



## REGIONALIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO NOROESTE DA AMAZÔNIA

*Isela Leonor Vásquez Panduro<sup>(1)</sup>, Otto Corrêa Rotunno Filho<sup>(1)</sup>, Arturo Sanchez<sup>(2)</sup>\*, Lígia Maria Nascimento de Araujo<sup>(3)</sup>, Daniel Medeiros Moreira<sup>(4)</sup>, Humberto Alves Barbosa<sup>(5)</sup>, Juan G. Rejas Ayuga<sup>(6)</sup>*

**Resumo** – A região amazônica possui grande extensão territorial, caracterizada pela presença de regimes climáticos diferenciados em função da atuação de diferentes sistemas meteorológicos que contribuem para a não homogeneidade da distribuição sazonal da precipitação na região. O presente estudo tem como objetivo determinar sub-regiões de precipitação homogênea na região noroeste da Amazônia. Para essa segmentação, aplicou-se o método de agrupamento não hierárquico k-médias. Foram analisadas as médias mensais da precipitação de 129 estações pluviométricas ao longo do período entre 2000 e 2015. Adicionalmente, examinou-se a base de dados de chuva TRMM em termos de sua relação com uma rede de dados de superfície de pluviometria. Em especial, avaliou-se que a base de dados TRMM apresenta consistência e robustez quando confrontada com o conjunto de estações pluviométricas observacionais. Os resultados sugerem que o noroeste da Amazônia brasileira possui cinco regiões homogêneas de precipitação.

**Palavras Chave:** Comportamento espacial da precipitação, Análise de agrupamento, Índice Silhouette.

## PRECIPITATION REGIONALIZATION IN THE NORTHWEST AMAZON REGION

**Abstract** – The Amazon region has a large territorial extension, with different climatic patterns due to the presence of different meteorological systems that contribute to non-homogeneity in the seasonal distribution of precipitation in the region. The present study aims to determine sub-regions with homogeneous precipitation in the Northwest region of Amazonia. For this discrimination, the non-hierarchical grouping method k-means was used. The analysis was applied to monthly precipitation for 129 rainfall gauge stations between 2000 and 2015. In addition, we examined TRMM rainfall data set with respect to data collected by means of a network of rain gauges. In particular, we evaluated that TRMM satellite data set presents consistency and robustness when contrasted to such observational rainfall information. The results suggest that the Brazilian Northwestern area of Amazonia presents five homogeneous rainfall regions.

**Key words:** Spatial-temporal behavior of precipitation, Cluster analysis, Silhouette Index.

1 Laboratório de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (LABH2O), Programa de Engenharia Civil - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, Doutoranda: [iselavp@gmail.com](mailto:iselavp@gmail.com); Professor: [otto@coc.ufrj.br](mailto:otto@coc.ufrj.br); [ottorotunno@gmail.com](mailto:ottorotunno@gmail.com)

2 Instituto de Geociências – IGEO, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, [arturo66cta@gmail.com](mailto:arturo66cta@gmail.com).

\*Autor Correspondente

3 Agência Nacional de Águas, Brasília, Brasil, [ligiamna@gmail.com](mailto:ligiamna@gmail.com)

4 Instituto de Ciências Atmosféricas – UFAL, Maceió, AL, Brasil, [barbosa33@gmail.com](mailto:barbosa33@gmail.com)

5 Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, Serviço Geológico do Brasil, Brasil, [daniel.medeiros@cprm.gov.br](mailto:daniel.medeiros@cprm.gov.br)

6 Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Espanha, [juangregorio.rejas@upm.es](mailto:juangregorio.rejas@upm.es)

## INTRODUÇÃO

A precipitação é uma componente vital do ciclo hidrológico, o que requer uma melhor compreensão de sua variabilidade espaço-temporal. Em particular, o impacto da precipitação sobre a bacia hidrográfica é de grande importância para os estudos hidrológicos e, naturalmente, para o efetivo gerenciamento dos correspondentes recursos hídricos. Levando-se em consideração a importância da análise do comportamento espacial da precipitação pluviométrica, propõe-se, neste trabalho, o desenvolvimento de análise estatística de agrupamento com a finalidade de delimitar regiões homogêneas.

