DOI: https://doi.org/10.35424/regeo.164.1085
Este es un artículo acceso abierto baio la licencia CC BY-NC-SA 4.0



Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos con CMIP5 para el Perú

Statistical Regionalization of Climate Scenarios with CMIP5 for Peru

Jorge Llamocca Huamani¹

Fecha de recibido: 9 de julio de 2021 Fecha de aceptado: 7 de diciembre de 2021

Resumen

Los Modelos de Circulación General (MCGs) actualmente tienen un rol importante como herramienta para identificar cambios importantes del sistema climático para las siguientes décadas; éstas permiten simular flujos de energía, masa y cantidad de movimiento en cada grilla tridimensional distribuida espacialmente. Sin embargo; la resolución espacial de estos modelos dinámicos son demasiados gruesos (>250km) y considerados como principal desventaja al momento de realizar estudios localizados. En ese sentido, la presente investigación prioriza la aplicación de técnicas de regionalización estadística, poniendo énfasis en áreas específicas. Uno de los principales resultados está centrado en obtener los mapas regionalizados de las proyecciones climáticas de precipitación, temperatura máxima y mínima del aire para Perú y en un contexto de los escenarios Climáticos del Quinto Reporte de Evaluación-AR5-2014 del IPCC-RCP45 & RCP85. Los mapas regionalizados se calcularon para un grupo de cuatro modelos (modelos climáticos globales del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplado-CMIP5) y que fueron seleccionados mediante la aplicación de métricas

Perú. XLVII Curso InternacionI de Geografía Apliada 2020, Centro Panameicano de Estudios e Investigaciones Geográficas (CEPEIGE), Ecuador, correo electrónico: jllamocca1@gmail.com

estadísticas. Las proyecciones bajo los dos escenarios están centradas en el periodo futuro 2041-2070, tomando como periodo climático referencial 1981-2005. Se analizaron cada uno de los cuatro modelos seleccionados permitiendo observar la distribución espacial de las variables focalizados en áreas se interés. Los resultados a nivel anual muestran que en general existe el posible aumento de la temperatura mínima del aire, con rangos que varían entre 1.5 °C a 1.8 °C bajo el RCP4.5 y 2.6 °C a 3.7 °C bajo el RCP8.5, para la temperatura máxima del aire de 1.6 °C a 1.8 °C bajo el RCP4.5 y 2.7 °C a 3.9 °C bajo el RCP8.5. Estos incrementos en general estarías más centrados en la selva baja norte, centro y sur de Perú. Para la precipitación, bajo los dos escenarios RCP, varía según el área de análisis evidenciando los incrementos significativos para la costa norte y costa centro de Perú entre 20% a 10% respectivamente y estarían asociados con la dinámica del océano, principalmente del pacífico central y oriental. Para la costa sur las proyecciones muestran deficiencias entre -10% a -20%; sin embargo, para zona andina centro y sur, las proyecciones son de incremento al 20% y estarían asociadas a la teleconexión que existe entre el Pacífico Central y la zona andina de Perú. Por otro lado, las proyecciones son de reducción para la selva baja entre -12% y -20%.

Palabras claves: cambio climático, variabilidad climática, regionalización estadística, precipitación, temperatura, Perú, CMIP5, RCPs.

Abstract

General Circulation Models (GCMs) are currently playing an important role as a tool to identify important changes in the climate system during the following decades; These allow the simulation of flows of energy, mass and momentum in each spatially distributed three-dimensional grid. Nevertheless; the spatial resolution of these dynamic models are too thick (> 250km) and considered as the main disadvantage when conducting localized studies. In this sense, this research prioritizes the application of statistical regionalization techniques, placing emphasis on specific areas. One of the main results is focused on obtaining the regionalized maps of the climate projections of precipitation, maximum and minimum air temperature for Peru and in a context of the Climate scenarios of the Fifth Assessment Report-AR5-2014 of the IPCC - RCP45 & RCP85. The regionalized maps were calculated for a group of 4 models (global climate models of the Coupled Models Intercomparison Project -CMIP5) mainly and that were selected by applying statistical metrics. The projections under each of the two scenarios are focused on the future period 2041-2070, taking 1981-2005 as the referential climate period. Each of the 4 selected models were analyzed allowing to observe the spatial distribution of the variables focused on areas of interest. The annual results show that in general there is a possible increase in the minimum air temperature, with

