



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Prognóstico sazonal de precipitação regionalizada na Amazônia Oriental

Franklin Thiago Mota de Azevedo¹, Everaldo Barreiros de Souza², Vania dos Santos Franco³, Paulo Fernando de Souza Souza⁴

¹ Universidade Federal do Pará (UFPA). franklintma@gmail.com (autor correspondente). ² Instituto Tecnológico Vale (ITV). everaldo.barreiros.souza@itv.org. ³ Instituto Tecnológico Vale (ITV). vsanfranco@yahoo.com.br. ⁴ Universidade Federal do Pará (UFPA). pfsouza@ufpa.br.

Artigo recebido em 08/09/2016 e aceito em 04/09/2017

RESUMO

O foco deste trabalho é na variabilidade espacial e temporal da precipitação na região da Amazônia oriental (estados do Pará, Maranhão e Tocantins) no período de 1982 a 2015. A aplicação da análise de agrupamento permitiu a identificação de quatro regiões homogêneas de precipitação sobre a região, sendo que o período mais chuvoso (CHU+) e menos chuvoso (CHU-) ocorrem de forma diferenciada ao longo dos meses do ano, caracterizando a variabilidade pronunciada sobre a região. As áreas-chave dos padrões de temperatura da superfície do mar (TSM) sobre os Oceanos Pacífico e Atlântico foram selecionadas através de correlações significantes, com a finalidade de montar os modelos de regressão simples e múltipla para a geração das previsões sazonais de precipitação nas regiões homogêneas durante os regimes CHU+ e CHU-. Os resultados dos modelos indicaram que as previsões com lag0 (preditores de TSM no mesmo período de ocorrência dos regimes CHU+ e CHU-) são melhores do que as previsões defasadas (preditores de TSM no mês, bimestre e trimestre anterior ao regime CHU+ e CHU-), independente do modelo ser de regressão simples (apenas uma área de TSM) ou múltipla (duas, três ou quatro áreas de TSM).

Palavras-chave: regionalização de precipitação, TSM Pacífico e Atlântico, modelos de regressão linear.

Seasonal prognostic of regionalized precipitation in Eastern Amazon

ABSTRACT

The focus of the present work is on time and spatial variability of precipitation in eastern Amazon (Pará, Maranhão and Tocantins states) during 1982 to 2015 period. The application of the cluster analysis allowed the identification of four homogeneous regions of precipitation over region, with the rainy (CHU+) and dry (CHU-) periods occurring in different ways throughout the months of the year, featuring the pronounced climate variability of the region. The key-areas of the patterns of sea surface temperature (SST) over Pacific and Atlantic Oceans were selected through significant correlations, in order to build simple and multiple regression models to generate seasonal forecasts of precipitation in regions homogeneous during the CHU + and CHU- regimes. The results of the models indicated that the lag0 predictions (SST predictors in the same period of occurrence of CHU + and CHU-) are better than the lagged forecasts (SST predictors of the month, two-months and three-months preceding the CHU + and CHU-), regardless of the model is simple (only one TSM area) or multiple (two, three or four areas of SST).

Keywords: precipitation regionalization, Pacific and Atlantic SST, linear regression models.

Introdução

A Amazônia está localizada na porção norte da América do Sul, sendo caracterizada por uma variabilidade climática, na qual a precipitação é a variável que melhor define essa variabilidade (Fisch et al., 1998). Espinoza Villar et al. (2009) analisaram a variabilidade climática em toda a bacia Amazônica e demonstraram que não existe uma pluviometria homogênea em sua totalidade, o que também foi observado por Santos et al. (2015)

que detectaram seis regiões homogêneas ao longo da região.

Um dos principais sistemas indutores das chuvas sobre a Amazônia e o Nordeste brasileiro é a Zona de Convergência Intertropical - ZCIT (Satyamurti et al., 1998; De Souza e Rocha, 2006) sobre o Atlântico tropical. A ZCIT é influenciada direta ou indiretamente pelos modos de variabilidade climática de grande escala presentes sobre os oceanos tropicais adjacentes. O Oceano

Pacífico, ciclo do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e também o Oceano Atlântico, fases do gradiente meridional inter-hemisférico de anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM), induzem modificações significativas nos padrões das circulações de Walker e Hadley e consequentemente modulam a atividade convectiva da ZCIT (Kousky et al., 1984; De Souza et al., 2000; De Souza et al., 2009).

Estudos como os de Sodré et al. (2015) e Fu et al. (2001) observaram que a precipitação da Amazônia é influenciada pelos padrões de TSM dos Atlântico e Pacífico. Assim, o sinal e intensidade da TSM nesses oceanos são utilizados como preditores na previsão da precipitação para o nordeste e sul do Brasil (Hastenrath, 1990; Hastenrath e Greischar, 1993; Pezzi et al. 2000). Para a região da Amazônia trabalhos usando modelagem estatística são escassos. Assim sendo o objetivo deste estudo é desenvolver modelos de previsão sazonal de precipitação particularmente para a Amazônia oriental, baseados na influência da TSM dos Oceanos Pacífico e Atlântico. A abordagem da precipitação será em escala regionalizada.

Material e métodos

Dados

Foram utilizados dados mensais de precipitação de um total de 20 estações meteorológicas localizadas em pontos dos estados do Pará, Tocantins e Maranhão, sobre a Amazônia oriental, conforme mostra a Tabela 1. Estes dados foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, através do BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa, e consistem de séries temporais compreendendo o período de 1982 a 2015 das estações convencionais, de acordo com as normas técnicas internacionais da Organização Meteorológica Mundial. Foram utilizados também dados mensais de TSM (Temperatura da Superfície do Mar) de 1982 a 2015, extraídos do *Climate Prediction Center* (CPC), pertencente ao *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) dos Estados Unidos da América, os quais se encontram disponíveis numa grade global de resolução de 1° de latitude e longitude.

Tabela 1. Litologia e porcentagem de cavernas do Pará

Número e nome estação	Sigla	Lon	Lat
1 - Altamira	ALTA	-52,21	-3,21
2 - Araguaína	ARAG	-48,20	-7,20
3 - Bacabal	BACA	-44,76	-4,21
4 - Balsas - MA	BALS	-46,03	-7,53
5 - Barra do Corda	BCOR	-45,23	-5,5
6 - Belém	BELE	-48,43	-1,43
7 - Breves	BREV	-50,48	-1,68
8 - Cametá	CAME	-49,5	-2,25
9 - Carolina	CARO	-47,46	-7,33
10 - Colinas	COLI	-44,25	-6,03
11 - Conceição Araguaia	CARA	-49,26	-8,26
12 - Imperatriz	IMPE	-47,48	-5,53
13 - Marabá	MARA	-49,13	-5,36
14 - Porto de Moz	PMOZ	-52,23	-1,73
15 - São Felix Xingu	SFXI	-51,96	-6,63
16 - São Luis	SLUI	-44,21	-2,53
17 - Tracuateua	TRAC	-46,9	-1,06
18 - Tucuruí	TUCU	-49,66	-3,76
19 - Turiaçu	TURI	-45,36	-1,56
20 - Zé Doca	ZDOC	-45,65	-3,26

Métodos e procedimentos de análise

Similarmente ao estudo de regionalização de precipitação conduzido por Santos et al. (2015), utiliza-se uma Análise de Agrupamento como metodologia para a identificação objetiva das áreas pluviometricamente homogêneas sobre a Amazônia Oriental. Esta técnica multivariada agrupa elementos através da medida de similaridade ou dissimilaridade nos dados. Para isso, utilizou-se a metodologia de Mimmack et al. (2001), a distância Euclidiana que é indicada para regionalização de dados climáticos. Esta distância d_{xy} é dada entre dois elementos, $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]$ e $Y = [Y_1, Y_2, \dots, Y_n]$ de acordo com a seguinte equação:

$$d_{xy} = \sqrt{(X_1 - Y_1)^2 + (X_2 - Y_2)^2 + \dots + (X_n - Y_n)^2}$$

$$= \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}$$

Sendo que X_i e Y_i são elementos da comparação.