As técnicas de agrupamento de dados podem ser separadas em hierárquicas e não-hierárquicas (discriminatórias). Nas primeiras, os dados são particionados sucessivamente, diminuindo ou aumentando o número de grupos (*clusters*). Os procedimentos não-hierárquicos, por sua vez, dividem os  $n$  dados e as  $u$  observações existentes em  $k$  partições ou agrupamentos, onde o número de partições deve ser conhecido (Cooley *et al.*, 2006).

O método  $k$ -médias, empregado neste estudo, consiste em um método não-hierárquico, que utiliza, como critério de agrupamento, o centróide de cada grupo. De acordo com Cooley *et al.* (2006) e com Naveau *et al.* (2009), o método  $k$ -médias consiste em um procedimento em que, definido um número de agrupamentos, previamente, os elementos são segmentados. Cada elemento é atribuído ao grupo cujo centróide esteja mais próximo, e, a cada novo agrupamento, o centróide do grupo modifica-se, sendo recalculado até alcançar um equilíbrio estático. Em outras palavras, a função  $k$ -médias divide as observações dos dados em  $k$  grupos mutuamente exclusivos, e retorna um vetor de índices indicando a qual dos  $k$  grupos cada observação foi atribuída. O algoritmo busca  $k$  objetos representativos (centróide) que estão centralmente localizados nos grupos que eles definem. O objeto representativo de um cluster, o centróide, é o objeto para o qual a dissimilaridade média de todos os objetos no grupo é mínima. De fato, o algoritmo partição ao redor de centróides minimiza a soma de dissimilaridades em vez da dissimilaridade média (Kaufman and Rousseeuw, 1990). Dentre as abordagens existentes para auxiliar na decisão do número de grupos, foi utilizado o método silhueta (*silhouette*), proposto por Rousseeuw (1987), que subsidia a escolha de um número ótimo de grupos, avaliando os particionamentos encontrados, e permite visualizar graficamente os agrupamentos obtidos no presente trabalho.

A região amazônica possui ampla extensão territorial e está sujeita a padrões climáticos distintos, na medida em que a presença de diferentes sistemas meteorológicos gera não homogeneidade na distribuição sazonal da precipitação. Por essas razões, a bacia amazônica apresenta alta variabilidade espacial e temporal da distribuição da precipitação sazonal mostrando uma heterogeneidade significativa (Silva Dias *et al.*, 2004).

Santos *et al.* (2015), mediante o método de agrupamento hierárquico Ward, identificaram, na Amazônia brasileira, seis (6) regiões pluviometricamente homogêneas, nas quais duas sub-regiões estão distribuídas no sul da Amazônia e quatro sub-regiões na região norte, sendo duas na zona costeira e duas na região noroeste tendo por base o período 1983-2012. Por outro lado, no presente trabalho, por meio do emprego do algoritmo  $k$ -médias identificaram-se, para a região noroeste, no período 2000-2015, cinco (5) agrupamentos, confirmando os resultados de Guillermo *et al.* (2006), que delimitou, por sua vez, com dados de precipitação diária (1973-1993), diferentemente da escala mensal e temporal aqui empregada, com suporte do método  $k$ -médias, que a precipitação espacial na Amazônia pode ser agrupada em 5 regiões, distribuídas principalmente entre as regiões noroeste-sudeste. Dessa forma, o presente artigo contribui para a discussão sobre a caracterização do regime pluvial na Amazônia.

## ÁREA DE ESTUDO

Com 6,5 milhões de quilômetros quadrados que correspondem a 56% da floresta tropical da Terra, a bacia amazônica é o maior sistema hidrológico do mundo, desempenhando um importante papel nas trocas de energia, umidade e massa entre a superfície continental e a atmosfera (Fisch *et al.*, 1998; Marengo, 2006; Nobre *et al.*, 2009 a,b). A Figura 1 mostra a localização da rede pluviométrica disponível na região de estudo.

