

MODELAGEM ESTATÍSTICA NÃO ESTACIONÁRIA DE CHEIAS SAZONAIS NO SUDESTE BRASILEIRO

Sarah Lopes dos Anjos¹; Camila Santos Bueno da Silva²; Carlos H. R. Lima³

RESUMO --- Cheias causam elevadas perdas humanas e materiais em todo o mundo, particularmente no Brasil nos últimos anos. O entendimento e a modelagem dos padrões espaço-temporais desses eventos extremos são parte de uma metodologia tradicional de estudos em Hidrologia que tem sido questionada em um contexto de mudanças climáticas e de uso do solo. Tradicionalmente, a análise de frequência de cheias (FFA) tem como base a suposição de estacionariedade da série temporal de picos de vazão. Devido à urbanização, ao crescimento populacional e às mudanças climáticas globais essa premissa pode deixar de ser válida em algumas regiões. Nesse sentido, este trabalho tem como foco o estudo do ajuste de uma distribuição Gumbel não estacionária, para a qual os parâmetros de posição e escala variam com o tempo em uma primeira análise e com um índice climático em um segundo momento. Os resultados mostram uma tendência negativa na série de máximas de vazões sazonais; no índice climático, porém, os parâmetros da modelagem temporal indicaram coeficientes angulares estatisticamente nulos, não apresentando variação significativa quando comparado aos resultados estacionários. O risco dinâmico associado à modelagem com o índice climático se apresentou variando entre metade e o dobro do risco estacionário para um dado quantil.

Palavras-chave: não estacionariedade, análise de frequência de cheias, hidrologia.

NON-STATIONARITY OF SEASONAL FLOOD FREQUENCY MODELING IN A BRASILIAN SOUTHEAST BASIN

ABSTRACT --- Flood events have caused many human losses and material damages all over the world, particularly in Brazil in the last few years. The understanding and modeling of the spatiotemporal patterns of these events are part of a traditional methodology in Urban and human development, as well as global climate changes, may lead to conditions where the assumption of stationarity may not hold for some regions. This paper focuses on the study and modeling of a seasonal flow maximum series in a gauge located in the Southeast of Brazil. The Gumbel distribution fit to the data, with both the stationary and non-stationary fitting (temporal and in relation to a climate index), with position and scale parameters that varied monotonically. The results show a negative trend of the seasonal maximum flow rates and of the climate index, but the parameters of the temporal modeling showed angular coefficients were not statistically significant, showing no significant variation in the quantiles when compared to the stationary modeling. The dynamic risk associated with climate modeling had a range between half and double the stationary risk of a defined quantile.

Keywords: non-stationarity, flood frequency analysis, hidrology.

1) Eng^a Civil da Prime Projetos e Consultoria Ltda., CEP: 70.070-120 – Brasília – Brasil. E-mail: sarah@primeprojetos.com

2) Eng^a Civil da Prime Projetos e Consultoria Ltda., CEP: 70.070-120 – Brasília – Brasil. E-mail: camila@primeprojetos.com

3) Prof. Adjunto. Depto. de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. E-mail: chrlima@unb.br

1 - INTRODUÇÃO

O processo de urbanização acelerado faz-se sentir sobre todo o aparelhamento urbano relativo a recursos hídricos, e enchentes urbanas constituem um dos importantes impactos sobre a sociedade. Esses impactos podem ocorrer devido à urbanização ou à inundação natural da várzea ribeirinha. Conhecidos os processos e suas consequências, é necessário planejar-se a ocupação do espaço urbano com a infraestrutura e as condições que evitem impactos econômico-sociais sobre a sociedade.

Nesse contexto, torna-se fundamental o conhecimento científico de vazões extremas com um determinado risco (probabilidade) de recorrência. Para a determinação dessa vazão, é comum na literatura a utilização de métodos estatísticos de análise de frequência de cheias, pois, em geral, são de aplicação compreensível e não necessitam de informações complexas, como dados climatológicos. Nesse estudo é apresentada uma alternativa à estimativa estacionária de quantis adotando a modelagem não estacionária da frequência de cheias em que os parâmetros da distribuição são obtidos em função de uma variável climática, com o intuito de avaliar e mensurar qual o risco (estático e dinâmico) que uma estrutura hidráulica pode correr ao ser dimensionada, monitoramento de usinas para geração hidroenergética, como também serve de subsídio para um sistema de alerta da população local.

