

***EVALUACIÓN DE LAS SIMULACIONES DE PRECIPITACIÓN Y
TEMPERATURA DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES DEL
PROYECTO CMIP5 CON EL CLIMA PRESENTE EN COLOMBIA.***

Andrea Onelia Rodríguez Roa
Meteoróloga, MSc.

RESUMEN

En este trabajo fueron evaluadas las salidas de precipitación y temperatura en superficie, medias anuales y trimestrales del conjunto de datos WCRP-CMIP5, de las nuevas generaciones de los 20 modelos utilizados en el AR4-IPCC frente a los datos de los proyectos CPC Merged Analysis of Precipitation (CMAP) y reanálisis ERA40, con el objetivo de analizar la capacidad de los Modelos Climáticos Globales para representar el clima actual de la región de Colombia y explorar si existe alguna mejora en esta nuevas generaciones. Para este estudio se realizó la comparación de las salidas de los modelos utilizando diferentes métricas, entre las que se encuentra la correlación, el bias, el error cuadrático medio (RMSE) y el error cuadrático medio corregido (RMSE-corr). Así como también los diagramas de Taylor, la distribución espacial y la representación del ciclo anual. Algunos modelos que se destacan en la evaluación están el CCSM4, MPI-ESM-LR, HadCM3 Y CNR-CM5. Se muestra la mejora de varios modelos del CMIP3 al CMIP5, mas no existe una relación clara entre la resolución del modelo y la capacidad del mismo.

PALABRAS CLAVE: Modelos Climáticos Globales, CMIP5, Evaluación, Colombia.

ABSTRACT

In this paper has been assessed the mean annual and seasonal rainfall and surface temperature outputs from WCRP-CMIP5 data over 20 Global Climate Models (GCMs) new generations used in the AR4-IPCC compared with CPC Merged Analysis of Precipitation (CMAP) data and ERA40 re-analysis, in order to test the GCM's skill for Colombia present climate and to explore if there was any improvement in these new generations. For this study was made the comparison among the models outputs using different statistical metric ssuch as correlation, bias and root mean square error, aswell as Taylor Diagram, spatial distribution and seasonality. In Colombia, some models showed good improvement from CMIP3 to CMIP5 data in the assessments such as CCSM4, MPI-ESM-LR, HadCM3 Y CNR-CM5; however it does not exist a clear relationship between model resolution and model skill.

KEY WORDS: Global Climate Models, CMIP5, Assess, Colombia.

INTRODUCCIÓN

Los Modelos Climáticos Globales (MCGs) son una representación tridimensional de la circulación general de la atmósfera y corresponden a las herramientas más avanzadas actualmente, disponibles para simular la respuesta del sistema climático global al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero y proporcionar estimaciones del cambio climático futuro (IPCC, 2009). Sin embargo, las simulaciones de los MCGs están sujetas a numerosas incertidumbres, que generan imprecisiones en las proyecciones futuras. Por tanto, para una mayor confianza en la implementación de los MCGs se realiza una evaluación de su desempeño, utilizando herramientas de intercomparación de modelos.

El proyecto CMIP5 corresponde a la quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Climáticos del Programa World Climate Research (WCRPs) y produce el estado del arte del conjunto de datos multimodelo diseñado para avanzar en el conocimiento de la variabilidad climática y el cambio climático. CMIP5 incluye simulaciones a largo plazo del clima del siglo XX y proyecciones para el siglo XXI y más allá; además de simulaciones a corto plazo centradas en las últimas décadas y el futuro hasta el año 2035. CMIP5 recoge un conjunto amplio de salidas modeladas y esta disponible libremente a investigadores a través de un archivo de datos integrados (Taylor, y otros, 2012) y será parte del quinto informe de evaluación (AR5) del IPCC.

Recientemente en el mundo se presentan los primeros análisis realizados a partir de investigaciones que utilizan la base de datos de CMIP5, enfocados tanto a su evaluación como en la generación de proyecciones de cambio en las variables como temperatura y precipitación. Para la región de Sudamérica por ejemplo, se comparó la habilidad de dos conjuntos de MCGs derivados de los proyectos de intercomparación CMIP3 y CMIP5 para representar los campos medios de precipitación de verano, invierno y anual, en Sudamérica al sur del Ecuador para el período 1960-1999. Entre los resultados más relevantes se manifiesta que la nueva generación de modelos climáticos muestra importantes mejoras, disminuyendo los porcentajes de subestimación, no así los de sobreestimación (Gulizia, y otros, 2012).

En otro estudio para el Sudeste de Sudamérica (SESA) se realiza una evaluación de la representación de la media y la variabilidad de la precipitación del verano (Diciembre-Enero-Febrero, DJF) por las simulaciones históricas de 18 modelos de circulación general acoplados del conjunto WCRP/CMIP5. La simulación de la media climatológica de la precipitación de fines del siglo veinte muestra en la

mayoría de los modelos CMIP5 en comparación a las observaciones, desvíos similares a aquellos mostrados por la versión previa de los modelos CMIP3. Los resultados muestran sin embargo mejoras en la representación del patrón principal de variabilidad interanual de la precipitación en el SESA.

Para México se realizaron proyecciones de precipitación para el periodo 2015-2039 (futuro cercano) y 2075-2099 (futuro lejano) utilizando 9 modelos de CMIP5 bajo el escenario RCP6 mediante el método de fiabilidad del ensamble ponderado o REA. Los modelos globales muestran regiones que reciben menos precipitación y otras más, y donde la precipitación tenderá a ser menos frecuente y más intensa (Velázquez, y otros, 2012).

En el Año 2010 el IDEAM realizó una evaluación de las salidas de viento, precipitación y temperatura de 20 modelos del conjunto de datos CMIP3, con el objetivo de analizar la capacidad de los MCGs para representar el clima actual de Colombia y elegir un grupo de modelos con el mejor comportamiento. En el trabajo se desatacó los resultados del modelo ECHAM5 del Max Planck Institute for Meteorology (Alemania) (Rodríguez, 2010).

Siguiendo esta idea el IDEAM pretende, en este estudio, analizar la capacidad de los MCGs para representar el clima presente de Colombia teniendo en cuenta las variables de precipitación y temperatura, con las actuales simulaciones de 20 modelos contenidas en proyecto CMIP5, de los cuales se selecciona un grupo con el mejor comportamiento del clima presente para el país, que serán útiles en la reducción de escala, y permitirán una representación más precisa de los posibles escenarios futuros sobre el territorio Nacional.

DATOS Y ÁREA DE ESTUDIO

Para la evaluación de las variables de temperatura en superficie y precipitación se utilizan las salidas mensuales del periodo 1971-2000 de 20 MCGs (Tabla 1) integrados en la base de datos del proyecto CMIP5, que corresponden a las nuevas generaciones de los modelos utilizados en el AR4-IPCC de la base de CMIP3. Los datos utilizados de CMIP5 corresponden a los experimentos "*historical*" para el clima presente y los datos de referencia de temperatura pertenecen al grupo de datos del reanálisis ERA-40 (ECMWF, 2008), mientras que la precipitación fue tomada del proyecto CPC Merge Analysis of Precipitation - CMAP (NOAA, 2009).

La evaluación se realizó considerando el promedio anual y estacional correspondientes a los trimestres: diciembre, enero, febrero (DJF), marzo, abril,

mayo (MAM), junio, julio, agosto (JJA) y septiembre, octubre, noviembre (SON), y el área considerada fue entre los 32°N a 35°S y 27°W a 107°W (Figura 1). De la misma manera se utiliza para algunos casos de la metodología el área de Colombia específicamente y las áreas de sus cinco regiones naturales.

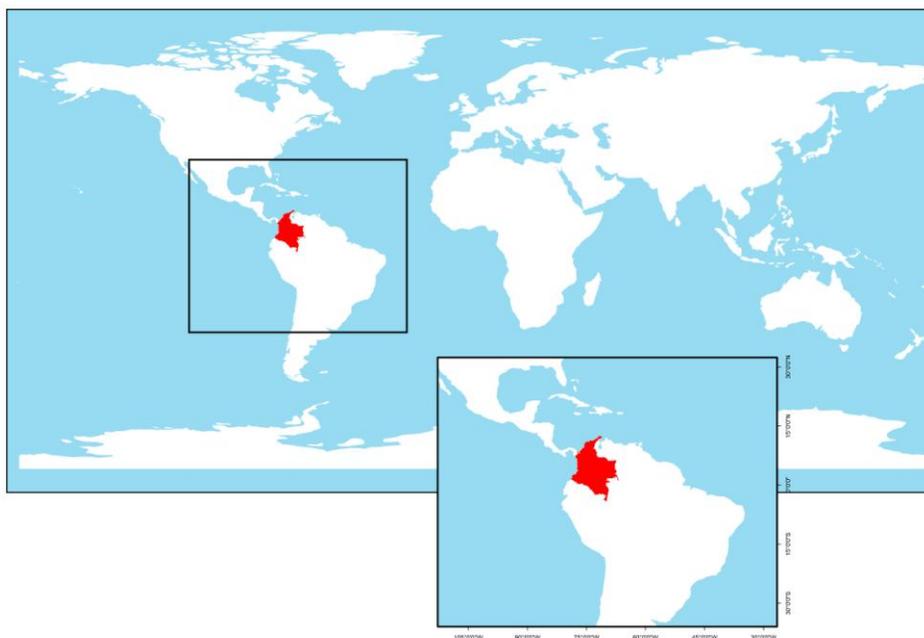


Figura 1. Área de evaluación seleccionada (32°N a 35°S y 27°W a 107°W).

Tabla 1. Modelos utilizados en la evaluación.

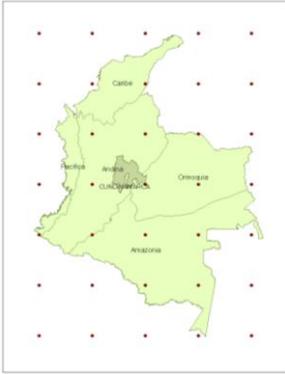
NOMBRE DEL MODELO	INSTITUCIÓN
bcc-csm1-1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration
CanCM4	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis
CCSM4	National Center for Atmospheric Research NCAR
CNR-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancées en Calcul Scientifique
CSIRO-MK3-6-0	CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia), and BOM (Bureau of Meteorology, Australia)
FGOALS-g2	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences
GFDL-CM3 GFDL-ESM2G GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GISS-EH-H GISS-E2-R	NASA Goddard Institute for Space Studies
HadCM3	Met Office Hadley Centre

HadGEM2-CC HadGEM2-ES	
inmcm4	Institute for Numerical Mathematics
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace
MIROC4h MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine- Earth Science and Technology
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute

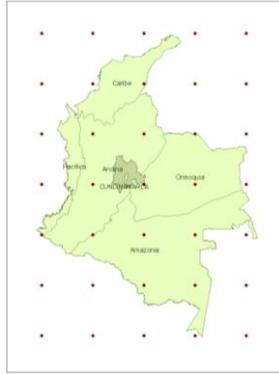
Los datos de referencia están a una resolución de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ y la resolución de las simulaciones de los modelos se pueden identificar en la Tabla 2 y la Figura 2.

Tabla 2. Resolución en grados de los 20 modelos utilizados en la evaluación.

