

CLIMATOLOGIA E PREVISÃO HIDROLÓGICA DE CHEIA SAZONAL DO RIO XINGU, ALTAMIRA-PA

FRANCO, Vania dos Santos - vsanfranco@yahoo.com.br
Instituto Tecnológico Vale / ITV

SOUZA, Everaldo Barreiros - everaldo@ufpa.br
Universidade Federal do Pará / UFPA e Instituto Tecnológico Vale / ITV

LIMA, Aline Maria Meiguins de - alinemeiguins@gmail.com
Universidade Federal do Pará / UFPA

SOUZA, Adriano Leão de - marlisomleao@yahoo.com.br
Universidade Federal Rural da Amazonia / UFRA

PINHEIRO, Amanda Nascimento - nanda_tkr18@hotmail.com
Universidade Federal do Pará / UFPA

DIAS, Thaiane Silva - thaiane_met_ufpa@hotmail.com
Universidade Federal do Pará / UFPA

AZEVEDO, Franklin Mota de - franklintma@gmail.com
Instituto Tecnológico Vale / ITV

RESUMO: No presente trabalho foram investigados os aspectos climatológicos do regime hidrológico do rio Xingu, incluindo a elaboração de um modelo estatístico de previsão das cheias sazonais no município de Altamira-PA. Os resultados mostraram que o pico das cheias ocorre entre os meses de março a maio (MAM) e a variabilidade fluviométrica é dependente da ocorrência de precipitação no rio Xingu (entre os estados do Pará e Mato Grosso), bem como dos padrões de temperatura da superfície do mar (TSM) no Pacífico e Atlântico que influenciam nas bandas de nuvens convectivas da Zona de Convergência do Atlântico Sul e Zona de Convergência Intertropical. O modelo estatístico de previsão hidrológica do rio Xingu (Altamira-PA), desenvolvido através da regressão linear múltipla para prever a cota da cheia sazonal (MAM) levando em consideração as variáveis preditoras (explicativas) TSM e a precipitação, obteve resultado satisfatório, pois acompanhou bem a cota observada e, além disso, apresentou correlação significativa entre as variáveis, com o coeficiente de Nash Sutcliffe considerado adequado e bom.

PALAVRAS-CHAVES: Amazônia oriental, Cota fluviométrica, Modelagem Hidrológica, Precipitação, Temperatura da Superfície do Mar

CLIMATOLOGÍA Y PREDICCIÓN HIDROLÓGICA DE CRECIDAS DEL RÍO XINGÚ, ALTAMIRA-PA

RESUMEN: En el siguiente trabajo, fueron investigados los aspectos climatológicos del régimen hidrológico del río Xingú, incluyendo la elaboración de un modelo estadístico de previsión de las inundaciones estacionales en el municipio de Altamira-PA. Los resultados muestran que el pico de las inundaciones ocurre entre los meses de marzo a mayo (MAN) y la variabilidad fluviométrica depende de la ocurrencia de precipitación del río Xingú (entre los estados de Pará y Mato Grosso), así como los patrones de temperatura de la superficie del mar (TSM) en el Pacífico y Atlántico, que influyen en las bandas de nubes convectivas de la Zona de Convergencia de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur y la Zona de Convergencia Intertropical. El modelo estadístico de previsión hidrológica del río Xingú (Altamira-PA), desarrollado a través de regresión lineal múltiple para predecir el nivel de inundación estacional (MAM), teniendo en consideración las

variables de predicción (explicativas), la TSM y la precipitación, obtuvo resultados satisfactorios, acompañó bien el nivel observado y, además, mostró una correlación significativa entre las variables y el valor considerado adecuado y bueno para el coeficiente de Nash Sutcliffe.

PALABRAS CLAVE: Amazônia oriental, Nivel Fluviométrica, Modelaje Hidrológico, Precipitación, Temperatura de la Superficie del Mar

CLIMATOLOGY AND HYDROLOGICAL PROGNOSTIC OF THE SEASONAL FLOODS OF THE XINGU RIVER, ALTAMIRA-PA

ABSTRACT: The present work investigated the climatologic aspects of the hydrologic regime of the Xingu river, including the elaboration of a statistical model for the prediction of seasonal floods in the municipality of Altamira-PA. The results showed that a peak of floods occurs between the months of March and May (MAM) and the fluvioimetric variability is dependent of precipitation in the Xingu (states of Pará and Mato Grosso), as well of the Pacific and Atlantic sea surface temperature (SST) pattern that influence the bands of convective clouds of the South Atlantic Convergence Zone and Intertropical Convergence Zone. The statistical hydrologic prediction model of the Xingu River (Altamira-PA) developed through multiple linear regression to predict the water level of seasonal floods (MAM) taking in to account the predictor variables (explanatory) SST and precipitation, presented significant correlation between variables, concordant to the observed water level, with Nash and Sutcliffe coefficient considered adequate and good.

KEYWORDS: Eastern Amazon, River water level, Hydrologic Modeling, Precipitation, Sea Surface Temperature

CLIMATOLOGIE ET PRÉVISION HYDROLOGIQUE DE LA CRUE SAISONNIÈRE DU RIO XINGU, ALTAMIRA-PA

RESUME: Dans la présente étude, nous présentons les aspects climatologiques du régime hydrologique du rio Xingu, y compris l'élaboration d'un modèle statistique de prévision des crues saisonnières dans la ville d'Altamira-PA. Les résultats ont montré que la pointe de crue a lieu entre les mois de mars et mai (MAM) et la variabilité fluvioimétrique dépend de l'occurrence de précipitation du rio Xingu (entre les états du Pará et du Mato Grosso), ainsi que les normes de température de surface de la mer (TSM) dans le Pacifique et l'Atlantique qui influent sur les bandes de nuages convectifs de la Zone de Convergence de l'Atlantique Sud et la Zone de Convergence Intertropicale. Le modèle statistique hydrologique de prévision du rio Xingu (Altamira-PA), développé par régression linéaire multiple pour prévoir le quota de crue saisonnière (MAM) en tenant compte des variables prédictives (explicatives) TSM et la précipitation, a obtenu un résultat satisfaisant, vu qu'il a bien accompagné la quota observée et, en plus, a montré une corrélation significative entre les variables et la valeur considérée adéquate et bonne pour le coefficient de Nash Sutcliffe.

MOT CLÉS: Amazonie Orientale, Quota Fluvioimétrique, modelage hydrologique, Température de Surface de la Mer.

INTRODUÇÃO

O principal elemento que define o clima na Amazônia é a precipitação, devido à grande variabilidade espacial e temporal desta variável (FISCH et al. 1998; VILLAR et al., 2009). Vários estudos observaram que a precipitação da Amazônia é influenciada pelos padrões de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) dos oceanos Atlântico e Pacífico (LIEBMANN e MARENGO, 2001; SOUZA et al. 2000 e SODRÉ et al. 2015). A variabilidade climática de grande escala presente sobre os oceanos tropicais adjacentes influencia um dos principais sistemas indutores das chuvas sobre a Amazônia, a Zona de Convergência Intertropical - ZCIT (DE SOUZA E ROCHA, 2006). Além da ZCIT, outros sistemas meteorológicos de escala local, meso e sinótica contribuem para essa

variabilidade da precipitação, como por exemplo, linhas de instabilidade, sistemas convectivos de mesoescala, a Zona de Convergência do Atlântico Sul e Sistemas Frontais (MOLION, 1993).

A distribuição espacial da precipitação influencia diretamente no nível (cheia e vazante) dos rios amazônicos (SANTOS 2008), um exemplo disso são os episódios das enchentes, como a ocorrida em 2009 nos rios Negro, Solimões e Amazonas (CPRM 2009; OLIVEIRA et al. 2012) e das secas, como a de 2005 ocorrida em algumas partes da bacia amazônica ocidental (MARENGO et al. 2008).

Eventos extremos de cheias são fatos que atingem muitos municípios na Amazônia (OLIVEIRA et al. 2012), e a fim mitigar os impactos causados por esse tipo de evento, ao longo das últimas décadas, vem sendo desenvolvidos modelos hidrológicos. Tucci (1998) define modelo hidrológico como uma ferramenta utilizada para representar os processos do ciclo hidrológico que ocorrem em uma determinada bacia hidrográfica e prever as consequências das diferentes ocorrências em relação aos valores observados. Assim, eles são importantes para a prevenção de danos causados pelas cheias dos rios devido ao aumento da precipitação na bacia (SANTOS, 2008; LUCAS et al., 2007).

