

Comportamento e previsão do nível do rio Cuiabá por meio de modelos SETAR

Elianara Martins de Almeida^{1†}, Anderson Castro Soares de Oliveira², Luciana Sanches³,
Marcelino Alves Rosa de Pascoa⁴

¹ Departamento de Estatística. Universidade Federal de Mato Grosso.

² Departamento de Estatística. Universidade Federal de Mato Grosso.

E-mail: andersoncso@gmail.com

³ Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Mato Grosso.

E-mail: lsanches@hotmail.com

⁴ Departamento de Estatística. Universidade Federal de Mato Grosso.

E-mail: marcelino.pascoa@gmail.com

Resumo: *As enchentes já provocaram grandes inundações à população que vive em torno do rio Cuiabá, e para minimizar esse feito construíram a barragem da usina do Manso no ano de 2000. No entanto, as comunidades ribeirinhas ainda são afetadas pela cheias do rio. Desta forma, o objetivo principal desse trabalho é analisar o comportamento da série temporal do nível diário de água do rio Cuiabá, e propor modelos de previsão por meio do modelo SETAR. Para análise utilizou-se as estações Rosário Oeste e Barão de Melgaço, com cota média diária, no período de 1988 a 2012. Observou-se um comportamento sazonal do nível do rio, e que ocorreu um aumento da cota mínima do rio expressivo após a implantação da barragem. Foram estimados modelos SETAR com threshold pré-definido pela mediana, que produziram boas previsões.*

Palavras-chave: Séries temporais; Enchentes; Usina hidrelétrica de Manso.

Abstract: *The floods have already caused large floods to the population living around the Cuiabá River, and to minimize this feat, they built the Manso dam in the year 2000. However, riverine communities are still affected by flooding of the river. Thus, the main objective of this work is to analyze the behavior of the time series of daily water level of the Cuiabá river, and to propose forecast models using the SETAR model. For the analysis, the Rosário Oeste and Barão de Melgaço stations were used, with average daily quota, in the period from 1988 to 2012. A seasonal behavior of the river level was observed, and an increase of the minimum expressive river quota occurred after implementation of the dam. SETAR models with threshold pre-defined by the median were estimated, it was verified that the estimated models produced good predictions.*

Keywords: Time Series; Floods; Manso Hydroelectric Power Plant.

Introdução

As ocorrências de enchentes e inundações têm consequências intensas, provocam mortes, pessoas feridas, desabrigadas e grandes perdas econômicas, associadas a diversos fatores como a crescente urbanização, pobreza, deterioração ambiental e mudanças climáticas. As inundações aumentam consecutivamente abrangendo diferentes localidades urbanas, como pequenos povoados e cidades de médio porte e núcleos de negócios (GOERL; KOBİYAMA, 2005).

[†] Autora correspondente: martinsnaraa@gmail.com.

Em Mato Grosso, a população que mora na bacia rio Cuiabá é afetada por cheias periódicas provocando danos. A população do município de Cuiabá e região registraram ao longo dos anos ocorrências cíclicas de enchentes e estiagens em conformidade com os períodos hidrológicos. De acordo com os valores estabelecidos pela Defesa Civil do Estado de Mato Grosso, entre os anos de 1933 a 2014 foram registrados 18 eventos no qual a cota (nível) rio Cuiabá estava acima do nível de alerta (8,50m), sendo que 7 cheias atingiram o estado de emergência (9,5 m) e não houve registro de eventos que atingiram o estado de calamidade (11,00m) nesse período (MATO GROSSO, 2014; SHIRASHI, 2003).

Após a inundação de 1974 em Cuiabá que deixou mais de 20 mil pessoas desabrigadas, foi elaborado o projeto de construção da barragem da usina do Manso, que entrou em funcionamento em novembro de 2000. Inicialmente a barragem foi criada com a intenção de regularizar o nível de água do rio Cuiabá e posteriormente a produção de energia elétrica. A operação atual da usina de energia aumentou as descargas durante o período seco em cerca de $100m^3/s$ a $150m^3/s$, resultando em níveis de água de aproximadamente 1 m acima dos registrados antes da regulamentação. Embora a usina hidrelétrica de Manso tenha atenuado as cheias, grande parte da água responsável pelas inundações do rio Cuiabá na cidade de Cuiabá vem da bacia intermediária entre a barragem e a cidade (ZEILHOFER; MOURA, 2009; PAES, 2011).

A relação entre a dinâmica do nível de água no rio Cuiabá na porção Norte e a da planície de inundação nem sempre é linear, uma vez que a inundação desta planície é afetada por fatores como topografia, resistência ao fluxo de água pela vegetação, comprimento rio entre outras características geomórfológicas que definem o caminho principal do fluxo d'água, isso gera gradientes no perfil da superfície da água que variam em espaço e tempo (GIRARD et al., 2010). Desta forma, medidas não-estruturais mais eficazes minimizariam esse problema sem agredir o curso natural do rio, principalmente a utilização de modelos que permitam obter previsões.

De acordo com Tucci (2002) em hidrologia existem dois modos de descrever as variáveis envolvidas no ciclo hidrológico e fazer previsões: 1 - usar equações com base conceitual ou empírica para descrever os processos físicos, que são chamados de modelos determinísticos; 2 - considerar que os processos são controlados por leis probabilísticas, ou seja, modelos estocásticos. Os modelos de séries temporais são uma classe de modelos estocásticos muito útil na descrição e previsão na área de hidrologia.

Durante as últimas décadas, vários modelos estocásticos foram desenvolvidos e propostos para modelagem de séries temporais hidrológicas, entretanto Tokar e Johnson (1999) relatam que muitas das técnicas disponíveis para análise de séries temporais assumem relações lineares entre as variáveis e podem nem sempre funcionar bem. Assim, os modelos da classe *threshold* propostos por Tong e Lim (1980) são indicados para dados que não assumem relações lineares. Dentre os diversos modelos não lineares propostos para séries com tais propriedades pode-se dizer que os mais bem concebidos são os da classe *threshold* (TONG, 1990). Estes modelos têm como principal característica definir diferentes estados ou regimes para a série temporal e permitir comportamentos dinâmicos distintos para as variáveis dependendo do regime que ocorre em cada ponto do tempo. Nesta classe, o mais popular é o modelo autorregressivo com limiar (TAR), em que os regimes são definidos por uma outra variável denominada variável *threshold*.