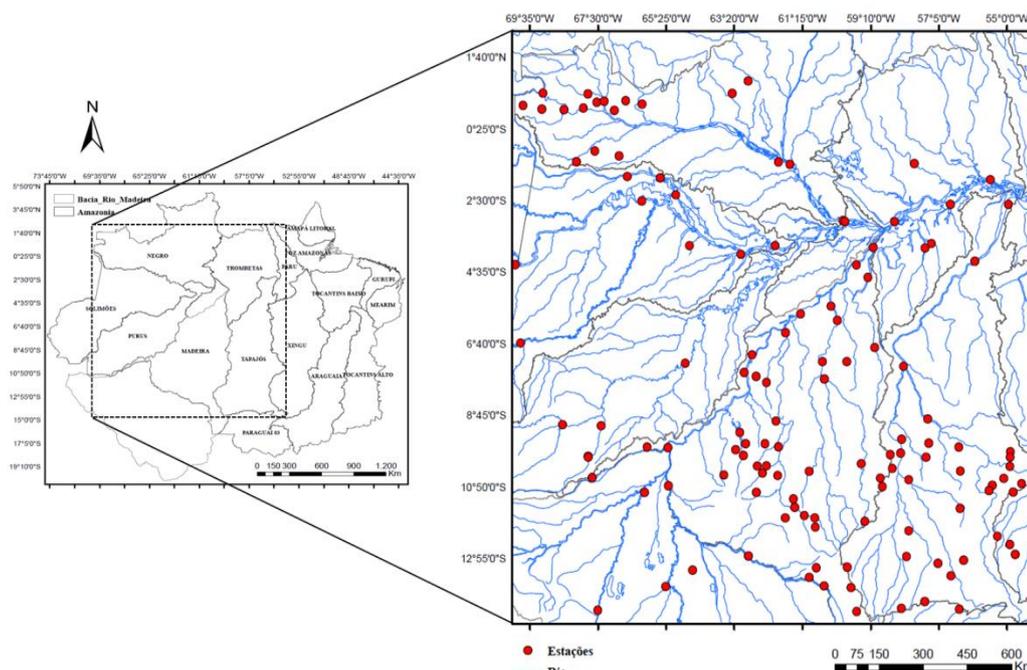


Figura 1: Localização da área de estudo e distribuição das estações pluviométricas

Ademais, a bacia Amazônica comporta-se como um sumidouro de umidade desviada para o centro, sudeste e sul do Brasil, assim como para o norte da Argentina, incluindo a bacia da Prata, contribuindo para a ocorrência de precipitação nessas regiões (Marengo *et al.*, 2004; Marengo, 2005 e 2006; Satyamurty *et al.*, 2013). Nesse sentido, Satyamurty *et al.* (2009) mostraram que a atividade convectiva sobre o sul do Brasil e o norte da Argentina é influenciada pelo transporte de umidade através da fronteira sul da bacia amazônica, feito pelos jatos de baixos níveis (JBNs) a leste dos Andes. De acordo com Stickler *et al.* (2013), o vapor de água disponível para as precipitações no Brasil central durante o verão austral vem diretamente da Amazônia. No mês de dezembro de 2013, um episódio de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), muito intenso e prolongado, alimentado por um fluxo de umidade desde a Amazônia com forte convergência nos baixos níveis, gerou as enchentes mais severas das últimas décadas na bacia do rio Doce (Marengo *et al.*, 2014). Grimm *et al.* (1998) constataram que as precipitações na região são influenciadas pelo fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) em conjunto com os modos de variabilidade do Atlântico tropical norte e sul.

## MÉTODOS

O presente estudo envolve a utilização de dados de precipitação mensal de 129 estações pluviométricas disponíveis no Hidroweb (ANA, 2015) e no BDMEP (INMET, 2015), bem como os dados do algoritmo 3B42RT do TRMM com uma grade  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  e resolução temporal de 3 horas. Especificamente, foi utilizada a média mensal acumulada de cada 3 horas, para o cálculo do coeficiente de correlação linear de Pearson e para o cálculo da precipitação padronizada na região de estudo. A série histórica de dados utilizada compreende os anos de março de 2000 a dezembro de 2015. Neste trabalho, foi aplicado o algoritmo k-médias sobre os dados, com valor inicial de k igual a cinco (5), em que k representa o número de grupamentos. O método silhueta (ou *silhouette*) foi utilizado para subsidiar a escolha do número adequado final de grupamentos.

Para escolher um número relevante  $k$  de grupamentos e para avaliar se uma estação meteorológica está bem classificada, Rousseeuw (1986) desenvolveu o chamado método de coeficiente de silhueta (*silhouette*), que oferece suporte na escolha de um número ótimo de grupos, avaliando os particionamentos encontrados, com correspondente representação gráfica dos agrupamentos.

