

Evaluación de modelos climáticos globales del CMIP5 sobre el noroeste de América del Sur

Evaluation of the global climate models in the CMIP5 on the South America Northwest

Reiner Palomino-Lemus^{1,2}, Samir Córdoba-Machado^{1,2}, María Jesús Esteban-Parra¹

Resumen

Objetivo: El propósito de este estudio fue validar y comparar el rendimiento de seis modelos climáticos globales (GCMs) simulaciones de la quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5) en el norte de América del Sur. **Metodología:** La validación se llevó a cabo para la presión a nivel del mar (SLP) y la temperatura superficial del mar (SST), porque estas dos variables son de gran importancia en la descripción del clima de Colombia y pueden ser utilizadas como predictores en reducción de escala estadística de la precipitación en Colombia. En este trabajo se comparan los campos de medios y de varianza de SLP y SST de seis modelos del CMIP5 con respecto al reanálisis NCEP en el período comprendido entre los años 1950 y 2005. Además, se han comparado los principales modos de variabilidad derivados de un Análisis de Componentes Principales (PCA). **Resultados:** Los resultados muestran cómo los modelos reproducen relativamente bien los campos medios de la SLP y la SST, aunque en algunos modelos, como el CCSM4 tiende a mostrar patrones más zonales de la SLP, reforzando las altas subtropicales. **Conclusión:** Se encontró que todos los modelos reproducen razonablemente bien los principales modos de variabilidad asociada con el ENOS y con la del Atlántico tropical, sin embargo otros tienden a sobreestimar la varianza asociada con el primer modo.

Palabras clave: CMIP5, Comparación de modelos, Evaluación de modelos, Modelos climáticos.

Abstract

Objective: The purpose of this study was to validate and compare the performance of six Global Climate Models (GCMs) simulations from the 5th Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) in the area of northern South America. **Methodology:** The validation study is carried out for sea level pressure (SLP) and sea surface temperature (SST), because of these are two of the most important global variables in describing the climate of Colombia. So, both variables are susceptible be used as predictors in statistical downscaling of precipitation in Colombia. To this end we compare the mean and variance fields of SLP and SST in different models of the CMIP5 with those obtained from the NCEP reanalysis data for the period 1950-2005. Furthermore, we have compared the main modes of variability derived from a Principal Component Analysis (PCA). **Results:** The results show how the models reproduce reasonably well the mean fields of SLP and SST, although some models, such as CCSM4, tend to show more zonally SLP patterns, strengthening subtropical highs. **Conclusions:** For the PCA, all models reproduce the main variability modes associated with ENSO and tropical Atlantic reasonably well, while many of them tend to overestimate the variance associated with the first mode.

Keywords: Climate models, CMIP5, Model evaluation/performance, Model comparison.

Introducción

La variabilidad del clima en Colombia asociada con el cambio climático, tiene un impacto directo en

los sectores sociales y económicos, por ello ha sido objeto de numerosos estudios, sobre todo en diferentes escalas de tiempo espaciales y temporales. Pero la principal preocupación para las sociedades

¹ Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Granada, España.

² Profesor, Universidad Tecnológica del Chocó, Quibdó, Colombia.

e-mail: d-reiner.palomino@utch.edu.co d-samir.cordoba@utch.edu.co esteban@ugr.es

Fecha recepción: Septiembre 5, 2014

Fecha aprobación: Diciembre 10, 2014

Editor asociado: Jiménez AM

actuales son sus tendencias y efectos a largo plazo, como por ejemplo, las inundaciones, resultado de fuertes eventos de precipitación y la sequía, que normalmente aparecen como una combinación de la disminución de precipitación y por lo tanto del caudal, junto con temperaturas por encima del promedio (Redmond y Koch 1991, Pabón *et al.* 2001, Poveda 2004).