O estudo de uma metodologia não estacionária se dá pela possibilidade do pressuposto da estacionariedade da série de vazões não ser verificado, o que ocorre pela constante alteração no uso do solo e na cobertura vegetal de bacias hidrográficas, assim como mudanças nos padrões climáticos regionais. Nessa situação, os dados passados podem não representar bem o comportamento futuro das séries temporais de vazão, assim, a análise não estacionária de frequência de cheias aparece como alternativa, requerendo um método diferente da análise estacionária, visto os parâmetros da distribuição (e talvez a própria distribuição) variarem com o tempo e conseqüentemente as estimativas da probabilidade de excedência de uma dada vazão e de sua incerteza (Khaliq et al., 2006). Uma abordagem comum da análise não estacionária de frequência de cheias é o uso de uma extensão direta de uma função probabilística em que a distribuição em si é considerada estacionária (não variante com o tempo), mas seus parâmetros são considerados não estacionários (veja Leclerc e Ouarda, 2007; Villarini et al., 2009; Lima e Lall, 2010; Cunderlik e Burn, 2003; etc.). É importante ressaltar que a presença de não estacionariedade numa série hidrológica não pode ser ignorada ao se estimar os quantis de dimensionamento para horizontes de tempo futuros (Cunderlik e Burn, 2003). Estudos indicam que ignorar a tendência do regime hidrológico local pode levar à séria subestimação ou superestimação dos quantis para tal local (Leclerc e Ouarda, 2007). No presente estudo, busca-se relacionar os dados de vazão com variáveis climáticas. Assim, é necessário identificar um parâmetro climático que apresente correlação satisfatória com os dados de vazão da região em estudo.

2 – REGIÃO DE ESTUDO E DADOS HIDROLÓGICOS

Como mostram os estudos de Müller et al. (1998), Guetter (2002), Re e Barros (2009), dentre outros, a região sul/sudeste é conhecida como região que apresenta tendência significativa em suas séries hidrológicas. Por esse motivo a bacia 8 (Bacia dos Rios do Atlântico Sul trecho Sudeste) foi escolhida como área de estudo.

A estação fluviométrica em estudo é a Morretes (82170000) localizado na sub-bacia 82 no rio Nhundiaquara no estado do Paraná. A série de vazão diária para o posto em questão são dados consistidos obtidos junto a Agência Nacional de Águas - ANA. Além disso, como o pico de vazão nessa região pode ocorrer em qualquer época do ano, com uma predominância nos meses de dezembro a março, utilizou-se os dados de pico de vazão sazonal (novembro a março) para eliminar a possibilidade de que o uso de máximos anuais leve a valores de pico de vazão pertencentes a diferentes populações e, portanto, a necessidade de outro tipo de modelagem.

O índice climático utilizado no estudo é o *Trenberth and Hurrell North Pacific Index* (NDJFM), obtido por meio da página eletrônica do Climate Data Guide (NCAR). O qual é assumido como a pressão ponderada no nível do mar da 30°N-65°N, 160°E – 140°W. O índice de NP é definido para medir a variação interanual decadal na circulação atmosférica. A relação oceano-atmosfera dominante no Pacífico norte é onde as mudanças atmosféricas lideram as alterações na temperatura da superfície do mar de um a dois meses. O período de dados do índice em estudo é de 1899 a 2012.

Para avaliar a tendência temporal nos dados de vazão e do índice NDJFM da região abordada, foram aplicados os testes de estacionariedade da regressão linear vazão vs. tempo, de Mann-Kendall e de Spearman. Para consideração do valor-*p* onde assumiu-se a hipótese nula de nenhuma tendência temporal monotônica. A análise do coeficiente angular da regressão das máximas sazonais de vazões (novembro a março) com o tempo e do índice climático com o tempo também fornece parâmetros para a avaliação da estacionariedade das séries em questão, sendo essa apresentada visualmente na

