a variação das vazões mínimas em função do período de retorno, em que pode observar a discrepância que a distribuição exponencial possui quando comparado com as demais distribuições de probabilidade, subestimando as vazões mínimas para os diversos períodos de retorno. Assim sendo, a distribuição exponencial não se apresenta como um método adequado para determinar as vazões mínimas do manancial em estudo.

Na Tabela 3 são apresentados as vazões mínimas obtidas através das diferentes distribuições de probabilidade para os diversos períodos de retorno, enquanto na Tabela 4 são apresentados valores de probabilidade dos testes de Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado, para distribuições de vazões mínimas em relação às funções densidade de probabilidade Normal, Log-Normal, Weibull, Gama e Exponencial.

Para as vazões mínimas as distribuições que obtiveram aderência foram a Normal, Log-Normal, Gama e Weibull segundo o teste K-S.

Observa-se que as distribuições que apresentaram maior aderência para vazões mínimas foi a distribuição de Weibull, que é uma distribuição normalmente utilizada para representar vazões mínimas (Clark, 1993). Sendo que a distribuição exponencial acaba subestimando as vazões mínimas.

Pelo teste de Qui-Quadrado, as distribuições de probabilidade que obtiveram maior aderência foram a Normal e a Gamma, os resultados foram compatíveis aos obtidos com o teste de K-S, observando uma tendência dos níveis de significância do teste Qui-Quadrado serem maiores que os obtidos com o teste de K-S.

De acordo como os dados da Tabela 3, verifica-se que a distribuição Weibull é uma das mais precisas para representar as vazões mínimas anuais, mostrando-se inclusive com o desempenho bastante próximo da distribuição Normal.

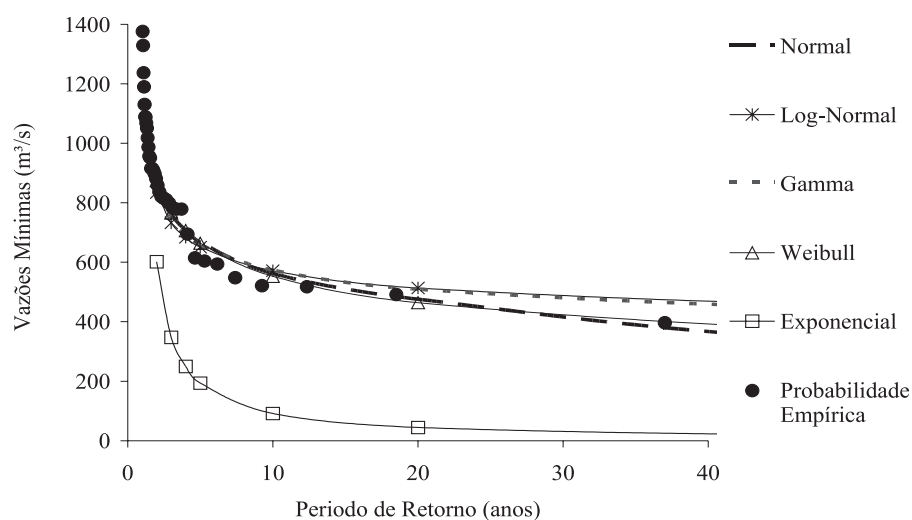


FIGURA 5. Representação da variação das vazões mínimas em função do período de retorno.

TABELA 3. Estimativa das Vazões mínimas (m^3/s) para diferentes períodos de retorno (em anos) e obtidos pelas distribuições probabilidades teóricas.

Período de retorno	Normal	Log-Normal	Gama	Weibull	Exponencial	Probabilidade empírica
500	182	358	329	210	2	*
200	254	390	368	263	4	*
100	313	420	403	312	9	*
50	337	455	443	370	18	*
20	476	513	510	464	45	898
10	563	572	574	553	92	779
5	668	651	659	664	194	549
4	708	684	694	706	250	522
3	764	733	744	766	348	518
2	869	835	846	875	602	492

* valor não possível de determinação pela probabilidade empírica pois a extensão da série histórica é de 37 anos.

TABELA 4. Valores de probabilidade dos testes de Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado para distribuições de vazões mínimas em relação às funções densidade de probabilidade Normal, Log-Normal, Weibull e Exponencial.