Por eso en las últimas décadas, muchos investigadores han realizado esfuerzos significativos de cooperación mutua y colaboración entre las diferentes comunidades que trabajan en el desarrollo de modelos más sofisticados para la predicción del fenómenos climáticos (Chen *et al.* 2004, Hibbard *et al.* 2007, Meehl y Hibbard 2007, Taylor *et al.* 2009). Muchos investigadores consideran que las mejores predicciones son proporcionadas por modelos más complejos como los modelos de circulación acoplados atmósfera-océano (AOGCMs por su siglas en inglés), los cuales son ampliamente utilizados para hacer proyecciones de posibles cambios futuros del clima, involucrando en la medida de lo posible, todos los procesos que afectan el sistema climático. Sin embargo, los resultados producidos por diferentes AOGCMs difieren significativamente, aun para cambios similares de forzamientos externos.

Por eso en este documento, se propone como paso previo para la obtención de proyecciones regionales de cambio climático para Colombia y para evaluar la capacidad de representación, las variables presión a nivel del mar (SLP) y temperatura de la superficie del mar (SST); en esta investigación se aborda la validación de los modelos de circulación general de la quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5) en el norte de Suramérica, porque estas son dos de las variables globales más importantes a la hora de describir el clima de Colombia, susceptibles, por tanto, de ser usadas como predictores fundamentales en el *downscaling* estadístico de la precipitación colombiana.

Datos y metodología

Para el presente estudio se utilizan las variables presión a nivel del mar (SLP) y temperatura de la superficie del mar (SST), en el área comprendida

entre 40°N-30°S; 170°W-30°W, de seis modelos distintos del CMIP5 (Tabla 1) con los obtenidos de los datos de la SLP del NCEP-NCAR reanalysis y la SST del Hadley Centre Global Sea Ice and Sea Surface Temperature (HadISST).

Se compararon los valores medios y de varianza, a nivel mensual de la SLP y SST, seguido de las correlaciones de los principales modos de variabilidad obtenidos mediante un Análisis de Componentes Principales (PCA) entre las observaciones y los modelos.

Para el análisis de la diferencia de medias, se aplicó la prueba t de Student, partiendo del supuesto de que ambas son variables aleatorias, de distribución normal independientes distribuidas con medias u_1 y u_2 , asumiendo como hipótesis nula, H_0 , con igualdad de medias y varianzas desconocidas, frente a la hipótesis alternativa en que las medias no son iguales.

$$H_0: u_x = u_y, \quad H_1: u_x \neq u_y, \text{ para } H_0,$$

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 + \sum_{j=1}^M (y_j - \bar{y})^2}{(N+M-2)} \left(\frac{1}{N} + \frac{1}{M} \right)}}$$

Se distribuye como una distribución t de Student con N+M-2 grados de libertad y por tanto se compara con lo que cabría esperar para la distribución t teórica con M-N-2 grados de libertad y se calcula la probabilidad (p) de obtener aleatoriamente tal muestra. Si la probabilidad es muy baja, p.e. <5%, se rechaza la hipótesis nula sobre la igualdad de las medias de las dos muestras a un nivel de confianza del 95%.

Luego se aplicó un F-test para obtener y representar las áreas donde las varianzas son distintas al nivel de significación del 95%, en donde

$$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \Rightarrow F > F_{\alpha/2, n_1, n_2} \text{ ó } F > F_{1-\alpha/2, n_1, n_2}$$

$$\text{Con } V_1 = n_1 - 1, V_2 = n_2 - 1, \alpha = 0.05$$

Finalmente se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) en Modo S sobre la Matriz de

Tabla 1. Resumen de las características principales de los modelos utilizados AR5, incluyendo acrónimos, la institución de acogida, atmosféricos y oceánicos resolución y la referencia principal para cada uno.

Nombre del modelo	Institución (país)	Resolución (°latx°lon)	Referencia
CCSM4	National Center for Atmospheric Research, USA	Atm:(~1.25°x0.94°)	Gent <i>et al.</i> (2011)
CSIRO-Mk3.6	The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia	Atm:T63(~1.9°x1.9°) Oce:0.9°x1.9°	Rotstayn <i>et al.</i> (2010)
HadGEM2-AO	Met Office Hadley Centre, UK	Atm:1.875°x1.25° Oce:0.5°x1°	Jones <i>et al.</i> (2011)
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japón	Atm:T85(~1.4°x1.4°) Oce:1°x1°	Watanabe <i>et al.</i> (2010)
GISS-E2-H	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	Atm:(~2°x2.5°)	Kim <i>et al.</i> (2012)
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology, Alemania	Atm:(~1.9°x1.9°) Oce:1.5°x1.5°	Giorgetta <i>et al.</i> (2013)

Correlaciones (Jolliffe *et al.* 2002), llamado también funciones empíricas ortogonales, por sus siglas en inglés (EOFs, Empirical Orthogonal Functions), que es una de las técnicas más utilizadas en las ciencias de la atmósfera (Obukhov 1947, 1960, Fukuoka 1951, Lorenz 1956).