Figura 1. Assumindo um nível de significância $\alpha = 5\%$, observa-se que todos os testes realizados na estação 82170000 resultam em valores-*p* menores do que o nível de significância, o que leva a não aceitação da hipótese nula e conseqüentemente sugere fortes tendências monotônicas (não estacionariedade) nas séries de máximas sazonais em questão, confirmada também visualmente pela Figura 1. Para os testes não paramétricos de Mann-Kendall e de Spearman a

Tabela 1 apresenta os valores-*p* obtidos na aplicação desses na série de vazão e na serie do índice climático (NDJFM). Os valores-*p* obtidos para o NDJFM indicam a estacionariedade para todos os testes aplicados. Indicando que o índice não apresenta tendência estatisticamente significativa.

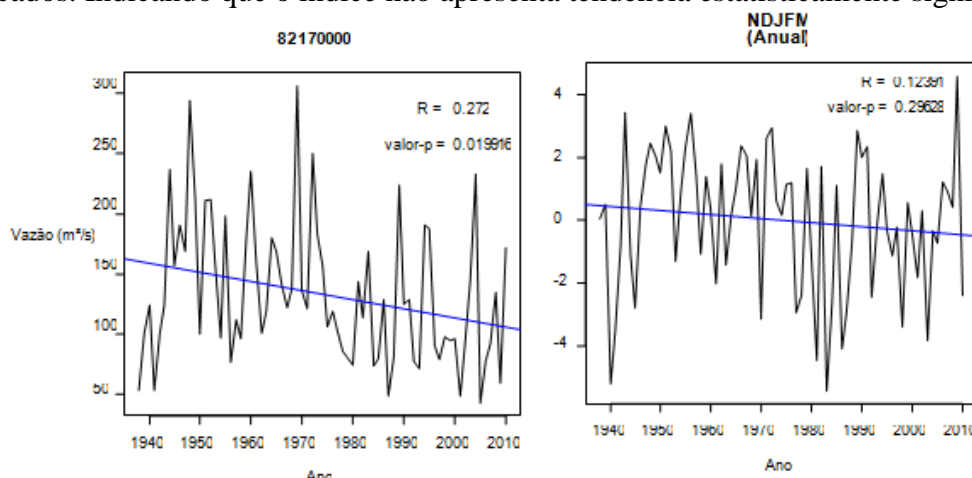


Figura 1: Série de máximas sazonais de Morretes e valor-*p* e Série anual do índice NDJFM e valor-*p*

Tabela 1: Valores- *p* para série de vazões e índice climático

-	Regressão Linear	Mann-Kendall	Spearman
Posto 82170000	0,0199	0,0089	0,0119
Índice NDJFM	0,0296	0,1657	0,1645

3 - MODELAGEM ESTACIONÁRIA DE FREQUÊNCIA DE CHEIAS

Numa primeira abordagem, considerou-se na análise de frequência dos dados de máximos sazonais de vazão a distribuição estacionária de Valores Extremos Generalizados (GEV), comumente utilizada na literatura para dados extremos. Inicialmente foram obtidos os parâmetros de posição, escala e forma para a série de máximos sazonais de vazão pelo Método da Máxima Verossimilhança. O intervalo de confiança de cada parâmetro foi obtido para o nível de confiança de 95% por meio da estimação dos erros padrões e uso da distribuição t-Student para os estimadores. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros da distribuição GEV para o posto 82170000 (nível de confiança = 95%)

Posto	Parâmetro					
	α (posição)		β (escala)		γ (forma)	
	Valor estimado	Intervalo de confiança	Valor estimado	Intervalo de confiança	Valor estimado	Intervalo de confiança
Morretes	105,77	(93,48 ; 118,06)	45,30	(36,06 ; 54,54)	0,03	(-0,19 ; 0,24)

Analisando o intervalo de confiança para o parâmetro de forma, observa-se que esse parâmetro não é estatisticamente diferente de zero. Assim, como sugerido em Coles (2007), foram estimados novamente apenas os parâmetros de posição e escala, com o fator de forma igual a zero, assumindo então uma distribuição Gumbel para os dados de máximos sazonais. As estimativas dos parâmetros de posição e escala é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros da distribuição Gumbel para o posto 82710000 (nível de confiança = 95%)

