

LA VARIABILIDAD DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LAS ZONAS INTERTROPICALES DE LOS OCÉANOS PACÍFICO Y ATLÁNTICO Y SU RELACIÓN CON LA PRECIPITACIÓN EN EL NORDESTE BRASILEÑO

Jonas TEIXEIRA NERY¹, Oliver MESEGUER-RUIZ²

¹ Campus Experimental de Ourinhos, Universidade Estadual Paulista, CLIMA/CNPq

² Grupo de Climatología, Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universitat de Barcelona

jonas@ourinhos.unesp.br, oliver.meseguer@ub.edu

Resumen

La precipitación en la región del nordeste brasileño presenta una elevada irregularidad interanual e intraanual, dándose períodos de marcadas sequías, y períodos en los que la precipitación es más abundante. Es conocida la influencia de los mecanismos atmosféricos que afectan estos procesos, siendo la oscilación de la Zona de Convergencia Intertropical la principal. Se demuestra que la temperatura superficial del océano Pacífico en la parte oriental de El Niño 3.4 presenta una marcada relación con la variabilidad de la precipitación en la región brasileña estudiada con varios meses de desfase. Asimismo, también muestra una importante influencia en la temperatura superficial del océano Atlántico intertropical, siendo el Atlántico norte tropical y el Atlántico sur tropical donde mayor influencia presenta. A su vez, la temperatura superficial de este dipolo también influye en las precipitaciones mensuales de la región del nordeste brasileño, de lo que se puede afirmar que la alternancia de las fases de El Niño/La Niña influyen de una manera doble los mecanismos pluviométricos en la región estudiada.

Palabras clave: Nordeste brasileño, Precipitación anual y mensual, Zona de Convergencia Intertropical, El Niño 3.4, Atlántico tropical

Abstract

Precipitation in the Brazilian northeast region has a high interannual and intra-annual irregularity, occurring periods of marked droughts and periods where precipitation is higher. The influence of atmospheric mechanisms affecting these processes is well known, being the oscillation of the Intertropical Convergence Zone the most important. In this work is shown that the Pacific sea surface temperature in the eastern part of El Niño 3.4 has a strong relationship with the variability of precipitation in the studied Brazilian region several months after. Furthermore, it also shows a significant influence of the Intertropical Atlantic sea surface temperature, being the Tropical North Atlantic and the Tropical South Atlantic where the higher influence is found. In turn, the surface temperature of this dipole also influences the monthly rainfall in the Northeast region, so it can be said that the alternating phases of El Niño / La Niña influence in a double way the precipitation mechanisms of the studied region.

Key words: Brazilian northeast, Annual and monthly precipitation, Intertropical Convergence Zone, El Niño 3.4, Tropical Atlantic Ocean

1. INTRODUCCIÓN

El Nordeste brasileño (NEB) es una región que tiene una dinámica climática muy compleja, con una vasta área denominada semiárida, donde la lluvia es escasa durante gran parte del año y con una gran variabilidad espacial e interanual.

La precipitación es la variable climatológica más importante de las regiones tropicales, y además, de las más difíciles de ser observadas. Esta variable está directamente relacionada con la convección tropical, que se encuentra esencialmente controlada (ya sea intensificándola o inhibiéndola) por la circulación general de la atmósfera, fenómenos de escala global resultantes de la compleja interacción con la superficie del planeta, en especial con la particular distribución de los continentes y los océanos y el desigual suministro de energía solar derivado de la topografía y de la cobertura vegetal.

Uno de los primeros investigadores que correlacionaron las anomalías de la temperatura de la superficie marina con la presión atmosférica fue Bjerknes (Arntze y Fahrback, 1996): “el meteorólogo noruego Bjerknes en 1969 reconoció la relación entre las fluctuaciones de la atmósfera y del océano”. Este hecho no solo permitió el descubrimiento, sino también la explicación, de la Oscilación del Sur.

En este sentido, hay que señalar que el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) afecta a la circulación atmosférica, determinando perturbaciones en el patrón de variabilidad de la precipitación en diversas regiones del globo de manera general: la fase cálida se asocia a períodos secos en las regiones tropicales y a períodos cálidos y húmedos más allá de los trópicos, y la fase fría se caracteriza por lo contrario, períodos húmedos en los ámbitos tropicales y secos y fríos fuera de ellos (Ropelewski y Haplert, 1989).