Um caso particular dos modelos TAR ocorre quando a variável *threshold* é tomada como o valor defasado da série temporal em si. Nesse modelo, o regime é determinado pela própria série temporal, o modelo é chamado de Modelo Autorregressivo com Limiar Auto-Excitado (SETAR) (TONG, 1990).

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo analisar o comportamento da série temporal da cota diária do rio Cuiabá, e propor modelos de previsão por meio do modelo SETAR.

Materiais e Métodos

Área de Estudo

A bacia hidrográfica de Cuiabá está localizada na parte ocidental da região central do Brasil, no estado de Mato Grosso, com uma área total de aproximadamente 29.000km^2 com 841 km de perímetro pertencente à bacia do Alto Rio Paraguai. A bacia encontra-se localizada entre as coordenadas geográficas 1418 e 1700S e 5440 e 5655W. As nascentes localizam-se no município de Rosário Oeste, nas encostas da Serra Azul, tendo como principais formadores os rios Cuiabá da Larga e Cuiabá do Bonito. Após a confluência desses rios, recebe o nome de Cuiabazinho e, somente após o encontro com o Manso, passa a se chamar rio Cuiabá (MATO GROSSO, 1995).

A bacia do rio Cuiabá é constituída por duas grandes formações naturais com características bióticas e abióticas definidas e próprias: a planície do Pantanal e as áreas de planalto e serras circunvizinhas. Essas características orográficas possibilitam a distinção de três regiões na bacia do rio Cuiabá, sendo elas: Alto Cuiabá, Médio Cuiabá e Baixo Cuiabá (VITAL; COSTA; CURVO, 1996).

Dados pluviométricos e fluviométricos

As variáveis consideradas foram a cota linimétrica (nível da água do rio) e a precipitação pluviométrica obtidas do sistema Hidroweb da Agência Nacional das Águas (ANA), em que todos os valores para ambas as medidas são expressos em milímetros(mm). As cotas linimétricas são referentes às estações Rosário Oeste (código 66250001) e Barão de Melgaço (código 6628000) no período de janeiro de 1988 a dezembro de 2012, em que para cada estação havia duas medições diárias às 07h00min e 19h00min, assim foi considerada a média das duas medições. As precipitações pluviométricas mensais são referentes às estações Rosário Oeste (código 01456008) e Barão de Melgaço (código 01655002).

Modelo SETAR

Um processo estacionário $\{Y_t\}$ segue um modelo SETAR com dois regimes, em que satisfaz a seguinte equação

$$Y_t = \begin{cases} \Phi_{10} + \Phi_{11}Y_{t-1} + \dots + \Phi_{1p_1}Y_{t-p_1} + \varepsilon_t, & \text{se } Y_{t-d} \leq r \\ \Phi_{20} + \Phi_{21}Y_{t-1} + \dots + \Phi_{2p_2}Y_{t-p_2} + \varepsilon_t, & \text{se } Y_{t-d} > r \end{cases} \quad (1)$$

em que:

- Φ são os parâmetros autorregressivos;
- r é o parâmetro de limiar (threshold) que divide a série em duas partes;
- $d > 0$ é o parâmetro de defasagem;
- p_1 e p_2 são as ordem dos submodelos de cada regime;
- ε_t é um ruído branco, ou seja, com média nula, variância constante e não correlacionados.

Considere uma dada variável threshold r e uma conhecida posição da variável aleatória Y_{t-d} , o processo autoregressivo $\{Y_t\}$ segue um submodelo particular $AR(p_i)$ para $i = 1, 2, \dots$, em que as ordens de defasagem p_1 e p_2 não precisam ser idênticas e o parâmetro de defasagem d pode ser maior que p_1 e p_2 (CRYER; CHAN, 2008; MARQUES, 2013). O modelo definido pela equação (1) é indicado por $SETAR(2, p_1, p_2)$.

A estimação do modelo SETAR é condicionada aos valores iniciais $\max(p_1, p_2, d)$, em que se tem duas abordagens, valores da variável threshold r e de defasagem d estimados ou considerados fixos. Quando deseja-se estimar o valores r e d , é feita um grande número de combinações deste

parâmetros e a combinação que obtiver o menor AIC é escolhida. Entretanto, em algumas situações, o valor de r e d é definido pelo pesquisador conforme o seu conhecimento sobre o fenômeno estudado, e o r e d parâmetros podem considerados fixos. Para estimar as ordens de defasagem p_1 e p_2 são inicialmente iguais ao maior lag significativo na função de autocorrelação parcial, assim o processo de estimação visa estabelecer diversos modelos com diferentes ordens p_1 e p_2 e o modelo final é escolhido utilizando o critério de Akaike (AIC) (CRYER; CHAN, 2008).

Análise Estatística

Todas as análises foram realizadas no software R (R CORE TEAM, 2020) por meio dos pacotes TSA(CHAN; RIPLEY, 2018), τ_{sDyn} (NARZO; AZNARTE; STIGLER, 2009; STIGLER, 2010) e $snpar$ (QIU, 2014). Foram utilizados os dados de níveis de água e precipitação. E para todos os testes realizados considerou-se a significância de 5%.

Análise descritiva

Para análise descritiva da cota diária de água no período de 1988 a 2012 foram utilizados gráficos das séries temporais, bem como a aplicação dos testes de Cox-Stuart (MORETTIN; TOLOI, 2006) e g de Fisher (PRIESTLEY, 1989) para verificar, respectivamente, a existência de tendência e sazonalidade.