ranges that vary between 1.5 °C to 1.8 °C under RCP4.5 and 2.6 °C to 3.7 °C under RCP8.5., for the maximum air temperature of 1.6 °C to 1.8 °C under RCP4.5 and 2.7 °C to 3.9 °C under RCP8.5. These increases in general would be more focused on the northern, central and southern lowland forest. For precipitation under the two scenarios RCP varies according to the area of analysis, showing significant increases for the north coast and central coast of Peru between 20% and 10% respectively and would be associated with the dynamics of the ocean, mainly the central and eastern Pacific. For the south coast the projections show deficiencies between -10% to -20%; However, for the central and southern Andean areas, the projections are for an increase to 20% and would be associated with the teleconnection that exists between the Central Pacific and the Andean area of Peru. On the other hand, the projections are for a reduction for the lowland forest between -12% to -20%.

Key words: climate change, climate variability, statistical regionalization, precipitation, temperature, Peru, CMIP, RCPs.

1. Introducción

Esta investigación tiene como premisa que el clima es un sistema dinámico, complejo y caótico, resultado de las diversas interacciones de los componentes del sistema climático, que tienen un comportamiento no lineal (Beersma et al., 2003).

Actualmente existe la tendencia de elaborar información grillada y de alta resolución debido a que en los últimos años se ha tenido mayor libertad al acceso de infraestructura de computación moderna y como consecuencia los diversos centros internacionales ponen a disposición más de 60 Modelos de Circulación General Océano - Atmósfera (AOGCM) así como los resultados productos de simulaciones históricas y futuras, con resoluciones espaciales que varían entre 150 km a 250 km.

Esta investigación tiene por objetivo, de realizar el análisis de escenarios climáticos de la precipitación, temperatura máxima y mínima del aire para Perú, bajo los escenarios de Cambio Climático del Quinto Reporte de Evaluación (AR5) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Para ello se calculó los escenarios regionales de los modelos climáticos globales seleccionados del proyecto CMIP5 y se realizó una evaluación histórica con una reducción de escala a 25km2 usando el método Delta, referido a la línea base climática Reanálisis ERA5-Land del periodo 1981-2005. ERA5-Land es un conjunto de datos de Reanálisis que proporciona una visión coherente de la evolución de las variables de la superficie durante varias décadas con una resolución mejorada. El Reanálisis combina referencias de modelos con observaciones de todo el mundo en un conjunto de datos globalmente completo y consistente que utiliza las leyes de la física remontándose a varias décadas, proporcionando una descripción precisa del clima del pasado (Muñoz-Sabater, J., 2011).

Los escenarios utilizados son RCP4.5 y RCP8.5, los cuales tienen resolución temporal mensual en cada uno de los periodos climáticos futuros; 2011-2040 2041-2070 (caso de estudio) y 2071-2100. Además, se analiza como estos modelos globales a pesar de su "gruesa resolución espacial" proyectan los cambios en la precipitación, temperatura máxima y mínima del aire en el periodo 2041-2070 según el escenario pesimista de alta emisión de gases de efecto invernadero RCP8.5 y moderada emisión RCP4.5. Los resultados más relevantes son presentados al final de la investigación y este análisis pueda contribuir a la gestión de los cambios climáticos, focalizados en reconocer iniciativas que desarrollen medidas destacadas de adaptación y mitigación del cambio climático.

