

Validación de la precipitación estimada en modelos climáticos globales del CMIP6 para la Cuenca Tupiza

Fernández, S^a, Fernández, C^b

^a Investigador en el área de recursos hídricos y cambio climático del Instituto de Aguas de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: sergio.fernandezm9@gmail.com.

^b Docente de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: cristian_ck2@hotmail.com.

RESUMEN

Los diferentes modelos de circulación general generados en la sexta fase de intercomparación de modelos acoplados CMIP6 que se aguarda su publicación y principales resultados en el sexto informe del IPCC ya se encuentran disponibles en su mayoría para ser usados en las diversas investigaciones. Es importante resaltar que cada vez se van reduciendo las incertidumbres de las predicciones y simulaciones de las diferentes variables atmosféricas, además que la tecnología permite cada vez obtener modelos con mayor resolución.

La falta de investigaciones en nuestro país sobre los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y su evaluación integral con las variables atmosféricas nos mantienen en un contexto vulnerable a desastres naturales, sin dar la importancia necesaria y anticipada de adaptación y mitigación del cambio climático.

Precisamente por falta de este conocimiento global, técnico y regional es que el municipio de Tupiza que se encuentra al sur del país, en las últimas décadas ha atravesado eventos de sequías, granizadas e inundaciones, dejando pérdidas humanas y materiales considerables.

Bajo esta perspectiva se vio necesario la evaluación del desempeño de 19 modelos de circulación general del CMIP6 contrastando con los datos de observación que se tienen dentro la cuenca Tupiza. La manipulación y extracción de la información se realizó a escala mensual considerando solamente la variable de precipitación para el periodo 1943-2014, debido a que la estación Tupiza, la cual se encuentra en la parte baja de la cuenca, cuenta con datos para este periodo de tiempo. Aplicando indicadores estadísticos como el MAE, RMSE, BIAS, CC se identificaron dos modelos climáticos que responden con una similitud aceptable a las condiciones pluviométricas de la zona, estos modelos fueron el modelo CNRM-CM6-1 y el modelo INM-CM4-8.

Palabras clave: Modelos de circulación general, CMIP6, validación, cambio climático.

ABSTRACT

The different general circulation models generated in the sixth phase of the CMIP6 intercomparison of coupled models, which are expected to be published in the sixth IPCC report, are already available for use in the various investigations. It is important to highlight that the uncertainties in the predictions and simulations of the different atmospheric variables are becoming smaller and smaller, in addition to the fact that technology is making it possible to obtain models with higher resolution.

The lack of research in our country on the impacts of climate change on water resources and its integral evaluation with atmospheric variables keep us in a context vulnerable to natural disasters, without giving the necessary importance and anticipation of adaptation and mitigation of climate change.

It is precisely due to the lack of this global, technical and regional knowledge that the municipality of Tupiza, located in the south of the country, has experienced droughts, hailstorms and floods in recent decades, leaving considerable human and material losses.

Under this perspective, it was necessary to evaluate the performance of 19 CMIP6 general circulation models, contrasting them with the observation data available in the Tupiza basin. The manipulation and extraction of the information was performed on a monthly scale considering only the precipitation variable for the period 1943-2014, because the Tupiza station, which is located in the lower part of the basin, has data for this period of time. Applying statistical indicators such as MAE, RMSE, BIAS, CC, two climate models were identified that respond with an acceptable similarity to the pluviometric conditions of the area, these models were the CNRM-CM6-1 and the INM-CM4-8 model.