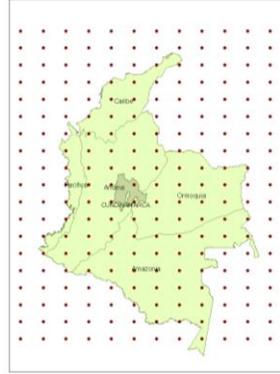
$R < 1,25^\circ$	$1,25^\circ < R < 3$	$3^\circ < R$
CCSM4	CanCM4	HadCM3
MIROC4H	FGOALS-g2	IPSL-CM5A-LR
MRI-CGCM3	GFDL-CM3	
	GFDL-ESM2G	
	GFDL-ESM2M	
	HadGEM2-ES	
	HadGEM2-CC	
	IPSL-CM5A-MR	
	MIROC5	
	MPI-ESM-LR	
	CSIRO-MK3-6-0	
	CNR-CM5	
	Bcc-csm1-1	
	Inmcm4	
	GISS-E2-H	
	GISS-E2-R	



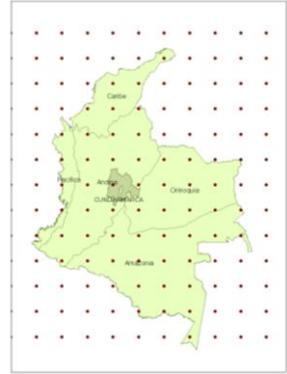
bcc-csm1-1



CanCM4



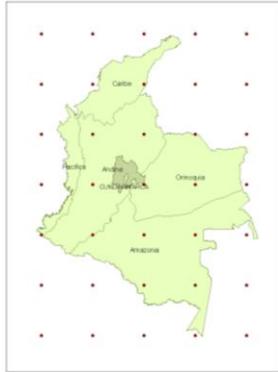
CCSM4



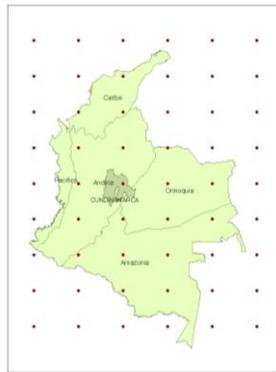
CNR-CM5



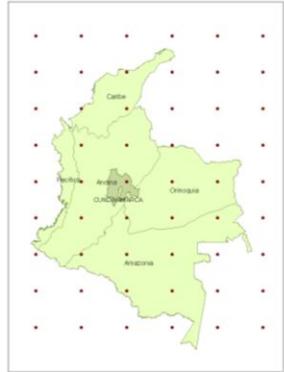
CSIRO-MK3-6-0



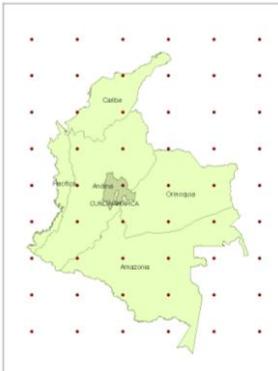
FGOALS-g2



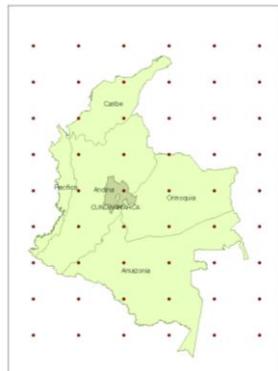
GFDL-CM3



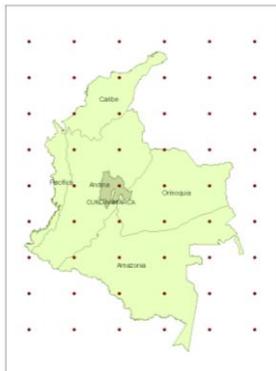
GFDL-ESM2G



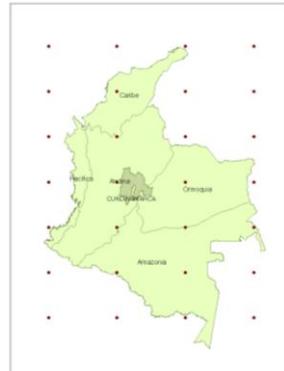
GFDL-ESM2M



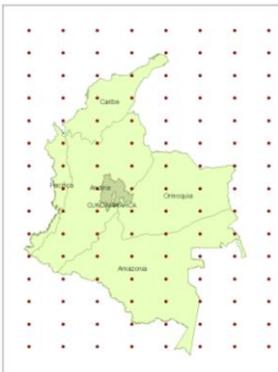
GISS-E2-R



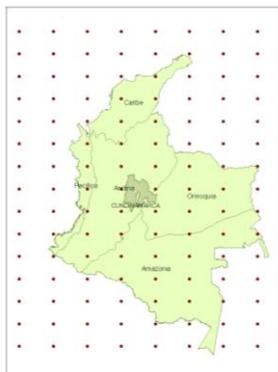
GISS-EH-H



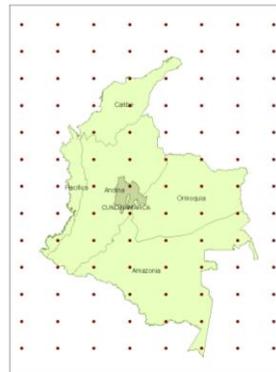
HadCM3



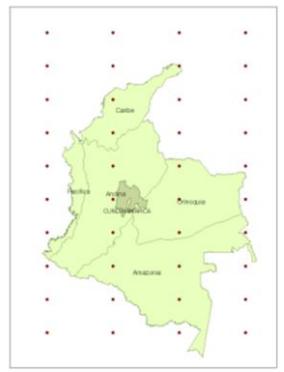
HadGEM2-CC



HadGEM2-ES



inmcm4



IPSL-CM5A-LR

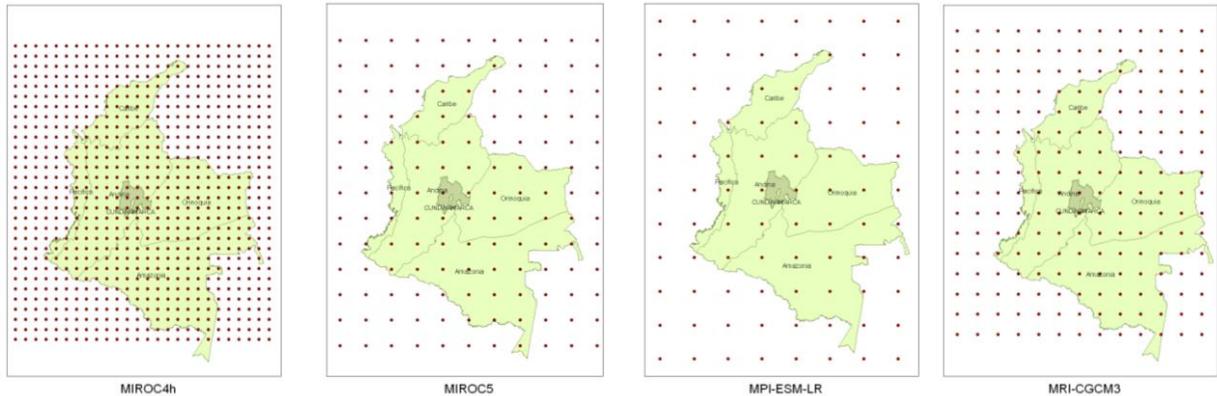


Figura 2. Distribución de los punto de rejilla de los 20 modelos utilizados en la evaluación.

METODOLOGÍA

En el conocimiento de la confiabilidad de los MCGs se debe cuantificar objetivamente el acuerdo entre los modelos y los datos de referencia u observaciones, utilizando diferentes métricas o estadísticos, que corresponden a cantidades escalares que de forma objetiva miden la calidad de la simulación del modelo.

Aunque la necesidad de determinar ciertas métricas se ha experimentado en la comunidad de modelización hasta la actualidad, no se ha desarrollado ningún protocolo de evaluación. La mayoría de estudios científicos donde se cuantifica el análisis se selecciona la implementación de estadísticos simples como el error cuadrático medio, el error absoluto medio o el sesgo, entre otros.

Para el caso del presente trabajo se ha optado por emplear la correlación (CORRE), raíz del error cuadrático medio (RMSE), sesgo (BIAS) y raíz del error cuadrático medio corregido (RMSE_C), haciendo una clasificación de los modelos con los resultados de estos estadísticos mediante un código terciario tipo semáforo, en el cual el color verde representa la clasificación del modelo en un nivel superior, el amarillo en medio y el rojo en inferior, con respecto a los demás.

Diagrama de Taylor

El diagrama de Taylor se utiliza para mostrar la calidad de las predicciones del modelo, con respecto a los valores de referencia. La similitud entre dos parámetros se cuantifica en términos de su correlación, el error cuadrático medio (RMSE) y la amplitud de sus variaciones, que es representada por su desviación estándar. Estos diagramas son especialmente útiles en la medición de la habilidad

relativa de muchos modelos. En el diagrama los modelos ubicados próximos al punto señalado como “observado” corresponden a los modelos que mejor acuerdan con la referencia (Taylor, 2001).

Distribución Espacial

Se grafica la distribución espacial de cada una de las series de datos promediados de las diferentes variables consideradas de tal manera que se compare la climatología observada o de referencia frente a los promedios simulados por los modelos en cada punto de rejilla.

Representación del ciclo anual

Se grafica el ciclo anual medio promediando los datos mensuales tanto para los observados como para las simulaciones, de tal manera que se puedan comparar el comportamiento de las fluctuaciones de esta variable sobre el curso del año, para el territorio nacional, como para las cinco regiones naturales de Colombia.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Evaluación de las Simulaciones de Precipitación

A continuación en la Figura 3 se visualizan los mapas de la distribución espacial de la precipitación anual para los datos de referencia CMAP y las simulaciones de las nuevas generaciones de los 20 modelos globales de CMIP5. Las observaciones muestran la distribución característica de las lluvias en Colombia, en el que de forma general se presentan las menores lluvias para la zona de la Guajira y valores altos para la amazonia y máximos en la región pacífica. En su mayoría los modelos tienen a simular las altas precipitaciones hacia el pacífico pero no en la amazonia y algunos modelos sobrestiman altamente la lluvia hacia la parte norte del país.

Más aun es difícil decidir mediante los mapas de distribución de la precipitación cuales modelos son los más representativos, por tanto se puede identificar mediante la clasificación de los modelos de acuerdo a la Tabla 3. En ésta se observa que el CCSM4 (NCAR-USA), CNR-CM5 (Francia), MPI-ESM-LR (Alemania), HadCM3 (UK), CanCM4 (Canadá) y FGOALS-g2 (China) sobresalen frente al total de los modelos, mientras que entre los menos representativos están GISS-ER-R y GISS-ER-H de la NASA o los HadGEM2-CC y HadGEM2-ES de UK.