Alguns modelos hidrológicos já foram elaborados para rios da Amazônia, como por exemplo, Santos (2008) e Schöngart e Junk (2007) fizeram estudos mensais, sendo este para prever o nível máximo mensal, onde as variáveis preditoras foram o nível médio do rio e a média do Índice de Oscilação Sul do mês de fevereiro, para o período de 1903-2004, do rio Negro na Amazônia Central, e aquele estudou a vazão mensal do rio Tocantins na região de Marabá, tendo como variável preditora a vazão fluviométrica de uma estação a montante da área do estudo. E para a região do rio Xingu, Lucas et al. (2009) elaboraram um modelo hidrológico determinístico mensal de dois parâmetros e um estocástico, porém estes utilizaram a vazão mensal do Xingu no Estado do Pará. O primeiro se mostrou bem eficiente, porém sensível a eventos extremos de precipitação afetando fortemente o armazenamento de água no solo; o segundo mostrou melhores resultados, pois conseguiu capturar a dinâmica da série temporal na simulação das vazões.

De acordo com o Quarto Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC AR4 (MEEHL et al., 2007) as projeções de extremos sugerem que o Brasil terá aumentos na frequência de extremos de chuva. O cenário A1B (cenário intermediário que projeta concentrações atmosféricas de Gases de Efeito Estufa) mostra um aumento, para o período de 2080-2099 em relação ao observado em 1980-1999 nos eventos extremos de chuva intensa em parte da Amazônia.

Segundo Marengo (2008) o Brasil é vulnerável às mudanças climáticas atuais e mais ainda às que se projetam para o futuro, especialmente quanto aos extremos climáticos, e a Amazônia está entre as áreas mais vulneráveis do país (AMBRIZZI et al. 2007) devido a uma possível perda de biodiversidade e impactos no ciclo hidrológico. Nos municípios do estado do Pará, os principais desastres naturais identificados são as enchentes, as inundações, as enxurradas e a erosão fluvial. Szlafsztein et al. (2010) afirma que as enchentes e inundações são frequentes, principalmente no período conhecido como "inverno amazônico" (de dezembro a maio).

É fato de que não se pode impedir que um desastre natural aconteça, mas pode-se minimizar os impactos causados através dos modelos de previsão e medidas de prevenção e gestão de riscos. Assim, como a pluviometria afeta diretamente a variabilidade no comportamento do regime fluviométrico, os valores de precipitação acima da média observados em Altamira-PA (SUDAM 2014) indicam que há necessidade de atuar de forma mais efetiva no monitoramento das cheias. Com isso, o objetivo deste trabalho é a caracterização do regime de cheia do rio Xingu e o desenvolvimento de um modelo estatístico de previsão de cheia sazonal (outono austral - março, abril e maio) para o município de Altamira-PA.

MATERIAL E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é a cidade de Altamira localizada nas margens do rio Xingu, em seu baixo curso, na chamada "Volta Grande do Xingu" (Figura 1). A bacia do rio Xingu em sua totalidade abrange uma área com cerca de 509.000 km², desde a Região Centro-Oeste, no Cerrado, até a Região Norte, com aproximadamente 1.979 km de extensão, que começa no Estado do Mato Grosso e deságua na margem direita do Rio Amazonas, no Estado do Pará.

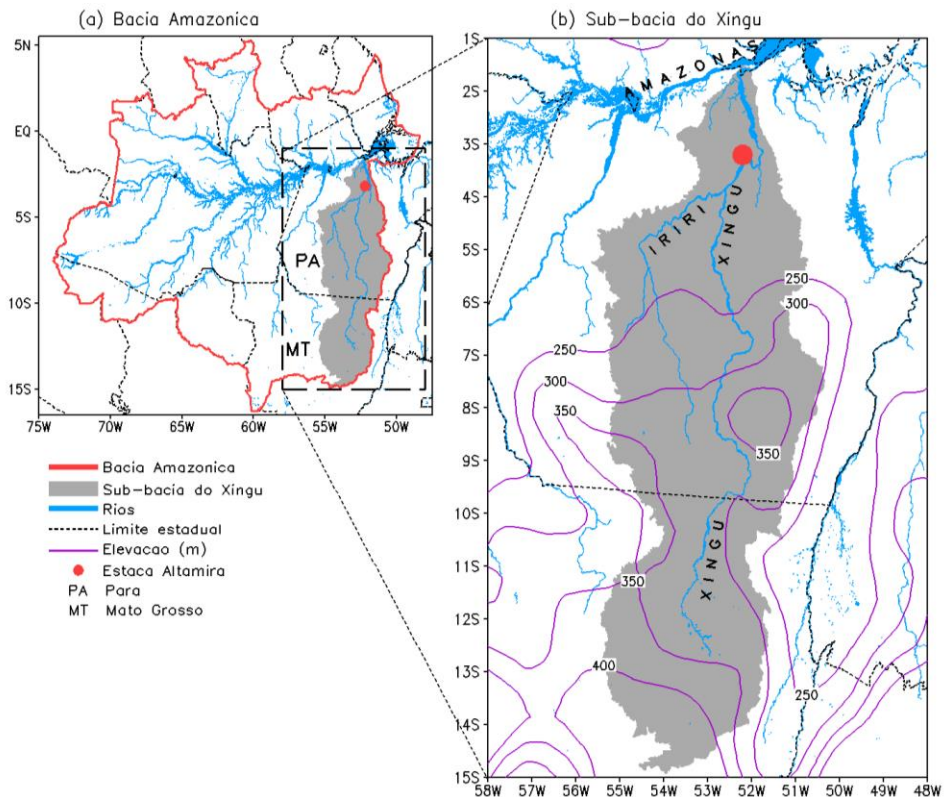


Figura 1 - (a) Bacia do rio Xingu na parte brasileira da bacia hidrográfica amazônica. (b) Localização da estação fluviométrica convencional do município de Altamira.

DADOS E MÉTODOS

Utilizaram-se dados em pontos de grade de precipitação obtidos do Climate Prediction Center (CPC) pertencente ao National Centers for Environmental Prediction (NCEP) dos Estados Unidos da América e documentados em Silva et al. (2007), na qual foram gerados através da interpolação espacial dos dados observados nas estações meteorológicas de superfície, reportados na codificação SYNOP das 1200 UTC, com resolução específica ($1^\circ \times 1^\circ$ de latitude-longitude); e dados mensais de radiação de onda longa emergente (ROLE, unidade: W/m²), estes dados foram extraídos do Climate Prediction Center (CPC) para a análise de convecção (indicativo de nebulosidade tropical) observados nas áreas de atuação da ZCAS e da ZCIT.

Utilizou-se a precipitação (período de 1979 a 2012), na qual foi feita uma "divisão" do rio Xingu em três áreas da seguinte forma: PREC-N (precipitação da região norte do rio Xingu), PREC-C (precipitação da região central) e PREC-S (precipitação da região sul). Tal "divisão" ocorreu devido a declividade do terreno e o curso d'água serem diferenciados ao longo do rio, e ainda, por que o mesmo está localizado em regiões (Centro-Oeste e Norte) com clima (tropical semiúmido e equatorial) e vegetação (savana - que caracterizam as áreas das nascentes e as extensas florestas ombrófilas presentes no médio e no baixo curso) também diferentes. A partir dessa divisão foi feita a análise climatológica da precipitação das três áreas durante o ano hidrológico (ciclo anual completo do regime hidrológico de cheia e vazante).

Foram extraídos diretamente do site da ANA (Agência Nacional de Águas), dados mensais de cota do rio Xingu em Altamira-PA, a fim de: (I) analisar o comportamento mensal e anual da cota e comparar com os dados de precipitação durante as décadas de 80,90 e 2000; (II) investigar a variabilidade e a tendência das cheias no período de 1979 a 2012 (34 anos); (III) verificar a significância estatística, no qual utilizou-se o teste não paramétrico de Mann-Kendall (MANN 1945; KENDALL 1975) e, (IV) observar os eventos com nível do rio abaixo (1o quartil) e acima do normal (3o quartil) durante o pico de cheia que ocorre em março, abril e maio (MAM), através da técnica dos quartis encontrada em Levine et al. (2008).