Key words: General Circulation Models, CMIP6, Validation, Climate Change

INTRODUCCIÓN

En un ámbito global, según resultados de investigaciones realizadas por modelos que relacionan la atmósfera y el océano, se prevé un aumento de temperatura media entre 1°C a 2,5°C además de variaciones de las precipitaciones en un 10% para el año 2100. Estas alteraciones ocasionarían un régimen de eventos extremos entre sequías e inundaciones. (Candela, et al., 2015)

El impacto antropogénico al medio ambiente que empezó en la era industrial ha generado hasta 400ppm de concentración de CO₂ hasta el año 2013 y se espera que alcance entre 600ppm a 850ppm en el año 2100. Las emisiones de gases de efecto invernadero en Bolivia solo alcanzaron el 0.46% de las emisiones mundiales en el año 2005, este porcentaje de concentración proviene principalmente de procesos de deforestación. (BID & CEPAL, 2014)

Vuille & Bradley (2000), mencionan que la temperatura en la cordillera tropical andina se ha incrementado entre 0.1° y 0.11°C por década desde 1939 y el ritmo del calentamiento se está incrementando en estos últimos 25 años entre 0.32° y 0.34°C por década.

Seiler, (2009), basado en el modelo regional climático PRECIS y el coeficiente de variación del modelo ECHAM4, proyectó la precipitación y temperatura en los escenarios A2 y B2 correspondiente al tercer informe de evaluación del IPCC. Según este estudio, es probable que la temperatura media anual incremente en mayor proporción en la zona altiplánica del país. Las precipitaciones tienen un comportamiento variable, por lo cual en algunas zonas se incrementará y en otras disminuirá.

Los modelos de circulación general (GCM) representan los procesos físicos que suceden en la atmósfera, el océano, la criósfera y la superficie de la tierra de manera acoplada, que, mediante simplificaciones y limitaciones, intentan simular numéricamente las dinámicas del sistema climático. Sin embargo, estos modelos no contemplan los fenómenos relacionados a la orografía y convección a escala pequeña o intermedia, esta situación hace necesaria el análisis y comparación de estos modelos con datos observados. (Bonilla & Mesa, 2017)

La sexta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6) es un proyecto que pertenece al Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP) en el cual se desenvuelve el Grupo de Modelado Acoplado (WGCM). CMIP ha alcanzado una mejor comprensión del clima pasado, presente y futuro y la variabilidad en un marco multi-modelo y son los encargados de generar los GCMs.

El diagnóstico, evaluación y caracterización del clima (DECK) es comprendido a partir de esta fase como un sistema base para proporcionar continuidad en las fases pasadas y futuras del CMIP en base a las simulaciones atmosféricas (1979-2014), simulación de control Pre-industrial, evaluación del incremento de las concentraciones de CO₂. Otro componente que constituye la información de entrada a los MIP es la simulación histórica en el periodo 1850-2014. Con estos dos componentes se generan los experimentos de cada fase del CMIP, cada experimento evalúa variables específicas del clima y la atmósfera, estos experimentos están agrupados en los modelos de interoperación MIPs. (Eyring, et al., 2016)

Los impactos del cambio climático sobre los extremos hidrológicos pueden afectar al número de eventos de caudal extraordinario que se producen en un año, a su frecuencia interanual, a la duración y volumen de los hidrogramas y a los caudales punta que se registran. Las condiciones atmosféricas generales en las que se enmarcan la persistencia de las situaciones que generan crecidas son complejas, y resulta difícil establecer una relación directa y unívoca entre clima e inundaciones.

La ciudad de Tupiza se encuentra a las riveras del río que lleva el mismo nombre, en las últimas décadas ha presentado eventos pluviales de gran magnitud ocasionando desde el año 2010 constantes pérdidas de áreas de cultivo por inundaciones, principalmente en las zonas periurbanas y comunidades aledañas. Los últimos 5 años, los eventos han sido aún más extremos y ha generado mayores desastres naturales abarcando ya el área urbana con socavación en los muros de protección ubicados en el río que cruza toda la ciudad, derrumbe de viviendas, caída de puentes peatonales y pérdidas humanas que fueron arrastradas por las diferentes quebradas que circundan a la ciudad.

De acuerdo al estudio a nivel municipal de recurrencia de inundaciones a nivel Bolivia

realizado por el Viceministerio de Defensa Civil, Tupiza es considerado un municipio de nivel de recurrencia "Alto" a inundaciones dentro del departamento de Potosí.