2. Herramientas y Metodología

2.1. Área de estudio

El área de estudio comprende el territorio nacional dominada por la complejidad topográfica correspondiente a los andes de Perú que varía desde

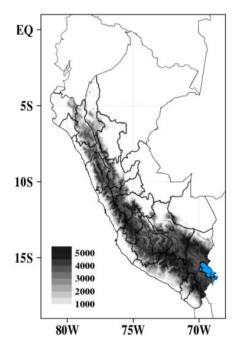


Figura 1. Área de estudio.

los 3 000 a 5 000 msnm. Esta variable permite tener una amplia diversidad de tipos de suelo y climas donde la parametrización de un modelo global es totalmente relevante en la simulación en su proceso de aproximación a lo real (Figura 1).

2.2 Base datos

Los Modelos de Circulación General (GCM), son una representación numérica tridimensional de la dinámica atmosférica y son herramientas importantes para mejorar la comprensión y la previsibilidad del comportamiento climático en las diferentes escalas temporales y espaciales. Estos modelos representan en cierta medida los procesos físicos del sistema climático que comprende la atmósfera, los océanos, la criósfera, la superficie terrestre, y en la actualidad es la herramienta disponible más avanzada que existe para simular proyecciones como escenarios futuros del sistema climático global ante los aumentos en los gases efecto invernadero (IPCC, 2013).

Todos los modelos son similares porque describen el mismo sistema climático, pero las incertidumbres, omisión de procesos, simplificaciones, parametrización y aproximaciones numéricas no son similares.

Para la selección de los modelos a utilizar para los escenarios de cambio climático en Perú, se realizó el inventario de los GCM en la base de datos del proyecto CMIP5 (portal Earth System Grid Federation-ESG), y se descargaron los datos mensuales para la precipitación, temperatura máxima y mínima del aire. El periodo histórico de referencia corresponde a 1981-2005 y el periodo futuro para los RCPs comprende del 2041-2070 para las tres variables mencionadas anteriormente. Con este criterio, se tomaron los datos de 19 modelos (Tabla 1).

		•
Modelo	Institución	Resolución (º de arco1)
bcc-csm1-1-m	BCC	2.8125x2.7906
CCSM4	NCAR	1.25x0.9424
CESM1-CAM5	NCAR	1.25x0.9424
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE	1.875x1.8653
FIO-ESM	FIO	2.81x2.77
GFDL-CM3	NOAA-GFDL	2.5x2
GISS-E2-H	NASA-GISS	2.5x2
GISS-E2-R	NASA-GISS	2.5x2
HadGEM2-AO	NIMR/KMA	1.88x1.25
IPSL-CM5A-LR	IPSL	3.75x1.8947
IPSL-CM5A-MR	IPSL	2.5x2.5352

Tabla 1. Lista de modelos disponibles

Modelo	Institución	Resolución (º de arco1)
MIROC5	MIROC	1.40625x1.4008
MIROC-ESM-CHEM	MIROC	2.8125x2.7906
MIROC-ESM	MIROC	2.8125x2.7906
MRI-CGCM3	MRI	1.125x1.12148
NorESM1-ME	NCC	2.5x1.8947
ACCESS1-0	CSIRO-BOM	~1.25°x1.875°
MPI-ESM-LR	MPI-M	~1.8°x1.8°
IPSL-CM5A-MR	IPSL	2.5x2.0

2.3.Data observada

Los datos del ERA5 se usaron para la calibración mediante el factor de ajuste (Pabón, 2012) y la evaluación del desempeño de los diferentes GCMs el cual permitió definir una nueva lista adecuada para Perú y la información grillada del SENAMHI-Perú denominada Pisco V2.1 (Aybar, 2020) a escala mensual de la precipitación, temperatura máxima y mínima del aire para los periodos 1981-2005.