Posto	Parâmetro			
	α		β	
	Valor estimado	Intervalo de confiança	Valor estimado	Intervalo de confiança
Morretes	106,43	(95,19 ; 117,68)	45,78	(37,25 ; 54,30)

4 - MODELAGEM NÃO ESTACIONÁRIA DOS PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO GUMBEL

Os dados de máximos sazonais de vazão (Figura 1) sugerem uma tendência temporal monotônica e linear no parâmetro de posição. Assim, assumiu-se uma variação temporal linear e uma variação climática nesses parâmetros, onde a covariável é o próprio tempo e o índice NDJFM respectivamente. Os valores dos coeficientes angulares e lineares da equação dos parâmetros de posição e escala obtidos pelo método da máxima verossimilhança são apresentados na Tabela 4 para a covariável tempo e para a covariável climática. Observe que os coeficientes angulares das retas dos parâmetros obtidos para covariável tempo são aproximadamente nulos, indicando pouca

variação. Já com a covariável climática os parâmetros de posição e escala indicam tendência no coeficiente angular dos mesmos.

Tabela 4: Parâmetros estimados para a distribuição Gumbel não estacionária

Covariável	Posição		Escala	
	α_t	α_0	β_t	β_0
Tempo	0,0001	106,12	-0,0003	46,48
NDJFM	3,89	106,28	0,93	45,74

5 – COMPARAÇÃO DOS MODELOS (ESTACIONÁRIO VS. NÃO ESTACIONÁRIO)

Em busca do aprimoramento da modelagem estacionária já existente, o modelo aqui apresentado, é então comparado e avaliado no sentido de escolher aquele que apresenta a melhor precisão com os dados observados. Uma primeira análise visual da eficiência da modelagem proposta é através do método gráfico Q-Q plot (ou quantil-quantil plot), que consiste em plotar, em um mesmo gráfico, os quantis teóricos e empíricos da distribuição. Se as duas distribuições forem similares, os pontos empíricos alinham-se à reta de quantis teóricos. Por meio de uma comparação visual, pode-se então determinar se a distribuição testada se assemelha com a distribuição teórica dos dados. A Figura 2 representa o método gráfico Q-Q plot para a modelagem estacionária, que se ajusta bem. Para o modelo não estacionário com a covariável tempo e também para a covariável climática, os gráficos Q-Q Plot Residual (Coles, 2007) mostrado na Figura 3 indica que o modelo não estacionário também se ajusta aos valores observados.

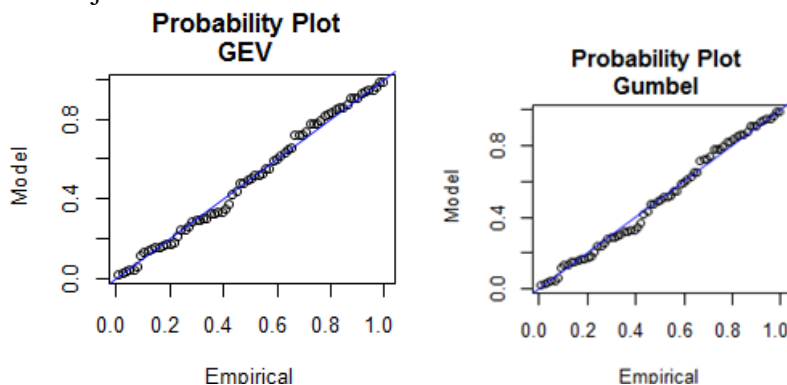


Figura 2: Q-Q plot para a modelagem estacionária (GEV/ Gumbel).

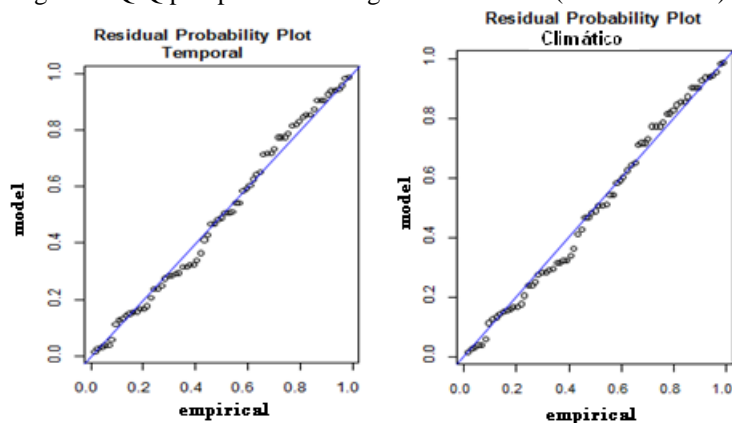


Figura 3: Q-Q plot residual para o modelo não estacionário (covariável tempo/covariável climática).