A silhueta é um gráfico de um dado grupamento composto por um valor de silhueta  $s(i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ , que reflete a qualidade da alocação dos objetos nos grupos. Cada objeto (indivíduo) do grupamento é representado por  $i$ . Para cada objeto  $i$ , o valor  $s(i)$  é calculado conforme

$$s(i) = \left( \frac{b(i) - a(i)}{\max(a(i) - b(i))} \right) \quad (1)$$

onde  $a(i)$  é a dissimilaridade média do objeto  $i$  em relação a todos os objetos do mesmo grupo, e  $b(i)$  é a dissimilaridade média entre o objeto  $i$  em relação a todos os objetos do grupo vizinho mais próximo a ele, aqui denominado de grupamento  $j$ .

O valor de  $s(i)$  varia entre  $-1$  e  $1$ , sendo adimensional. Quando se atinge um valor de  $s(i) \approx 1$ , significa que o objeto  $i$  foi bem classificado no seu respectivo grupamento, pois  $a(i) < b(i)$ . Se é atribuído o valor de  $s(i) \approx -1$ , significa que o objeto foi mal classificado, pois  $a(i) > b(i)$ , ou seja, o objeto  $i$ , em média, está mais distante dos objetos do seu próprio grupo, isto é, o objeto do seu grupo está mais próximo dos objetos do grupamento  $j$ . Por sua vez, se  $s(i) \approx 0$ , o objeto  $i$  está entre o correspondente grupamento e o grupamento  $j$ ; isso ocorre quando  $a(i) = b(i)$ , indicando que o objeto está num ponto intermediário entre dois grupos. Em síntese, o valor de  $s(i)$  informa sobre a adequação aos grupamentos.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta os resultados obtidos aplicando o algoritmo k-médias sobre o conjunto de atributos com  $k = 5$ . Por meio do método silhueta, foi descoberto o número ideal de cinco grupamentos para separação dos dados de precipitação mensal. Observa-se que a distribuição dos grupos está da seguinte maneira: grupo 1 (Madeira e Tapajós); grupo 2 (Madeira, Solimões, Trombeta); grupo 3 (Madeira e Purus); grupo 4 (Solimões, Negro, Trombeta); grupo 5 (Solimões, Purus, Madeira).

A Figura 3 mostra a precipitação média anual de cada grupo para o período 2001-2015. Observa-se que o comportamento médio dos grupos 2 e 3 é seguir uma mesma tendência ao longo dos anos, sendo a precipitação média anual do grupo 3 sempre superior à do grupo 2. Os grupos 4 e

5 também seguem uma mesma tendência, sendo a precipitação média anual do grupo 5 maior que a do grupo 4.