Para os dados mensais de precipitação e a média mensal da cota linimétrica foram utilizados gráficos das séries temporais, em seguida foram realizadas comparações no seguintes intervalos de tempo da série:

- 1988-1993 versus 1994-2000 - comparação entre dois períodos antes do fechamento da barragem
- 1988-2000 versus 2001-2012 - comparação entre os períodos antes e após do fechamento da barragem
- 2001-2006 versus 2007-2012 - comparação entre dois períodos após do fechamento da barragem

Para verificar se as duas partes da série temporal foram geradas por um mesmo processo estocástico foi aplicado o teste de Quenouille (QUENOUILLE, 1958). Ademais, aplicou-se o teste de Kolmogorov Smirnov para verificar se as duas partes tem forma e locação similar .

Modelagem

Para ambas as estações foram ajustados modelos SETAR considerando a cota linimétrica como variável dependente e o tempo em anos como variável independente seguindo os seguintes passos:

- i. É verificado se existe tendência e sazonalidade nas séries estudadas por meio dos testes de Cox-Stuart e g de Fisher, respectivamente.
- ii. Plota-se os correlogramas da função de autocorrelação parcial $facp$, sendo esta determinante do maior número de lags significativos.
- iii. É estimado o modelo SETAR com threshold definido pela mediana das cotas linimétricas e $d = 1$

Após a estimação dos modelos, sua performance foi avaliada por meio do gráfico de previsões, Erro Absoluto Médio Escalonado (MASE) e Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) (HYNDMAN; KOEHLER, 2006).

Resultados e Discussão

Descrição da série temporal

A série temporal das cotas linimétricas médias diárias na Estação Rosário Oeste é apresentada na Figura 1, em que observa-se a ocorrência dos maiores picos no período anterior ao ano 2000, ano do início da operação da barragem de Manso. Pelo teste de g Fisher verifica-se a existência de sazonalidade (valor-p < 0,0001) com período de oscilação da série em torno de 366 dias, o qual foi determinado pelo periodograma (MORETTIN; TOLOI, 2006), sendo as máximas no períodos chuvosos e mínimas no período de seca. O teste de Cox-Stuart indicou a existência de tendência (valor-p = 0,0002), com um aumento gradual da série ao longo do tempo.

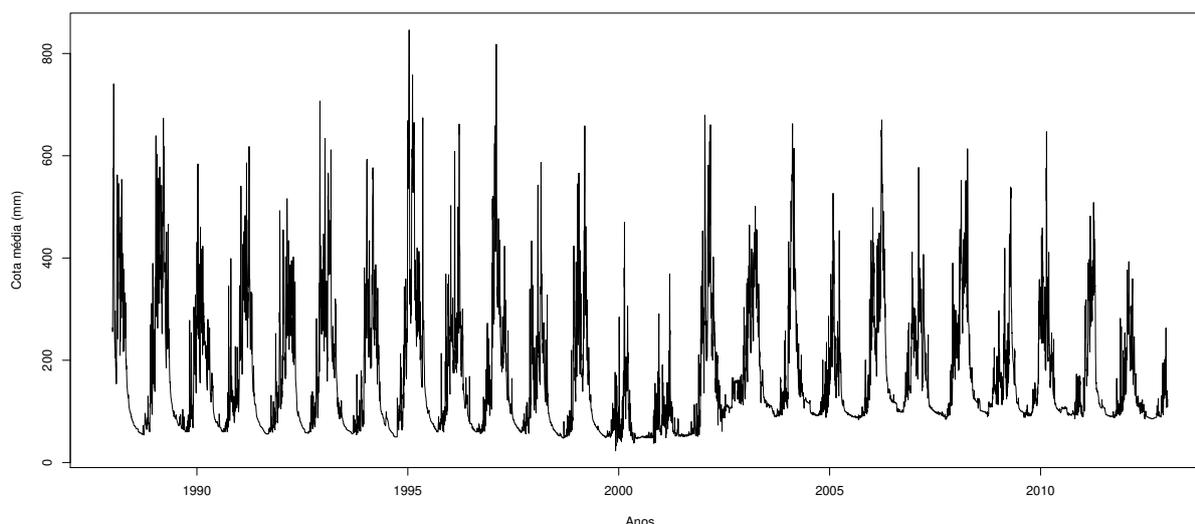


Figura 1: Série das cotas linimétricas médias diárias, estação Rosário Oeste, no período de 1988 a 2012.

Na Tabela 1, são apresentados os testes Quenouille e Kolmogorov-Smirnov para as três comparações das séries nos períodos de 1988-1993 versus 1994-2000, 1988-2000 versus 2001-2012 e 2001-2006 versus 2007-2012, estação Rosário Oeste. Para a variável precipitação, constata-se que ambos os testes não foram estatisticamente significativos, assim as duas partes da série temporal foram geradas por um mesmo processo estocástico e, tem forma e localização similar.

O nível de água não apresenta significância para o teste de Quenouille, por outro lado, por meio do teste Kolmogorov-Smirnov, encontrou-se diferença quando comparada a série no períodos entre 1988-2000 versus 2001-2012. Desta forma, a estrutura de correlação da série permaneceu inalterada, mas ocorreu alteração na forma e localização dos dados após a implantação da Represa do Manso.

Tabela 1: Testes de comparação entre os intervalos de tempo da série das cotas linimétricas médias diárias, estação Rosário Oeste, no período de 1988 a 2012.

Período	Precipitação		Cota	
	Quenouille	Kolmogorov Smirnov	Quenouille	Kolmogorov Smirnov
1988-1993 versus 1994-2000	0,9858	0,9596	0,9987	0,7658
1988-2000 versus 2001-2012	0,7950	0,9030	0,9531	< 0,0001
2001-2006 versus 2007-2012	0,9985	0,8500	0,9998	0,6307

Os valores médios mensais da cota linimétrica e a precipitação acumulada para estação Rosário Oeste, no período de 1988 a 2012, são apresentados na Figura 2, em que observa-se que os níveis de precipitação permaneceram similares ao longo do tempo, e a cota apresentou mudança na série após a instalação da represa do Manso.