Os dados de TSM (Temperatura da Superfície do Mar) disponíveis no site do NCEP foram empregados para a análise da climatologia da região bem como para análise da correlação, sendo esta baseada na literatura de Naghettini (2007). A correlação foi feita entre a TSM (oceanos Atlântico e Pacífico) e a cota média do rio Xingu considerando as defasagens de um e dois trimestres.

Para a construção do modelo estatístico de previsão da cota fluviométrica foram avaliadas as variáveis (1) cota média, (2) precipitação e (3) temperatura da superfície do mar, de um período de 34 anos (1979 a 2012), sendo que 24 anos (1979 a 2002) foram utilizados para o treinamento do modelo e 10 anos (2003 a 2012) para a previsão. Foi utilizada a técnica de análise de regressão linear (simples e múltipla) avaliando-se diversos modelos com base nas três variáveis citadas. E para escolha do modelo que representasse a amostra de dados foram utilizados os seguintes indicadores: (A) Coeficiente de determinação (R²), (B) Erro Quadrático Médio (MSE), (C) Erro Percentual Médio Absoluto (MAPE) e (D) Nash-Sutcliffe.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

ASPECTOS CLIMATOLÓGICOS

CLIMATOLOGIA DE ROLE (NEBULOSIDADE) E PRECIPITAÇÃO SAZONAL

Com base nos dados dos anos de 1979 a 2012 e utilizando-se o software Grid Analysis and Display System (GrADS) foram gerados mapas de ROLE sobre a América do Sul e PREC sobre a bacia do rio Xingu durante as estações de DJF, MAM, JJA e SON.

Nota-se a região de atuação da ZCAS durante o verão (DJF), caracterizada pela presença de uma grande área contendo valores de ROLE entre 200 e 220 W/m² com orientação noroeste/sudeste, desde a Amazônia, centro-oeste, até o sudeste do Brasil (Figura 2a). A ZCAS provoca elevados níveis pluviométricos com valores entre 9 mm/dia no norte e volumes de chuva acima 11 mm/dia ao sul do rio Xingu, em DJF (Figura 2b).

No outono (MAM), observam-se os maiores volumes pluviométricos acima de 9 mm/dia no extremo norte do rio Xingu (Figura 2b), onde se encontra o município de Altamira (estação onde se extraiu os dados de cota para este estudo). Os altos índices pluviométricos deste trimestre são favorecidos pela atuação da ZCIT, caracterizada pela presença da região contendo uma faixa zonal de ROLE desde a Amazônia até o Oceano Atlântico equatorial (Figura 2a).

O estudo de Lucas et al. (2009) para a região do rio Xingu utilizando a técnica de agrupamento, permitiu identificar a influência desses sistemas meteorológicos sobre o rio Xingu. Outros estudos como os de Carvalho et al. (2004) e Villar et al. (2009a) também deixam claro a influência dos fenômenos e da TSM na precipitação sobre a Amazônia.

O trimestre JJA é caracterizado por forte redução das chuvas em toda a região da bacia, menos de 3 mm/dia (Figura 2b). Neste período de inverno, a atividade convectiva encontra-se sobre o Hemisfério Norte, com predomínio de ROLE sobre o norte da América do Sul (Figura 2a). Em SON percebe-se o aumento da convecção na porção oeste e sul da Amazônia, com valores de ROLE abaixo de 230 W/m² (Figura 2a), associada com aumento de precipitação na porção sul do rio Xingu, com valores entre 3 e 7 mm/dia (Figura 2b).

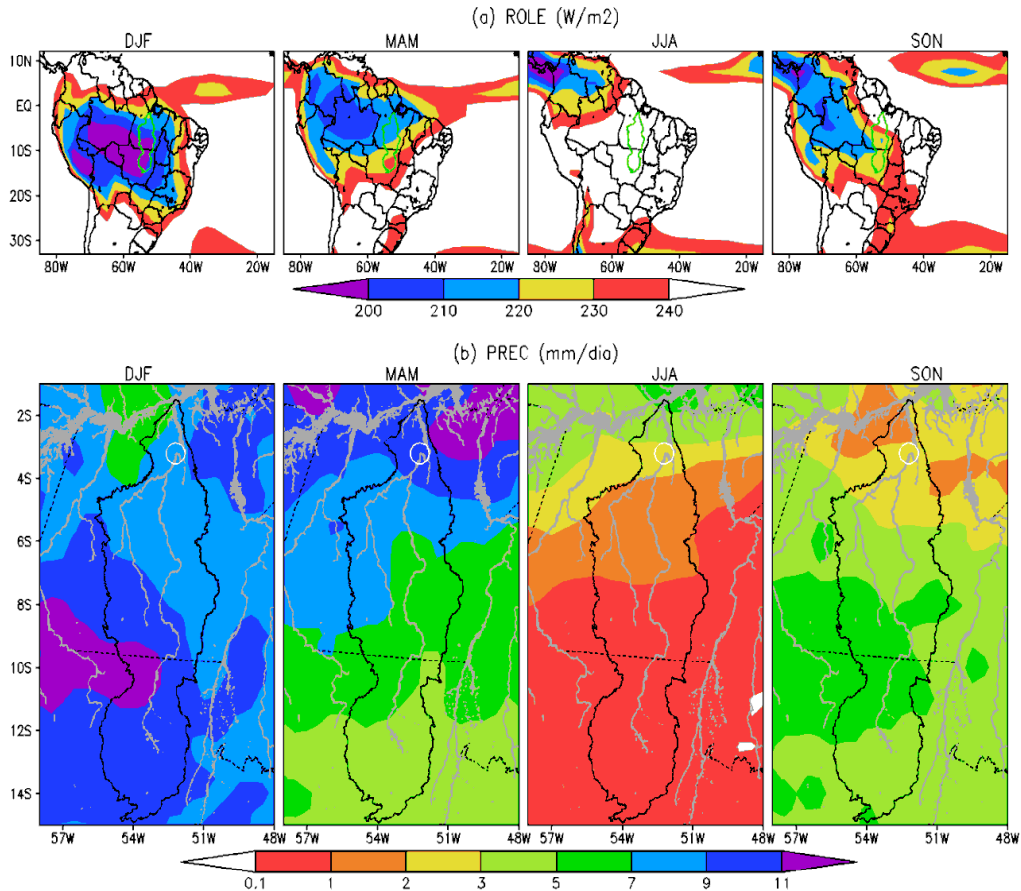


Figura 2 - Climatologia sazonal (média 1979/2012) de (a) ROLE (W/m²) sobre a América do Sul e Oceano Atlântico e (b) de precipitação - PREC (mm/dia) sobre o rio Xingu durante as estações de DJF, MAM, JJA e SON.

COMPORTAMENTO MENSAL E ANUAL DA COTA E PRECIPITAÇÃO (1979-2012)

Com base nos dados dos anos de 1979 a 2012 foram calculados os valores médios mensais de precipitação (PREC) das regiões situadas no alto (PREC-S), médio (PREC-) e baixo (PREC-N) Xingu.

A Figura 3 mostra a variação mensal da cota média em Altamira e da precipitação sobre as três regiões do rio Xingu durante o ano hidrológico, o qual se processa de novembro de um ano até outubro do ano posterior, onde se observa a modulação da precipitação no regime hidrológico ao longo do rio Xingu em Altamira.

O início das chuvas sobre a região ocorre entre agosto e setembro, atingem valores em torno de 3 a 5 mm/dia no mês de outubro, aumentando progressivamente para 5 a 9 mm/dia nos meses de novembro e dezembro, e alcançam valores máximos (pico anual) nos meses de janeiro e fevereiro com precipitação em torno de 12 e 14 mm/dia. De fevereiro para março observa-se um declínio acentuado da chuva para valores entre 6 e 9 mm/dia, até atingir os valores mínimos nos meses de junho e julho.

Por outro lado, a cota do rio em Altamira inicia seu período de subida no mês de novembro e aumenta progressivamente mês a mês até alcançar o seu nível máximo anual (pico anual) nos meses de março e abril, quando se observam cotas entre 673 e 685 cm. A partir de maio o rio inicia seu regime de descida com o pico da vazante ocorrendo nos meses de setembro e outubro, com níveis em torno de 250 cm.