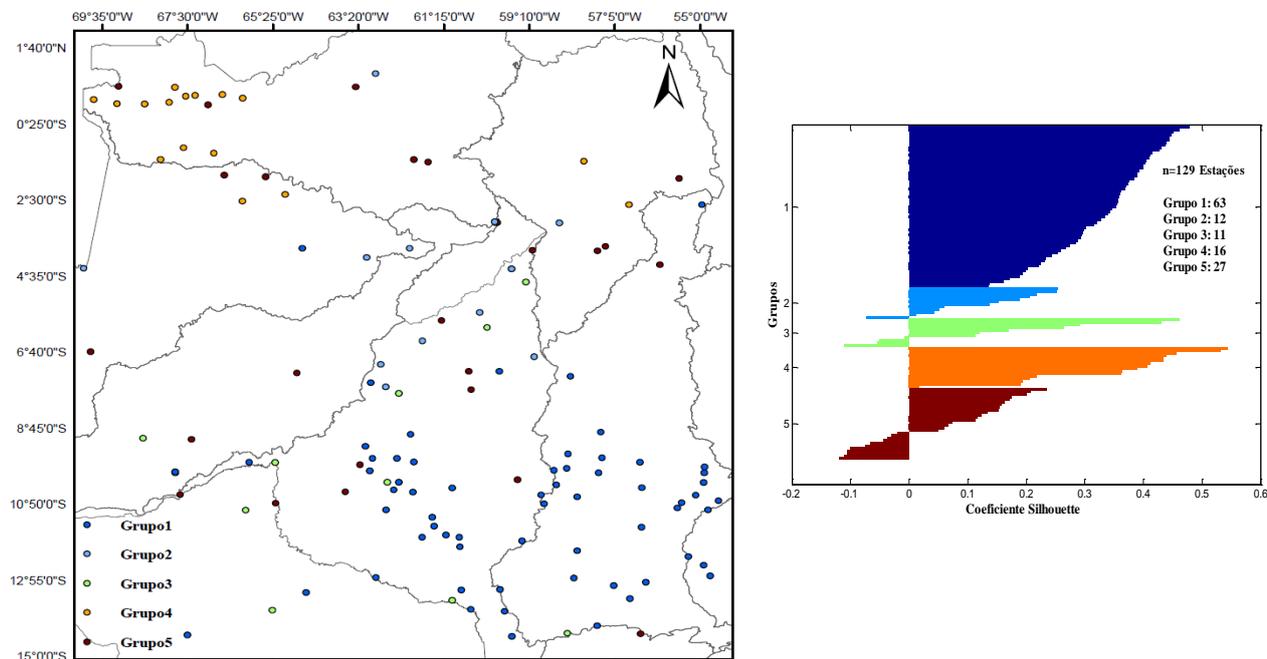


Figura 2: Agrupamento final das estações pluviométricas pelo algoritmo k-médias.

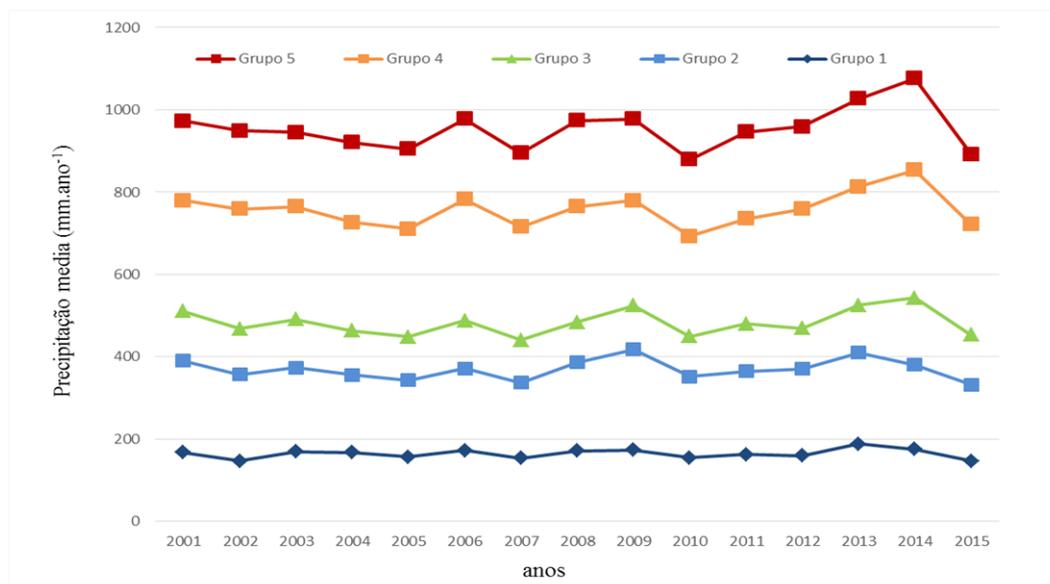


Figura 3: Precipitação média anual para os grupos 1, 2, 3, 4 e 5.