A cota máxima tem seus maiores valores no período anterior a 1999, e menores valores nos anos de 2000 e 2001, período de enchimento da represa. Após o ano de 2002 tem-se um aumento novamente da cota máxima, entretanto esses valores são inferiores ao período anterior a 1999. A cota mínima tem menores valores no período anterior a 2002, a partir deste ano registrou aumento significativo, sendo seus valores superiores aos anos anteriores. Este aumento da cota mínima explica a tendência apresentada pelo teste de Cox-Stuart.

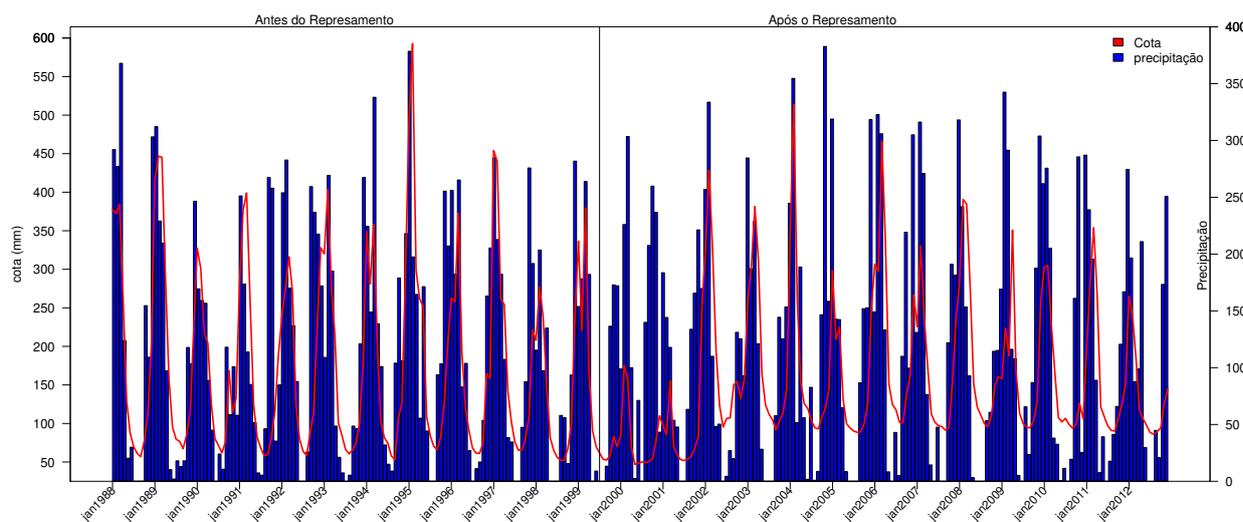


Figura 2: Valores médios mensais da cota linimétrica e precipitação acumulada, estação Rosário Oeste, no período de 1988 a 2012.

As cotas linimétricas médias diárias da Estação Barão de Melgaço, no período de 1988 a 2012, são apresentadas na Figura 3. Da mesma forma que na estação Rosário Oeste, nos períodos anteriores ao represamento os picos dos níveis de água eram mais elevados, e os anos de 2000 e 2001 apresentam menores níveis de água. Pelo teste de Fisher verificou-se a existência de sazonalidade (valor- $p < 0,0001$) com período de oscilação da série em torno de 366 dias. Pelo teste de Cox-Stuart, verificou-se a existência de tendência (valor- $p = 0,0002$), indicando um aumento gradual ao longo do tempo.

Nos testes de Quenouille e Kolmogorov-Smirnov (Tabela 2), a série precipitação de Barão de Melgaço pode ser considerada gerada por um mesmo processo estocástico e apresenta forma e locação similar. Para a cota linimétrica, o teste de Quenouille foi não significativo nas três comparações realizadas, desta forma a série apresenta a mesma estrutura de correlação. O teste de Kolmogorov-Smirnov para cota do rio foi estatisticamente significativo na comparação entre 1988-2000 versus 2001-2012, indicando uma alteração na forma e locação dos dados após a implantação da Represa do Manso.

Na Figura 4, são apresentados as médias mensais da cota linimétrica e a precipitação acumulada da estação Barão de Melgaço, no período de 1988 a 2012, em que, constatou-se que a distribuição da precipitação não apresentou alteração, permanecendo similar antes e pós a instalação da represa do Manso. A cota mínima ocorreu em 1999, quando se deu início o represamento da barragem do Manso, retornando a aumentar em 2002, e não demonstrando alterações expressivas até 2012. Já a cota máxima apresentou comportamento crescente até 1993,

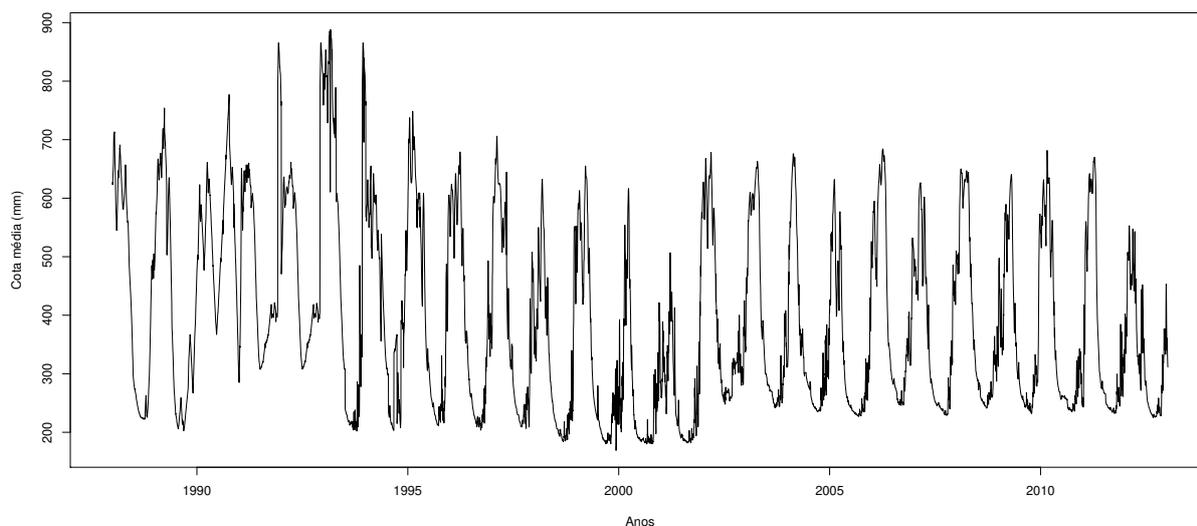


Figura 3: Série das cotas linimétricas médias diárias, estação Barão de Melgaço, no período de 1988 a 2012.