La variabilidad interanual de la distribución de las lluvias en el nordeste brasileño, tanto a escala espacial como temporal, está íntimamente relacionada con los cambios en las configuraciones de circulación atmosférica a gran escala y con la interacción océano-atmósfera del Pacífico y del Atlántico. El impacto causado por el fenómeno ENSO se pone de manifiesto principalmente por la modificación del régimen y del total de precipitación, que puede tener como efectos severas sequías, interfiriendo de manera contundente en las actividades humanas.

Diversos investigadores (Nobre y Molion, 1988) sugirieron que en la fase cálida del ENSO (fase Niño), el ramal ascendente de la célula de Hadley/Walker, normalmente situado sobre la Amazonía, se desplaza sobre las aguas anormalmente cálidas del Pacífico Oriental y Central, dando lugar a centros ciclónicos en los niveles altos de la atmósfera sobre el norte y el nordeste de Sudamérica, y una fuerte subsidencia sobre esta región y sobre el Atlántico tropical. Esta subsidencia debilitaría la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y la convergencia sobre el nordeste, disminuyendo las lluvias. El evento del Niño de 1983 (Rao *et al.*, 1986), en particular, fue muy marcado, provocando reducciones de hasta el 80% de los totales pluviométricos entre los meses de marzo y mayo de aquel año. Por otro lado, parece existir una relación opuesta entre la fase fría (fase Niña) y las lluvias, que se ven intensificadas durante ese período, como pudo constatarse en los episodios de 1974, 1985 y 1995.

Desde el punto de vista climático, la región del nordeste de Brasil, que se localiza entre los 0° y 18° de latitud sur y entre los 35° y 48° de latitud oeste, en el extremo nordeste del continente sudamericano, frente a las costas atlánticas (Figura 1), es considerada semiárida al presentar sustanciales variaciones temporales y espaciales de la precipitación, así como elevadas temperaturas a lo largo del año (Azevedo *et al.*, 1998). A pesar de las elevadas temperaturas registradas a lo largo de todo el año, las amplitudes térmicas máximas se sitúan en torno a los 6° C. En general, cinco mecanismos gobiernan el régimen pluviométrico de la región (Ronny, 1996): 1) Eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENSO); 2) Temperatura de la superficie del mar (SST) en la cuenca del océano Atlántico, los vientos alisios y la presión al

nivel del mar (SLP); 3) Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) sobre el océano Atlántico; 4) Frentes fríos; y 5) Depresiones aisladas en niveles altos (DANA). Además de estos mecanismos, también se puede destacar el papel de las líneas de inestabilidad, de los complejos convectivos de mesoescala, y el efecto de las brisas marítima y terrestre en la precipitación.