Debido a la situación físico-natural y las condiciones topográficas en la que se encuentra estas zonas, las viviendas que se encuentran emplazados en los límites y alrededor de esta quebrada y el río Tupiza están expuestos a los constantes peligros que ocasionan los desbordes de las quebradas; a causa del mal manejo de las cuencas, y los efectos del cambio climático que cambian los patrones pluviométricos en la zona.

Este trabajo está enfocado en evaluar los modelos climáticos globales de la sexta fase del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP6) considerando

solamente el experimento de simulación histórica que comprende el periodo 1850-2014 con el objetivo de identificar que modelos climáticos globales representan estadísticamente las condiciones pluviométricas de la zona. Para este objetivo es necesario el uso de estaciones de observación en Tierra de la zona de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca Tupiza pertenece a la macrocuenca del río Pilcomayo, abarca una extensión de 2250km², y un perímetro de 284.5km, la pendiente media de la cuenca es de 33% y según los parámetros morfológicos se constituye en una cuenca irregular, cuyas altitudes varían en el rango de 3003msnm a 4486msnm. Según la clasificación Pfafstetter la cuenca se encuentra en el nivel 4 con la siguiente codificación:8694.

En la figura 1 se muestra la delimitación de la cuenca Tupiza y la ubicación de las estaciones meteorológicas. Dentro de la cuenca se encuentran las estaciones de San Miguel de Lipez, Oploca y Salo; de estas tres estaciones, solo se consideró la estación de Oploca por que tiene una buena cantidad de años con datos. La estación Tupiza se encuentra a la salida de la cuenca y almacena 65 años de datos completos.

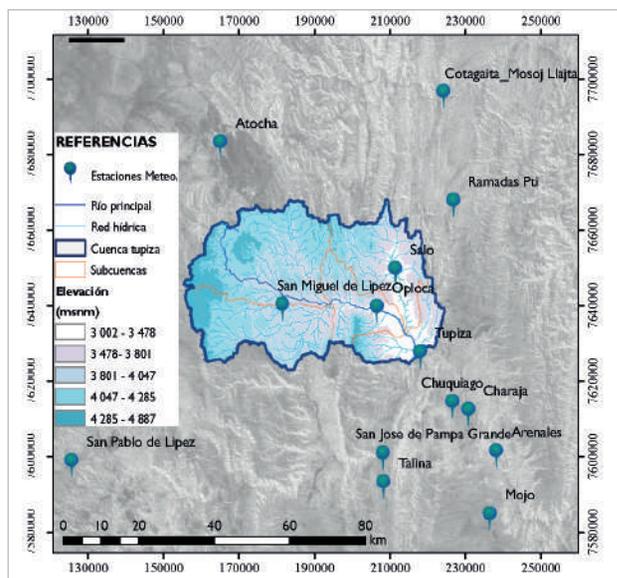


Figura 1. Ubicación espacial cuenca del río Tupiza y estaciones meteorológicas

Se utilizó la información pluviométrica de la base de datos del Sistema de Procesamiento de Datos Meteorológicos (SISMET) perteneciente al SENAMHI. De las 14 estaciones cercanas a la cuenca, las estaciones de Mojo, Tupiza, Oploca, San Pablo de Lipez, San Jose de Pampa Grande, Atocha y Ramadas Pti son las que cuentan con la mayor cantidad de datos, y se encuentran próximas al área de estudio.

Considerando la serie temporal de precipitación total anual de la estación Tupiza, se realizó el análisis de variabilidad climática y cambio climático considerando dos periodos de 30años, de 1960 a 1989 denominado tiempo “pasado” y de 1990 a 2019 denominado tiempo “presente”. En la serie correspondiente al tiempo pasado se tiene una media anual de 343.2mm y para el tiempo presente se tiene una media de 292.7mm, es decir la precipitación total ha disminuido 50.5mm en los últimos 30 años. Para evaluar si la variabilidad climática se ha incrementado o no, se determinó la desviación estándar, el coeficiente de variación, el rango intercuantílico y el rango de la serie de datos

El cambio climático ha sido evaluado mediante un análisis de tendencias. En la figura 2 se puede observar que la tendencia de la serie de precipitación es decreciente, pero para saber si es o no significativa se evaluó mediante las pruebas estadísticas de Mann-Kendall y Spearman.