Outro método utilizado para testar a aderência dos modelos estacionário e não estacionário às vazões observadas foi a validação cruzada, onde o intervalo de tempo é dividido num período onde os parâmetros das distribuições são ajustados (período de treinamento) e outro período independente (período de teste) onde os modelos são utilizados para prever os valores de máximos anuais e esses resultados são comparados com os observados. Foi definido o período 1938-1968 para estimação dos parâmetros, sendo então realizadas previsões de cheias para o período 1969-2011. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 4. O coeficiente *NS* pode variar de $-\infty$ a 1. O valor 1 significa eficiência perfeita do modelo com os dados observados, o valor zero indica que o modelo é tão preciso quanto à estimação pela média, e valores menores que zero significam que a média observada é um melhor preditor do que a modelagem sugerida. Para os valores previstos pelo modelo temporal foi obtido um $NS = 0,114$, e para a modelagem climática um $NS = 0,103$, indicando que os valores de mediana previstos por ambos os modelos não estacionários superam a utilização da média estacionária como modelo padrão para previsão dos máximos sazonais de vazão.

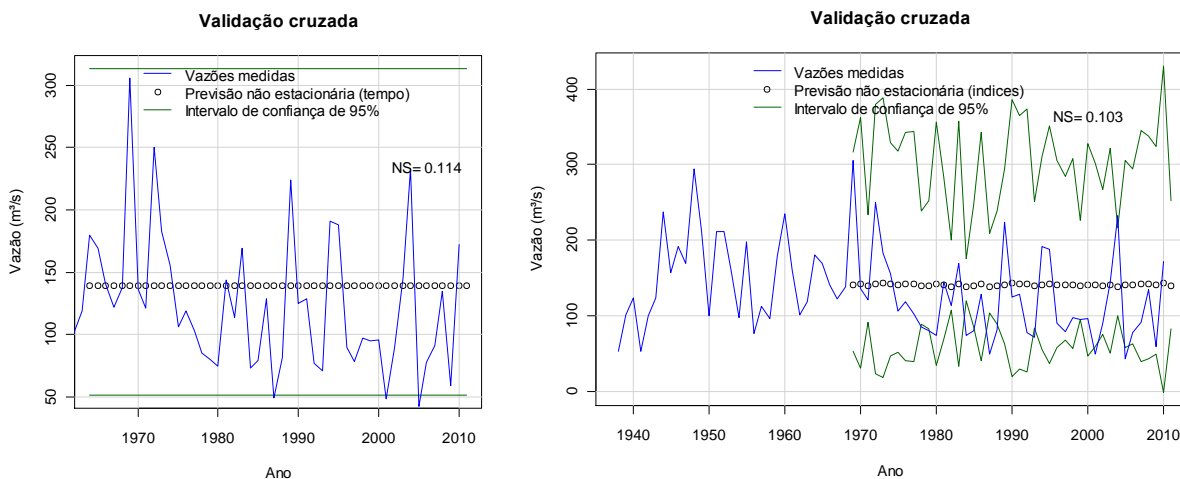


Figura 4: Validação cruzada para a modelagem temporal no posto Morretes e Validação cruzada para a modelagem climática no posto Morretes

6 – ESTIMAÇÃO NÃO ESTACIONÁRIA DOS QUANTIS DE CHEIA PARA OS DADOS HISTÓRICOS

Para comparação entre os quantis estimados pelos métodos estacionários e não estacionários, foram calculadas as vazões com tempo de recorrência de 100 anos. Como a distribuição utilizada nas análises foi a distribuição Gumbel, os quantis procurados foram calculados segundo a distribuição de probabilidades derivada da função densidade de Gumbel, que pode ser escrita da forma:

$$Q_T(x) = \alpha(x) + \beta(x) \left\{ -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

Fazendo-se a análise com a covariável temporal, variando ambos os parâmetros de posição e de escala, pode-se observar na Figura 5 que os quantis não estacionários estimados para um tempo de recorrência de 100 anos mostram uma pequena variação quando comparados à uma estimativa estacionária. Ainda na Figura 5, na modelagem que considera a covariável climática (NDJFM), pode-se observar o quantil variando ao longo do tempo, com valores tanto menores quanto maiores do que o quantil estacionário até o final do período.