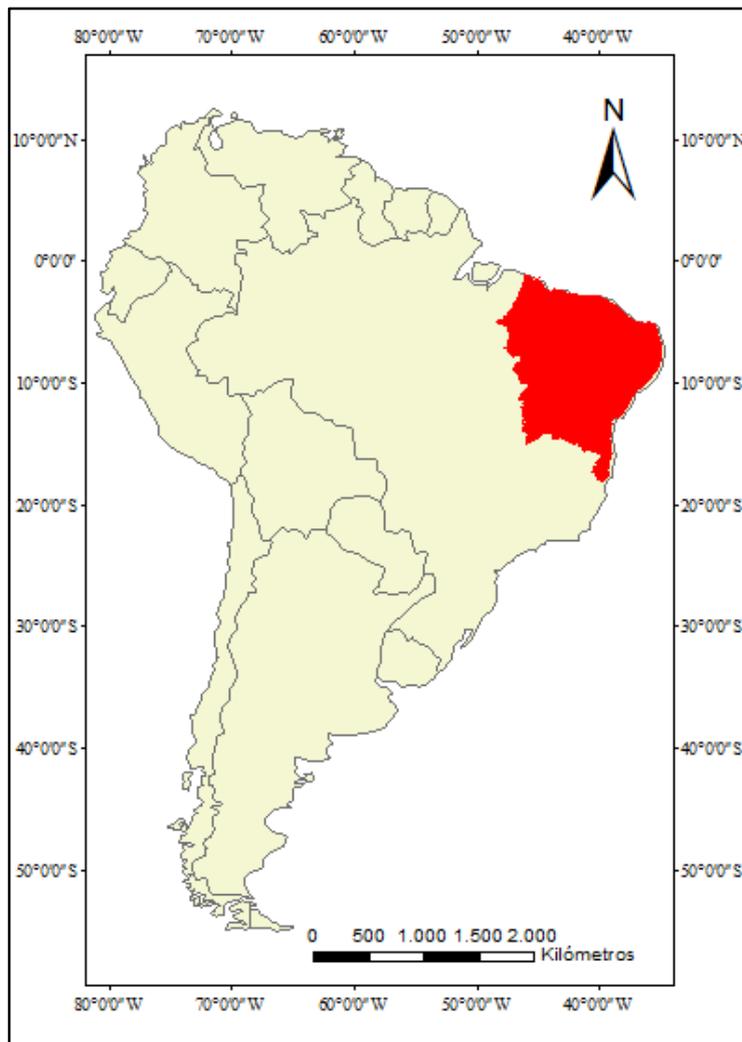


Fig. 1: El nordeste brasileño en el contexto sudamericano

Numerosos trabajos (Alves *et al.*, 1997; de Souza *et al.*, 2004) muestran la influencia del océano Atlántico tropical en la distribución de las lluvias en las regiones tropicales del continente sudamericano, principalmente sobre el sector norte del Nordeste brasileño. Estos trabajos muestran que, El Niño, cuando acontece conjuntamente con un dipolo positivo del Atlántico, definido como la diferencia entre la anomalía de la temperatura superficial del mar del Atlántico norte y del Atlántico sur, que es desfavorable para las lluvias, causan años secos o muy secos en el Nordeste. El fenómeno de La Niña (enfriamiento anómalo de las aguas del océano Pacífico) asociado a un dipolo del Atlántico negativo (favorable para la ocurrencia de

precipitaciones), es normalmente responsable de años considerados normales, lluviosos o muy lluviosos en esta región. Por último, cuando las aguas del Pacífico se encuentran en condiciones normales y el dipolo del Atlántico en una situación negativa (positiva), la probabilidad de que se dé un año normal o lluvioso (seco) también es elevada. Estas observaciones han sido tan contrastadas que se han podido evaluar a partir de datos con generados por modelos, como el caso del PIRATA (Servain *et al.*, 2003).

El objetivo de este trabajo es analizar la influencia de los océanos Pacífico (en su sector central, conocido como sector El Niño 3.4) y Atlántico tropical (tanto del Atlántico norte como del Atlántico sur) en la zona tropical brasileña.

2. MATERIALES Y MÉTODO

Fueron analizadas las series mensuales obtenidas a partir de las series diarias de precipitación de un centenar de observatorios pluviométricos en el período 1970-2012, localizados en el área de estudio y en sus proximidades (Figura 2). Estos datos fueron obtenidos a través de la Agência Nacional de Água (HIDROWEB) brasileña.

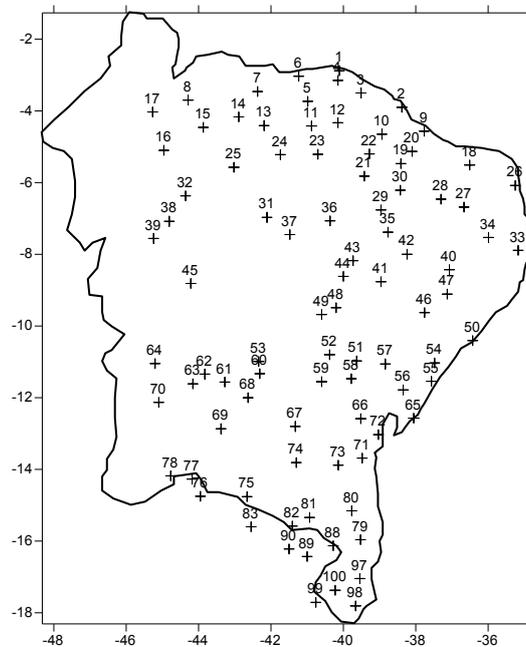


Fig. 2: Localización de los observatorios pluviométricos utilizados

También se obtuvieron datos relativos a las temperaturas superficiales del océano Pacífico (sector El Niño 3.4) y del océano Atlántico (franja intertropical) a través del sitio web de la NOAA, en su sección Climate Indices: Monthly Atmospheric and Ocean Time Series (Enfield *et al.*, 1999).

De entre los softwares de dominio público, uno de los que más destacan en el campo de la estadística y que ha ganado más usuarios es el entorno R. Se trata de una herramienta útil, de análisis y tratamiento de datos, y por presentar una serie de análisis estadísticos de gran utilidad: tests paramétricos y no paramétricos, modelización lineal y no lineal, análisis de series temporales, simulación y estadística espacial, o simplemente estadísticas descriptivas. El programa R es gratuito y de código abierto, pudiendo ser modificado o implementado con

nuevos procesos y funciones desarrolladas por los usuarios en cualquier momento (Peternelli y Mello, 2013).