Durante o regime de subida do nível do rio, verifica-se uma defasagem de dois meses entre o pico da precipitação (em janeiro e fevereiro) e o pico da cheia do rio em Altamira (em março e abril). Na evolução da cota fluviométrica da Figura 3 demonstra-se que o trimestre março-abril-maio (MAM) é o período em que se deflagra o pico da cheia anual do rio Xingu em Altamira.

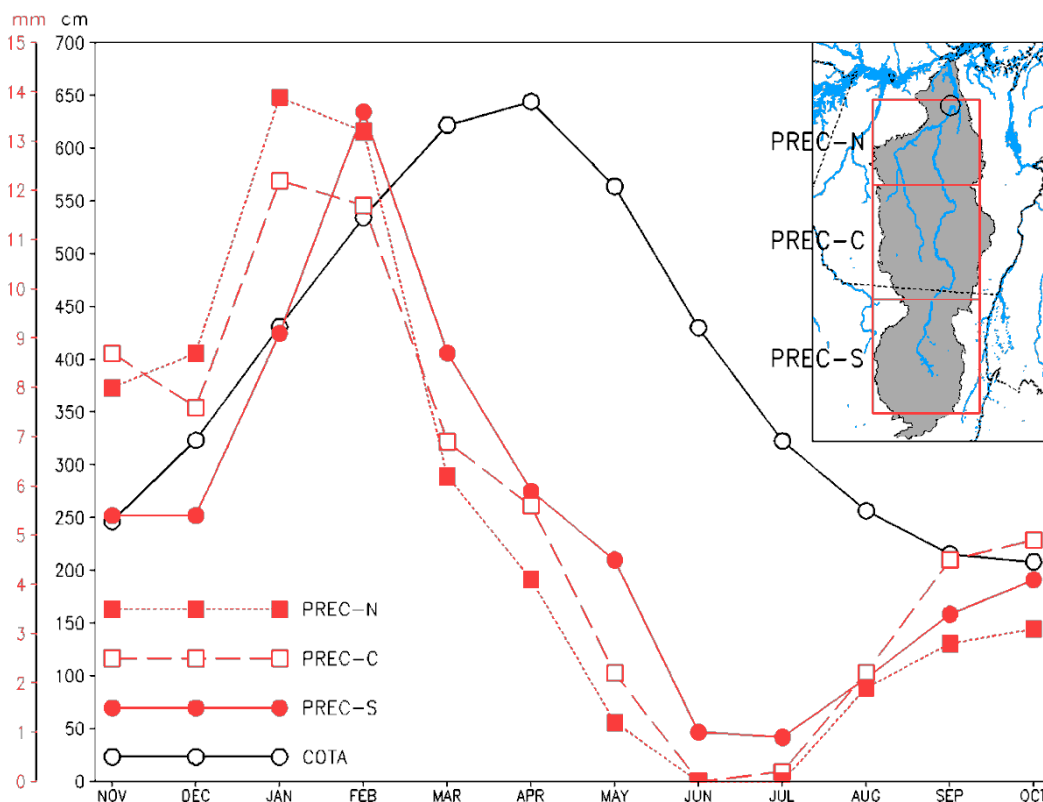


Figura 3 - Variação mensal (média 1979/2012) da cota fluviométrica em Altamira-PA e de precipitação – PREC (mm/dia) medida sobre as áreas situada no alto (PREC-S), médio (PREC-C) e baixo (PREC-N) Xingu durante o ano hidrológico.

Para verificar se houve mudança no comportamento hidrológico do rio Xingu (baixo Xingu), foram considerados 3 períodos de tempo para efeitos de comparação: os dados médios de cota e precipitação das décadas de 1980, 1990 e 2000. Esta análise se deu apenas para o baixo Xingu, não se estendendo para as demais áreas (médio e baixo Xingu), devido à falta de dados de cota.

A Figura 4a ilustra o comportamento do ano hidrológico nas décadas 1980, 1990 e 2000 (linhas em preto) em relação à média mensal da precipitação, no baixo Xingu (PREC-N, precipitação da porção norte) para o mesmo período. Percebe-se que o ano hidrológico na década de 80 tem seu pico

máximo no mês de junho (699 cm) e pico mínimo no mês novembro (267 cm), enquanto que a máxima precipitação ocorre no mês de janeiro, ou seja, cinco meses de defasagem.

A década de 90 apresenta cota máxima anual em abril (670 cm) e pico mínimo em outubro, com isso observa-se que a defasagem entre a precipitação e cota nesta década é de três meses, uma diferença de dois meses em relação à década anterior. Na década de 2000 o pico máximo da cota ocorre em fevereiro (642 cm), tendo, portanto, uma defasagem de um mês entre as variáveis, e quando se compara esta década com a de 1980 observa-se um decréscimo de quatro meses de diferença (Tabela 1). De acordo com Costa, et al. (2003) as modificações na descarga de longo prazo de um rio podem ser causadas por mudanças na variabilidade do clima decadal ou interdecadal, em decorrência de mudanças no uso e cobertura da terra em uma bacia a montante.

A conversão de vegetação, floresta tropical ou cerrado para pastagem, pode interromper o ciclo hidrológico de uma bacia de drenagem, alterando o equilíbrio entre chuva e evaporação e, por conseguinte, a resposta do escoamento da área. A redução de evapotranspiração depois da mudança de cobertura do solo provoca um aumento consistente na descarga ao longo do ano, concluíram Zhang et al. (2001) e Costa (2003). A Figura 4b apresenta o comportamento do ano hidrológico, sendo, porém ao longo dos anos (de 1980 a 2012). Além da diferença nas defasagens entre as três décadas também se observou uma diminuição sistemática no valor da cota, uma queda de aproximadamente 28 cm de uma década para outra.

Estudos mostram que o desmatamento vem aumentando ao longo do rio Xingu. De acordo com o RIMA (2009) ao longo dos últimos anos, a vegetação nativa da região do rio Xingu vem sofrendo grande transformação, com muito desmatamento e degradação ambiental. Teixeira e Soares (2009) concluíram que 50% da ocupação média das áreas da cabeceira do rio Xingu são originalmente em áreas florestais. Bruijnzeel (1990) enfatiza que o aumento de infiltração e redução da evaporação está associado com a mudança do uso da terra, então uma mudança no regime do fluxo do rio pode ser esperada com o aumento de picos durante a estação das chuvas e dos fluxos reduzidos durante a estação seca.

Tabela 1- Defasagem da cota em relação a precipitação.

	Mês cota máxima anual	Mês precipitação máxima	Defasagem (em meses)
1980	Junho	janeiro	5
1990	abril	janeiro	3
2000	fevereiro	janeiro	1