Tabela 2: Testes de comparação entre os intervalos de tempo da série das cotas linimétricas médias diárias, estação Barão de Melgaço, no período de 1988 a 2012.

Período	Precipitacao		Cota	
	Quenouille	Kolmogorov Smirnov	Quenouille	Kolmogorov Smirnov
1988-1993 versus 1994-2000	0,9907	0,7248	0,9991	0,1306
1988-2000 versus 2001-2012	0,9722	0,7299	0,5066	0,0030
2001-2006 versus 2007-2012	0,9998	0,9171	0,9995	0,9659

e a partir desse ano, os valores diminuíram significativamente. Além disso, observou-se que em 2012 ocorreu o menor nível, pois segundo a Defesa Civil do estado de Mato Grosso, no ano de 2012, 197 registros foram computados de baixos níveis de água, apesar dos meses de abril e maio do mesmo ano apresentar intensas chuvas, de fato a estiagem foi prolongada e contabilizou 199 cotas abaixo do limite.

Para as duas estações analisadas observou-se que a implantação da represa de Manso teve um impacto na série temporal da cota do rio Cuiabá. Estudos realizados por Loverde-Oliveira et. al. (2009) e Zeilhofer e Moura (2009) indicam que o início de atividades da usina do manso em 2002 produziu uma equalização dos picos de cheia entre os anos e uma redução de sazonalidade das cheias, devido a uma diminuição de aproximadamente 20% de água descarregada durante o período de cheia.

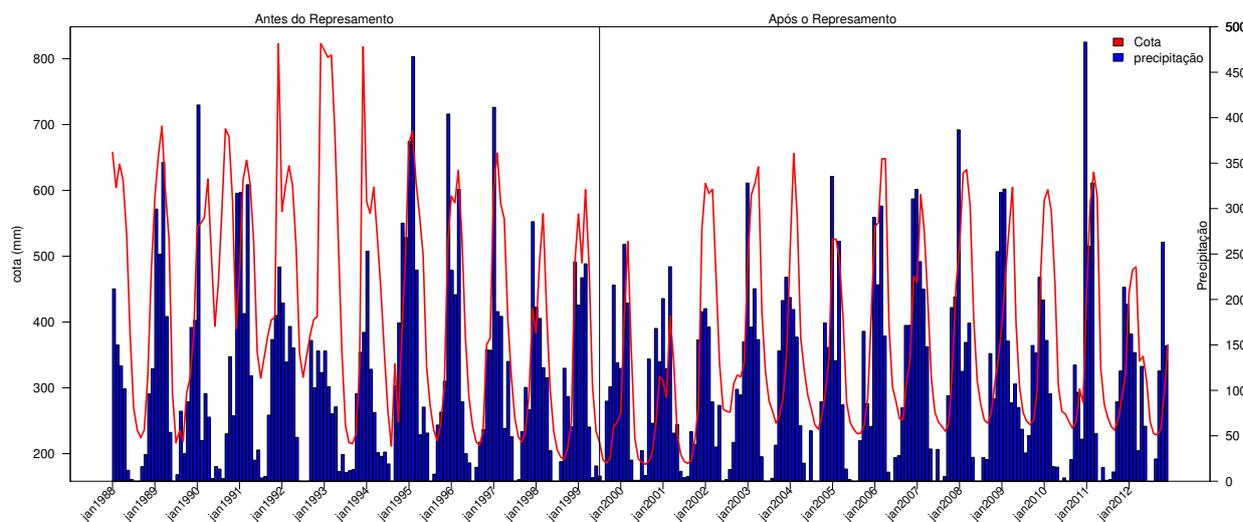


Figura 4: Valores médios mensais da cota linimétrica e precipitação acumulada, estação Barão de Melgaço, no período de 1988 a 2012.

Modelagem

Na modelagem utilizando os modelos SETAR foi considerado apenas o período de 2001 a 2012, devido à influência da represa do Manso no nível de água do Rio Cuiabá.

Na Tabela 3, é apresentado o teste exato de Cox-Stuart e teste de Fisher, para as séries das cotas linimétricas médias diárias das estações Rosário Oeste e Barão de Melgaço, no período de 2001 a 2012. Verifica-se que para ambas as estações, não há evidências de tendência, mas existe a presença sazonalidade com um período de 366 dias.

Tabela 3: Teste de tendência e sazonalidade, para as séries das cotas linimétricas médias diárias das estações Rosário Oeste e Barão de Melgaço, no período de 2001 a 2012.

