

Avaliação do tipo de distribuição de probabilidades das vazões máximas diárias anuais no Brasil

Evaluation of the type of probability distribution of annual maximum daily flows in Brazil

Karoline Tenório da Costa¹ e Wilson dos Santos Fernandes²

¹ Programa de pós-graduação em saneamento, meio ambiente e recursos hídricos (SMARH), Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

karol.tdc@gmail.com

² Departamento de engenharia hidráulica e recursos hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

wilson@chr.ufmg.br

Recebido: 02/04/14 - Revisado: 26/09/14 - Aceito: 05/02/15

RESUMO

A análise de frequência de dados hidrológicos ou climatológicos tem sido a principal ferramenta utilizada por engenheiros para a estimativa do risco de falhas nas obras civis. Uma das etapas necessárias para a análise de frequência consiste na escolha de um modelo probabilístico para estimar vazões para determinados tempos de retorno com base em dados observados. No entanto, essa etapa tem sido realizada de maneira subjetiva no Brasil, o que pode comprometer o uso desse método. No presente trabalho, diversos modelos probabilísticos foram avaliados com o intuito de indicar os que melhor se adaptam aos dados fluviométricos brasileiros, tendo em vista fomentar a discussão acerca da padronização dos métodos utilizados na análise de frequência no Brasil. Os dados utilizados foram coletados automaticamente a partir do Web Service da Agência Nacional de Águas (ANA). A adequação das 1943 amostras foi garantida através da aplicação de critérios para eliminar estações com um número grande de dados faltosos e dos testes de Mann-Whitney, Spearman e Pettit, para testar a homogeneidade, a estacionariedade e a presença de saltos, respectivamente. Para a avaliação dos modelos probabilísticos mais adequados aos dados brasileiros foram utilizados os critérios de informação de Akaike (AIC), e Bayesiano (BIC) e um critério baseado no teste de aderência de Anderson Darling (ADC), o diagrama de quocientes de momentos-L, o método de Beard e o software SEAF. Os resultados obtidos com a aplicação de tais procedimentos mostram que as distribuições de probabilidades mais adequadas para os dados brasileiros são as distribuições log-normal de dois e três parâmetros e que a única distribuição, entre as testadas, que não mostrou-se adequada aos dados brasileiros foi a generalizada de Pareto.

Palavras Chave: Vazões máximas no Brasil. Análise de frequência. Testes estatísticos de aderência

ABSTRACT

The frequency analysis of hydrologic and climate data has been the main tool used by engineers to estimate the environmental risk of civil works. One of the steps necessary for frequency analysis consists of choosing a probabilistic model to estimate flows for certain return periods based on observed data. However, this step has been performed subjectively in Brazil, which may compromise the use of this method. In this paper, several probabilistic models were evaluated to indicate which one was the best fit to Brazilian runoff data in order to stimulate discussion about the standardization of the methods used in the frequency analysis. The data were collected automatically from the Web Service of the National Water Agency (ANA). The adequacy of the 1943 samples was ensured through the application of criteria to eliminate stations with a large number of missing data and the Mann-Whitney, Spearman and Pettit tests, to test the homogeneity, stationarity and shifts in the mean and variance, respectively. The Akaike information criterion (AIC), Bayesian information criterion (BIC) and a goodness-of-fit measure based on the Anderson Darling test, the diagram of L-moments ratios, the method of Beard and the SEAF software were used to assess which probabilistic models are the most suitable to Brazilian data. The results obtained with the application of such procedures show that the most appropriate probability distributions for the Brazilian data are the two and three parameter log-normal distributions and that the only distribution among those tested that did not prove adequate to the Brazilian data was the generalized Pareto.

Keywords: Maximum discharges in Brazil. Flood frequency analysis. Goodness of fit tests

INTRODUÇÃO

Uma estimativa precisa do risco da ocorrência de vazões máximas diárias é um elemento chave para o desenvolvimento de um programa eficaz de redução de danos causados por inundações. A análise de frequência de dados hidrológicos, ou climatológicos, tem sido a principal ferramenta utilizada por engenheiros para a estimativa do risco de falhas nas obras civis. Uma das etapas necessárias para a análise de frequência consiste na escolha de um modelo probabilístico para estimar vazões com determinados tempos de retorno com base em dados observados. No entanto, essa etapa tem sido realizada de maneira subjetiva no Brasil, o que pode acarretar em resultados muito diferentes embasados nos mesmos dados, comprometendo o uso desse método.

A busca pela melhor distribuição de probabilidades para a análise de frequência tem sido o assunto de muitos estudos ao redor do mundo. Os primeiros esforços na busca pela distribuição de probabilidades de vazões máximas foram realizados nos Estados Unidos na década de 1960, com a finalidade de desenvolver um programa nacional de seguros contra enchentes e para facilitar a coordenação entre os órgãos governamentais e membros do setor privado que trabalhavam no gerenciamento dos recursos hídricos e que, de alguma forma, necessitavam de conhecimento acerca do risco de inundações (STEDINGER; GRIFFIS, 2008).

Desde então, diversos estudos foram desenvolvidos propondo diferentes métodos para a determinação da melhor distribuição de probabilidades para vazões máximas. Alguns

estudos tentaram determinar qual distribuição se ajusta melhor aos dados observados, seja por meio de testes estatísticos ou por métodos gráficos, como os diagramas de momentos-L. Outros estudos testaram a capacidade de uma distribuição de estimar os quantis de uma população derivada de uma distribuição diferente daquela que se quer testar para diversos tempos de retorno. Não existe um consenso acerca do melhor método, de maneira que, é comum encontrar trabalhos que empregam diversos métodos na busca pela melhor distribuição.

A tabela 1 resume alguns trabalhos desenvolvidos sobre esse tema. Dentre os trabalhos apresentados, destaca-se o de Beard (1974), que, segundo Vogel e McMartin (1991), deu origem ao Bulletin 17B: Guidelines for determining Flood Flow Frequency do U.S. Interagency Advisory Committee on Water Data (IACWD, 1982), que apresenta as diretrizes para a análise de frequência nos Estados Unidos e é usado até os dias de hoje. As distribuições de probabilidades (DP) citadas em tal tabela são a log-Normal de 2 parâmetros (LN2), log-Normal de 3 parâmetros (LN3), log-Pearson tipo III (LP3), generalizada de valores extremos (GEV), Wakeby (WAK) e generalizada de Pareto (GPA).