Debido a problemas de los registros instrumentales, las series climáticas se encuentran, en general, incompletas. El relleno de los datos faltantes de estas series puede ser llevado a cabo teniendo en consideración la continuidad espacial de los valores observados y la variabilidad espacial de la variable observada. Este tipo de relleno, denominado “por predicción espacial”, requiere del conocimiento de la localización espacial de las estaciones de seguimiento en las que han sido observados los valores. En esta fase del proyecto se utilizó la herramienta de R *Climatol*, una subrutina fácil de manejar y que permite el relleno de huecos manteniendo la consistencia o, en su defecto, la eliminación de la serie pluviométrica con problemas (Strangeways, 2007).

La aplicación de un análisis de componentes principales a un conjunto de datos de gran dimensión es interesante, en un primer lugar, para poder determinar combinaciones lineales de variables originales, que expliquen lo máximo posible la variación existente en los datos originales. Estrictamente hablando, este tipo de análisis no requiere ninguna condición de validez inicial, es decir, de ninguna suposición teórica de que exista un modelo causal, sino que asume la distribución de probabilidad de los datos. Por lo tanto, no es posible establecer en ningún momento una relación de causa y efecto entre las variables, aunque existiera. El análisis de componentes principales es una técnica que se utiliza para la reducción del tamaño de una población. Por ejemplo, considerando una población de m componentes y p variables (siendo $m \leq p$), se da la siguiente configuración de variables latentes, es decir, los componentes principales (CP) resultantes de combinaciones lineales sin errores de las variables iniciales:

$$\begin{aligned} CP_1 &= a_{11}X_1 + a_{21}X_2 + \dots + a_{p1}X_p \\ CP_2 &= a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{p2}X_p \\ CP_m &= a_{1m}X_1 + a_{2m}X_2 + \dots + a_{pm}X_p \end{aligned}$$

La solución de este sistema de ecuaciones es único (esto es cierto en la práctica, en la teoría, la igualdad de dos vectores propios implica una multitud de soluciones, pero esta situación es muy poco frecuente). Esta solución considera la varianza total en el conjunto inicial de variables, donde la primera componente principal (CP_1) explica la varianza máxima de los datos iniciales. La segunda componente (CP_2) explica la máxima varianza no explicada y así sucesivamente, hasta la última componente (CP_m), que aporta la porción más pequeña de la explicación total de la varianza de los datos iniciales. Los resultados numéricos tienen en cuenta las coordenadas, las puntuaciones, los valores y los vectores propios, aportados por las variables y los coeficientes.

Las regiones homogéneas que se identificaron fueron determinadas a partir de un análisis de componentes principales en modo S (Richman, 1986), y a continuación un análisis *cluster* (de conglomerados).

Se realizó un análisis *cluster* (Everitt *et al.*, 1991), técnica de carácter clasificatorio que tiene como finalidad la formación de grupos (llamados también conglomerados), tan internamente homogéneos como sea posible partiendo de un conjunto de datos multivariados. Este análisis se basa, principalmente, en determinar las distancias (medidas de proximidad o semejanzas entre objetos). Se desarrolla mediante la división sucesiva de la población total en subgrupos significativos a través de diferentes pasos: 1) hallar la distancia euclídea métrica entre los diferentes individuos; 2) construir una matriz de las distancias obtenidas; 3) formar un primer subgrupo a partir del método del vecino más próximo; 4) hallar las distancias del subgrupo formado por las matrices de menor distancia en relación a los otros individuos y formar una

nueva matriz de distancias; 5) formar un segundo subgrupo y determinar las nuevas distancias y matrices (y así sucesivamente hasta que se clasifiquen todas las matrices); y 6) formar un dendrograma correspondiente con los resultados obtenidos y el tipo de análisis realizado. Por último, una vez obtenidas las áreas homogéneas, se relacionaron con el índice de la precipitación (IPP) de cada área identificada, con las anomalías de las temperaturas superficiales de la zona de El Niño 3.4 y del Atlántico tropical norte y sur, quedando definido el índice de la siguiente manera:

$$IPP = \frac{\overline{P}_i - \overline{P}}{\overline{P}}$$

Siendo \overline{P}_i la media de precipitación acumulada para cada año y \overline{P} la media de las medias de \overline{P}_i . De esta forma, este índice constituye una anomalía relativa generada para cada área homogénea.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la obtención de los datos fue necesario utilizar el criterio de relleno de huecos a través de los observatorios pluviométricos próximos y con altitudes similares. Así fue posible obtener series completas dentro del período analizado. Al mismo tiempo también se tuvieron en cuenta los valores que pudieran ser *outlayers*, y se compararon con las estaciones vecinas para comprobar si dicho valor era correcto. Si la comparación no era posible, dicha serie se descarta.