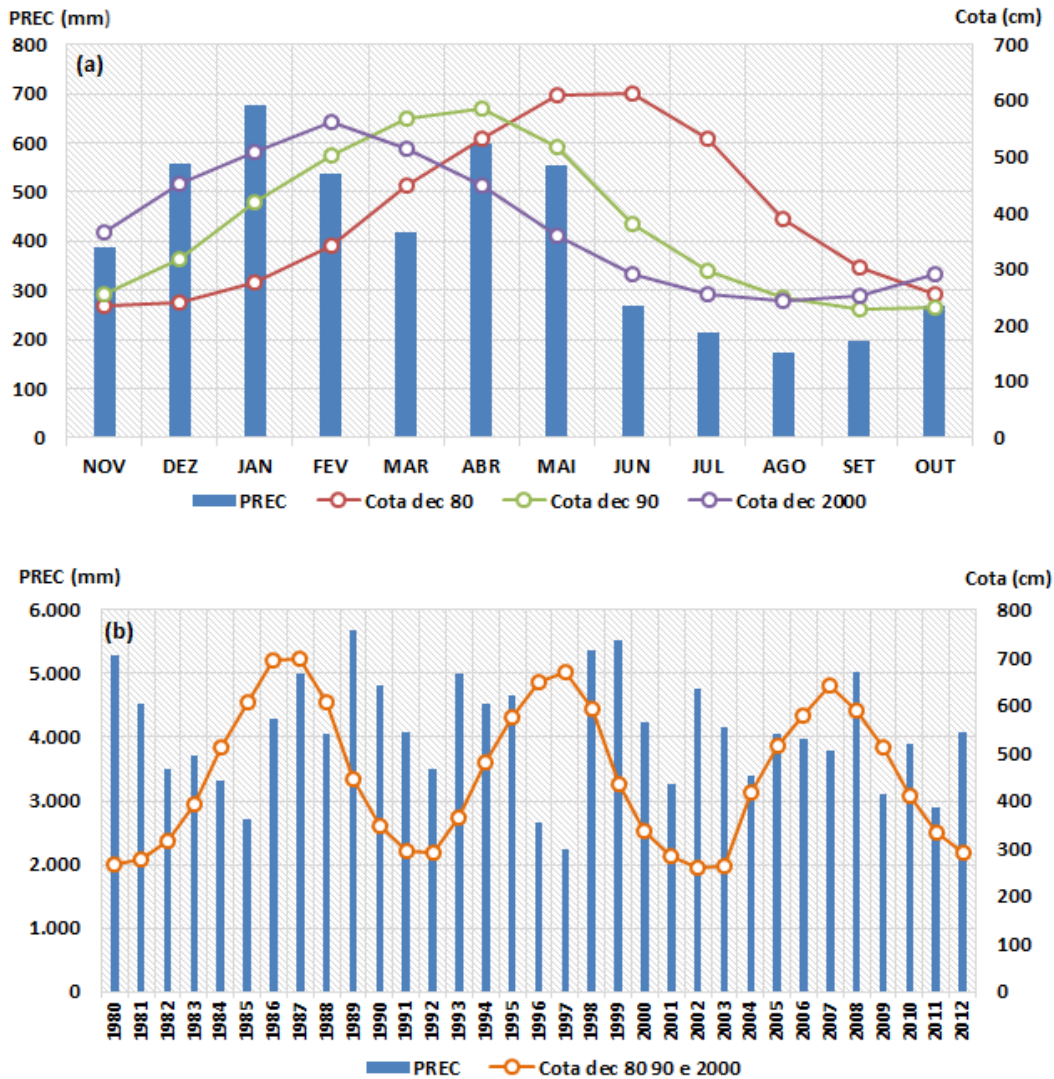


Figura 4 – (a) Modulação mensal (média 1980/2012) da cota fluviométrica (cm) em Altamira-PA e de precipitação - PREC (mm) média sobre a área situada no baixo Xingu (PREC-N) durante o ano hidrológico das décadas de 80, 90 e 2000. (b) Média anual (1980/2012) da precipitação - PREC e da cota sobre a área situada no baixo Xingu (PREC-N) durante o ano hidrológico das décadas de 80, 90 e 2000.

VARIABILIDADE E TENDÊNCIA DAS CHEIAS DO RIO XINGU

Com o objetivo de se investigar a variabilidade e a tendência das cheias sazonais do rio Xingu em Altamira, analisou-se a série temporal da cota de cheia observadas no trimestre MAM entre os anos de 1969 a 2012, na qual neste intervalo de tempo ocorreram 10 eventos de cheias (anos em que o dado de cota fica acima do 3º quartil) e 8 eventos de seca (anos em que o dado de cota fica abaixo do 1º quartil) no município de Altamira (ver Figura 5). Nota-se que a cheia mais expressiva do período ocorreu no ano de 1973 quando o valor da cota ficou próxima de 800 cm, enquanto que a seca mais severa ocorreu em 1998 com a cota inferior a 500 cm. Vale ressaltar também as informações

estatísticas da cota de cheia sazonal (MAM) no período, no qual a diferença entre os valores do 3º e 1º quartis é de 87 (594 no 1º quartil e 681 no 3º quartil) e a média é aproximadamente 642 cm.

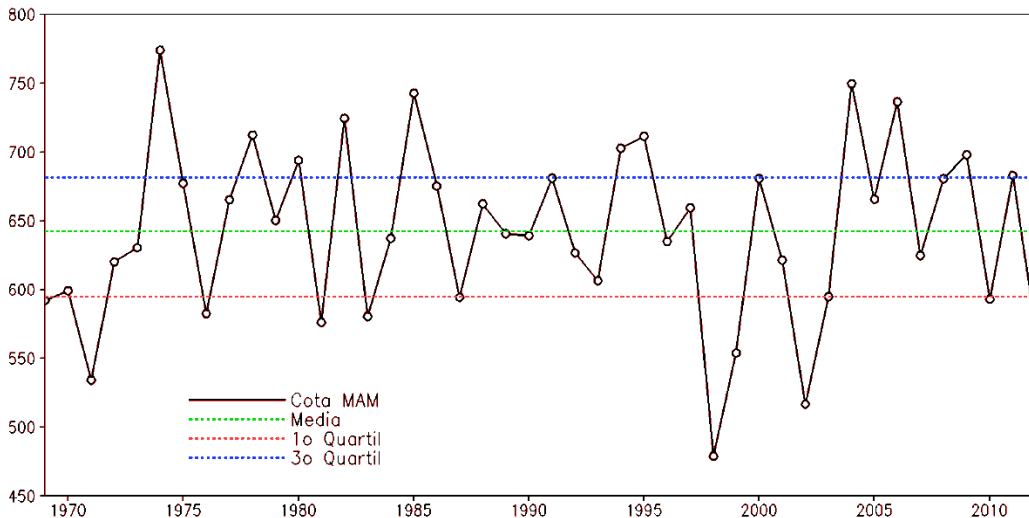


Figura 5 - Variabilidade interanual da cota de cheia sazonal (MAM) do rio Xingu em Altamira durante o período de 44 anos (1969 a 2012). O eixo na vertical refere-se a cota em cm e o eixo na horizontal o ano.

Para verificar se no período considerado houve tendência de aumento (ou diminuição) da cota de cheias, foi realizado o teste não paramétrico de Mann-Kendall onde a hipótese nula H_0 = os dados observados não apresentam tendência e a hipótese alternativa H_a = os dados observados apresentam tendência. Foi obtida a estatística $\tau = 0,038$ com p-valor = 0,725. Desta forma, o teste seria significativo somente ao nível $\alpha = 0,725$. Assim, não se rejeitou a hipótese nula do teste H_0 aceitando-se, portanto que os dados da amostra apresentam um padrão aleatório, ou seja, não apresentam tendência de aumento nem de diminuição ao longo do tempo.

MODELO ESTATÍSTICO DE PREVISÃO DA CHEIA SAZONAL (MAM)

CORRELAÇÕES

A Figura 6 ilustra as correlações entre a cota de cheia em MAM para Altamira e o campo de TSM sobre o Pacífico e Atlântico, ROLE sobre a América do Sul e PREC sobre o rio Xingu para a defasagem nos trimestres anteriores de janeiro a março (JFM) e de fevereiro a abril (FMA) durante os anos de 1979 a 2012. O objetivo desta análise foi descobrir quais regiões poderiam ser usadas como preditoras do modelo estatístico de previsão de cheia.

As correlações entre a cota de MAM e o campo de TSM em JFM (Figura 6a) e também em FMA apresentaram valores negativos numa grande área cobrindo o Oceano Pacífico tropical, sobre o Oceano Atlântico subtropical (próximo à costa sudeste do Brasil) e também sobre a bacia norte do Oceano Atlântico.

As correlações para o campo de ROLE também mostraram configurações semelhantes para os trimestres de JFM (Figura 6a) e FMA (Figura 6b). O ambiente sinótico em que os eventos de chuva ocorrem sobre o rio Xingu estão relacionados com a manifestação conjunta das bandas convectivas da ZCAS e da ZCIT. É possível visualizar a ZCAS bem configurada estendendo-se diagonalmente sobre a Amazônia central, sudeste do Brasil até o Atlântico sul, pois se percebe correlação negativa de ROLE nas Figuras 6a e 6b, bem como também se verificam padrões de correlação negativa de ROLE cobrindo uma banda zonal de convecção da ZCIT ao sul do equador sobre o Atlântico intertropical atingindo também a Amazônia oriental e Nordeste Brasileiro.

As correlações entre a cota de MAM e o campo de precipitação de JFM e de FMA apresentam valores positivos moderados cobrindo todo o rio Xingu, exceto na porção central do rio, em que as correlações oscilam entre -0,15 e 0,3. Em resumo, as variáveis TSM e cota média apresentam uma moderada correlação negativa ($r \sim -0.45$), e a formação de nebulosidade tropical ocorre pela presença da ZCAS e da ZCIT, as quais promovem a ocorrência de chuva em grande parte do rio Xingu, durante os meses anteriores (JFM e FMA).