Los EOFs son patrones ortogonales en el espacio que pueden ser considerados como derivaciones empíricas de una función básica, es decir, son los autos vectores de la matriz de covarianza cuya estructura es espacial. En ese orden, los EOFs a veces pueden ser interpretados como modos naturales de la variabilidad del sistema observado. Los coeficientes temporales o PCs que son correlacionados, se obtienen proyectando los campos observados o matriz original de datos sobre los EOFs ortogonales, mostrando la variación de cada estructura espacial en el tiempo y representando de una manera eficiente esa variabilidad. Además, el autovalor asociado es proporcional a la varianza explicada por la PC.

En resumen el PCA busca hallar combinaciones lineales de las variables originales que expliquen la mayor parte de la varianza total. El primer factor o componente es aquel que explica una mayor parte de la varianza total, mientras que el segundo factor

explica la mayor parte de la varianza restante, es decir, de la que no explicaba el primero y así sucesivamente. De este modo es posible obtener tantas componentes como variables originales.

Resultados

Como se puede apreciar en la Figura 1, se presenta la comparación de los campos medios de la presión a nivel del mar en el período 1950 a 2005 para los datos del reanálisis NCEP y los modelos (CCSM4 y CSIRO-Mk3.6). Se aprecia que el modelo CCSM4 representa claramente los campos medios de la SLP, a excepción de la parte montañosa de Estados Unidos y el nororiente del Atlántico, en donde tiende a la subestimación de esta. Por otro lado, el CSIRO-Mk3.6 tiende a sobreestimar fuertemente la presión en la mayor parte de la zona de estudio, siendo más fuerte sobre la zona montañosa tanto de Norteamérica como de Suramérica.

En cuanto a las diferencias de varianza (Figura 2), se encuentran que ambos modelos tienden a reproducirlas muy bien, incrementándose ligeramente los puntos de no significativos según la prueba-F, para ambos modelos respecto a la diferencia de me-

días con el t-test. Solamente se encuentra que el CSIRO-Mk3.6 presenta un fuerte núcleo en el nororiente de Brasil.

El análisis de los principales patrones de variabilidad para los datos de la SLP en superficie para la zona de estudio corresponde al reanálisis del NCEP y el modelo CCSM4 (Figura 3). Se encuentra que los tres primeros componentes sintetizan el 50% de la varianza total para el NCEP y 59% del CCSM4, encontrándose que el primer REOF del NCEP, es el que tiene la varianza más alta, por lo tanto, la mayor capacidad explicativa de los datos con 27.1%, presentando un centro de correlaciones positiva muy fuerte en el centro del Pacífico, asociado con el fenómeno ENSO. También se encuentra que el segundo REOF el cual explica en un 13.6% de la variabilidad total, presenta fuertes patrones de carga positivas centrados en la Amazonia y el sur del Atlántico. El tercer REOF también presenta un fuerte núcleo de correlación positiva pero esta vez ubicado en el Atlántico norte con una variabilidad total explicada del 10.5%.

Un patrón similar presenta el CCSM4, el cual al correlacionar los REOFs1, REOFs2 y REOFs3 de este modelo, con los REOFs del NCEP, mostraron fuertes valores correlaciones de 0.96, 0.93 y 0.96, respectivamente (Figura 3, Tabla 2), lo cual indica que el modelo tiende a representar de manera razonable los patrones más razonables de la SLP en el norte de Suramérica.