Testes	Normal	Log-Normal	Gama	Weibull	Exponencial
K-S	0,833821	0,333496	0,516544	0,871	1,50E-05
Qui-Quadrado	0,512455	0,265252	0,452993	0,3048	4,70E-14

CONCLUSÕES

Observou-se que para as vazões máximas as distribuições que obtiveram maior aderência foram a Gama e a Log-Normal, respectivamente; no entanto, para as vazões mínimas as distribuições que obtiveram maior aderência foram a Weibull e a Normal, respectivamente, segundo o teste de Kolmogorov Smirnov.

Para as vazões máximas e mínimas as distribuições que obtiveram maior aderência foram a Normal e a Gama, respectivamente, através do teste de Qui-Quadrado.

Contudo, conforme o teste de Kolmogorov, as distribuições de probabilidade que obteve maior ajuste na determinação de vazões máximas para os diversos períodos de retornos foram à distribuição Gamma e a Log-normal e para as vazões mínimas é a distribuição Weibull seguida da Normal. Assim, obtendo-se uma boa aderência e se a amostra for razoavelmente grande, pode-se em princípio admitir que o modelo possa

representar adequadamente o conjunto de informações.

Quando se obtém mais de um modelo aderido para a amostra estudada, o pesquisador poderá usar parcimônia, escolhendo o modelo mais simples dentre aqueles ajustados, pois a qualidade das inferências são similares. Assim, convém verificar qual das funções estudadas tem o melhor ajuste, podendo a mesma coincidir com uma distribuição que apresente menor dificuldade de obtenção dos parâmetros e ainda, facilidade nas estimativas de probabilidades.

Os resultados obtidos na estimativa das vazões máximas e mínimas apresentam-se como um dado de importância econômica para a região uma vez que influencia diretamente nos custos e segurança dos projetos de engenharia, como o dimensionamento de canais, proteções contra cheias, pontes, vertedouros, abastecimento de água dos municípios, irrigação, navegação, geração de energia, entre outras aplicações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANA – AGENCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Caderno da região hidrográfica do Paraguai**. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. Brasil: MMA, 140 p., 2006. (a).
2. ANA – AGENCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em 17nov2006. (b).
3. ARAÚJO, W.F.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. DE; MEDEIROS, R.D. DE; SAMPAIO, R.A. Precipitação pluviométrica mensal provável em Boa Vista, Estado de Roraima, Brasil. **Revista Brasileira de Agricultura Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 563-567, 2001.
4. ASSIS, J.P.; NETO, D.D.; MANFRON, P.A.; MARTIN, T.N.; SPAROVEK, G.; TIMM, L.C. Ajuste de séries históricas de temperatura e radiação solar global diária às funções densidade de probabilidade normal e log-normal, em Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 113-121, 2004.
5. CARGNELUTTI FILHO, A.; MATZENAUER, I.R.; TRINDADE, J.K. Ajustes de funções de distribuição de probabilidade à radiação solar global no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Brasília, v. 39, n. 12, p. 1157-1166, 2004.
6. CATALUNHA, M.J.; SEDIYAMA, G.C.; LEAL, B.G.; SOARES, C.P.B.; RIBEIRO, A. Aplicação de cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação pluvial no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 153-162, 2002.
7. CLARKE, R.T. Hidrologia Estatística. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS. Livro da Coleção ABRH, Cap. 17, 1993.
8. DOURADO NETO, D.; ASSIS, J.P.; TIMMM, L.C.; MANFRON, P.A.; SPAROVEK, G.; MARTIM, T.N. Ajuste de modelos de distribuição de probabilidade a séries históricas de precipitação pluvial diária em Piracicaba-SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 153-162, 2002.
9. ESSENWANGER, O.M. **Elementes of Statistical Analysis**. Elsevier, p. 424, 1986.
10. LANNA, E.A. Elementos de Estatística e Probabilidade. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS. Livro da Coleção ABRH, Cap. 4, p. 79-176, 1993.
11. SIEGEL, S. **Estatística não paramétrica para as ciências do comportamento**. McGraw-Hill, 350 p., 1975.
12. STATPOINT. Statgraphics Centurion XV User Manual. Disponível em <http://www.statgraphics.com/main.pdf> >. Acesso em 15fev2006.
13. TUCCI, C.E.M. Vazões máximas e hidrograma de projeto. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS. Livro da Coleção ABRH, Cap. 14, 1993.

*Manuscrito Recebido em: 13 de fevereiro de 2007
Revisado e Aceito em: 15 de fevereiro de 2008*