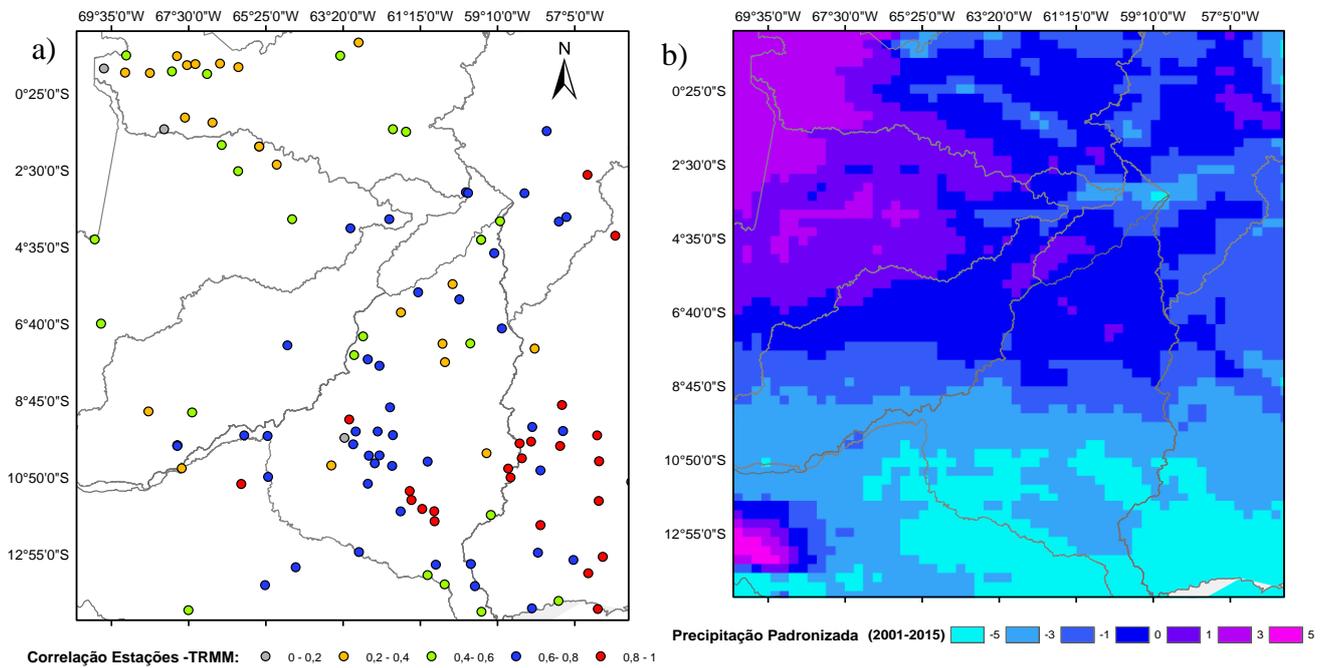


Figura 4: a) Correlação das acumuladas mensais de precipitação entre estações –TRMM; b) Precipitação padronizada no período março de 2000 a dezembro de 2015.