Después de ese análisis preliminar, se elaboraron las series mensuales para cada observatorio. Fueron homogeneizadas utilizando el paquete Climatol de R (Guijarro, 2001). A partir de esa base de datos se estudiaron las componentes principales (modo S) y se generaron autovalores que posteriormente posibilitaron en análisis *cluster* (Figura 3).

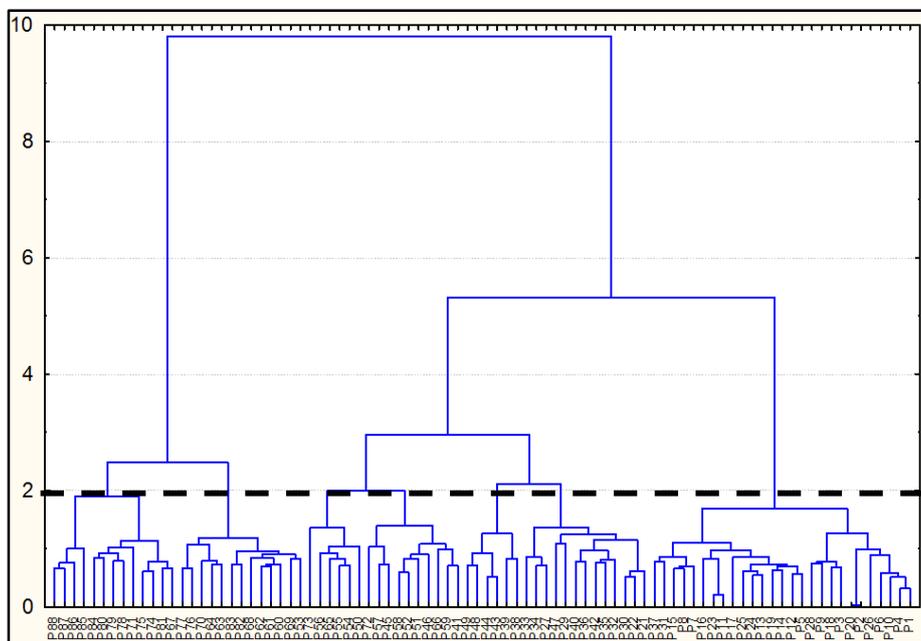


Fig. 3: Dendrograma generado a partir del método de distancias euclídeas para los 88 observatorios

Considerando como base un corte subjetivo en el dendrograma, se generaron cinco grupos homogéneos de precipitación. El primer grupo, denominado G-I, consta de 27 series pluviométricas y corresponde al norte del área de estudio. El segundo grupo, con 19 observatorios (G-II), se encuentra situado inmediatamente al sur del primero. Seguidamente, de nuevo al sur del G-II se encuentra el tercer grupo (G-III), que consta de 15 series. Finalmente, al sur de este último, se encuentran los grupos G-IV (10 series) y G-V (15 series), tal y como se muestra en la Figura 4.

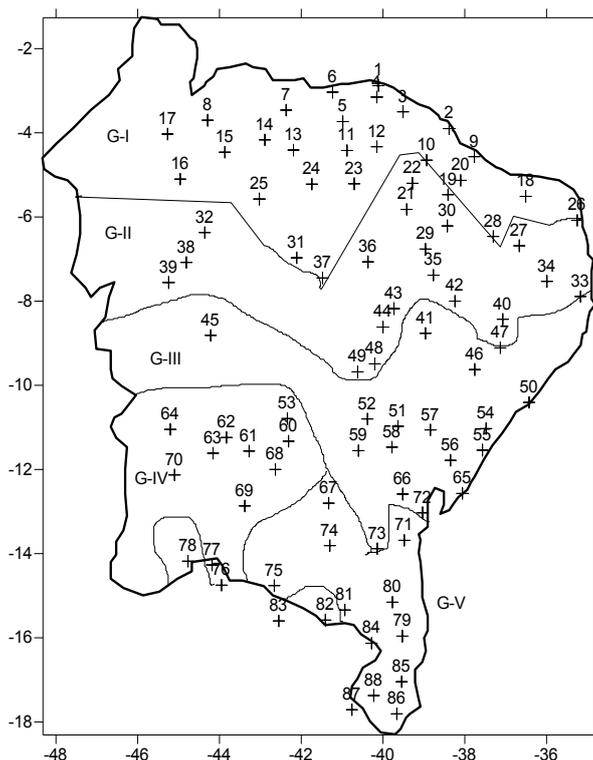


Fig. 4: Áreas homogéneas generadas a partir del análisis cluster

A partir de estas áreas homogéneas, se generaron cinco índices de precipitación, denominados IPP1, IPP2, IPP3, IPP4 e IPP5, que constituyen los índices relativos de cada grupo homogéneo, y que fueron correlacionados con las anomalías de El Niño 3.4 y con el Atlántico tropical norte y sur (Figuras 5, 6 y 7).