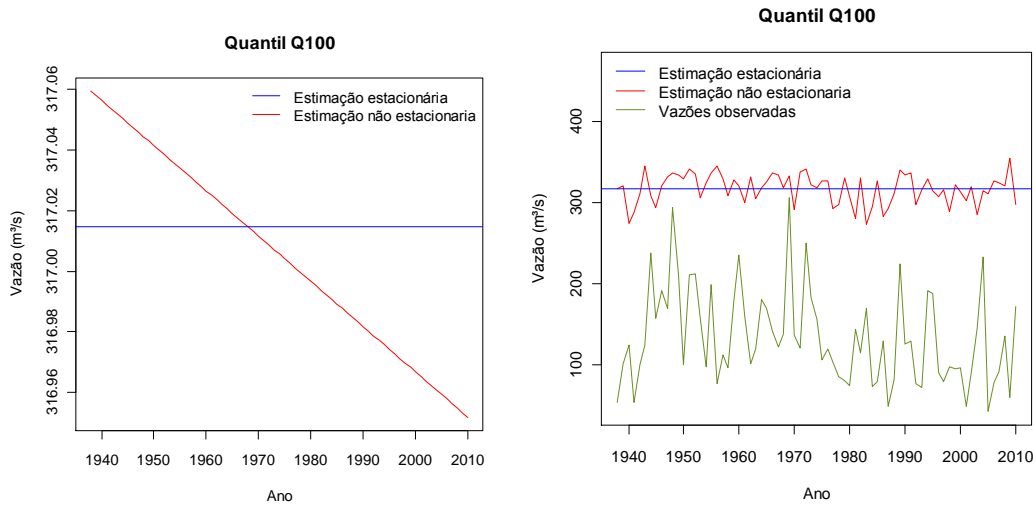


Figura 5: Gráfico a esquerda - Quantis para o tempo de retorno de 100 anos estimados pelos métodos estacionário e não estacionário com covariável tempo. E gráfico à direita - Dados observados e quantis para o tempo de retorno de 100 anos estimados pelos métodos estacionário e não estacionário com covariável climática.

É importante ressaltar que a variação do quantil de cheia ao longo do período implica na variação do risco de falha da estrutura. Uma análise interessante é a variação do risco associado ao quantil estimado pela modelagem estacionária, que é suposto de 1% (na modelagem estacionária), mas, quando considerado a variação do risco com as covariáveis tempo ou índice climático, este pode variar ao longo dos anos, como pode ser observado na Figura 6.