En la Figura 4 se presenta la comparación de la distribución espacial de los campos medios de temperaturas en la superficie del mar en grados Celsius (°C) de los modelos MIROC5 y GISS-E2-H, respecto al HadI. Se observa que ambos modelos sobreestiman toda la costa pacífica de América a excepción del GISS-E2-H que tiende a subestimarla en el occidente de Centroamérica hasta México. En general ambos modelos representan muy bien los campos medios de la SST, con ligeras subestimación de los datos en todo el Atlántico y al extremo occidental del Pacífico. También es posible evidenciar

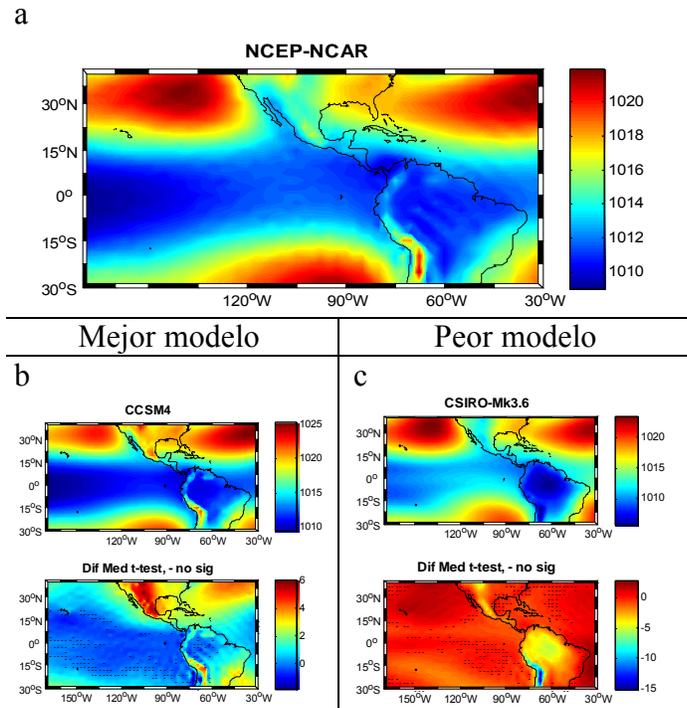


Figura 1. Campos medios de la SLP en hPa, mensual para el período entre 1950 y 2005 para los datos: a) reanálisis NCEP; b) modelo CCSM4; c) modelo CSIRO-Mk3.6. Las áreas donde las diferencias no son significativas al 95%, están marcadas por -.

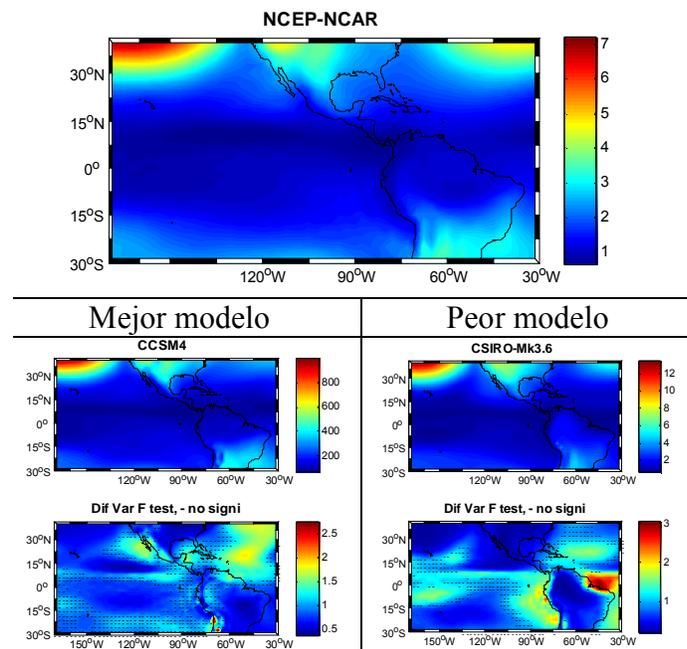


Figura 2. Desviaciones típicas y diferencia de varianza de la SLP, mensual para el período entre 1950 y 2005 para los datos: a) reanálisis NCEP; b) modelo CCSM4; c) modelo CSIRO-Mk3.6. Las áreas donde las diferencias no son significativas al 95%, están marcadas por -.