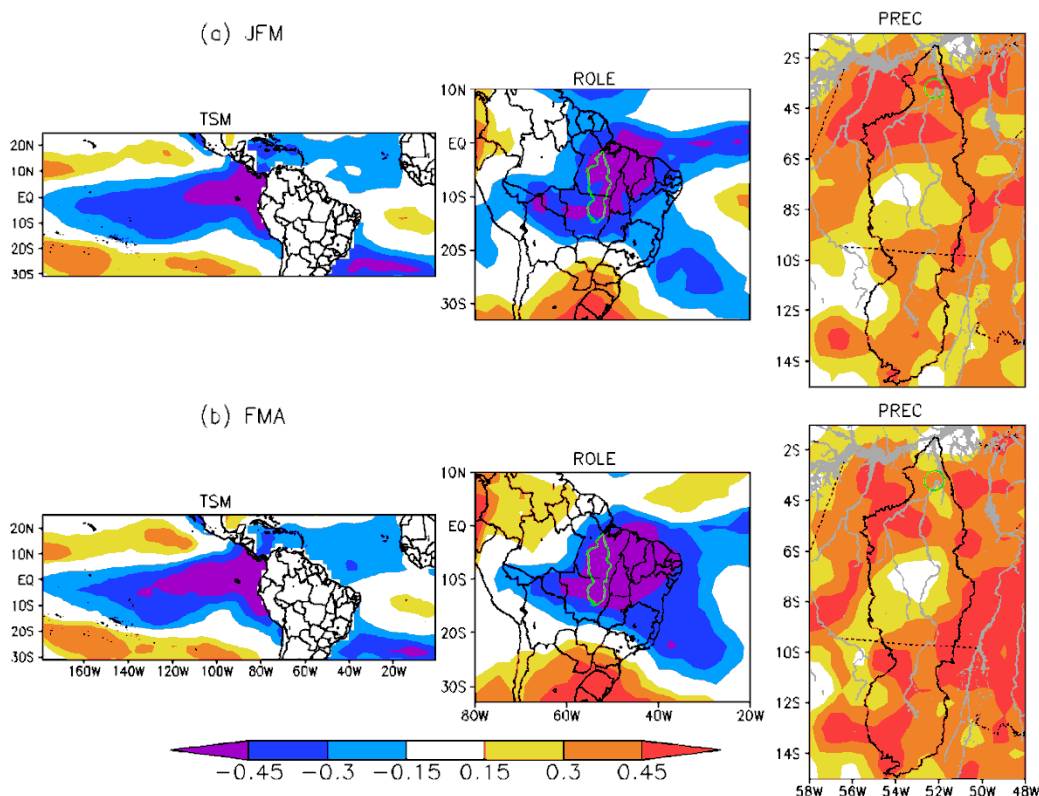


Figura 6 - Correlações entre a cota sazonal de MAM em Altamira e o campo de TSM sobre o Pacífico e Atlântico, ROLE sobre a América do Sul e PREC sobre o rio Xingu para a defasagem (a) JFM e (b) FMA. A escala de cores na base mostra o sinal e intensidade das correlações.

PREVISÃO DA COTA DE CHEIA EM ALTAMIRA

Modelos de regressão linear simples e múltipla foram construídos, considerando as variáveis explicativas TSM dos Oceanos Atlântico e Pacífico e Precipitação das porções norte e sul do rio Xingu para os trimestres JFM (Janeiro, Fevereiro e Março) e FMA (Fevereiro, março e Abril) onde o primeiro trimestre foi considerado como lag (-2) e o segundo como lag (-1), ou seja, defasagem de dois e um trimestres respectivamente antes do trimestre observado de cheia sazonal (MAM) do rio Xingu, no Município de Altamira, do período de 1979 a 2012. Desse período utilizou-se 24 anos (1981 a 2002) para o treinamento do modelo e 10 anos (2003 a 2012) para a previsão.

Consideraram-se as seguintes áreas dos Oceanos Atlântico e Pacífico: Atlântico Norte (NTA), Atlântico Sul (STA), Atlântico Subtropical (SSA), Pacífico Central (CPAC) e Pacífico Equatorial (EPAC). As áreas de precipitação sobre o rio Xingu foram as áreas Norte e Sul do rio (P_{norte} , precipitação da porção norte e P_{sul} ; precipitação da porção sul), conforme figura 7. Foram construídos primeiramente os modelos de regressão linear simples (apenas uma variável preditora), considerando a TSM e a precipitação, porém nenhum foi considerado adequado, pois ou subestimavam ou superestimavam demais os dados observados de cota sazonal de cheia (MAM); e em seguida os modelos de regressão múltipla (usando mais de uma variável preditora). A Tabela 2 mostra alguns dos modelos avaliados de regressão simples e múltipla, incluindo o modelo escolhido para fazer a previsão da cheia do rio Xingu no trimestre março, abril e maio.

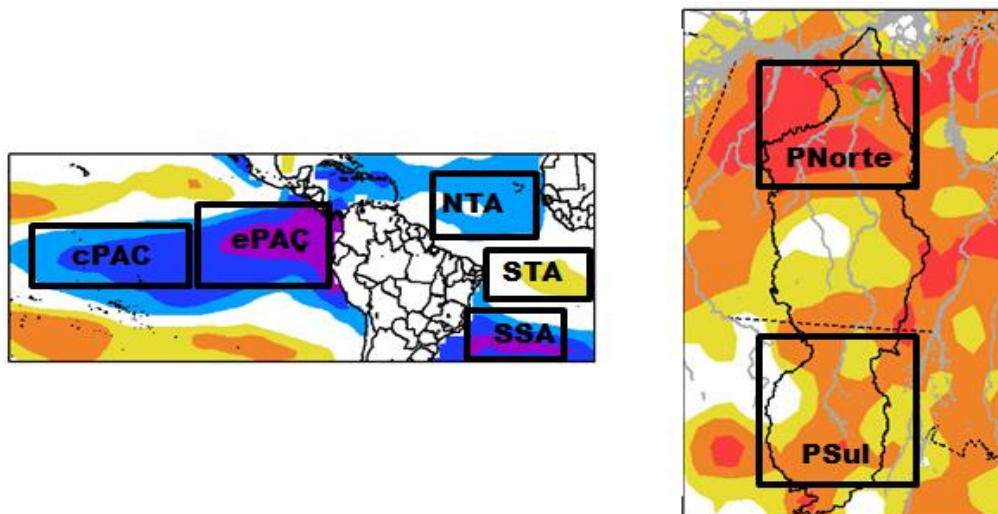


Figura 7 - Áreas de TSM sobre os Oceanos Pacífico e Atlântico e de precipitação do rio Xingu para a montagem do modelo estatístico de previsão da cota de cheia em Altamira-PA.

Tabela 2 – Modelos de regressão avaliados

Modelo	R ²	MSE	MAPE	Nash-Sutcliffe
Y ~ X1	0,30	2885,1	6,4	0,16
Y ~ X2	0,37	2603,5	5,7	0,10
Y ~ X3	0,37	2606,6	6,2	0,17
Y ~ X4	0,01	4109,3	8,0	0,03
Y ~ X5	0,15	3508,8	7,1	0,13
Y ~ X6	0,37	2614,6	5,9	0,16
Y ~ X1 + X3	0,59	1763,5	5,1	0,47
Y ~ X1 + X4	0,32	2903,6	6,2	0,07
Y ~ X1 + X3 + X4+X5	0,72	1363,8	4,4	0,52

Obs.: Y - ALT-Cota-med_MAM; X1 - Pnorte_fma; X2 - Pnorte_jfm; X3 - Psul_fma; X4 - STA_fma; X5 - CPAC_fma; X6 - EPAC_fma

Após os testes de combinações entre as variáveis para as áreas dos dois Oceanos e do rio Xingu para os trimestres (JFM, FMA), o modelo que se adequou aos dados observados de cota para o trimestre MAM foi o modelo utilizando os dados de precipitação das áreas da porção norte do rio Xingu (P_{norte}), porção Sul (P_{sul}), e dados de TSM do Pacífico Central (CPAC) e do Atlântico Sul (STA). A melhor defasagem foi a do trimestre FMA [lag (-1)], cuja equação encontra-se a seguir. Nota-se através da equação que a cota média de (MAM) (variável resposta Y) tem correlação positiva com a chuva das áreas do rio Xingu da porção norte (P_{norte}) (variável preditora X1) e porção sul (P_{sul}) (variável preditora X3). Por outro lado, tem correlação negativa com a TSM das áreas do Atlântico Sul (variável preditora X4) e Pacífico Central (variável preditora X5). O valor da correlação entre a cota, a precipitação e a TSM foi de 0,85, o que mostra uma correlação significativa entre as variáveis.