Como se pode observar, existem muitos métodos para a escolha da melhor distribuição de probabilidades para as vazões máximas, entretanto, não há consenso acerca da melhor distribuição ou do melhor método. Desde a introdução dos momentos-L, eles têm sido recomendados para verificar o ajuste de distribuições de probabilidades sobre amostras de vazões. Porém, existem estudos apontando que outros métodos podem obter resultados tão ou mais precisos que os obtidos utilizando

Tabela 1 - Resumo dos principais trabalhos desenvolvidos buscando a melhor distribuição de probabilidades para um determinado local

Referência	Local	DP recomendada	Método de Seleção da Distribuição	Número de Estações	Menor série (anos)
Benson (1968)	Estados Unidos	LN2, LP3	Comparação entre tempo de retorno observado e calculado com as distribuições	10	44
Beard (1974)	Estados Unidos	LN2, LP3	Método de Beard	300	30
Wallis e Wood (1985)	Série Sintética	GEV, WAK	Comparação entre tempo de retorno calculado a partir da distribuição usada para determinar a série sintética e calculado com as distribuições	20	20
Gunasekara e Cunnane (1992)	Série Sintética	LP3 com coeficiente de assimetria regionalizado	Método de Beard	2500	10
McMahon e Srikanthan (1981)	Austrália	LP3	Diagramas de quociente de momentos	172	-
Vogel (1993a)	Estados Unidos	LN2, LP3, LN3, GEV	Diagrama de momentos-L e método de Beard	383	30
Vogel (1993b)	Australia	LP3, GPA, LN2, LN3 e GEV	Diagrama de momentos-L e método de Beard	61	20
Önöz e Bayazit (1995)	Mundo	GEV	Testes Estatísticos de Aderência, Diagrama dos Momentos-L, Método de Beard	19	60
Vogel e Wilson (1996)	Estados Unidos	GEV, LN3, LP3	Diagrama de momentos-L	1490	30

os momentos-L, dependendo do tamanho da amostra. Critica-se também que muito do que têm sido discutido e proposto na academia não é adotado pelos engenheiros que utilizam a análise de frequência na prática (BOBÉE et al., 1993). Vale ressaltar que, em vista das mudanças ocorridas desde a sua publicação, as diretrizes sobre análise de frequência australianas e americanas estão em processo de atualização (EA, 2013; USGS, 2013).

No presente trabalho, pretende-se avaliar os modelos probabilísticos que melhor se adaptam aos dados fluviométricos brasileiros, tendo em vista fomentar a discussão acerca da padronização dos métodos utilizados na análise de frequência no Brasil.

MATERIAIS E MÉTODOS

Dados de vazão máxima diária anual

Foram criadas sub-rotinas em Visual Basic para coletar os dados das estações fluviométricas a partir do Web Service da Agência Nacional de Águas (ANA). Foram recolhidos dados de 1943 estações neste banco de dados, com séries variando entre 10 e 83 anos. O início do ano hidrológico de cada estado foi determinado a partir das normais climatológicas de precipitação do período de 1961 a 1990.

Grande parte das séries do Web Service da ANA possui porcentagem significativa de dados faltosos, contém poucos anos de dados, ou dados suspeitos. Essas falhas dificultam a análise estatística dos dados. Como se está trabalhando com valores máximos anuais de vazões, em séries com falhas existe a possibilidade de que esse valor máximo esteja entre os dados faltosos. Quanto maior a porcentagem de dados faltosos, maior a probabilidade de que o valor máximo real não tenha sido medido. Séries pequenas podem não ser representativas e a presença de pontos atípicos pode indicar erros de medição.

Critérios de eliminação de anos

Dentro desse contexto, Papalexiou e Koutsoyiannis (2013) afirmam que existem três possibilidades para extrair o valor máximo de um ano com falhas: a primeira seria estabelecer critérios para avaliar a validade do valor máximo encontrado, a segunda aceitar somente os valores máximos de anos completos e a terceira, aceitar todos os valores máximos. Observa-se que, caso a segunda alternativa seja escolhida, muitos valores de vazões máximas reais poderiam ser descartados, uma vez que não há uma avaliação do período do ano hidrológico que apresenta falhas ou da porcentagem de dados faltosos. Já sobre a terceira alternativa, pode-se dizer que muitos valores de vazões máximas anuais aceitos não seriam os verdadeiros máximos, uma vez que não há uma análise dos dados faltosos.

Dessa maneira, pode-se admitir que a primeira opção é a mais viável para a extração dos valores máximos de um ano com falhas. Assim, faz-se necessário a aplicação de alguns critérios para a seleção dos valores máximos de anos com falhas. No presente trabalho foram usados critérios adaptados de Papalexiou e Koutsoyiannis (2013). Para a aplicação desses critérios,

deve-se selecionar e ordenar (classificar em ordem crescente) os valores máximos anuais de cada estação, considerando o ano hidrológico e sem levar em conta as falhas das séries. Os dois critérios de eliminação usados são:

- A posição (ordem) é menor ou igual a $40\% \times N$ (onde N é o tamanho da série de vazões máximas), ou seja, quando a vazão em questão pertence aos 40% menores valores;
- A porcentagem de dados faltosos em um determinado ano é maior ou igual a $1/3$, ou seja, o ano em questão tenha mais de 4 meses de dados faltando.

Caso esses dois critérios sejam atendidos simultaneamente por determinado valor de vazão máxima, o ano em que esse valor aconteceu deve ser rejeitado. Com o uso desses critérios, consegue-se eliminar anos com muitas falhas e com dados muito baixos, em que é provável que o valor máximo real não tenha sido contabilizado.

Tamanho mínimo das séries

Outro critério utilizado para a seleção das estações foi uma análise sobre o tamanho mínimo das séries e a representatividade geográfica das estações. Como grande parte das estações do país são relativamente novas (com menos de 30 anos de dados), existe a possibilidade de se perder a representatividade de todas as regiões do país por meio dessas estações caso o tamanho mínimo das séries seja alto. À medida que o tamanho mínimo das séries cresce, a representatividade das regiões geográficas Norte e Centro-Oeste diminuem, ou seja, menos estações dessas regiões são consideradas no estudo. Como o foco do presente trabalho é em uma avaliação dos dados do país, a representatividade das regiões foi considerada mais importante do que o tamanho das séries. Sendo assim, para realizar um trabalho que representasse a maior parte das regiões brasileiras, decidiu-se que seriam utilizadas todas as estações com mais de 10 anos de dados, como preconizado pela IACWD (1982).