3. Método de regionalización

Mediante el factor de ajuste (Pabón, 2012), se realizó el ajuste de las series de los 19 modelos para el periodo 1981-2005 a nivel espacial área que corresponde al territorio nacional para las tres variables (precipitación, temperatura máxima y mínima del aire). Esta metodología permite en gran medida reducir la diferencia entre los valores observados y los valores simulados de las siguientes ecuaciones (Ecuación 1 y Ecuación 2):

$$X_i^* = \alpha_i X_i^m \tag{1}$$

Donde:

 X_i^* : valor ajustado de la variable X para el año i-ísemo.

 X_i^m : valor simulado de la variable X para el año i-ísemo.

 α_i : factor de ajuste.

Donde

$$\alpha_i = \frac{\overline{X_i^{obs}}}{\overline{X_i^{mod}}} \tag{2}$$

 $\overline{\chi_{gbs}}$; promedio multianual de los datos observados del año i-ésimo. $\overline{\chi^{mod}}$ promedio multianual de los datos simulados del año i-ésimo.

Para esta metodología se tiene información de los GCMs y observados de 25 años el cual va permitir generar promedios multianuales para cada grilla intermedia establecida en esta investigación.

Los modelos de circulación global (GCMs) pasan por un método de ajuste y son evaluados aplicando las métricas estadísticas de la Tabla 2 y detallados por Sandoval (2010).

Número	Métrica	Criterio
1 Sesgo		Valores negativos: subestimación del sesgo del modelo
	Sesgo o BIAS	Valores positivos: indica una sobre estimación del sesgo del modelo
		Valor Cero: Valor óptimo
2	Coeficiente de correlación	0.8-1: correlación Muy alto u Óptimo
		0.6-0.7: correlación Alto o fuerte
		0.4-0.5: correlación Bajo
		0.2-0.3: correlación Muy bajo

Tabla 2. Descripción de las principales métricas

A continuación, se muestra una lista de los modelos que pasaron la evaluación estadística y son los que mejor desempeño muestran para todo el territorio nacional (Tabla 3).

ID	Modelo	Institución
M1	ACCESS1-0	CSIRO-BOM
M2	MPI-ESM-LR	MPI-M
M3	IPSL-CM5A-MR	IPSL
M4	CESM1-CAM5	NCAR

Tabla 3. Lista de modelos seleccionados

En la literatura científica existe diferentes Métodos de Regionalización que se aplican a temas de escenarios de cambio climático. Dos de los métodos más utilizados son el método Delta y el Factor de Ajuste o Corrección del Sesgo (Pabón, 2012). En el "Método Delta" básicamente lo que se obtiene es un factor de ajuste a partir de los datos simulados; este factor se aplica a las series de datos observados, y esta nueva serie pasa a ser la nueva serie futura ajustada. Según la variable a ajustar, este factor se aplica en una forma aditiva (por ejemplo, para temperatura) o multiplicativa (para precipitación).

Para mayor detalle se muestra las ecuaciones para este factor y se calcula con la Ecuación 3º

$$\alpha_i^{add} = \overline{X_i^{Futuro}} - \overline{X_i^{Base}}$$

$$\alpha_i^{mul} = \frac{\overline{X_i^{Futuro}}}{\overline{X_i^{Base}}}$$
(3)

Donde:

 $\overline{X_i^{Futuro}}$: Promedio multianual de los RCPs para i modelos.

 $\overline{X_i^{Base}}$: Promedio multianual de la simulacion para i modelos.

4. Resultados y discusión

4.4. Escenarios climáticos futuros para el Perú

4.1.1. Distribución espacial de cambios en la precipitación

En las siguientes gráficas se muestra los mapas de cambio para los dos escenarios e identificados con un ID según la Tabla 3 que simboliza el nombre del modelo seleccionado.