Estação	Teste Cox-Start	Teste Exato de Fisher	Período
Rosário Oeste	0,8639	< 0,0001	366
Barão de Melgaço	0,6999	< 0,0001	366

As funções de autocorrelação e autocorrelação parcial da série temporal da cota do rio Cuiabá na estação Rosário Oeste são apresentadas na Figura 5, em que verifica-se por meio da fac o modelo AR e por meio da facp determinou-se a defasagem máxima de 20 lags que será considerada na estimação do modelo SETAR. Assim, foi ajustado o modelo de acordo com a expressão (2).

$$Y_t = \begin{cases} 5,58 + 0,95Y_{t-1}, & \text{se } Y_{t-1} \leq 119 \\ 8,64 + 0,95Y_{t-1} - 0,08Y_{t-2} + 0,04Y_{t-6} + 0,06Y_{t-9} \\ -0,05Y_{t-10} + 0,03Y_{t-13} + 0,08Y_{t-19} - 0,07Y_{t-20} & \text{se } Y_{t-1} > 119, \end{cases} \quad (2)$$

A partir do modelo da estação Rosario Oeste 2 verifica-se que no regime 1 encontram-se valores inferiores à mediana, em que os níveis de água são baixos e são afetados somente por valores do dia anterior. No regime 2, tem-se valores acima da mediana, ou seja, os maiores níveis de água, estes são autocorrelacionados até 20 dias anteriores, sendo os valores de 1, 6, 9, 13 e 19 dias anteriores contribuem para aumentar o nível do rio e 2, 10 e 20 dias contribuem para diminuir.

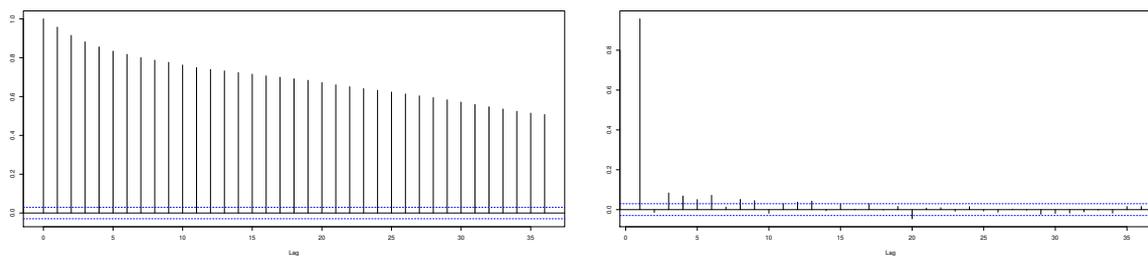


Figura 5: Funções de autocorrelação e autocorrelação parcial para a cotas linimétricas médias diárias, estação Rosário Oeste, no período de 2001 a 2012.

Na Figura 6 são apresentadas as cotas linimétricas médias diárias observadas e estimadas pelo modelo SETAR, na estação Rosário Oeste. Observa-se que os valores apresentados pelo modelo foram semelhantes aos observados. Na Tabela 4, são apresentados os indicadores de qualidade de previsão do modelo (2), tanto o MASE como MAPE apresentaram valores pequenos, indicando uma boa capacidade de previsão do modelo.

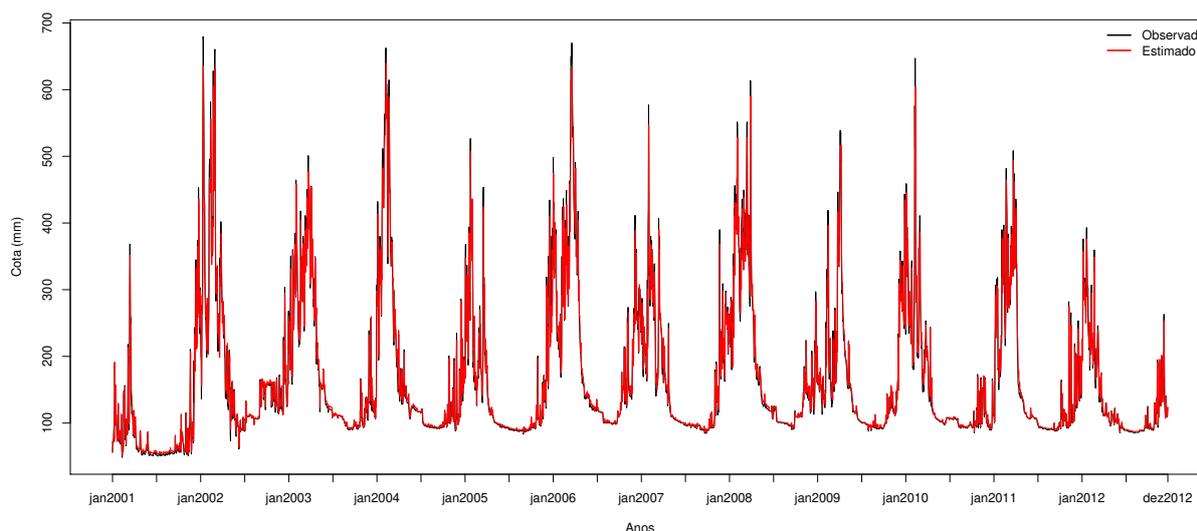


Figura 6: Ajuste do modelo SETAR com a utilização da mediana como threshold, para cotas linimétricas médias diárias, estação Rosário Oeste, no período de 2001 a 2012.

Tabela 4: Indicadores de qualidade de previsão para o modelo SETAR, estação Rosário Oeste.

Indicador	Valor
MASE	1,02
MAPE	7,84%

Na Figura 7 são apresentados os correlogramas da fac e a da $facp$ da série das cotas linimétricas médias diárias, na estação Barão de Melgaço, em que observa-se um comportamento do modelo AR na fac e uma defasagem máxima de 10 lags pela $facp$. Desta forma, foi realizada a estimação do modelo SETAR, conforme expressão (3).