Homoscedasticidade

Para se trabalhar com a análise de frequência de vazões é necessário assumir que a amostra utilizada é aleatória, simples e extraída de uma única população. Portanto, assume-se que as hipóteses de aleatoriedade, independência, homogeneidade e estacionariedade sejam aceitas.

Nesta etapa do trabalho, é descrita a aplicação de testes estatísticos para a verificação das hipóteses fundamentais da análise de frequência de uma variável hidrológica. As hipóteses de aleatoriedade e independência não foram testadas no presente trabalho. Por outro lado, a independência é parcialmente garantida pela forma que a série é amostrada. Ou seja, do ponto de vista estritamente hidrológico, não faz sentido imaginar que o máximo diário anual de vazão guarde qualquer relação com o máximo do ano anterior, já que o ano hidrológico é estabelecido entre dois períodos de estiagem. Já a aleatoriedade é parcialmente garantida pela natureza do fenômeno analisado, já que a formação de vazões em uma bacia é, sabidamente, um evento estocástico.

Como a maioria das estações possui séries curtas, é difícil indicar a presença de tendências. Entretanto, é importante identificar a presença de saltos nos dados. No Brasil, existe um grande número de reservatórios sem informação de localização e capacidade, cuja presença pode causar saltos nas séries de vazões. Um teste indicado para a identificação de descontinuidades em séries temporais é o de Pettit (PETTTTT, 1979). Diversos estudos (VILLARINI et al., 2009; VILLARINI et al., 2011a; VILLARINI et al., 2011b; VILLARINI; SMITH, 2010, entre outros), mostram que esse teste produz bons resultados, e, devido a sua simplicidade, foi adotado no presente estudo. A homogeneidade e a estacionariedade das séries foram avaliadas, respectivamente, pelos testes de Mann-Whitney e Spearman. Tais testes têm sido utilizados em análise de frequência de séries hidrológicas e não serão detalhados aqui. Para mais informações sobre os testes de hipóteses utilizados, o leitor pode consultar Naghettini e Pinto (2007).

Os testes não-paramétricos de Mann-Whitney, Spearman e Pettit foram aplicados às 1943 amostras considerando um nível de significância de 10%. A partir da aplicação de tais testes, pôde-se concluir que 1409 amostras, ou 72,5% do total, podem ser consideradas homogêneas, 1364, ou 70,2% do total, estacionárias e 1610, ou 82,9% do total, não apresentam saltos na média. Apenas 1253 amostras não tiveram a hipótese nula rejeitada em nenhum dos três testes aplicados, e portanto, foram consideradas adequadas para serem utilizadas nas próximas etapas do trabalho.

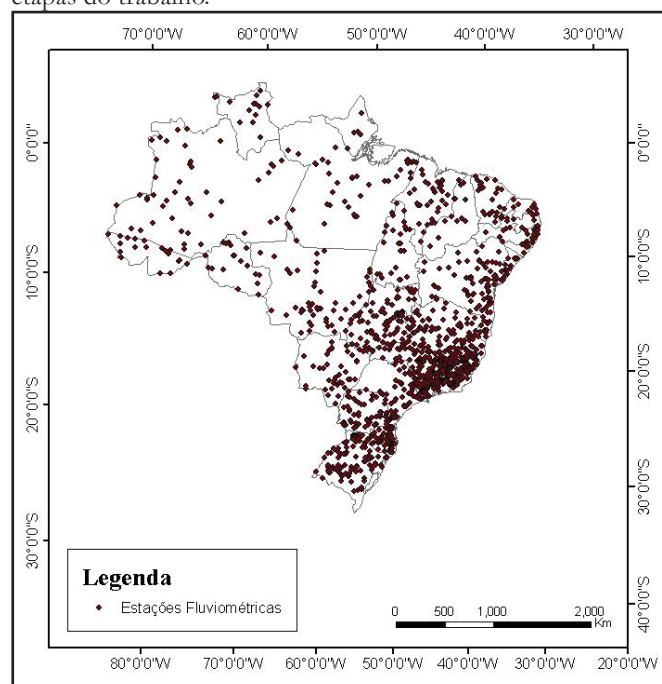


Figura 1 – Mapeamento das estações consideradas no estudo após a aplicação dos testes estatísticos para a adequação das amostras

A figura 1 apresenta a distribuição geográfica das 1253 estações cujas amostras foram selecionadas. Embora a porcentagem de estações na região Norte em relação ao total tenha sido similar a porcentagem calculada com as amostras

iniciais, é visível a pouca quantidade de estações nessa região, que é a maior em dimensão do país. Ainda assim, no presente trabalho, assume-se que tais estações representem a região em que estão localizadas.

DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADES

Foram utilizadas nove distribuições de probabilidades no trabalho, sendo quatro de dois parâmetros, a LN2, a exponencial (EXP), a gama (GAM) e a Gumbel (GUM); e cinco de três parâmetros, a Pearson tipo III (PE3), a GEV, a LP3, a LN3 e a GPA. Essas distribuições foram selecionadas devido à sua ampla utilização na área da hidrologia, especialmente no que diz respeito a vazões máximas. Os parâmetros das distribuições foram calculados utilizando o método dos momentos-L. Vale ressaltar que em alguns métodos de seleção não foi possível a utilização de todas essas distribuições pois foram utilizados softwares fechados, e portanto, não passíveis de modificações, para sua aplicação.

PROCEDIMENTOS UTILIZADOS PARA SELECIONAR A DISTRIBUIÇÃO

Para a avaliação e seleção dos modelos mais adequados para os dados brasileiros, foram utilizados os seguintes procedimentos:

- Critérios de Informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC) e um critério baseado no teste de aderência de Anderson Darling (ADC), através da aplicação da função MSCLaio2008 do pacote nsRFA da linguagem R.
- Diagrama de momentos-L;
- Uma avaliação não-paramétrica da frequência de cheias (Método de Beard);
- Análise comparativa dos quocientes de momentos-L amostrais e teóricos e uma avaliação das posições de plotagem empíricas e teóricas, por meio do teste de Filliben, através da aplicação do software SEAF, desenvolvido por Candido (2003).