La distribución espacial para el RCP45 y RCP85 centrado al 2041-2070 a escala anual y para los cuatro modelos de selección convergen en precisar los incrementos de la precipitación en un 10% a 20% respecto a la climatología referencial 1981-2005 para gran parte de la zona costera centro y norte de Perú. En definitiva, estos incrementos estarían relacionados con los calentamientos de la temperatura superficial del mar el cual guarda una dependencia directa con el pacifico central y oriental. Las zonas de reducción (-12 a -20%) se ubican principalmente en la selva baja norte, centro y sur correspondiente a la amazonia; y por otro lado similar panorama para la costa sur con deficiencias en un -10 a -20% (Figura 2). Por otro lado, los resultados sugieren un incremento de la precipitación principalmente para parte central y sur occidental de los andes en un 20%. La distribución de la precipitación en un escenario RCP45 es menor que una distribución del RCP85, justamente porque en este último se considera una mayor concentración de los gases de invernadero y que repercute directamente en una mayor distribución espacial.

4.1.2. Distribución espacial de cambios en la temperatura máxima del aire

La Figura 3 muestra los cambios anuales de la temperatura máxima en el periodo 2041-2070 respecto al periodo de referencia 1981-2005 para los cuatro

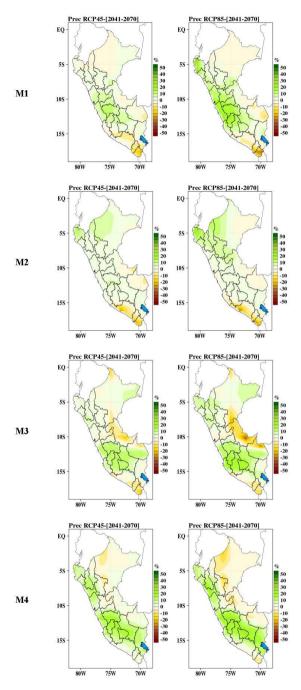
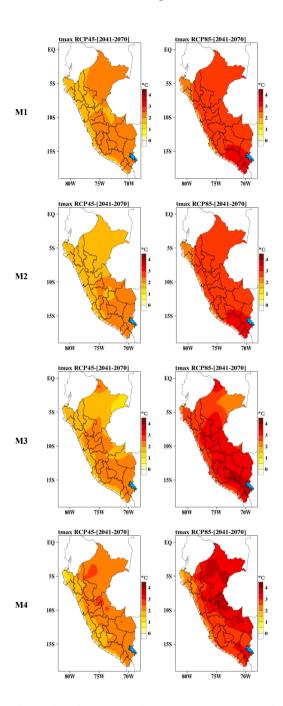


Figura 2. Mapas de cambio para la precipitación al 2041-2070 (en referencia a 1981-2005), proyectado por los 4 modelos M1, M2, M3, M4 (Tabla 3): columna izquierda representa el RCP4.5, columna derecha representa el RCP8.5.



Mapas de cambio al 2041-2070 (con respecto a 1981-2005), proyectado por Figura 3. los cuatro modelos M1, M2, M3, M4(Tabla 3) para la temperatura máxima del aire en los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5 (columna izquierda y derecha, respectivamente).

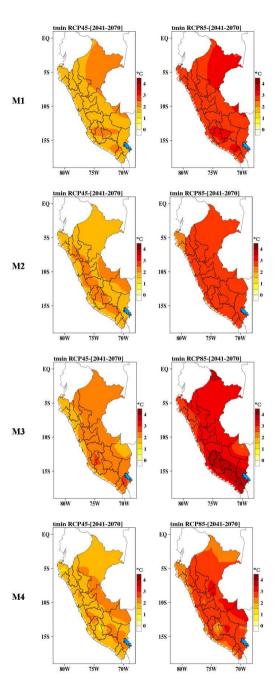


Figura 4. Mapas de cambio al 2041-2070 (con respecto a 1981-2005) para la temperatura mínima del aire, proyectado por los 4 modelos M1, M2, M3, M4: RCP4.5 y RCP8.5 (columna izquierda y derecha).