Se seleccionaron algunos años para llevar a cabo una correlación lineal, basadas en las anomalías de los océanos. Por ejemplo, para el caso de El Niño 3.4, se pueden observar tanto anomalías positivas en los años 1972, 1982, 1987, 1991, 1992, 1997, 2002, 2004, 2006 y 2009, y negativas en los años 1973, 1975, 1988, 1999, 2007 y 2010. Tras estos, se relacionan las anomalías de cada índice con los diferentes índices de precipitación (sin desfase y con un desfase de hasta 14 meses en algunos casos) y se seleccionaron las mejores correlaciones positivas y negativas para cada año y de cada área homogénea y se correlacionaron nuevamente con las muestras seleccionadas. Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 1 y 2.

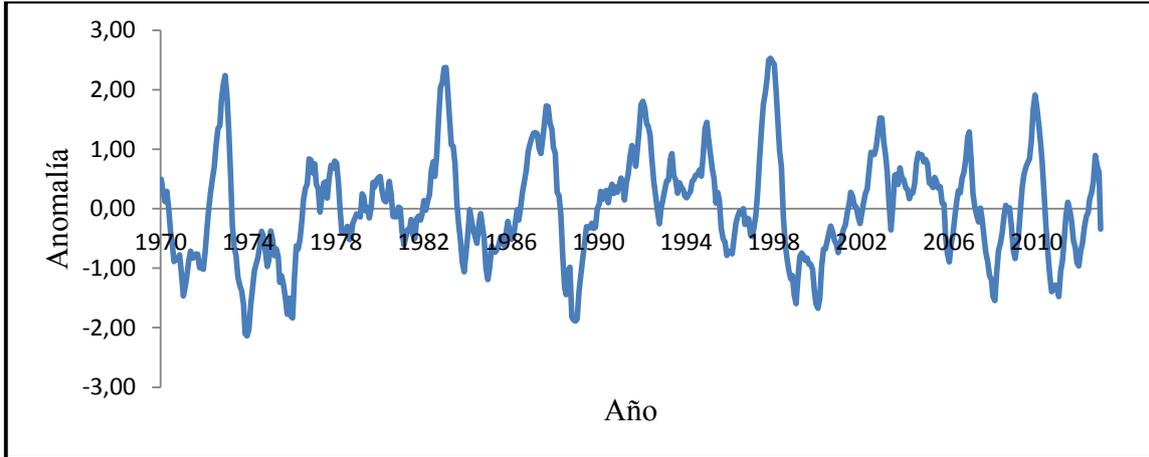


Fig. 5: Evolución de la anomalía en El Niño 3.4

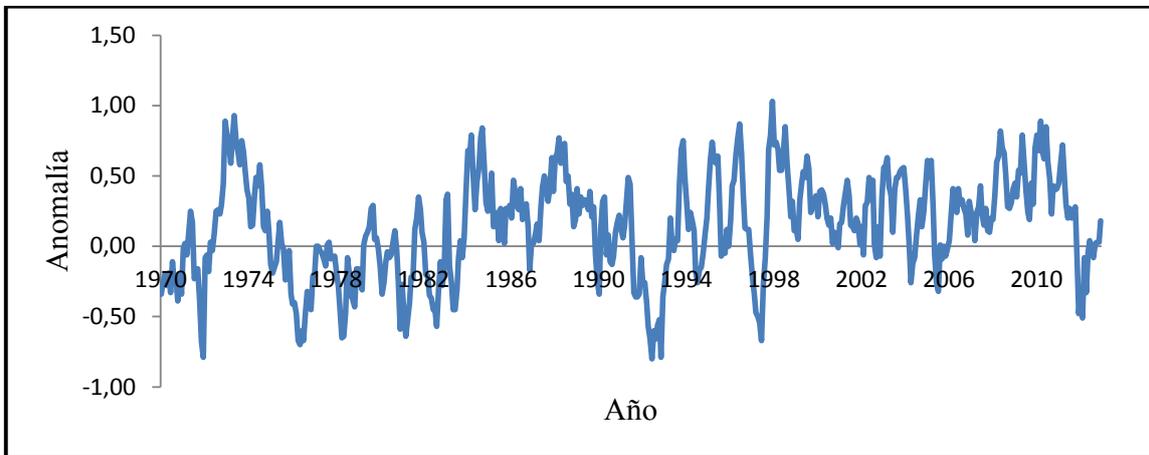


Fig. 6: Evolución de la anomalía en el Atlántico tropical sur

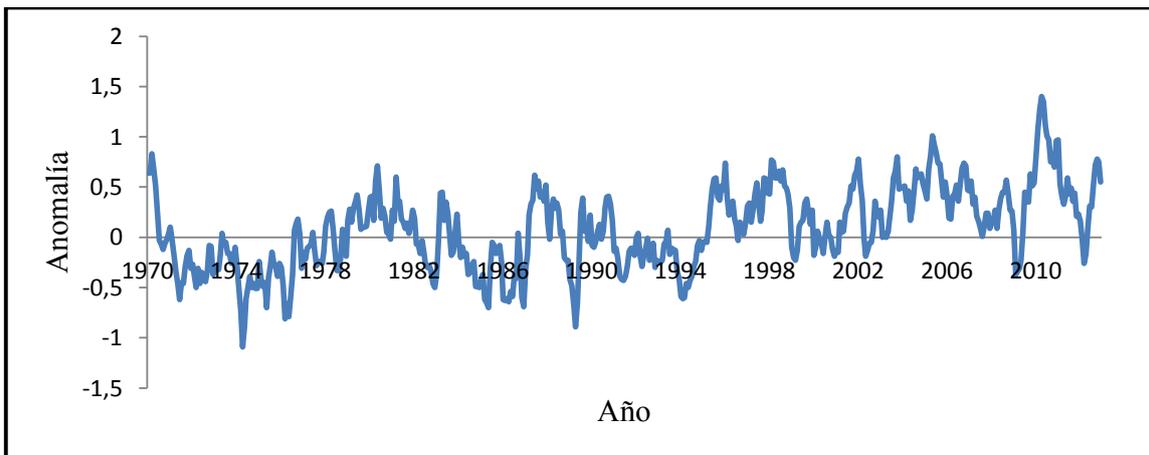


Fig. 7: Evolución de la anomalía en el Atlántico tropical norte

En la Tabla 1 se presenta la correlación entre los cinco valores del índice pluviométrico de los diferentes clusters identificados con las anomalías positivas de El Niño 3.4 y del Atlántico tropical sur (TSA) y norte (TNA). Se puede observar que el El Niño 3.4 presenta una alta correlación lineal, principalmente con las lluvias del norte del área de estudio (G-I), siendo las correlaciones con las demás áreas homogéneas marcadas pero no tan elevadas.