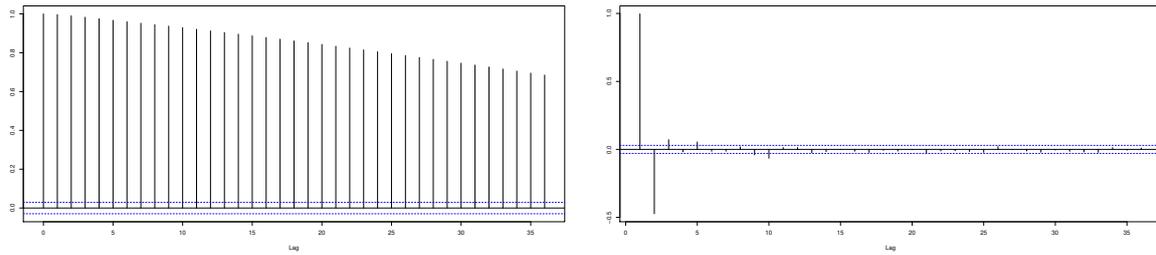


Figura 7: Funções de autocorrelação e autocorrelação parcial, para cotas linimétricas médias diárias, estação Barão de Melgaço, no período de 2001 a 2012.

$$Y_t = \begin{cases} 1,95 + 1,30Y_{t-1} - 0,37Y_{t-2} - 0,07Y_{t-4} + 0,12Y_{t-6}, & \text{se } Y_{t-1} \leq 309 \\ 1,84 + 1,64Y_{t-1} - 0,78Y_{t-2} + 0,19Y_{t-3} - 0,10Y_{t-4} \\ + 0,07Y_{t-5} - 0,06Y_{t-7} + 0,13Y_{t-9} - 0,09Y_{t-10} & \text{se } Y_{t-1} > 309, \end{cases} \quad (3)$$

No modelo para estação Barão de Melgaço (3), observa-se que quando os níveis de água forem baixos (Regime 1) tem-se um dependência de até 6 dias, sendo que os valores de 1 e 6 dias afetam positivamente e 2 e 4 dias negativamente. Já para os maiores níveis de água (Regime 2), a autocorrelação está presente em até 10 dias, sendo os valores dos níveis de águas de 1, 3, 5, e 9 dias anteriores contribuem para aumentar o nível do rio e por 2, 4, 7 e 10 dias contribuem para diminuir.

Os valores das cotas linimétricas médias diárias observadas e estimadas pelo modelo na estação Barão de Melgaço são apresentadas na Figura 8, em que observa-se similaridade entre os resultados obtidos pelos modelo e os reais. Na Tabela 5, são apresentados os indicadores de qualidade de previsão do modelo (3), tanto o MASE como MAPE apresentaram valores pequenos, indicando uma boa capacidade de previsão do modelo.

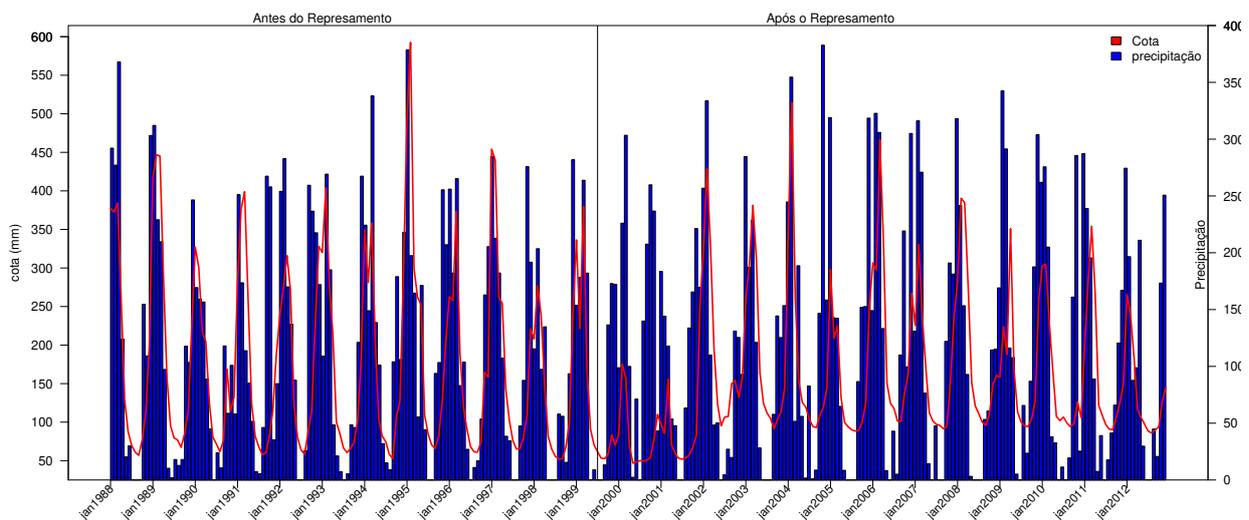


Figura 8: Ajuste do modelo SETAR com a utilização da mediana como threshold, para as cotas linimétricas médias diárias, estação Barão de Melgaço, no período de 2001 a 2012.

Para as duas estações o modelo SETAR se mostrou eficiente em captar a dinâmica não linear

Tabela 5: Indicadores de qualidade de previsão para o modelo SETAR, estação Barão de Melgaço.

Indicador	Valor
MASE	0,79
MAPE	1,44%

do Rio Cuiabá e apresentou boa capacidade de previsão. Amiri (2005) utilizando dados do rio Colorado para comparar o modelo SETAR com os modelos Autorregressivo de Transição Suave (STAR), Autorregressivo Exponencial (EXPAR), Modelo Bilinear (BL) e Autoregressivo de Comutação de Markov (MSAR), observou que o modelo SETAR apresentou melhor desempenho de previsões do que outros quatro modelos.

Conclusão

O comportamento do nível de água do rio Cuiabá sofreu algumas mudanças após a criação da barragem da usina do Manso. Na análise anual do nível de água, o aumento da cota mínima do rio foi expressivo após a implantação da barragem. Desta forma, evidencia um efeito da barragem, já que o nível do rio não diminui tanto na época da estiagem. Ademais, a técnica de previsão pelo modelo SETAR foi de grande aplicação e pode ser adaptada para outras bacias hidrográficas e estações. Assim, os ajustes convirão como modelo para implantação de um sistema de alarme que poderá auxiliar a Defesa Civil e o Corpo de Bombeiros na comunicação de enchentes e inundações nas comunidades ribeirinhas. Contudo, as enchentes estão relacionadas a outros fatores climáticos, causa pela qual se almeja em um próximo trabalho aperfeiçoar o desempenho da previsão, a fim de obter melhores resultados.