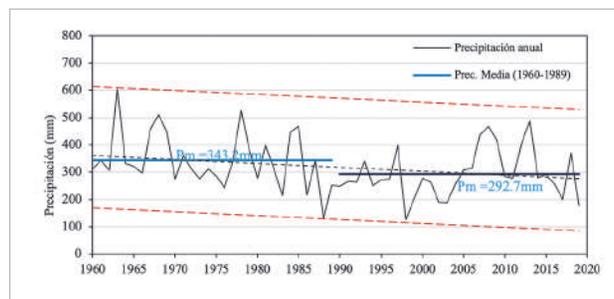


Figura 2. Precipitación total anual estación Tupiza

Los modelos climáticos de circulación general para la CMIP6 usados en este trabajo se descargaron del portal: <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>. De esta fuente de información se obtuvieron los datos de precipitación (“pr”) para las series de simulación histórica (“historical”) que abarca el periodo 1850-2015 a escala mensual para cada uno de los modelos en formato “nc”.

En la tabla 1. se detalla los modelos climáticos usados, la institución a la que pertenecen y el tamaño de resolución.

Tabla 1. Modelos climáticos objeto de validación del CMIP6

Modelo	Institución	Resolución (lat, long)
ACCESS-ESM1-5	CSIRO	1.87° x 1.25°
CAMS-CSM1-0	CAMS	1.25° x 1.12°
CAN-ESM5	CCCMA	2.8° x 2.8°
CANESM5-CANOE	CCCMA	2.8° x 2.8°
CESM2-WACCM	NCAR	1.25° x 0.95°
CMCC-CM2-SR5	CMCC	1.25° x 0.95°
CMCC-ESM2	CMCC	1.25° x 0.95°

CNRM-CM6-1	CNRM-CERFACS	1.4° x 1.4°
CNRM-ESM2-1	CNRM-CERFACS	1.4° x 1.4°
FGOALS-f3-L	CAS	1.25° x 1°
FIO-ESM-2-0	FIO-QLNM	1.25° x 0.95°
HADGEM3-GC31-LL	MOHC	1.87° x 1.25°
INM-CM4-8	INM	2° x 1.5°
INM-CM5-0	INM	2° x 1.5°
IPSL-CM5A2-INCA	IPSL	3.75° x 1.9°
IPSL-CM6A-LR	IPSL	2.5° x 1.25°
IPSL-CM6A-LR-INCA	IPSL	2.5° x 1.25°
MRI-ESM2-0	MRI	1.12° x 1.12°
NESM3	NUIST	1.87° x 1.87°
NorCPM1	NCC	2.5° x 1.9°

Como se puede observar en la tabla 1, el tamaño de resolución de cada modelo varía desde 0.95° a 3.75°, los datos fueron extraídos mediante un script usando la herramienta R Studio, con este script se obtuvo los datos en cada punto donde se ubican las estaciones de observación.

El script utilizado, realizó las siguientes tareas: primeramente, fue necesario modificar y ajustar los límites de extensión en la latitud de los modelos climáticos debido a que originalmente tiene una extensión de 0 a 360°, pero la región geográfica de acuerdo a la configuración WGS84 los límites deben estar entre -180° y 180°. Con el modelo ya corregido se extrae los datos puntuales de cada estación mediante un archivo shapefile. Los datos que extraen de estos modelos se encuentran en unidades de energía ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) por lo cual fue convertido a unidades de mm/mes.

En la figura 3 se presenta el procedimiento mencionado en el párrafo anterior, donde en la imagen de la izquierda está el GCM correspondiente al modelo IPSL-CM6A-LR-INCA, para el cual se extrajo la imagen con la data mensual del año 1850. Ya en la figura de la parte superior derecha se muestra los pixeles que comprenden la cuenca y las estaciones de observación y finalmente en la parte inferior se tienen los datos extraídos del modelo con la estación de observación.