Para el caso del TSA, los valores de correlación lineal fueron menores, pero igualmente elevados. Se puede considerar también que el TNA presenta los valores con la menor correlación, con lo que se puede deducir que su influencia en las lluvias del nordeste brasileño es la menor.

| | IPP-1 | IPP-2 | IPP-3 | IPP-4 | IPP-5 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| EN 3.4 | 0,74 | 0,65 | 0,52 | 0,44 | 0,35 |
| TAS | 0,37 | 0,47 | 0,37 | 0,43 | 0,35 |
| TAN | 0,33 | 0,31 | 0,23 | 0,36 | 0,30 |

Tabla 1: CORRELACIÓN LINEAL POSITIVA ENTRE LOS ÍNDICES DE PRECIPITACIÓN Y LAS ANOMALÍAS DE EN3.4, TAS Y TAN

| | IPP-1 | IPP-2 | IPP-3 | IPP-4 | IPP-5 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| EN 3.4 | -0,44 | -0,42 | -0,31 | -0,42 | -0,41 |
| TAS | -0,20 | -0,16 | -0,14 | -0,33 | -0,35 |
| TAN | -0,49 | -0,34 | -0,43 | -0,34 | -0,28 |

Tabla 2: CORRELACIÓN LINEAL NEGATIVA ENTRE LOS ÍNDICES DE PRECIPITACIÓN Y LAS ANOMALÍAS DE EN3.4, TAS Y TAN

4. CONCLUSIONES

Las correlaciones entre los índices de precipitación y la anomalía de El Niño 3.4 son las más elevadas para el caso de la región norte del área de estudio (G-I) con un valor de la r de Pearson de 0,74, y de 0,65 para el caso de la región norte-centro (G-2). Estas correlaciones, para el caso de El Niño 3.4, van disminuyendo hacia el sur, alcanzando un valor mínimo (en cuanto a las correlaciones positivas) de 0,35 para la región más meridional (G-V). Puede afirmarse que existe un gradiente latitudinal, que hace que la influencia de El Niño 3.4 disminuya con el aumento de latitud.