Todos esses procedimentos foram implementados de maneira que sua aplicação aos dados das estações em estudo fosse automatizada, uma vez que uma análise posto a posto para cada um dos métodos seria impraticável.

Critério de Informação de Akaike

O critério de Akaike (AIC, do inglês Akaike information criterion) é um estimador da informação (ou distância) de Kullback-Leibler (K-L) para a seleção de modelos. A informação de K-L representa a distância relativa entre um modelo ajustado e o modelo real, a partir do qual os dados são gerados. Akaike concluiu que a máxima log-verossimilhança é um estimador enviesado da informação de K-L, sendo o viés aproximadamente igual ao número de parâmetros do modelo ajustado. Este método é recomendado quando o número de observações é maior que

40 vezes o número de parâmetros do modelo. Para outros casos recomenda-se o uso de uma versão do método, chamada AICc, em que o viés é corrigido (BURNHAM; ANDERSON, 2002).

Critério de Informação Bayesiano

Um outro método utilizado para a seleção de modelos probabilísticos é o critério de informação bayesiano (BIC, do inglês Bayesian information criterion) ou critério de informação de Schwarz. Este método possui um formato semelhante ao AIC, embora tenha um embasamento teórico diferente, seguindo um ponto de vista bayesiano. O termo relativo ao número de parâmetros, no caso do BIC, é multiplicado por um fator correspondente ao logaritmo natural do número de observações da amostra. Considera-se que o melhor modelo para representar os dados é o que apresenta o menor valor de BIC (BURNHAM; ANDERSON, 2002).

Testes estatísticos de aderência

De acordo com Naghettini e Pinto (2007), os testes de aderência são instrumentos da estatística matemática que auxiliam a tomada de decisão quanto à adequação ou inadequação de um certo modelo distributivo a uma dada amostra. O teste de aderência de Anderson Darling baseia-se na diferença entre as funções de probabilidades empírica e teórica de variáveis aleatórias contínuas, enfatizando as discrepâncias entre as caudas. Laio (2004) propôs um critério de seleção de modelos baseado no teste de Anderson-Darling, que avalia também a complexidade dos modelos adotados. O teste de aderência de Filliben baseia-se na existência de uma associação linear forte entre os quantis teóricos, calculados a partir de uma distribuição de probabilidades $F_X(x)$, e os observados, indicando que as observações podem ter sido extraídas de uma população cuja distribuição de probabilidades seja $F_X(x)$.

Método de Beard

Um método de simples aplicação para determinar a distribuição que melhor se ajusta aos dados observados foi desenvolvido por Beard (1974). Esse método consiste em calcular o número de vezes em que um quantil de um determinado tempo de retorno calculado a partir de uma distribuição de probabilidades é ultrapassado pelos dados históricos, e comparar esse valor a um número de excedências esperado, determinado pela razão entre o número de anos de dados e o tempo de retorno adotado. Beard (1960) mostrou que um estimador de um quantil de tempo de retorno T não é excedido, de modo geral, com uma probabilidade média $p = 1/T$, devido a efeitos causados pelo tamanho da amostra a partir da qual o quantil foi estimado. Utilizando quantis de 100 anos de período de retorno e baseando-se em uma amostra de 10 anos de dados de vazões anuais máximas, Beard (1974) concluiu que o quantil calculado seria excedido em média 3 vezes mais do que o assumido e que, mesmo com amostras maiores, ainda existiria uma diferença considerável entre o número de excedências teórico e o observado. Para eliminar essa diferença, pode-se fazer um ajuste no estimador

do quantil de tempo de retorno T , com base na probabilidade de excedência esperada para o tamanho N da amostra considerada. A probabilidade de excedência esperada é definida como a média da probabilidade de excedência verdadeira de todas as estimativas calculadas para uma determinada frequência a partir de amostras sucessivas de um tamanho específico (BEARD, 1974). Beard (1978) desenvolveu equações para o cálculo da probabilidade de excedência esperada para distribuições normais em função do tempo de retorno T adotado e do tamanho da amostra. Gunasekara e Cunnane (1991) mostraram que tais equações produzem resultados satisfatórios com quaisquer distribuições de probabilidades.

Momentos-L

O diagrama de momentos-L compara estimativas dos quocientes de momentos-L (L-CV, assimetria-L e Curtose-L) com os valores teóricos correspondentes. No diagrama, a distância entre um ponto da amostra e uma curva ou ponto de uma certa distribuição pode ser tomada como uma medida que indica a qualidade do ajuste (quanto menor a distância, melhor o ajuste). A grande vantagem no uso do diagrama de momentos-L é que se pode comparar o ajuste de várias distribuições a muitas amostras usando apenas um gráfico (VOGEL; WILSON, 1996).

Quando muitas amostras são utilizadas na análise, é difícil visualizar a distância de cada ponto, de maneira que uma distribuição de probabilidades é considerada adequada para representar as amostras se ela cruzar o centro da nuvem formada pelas amostras e seguir a tendência dessa nuvem (YUE; HASHINO, 2007). Para ilustrar esses dois critérios de uma maneira mais clara no diagrama de momentos-L, em muitos estudos são utilizadas regressões lineares das amostras, enquanto em outros se observa o uso da média amostral. Peel et al. (2001) argumentam que embora esses critérios produzam uma avaliação visual rápida, essa avaliação é subjetiva e não substitui uma análise mais objetiva que leve em conta a variabilidade e o tamanho das amostras. Um método de avaliar a qualidade do ajuste das distribuições, que pode ser utilizado simultaneamente à interpretação visual do diagrama de momentos-L, foi desenvolvido por Kroll e Vogel (2002) e é dado pela média ponderada das distâncias ortogonais (AWOD, do inglês Average Weighted Orthogonal Distance).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Critérios de informação e seleção de modelos

A maior amostra considerada no presente trabalho tem 83 anos de dados. Como são considerados apenas modelos de 2 ou 3 parâmetros, decidiu-se utilizar o AICc em todas as amostras, uma vez que a medida que n aumenta, o valor do AICc converge para o valor do AIC. Entretanto, nas estações com mais de 80 anos de dados, as duas versões do critério de Akaike foram aplicadas.