O segundo passo consiste no método da Análise Aglomerativa Hierárquica (AHC), na qual se identifica a menor variância entre os grupos, associando elementos cuja soma dos quadrados entre eles é mínima, ou ainda, que o erro desta soma seja mínimo (Hervada-Sala e Jarauta-Bragulat, 2004), através do conhecimento prévio dos dados, uma redução da distância foi determinada a fim de definir os aglomerados. Assim, a técnica AHC foi aplicada ao conjunto de dados mensais de precipitação das 20 estações considerando as séries temporais completas de janeiro de 1982 a dezembro de 2015.

O método da Regressão Linear Múltipla foi utilizado para o desenvolvimento dos modelos de previsão sazonal levando em conta os dados de precipitação e TSM. De acordo Levine et al. (2008) o princípio consiste em modelar uma variável quantitativa dependente Y através da combinação linear de p variáveis explicativas quantitativas $X_1, X_2, \dots, X_p$. O modelo estatístico pode ser escrito para observações i como segue:

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i$$

Sendo y_i o valor observado para a variável dependente (precipitação) e observação i , x_{ij} é o valor considerado pela variável j e observação i (as variáveis utilizadas como explicativa foram os dados de TSM em áreas selecionadas sobre os oceanos Pacífico e Atlântico), β_0 é o coeficiente linear (também chamado intercepto, é o valor que

y assume quando x for zero), β_j coeficiente angular (é a inclinação da reta, mede o aumento ou redução em y para cada aumento de uma unidade em x) e ε_i é o erro do modelo. Para a avaliação do desempenho do modelo de previsão utilizou-se os seguintes parâmetros: Coeficiente de determinação (R^2), indica o quanto da variação total dos dados (série dependente) é explicada pelo modelo (Lapponi, 2005). Este coeficiente é calculado através da comparação do erro do modelo e a variação dos dados da série dependente (série a ser prevista) em torno de sua média, na qual o valor varia entre 0 e 1 (quanto maior seu valor significa que o modelo está sendo melhor explicado). Os outros critérios utilizados foram: o viés e o RMSE (raiz quadrada do Erro Quadrático Médio).

Os procedimentos de análise empregados foram os seguintes:

Regionalização da precipitação e definição dos regimes chuvoso e menos chuvoso: a partir dos resultados da AHC, foram gerados os índices regionais de precipitação representativo das regiões homogêneas (médias dos dados das estações em cada região homogênea). Foram calculadas as médias climatológicas mensais de janeiro a dezembro de 1982 a 2015 para cada índice regional e foi identificado o trimestre de ocorrência dos máximos pluviométricos, definido como o regime chuvoso (CHU+) e também do trimestre de ocorrência dos mínimos pluviométricos, definido como o regime menos chuvoso (CHU-). Em seguida, foram extraídas as médias trimestrais de precipitação CHU+ e CHU- para cada índice regional de 1982 a 2015.

Montagem dos modelos de regressão e seleção das áreas predictoras de TSM: foram calculadas as correlações entre os índices regionais de precipitação e a grade espacial de TSM sobre os Oceanos Pacífico e Atlântico com a finalidade de selecionar as áreas geográficas contendo correlações significativas a serem usadas como variáveis predictoras. As correlações foram feitas com lag0 ou defasagem simultânea (mesma série temporal dos trimestres de precipitação e TSM) e também com defasagem de um mês (lag-1), de dois meses (lag-2) e de três meses (lag-3). Os resultados contendo correlações significativas entre os índices de precipitação regional e TSM foram usados para a montagem dos modelos de regressão simples (TSM em apenas uma área oceânica prevendo precipitação) e múltipla (TSM em duas ou mais áreas oceânicas prevendo precipitação). Assim, foram montados dois modelos, o MRL1 para o lag0 e o MRL2 para a melhor defasagem lag-1, lag-2 ou lag-3, de acordo com o sinal de correlação mais significativa. Os modelos foram gerados

considerando o período de treinamento de 23 anos (1983 a 2005) e o modelo foi avaliado para o período de previsão de 10 anos (2006 a 2015). Tanto para as análises de correlações, como para os modelos de regressão são considerados a significância estatística ao nível de 95% ($p = 0,05$).

Resultados

Regionalização da precipitação

A Figura 1 mostra os resultados obtidos na AHC com a distribuição espacial das áreas homogêneas de precipitação sobre a Amazônia oriental. Foram identificadas quatro regiões nomeadas de R1 (centro), R2 (sul/sudeste), R3 (norte) e R4 (litoral). Em termos de abrangência

espacial foram verificadas quatro estações (Altamira, Bacabal Tucuruí e Zé Doca) em R1, nove estações (Araguaína, Balsas, Barra do Corda, Carolina, Colinas, Conceição do Araguaia, Imperatriz, Marabá e São Felix do Xingu) em R2, quatro estações (Belém, Breves, Cametá e Porto de Moz) em R3 e três estações (São Luís, Tracuateua e Turiaçu) em R4.

A Figura 2 mostra o dendrograma com a formação dos grupos de estações, sendo que o corte na vertical (nível em que se define os agrupamentos) na dissimilaridade delimitou a formação de quatro grupos ou regiões homogêneas. Nos grupos de estações formados pela análise de agrupamento, percebe-se que as estações se encontram próximas geograficamente.