A partir de los valores obtenidos, se puede afirmar que el océano Atlántico tropical norte presenta unas correlaciones inversas más marcadas que el océano Atlántico tropical sur. En esta situación, el sector de El Niño 3.4 siempre presenta unas correlaciones negativas más evidentes que el TAS. Para el TAN ocurre lo mismo con la excepción del conglomerado G-III (-0,31 frente a -0,43).

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación está financiada por el proyecto CSF-CAPES/proceso 8176/13-2 del gobierno de Brasil y por el Programa de Formación de Profesorado Universitario del Ministerio de Educación. Además, también se inserta dentro del proyecto PRECABAL (CGL2011-29263-C02-01) del Ministerio de Ciencia e Innovación, y en el marco de las investigaciones del Grupo de Climatología de la Universidad de Barcelona (2009 SGR 443). Los autores también agradecen a la Agencia Nacional do Agua brasileña la cesión de los datos.

6. REFERENCIAS

- Alves, J.M.B.; de Souza, E.B.; Repelli, C.A.; Vitorino, M.I. y Ferreira, N.S. (1997). “Episódios de La Niña na bacia do oceano Pacífico Equatorial e a Distribuição de Chuvas no Setor Norte do Nordeste Brasileiro”. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 12, pp. 63-76.
- Arntz, W.E. y Fahrbach, E. (1996). *El Niño: experimento climático de la naturaleza. Causas físicas y efectos biológicos*. Fondo de Cultura Económica, Mexico.
- Azevedo, P.V., da Silva, B.B. y Rodrigues, M.F.G. (1998). “Previsão Estatística das Chuvas de Outono no estado do Ceará”. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 13, pp. 19-30.
- De Souza, E.B.; Kayano, M.T. y Ambrizzi, T. (2004). “The regional precipitation over the Eastern amazon/northeast Brazil modulated by the tropical Pacific and Atlantic SST anomalies on weekly timescale”. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 19, pp. 113-122
- Enfield, D.B.; Mestas-Nuñez, A.M.; Mayer, D.A. y Cid-Serrano, L. (1999). “How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures?” *Journal of Geophysical Research*, 104, pp. 7841-7848.
- Everitt, B.S. y Graham, D. (1991). *Applied multivariate data analysis*. Edward Arnold. USA, British Library Cataloguing in Publication Data.
- Guijarro Pastor, J. A. (2001). Climatol: software libre para depuración y homogeneización de datos climatológicos. En: García Codron, J.C.; Diago Liaño, C.; Fernández de Arróyabe Hernández, P. y Garmendia Pedraja, C. (Eds.). *El clima, entre el mar y la montaña*. Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, pp. 493-502.
- Nobre, C.A. y Molion, L.C.B. (1988). The Climatology of Droughts and Drought Prediction. En Parry, M.P.; Carter T.R.; Konijn N.T. (Eds.). *The Impact of Climatic Variations on Agriculture. Volume 2: Assessments in Semi-Arid Regions*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Países Bajos, pp 305-323.
- Mello, M.P. y Peternelli, L.A. (2013). *Conhecendo o R: uma visão mais que Estatística*. Editora Universidade Federal de Viçosa.
- Rao, V.B.; Satyamurty, P. y de Brito, J.I.O.B. (1986). “On the 1983 drought in Northeast Brazil”. *International Journal of Climatology*, 6, pp. 43-51.
- Ronny Berndtsson, C.U. (1996). “Regionalization and Spatial Properties of Ceará State Rainfall in Northeast Brazil”. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101, pp. 4221-4233.
- Ropelewski, C. F. y Halpert, M. S. (1989). “Precipitation patterns associated with the high index phase of the southern oscillation”. *Journal of Climate*, 2, pp. 268-284.
- Richman, M. B. (1986). “Rotation of principal components”. *International Journal of Climatology*, 6, pp. 293-335.
- Servain, J.; Clauzet, G. y Wainer, I.C. (2003). “Modes of tropical Atlantic climate variability observed by PIRATA”. *Geophysical Research Letters*, 30, 5.
- Strangeways, I. (2007). *Precipitation, Theory, Measurement and Distribution*, Cambridge University Press, Cambridge.