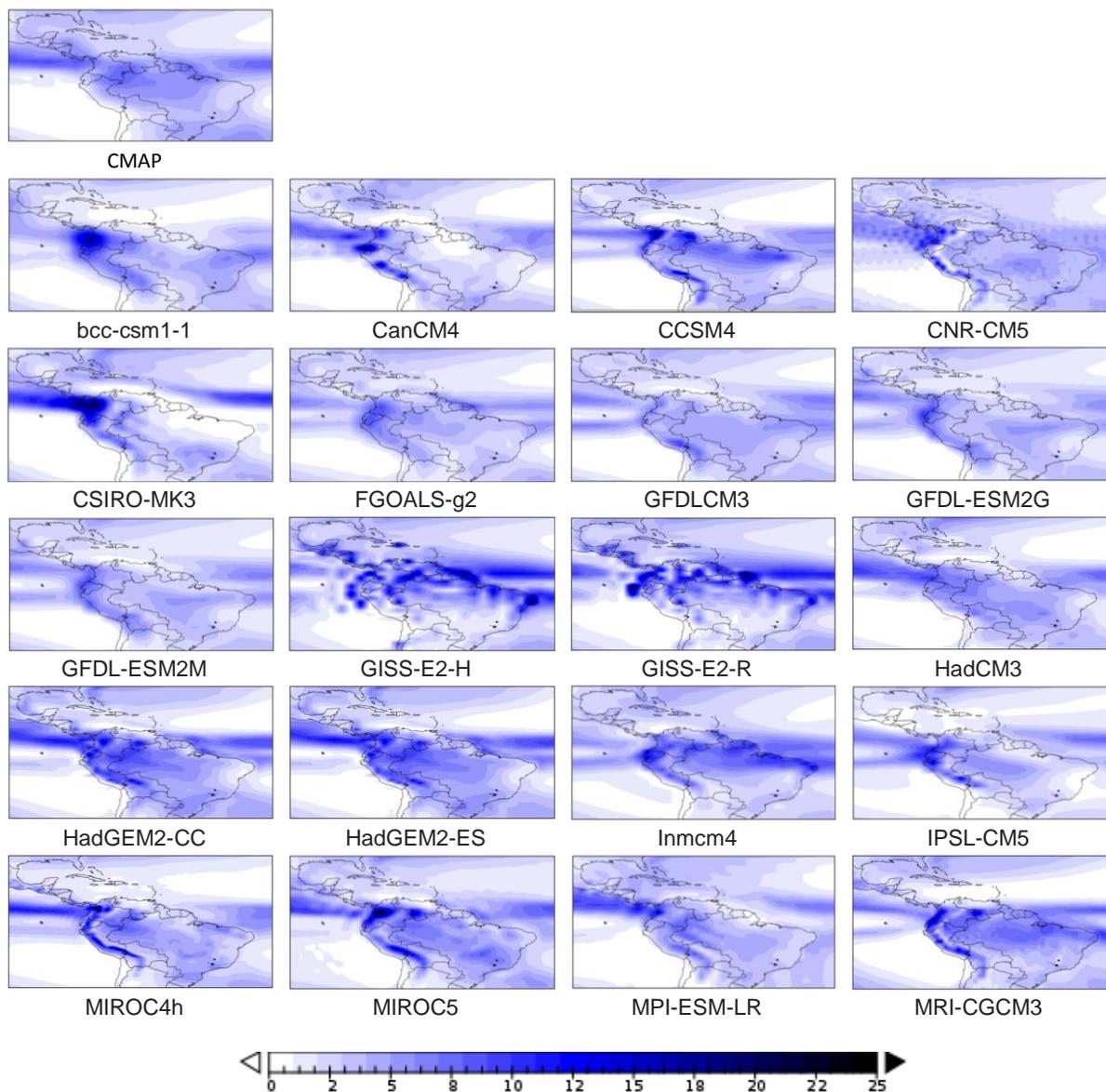


Figura 3. Distribución espacial de la precipitación anual del periodo 1971-2000 en el área de evaluación de los datos de la NOAA y las simulaciones de 20 MCGs del CMIP5.

Tabla 3. clasificación de los modelos mediante los errores de los campos medios de la distribución de la precipitación anual.

MODELO	CORRE	RMSE	BIAS	RMES_CORR
bcc-csm1-1	20	6	2	6
CanCM4	14	4	1	8
CCSM4	8	8	4	9
CNR-CM5	7	7	12	5
CSIRO-MK3-6-0	17	14	8	20
FGOALS-g2	10	1	3	1
GFDL-CM3	11	5	10	4
GFDL-ESM2G	15	2	5	2
GFDL-ESM2M	16	3	6	3
GISS-E2-R	13	19	19	18
GISS-EH-H	19	20	20	19
HadCM3	4	11	9	11
HadGEM2-CC	3	16	18	15
HadGEM2-ES	1	17	16	16
inmcm4	18	12	13	12
IPSL-CM5A-LR	2	18	17	17
MIROC4h	9	10	7	10
MIROC5	5	15	15	14
MPI-ESM-LR	6	9	11	7
MRI-CGCM3	12	13	14	13

En cuanto a la distribución espacial de la precipitación a nivel estacional se observa que los modelos más cercanos a la referencia varían de acuerdo al trimestre que se esté evaluando (Tabla 4). En general para los modelos, las mayores correlaciones y menores errores en la simulación de la precipitación se dan en el trimestre de JJA y en segundo lugar para SON. Las más bajas correlaciones y altos errores se dan para DJF.

Sobresalen para todo los meses los modelos HadCM3 (UK), CNR-CM5, FGOALS-g2, MPI-ESM-LR y el CCSM4. Las salidas del modelo FGOALS-g2 muestra una mejora con respecto a los resultados obtenidos en la evaluación de datos CMIP3, en la cual se ubicaba entre los modelos menos confiables.

Tabla 4. clasificación de los modelos mediante los errores de los campos medios de la distribución de la precipitación a nivel estacional.

MODELO	DJF				MAM				JJA				SON			
	CORRE	RMSE	BIAS	RMS_E_CORR	CORRE	RMSE	BIAS	RMSE_CORR	CORRE	RMSE	BIAS	RMSE_CORR	CORRE	RMSE	BIAS	RMSE_CORR
bcc-csm1-1	14	2	4	3	20	7	4	10	17	5	8	7	15	5	6	4
CanCM4	20	3	1	13	9	5	2	5	7	9	1	9	18	3	2	9
CCSM4	5	13	7	15	8	11	6	15	12	7	6	8	8	10	10	11
CNR-CM5	10	6	14	2	14	3	13	1	2	8	14	6	3	8	14	3
CSIRO-MK3-6-0	19	8	3	11	16	9	5	11	14	19	12	20	12	17	9	20
FGOALS-g2	6	1	6	1	6	1	8	2	16	1	4	1	9	2	7	1
GFDL-CM3	11	10	12	7	19	13	11	17	1	4	9	4	4	4	5	6
GFDL-ESM2G	9	11	11	8	15	12	10	9	9	3	7	5	14	6	3	7
GFDL-ESM2M	12	7	10	5	18	10	12	7	10	2	2	2	11	7	4	8
GISS-EH-H	13	19	19	14	7	19	19	20	18	15	19	14	19	18	20	12
GISS-E2-R	18	20	20	16	13	20	20	19	19	14	20	13	13	16	19	10
HadCM3	1	12	8	12	1	4	3	4	3	12	10	12	6	12	11	14
HadGEM2-CC	3	16	16	17	5	16	17	12	5	18	18	18	5	19	18	18
HadGEM2-ES	2	17	17	19	4	15	16	14	4	20	17	19	2	20	17	19
inmcm4	15	14	15	6	10	14	15	16	20	6	13	3	20	9	13	5
IPSL-CM5A-LR	17	5	2	10	17	6	1	8	13	11	5	11	17	1	1	2
MIROC4h	8	9	9	9	3	8	9	6	15	10	3	10	10	11	8	16
MIROC5	4	18	18	20	2	17	18	13	8	16	15	16	7	14	16	15
MPI-ESM-LR	7	4	5	4	11	2	7	3	6	13	11	15	1	13	12	13
MRI-CGCM3	16	15	13	18	12	18	14	18	11	17	16	17	16	15	15	17

En los diagramas de Taylor (Figura 4 y Figura 5) se pueden destacar los modelos MPI-ESM-LR, HadCM3, MIROC4h, CNR-CM5 y el FGOALS-g2, tanto a nivel anual como estacional. En donde el MPI-ESM-LR y HadCM3 se aproximan un poco más a la variación de la precipitación. Entre tanto las simulaciones de los modelos CSIRO-MK3-6-0, GISS-E2-H y GISS-E2-R se encuentran muy alejadas de lo observado para los cinco casos.

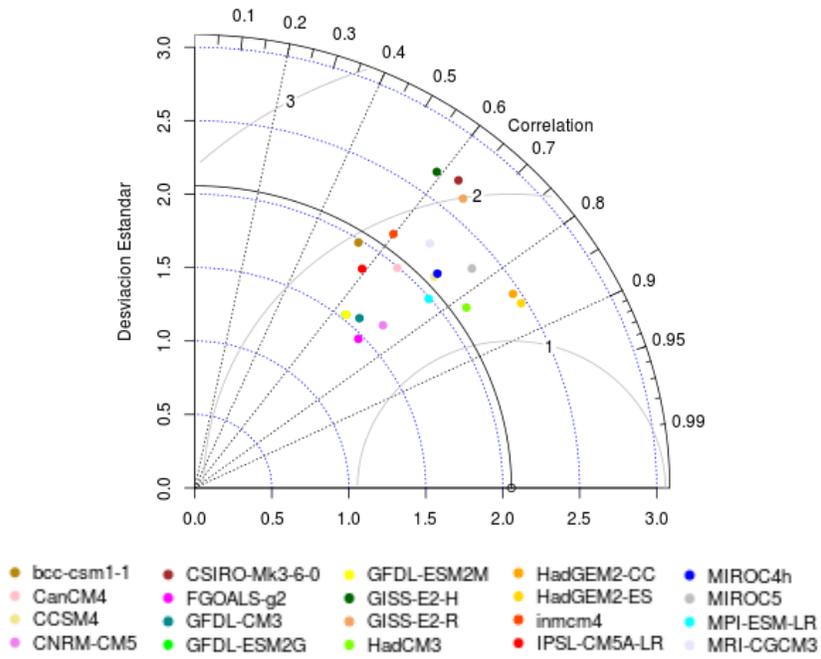
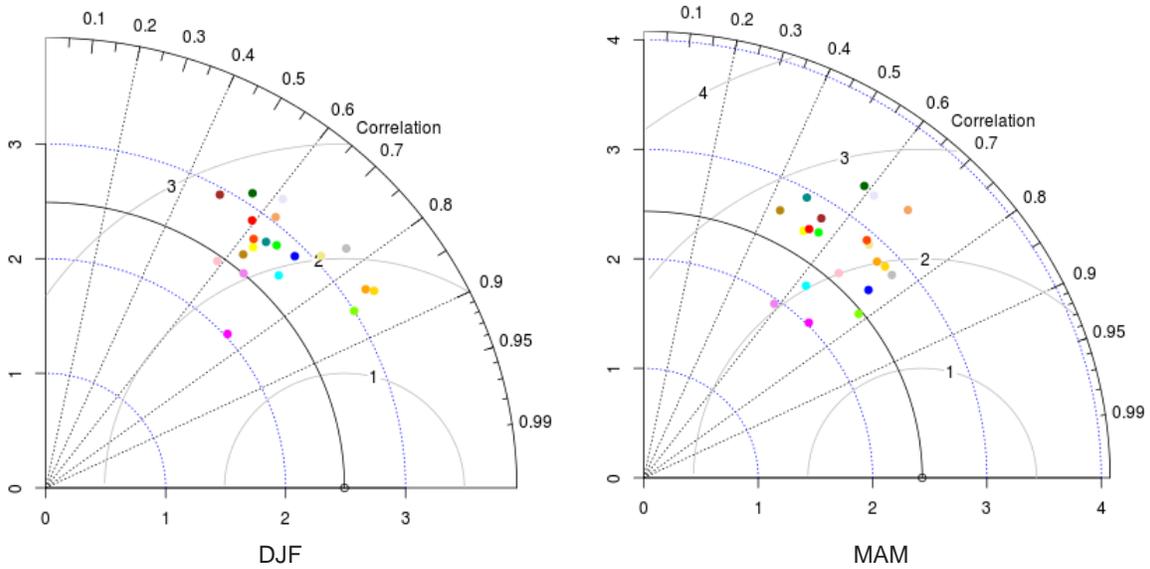