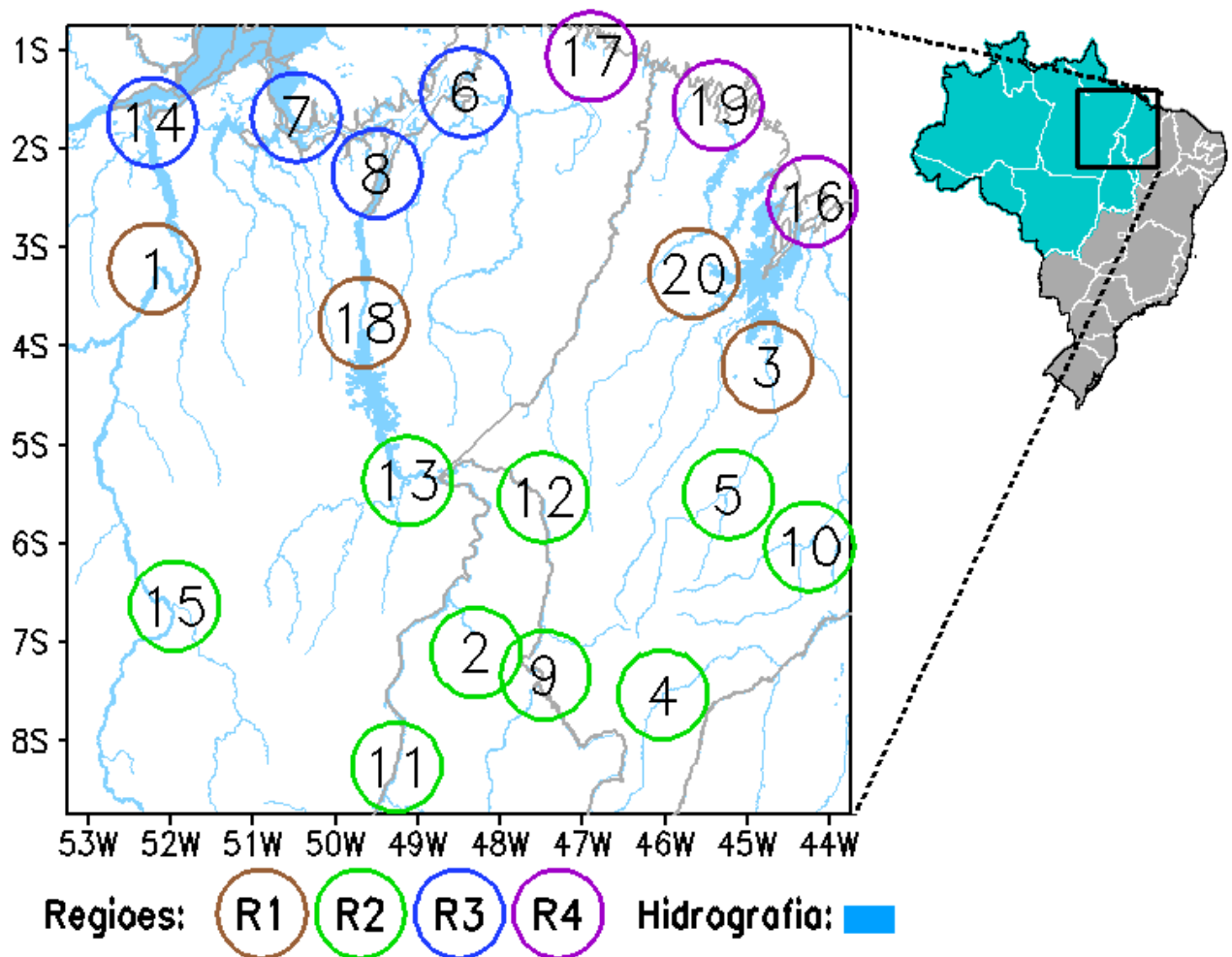


Figura 1. Distribuição espacial das vinte estações nas quatro regiões pluviometricamente homogêneas da Amazônia oriental, entre os estados do Pará, Tocantins e Maranhão. As cores indicam o agrupamento das estações nas regiões R1, R2, R3 e R4.

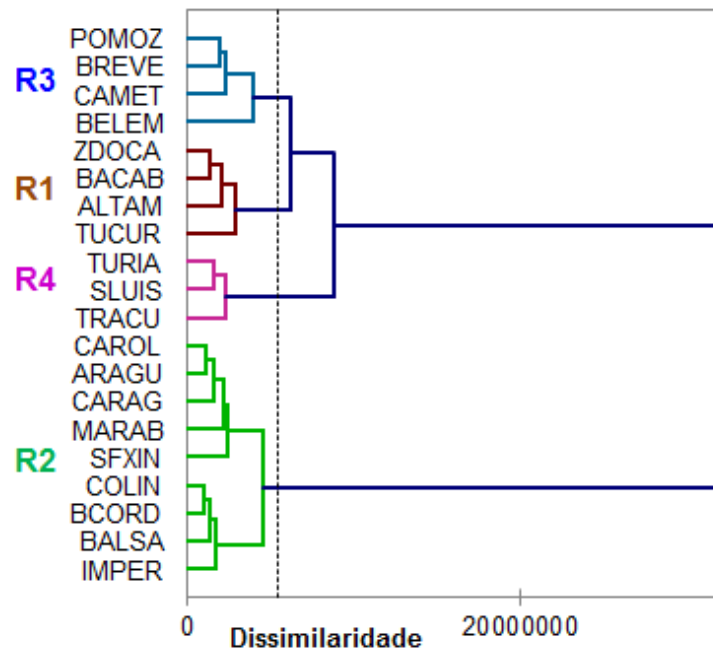


Figura 2. Dendrograma obtido pela AHC com a delimitação dos quatro grupos (R1, R2, R3, R4) de estações sobre a Amazônia oriental. O significado das siglas das estações encontra-se na Tabela 1.

Ciclo anual climatológico e regimes pluviométricos sazonais

A Figura 3 ilustra o ciclo anual (média climatológica de 1982 a 2015) dos índices regionalizados (média das estações em cada região) de precipitação das regiões R1, R2, R3 e R4. Na evolução mensal da precipitação evidenciam-se variabilidades pronunciadas tanto temporalmente ao longo dos meses do ano, como espacialmente entre as diferentes regiões. Os trimestres que apresentam os máximos de precipitação são

definidos como o período chuvoso (CHU+), ou seja, o atingimento do pico máximo do ciclo anual. Os trimestres de ocorrência do CHU+ nas regiões R1, R3 e R4 são Fev-Mar-Abr e na região R2 são Jan-Fev-Mar. Por outro lado, os meses em que se deflagram os mínimos pluviométricos são definidos como o período menos chuvoso (CHU-), ou seja, a consecução do pico mínimo do ciclo anual. Os trimestres de ocorrência do CHU- na região R1 é em Jul-Ago-Set, na R2 em Jun-Jul-Ago, na R3 e R4 em Set-Out-Nov.

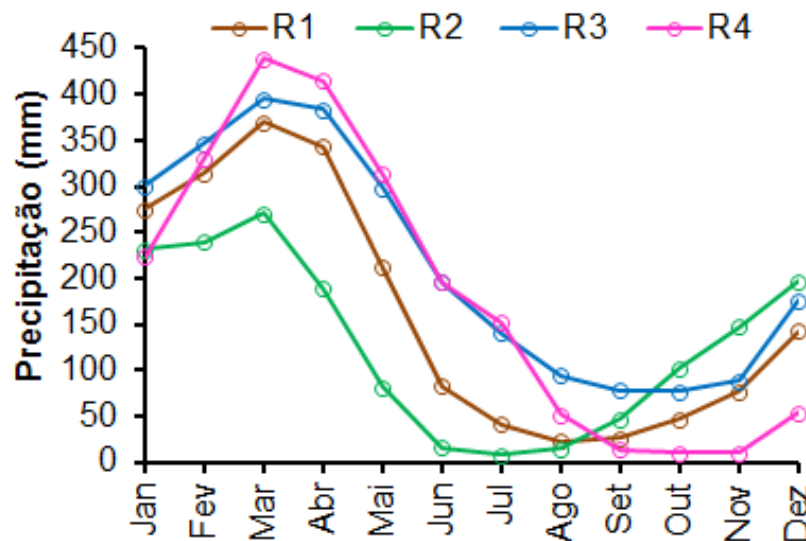


Figura 3. Ciclo anual da precipitação nas regiões R1, R2, R3 e R4.

Analisando as médias climatológicas sazonais na Figura 4, observa-se que durante o período chuvoso (CHU+), a região R4 (litoral) é que apresenta o maior volume pluviométrico de 1184 mm, seguido das regiões R3 (norte) com 1125 mm e R1 (centro) com 1027 mm e da região R2 (sul/sudeste) com 743 mm que representa o menor volume. No período seco (CHU-), a região com

maior volume é a R3 com 244 mm, R1 apresenta 92 mm e as regiões com volume bem mais baixo são R2 e R4 com 39 e 34 mm, respectivamente. A diferença nos valores sazonais entre CHU+ e CHU- indica a sazonalidade regional, a qual é mais pronunciada em R1 (litoral) e menos pronunciada em R2 (sul/sudeste).