A figura 2 expõe os resultados referentes a aplicação dos três critérios (AICc, BIC e ADC) aos dados das 1253 estações

fluviométricas consideradas no estudo. É visível que os três métodos utilizados indicam com mais frequência a distribuição LN2. Em apenas 586 estações os três métodos indicaram a mesma distribuição de probabilidades, sendo que na maior parcela de estações, em 216 ou 37% das 586, a distribuição indicada foi a LN2.

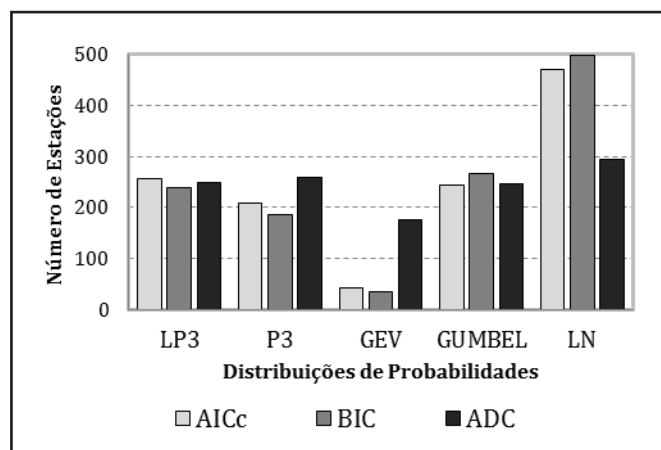


Figura 2 – Distribuições de probabilidades indicadas com a aplicação do AICc, do AIC e do ADC

O AIC foi aplicado as duas estações de tamanho superior ou igual a 80 anos. A primeira estação (código: 36160000) está localizada no estado do Ceará e tem 83 anos de dados. Nessa estação o AIC, indicou como melhor modelo probabilístico a LP3, assim como todos os outros três métodos aplicados. Na segunda estação (código: 61135000), localizada no estado de Minas Gerais, o AIC e o AICc indicaram a mesma distribuição, a GUM. Ao se analisar todas as estações, mesmo aquelas cujos tamanhos não satisfazem o critério de aplicação do AIC, não é observada uma diferença muito grande entre os resultados obtidos com o AIC e com o AICc. Em 92% das estações testadas, os resultados obtidos com o AIC e com o AICc foram iguais.

A escolha da função MSCLaio 2008 se deu devido a facilidade de aplicação. No entanto, pode-se perceber algumas limitações de se utilizar uma função desenvolvida por terceiros. Uma delas foi a impossibilidade de acrescentar outros modelos probabilísticos na análise. Por esse motivo, apenas os cinco modelos vistos nesse item foram utilizados. Outra limitação foi a presença de erros inerentes ao programa, que não puderam ser contornados. Em 30 estações, os resultados não foram analisados devido a tais erros. Notou-se também que embora o princípio da parcimônia esteja implícito no cálculo dos critérios de informação, algumas vezes os resultados obtidos com a análise de dois modelos eram semelhantes, entretanto, nem sempre o modelo selecionado era o mais simples. Mesmo com tais limitações, considerou-se que os resultados obtidos com a aplicação da função MSCLaio2008 são satisfatórios de acordo com os objetivos do trabalho.

SEAF – Sistema especialista de análise de frequência

O software SEAF (acrônimo de Sistema Especialista de Análise de Frequência), desenvolvido por Candido (2003),

foi utilizado nesta etapa do trabalho uma vez que ele indica o modelo probabilístico mais adequado para uma amostra a partir de três critérios: intervalos de confiança referentes aos quocientes de momentos-L, intervalos de confiança construídos a partir do teste de Filliben e uma análise da complexidade dos modelos, baseada no princípio da parcimônia. Além disso, tal software utiliza elementos da lógica fuzzy e de inteligência artificial com o intuito de simular o raciocínio de um especialista em análise de frequência no processo de decisão. Mais informações sobre o SEAF podem ser encontradas em Candido (2003) e Candido e Naghettini (2008).

Para cada estação analisada, o SEAF define uma ordem de classificação das distribuições de probabilidade testadas, sendo o primeiro lugar ocupado pela distribuição que melhor se ajusta aos dados e o sétimo, pela pior.

A tabela 2 expõe os resultados referentes à aplicação do software SEAF aos dados das 1253 estações fluviométricas consideradas no estudo. Nessa tabela, é possível observar a quantidade de vezes em que uma distribuição foi classificada em qualquer ordem (da primeira a sétima). Percebe-se que a distribuição mais indicada pelo software para modelar os dados brasileiros é a GUM, seguida pela LN2. No entanto, em muitas estações o SEAF ordena apenas algumas das distribuições consideradas nas análises, uma vez que as distribuições podem ser rejeitadas de acordo com alguns critérios adotados pelo software. Sendo assim, a distribuição que foi considerada viável e classificada pelo software em qualquer ordem mais vezes foi a LN2.

Tabela 2 – Ordem de classificação das distribuições pelo software SEAF

Dist.	Classificação						
	1	2	3	4	5	6	7
EXP	79	46	56	60	22	1	0
GUM	366	272	164	69	67	25	4
LN2	327	298	222	81	37	30	3
PE3	170	250	305	66	5	1	0
GPA	17	22	7	0	0	0	0
GEV	141	108	57	46	5	0	0
LP3	35	66	62	12	7	0	0

Novamente algumas limitações foram observadas durante a utilização do SEAF. Uma delas é a impossibilidade de acrescentar outras distribuições cuja análise foi proposta pelo presente trabalho, como a LN3 e a GAM. Embora remover uma distribuição das análises feitas pelo software seja simples, acrescentar outras distribuições é uma tarefa complexa, e por isso, decidiu-se que ela não seria realizada. Outra limitação do uso do SEAF são os erros que o programa apresenta. O software SEAF realiza os cálculos necessários à sua análise de lógica fuzzy com uma série de métodos numéricos que, para uma determinada combinação de características estatísticas da amostra (média, variância, assimetria, etc...), não converge. Por outro lado, os autores do software não relatam em quais situações os métodos numéricos não convergem. Assim, o software foi utilizado para todos os postos, sendo descartados aqueles onde

o software teve comportamento não esperado ou simplesmente não funcionou. Devido a essa limitação, 119 estações, distribuídas proporcionalmente entre as regiões geográficas (cerca de 10% do total de dados de cada região) não foram analisadas. Por outro lado, o princípio da parcimônia utilizado pelo SEAF é refletido nos resultados, uma vez que os dois modelos mais indicados possuem apenas dois parâmetros.