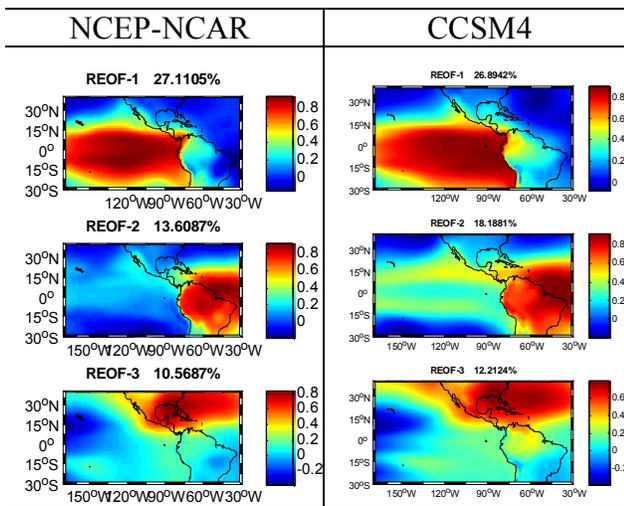


Figura 3. Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs) para la SLP del área de estudio, correspondiente al período entre 1950 y 2005. a) reanálisis NCEP; b) modelo CCSM4.

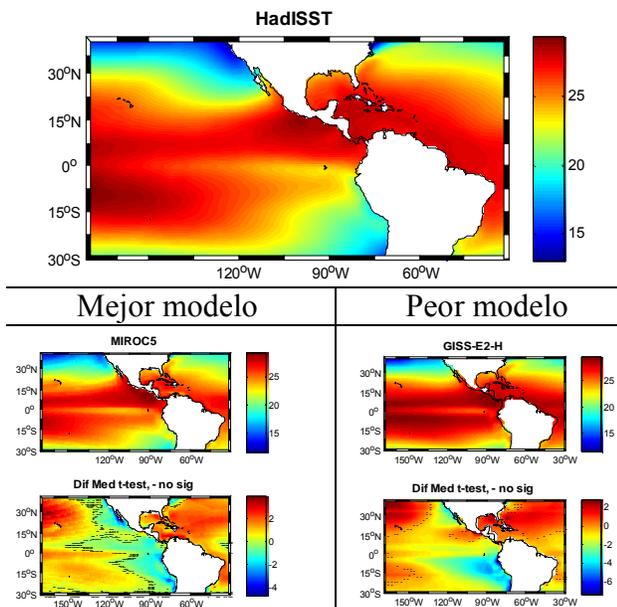


Figura 4. Campos medios de la SST en °C, a nivel mensual para el período entre 1950 y 2005 para los datos: a) reanálisis NCEP; b) modelo CCSM4; c) modelo CSIRO-Mk3.6. Las áreas donde las diferencias no son significativas al 95%, están marcadas por -.

que pocos fueron los puntos de grilla, puntos que no cumplieron el test de significancia al 95% del t-test.

Se encuentran que ambos modelos representan muy bien la reproducción de las desviaciones estándar del

HadISST, con muy pocos puntos de grillas no significativos al aplicar el F-test. Ambos modelos presentan zonas aisladas en donde llegan a aparecer diferencias significativas en las varianzas, siendo más frecuentes estos en el GISS-E2-H (Figura 5).

Cerca del 42% y 43% de la varianza total es explicada por los 3 primeros modos de variabilidad de la SST para el HadISST y el MIROC5 respectivamente (Figura 6). El primer modo, REOF-1, es similar para ambas explicando un 20.9% para el HadISST y ligeramente mayor para el MIROC5 (23.7%) de la varianza total, representando nuevamente al ENSO. Por otro lado, los REOFs 2 y 3 tanto del HadISST como del MIROC5, aún estén intercambiados, es claro que ambos representa un núcleo de correlación muy fuerte en Atlántico central, como otro núcleo, en el noroccidente del Pacífico. De manera general se puede decir que todos los modelos representan muy bien los modos de variabilidad asociados con el fenómeno ENOS, siendo este el modo más significativo (Tabla 3), mientras que los otros fenómenos tienden a intercalarse.

Conclusiones

Los modelos climáticos se han evaluado en general, centrándose en la capacidad de representar los valores medios mensuales de datos observacionales o bien reanálisis, lo cual es un trabajo necesario que nos permite aumentar la confianza en las proyecciones futuras del cambio climático.