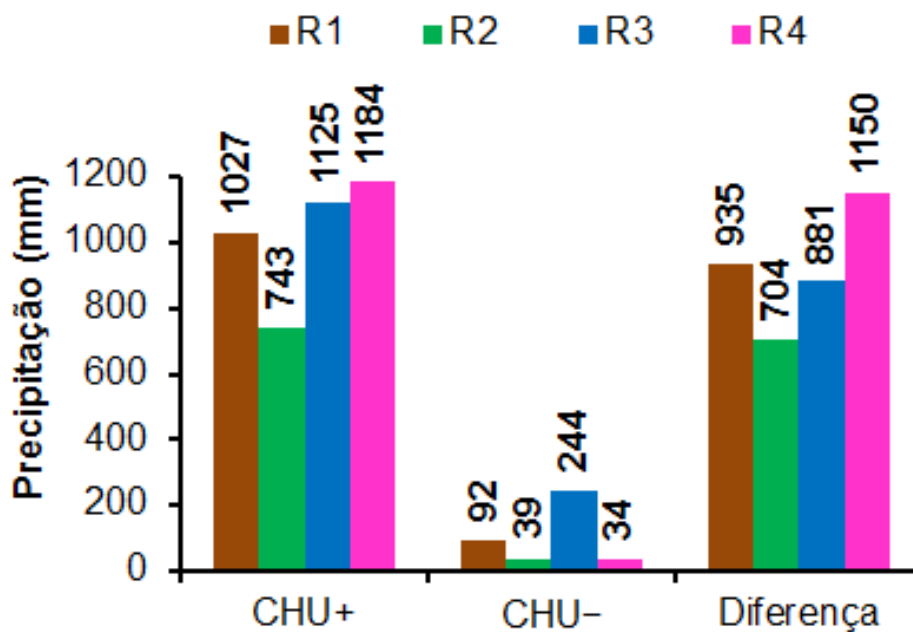


Figura 4. Médias climatológicas de precipitação do período chuvoso (CHU+) e menos chuvoso (CHU-) e respectiva diferença nas regiões R1, R2, R3 e R4.

Modelagem estatística dos regimes pluviométricos sazonais

Inicialmente, investigam-se as áreas oceânicas preditoras de precipitação, através das correlações entre os índices regionais de precipitação dos períodos chuvoso e menos chuvoso com a grade espacial de TSM nos Oceanos Pacífico e Atlântico.

A Figura 5 mostra os resultados dos padrões espaciais das correlações simultâneas (lag0, i.e., séries temporais do mesmo trimestre de precipitação e TSM) entre a precipitação do regime CHU+ em cada região homogênea e a TSM, sendo que se plotaram somente os valores de correlação +0.4 e -0.4 sobrepostos no mesmo mapa para as quatro regiões R1, R2, R3 e R4 (ver cores distinguindo cada região). Considerando as áreas contendo as correlações significantes, foram selecionadas caixas para a extração das séries

temporais de TSM sobre o Pacífico tropical (PT), Atlântico tropical norte (ATN), Atlântico equatorial sul (AES) e Atlântico subtropical sul (ASS), conforme ilustrado pelos quadrados em preto na Figura 5. Similarmente, a Figura 6 mostra as correlações lag0 entre a precipitação do regime CHU- nas quatro regiões R1, R2, R3 e R4 e a TSM. A configuração espacial das correlações significantes permitiu a seleção de três caixas sobre o Oceano Pacífico, a caixa PT e também as caixas nas áreas tropicais do Pacífico centro-sul (PCS) e Pacífico leste norte (PLN), bem como das caixas sobre o Atlântico subtropical norte (ASN), Atlântico equatorial sul (AES) e Atlântico subtropical sul (ASS), conforme mostra a Figura 6.

Estas séries temporais de TSM mediadas nas caixas sobre áreas-chave do Pacífico e Atlântico serão usadas como variáveis preditoras da precipitação nas regiões homogêneas.

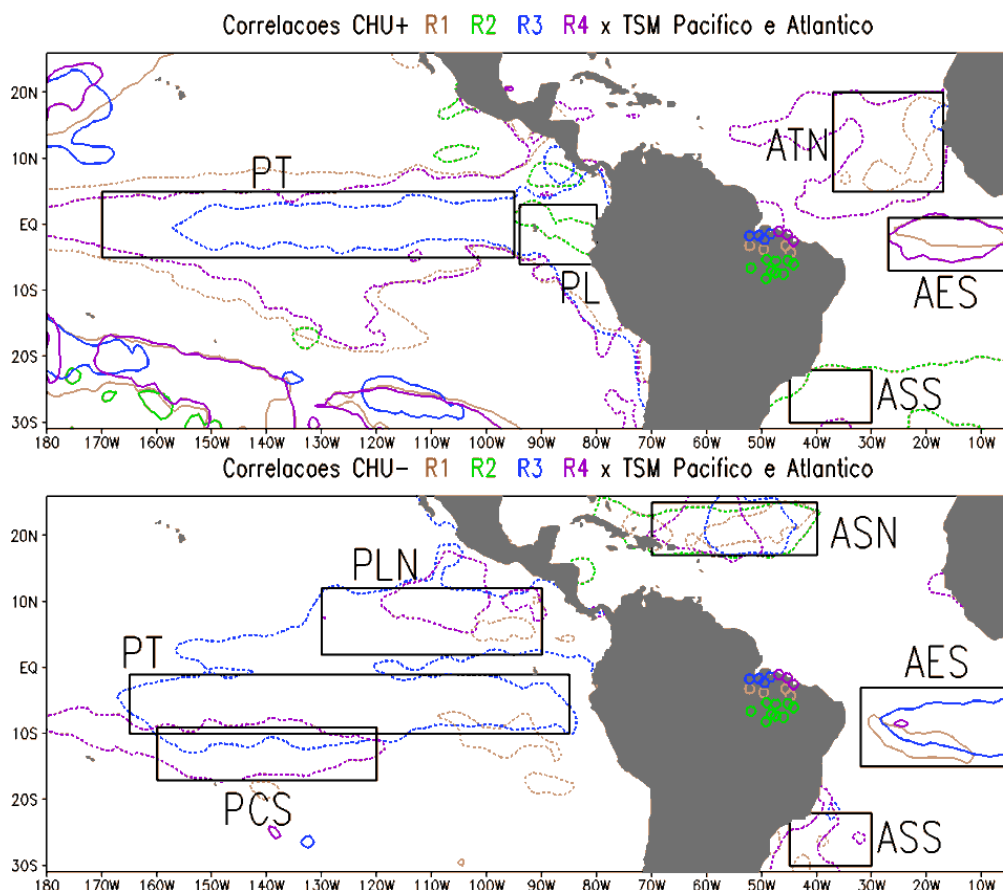


Figura 5. Padrões espaciais das correlações (somente valores de 0,4 e -0,4) entre precipitação nas regiões R1, R2, R3, R4 do período chuvoso CHU+ (figura acima) e do período seco CHU- (figura abaixo) e a grade de TSM, sendo que as caixas no Pacífico (PT = Pacífico tropical, PL = Pacífico leste, PLN = Pacífico leste norte, PCS = Pacífico central sul) e Atlântico (ATN = Atlântico tropical norte, AES = Atlântico equatorial sul, ASS = Atlântico subtropical sul, ASN = Atlântico subtropical norte) indicam as áreas-chave contendo correlações significantes. As cores das isolinhas de correlação para cada região são indicadas no título acima da figura. Os círculos coloridos sobre o mapa indicam as estações nas regiões homogêneas. Período base: 1983 a 2015.