Figura 4. Diagramas de Taylor anual para la precipitación del periodo 1971-2000



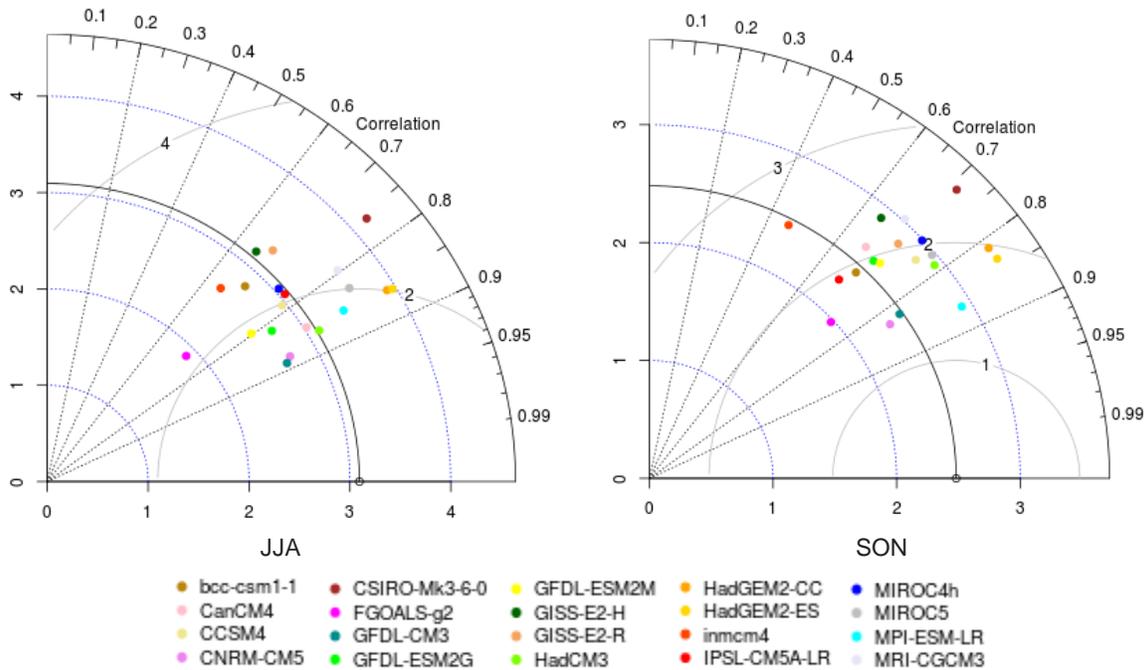


Figura 5. Diagramas de Taylor para la precipitación del periodo 1971-2000 a nivel estacional correspondientes a los trimestres DJF, MAM, JJA y SON

En cuanto al ciclo anual, en la Figura 6 se muestra la representación para la referencia y los veinte modelos, del promedio sobre todos los puntos de rejilla del área de Colombia. CMAP muestra dos máximos de precipitación en mayo y octubre que están relacionados con las dos temporadas de lluvia que se dan en gran parte del territorio del país como causa del doble paso de la ZCIT. Los modelos tienden a representar efectivamente una bimodalidad, pero algunos indican los máximos con un anticipo o un atraso. En los casos del HadGEM-CC o el HadGEM-ES las simulaciones solo muestran un pico de la precipitación en el año.

En la evaluación del ciclo anual con el proyecto CMIP3 los modelos igualmente tendían a representar esta bimodalidad, pero en su gran mayoría los modelos presentaban una subestimación considerable en su ciclo del año (Rodríguez, 2010). En la actual representación con las salidas de CMIP5 se observa que los valores son más cercanos, con menos infraestimación, en comparación con CMIP3, lo que significaría que evidentemente los modelos están siendo más eficientes en la representación de este tipo de variabilidad.

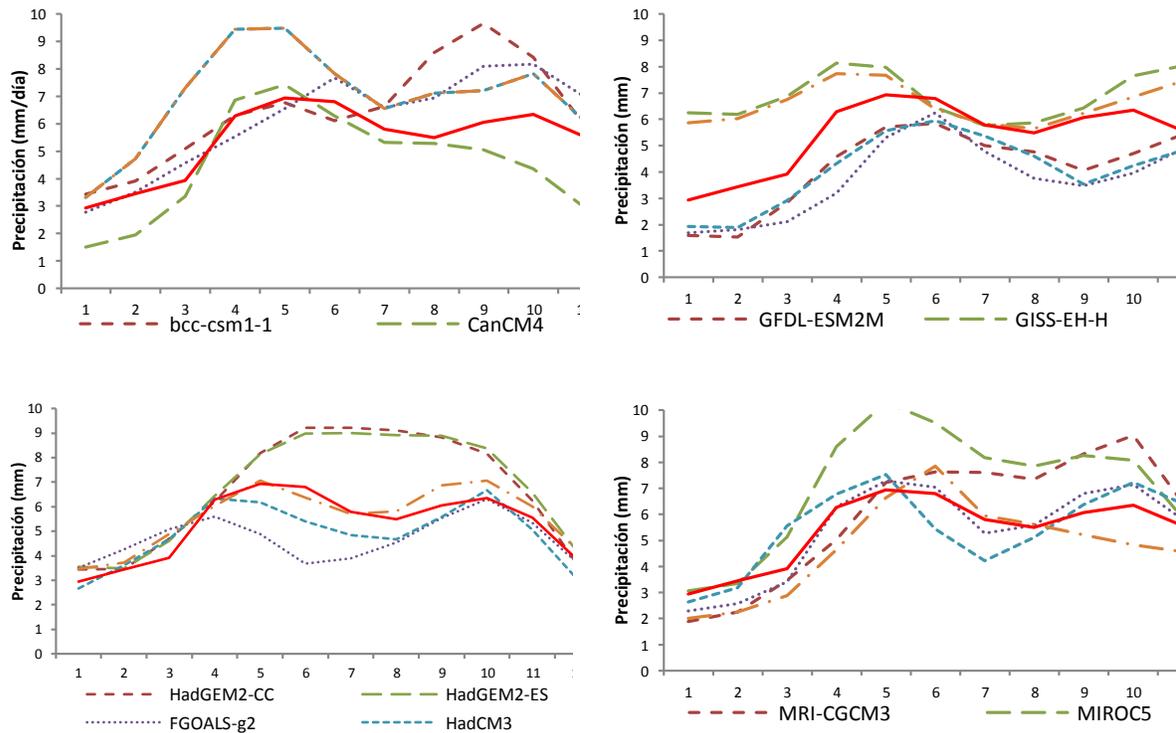


Figura 6. Ciclo anual de precipitación promediada sobre todos los puntos de rejilla en el área de Colombia. El ciclo marcado en color rojo corresponde a los valores de referencia CMAP y las restantes a los modelos.

Como todo el territorio Colombiano no tiene un ciclo anual de precipitaciones, representado por dos máximos, si no que en ciertas zonas solo existe uno, es importante revisar la representación del ciclo anual por cada región del país. En la Figura 7 a la Figura 11 se representan los ciclos anuales promediados de la precipitación de los puntos de rejilla contenidos en cada región natural de país.

En las zonas donde la referencia representa un ciclo bimodal como en la Amazonia, el Pacífico, el Caribe y la región Andina, en general los modelos lo simulan de la misma manera, exceptuando algunos casos evidentes como el HadGEM-CC y el HadGEM-ES en la región andina y Caribe que muestra solo un máximo de precipitación. En el caso de la Orinoquia donde el comportamiento es tipo monomodal y en la cual las simulaciones de los modelos del proyecto CMIP3 tendían a mantener un comportamiento bimodal, se observa para este nuevo conjunto de datos CMIP5 que el número de modelos que mantienen este régimen de precipitación es menor.

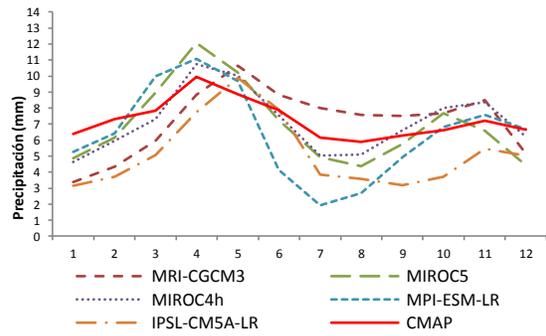
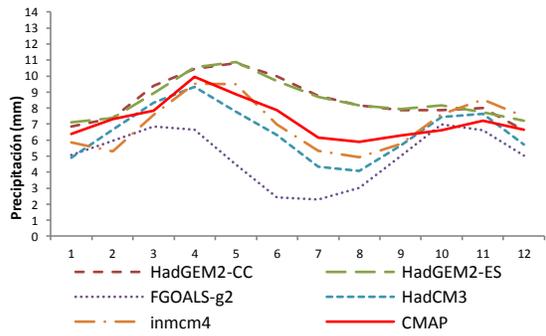
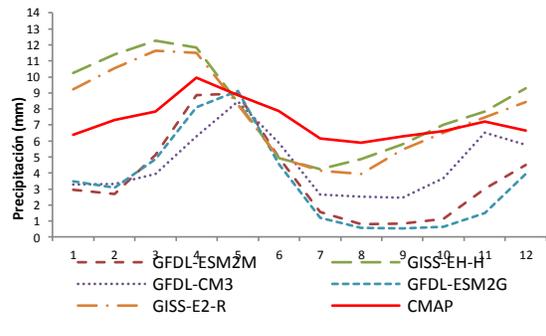
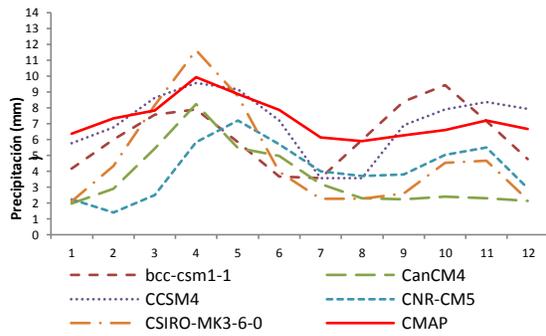
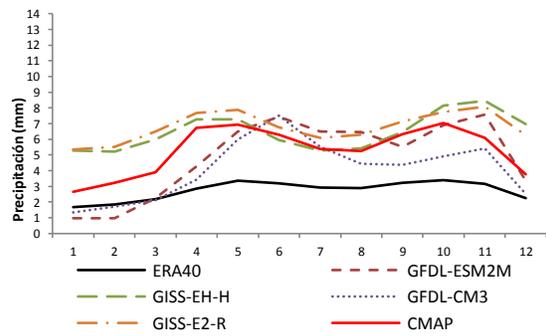
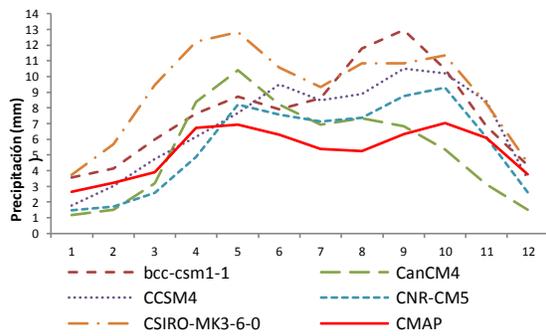


Figura 7. Ciclo anual de precipitación promediada sobre todos los puntos de rejilla en el área de la región Amazónica.



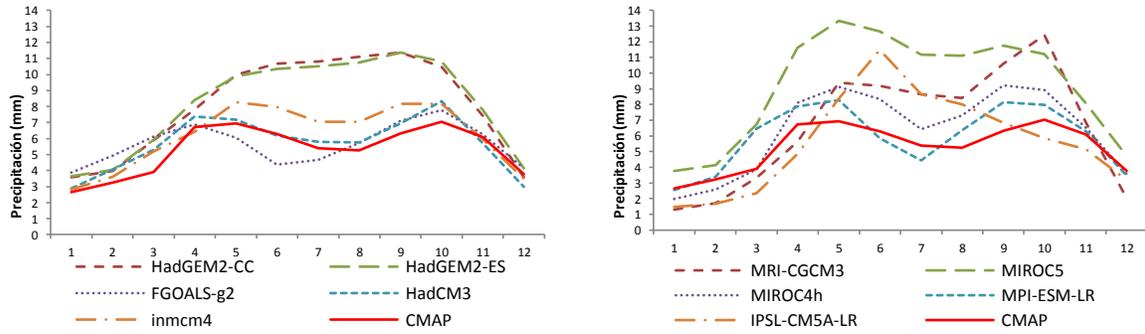


Figura 8. Ciclo anual de precipitación promediada sobre todos los puntos de rejilla en el área de la región Andina.