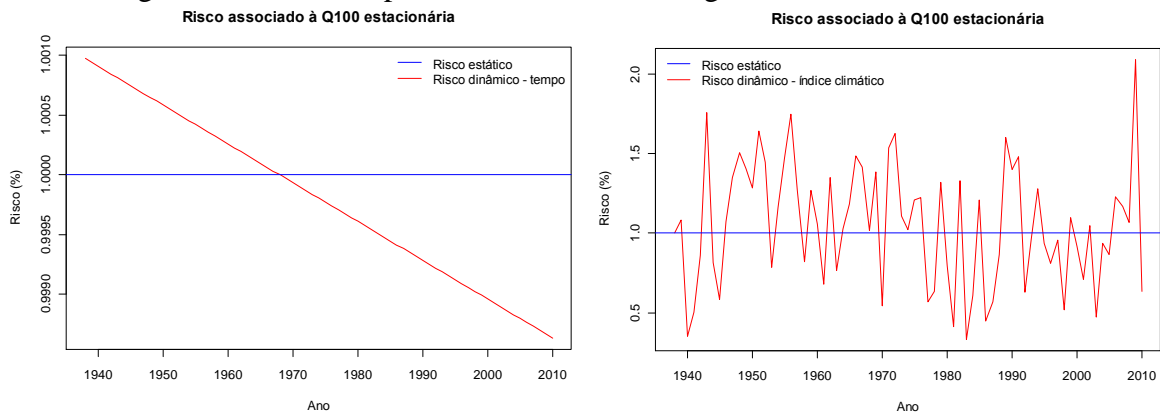


Figura 6: Gráfico a esquerda - Risco dinâmico temporal (linha vermelha) associado ao quantil Q100 estacionário e Gráfico a direita - Risco dinâmico temporal (linha vermelha) associado ao quantil Q100 estacionário.

7 – CONCLUSÕES

Neste artigo foi abordado o método não estacionário de análise de frequência de cheias, enfatizando a comparação entre os modelos estacionário e não estacionário na estimativa dos parâmetros de distribuições de probabilidade. A estacionariedade das séries de vazão é uma premissa básica para o método tradicional de análise de frequência de cheias, mantendo o método tradicional com a violação dessa hipótese pode levar a sub ou superestimação dos quantis de cheias e conseqüentemente diversos danos, como falha de estruturas hidráulicas e rompimento de barragens no caso de superestimação desses quantis, e gastos desnecessários na implantação dessas estruturas no caso de subestimação.

Ao comparar as metodologias estacionária e não estacionária, no posto fluviométrico Morretes, pode-se observar o melhor ajuste na metodologia estacionária. Para a modelagem dos quantis o modelo não estacionário fornece uma melhor previsão dos picos de vazões quando comparada à previsão pela média da amostra. Para esse local, caso fosse instalada uma usina hidrelétrica seria necessária avaliação da potência instalada devido à tendência negativa da série de vazões para tempos futuros. A incorporação dessas previsões no gerenciamento do risco de cheias é também um assunto aberto, mas que pode ser discutido para melhor mitigar o efeito deletério de eventos extremos de vazão.

Em trabalhos futuros, sugere-se analisar a modelagem não estacionária com outras covariáveis climáticas que apresentem melhor representatividade dos dados de vazão e a regionalização dos quantis e dos parâmetros da distribuição, como também a introdução no estudo das cotas atingidas para os quantis estimados visando o mapeamento da região em estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a ANA pelo fornecimento dos dados de vazão diária para a bacia em estudo e aos criadores do pacote ISMEV (plataforma R) utilizado para os cálculos desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- COLES, S. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Bristol: Springer, 2007. 208 p.
- CUNDERLIK, J. M.; BURN, D. H. (2003). Non-stationary pooled flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, v. 276, p. 210-223, 2003.
- GUETTER, A. K. Degrau climático nas séries de vazões das bacias brasileiras. In: 2002 Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002, Foz do Iguaçu – Brasil.
- KHALIQ, M. N.; OUARDA, T. B. M. J.; ONDO, J. C.; GACHON, P.; BOBÉE, B. (2006). Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review. *Journal of Hydrology*, v. 329, p. 534-552, 2006.
- LECLERC, M.; OUARDA, T. B. M. J. (2007). Non-stationarity regional flood frequency analysis at ungauged sites. *Journal of Hydrology*, v. 343, p. 254-265, 2007.
- LIMA, C. H. R.; LALL, U. Bayesian non-stationary flood frequency estimation at ungauged basins using climate information and a scaling model. In: 2010 American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, Dez. 2010, São Francisco – Estados Unidos da América.
- MÜLLER, I. I.; KRÜGER, C. M.; KAVISKY, E. (1998) Análise de estacionariedade de series hidrológicas na bacia incremental de Itaipu. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 3, n. 4, p. 51-71, 1998.
- RE, M.; BARROS, V. P. Extreme rainfalls in SE South America. *Springer Science*, v.136, p.96-119, 2009.
- VILLARINI, G.; SMITH, J. A.; SERINALDI F.; BALES, J.; BATES, P. D.; KRAJEWSKI W. F. (2009). Flood frequency analysis for nonstationary annual peak records in an urban drainage basin. *Advances in Water Resources*, v. 32, p. 1255-1266, 2009.