Baseado nos resultados das correlações simultâneas (lag0) e defasadas (lag-1, lag-2, lag-3) entre as séries temporais de 1983 a 2015 de TSM nas caixas sobre as áreas-chave do Pacífico e Atlântico e precipitação nas regiões R1, R2, R3 e R4 para o período chuvoso CHU+ (Tabela 2) e para o período menos chuvoso CHU- (Tabela 3), foram montados os modelos de regressão considerando somente as séries que apresentaram correlações estatisticamente significantes ao nível de 95%.

Na Tabela 2 para o período CHU+ as áreas de TSM com correlações significantes no lag0 para R1 foram o PT (-71%), PL (-64%), AES (42%) e ATN (-40%), para R2 o PL (-41%) e ASS (-59%), para R3 o PT (-47%) e PL (-67%) e para R4 o PT (-59%), PL (-62%), AES (40%) e ATN (-52%). Por sua vez, considerando as defasagens possuindo as maiores correlações, destaca-se a região R1 com o PT (-60% para lag-1), PL (-45% para lag-1) e ASS (-44% para lag-2), R2 somente com AES (-39%

para lag-3), R3 com o PT (-38% para lag-1) e PL (-35% para lag-1), e R4 com PT (-44% para lag-1), PL (-40% para lag-1) e AES (42% para lag-3). Assim sendo, foram montados os modelos MRL1 para lag0 e MRL2 para as melhores defasagens, usou-se o período de 1983 a 2005 (23 anos) para o período de treinamento e o período de 2006 a 2015 (últimos 10 anos) para a previsão. A Tabela 3 mostra os valores de r^2 obtidos nos modelos com as respectivas equações de previsão para cada região homogênea. Em geral, os valores de r^2 para os modelos MRL1 são bem maiores do que os modelos MRL2, com destaque para as regiões R1 e R4 com r^2 de 0,64 e 0,59, respectivamente. Nos modelos defasados os valores de r^2 caem sensivelmente, especialmente nas regiões R2 e R3 com 0,15 e 0,14, respectivamente.

Para o período menos chuvoso CHU- a Tabela 4 indica que as áreas de TSM com correlações significantes considerando o lag0 para

R1 foram o ASN (-38%), para R2 o ASN (-51%), para R3 o PT (-53%), PLN (-59%), PCS (-42%), AES (43%) a ASN (-51%), e para R4 o PLN (-36%), PCS (-49%), ASN (-44%) e ASS (-44%). Por outro lado, as defasagens com correlações significantes para R1 foram o PT (-35% para lag-1) e ASN (-42% para lag-2), para R2 o ASN (-51% para lag-1), para R3 o AES (51% para lag -1), PT (-66% para lag-3) e PLN (-70% para lag-3), e para R4 o AES (43% para lag-1), ASS (-36% para lag-

1), PCS (-53% para lag-2), PT (-42% para lag-3) e PLN (-41% para lag-3). Essas áreas de TSM foram usadas na montagem dos modelos MRL1 e MRL2. A Tabela 5 exibe os valores de r^2 e as equações de previsão para cada região homogênea. Para os modelos com lag0, os valores de r^2 são maiores para as regiões R3 e R4 com 0,54 e 0,34, respectivamente. Nos modelos defasados os valores de r^2 são maiores para as regiões R3 e R4 com 0,53 e 0,35, respectivamente.

Tabela 2. Correlações simultâneas (lag0) e defasadas (lag-1, lag-2, lag-3) entre precipitação do período chuvoso CHU+ nas regiões R1, R2, R3, R4 e TSM mediada nas caixas das áreas-chave no Pacífico e Atlântico, no período de 1983 a 2015. Valores destacados em amarelo indicam correlações significantes nas áreas usadas nos modelos com lag0 e valores em laranja as áreas usadas nos modelos com as melhores defasagens lag-1, lag-2 ou lag-3

Regiões	Defasagens	Meses	PT	PL	AES	ATN	ASS
R1 (centro)	lag0	Feb-Mar-Apr	-0,715	-0,644	0,429	-0,409	0,035
	lag-1	Jan	-0,609	-0,457	0,235	-0,067	0,001
	lag-2	Dec-Jan	-0,442	0,296	0,053	-0,075	-0,442
	lag-3	Nov-Dec_Jan	-0,555	-0,431	0,334	0,090	-0,112
R2 (sul/sudeste)	lag0	Jan_Feb_Mar	-0,335	-0,412	0,163	-0,100	-0,597
	lag-1	Dec	-0,283	-0,277	0,346	-0,018	-0,266
	lag-2	Nov_Dec	-0,270	-0,268	0,382	-0,027	-0,242
	lag-3	Oct_Nov_Dec	-0,260	-0,272	0,390	-0,024	-0,214
R3 (norte)	lag0	Feb-Mar-Apr	-0,476	-0,678	0,246	-0,316	-0,057
	lag-1	Jan	-0,381	-0,350	0,190	0,120	-0,168
	lag-2	Dec-Jan	-0,353	-0,340	0,238	0,258	-0,232
	lag-3	Nov-Dec_Jan	-0,334	-0,322	0,299	0,298	-0,266
R4 (litoral)	lag0	Feb-Mar-Apr	-0,599	-0,629	0,409	-0,520	-0,136
	lag-1	Jan	-0,446	-0,400	0,306	-0,273	-0,327
	lag-2	Dec-Jan	-0,432	-0,370	0,395	-0,155	-0,304
	lag-3	Nov-Dec_Jan	-0,411	-0,360	0,425	-0,129	-0,275

Tabela 3. Valores de r^2 e equações dos modelos MRL1 e MRL2 para previsão de precipitação nas regiões R1, R2, R3 e R4 do período chuvoso CHU+

Regiões	Modelos	r^2	Equações dos modelos
R1 (centro)	MRL1	0,645	R1 CHU+ = 1422,215 - 113,395 * PT lag0 - 21,391 * PL lag0 + 158,699 * AES lag0 - 48,191 * ATN lag0
	MRL2	0,413	R1 CHU+ = 1787,479 - 128,177 * PT lag-1 + 54,197 * PL lag-1 + 51,114 * ASS lag-2
R2 (sul/sudeste)	MRL1	0,434	R2 CHU+ = 5563,552 - 44,753 * PL lag0 - 139,002 * ASS lag0
	MRL2	0,152	R2 CHU+ = -2962,577 + 143,964 * AES lag-3
R3 (norte)	MRL1	0,460	R3 CHU+ = 3338,711 - 83,290 * PL lag0
	MRL2	0,145	R3 CHU+ = 2052,344 - 35,024 * PT lag-1
R4 (litoral)	MRL1	0,595	R4 CHU+ = 2251,293 - 109,268 * PT lag0 - 79,104 * PL lag0 + 309,915 * AES lag0 - 194,655 * ATN lag0
	MRL2	0,423	R4 CHU+ = -6034,479 - 164,170 * PL lag-1 + 431,813 * AES lag-3

Tabela 4. Correlações simultâneas (lag0) e defasadas (lag-1, lag-2, lag-3) entre precipitação do período menos chuvoso CHU- nas regiões R1, R2, R3, R4 e TSM mediada nas caixas das áreas-chave no Pacífico e Atlântico, no período de 1983 a 2015. Valores destacados em amarelo indicam correlações significantes nas áreas usadas nos modelos com lag0 e valores em laranja as áreas usadas nos modelos com as melhores defasagens lag-1, lag-2 ou lag-3