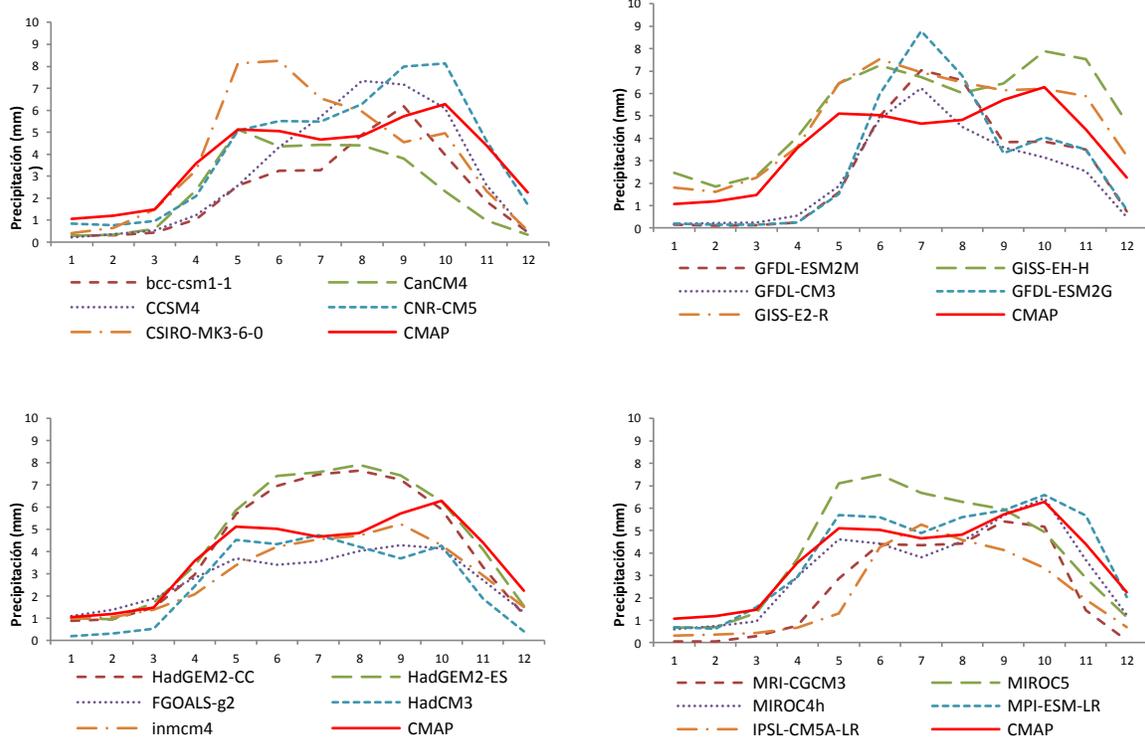


Figura 9. Ciclo anual de precipitación promediada sobre todos los puntos de rejilla en el área de la región Caribe.

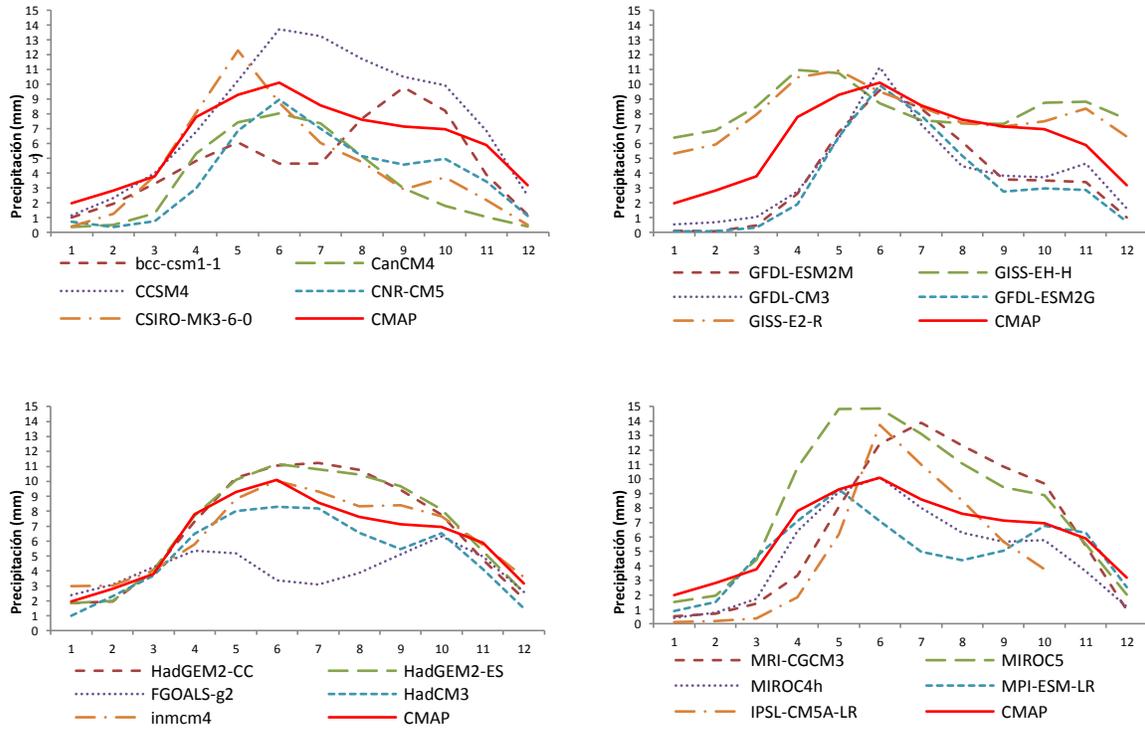
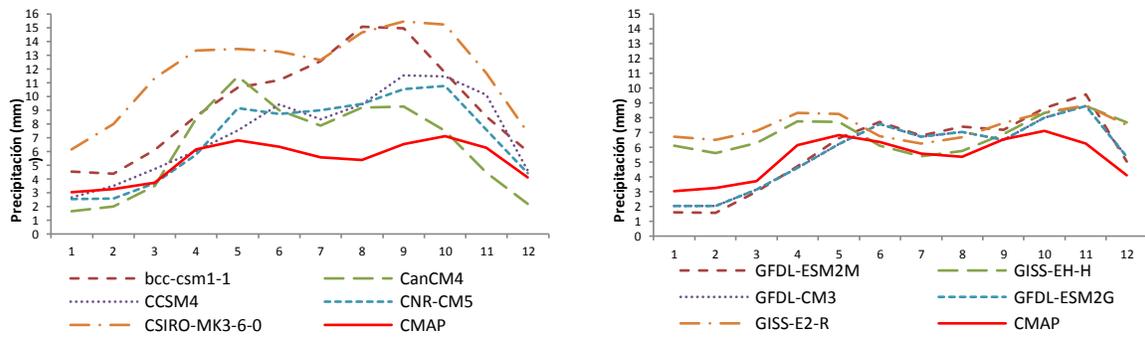


Figura 10. Ciclo anual de precipitación promediada sobre todos los puntos de rejilla en el área de la región Orinoquia.



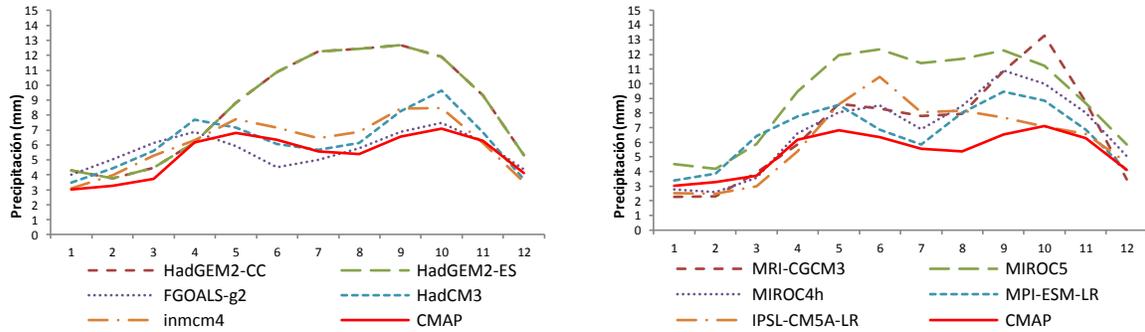


Figura 11. Ciclo anual de precipitación promediada sobre todos los puntos de rejilla en el área de la región Pacífico.

Al comparar las serie de los ciclo anuales mediante estadísticos se observa que las menores correlaciones y mayores errores se dan para la Amazonia, lo cual se puede interpretar como el hecho de que la simulación de la precipitación para esta región del país es la menos acertada y con mayor complejidad. Mientras que para el Caribe se presenta el caso de mayores correlaciones y menores errores.

Para sintetizar la selección del conjunto de modelos con mejor representación de la precipitación en Colombia se presenta a continuación unas tablas resumen donde se han seleccionado los modelos sobresalientes de acuerdo a la distribución espacial de la precipitación a nivel anual y estacional y su ciclo anual de acuerdo a la región. La ubicación de los modelos en la tabla no se hace parte de algún orden en su selección.

De acuerdo a lo establecido en la Tabla 5 y Tabla 6 los modelos sobresalientes en la representación de la distribución espacial de la precipitación a nivel anual y estacional son: CNR-CM5, FGOALS-g2, MPI-ESM-LR, GFDLCM3, HadCM3, CanCM4, mientras que para la simulación del ciclo anual (Tabla 7) se destacan el GFDL-ESM2M, GFDLCM2G, MPI-ESM-LR, HadCM3 y el CNR-CM5. Por tanto, cruzando estas tablas se llega al resultado que los modelos CNR-CM5, MPI-ESM-LR y HadCM3 son lo modelos recomendados para la representación de la precipitación en Colombia.

Tabla 5. Modelos sobresalientes de acuerdo a la distribución espacial de la precipitación.

Anual	DJF	MAM	JJA	SON
CNR-CM5	MPI-ESM-LR	HadCM3	GFDL-CM3	MPI-ESM-LR
CanCM4	bcc-csm1-1	MPI-ESM-LR	CanCM4	HadCM3
CCSM4	FGOALS-g2	CanCM4	CNR-CM5	GFDL-CM3
FGOALS-g2	GFDL-CM3	CNR-CM5	CCSM4	GFDL-ESM2G
GFDL-CM3	GFDL-ESM2M	FGOALS-g2	GFDL-ESM2G	GFDL-ESM2M
HadCM3	GFDL-ESM2G	MIROC4h	GFDL-ESM2M	FGOALS-g2
MPI-ESM-LR	MIROC4h	bcc-csm1-1	HadCM3	CNR-CM5

Tabla 6. Modelos sobresalientes de acuerdo a las salidas de los diagramas de Taylor.