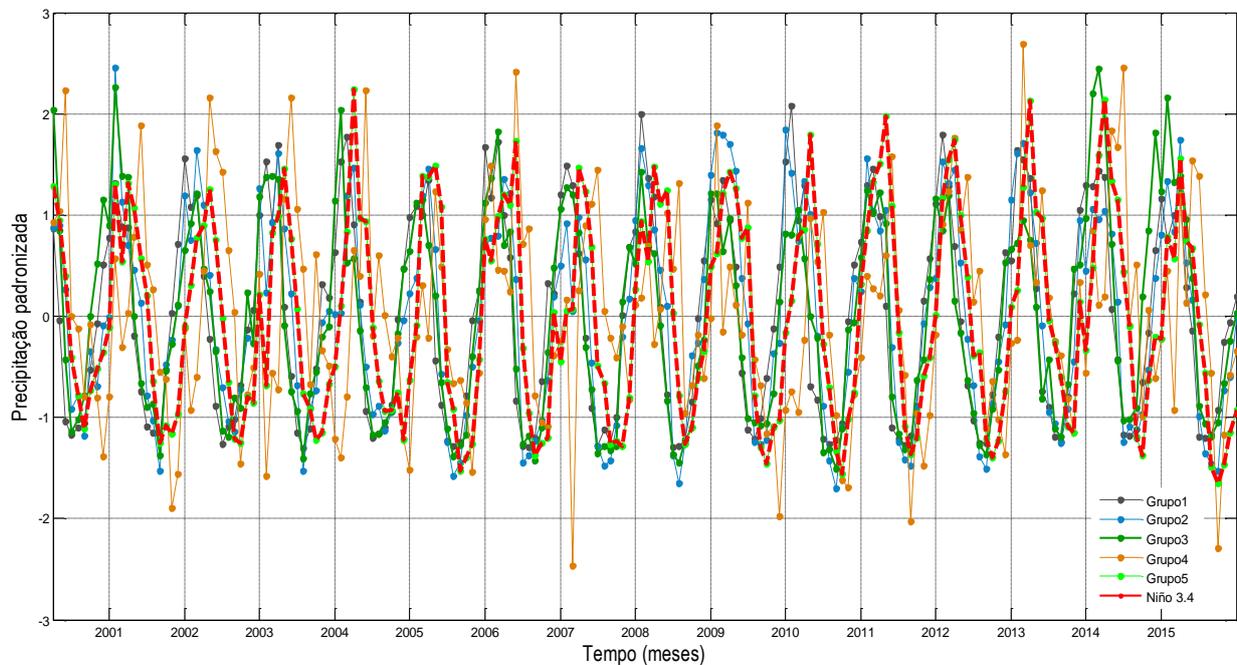


Figura 5: Precipitação padronizada mensal no período março 2000 a dezembro de 2015 para os grupos 1, 2, 3, 4 e 5.

No grupo 2, a precipitação mínima foi 182,95 mm.ano<sup>-1</sup>, observada no ano de 2007, enquanto a máxima 244,46 mm.ano<sup>-1</sup> foi observada no ano de 2009. Para o grupo 3, o ano mais chuvoso foi 2014, com 161,731 mm.ano<sup>-1</sup>, e o ano mais seco foi 2008, com 96,98 mm.ano<sup>-1</sup>. No grupo 4, a precipitação mínima foi 242,95 mm.ano<sup>-1</sup> registrada no ano 2010, enquanto a máxima foi 311,05 mm.ano<sup>-1</sup>. No grupo 5, a precipitação mínima foi 172,75 mm.ano<sup>-1</sup> no ano 2015, e a máxima de 222,87 mm.ano<sup>-1</sup> em 2014. No grupo 1, a precipitação mínima foi 88,55 mm.ano<sup>-1</sup>, observada no ano de 2013; por outro lado, a máxima de 146,70 mm.ano<sup>-1</sup> foi obtida para o ano de 2002.

A Figura 4 ilustra a correlação significativa entre as estimativas da precipitação do satélite TRMM e os dados observados em superfície. Também se pode observar que existe algum grau de correlação no comportamento espacial para os grupos.

A Figura 5 mostra a influência do fenômeno ENOS sobre as regiões dos cinco grupos. Grimm *et al.* (1998) constataram que as precipitações na região são influenciadas pelo ENOS em conjunto com os modos de variabilidade do Atlântico tropical norte e sul. Outros autores descrevem que a variabilidade interanual da precipitação na bacia amazônica estaria associada diretamente aos eventos do ENOS (Aceituno, 1988; Ropelewski e Halpert, 1987, 1989; Rao e Hada, 1990; Marengo, 1992, 1995; Marengo e Hastenrath, 1993; Rao *et al.*, 1996; Poveda e Mesa, 1997; Marengo e Nobre, 2001; Fu *et al.*, 2001; Poveda e Salazar, 2004; Poveda *et al.*, 2006).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas de agrupamento hierárquico e discriminatório apresentaram bons resultados ao serem aplicadas na identificação de regiões homogêneas de precipitação na área de estudo. Foram identificadas cinco (5) regiões homogêneas de precipitação na região, que denota algumas concordâncias e discordâncias com resultados prévios da literatura. Escalas temporais distintas com base de dados diferentes, em especial quanto à amplitude temporal, aliadas a algoritmos de segmentação diferenciados, podem explicar diferenças encontradas no processo de grupamento. Por outro lado, a identificação de 5 ou 6 regiões na literatura e no presente trabalho embasa as diretrizes aqui seguidas para condução da pesquisa.

As precipitações estimadas pelo algoritmo 3B43\_RT do TRMM, para a área de estudo, apresentam coerência com os dados observados, podendo-se afirmar que reproduzem, com boa aproximação, o ciclo sazonal padrão, sendo considerados dados confiáveis e robustos, que podem ser usados como dados de entrada em modelos de desagregação em áreas sem informações, constituindo-se em uma alternativa para fortalecer a gestão dos recursos hídricos em bacias hidrográficas, especialmente nas sub-bacias com pouco ou nenhum monitoramento.