Regiões	Defasagens	Meses	PT	PLN	PCS	AES	ASN	ASS
R1 (centro)	lag0	Jul-Aug-Sep	-0,272	-0,246	-0,201	0,317	-0,383	-0,210
	lag-1	Jun	-0,355	-0,247	-0,242	0,177	-0,410	-0,003
	lag-2	May-Jun	-0,304	-0,183	-0,207	0,128	-0,423	-0,035
	lag-3	Apr-May-Jun	-0,252	-0,169	-0,181	0,139	-0,389	-0,082
R2 (sul/sudeste)	lag0	Jun-Jul-Aug	-0,213	-0,219	-0,055	0,089	-0,516	-0,128
	lag-1	May	-0,112	-0,149	0,025	-0,040	-0,512	-0,126
	lag-2	Apr-May	-0,017	-0,183	0,077	-0,020	-0,458	-0,166
	lag-3	Mar-Apr-May	0,003	-0,179	0,101	-0,003	-0,417	-0,129
R3 (norte)	lag0	Sep-Oct-Nov	-0,537	-0,591	-0,429	0,432	-0,518	-0,333
	lag-1	Aug	-0,641	-0,666	-0,339	0,512	-0,341	-0,201
	lag-2	Jul-Aug	-0,662	-0,677	-0,307	0,412	-0,318	-0,234
	lag-3	Jun-Jul-Aug	-0,666	-0,706	-0,253	0,396	-0,199	-0,211
R4 (litoral)	lag0	Sep-Oct-Nov	-0,329	-0,369	-0,497	0,298	-0,444	-0,448
	lag-1	Aug	-0,397	-0,392	-0,526	0,439	-0,240	-0,367
	lag-2	Jul-Aug	-0,407	-0,382	-0,533	0,387	-0,223	-0,352
	lag-3	Jun-Jul-Aug	-0,427	-0,415	-0,517	0,335	-0,197	-0,304

Tabela 5. Valores de r^2 e equações dos modelos MRL1 e MRL2 para previsão de precipitação nas regiões R1, R2, R3 e R4 do período menos chuvoso CHU-

Regiões	Modelos	r^2	Equações dos modelos
R1 (centro)	MRL1	0,146	R1 CHU- = 1411,513 - 47,334 * ASN lag0
	MRL2	0,293	R1 CHU- = 1935,633 - 26,0277 * PT lag-1 - 43,337 * ASN lag-2
R2 (sul/sudeste)	MRL1	0,267	R2 CHU- = 869,796 - 30,314 * ASN lag0
	MRL2	0,262	R2 CHU- = 790,843 - 28,983 * ASN lag-1
R3 (norte)	MRL1	0,545	R3 CHU- = -409,615 - 42,276 * PT lag0 + 31,669 * PCS lag0 + 119,609 * AES lag0 - 75,053 * ASN lag0
	MRL2	0,537	R3 CHU- = 1269,650 + 58,114 * AES lag-1 + 15,718 * PT lag-3 - 103,337 * PLN lag-3
R4 (litoral)	MRL1	0,341	R4 CHU- = 2050,645 + 9,604 * PLN lag0 - 40,899 * PCS lag0 - 33,494 * ASN lag0 - 10,657 * ASS lag0
	MRL2	0,354	R4 CHU- = 1366,412 + 19,625 * AES lag-1 - 49,330 * PCS lag-2 + 17,559 * PT lag-3 - 34,046 * PLN lag-3

As Figuras 6 e 7 mostram os resultados dos modelos de regressão para o período chuvoso CHU+ e período menos chuvoso CHU-, respectivamente, sendo que os dados observados são plotados para toda a série temporal e as previsões somente para os últimos 10 anos.

Para o período chuvoso observa-se na Figura 6 que as previsões se encontram bem próximas dos valores observados e em geral acompanham os anos com variações mais extremas, a exemplo dos anos de 2009, 2010 e 2011. Visualmente, nota-se certa discrepância entre as previsões e observações para a região R4 particularmente nos anos de 2012 a 2015.

Para o período seco evidenciam-se na Figura 7 que as previsões são em geral consistentes e bem próximas das variações da precipitação

observada, principalmente as regiões R1, R2 e R3, sendo que a região R4 apresenta superestimativa alta na maior parte dos anos de previsão.

As Tabelas 6 e 7 mostram os parâmetros quantitativos do viés e RMSE obtidos nos 10 anos de previsões dos modelos MRL1 e MRL2 para o período chuvoso e menos chuvoso, respectivamente. Levando em conta a comparação dos valores do viés e RMSE, os resultados indicam que as previsões com lag0 são melhores do que as previsões defasadas, independente do modelo ser de regressão simples (apenas uma área de TSM preditora) ou múltipla (duas, três ou quatro áreas de TSM preditoras). Para o período menos chuvoso, as regiões R1 e R2 mostraram que as previsões defasadas melhoraram em relação aos modelos com lag0.