Número de excedências esperado

O método de Beard foi aplicado a cada uma das 1253 estações fluviométricas. Para cada tempo de retorno analisado ($T=100$ e 1000 anos) foi realizada uma contagem do número de vezes que os quantis calculados ultrapassavam os valores observados, considerando tanto a probabilidade de excedência especificada ($PS=1/T$) quanto a probabilidade de excedência esperada.

A tabela 3 mostra o número de excedências calculado com a probabilidade de excedências esperada (P_N) e a especificada (P_S). Os valores obtidos são comparados com o número de excedências teórico, ou o quociente do valor total de anos pelo tempo de retorno, e com os intervalos de confiança a 95% calculados considerando que o número de excedências siga uma distribuição binomial. Os valores destacados com um asterisco estão dentro do intervalo de confiança calculado.

Pode-se perceber que para cada tempo de retorno, foram

obtidos resultados diferentes, o que pode indicar que distribuições diferentes podem ser selecionadas como a melhor distribuição para se ajustar a uma mesma amostra dependendo do tempo de retorno em interesse. As distribuições que apresentaram os melhores resultados foram a LN2 e a LN3.

Outra maneira de analisar os resultados obtidos com o método de Beard é calcular o erro entre o número de excedências determinado com o uso do método e o número de excedências teórico. A tabela 4 mostra esse erro para os números de excedências calculados com as probabilidades de excedência esperada. É possível observar resultados diferentes em cada tempo de retorno analisado. A distribuição LN3 apresenta o menor erro médio, e também o menor erro para os números de excedências calculados com 100 e 1000 anos de tempo de retorno.

De maneira geral, os resultados obtidos e expostos nas tabelas mostram que embora tenham sido calculados número de excedências próximos aos valores teóricos com a distribuição LN3 em todos os tempos de retorno, outras distribuições obtiveram resultados melhores, quando se analisa a distância entre o número de excedências calculado e o teórico em um tempo de retorno específico. Ainda assim, considera-se que a distribuição LN3 é a mais indicada para os dados brasileiros de acordo com esse método.

A grande vantagem deste método é a sua simplicidade. No entanto, Beard (1974) recomenda que sejam utilizadas amostras com um tamanho mínimo de 30 anos, o que não é

Tabela 3 – Comparação entre o número de excedências calculado para diversos tempos de retorno e o número de excedências teórico

Distribuição	T=100		T=1000	
	P_S	P_N	P_S	P_N
LN2	229	353*	39*	61
EXP	116	202	15	28*
GAMA	365*	530	66	123
PE3	277	454	39*	76
GEV	270	427	62	86
GUM	316	478	46*	83
LP3	393*	521	168	202
LN3	229	390*	20	43*
GPA	847	989	608	659
Num. de Excedências Teórico	374,3		37,43	
Intervalo	337	412	25	49

Tabela 4– Erro (%) entre o número de excedências calculado com a probabilidade de excedência esperada e o número de excedências teórico

Tempo de Retorno	LN2	EXP	GAMA	PE3	GEV	GUM	LP3	LN3	GPA
10	0,060	0,068	0,036	0,063	0,108	0,052	0,030	0,103	0,042
20	0,136	0,232	0,098	0,137	0,185	0,070	0,074	0,166	0,186
100	0,057	0,460	0,416	0,213	0,141	0,277	0,392	0,042	1,642
1000	0,630	0,252	2,286	1,030	1,298	1,217	4,397	0,149	16,606
Media	0,221	0,253	0,709	0,361	0,433	0,404	1,223	0,115	4,619

o caso do presente estudo. Portanto, o tamanho reduzido das amostras utilizadas pode ter influenciado os resultados obtidos.

Diagrama dos momentos-L

A figura 3 compara a relação entre τ_3 e τ_4 das vazões máximas anuais com as relações teóricas das distribuições GEV, GPA, LN3 e PE3. A curva denominada OLB representa o limite inferior da relação entre τ_3 e τ_4 . É difícil definir a distribuição mais adequada para as vazões máximas anuais somente com a análise dessa figura, devido à grande quantidade de dados. No entanto, observa-se que nenhuma das distribuições analisadas pode ser descartada. Uma análise complementar a essa figura é exposta na tabela 5, que apresenta os AWODs calculados para cada distribuição. Já a figura 4 apresenta uma comparação da relação entre τ_3 e τ_4 dos logaritmos naturais das vazões máximas anuais com as relações teóricas da distribuição PE3, representando a distribuição LP3, uma vez que a relação teórica entre τ_3 e τ_4 para a LP3 não é conhecida. Assim como na figura anterior, não é possível descartar a distribuição LP3, uma vez que aparentemente a curva que representa tal distribuição cruza os dados em um ponto próximo do centro geométrico da massa de dados. A figura 5 mostra a comparação da relação entre τ_3 e τ das vazões máximas anuais com as relações teóricas das distribuições LN2 e GAMA. Essa figura foi construída utilizando as aproximações polinomiais definidas por Vogel e Wilson (1996) para a relação entre τ_3 e τ_4 para as distribuições LN2 e GAMA. Em tal figura é possível observar que, embora as distribuições não possam ser descartadas, seu ajuste é visivelmente pior do que o das distribuições de três parâmetros.

A tabela 5 complementa a análise dos diagramas de momentos-L apresentando os AWODs calculados para o Brasil. Como o menor valor de AWOD indica a distribuição mais adequada para a região analisada, pode-se afirmar que no caso dos dados brasileiros, a distribuição mais adequada é a LP3, embora as outras distribuições avaliadas não possam ser consideradas inadequadas.