Los resultados mostraron que los modelos reproducen razonablemente bien los campos medios de la SLP y la SST, si bien algunos modelos como el CCSM4 tiende a mostrar patrones más zonales de la SLP, reforzando las altas subtropicales. En cuanto a los resultados obtenidos por el PCA, todos los modelos reproducen los principales modos de variabilidad asociados con el ENSO y el Atlántico tropical, si bien muchos de ellos tienden a sobrestimar la varianza asociada con el primer modo.

Tabla 2. Correlaciones espaciales de los EOFs y los REOFs de los datos mensuales de SLP del NCEP con los EOFs y los REOFs de los modelos, para el período comprendido entre 1950-2005.

Modelo	NCEP(SLP)			NCEP(SLP)		
	EOF1	EOF2	EOF3	REOF1	REOF2	REOF3
CCSM4	0,85	0,86	-0,84	0,96	0,93	0,96
CSIRO-Mk3.6	0,93	-0,80	0,65	0,94	0,87	0,89
HadGEM2-AO	0,84	0,98	0,84	0,97	0,91	0,84
MIROC5	0,95	0,96	0,72	0,95	0,94	-0,89
GISS-E2-H	0,82	0,82	0,82	0,93	0,92	0,93
MPI-ESM-LR	0,94	0,93	-0,86	0,93	0,97	0,92

Tabla 3. Correlaciones espaciales de los EOFs y los REOFs de los datos mensuales de SST del HadI con los EOFs y los REOFs de los modelos, para el período comprendido entre 1950-2005.

Modelos	HadI (SST)			HadI(SST)		
	EOF1	EOF2	EOF3	REOF1	REOF2	REOF3
CCSM4	0,93	0,65	0,77	0,95	0,67	-0,81
CSIRO-Mk3.6	0,93	0,86	-0,80	0,95	0,89	0,89
HadGEM2-AO	0,91	-0,58	-0,82	0,92	0,75	0,85
MIROC5	0,91	0,80	-0,77	0,92	0,81	0,81
GISS-E2-H	0,85	0,61	0,50	0,89	0,59	-0,84
MPI-ESM-LR	0,87	0,85	0,64	0,92	0,83	0,76

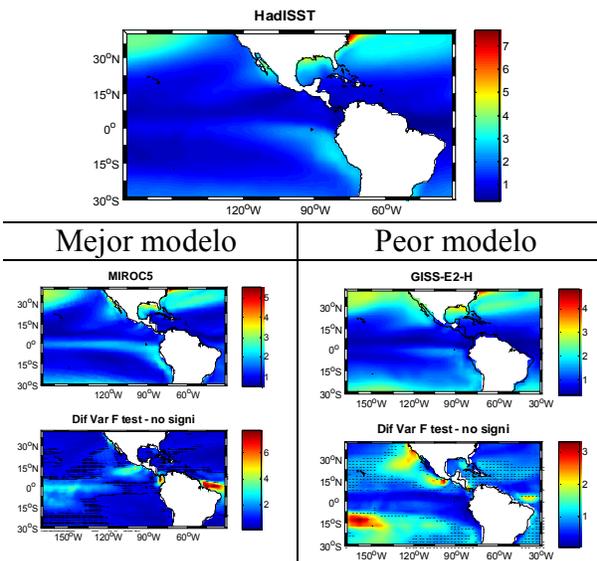


Figura 5. Desviaciones típicas y diferencia de varianza de la SST, mensual para el período entre 1950 y 2005 para los datos: a) HadISST; b) modelo MIROC5; c) modelo GISS-E2-H. Las áreas donde las diferencias no son significativas al 95%, están marcadas por -.