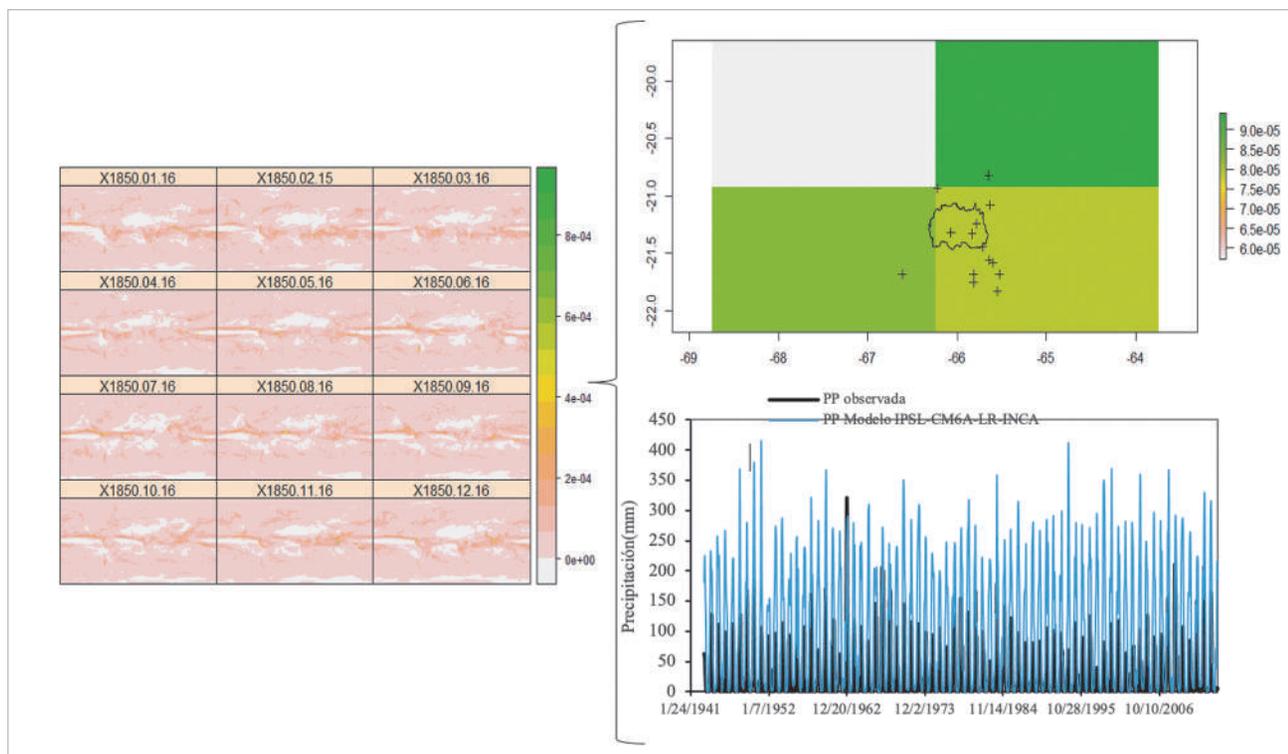


Figura 3. Proceso de extracción de datos del GCM perteneciente al modelo IPSL-CM6A-LR-INCA

Una vez descrito las fuentes de información, los procesos de manipulación y extracción de datos; se realizó las siguientes consideraciones para la evaluación del desempeño de los 19 modelos climáticos.

- El tamaño y área del pixel de cada GCM en la mayoría de los modelos cubre todas las estaciones y la cuenca, por lo tanto, para cada estación de observación, se obtuvieron los mismos valores extraídos del GCM.

- Considerando que las estaciones de Tupiza y Oploca cuentan con registros desde el año 1943 y además se encuentra dentro la cuenca, son las que se consideraron como estaciones representativas de la cuenca ya que según los polígonos de Thiessen, tienen mayor área de influencia.

- Finalmente, las estaciones de Oploca y Tupiza tienen una correlación de 0.87, lo cual muestra una buena relación de patrones pluviométricos entre ambas estaciones, por lo cual se definió trabajar con la estación Tupiza y se rellenó sus datos faltantes con la estación Oploca.