Conforme mencionado previamente, a maior vantagem dos diagramas dos momentos-L é poder utilizar apenas um elemento gráfico para analisar o ajuste de várias distribuições a um grande número de amostras. Entretanto, como foi observado no presente item, a análise dos diagramas de momentos-L pode ser subjetiva, caso ela não seja complementada por outros parâmetros. Os resultados obtidos mostraram que o método apresenta resultados melhores com distribuições de 3 parâmetros. Isso talvez possa ser atribuído ao fato de que os dados brasileiros extrapolam os intervalos em que a aproximação polinomial da relação entre τ_3 e τ_4 definida por Vogel e Wilson (1996) foi definida.

Tabela 5 – Cálculo dos AWODs para diversas distribuições no Brasil

GEV	GPA	LN3	PE3	LP3	LN2	GAM
0,062	0,089	0,061	0,063	0,058	0,109	0,138

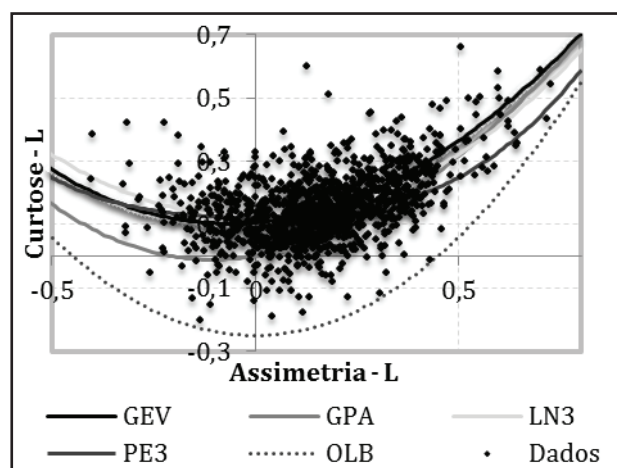


Figura 3 - Diagrama de momentos-L mostrando a relação entre τ_3 e τ_4 para as vazões máximas anuais

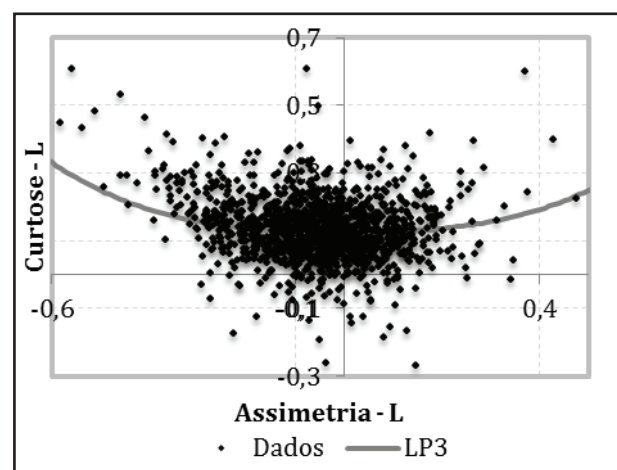


Figura 4 - Diagrama de momentos-L mostrando a relação entre τ_3 e τ_4 para os logaritmos naturais das vazões máximas anuais

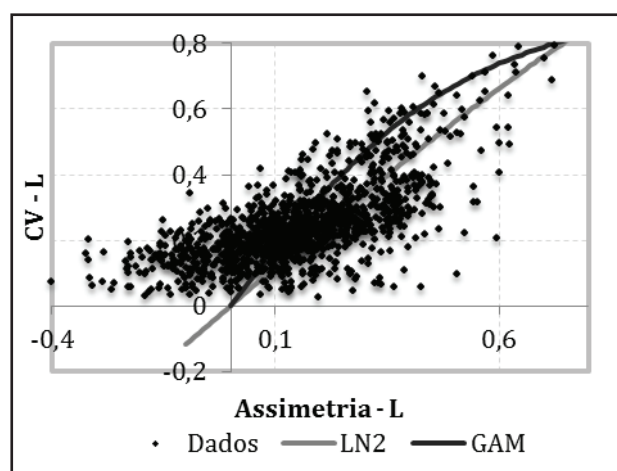


Figura 5 - Diagrama de momentos-L mostrando a relação entre τ_3 e τ para as vazões máximas anuais

CONCLUSÕES

Todos os métodos discutidos previamente possuem embasamento diferente e somente com as análises realizadas no presente trabalho não é possível afirmar se um método conduz a resultados melhores que os demais. Sendo assim, cada resultado é avaliado individualmente, não havendo uma forma de comparar quantitativamente os resultados obtidos. No entanto, pode-se observar que todos os métodos indicam a mesma família de distribuições de probabilidades, ou até a mesma distribuição, como a mais adequada para os dados brasileiros.

Dentro desse contexto, ao se analisar os resultados obtidos para todos os dados brasileiros, percebe-se que as distribuições log-normal de dois e de três parâmetros são indicadas entre as mais adequadas por todos os métodos. No entanto, no método do diagrama dos quocientes de momentos-L, a distribuição LP3 obteve resultados melhores que a log-normal, e no caso do software SEAF, a distribuição GUM obteve um resultado tão bom quanto a log-normal. De todas as distribuições de probabilidades analisadas no presente trabalho, a única que não se mostrou adequada aos dados brasileiros, sendo indicada pouquíssimas vezes pelos métodos adotados e obtendo resultados ruins em relação às outras distribuições, foi a GPA.

Embora não seja possível conhecer população a partir da qual os dados de vazões são originados, estudos como este podem fornecer alguma orientação sobre quais distribuições de probabilidades podem ser utilizadas para descrever aproximadamente tal população. É importante que existam indicações acerca da “melhor” distribuição de probabilidades para a análise de frequência, uma vez que a escolha entre as distribuições de probabilidade pode influenciar grandemente os valores utilizados nos projetos. Diante do que foi exposto no presente trabalho não é possível decidir qual a melhor distribuição para os dados brasileiros, uma vez que o país possui um território extenso e com características climáticas e hidrológicas distintas, embora existam indícios que a distribuição log-normal seja adequada de maneira geral. Ressalta-se que não é possível basear-se somente no resultado do presente trabalho para a escolha das distribuições de probabilidades para a análise de frequência de vazões máximas no Brasil. É possível que em determinadas regiões do país, outras distribuições sejam tão ou mais adequadas do que a log-normal. Portanto, em estudos posteriores, pretende-se avaliar o desempenho das distribuições de probabilidades em regiões menores do país. Recomenda-se ainda que outros estudos acerca dessa escolha, utilizando outros métodos, sejam realizados.