Agradecimentos

Agradecemos a FAPEMAT pelo financiamento do projeto de pesquisa.

Referências

- AMIRI, E. Forecasting daily river flows using nonlinear time series models. *Journal of Hydrology*, v. 527, p. 1054-1072, 2015.
- CHAN, K.; RIPLEY, B. *TSA: Time Series Analysis*: <https://CRAN.Rproject.org/package=TSA>, 2018. (R package version 1.2).
- CRYER, J.; CHAN, K. *Time Series Analysis: With Applications in R*. Springer New York, 2008. (Springer Texts in Statistics).
- GIRARD, P.; FANTIN-CRUZ, I.; DE OLIVEIRA, S.M.L.; HAMILTON, S. K. Small-scale spatial variation of inundation dynamics in a floodplain of the pantanal (brazil). *Hydrobiologia*, v. 638, n. 1, p. 223-233, Jan 2010.
- GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M. Considerações sobre as inundações no Brasil. In: *XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. 2005.
- HYNDMAN R. J.; KOEHLER, A. B. Another look at forecast-accuracy metrics for intermittent demand. *Foresight: International Journal of Applied Forecasting*, v. 4, p. 43-46, 2006.

- LOVERDE-OLIVEIRA, S.M.; HUSZAR, V.L.M.; MAZZEO, N; SCHEFFER, M. Hydrology-driven regime shifts in a shallow tropical lake. *Ecosystems*, v. 12, n. 5, p. 807, Jun 2009.
- MARQUES, A. M. Não linearidades, mudanças de regime e assimetrias na taxa de inflação brasileira: Análise a partir de um modelo SETAR. *Economia e Sociedade*, v. 22, n. 1, p. 141-163, 2013.
- MATO GROSSO. *Caracterização hidrográfica do Estado de Mato Grosso: relatório preliminar*. Cuiabá, 1995.
- MATO GROSSO. *Histórico da Defesa Civil do Estado de Mato Grosso*. Rio de Janeiro, 2014. 31 p.
- MORETTIN, P.; TOLOI, C. C. *Análise de séries temporais*. Edgard Blucher, 2006.
- NARZO, A. F. D.; AZNARTE, J. L.; STIGLER, M. *tsDyn: Time series analysis based on dynamical systems theory*, 2009.
- PAES, R. P. *Análise da translação da onda de cheia efluente do reservatório da UHE Manso na bacia hidrográfica do rio Cuiabá, Mato Grosso*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- PRIESTLEY, M. *Spectral Analysis and Time Series*. Academic Press Limited, 407, 1989.
- QIU, D. *snpar: Supplementary Non-parametric Statistics Methods*. <https://CRAN.Rproject.org/package=snpar>, 2014. (R package version 1.0).
- QUENOUILLE, M. H. The comparison of correlations in time-series. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Statistical Methodology)*, v. 20, n. 1, p. 158-164, 1958.
- R CORE TEAM. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria, 2020. Disponível em: <https://www.R-project.org/>
- SHIRASHI, F. K. *Avaliação dos efeitos da construção do APM Manso no controle das cheias nas áreas urbanas das cidades de Cuiabá e Várzea Grande - MT*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- STIGLER, M. *tsDyn: Threshold cointegration: overview and implementation in R*. 2010.
- TOKAR, A.; JOHNSON, P. Rainfall-runoff modeling using artificial neural networks. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 4, n. 3, p. 232-239, 1999.
- TONG, H. *Non-linear Time Series: A Dynamical System Approach*. : Clarendon Press, 1990. (Dynamical System Approach).
- TONG, H.; LIM, K. S. Threshold autoregression, limit cycles and cyclical data. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, v. 42, n. 3, p. 245-292, 1980.
- TUCCI, C. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Editora da UFRGS/ABRH, 2002. (Coleção ABRH

de recursos hídricos).

VITAL, A. R.; COSTA, E. S.; CURVO, M. *Projeto de recuperações conservação da Bacia do Rio Cuiabá: Programa de educação ambiental para onze municípios da Bacia do Cuiabá*. Cuiabá, 1996.

ZEILHOFER, P.; MOURA, R. M. Hydrological changes in the northern pantanal caused by the manso dam: Impact analysis and suggestions for mitigation. *Ecological Engineering*, v. 35, n. 1, p. 105-117, 2009.

Anexos

Tabela A.1: Estimativas do modelo SETAR para as cotas linimétricas médias diárias, estação Rosário Oeste, no período de 2001 a 2012.

Coeficiente	Estimativa	valor-p
Φ_{10}	5,58	0,0061
Φ_{11}	0,95	< 0,0001
Φ_{20}	8,64	< 0,0001
Φ_{21}	0,95	< 0,0001
Φ_{22}	-0,08	< 0,0001
Φ_{26}	0,04	0,0009
Φ_{29}	0,06	0,0008
Φ_{210}	-0,05	0,0022
Φ_{213}	0,03	0,0013
Φ_{220}	0,08	< 0,0001
Φ_{219}	-0,07	< 0,0001

Tabela A.2: Estimativas do modelo SETAR para as cotas linimétricas médias diárias, estação Barão de Melgaço, no período de 2001 a 2012.

Coeficiente	Estimativa	valor-p
Φ_{10}	1,96	0,0029
Φ_{11}	1,30	< 0,0001
Φ_{12}	-0,37	< 0,0001
Φ_{14}	-0,07	0,0158
Φ_{16}	0,12	< 0,0001
Φ_{20}	1,84	0,0340
Φ_{21}	1,64	< 0,0001
Φ_{22}	-0,78	< 0,0001
Φ_{23}	0,19	0,0000
Φ_{24}	-0,10	0,0013
Φ_{25}	0,07	0,0010
Φ_{27}	-0,06	0,0001
Φ_{29}	0,13	< 0,0001
Φ_{210}	-0,09	< 0,0001