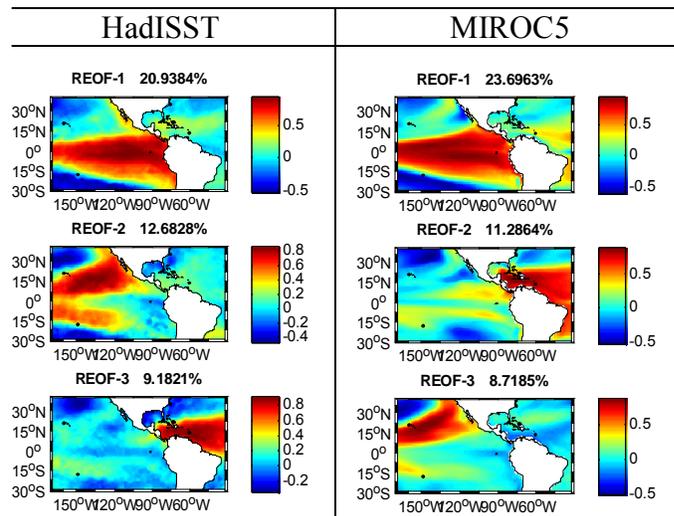


Figura 6. Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs) para la SST del área de estudio, correspondiente al período entre 1950 y 2005. Del HadISST; b) modelo CCSM4.

Literatura citada

- Chen D, Cane MA, Kaplan A, Zebiak SE, Huang D. 2004. Predictability of El Niño in the past 148 years. *Nature*. 428: 733-6.
- Fukuoka A. 1951. A study of 10-day forecast (A Synthetic Report). *Geophysical Magazine*. XXII: 177-218.
- Gent PR, Danabasoglu G, Donner LJ, Holland MM, Hunke EC, Jayne SR, et al. 2011. The Community Climate System Model Version 4. *J Climate*. 24: 4973-91. URL <http://dx.doi.org/10.1175/2011JCLI4083.1>
- Giorgetta MA, Jungclaus JH, Reick CH, Legutke S, Bader J, Böttinger M, et al. 2013. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *J Adv Model Earth Syst*. 5 (3): 572-97.
- Hibbard KA, Meehl GA, Cox P, Friedlingstein P. 2007. A strategy for climate change stabilization experiments. *EOS*. 88: 217-21.
- Jolliffe IT, Uddin M, Vines SK. 2002. Simplified EOFs—three alternatives to retain. *Climate Res*. 20: 271-9.
- Jones CD, Hughes JK, Bellouin N, Hardiman SC, Jones GS, Knight J, et al. 2011. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geosci Model Dev*. 4: 543-70. doi:10.5194/gmd-4-543
- Kim D, Sobel AH, Del Genio AD, Chen Y, Camargo S, Yao M-S, et al. 2012. The tropical subseasonal variability simulated in the NASA GISS general circulation model. *J Clim*. 25: 4641-59. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00447.1>
- Lorenz EN. 1956. *Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction*. Technical report, Statistical Forecast Project Report 1, Dep of Meteor, MIT. p. 49.
- Meehl GA, Hibbard KA. 2007. *A strategy for climate change stabilization experiments with AOGCMs and ESMs*. WCRP Informal Report N° 3/2007, ICPO Publication N° 112, IGBP Report N° 57. Geneva: World Climate Research Programme; 35 pp.
- Obukhov AM. 1947. Statistically homogeneous fields on a sphere. *Uspethi Matematicheskikh Nauk*. 2: 196-8.
- Obukhov AM. 1960. The statistically orthogonal expansion of empirical functions. *Bull Acad Sci USSR Geophys Ser*. (English Transl.), 288-91.
- Pabón J, Eslava J, Gómez R. 2001. Características de gran escala del clima de la América Tropical. *Meteorol Colomb*. 4: 47-53.
- Redmond KT, Koch RW. 1991. Surface climate and stream-flow variability in the western United States and their relationship to large-scale circulation indices. *Water Resour Res*. 27: 2381-99.
- Rotstayn LD, Collier MA, Dix MR, Feng Y, Gordon HB, O'Farrell SP, et al. 2010. Improved simulation of Australian climate and ENSO-related rainfall variability in a global climate model with an interactive aerosol treatment. *Intern J Climatol*. 30: 1067-88. doi:10.1002/joc.1952
- Poveda G. 2004. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev Acad Colomb Cien*. 28 (107): 201-22.
- Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA. 2009 An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull Am Meteor Soc*. 93: 485-98. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- Watanabe M, Suzuki T, O'ishi R, Komuro Y, Watanabe S, Emori S, et al. 2010. Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *J Climate*. 23: 6312-35. doi:10.1175/2010JCLI3679.1