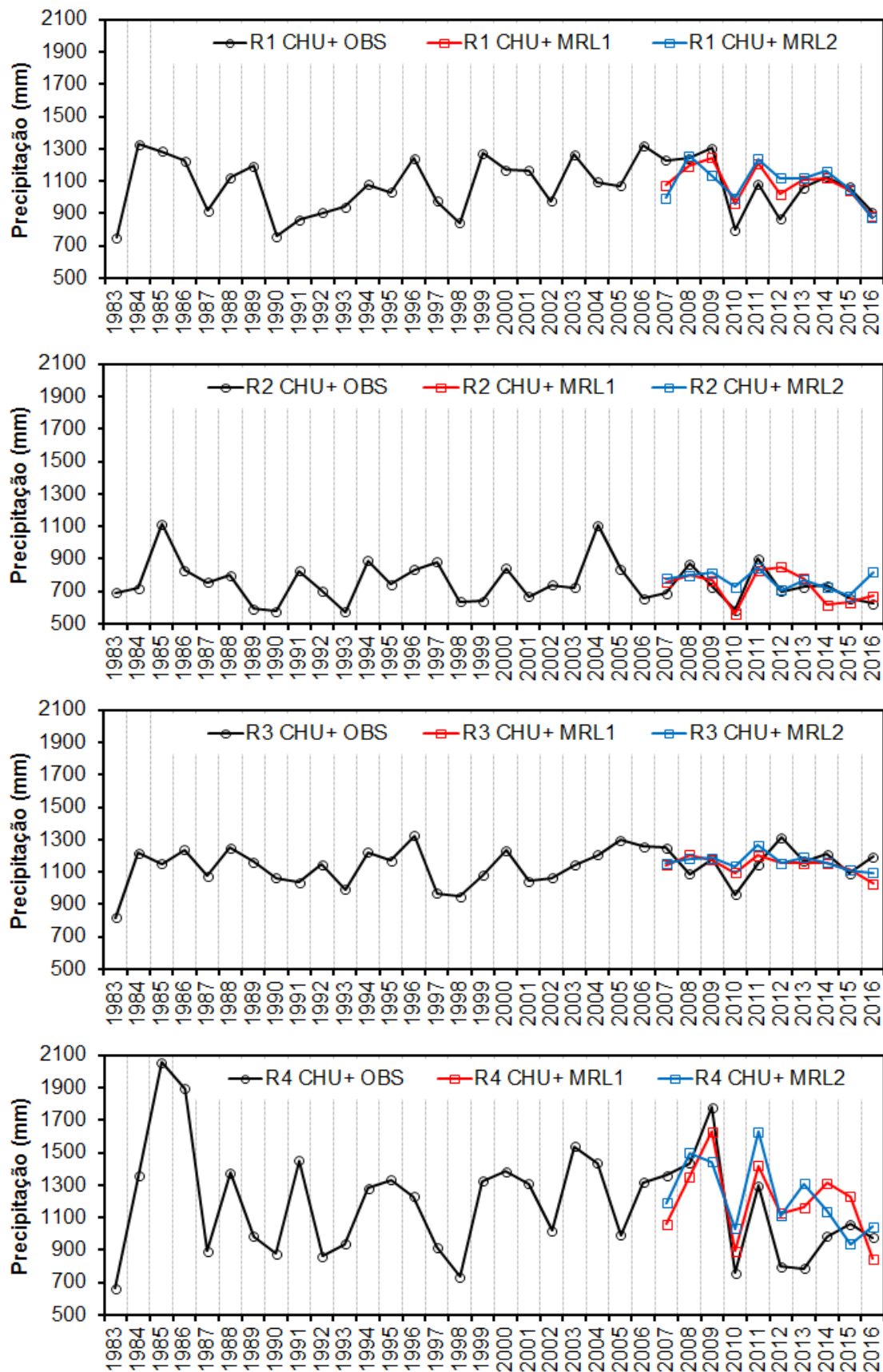


Figura 6. Séries temporais de precipitação observada (OBS) e simulada pelos modelos MRL1 e MRL2 nas regiões R1, R2, R3 e R4 para o período chuvoso CHU+.

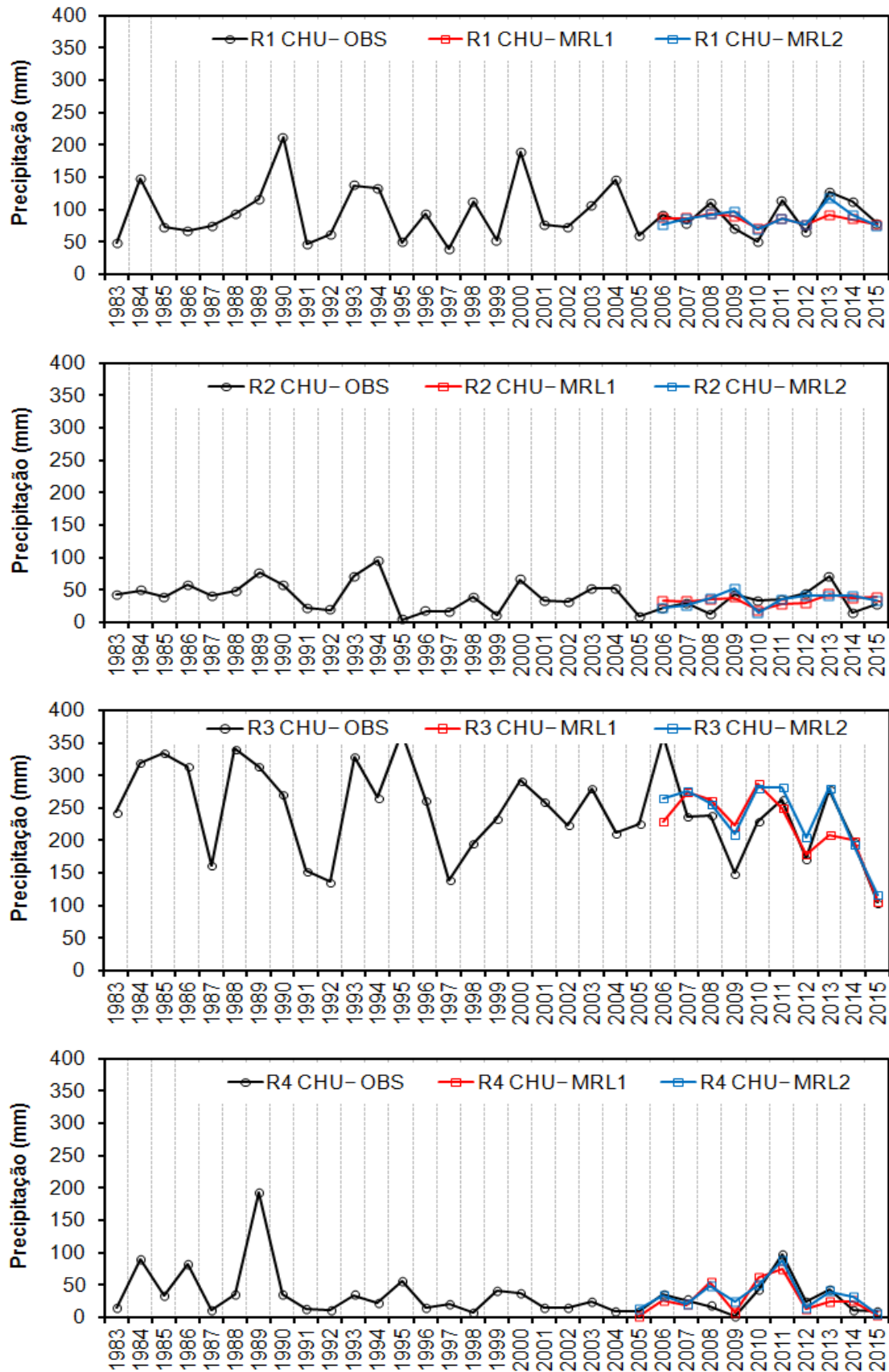


Figura 7. Séries temporais de precipitação observada (OBS) e simulada pelos modelos MRL1 e MRL2 nas regiões R1, R2, R3 e R4 para o período chuvoso CHU-.

Tabela 6. Valores de viés e RMSE para as previsões de 10 anos (2007 a 2016) do período chuvoso CHU+

Regiões	Modelos	Viés	RMSE
R1 (centro)	MRL1	17	99
	MRL2	26	147
R2 (sul/sudeste)	MRL1	5	77
	MRL2	44	91
R3 (norte)	MRL1	-17	102
	MRL2	3	101
R4 (litoral)	MRL1	80	236
	MRL2	110	273

Tabela 7. Valores de viés e RMSE para as previsões de 10 anos (2006 a 2015) do período menos chuvoso CHU-

Regiões	Modelos	Viés	RMSE
R1 (centro)	MRL1	-6	20
	MRL2	-3	18
R2 (sul/sudeste)	MRL1	0,1	16
	MRL2	0,9	15
R3 (norte)	MRL1	-1	57
	MRL2	13	44
R4 (litoral)	MRL1	0,1	18
	MRL2	5	15

Discussão

Quatro regiões homogêneas de precipitação foram identificadas sobre a Amazônia oriental (Pará, Tocantins e Maranhão). Pesquisas anteriores como Marengo (2003) que observou três núcleos anuais de precipitação abundantes sobre a Amazônia: no noroeste, na parte central e na parte sul da Amazônia; Santos et al. (2015) que identificaram seis regiões homogêneas para a Amazônia brasileira; Amanajás e Braga (2012) que em seus estudos para a Amazônia oriental (Estado do Pará) encontraram três regiões homogêneas, e Menezes et al., (2015) que comprovaram os resultados de Amanajás e Braga (2012), confirmam a variabilidade sobre a Amazônia.