En este estudio, se implementó un conjunto de 5 indicadores estadísticos con los que se evaluó el desempeño de los diferentes modelos en la representación de dichos atributos. (Tabla 2)

Tabla 2. Indicadores estadísticos utilizados para caracterizar atributos del GCM y del clima observado

INDICADOR	ECUACIÓN	VALOR ÓPTIMO
Error medio absoluto(mm)	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i - O_i $	0
Raíz del error medio cuadrático (mm)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$	0
Error sistemático, sesgo o BIAS (mm)	$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)$	0
Coefficiente de correlación de Pearson	$CC = \frac{cov(P^i, P^o)}{\sigma(P^i) * \sigma(P^o)}$	1
Coefficiente de determinación	r^2	1

La comparación de los resultados de un modelo particular P_i , con las observaciones O_i se apoya en las características centrales de los errores del modelo $P_i - O_i$. Es el caso del error medio absoluto, MAE y de la raíz del error medio cuadrático, RMSE. Para evitar la cancelación de los errores por exceso y defecto la primera usa el valor absoluto y la segunda el cuadrado. La diferencia entre ambas es que los errores más grandes pesan más en la segunda. En ambos casos un modelo es mejor mientras menor sea

el indicador, con valor óptimo 0.

Para tener una idea del sesgo en la predicción, el indicador BIAS considera el promedio de los valores conservando el signo y no puede mirarse aislado de los dos anteriores por causa de la mencionada cancelación. Un valor de cero indica ausencia de sesgo en promedio, no necesariamente ausencia de error. El coeficiente de correlación r , mide el grado de asociación lineal entre la serie observada y simulada por el modelo, está acotada entre -1 y 1, ambos valores indican relación lineal perfecta y 0 indica ausencia de relación lineal. Sin embargo, un buen coeficiente de correlación no significa un buen modelo, porque este indicador no revela la escala ni la tendencia central de cada serie. En otras palabras, este indicador requiere que se mire a los anteriores que sí consideran esas características de las series. De manera semejante, el coeficiente de determinación, r^2 mide la fracción de la varianza de las observaciones explicada por el modelo. (Bonilla & Mesa, 2017)

RESULTADOS

Los principales parámetros estadísticos de la evaluación de la variabilidad climática en la estación Tupiza se muestran en la tabla 3. La desviación estándar reduce para el tiempo presente, pero también se reduce la precipitación media, por lo tanto, es el coeficiente de variación el parámetro que nos relaciona tanto la media como la desviación estándar, este coeficiente tiene un leve incremento para el tiempo presente (1990-2019) de 0.2%; con este resultado se puede concluir que la variabilidad climática en la zona baja de la cuenca donde se ubica la estación Tupiza se ha incrementado levemente en los últimos 30 años.

La serie total de datos desde 1960 a 2019 muestra una tendencia decreciente

significativa según las pruebas de Spearman y Mann Kendall realizadas en la herramienta TREND V1.0.2 concluyendo con este análisis que las precipitaciones debido al cambio climático se han reducido en cuanto a volúmenes totales registrados en la parte baja de la cuenca donde se ubica la estación Tupiza, sin embargo, esto no quiere decir que el riesgo de eventos extremos se haya reducido. (Tabla 4.)

Tabla 3. Parámetros estadísticos para la evaluación de la variabilidad climática en la estación Tupiza

Periodo	Mínimo	Máximo	Media	Rango de la serie	Cuartil 1 (Q1)	Cuartil 3 (Q3)	Rango Inter cuartil	Desviación Estándar	Coficiente de variación
1960-1989	128.8	604.5	343.2	475.7	280.7	392.9	112.2	102.98	30.0
1990-2019	125.9	485.2	292.7	359.3	250.7	332.7	82	88.51	30.2

Tabla 4. Pruebas de tendencia de la serie de precipitación de la estación Tupiza

Test estadístico	Z estadístico	Valores críticos para cada porcentaje de significancia			Resultado
		a=0.1	a=0.05	a=0.01	
Mann-Kendall	-1.984	1.645	1.96	2.576	Significativo
Spearman's Rho	-2.08	1.645	1.96	2.576	Significativo