Portanto, a cota de cheia sazonal do trimestre MAM, no município de Altamira depende da chuva nas áreas porção norte e sul do rio Xingu e da TSM no Pacífico Central e Atlântico Sul.

$$Y = 1396,58 + 14,66 \cdot X1 + 29,23 \cdot X3 - 24,67 \cdot X4 - 16,85 \cdot X5$$

A Figura 8 mostra o resultado da aplicação da equação do modelo considerado como ótimo para prever a cota da cheia sazonal para o município de Altamira levando em consideração as variáveis preditoras (explicativas) TSM e precipitação. Em geral, a série de cota sazonal é consistente com a observação para a região de Altamira do período de 2003 a 2012. No entanto,

alguns valores previstos em anos isolados são notoriamente discrepantes em relação ao observado, a exemplo de 2005, 2006 e 2008. O coeficiente de determinação (R^2) ratifica que 72% da variância da cota prevista é explicada pela variância da cota observada; ao passo que o Erro Quadrático Médio (MSE) o Erro Quadrático Médio Percentual (MAPE) e o Nash-Sutcliffe indicam o bom desempenho do modelo (Tabela 2).

O modelo de regressão desta pesquisa foi desenvolvido para prever a cota sazonal do trimestre MAM, e através de revisão de literatura, o presente modelo parece ser único.

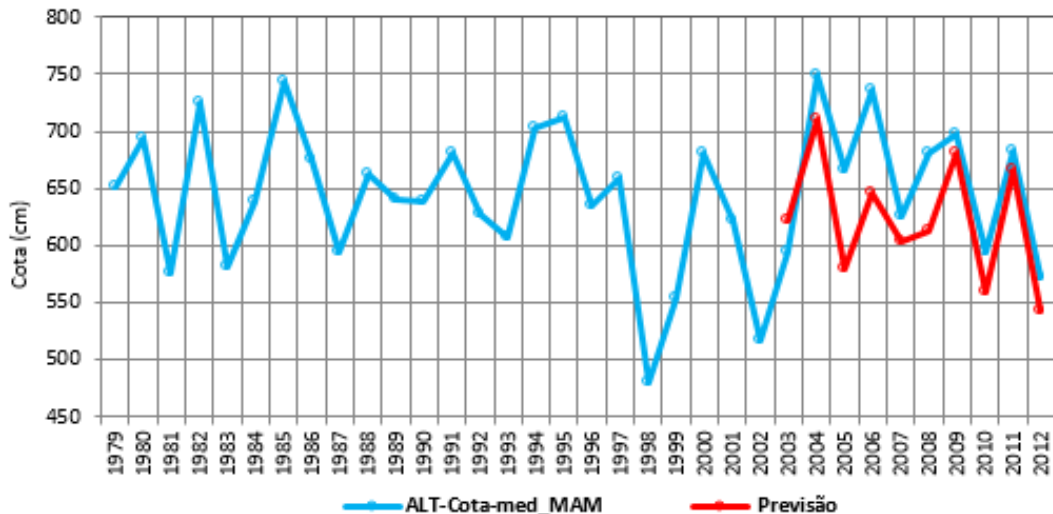


Figura 8 - Séries temporais da cota observada (de 1979 a 2012-linha em azul) e simulada (2003 a 2012 - 10 anos de previsão, linha em vermelho) em MAM pelo modelo estatístico de regressão múltipla para a região do município de Altamira-PA.

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

De acordo com Oliva, (2003) a calibração é o processo de estimar os parâmetros de entrada de um modelo, dentro de um intervalo, até que as diferenças entre os valores observados e previstos sejam verificadas por um critério de convergência pré-determinado. Muitos modelos necessitam de calibração para que reproduza o mais próximo possível o fenômeno a ser modelado (SANTOS, 2009). A validação é o método de determinação do comportamento do modelo, para várias condições de entrada de dados, por comparação da resposta do modelo com diferentes situações observadas (BECK, 1987).

A Figura 9 mostra as séries temporais da cota observada, prevista e calibrada do modelo para o período de 1979 a 1988. Assim como no modelo apresentado na Figura 8 (período de 2002 a 2012) esse período acompanha a sazonalidade da cota observada. O modelo calibrado se aproxima bem da cota observada nos anos de 1979, 1980, 1981, 1983, 1986 e 1987, demonstrando boa consistência, nos demais anos ora subestima (1982 e 1985), ora superestima (1984 e 1988), mas sempre acompanhando a cota observada, mostrando boa correlação entre ambos (0,76).

Os próximos dez anos (1989 a 1998) foram usados para a validação do modelo (Tabela 3), a qual mostrou um alto valor do coeficiente de determinação (R^2) que foi de 0,89. O erro médio percentual absoluto foi menor que 3% e o valor do coeficiente de Nash Sutcliffe foi 0,79. Com esses valores percebe-se que nesse período o modelo mostra consistência.

Gottschalk e Motovilov (2000) propõem que o desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de NS (coeficiente de Nash Sutcliffe) superar 0,70, e é considerado aceitável se o valor de NS ficar entre 0,36 e 0,70. Getirana et al. (2011) relatam que coeficientes de desempenho aproximados obtidos nos períodos de calibração e validação permitem afirmar que houve certa consistência na parametrização do modelo.

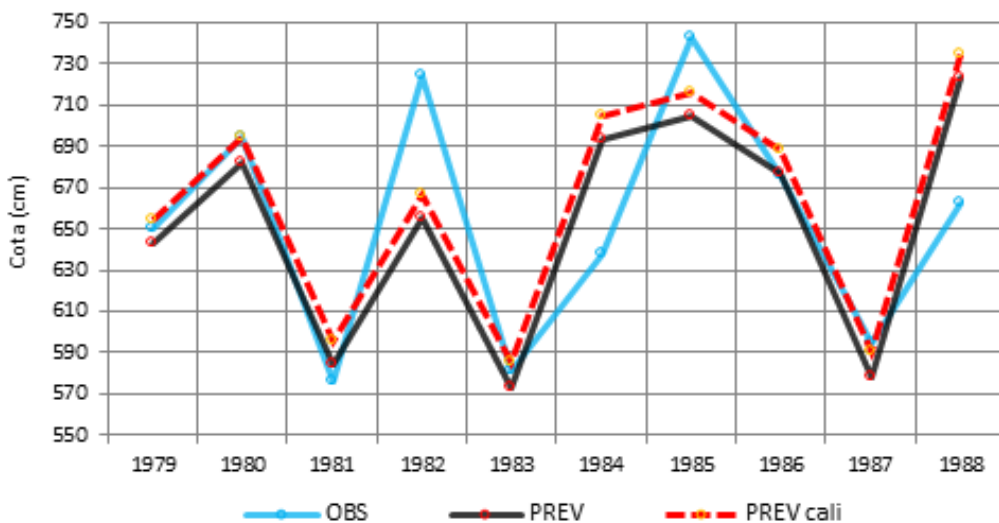


Figura 9 – Séries temporais da cota observada - OBS (linha sólida em azul), prevista - PREV (linha sólida em preto) e calibração - PREVcali (linha pontilhada em vermelho) do modelo estatístico de regressão múltipla para o período de 1979 a 1988.

Tabela 3 - Validação do modelo utilizando os parâmetros coeficiente de determinação (R^2), Erro Percentual Médio Absoluto (MAPE), Erro Médio Quadrático (MSE) e o coeficiente de Nash Sutcliffe para o período de 1989 a 1998.

Período	R^2	R^2 ajustado	MAPE	MSE	Nash Sutcliffe
1989 a 1998	0,89	0,80	2,73	856,66	0,79

CONCLUSÕES

A caracterização climatológica da bacia do rio Xingu indicou que o sistema predominante está relacionado ao campo de TSM nos Oceanos Atlântico e Pacífico bem como aos sistemas meteorológicos da Zona de Convergência do Atlântico Sul e principalmente da Zona de Convergência Intertropical, estes atuando de forma conjunta de dezembro a maio.