Anual	DJF	MAM	JJA	SON
MPI-ESM-LR	MPI-ESM-LR	HadCM3	GFDL-CM3	GFDL-CM3
HadCM3	CNR-CM5	MIROC4h	CanCM4	CNR-CM5
MIROC4h	MIROC4h	CanCM4	CNR-CM5	MPI-ESM-LR
MIROC5	FGOALS-g2	FGOALS-g2	HadCM3	FGOALS-g2
CNR-CM5	HadCM3	MPI-ESM-LR	MPI-ESM-LR	bcc-csm1-1
FGOALS-g2	CanCM4	CNR-CM5	GFDL-ESM2G	HadCM3
GFDL-CM3	bcc-csm1-1	MIROC5	GFDL-ESM2M	Inmcm4

Tabla 7. Modelos sobresalientes de acuerdo a la comparación del ciclo anual

Colombia	Andina	Amazonia	Caribe	Pacifico	Orinoquia
GFDL-CM3	CNR-CM5	CanCM4	FGOALS-g2	CNR-CM5	MPI-ESM-LR
GFDL-ESM2M	GFDL-ESM2M	CNR-CM5	HadCM3	GFDL-CM3	MIROC4h
GFDL-ESM2G	GFDL-ESM2G	CSIRO-MK3-6-0	Inmcm4	GFDL-ESM2M	HadCM3
IPSL-CM5A-LR	Inmcm4	GFDL-ESM2M	MIROC4h	GFDL-ESM2G	CSIRO-MK3-6-0
MIROC4h	MIROC4h	GFDL-ESM2G	MRI-CGCM3	Inmcm4	CNR-CM5
MIROC5	MPI-ESM-LR	HadCM3	MPI-ESM-LR	IPSL-CM5A-LR	CanCM4
Inmcm4	HadCM3	PSL-CM5A-LR	bcc-csm1-1	MIROC4h	Inmcm4

Evaluación de las Simulaciones de Temperatura

De la misma manera que para el campo de precipitación se muestra a continuación los mapas de la distribución anual de la temperatura para los datos de referencia, en esta caso ERA40, y las simulaciones de los modelos del proyecto CMIP5. En general se observa las bajas temperaturas hacia el centro del país de sur a norte sobre la región montañosa, como consecuencia de la variación de la temperatura con la altura, y para el resto de las regiones temperaturas más altas.

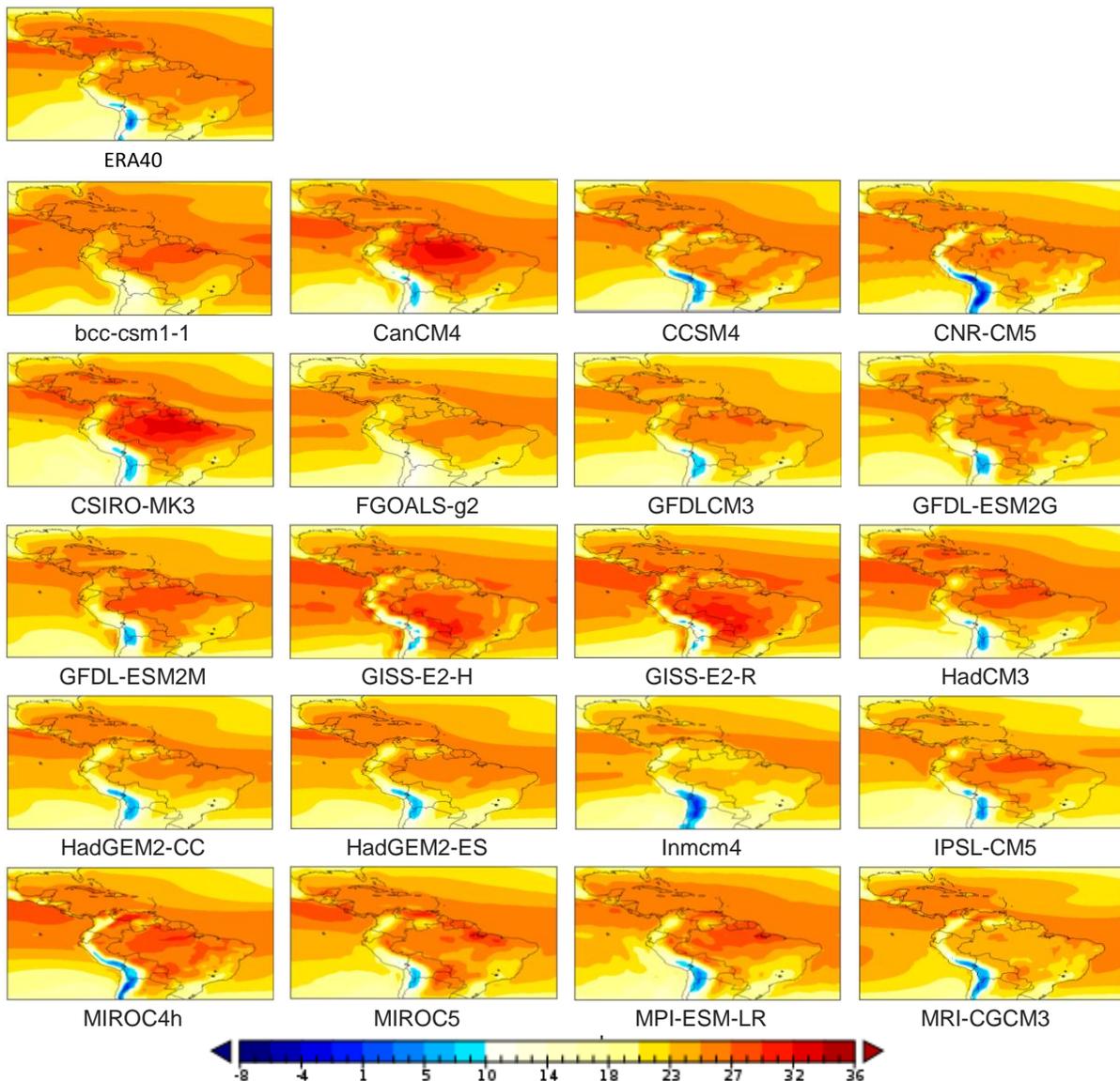


Figura 12. Distribución espacial de la temperatura anual del periodo 1971-2000 en el área de evaluación de los datos ERA40 y las simulaciones de 20 MCGs del CMIP5.

Como se hace difícil decidir un modelo específico mediante los mapas de distribución, en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** se realiza la clasificación de modelos de acuerdo a los estadísticos estimados. A partir de esta tabla se puede observar que modelos como el CCSM4, CNR-CM5, HadCM3, MIROC4h, MPI-ESM-LR sobresalen con respecto a los demás modelos, mientras que modelos como CSIRO-MK3-6-0, FGOALS-g2, GISS-EH-H, tiene una baja representación para el caso de la temperatura a nivel anual.

Tabla 8. clasificación de los modelos mediante los errores de los campos medios de la distribución de la temperatura anual.

MODELO	CORRE	RMSE	BIAS	RMES_CORR
bcc-csm1-1	16	8	12	7
CanCM4	13	7	6	10
CCSM4	1	1	4	3
CNR-CM5	5	6	10	9
CSIRO-MK3-6-0	15	16	8	16
FGOALS-g2	18	18	18	5
GFDL-CM3	8	12	16	12
GFDL-ESM2G	14	15	14	18
GFDL-ESM2M	19	14	7	20
GISS-E2-R	17	13	13	8
GISS-EH-H	20	17	17	4
HadCM3	4	3	2	15
HadGEM2-CC	6	10	15	13
HadGEM2-ES	3	5	11	14
inmcm4	10	19	19	1
IPSL-CM5A-LR	11	20	20	2
MIROC4h	9	9	1	11
MIROC5	7	4	3	19
MPI-ESM-LR	2	2	5	17
MRI-CGCM3	12	11	9	6

En cuanto a la distribución espacial de la temperatura a nivel estacional se observa en la Tabla 9 que los modelos que se destacan en todos los trimestres son: MPI-ESM-LR, MRI-CGCM3 y CCSM4, mientras los modelos menos representativos en general son: CanMC4, CSIRO-MK3-6-0, GISS-E2-H y GISS-E2-R. En forma general todos los modelos representan la temperatura con la misma aproximación en los cuatro trimestres.

Tabla 9. clasificación de los modelos mediante los errores de los campos medios de la distribución de la temperatura nivel estacional.

MODELO	DJF				MAM				JJA				SON			
	CORRE	RMS E	BIAS	RMES_CORR	CORRE	RMS E	BIAS	RMES_CORR	CORRE	RMSE	BIAS	RMES_CORR	CORRE	RMS E	BIAS	RMES_CORR
bcc-csm1-1	20	19	19	1	19	18	19	1	15	4	3	8	12	14	17	3
CanCM4	14	17	17	15	10	17	17	15	13	17	5	19	16	20	18	19
CCSM4	1	13	13	9	1	12	13	9	1	7	7	12	1	10	12	7
CNR-CM5	8	10	10	18	8	11	9	19	4	16	12	16	4	9	8	13
CSIRO-MK3-6-0	17	9	7	20	11	13	10	20	16	18	10	20	17	16	10	20
FGOALS-g2	15	3	3	11	17	5	3	11	17	12	14	11	15	2	3	8
GFDL-CM3	10	4	4	2	12	3	4	5	2	11	18	5	9	7	6	10
GFDL-ESM2G	16	5	5	7	15	4	5	2	10	9	16	6	19	8	7	14
GFDL-ESM2M	19	8	9	14	18	7	7	4	14	5	11	4	20	12	13	12
GISS-EH-H	13	18	18	16	16	19	18	13	19	2	2	7	14	19	19	11
GISS-E2-R	18	20	20	10	20	20	20	6	20	1	1	1	18	18	20	2
HadCM3	4	16	14	19	3	15	14	16	9	13	8	17	6	17	15	16
HadGEM2-CC	5	6	6	8	7	6	6	8	6	15	17	9	5	3	4	5
HadGEM2-ES	3	7	8	6	5	8	8	7	5	14	15	10	2	5	5	6
inmcm4	9	1	1	5	9	1	1	18	18	20	20	18	11	1	1	9
IPSL-CM5A-LR	12	2	2	13	14	2	2	14	11	19	19	13	13	4	2	15
MIROC4h	7	14	15	17	6	16	16	17	12	8	6	15	10	15	14	18
MIROC5	6	15	16	3	4	14	15	3	8	3	4	2	7	11	16	4
MPI-ESM-LR	2	11	12	4	2	10	12	12	3	10	9	14	3	13	11	17
MRI-CGCM3	11	12	11	12	13	9	11	10	7	6	13	3	8	6	9	1

De acuerdo a la dispersión de los puntos en los diagramas de Taylor se observa que los modelos se aproximan más al punto de referencia, teniendo mayores correlaciones y menores errores que en el caso de la precipitación, lo que significaría que los modelos tienen mayor habilidad para la representación de la temperatura. Así mismo la variabilidad dada por la desviación estándar es mucho más cercana en la temperatura que para la precipitación. Esto se muestra tanto para el caso anual como en el caso trimestral.

De acuerdo a los diagramas dados en la Figura 13 y Figura 14 los modelos sobresalientes son: MPI-ESM-LR, CCSM4, CNR-CM5, HAdCM3, HadGEM-CC, HadGEM-ES y MIROC5.