Notou-se que na formação das regiões, três grupos são formados com estações de Estados diferentes. Estes resultados são consistentes com as

análises anteriores de Santos et al. (2015), que identificaram regiões homogêneas com grupos de estações em diferentes estados ao longo da Amazônia brasileira.

As áreas-chave do Pacífico e Atlântico usadas como variáveis preditoras da precipitação nas regiões homogêneas é condizente com os estudos de De Souza et al. (2009) e Sodré et al. (2015) que mostraram relações diretas e indiretas entre a TSM do Pacífico e Atlântico e a precipitação na Amazônia. Pesquisas anteriores demonstraram que os mecanismos oceano-atmosfera dominantes sobre o Pacífico (ciclo dos eventos El Niño e La Niña) e Atlântico (fases do gradiente meridional de TSM) modulam os padrões de circulação de grande escala com efeitos na atividade convectiva tropical e interferem consequentemente nos regimes de precipitação sazonal em grande parte da Amazônia (De Souza

et al., 2005). Portanto, há relações conhecidas de causa-efeito entre os padrões de TSM e a precipitação na Amazônia, as quais permitem o desenvolvimento de modelos prognósticos.

Os resultados dos modelos estatísticos desenvolvidos para as previsões da precipitação com a TSM como preditor, para as regiões homogêneas da Amazônia oriental, mostraram valores bem próximas dos valores observados e em geral acompanham os anos com variações mais extremas. Estudos como os de (Hastenrath, 1990; Hastenrath e Greischar, 1993; Pezzi et al. 2000) que realizaram estudos com modelos estatísticos de previsão para o Nordeste e Sul do Brasil respectivamente, utilizando o sinal de intensidade da TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico como preditor, concluíram que o uso de modelos estatísticos para prognósticos da precipitação reproduz bem os dados observados, a qual é confirmado através dos valores do resultado do coeficiente de determinação (desempenho do modelo), neste trabalho, em que alguns modelos mostraram valores de 60% e 70%.

Conclusões

A aplicação da análise de agrupamento permitiu a identificação de quatro regiões homogêneas de precipitação sobre a Amazônia oriental, sendo que o período mais chuvoso (CHU+) e menos chuvoso (CHU-) ocorrem de forma diferenciada ao longo dos meses do ano, caracterizando a variabilidade espaço-temporal pronunciada sobre a região.

No período chuvoso o oceano Pacífico modula a precipitação sobre a região da Amazônia oriental, enquanto que no período menos chuvoso é o oceano Atlântico.

As previsões com lag0 são melhores do que as previsões defasadas independente do modelo ser de regressão simples ou múltipla.

As regiões com melhor correlação com o sinal da TSM com lag0, foram as regiões R1 e R4 no período chuvoso e as regiões R3 e R4 no período menos chuvoso. Concernentemente com lag defasada foram as regiões R3 e R4 no período menos chuvoso.

Os modelos de regressão com melhor acurácia foram os do período menos chuvoso, pois obtiveram os menores viés e RMSE.

Agradecimentos

A UFPA pela cota de Bolsa PIBIC, ao INMET pela disponibilidade dos dados de precipitação, ao *Climate Prediction Center* pela

concessão dos dados de temperatura da superfície do mar.

Referências

- Amanajás, J.C., Braga, C.C., 2012. Padrões espaço-temporal Pluviométricos na Amazônia Oriental utilizando Análise Multivariada. *Revista Brasileira de Meteorologia* 27, 323-338.
- De Souza, E.B., M. Lopes, N.G., Rocha, E.J.P., Souza, J.R.S., Cunha, A.C., Silva, R.R., Ferreira, D.B.S., Santos, D.M., Carmo, A.M. C., Sousa, J.R.A., Guimarães, P.L., M. Mota, A.S., Makino M., Senna, R. C., Sousa, M. L., Mota, G.V., Kuhn, P.A. F., Souza, P.F., Vitorino, M.I., 2009. Precipitação sazonal sobre a Amazônia oriental no período chuvoso: observações e simulações regionais com o RegCM3. *Revista Brasileira de Meteorologia* 24, 111-124.
- De Souza, E.B., Rocha, E.J.P., 2006. Diurnal variations of rainfall in Bragança-PA (eastern Amazon) during rainy season: mean characteristics and extreme events. *Revista Brasileira de Meteorologia* 21, 142-152.
- De Souza, E.B. de Kayano. M.T., Tota, J., Pezzi. L., Fisch. G., Nobre. C., 2000. 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.
- Espinosa-Villar, J.C., Ronchail, J., Guyot, J. L., co-authors., 2009. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *International Journal of Climatology* 29, 1574-1594.
- Fisch, G., Marengo, J.A., Nobre, C.A., 1998. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. *Acta Amazonia* 28, 101-126.
- Fu, R., Dickinson, R.E., Chen, M. Wang, H., 2001. How do tropical sea surface temperatures influence the seasonal distribution of precipitation in the equatorial Amazon?, *J. Clim.* 14, 4003-4026.
- Hastenrath, S., 1990. Prediction of Northeast Brazil rainfall anomalies. *J. Climate* 3, 893-904.
- Hastenrath, S., Greischar, L., 1993. Further Work on the Prediction of Northeast Brazil Rainfall Anomalies. *Journal of Climate* 6, 743-758.
- Hervada-Sala C, Jarauta-Bragulat E., 2004. Aprogram to perform Ward's clustering method on several regionalized variables. *Computers & Geosciences* 30, 881-886.
- Kousky V.E, Kayano M. T., Cavalcanti, I. F. A., 1984. A review of the southern oscillation: oceanic, atmospheric circulation changes and related anomalies. *Tellus* 36, 490-504.

- Lapponi, J.C., 2005. Estatística Usando Excel, 4 ed. Campus, Rio de Janeiro
- Levine, D.M., Stephan, David F., Krehbiel, Timothy C., Berenson, L. Mark., 2008. Estatística – Teorias e Aplicações, 5 ed. Rio de Janeiro, LTC.
- Marengo, J. A., 2003. Condições climáticas e os recursos hídricos no norte brasileiro, in: Tucci, C. E. M., Braga, B. (Org.). Clima e Recursos Hídricos no Brasil. ABRH, Porto Alegre.
- Menezes, F. P., Fernandes, L. L., Rocha, E.J P., 2015 O uso da estatística para regionalização da precipitação no estado do Pará, Brasil. Revista Brasileira de Climatologia 16, 64-71
- Mimmack G.M, Mason S.J, Galpin J.S., 2001. Choice of distance matrices in cluster analysis: defining regions. Journal of Climate 14, 2790-2797.
- Pezzi, L.P, Ubarana, V., e Repelli, C., 2000. Desempenho e Previsões de um Modelo Regional Estatístico para a Região Sul do Brasil. Brazilian Journal of Geophysics 18, 129-146.
- Santos E.B., Lucio P.S., Santos e Silva C.M., 2015. Precipitation regionalization of the Brazilian Amazon. Atmospheric Science Lettlers. doi: . 10. 1002 / asl2 535.
- Satyamurty P, Mattos LF, Nobre C.A., Silva Dias P.L., 1998. Tropics - South America, in: Kauly, D.J., Vincent, D.G.. Meteorology of the Southern Hemisphere. American Meteorological Society, Boston, pp. 119-139.
- Sodre, G.R., Moraes, B.C., Ferreira, D.S., Oliveira, J.V., Souza, E.B., 2015. Teleconexões oceânicas nos padrões climáticos da Amazônia oriental: análises dos últimos 40 anos (1974-2013). Revista Brasileira de Climatologia 17, 53-66.