La evaluación del desempeño de cada uno de los modelos climáticos mediante los indicadores estadísticos, dieron como resultado que los modelos CMCC-CM2-SR5 y CMCC-ESM2 son los que tiene mejor correlación con los datos observados de la estación Tupiza. Sin embargo, estos modelos tienen un 80% de sobre estimación según el coeficiente BIAS y los errores MAE y RMSE alcanzan los 130 y 190mm respectivamente.

Los modelos con menor error y sesgo son el IPSL-CM5A2-INCA y HadGEM3-GC31-LL los cuales varían entre 27 y 32mm de MAE y una sobreestimación aproximada del 40%.

Considerando que los modelos con alto coeficiente de correlación y bajo porcentaje de sobreestimación y error no son los mismos; los modelos que mejor se ajustarían a las características pluviométricas de la zona media y baja de la cuenca Tupiza fueron el CNRM-CM6-1 que tiene un error de 45mm, coeficiente de correlación de 0.7 y

un porcentaje de sobreestimación de los datos mensuales del 60%. Otro de los modelos es el INM-CM4-8 que tiene un error de 42mm, un coeficiente de correlación también de 0.7 y un porcentaje de sobreestimación del 60%.

Graficando a nivel mensual, se pudo observar que el modelo CNRM-CM6-1 tiene un comportamiento similar a los datos observados, excepto en el mes de febrero, en cambio el modelo INM-CM4-8 tiene un comportamiento más parecido con los datos observados y también menos error diferencia de magnitud (Figura 4-derecha.)

Para la serie anual que se muestra en el lado izquierdo de la figura 4.; se puede observar la sobreestimación de los datos en ambos modelos climáticos y el modelo que mejor similitud tiene a los datos anuales observados es el INM-CM4-

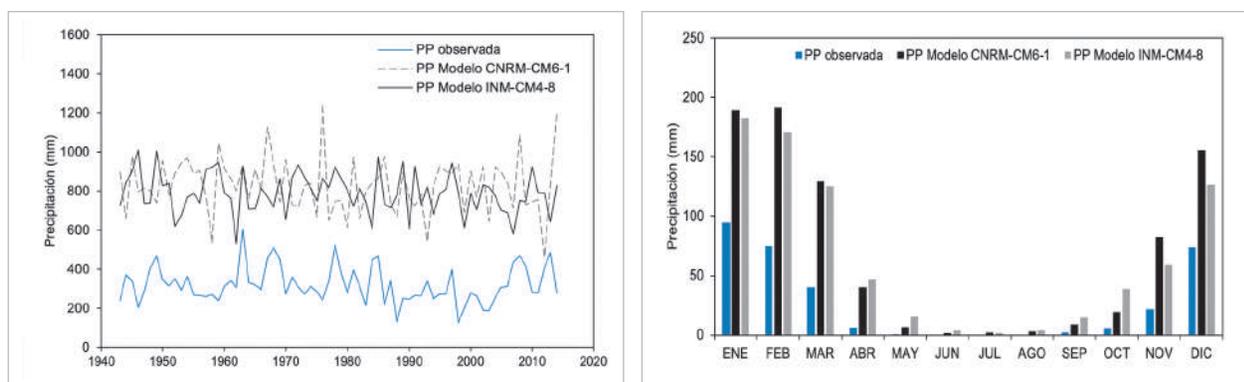


Figura 4. Precipitación anual y media mensual de los modelos climáticos con mejor desempeño.