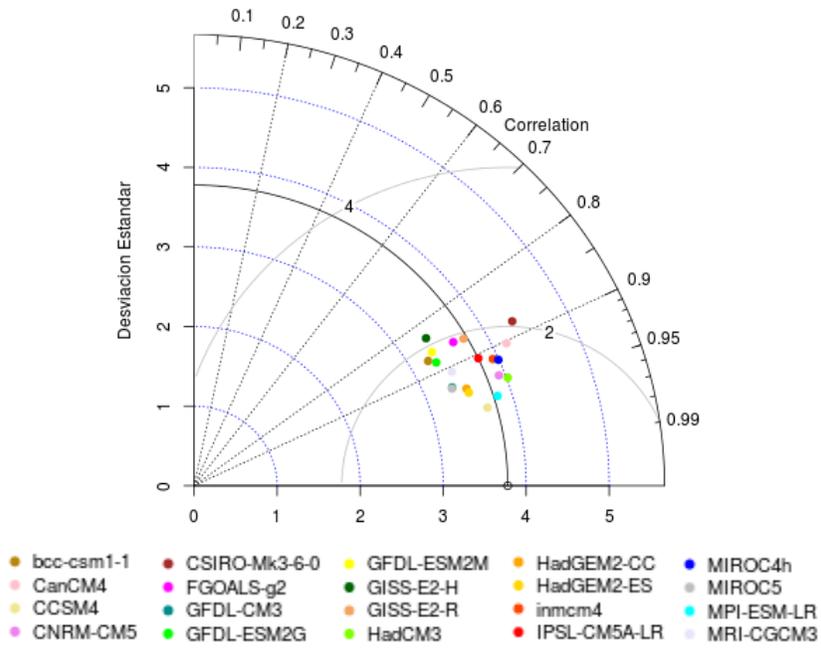
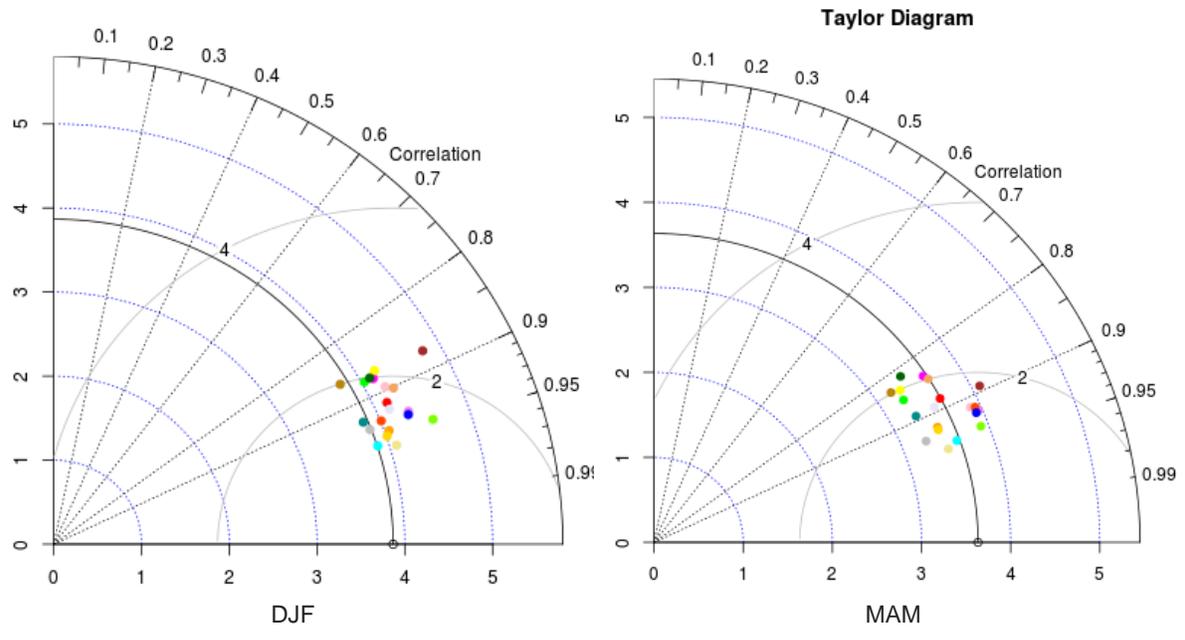


Figura 13. Diagramas de Taylor anual para la temperatura del periodo 1971-2000



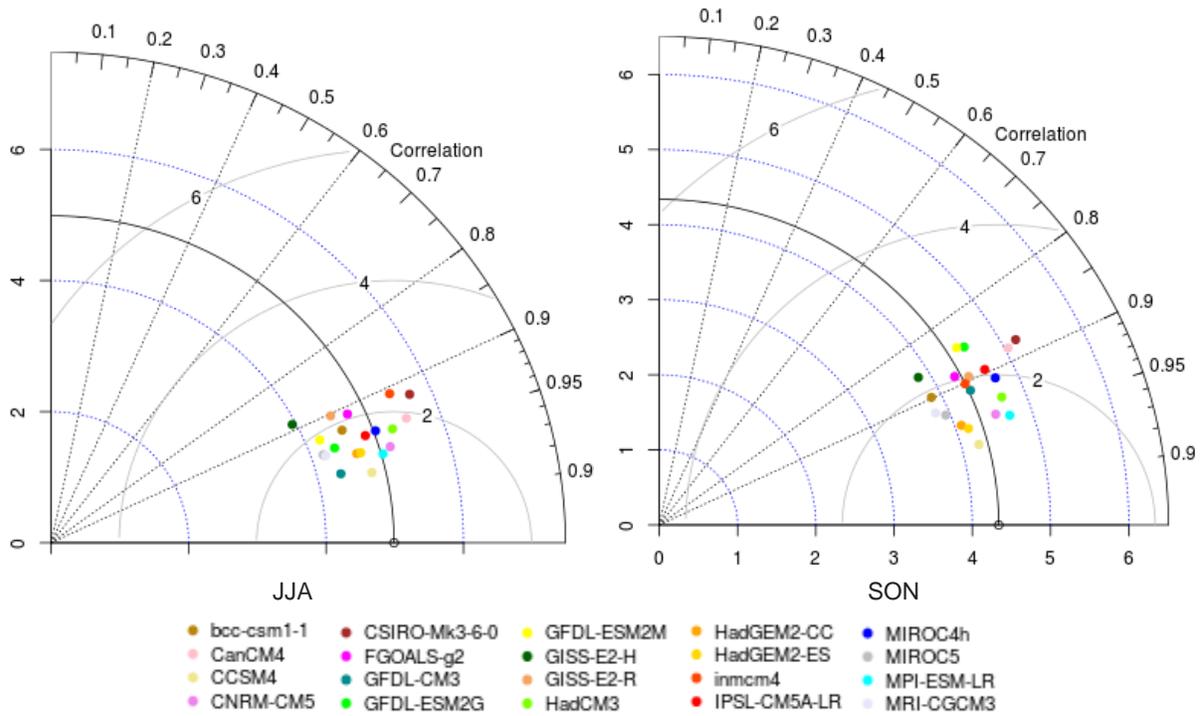


Figura 14. Diagramas de Taylor para la temperatura del periodo 1971-2000 a nivel estacional correspondientes a los trimestres DJF, MAM, JJA y SON

En el análisis de la variabilidad intranual de la temperatura se muestra la representación del promedio sobre todos los puntos de rejilla del área de Colombia para la observación y los modelos. En la Figura 15 se muestra el comportamiento bimodal de esta variable en el territorio, representados por los modelos con algunos corrimientos en los máximos y los mínimos. Ciertos modelos representan una variabilidad con grandes cambios de la temperatura entre los meses, como el GFDL-ESM2G, GFDLCM3 y el GFDL-ESM2M.

Entre los modelos más próximos a la simulación del ciclo anual de la temperatura están el HadCM3, MIROC5, CNR-CM5, IPSL-CM5-LR y el MIROC4h. Los modelos más lejanos probablemente son CSIRO-MK-3-6-0, FGOALS-g2 y GISS-E2-R

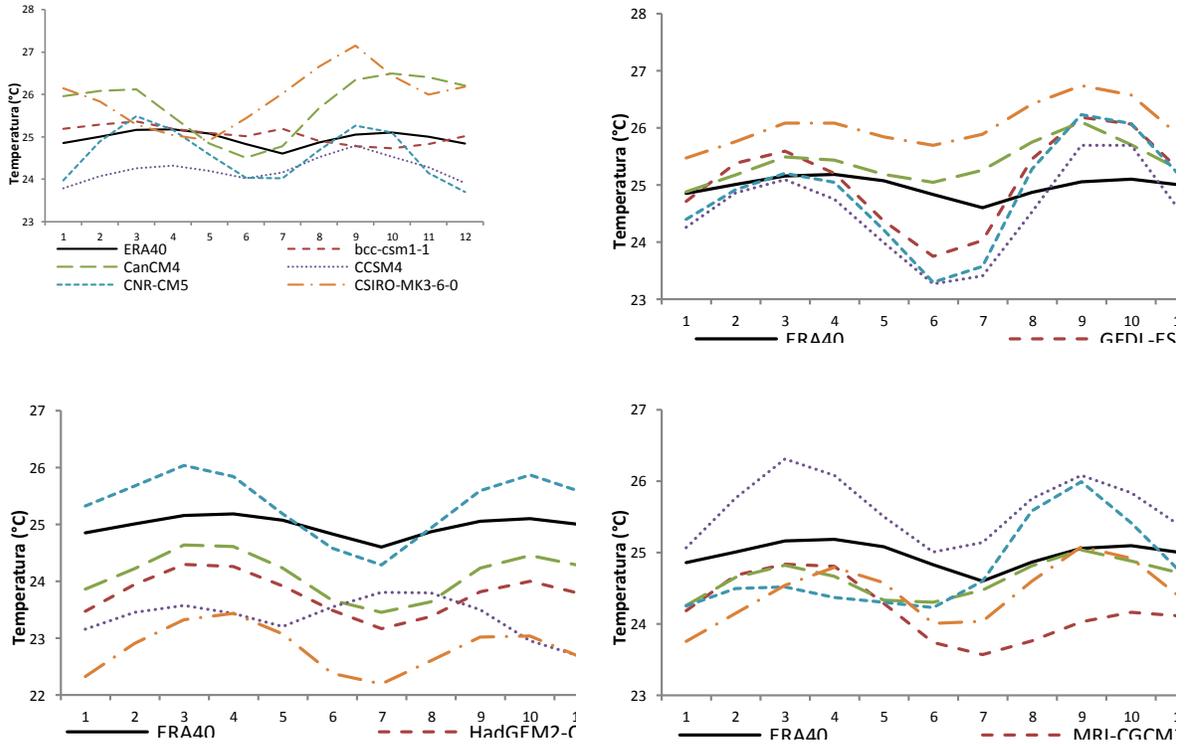


Figura 15. Ciclo anual de la temperatura promediada sobre todos los puntos de rejilla en el área de Colombia

De igual manera que para la precipitación a continuación se muestran las tablas resumen, en la que se indican los modelos sobresalientes de acuerdo a la distribución espacial de la temperatura anual y estacional y su ciclo anual. La ubicación de los modelos en la tabla no se hace parte de algún orden en su selección.

De acuerdo a lo establecido en la Tabla 10 y Tabla 11 los modelos sobresalientes en la representación de la distribución espacial de la temperatura a nivel anual y estacional son: CCSM4, MRI-CGCM3, MPI-ESM-LR, HadGEM-CC, HadGEM-ES, CNR-CM5 y CanCM4, mientras que para la simulación del ciclo anual (Tabla 12) se destacan el HadCM3, IPSL-CM5A-LR, MIROC4h, MIROC5, MRI-CGCM3, CNR-CM5 y MPI-ESM-LR. Luego cruzando esta información se puede indicar que los modelos CCSM4, MPI-ESM-LR y CNR-CM5 son los modelos recomendados para la representación de la temperatura en el país.

Tabla 10. Modelos sobresalientes de acuerdo a la distribución espacial de la temperatura.