O trimestre março, abril e maio foi determinado como o período de cheia sazonal do município de Altamira, uma vez que são os meses com maior pico de cota do rio Xingu. A cota do rio Xingu, em Altamira, vem ao longo das décadas mostrando uma modificação no comportamento mensal.

O modelo estatístico de previsão de cheia desenvolvido para Altamira é um modelo pioneiro para essa região e demonstrou bom desempenho, sendo válido para o Município, pois será uma forma de nortear as ações preventivas da cheia e assim minimizar os impactos causados na região, que sofre todos os anos quando o rio Xingu apresenta aumento em sua cota fluviométrica causado pelo aumento na pluviometria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBRIZZI, T., ROCHA, R., MARENGO J, A. I. PISNITCHENKO, L. ALVES, FERNANDEZ, J. P. Cenários regionalizados de clima no Brasil para o Século XXI: Projeções de clima usando três modelos regionais. Relatório 3, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS - SBF, DIRETORIA DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE - DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, Fevereiro 2007.

ARAÚJO, R; GONZALEZ; ANDREOLI, R. V; CANDIDO, L. A; KAYANO, M. T; SOUZA, R. A. F. A influência do evento El Niño - Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul. Acta Amazônica, 43: 469 - 480, 2013.

BECK, M. B. Walter quality modeling: a review of the analysis of uncertainty. Water Resour. Res. v. 23, p. 1393-144, 1987.

BRUIJNZEEL, L. A. Hydrology of Moist Forests and the Effects of Conversion: A State of Knowledge Review. 1a ed. Free University, Amsterdam, 1990, 224p.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: intensity, form, persistence, relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. Journal of Climate, 17: 88-108, 2004.

COSTA, M.H. Large-scale hydrological impacts of tropical forest conversion. In: Bonell, M.; Bruijnzeel, LA. Forest-Water-People in the Humid Tropics. 1a Ed. Cambridge, Cambridge University Press, 2003, 929p.

COSTA, M. H.; BOTTA, A; CARDILLE J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. Journal of Hydrology, 283: 206-217, 2003.

CPRM, Relatório da cheia de 2009 (http://www.cprm.gov.br/rehi/manaus/pdf/rel_final_2009.pdf). Acesso em 12/05/2014.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma Revisão Geral Sobre O Clima da Amazônia. Acta Amazonica, 28(2):101-126, 1998.

GETIRANA, A. C. V; ROTUNNO FILHO, O. C; MANSUR, W. J; BONNET, M. P; SEYLER, F; GUYOT; J. L. Calibração e Validação de Modelo Hidrológico com

Observações In Situ, Altimetria e Gravimetria Espaciais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos,16: 29-45, 2011.

GOTTSCHALK, L.; MOTOVILOV, Y. Macro-scale Hydrological Modelling – A Scandinavian Experience. In: International Symposium on: "Can Science and society save the water crisis in the 21st century – reports from the world", 2000, Tokyo. Anais... Tokyo: Japan Society of Hidrology and Water Resources, p. 38-45, 2000.

KENDALL, M. G. Rank correlation measures. 1a ed. Charles Griffin, London, 1975, 1975, 220p.

KUMMEROW, C; SIMPSON, J; THIELE O; BARNES W; CHANG, A. T. C; STOCKER, E. The status of the tropical rainfall measuring mission (TRMM) after two years in orbit, J. Appl. Meteor, 39: 1965-1982, 2000.

LEVINE; DAVID, M.; STEPHAN, DAVID, F; KREHBIEL; TIMOTHY, C; BERENSON, L; MARK. Estatística – Teorias e Aplicações. 5a. ed., Rio de Janeiro, 2008 752 p.

LIEBMANN, B; MARENGO, J. A. Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazonia. Journal of Climate, 14: 4308–4318, 2001.

LUCAS, E. W. M.; SOUSA, F. A. S.; SILVA, F. D. S. Modelagem Hidrológica Determinística e Estocástica Aplicada à Região Hidrográfica do Xingu – Pará. Revista Brasileira de Meteorologia, 24: 308 – 322, 2009.

MARENGO, J. A Water and climate change. Estudos Avançados 22(63):83–95, 2008.

MARENGO, J. A; NOBRE C. A; TOMASELLA, J; OYAMA, M. D; OLIVEIRA, G. S; OLIVEIRA, R; CAMARGO, H; ALVES, L. M. The drought in Amazonia in 2005. Journal of Climate, 21: 495–516, 2008.

MANN, H. B. Econometrica. The Econometric Society, 13: 245-259, 1945.

MEEHL, G.A., T.F. STOCKER, W. D. COLLINS, P. FRIEDLINGSTEIN, A. T. GAYE, J. M. GREGORY, A. KITO, R. KNUTTI, J.M. MURPHY, A. NODA, S. C. B. RAPER, I. G. WATTERSON, A. J. WEAVER AND Z. C. ZHAO: Global Climate Projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis, 2007.

MOLION, L. C. B. Amazonia rainfall and its variability. In: Hydrology and water management in the humid tropics. BONELL, M.; HUFSCHEMIDT, M. M.; GLADWELL, J. S. (eds.). International Hydrology Series, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, p. 99-111, 1993.

NAGHETTINI, M; PINTO, E. J. A.Hidrologia Estatística. 1a ed., Belo Horizonte, 2007, 2007, 552 p.

OLIVA, R. 2003. Model calibration as a testing strategy for system dynamics models. European Journal of Operational Research 151:552-568.

OLIVEIRA, V. P; MAFRA, M. V. P; SOARES, A. P. A. Eventos climáticos extremos na Amazônia e suas implicações no Município de Manaquiri (AM). Revista Geonorte, 1: 977 – 987, 2012.

RIMA, 2009 Belo Monte
(http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/Dossie/BM/DocsOf/RIMA-09/Rima_AHE%20Belo%20Monte.pdf). Acesso em 05/11/2013.

SANTOS, D. M. Análise e Modelagem Hidrometeorológica na Bacia do Tocantins em Marabá-PA. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará / Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, Pará. 2008, 118p.

SANTOS L. L. Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações. Revista Brasileira de Geografia Física, 2: 01-19, 2009.

SCHONGART, J; JUNK, W. J. Forecasting the flood-pulse in Central Amazônia by ENSO-índices. Journal of Hydrology, 335: 124-132, 2007.

SILVA, V. B. S; KOUSKY, V; SHI, W. E; Higgins, R. W. An improved gridded historical daily precipitation analysis for Brazil. Journal of Hydrometeorology, 8: 847-861, 2007.

SODRÉ G. R., B. C. Moraes, D.S. Ferreira, J. V. Oliveira, E. B. Souza, 2015. Telecomexões oceânicas nos padrões climáticos da Amazônia oriental: análises dos últimos 40 anos (1974-2013). Revista Brasileira de Climatologia, 17, 53-66.

SOUZA, E. B; KAYANO, M. T; TOTA, J; PEZZI, L; FISCH, G; NOBRE. C. On the influences of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960-1998. Acta Amazônica, 30: 305-318, 2000.

SUDAM, Boletim Hidroclimático 1278 (<http://defesacivil.sudam.gov.br/index.php/boletins/category/7-semanal?start=130>). Acesso em 02/05/2014.

SZLAFSZTEIN, C.; MARQUES, O.; MAIA, H.; PRETTE, M.; FISCHENICH, P.; ALTIERI, F. Referências Metodológicas para mapeamento de Riscos Naturais na Amazônia: Mapeando as vulnerabilidades. Brasília, MMA/GTZ, 60 p., 2010.

TEIXEIRA, G. G., SOARES FILHO, B. S. Simulação da tendência do desmatamento nas Cabeceiras do Rio Xingu, Mato Grosso – Brasil. Anais XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Natal, Brasil, INPE, p. 5483-5490. 2009.

TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 1998.

VILLAR, J. C. E; GUYOT, J. L; RONCHAIL, J; COCHONNEAU, G.; FILIZOLA, N. P; FRAIZY, P; LABAT, D; OLIVEIRA, E; ORDOÑEZ GÁLVEZ, J. J; VAUCHEL, P. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974–2004). Journal of Hydrology, 375: 297–311, 2009a.

ZHANG, L; DAWES, W. R; WALKER, G. R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. Water Resources Research, 37: 701–708, 2001.