A análise relacionada aos anos de ENOS evidenciou as anomalias de precipitação associadas com o fenômeno que ocorreu nos anos reconhecidos como episódios intensos, notadamente anomalias negativas, El Niño, em 2009-2010, 2002-2003, 2004-2005 e 2006-2007, e anomalias positivas, La Niña, em 2001, 2008, 2011 e 2012.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem, inicialmente, ao CNPq e CAPES, pela bolsa de estudos concedida ao primeiro e terceiro autor. Agradecimentos são estendidos à FAPERJ, por meio dos projetos FAPERJ – Pensa Rio – Edital 34/2014 (2014-2017) – E-26/010.002980/2014 e FAPERJ n° E\_12/2015, bem como ao suporte oferecido pelo CNPq por meio do projeto Edital n° 12/2016 – Processo 306944/2016-2 e projeto Edital Universal n° 14/2013 – Processo 485136/2013-9. Agradecimentos são também dedicados às agências que disponibilizaram dados para a pesquisa, como é o caso do CPRM, ANA, INMET e NASA.

## REFERÊNCIAS

- ANA (2015) Hidroweb - Sistema de informações Hidrológicas. <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Accessed 1 May 2015.
- BERNARD, E., P. NAVEAU, M. VRAC, AND O. MESTRE, Clustering of maxima: Spatial dependencies among heavy rainfall in France, *J. Clim.*, 26, 7929–7937, 2013
- COOLEY, D., P. NAVEAU, AND P. PONCET: Variograms for spatial max-stable random fields. *Dependence in Probability and Statistics*, P. Bertail, P. Doukhan, and P. Soulier, Eds., Lecture Notes in Statistics Series, Vol. 187, Springer, 373–90, 2006.
- DA SILVA, I.R., Variabilidade sazonal e interanual das precipitações na região sul do Brasil associadas às temperaturas dos oceanos Atlântico e Pacífico. Dissertação de M.Sc. INPE, São José dos Campos, Brasil 2004
- FISCH G, MARENGO JA, NOBRECA. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. *Acta Amazonica*; 28(2): 101-126, (1998).
- GRIMM AM, FERRAZ SET, GOMES J, Precipitation Anomalies in Southern Brazil Associated with El Niño and La Niña Events. *J Climate* 11:2863-2888,1998A.
- MARENGO, J. A. Interannual variability of surface climate in the Amazon Basin, *Int. J. Climatol.*, 12, 853-863,1992.
- MARENGO, J. A. et al. Tropical South America east of the Andes. [in “State of the Climate in 2014”], *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 95, p. S170-S171, 2014.
- NAVEAU, P., A. GUILLOU, D. COOLEY, AND J. DIEBOLT, Modelling pairwise dependence of maxima in space. *Biometrika*, 96, 1–17, 2009.
- NOBRE, C.A.; MARENGO, J.A; ARTAXO, P. Understanding the Climate of Amazonia: Progress From LBA. In: KELLER, M.; BUSTAMANTE, M.; GASH, J.; SILVA DIAS, P. (Orgs.). Amazonia and Global Change. Geophysical Monograph Ser, vol. 186. Washington, D.C.: American Geophysical Union Books, p.145-147, 2009a.
- OBREGÓN, G. O. ; NOBRE, C. A. . Rainfall regionalization on the Amazon basin. In: 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, 2006, Foz de Iguaçu. 8thICSHMO, 2006.
- ROPELEWSKI, C. F., AND M. S. HALPERT. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1606–1626, 1987.
- ROUSSEEUW, P., SILHOUETTES., A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *J. Comput. Appl. Math.*, 20, 53–65, 1986.
- SATYAMURTY, P.; da COSTA, C.P.W.; MANZI, A.O. Moisture source for the Amazon Basin: a study of contrasting years. *Theoretical and Applied Climatology*, v.111, n.1-2, p.195-209. 2013.
- SATYAMURTY, P., A. A. DE CASTRO, J. TOTA, L. E. GULARTE, AND A. O. MANZI, Rainfall trends in the Brazilian Amazon Basin in the past eight decades. *Theor. Appl. Climatol.*, 2009.
- SANTOS, E. B., P. S. LUCIO, AND C. M. SANTOS E SILVA., Precipitation regionalization of the Brazilian Amazon. *Atmos*, 2015.