Anual	DJF	MAM	JJA	SON
CCSM4	HadGEM-CC	HadGEM-CC	CCSM4	HadGEM-CC
CNR-CM5	HadGEM-ES	HadGEM-ES	MIROC5	HadGEM-ES
HadCM3	Inmcm4	MPI-ESM-LR	MRI-CGCM3	MPI-ESM-LR
MIROC4h	IPSL-CM5A-LR	GFDL-CM3	MPI-ESM-LR	MRI-CGCM3
MRI-CGCM3	MPI-ESM-LR	CCSM4	GFDL-CM3	CNR-CM5
MIROC5	GFDLCM3	IPSL-CM5A-LR	GFDL-ESM2M	Inmcm4
MPI-ESM-LR	CCSM4	MRI-CGCM3	GFDL-CM3	CCSM4

Tabla 11. Modelos sobresalientes de acuerdo a las salidas de los diagramas de Taylor.

Anual	DJF	MAM	JJA	SON
MPI-ESM-LR	MPI-ESM-LR	MPI-ESM-LR	CCSM4	HadGEM-CC
CCSM4	CanCM4	CCSM4	MPI-ESM-LR	HadGEM-ES
HadCM3	MIROC5	HadGEM-CC	CNR-CM5	CNR-CM5
CNR-CM5	GFDL-CM3	HadGEM-ES	HadGEM-CC	MPI-ESM-LR
HadGEM-CC	HadGEM-CC	MIROC5	HadGEM-ES	CCSM4
HadGEM-ES	HadGEM-ES	HadCM3	MIROC5	GFDLCM3
GFDL-CM3	Inmcm4	HadCM3	GISS-E2-H	MIROC5

Tabla 12. Modelos sobresalientes de acuerdo a la comparación del ciclo anual

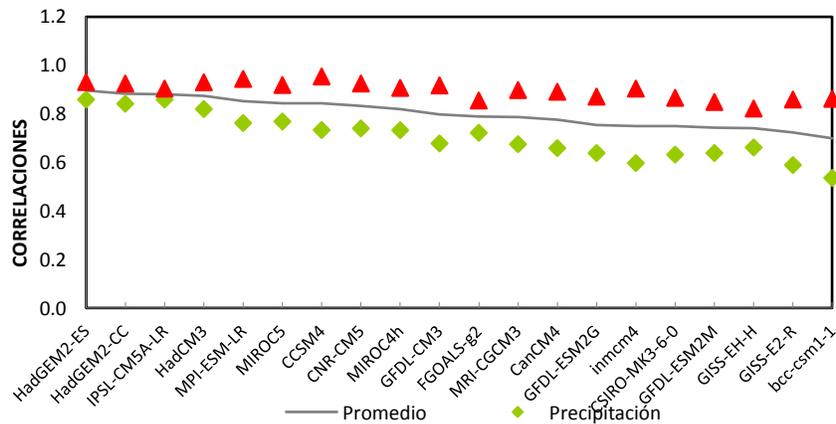
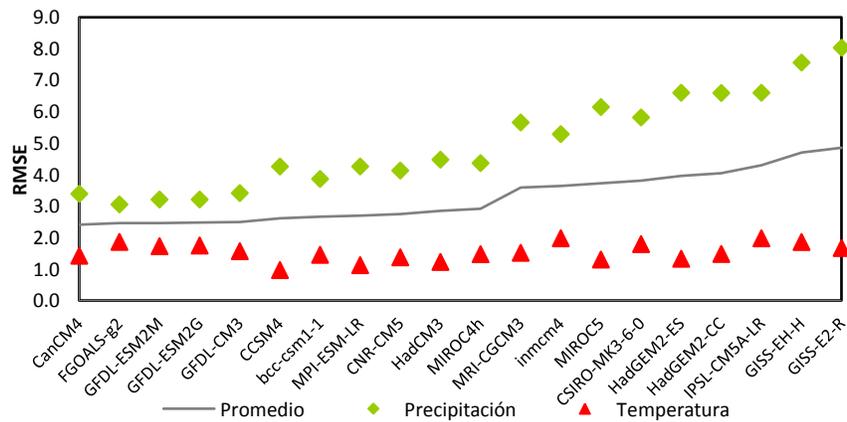
Colombia	Andina	Amazonia	Caribe	Pacífico	Orinoquia
CNR-CM5	GISS-EH-H	HadGEM-CC	bcc-csm1-1	bcc-csm1-1	MIROC5
HadCM3	HadCM3	HadGEM-ES	CCSM4	CNR-CM5	HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-LR	IPSL-CM5A-LR	IPSL-CM5A-LR	CSIRO-MK3-6-0	HadCM3	HadCM3
MIROC4h	MIROC4h	HadCM3	GISS-EH-H	MIROC4h	GISS-EH-H
MIROC5	MIROC5	MIROC5	GISS-E2-R	MRI-CGCM3	bcc-csm1-1
MRI-CGCM3	MRI-CGCM3	MRI-CGCM3	MIROC5	GFDL-ESM2G	MPI-ESM-LR
GFDL-ESM2M	MPI-ESM-LR	CNR-CM5	MPI-ESM-LR	GFDL-ESM2M	MRI-CGCM3

A continuación se muestra en la Figura 16 los valores de los estadísticos de temperatura y precipitación señalados con el color rojo y verde y su promedio indicado mediante la línea negra. Los modelos son organizados por su estadístico promedio de mayor a menor, sea el caso de la correlación o de menor a menor para el RMSE, BIAS y RMSE-corr. En este sentido con respecto a la Figura 16 eligiendo los seis mejores modelos para cada caso, los modelos con mayores valores de correlación y por consiguiente mayor “grado de ajuste” son HadGEM2-ES, HadGEM2-CC, IPSL-CM5A-LR, HadCM3, MIROC5 y CCSM4.

Para el promedio del BIAS, se debe tener en cuenta que los modelos más cercanos al eje x (con valor cero) corresponderán a los modelos con menor sesgo y por tanto mayor fiabilidad, para este caso son representativos: HadCM3, MIROC4, GISS-E2-H, CanCM4, bcc-csm1-1 y CCSM4.

Para el caso de RMSE y RMSE-corr, los promedios con menores valores están a la izquierda de la lista de la grafica, permitiendo seleccionar los modelos con mayor exactitud y para el RMSE los seis primeros son CanCM4, FGOALS-g2, GFDL-ESM2M, GFDL-ESM2G GFDLCM3 y CCSM4. Entretanto para el RMSE-corr están en los primeros lugares el FGOALS-g2, GFDL-ESM2M, GFDL-ESM2G GFDLCM3, CNR-CM5, bcc-csm1-1 y CanCM4.

Se observa que el modelo CCSM4 es común en los diferentes casos.



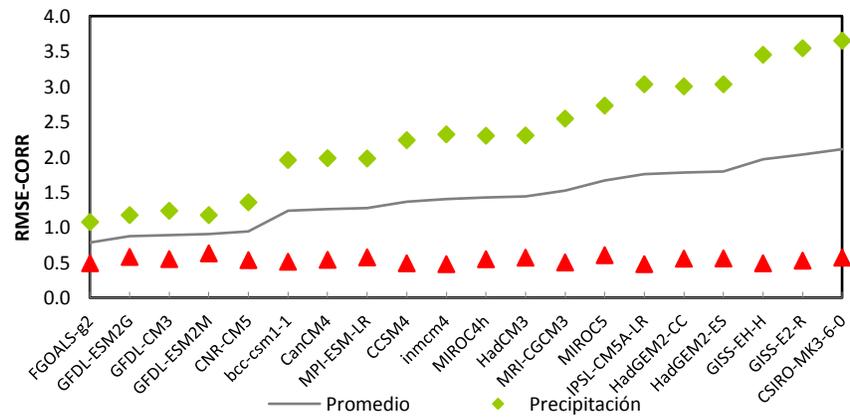
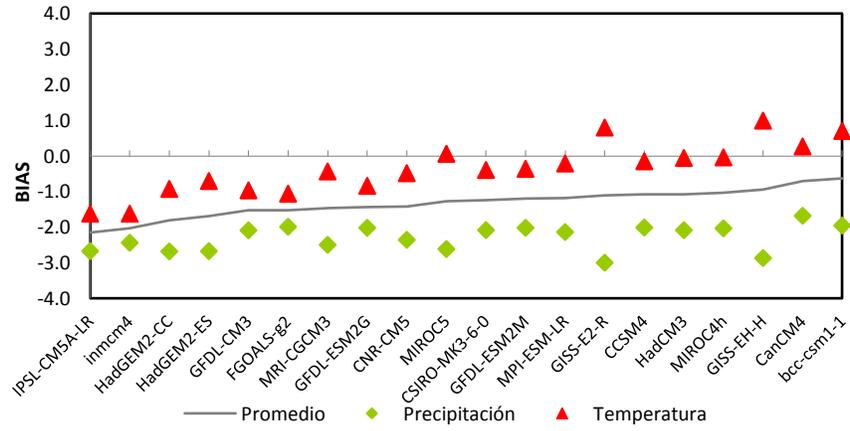


Figura 16. Promedio de los resultados de los estadísticos de cada modelo en el dominio regional – anual para la Precipitación y la Temperatura.

CONCLUSIONES

De acuerdo a la evaluación de la precipitación y la temperatura los modelos recomendados para estas variables en común son el CCSM4, MPI-ESM-LR, HadCM3 Y CNR-CM5.

Los modelos que se destacan en la evaluación de la representación de la precipitación de Colombia, teniendo en cuenta la distribución espacial a nivel anual y estacional, así como su ciclo anual, son el CNR-CM5, MPI-ESM-LR y HadCM3. Los modelos en general tienen mayores dificultades en la simulación de la precipitación para el trimestre DJF y para la región Amazonia.

Los modelos que se destacan en la evaluación de la representación de la temperatura de Colombia teniendo en cuenta la distribución espacial a nivel anual y estacional, así como su ciclo anual son el CCSM4, MPI-ESM-LR y CNR-CM5. En forma general los modelos representan la temperatura superficial con la misma aproximación en los diferentes casos considerados.

En la evaluación no se encontró una clara relación entre la resolución del modelo y su capacidad en la representación de la precipitación y la temperatura, ya que una alta resolución no significa una buena representación de las variables para los todos los casos considerados en el presente estudio, más aún el modelo de alta resolución CCSM4 ha mostrado en general una importante habilidad de la representación de la temperatura y la precipitación para la región de Colombia.

Se muestra una mejora en las simulaciones de los MCGs del proyecto CMIP5 con respecto al CMIP3. Esto es basado en la mejoramiento que evidencian los modelos como el FGOALS-g2 en la representación de la precipitación y el CCSM4 en la temperatura. Además de la identificación de características como la disminución de la subestimación del ciclo anual de la precipitación en general para todos los modelos, en comparación con el CMIP3.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ECMWF. 2008. ERA40. [En línea] 23 de Enero de 2008. [Citado el: 10 de Abril de 2012.] <http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/era-40>.

Gulizia, Carla y Camilloni, Inés. 2012. Análisis comparativo de la habilidad de un conjunto de modelos climáticos globales correspondientes a los proyectos de intercomparación CMIP3 y CMPI5 para representar la precipitación en Sudamérica. s.l. : Universidad de Buenos Aires. Pag. 19.

NOAA. 2009. CPC Merged Analysis of Precipitation (CMAP). [En línea] 2009. [Citado el: 3 de Abril de 2012.] <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.cmap.html>.

Rodríguez, Andrea. 2010. Evaluación de los Modelos Globales del Clima Utilizando para la generación de escenarios de cambio climático con el clima presente en Colombia. *Nota Técnica- IDEAM-METEO/009-2010*. Bogotá. Pag. 120.

Taylor, K. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. 2001. pág. 106.

Taylor, Karl, Stouffer, Ronald J. y Meehl, Gerald A. 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. s.l. : Bull. Amer. Meteor. Soc., 2012. Vol. 93, 485–498. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.

Velázquez, Mercedes y Montero, Martín. 2012. Nuevas proyecciones de Cambio Climático en Temperatura y Precipitación para México. s.l. : Servicio Meteorológico Nacional. Pag. 15.