Tabla 5. Indicadores de desempeño de modelos climáticos del CMIP6

Nro	Modelo	MAE	RMSE	CC	BIAS(%)	r ²
1	ACCESS-ESM1-5	113.64	166.36	0.70	80.92	0.31
2	CESM2-WACCM	71.62	117.99	0.70	72.51	0.39
3	CMCC-CM2-SR5	136.80	196.03	0.73	83.62	0.35
4	CMCC-ESM2	131.51	190.04	0.73	83.08	0.35
5	CNRM-CM6-1	45.46	74.32	0.70	61.40	0.38
6	CNRM-ESM2-1	54.18	89.90	0.68	66.09	0.36
7	Can ESM5	211.92	318.29	0.61	88.79	0.18
8	Can ESM5-CANOE	203.64	303.98	0.64	88.39	0.22
9	fGOALS-F3-L	78.28	110.81	0.70	74.41	0.26
10	FIO-ESM-2-0	117.60	169.69	0.73	81.43	0.36
11	IPSL-CM5A2-INCA	27.21	43.42	0.59	35.89	0.17
12	IPSL-CM6A-LR	69.69	100.04	0.67	71.82	0.21
13	IPSL-CM6A-LR-INCA	72.46	103.01	0.71	72.89	0.29
14	HadGEM3-GC31-LL	32.25	63.54	0.58	41.13	0.30
15	INM-CM4-8	42.35	64.50	0.70	59.46	0.33
16	INM-CM5-0	55.50	90.88	0.71	66.61	0.40
17	MRI-ESM2-0	262.37	319.38	0.53	90.76	-0.58
18	NESM3	114.92	167.19	0.72	81.08	0.35
19	NorCPM1	113.07	143.79	0.69	80.84	0.04

CONCLUSIONES

La variabilidad climática en la cuenca Tupiza se ha incrementado levemente en los últimos 30 años, el cambio climático por otra parte, muestra una tendencia decreciente para la precipitación, esto quiere decir que la disponibilidad hídrica ha disminuido sin embargo los eventos extremos debido al incremento de la variabilidad tienden a ser con mayor intensidad generando tendencias de picos de precipitación más elevados.

Los 19 modelos climáticos evaluados muestran una sobre estimación de los datos respecto a los observados, según otros estudios realizados a una escala mayor, los modelos con una alta correlación también tenían el más bajo MAE y BIAS, sin embargo, en este estudio, los modelos con menos error y sesgo son los que tienen menor correlación en sus datos a escala mensual. Por lo cual los modelos seleccionados como representativos y de mejor desempeño para la cuenca son aquellos con indicadores de correlación igual a 0.7 y sesgo del 60%, no siendo los más óptimos.

La evaluación no contemplo un análisis espacial porque los tamaños de pixel de la mayoría de los modelos climáticos son mucho más grandes que el área de la cuenca por lo tanto no muestra una variación de precipitación en las zonas altas y bajas del área de estudio.

El manejo de los datos climáticos requiere necesariamente el uso de herramientas de análisis de datos o scripts que permitan automatizar los procesos, manipular big data y generar los reportes o gráficos técnicos que muestren de manera clara los resultados de los diferentes procesos.

Se recomienda también evaluar los otros modelos climáticos restantes del CMIP6 para ver si existe algún modelo que represente de mejor manera los patrones de lluvia de la zona, evaluando también para las demás estaciones de observación y sacar un mejor resultado, más representativo para toda la cuenca de estudio, ya que en este trabajo los datos observados corresponden a la zona baja y media de la cuenca Tupiza.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BID & CEPAL, 2014. La economía del cambio climático en el Estado Plurinacional de Bolivia, s.l.: s.n.

Bonilla, C. & Mesa, O., 2017. Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia. *Ciencias de la Tierra*, 41(158), pp. 107-118.

Candela, L. y otros, 2015. Efectos del cambio climático y uso de suelo sobre los recursos hídricos de la cuenca del río Tordera (Barcelona-España). *Aqua-LAC*, Volumen 7, pp. 1-10.

Civil, V. d. D., 2017. Plan de contingencias inundaciones, s.l.: s.n.

Eyring, V. y otros, 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, Volumen 9, pp. 1937-1958.

Seiler, C., 2009. Implementation and validation of a regional climate model for Bolivia. *Fan-Bolivia*.

Vuille, M. & Bradley, R., 2000. Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical andes. *Geophysical Research Letters*, 27(23), pp. 3885-3888.