REFERÊNCIAS

- BEARD, L. R. Flood flow frequency techniques. Austin: Center for research in water resources, University of Texas, 1974.
- BEARD, L. R. Impact of hydrologic uncertainties on flood insurance. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, v. 104, n. 11, p. 1473-1483, Nov. 1978.
- BEARD, L. R. Probability estimates based on small normal distribution samples. *Journal of Geophysical Research*, v. 65, n. 7, p. 2143-2148, July 1960.
- BENSON, M. A. Uniform flood frequency estimating methods for federal agencies. *Water Resources Research*, v. 4, n. 5, p. 891-908, Oct. 1968.
- BOBÉE, B.; CAVADIAS, G.; ASHKAR, F.; BERNIER, J.; RASMUSSEN, P. Towards a systematic approach to comparing distributions used in flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, v. 142, n. 1-4, p. 121-136, Feb. 1993.
- BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. Model Selection and Multimodel Inference. 2nd ed. New York: Springer, 2002.
- CÂNDIDO, M. O. SEAF Um Protótipo de um Sistema Especialista para Análise de Frequência Local de Eventos Hidrológicos Máximos Anuais. 2003. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- CANDIDO, M. O.; NAGHETTINI, M. C. SEAF – a prototype of an expert system for at-site frequency analysis of hydrological annual maxima. *Avances en Recursos Hidráulicos*, n. 18, p. 37-56, 2008.
- EA – ENGINEERS AUSTRALIA. Revision Process. 2013. Disponível em: <<http://www.arr.org.au>>. Acesso em: 25 maio 2014.
- GUNASEKARA, T. A. G.; CUNNANE, C. Expected probabilities of exceedance for non-normal flood distributions. *Journal of Hydrology*, v. 128, n. 1-4, p. 101-113, Nov. 1991.
- GUNASEKARA, T. A. G.; CUNNANE, C. Split sampling technique for selecting a flood frequency analysis procedure. *Journal of Hydrology*, v. 130, n. 1-4, p. 189-200, Jan. 1992.
- IACWD - INTERAGENCY COMMITTEE ON WATER DATA. Guidelines for determining flood flow frequency: Bulletin 17B (revised and corrected), Hydrology Subcommittee. Reston: U.S. Department of the Interior, 1982.
- KROLL, C. N.; VOGEL, R. M. Probability distribution of low streamflow series in the United States. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 7, n. 2, p. 137-146, Mar. 2002.
- LAIO, F. Cramer – von Mises and Anderson-Darling goodness of fit tests for extreme value distributions with unknown parameters. *Water Resources Research*, v. 40, n. 9, Sept. 2004.
- LAIO, F.; DI BALDASSARRE, G.; MONTANARI, A. Model selection techniques for the frequency analysis of hydrological extremes. *Water Resources Research*, v. 45, n. 7, July 2009.
- MCMAHON, T. A.; SRIKANTHAN, R. Log Pearson III distribution - is it applicable to flood frequency analysis of Australian streams? *Journal of Hydrology*, v. 52, n. 1-2, p. 139-

148, June 1981.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. Hidrologia estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

ÖNÖZ, B.; BAYAZIT, M. Best-fit distributions of largest available flood samples. *Journal of Hydrology*, v. 167, n. 1–4, p. 195–208, May 1995.

PAPALEXIOU, S. M.; KOUTSOYIANNIS, D. Battle of extreme value distributions: a global survey on extreme daily rainfall. *Water Resources Research*, v. 49, n. 1, p. 1–15, Jan. 2013.

PEEL, M. C.; WANG, Q. J.; VOGEL, R. M.; MCMAHON, T. A. The utility of L-moments ratio diagrams for selecting a regional probability distribution. *Hydrological sciences – Journal des Sciences Hydrologiques*, v. 46, n. 1., p. 147–155, Feb. 2001

PETITTT, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied of Statistical*, v. 28, n. 2, p. 126–135, 1979.

STEDINGER, J. R.; GRIFFIS, V. W. Flood frequency analysis in the United States: Time to update. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 13, n. 4, p. 199–204, 2008.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Updating Bulletin 17B. 2013. Disponível em: <www.usgs.gov/water>. Acesso em 24 abr. 2014..

VILLARINI, G.; SERINALDI, F.; SMITH, J. A.; KRAJEWSKI, W. F. On the stationarity of annual flood peaks in the continental United States during the 20th century. *Water Resources Research*, v. 45, n. 8, p. 1–17, Aug. 2009.

VILLARINI, G.; SMITH, J. A. Flood peak distributions for the eastern United States. *Water Resources Research*, v. 46, n. 6, p. 1–17, June 2010.

VILLARINI, G.; SMITH, J. A.; BAECK, M. L.; KRAJEWSKI, W. F. Examining flood frequency distributions in the Midwest US 1. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 47, n. 3, p. 447–463, June 2011a.

VILLARINI, G.; SMITH, J. A.; SERINALDI, F.; NTELEKOS, A. A. Analyses of seasonal and annual maximum daily discharge records for central Europe. *Journal of Hydrology*, v. 399, n. 3–4, p. 299–312, Mar. 2011b.

VOGEL, R. M.; MCMAHON, T. A.; CHIEW, F. H. S. Flood flow frequency model selection in Australia. *Journal of Hydrology*, v. 146, p. 421–449, 1993b.

VOGEL, R. M.; MCMARTIN, D. E. Probability plot goodness-of-fit and skewness estimation procedures for the Pearson type III distribution. *Water Resources Research*, v. 27, n. 12, p. 3149–3158, Dec. 1991.

VOGEL, R. M.; THOMAS, JR., W. O.; MCMAHON, T. A. Flood-flow frequency model selection in southwestern United States. *Journal of water resources planning and management*, ASCE, v. 119, n. 3, p. 353–366, May/June 1993a.

VOGEL, R.; WILSON, I. Probability Distribution of Annual Maximum, Mean, and Minimum Stream flows in the United States. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 1 n. 2, p. 69–76, Apr. 1996.

YUE, S.; HASHINO, M. Probability distribution of annual, seasonal, and monthly precipitation in Japan. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, n. 5, p. 863–877, 2007.

WALLIS, J. R.; WOOD, E. F. Relative Accuracy of Log Pearson III Procedures. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 111, n. 7, p. 1043–1056, July 1985.