modelos (M1, M2, M3 y M4). Para el periodo futuro se disponen cuatro salidas por cada escenario de emisión (RCP4.5 y RCP8.5), es decir, ocho gráficos espaciales. Todos los modelos tienen un comportamiento similar y sugieren, para los dos escenarios de emisión, un calentamiento al 2070. Por otro lado, las zonas donde estarían los valores de cambio más altos abarcarían gran parte de la selva baja del Perú y parte de la sierra sur occidental. Se evidencia un mayor incremento de la temperatura máxima del aire en un escenario RCP8.5 respecto al escenario RCP4.5, donde es catalogada como el más conservador. Las zonas costeras tendrían menos impacto en comparación a la zona de la selva. Por otro lado, en el escenario RCP45 la zona sur del Perú. principalmente la parte occidental se evidencia un mayor calentamiento respecto a las otras zonas en los rangos de +1 °C y +2 °C (Figura 3).

4.1.3. Distribución espacial de cambios en la temperatura mínima del aire

Este escenario si presenta un aumento considerable para los próximos años inmediatos, se puede decir que el clima será continuo o muy similar al actual, sin embargo; para que esto suceda, se tendrían que dejar de emitir gases efecto invernadero a la atmósfera por parte de todo el mundo tomando como válida la premisa que el calentamiento es producto de la actividad del ser humano, aunque también se podría producir por una baja en la radiación entrante a la tierra por cambios en la actividad del sol.

Las proyecciones de cambios para la temperatura mínima del aire al 2070, considerando los promedios multianuales del 2041-2070 respecto al periodo de referencia 1981-2005 para el escenario RCP4.5 y RCP8.5 en general, se puede indicar que la temperatura mínima del aire para Perú se proyecta a una tendencia positiva. La Figura 4 muestra los cambios anuales correspondientes a la temperatura mínima y se observa que los modelos proyectan un incremento para el periodo 2041-2070 para los dos RCPs, y que esta tasa de incremento es más grande en el RCP8.5. Las salidas de los cuatro modelos son muy similares en el incremento y muestran una distribución espacial similar a la temperatura máxima.

El rango de todas las salidas para el final del periodo es del orden de +1.5 °C a 2 °C, tomando en cuenta los dos escenarios de emisión, +1.5 °C para RCP 4.5 y +2 °C a +3 °C para RCP 8.5. Las salidas de los modelos M3 para el escenario RCP8.5 es la que muestra valores más altos respecto a los otros tres modelos (Figura 4).

Conclusiones

La investigación ofrece proyecciones calibradas de precipitación, temperatura máxima y mínima del aire en base a los datos de Pisco v2.1

- Las proyecciones al 2070 muestran que los dos escenarios RCPs presentan un aumento de temperatura, esta tendencia es debido a que el forzamiento radiativo y las concentraciones de gases de efecto invernadero tienen una trayectoria parecida hasta mediados de siglo.
- La importancia de conocer los escenarios de cambio climático para Perú es muy significativa y urgente para orientar con datos científicos la toma de decisiones como país en materia de adaptación y mitigación. La mayoría de los escenarios estiman disminución del -20% de la precipitación anual para finales de siglo, principalmente en la selva baja y se proyectan aumentos para la zona costera (centro, norte) en un 20%, donde la señal de humedecimiento es más clara por el efecto oceánico.
- El promedio anual prevé un escenario positivo en rangos de 2.0 °C y 3.8 °C para la temperatura máxima y para la temperatura mínima en un rango de 1.7 °C y 3.0 °C.
- Se prevén impactos climáticos importantes por el aumento de temperatura y disminución de precipitación en las zonas de la selva baja y la costa sur oriental. Asimismo, las sequías podrían ser más prolongadas y el periodo de lluvias puede ser alterada, generando tormentas locales severas.

Referencias

- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., Felipe, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 770-785.
- Muñoz, J., Dutra, & Thépaut, J. N. (2021). ERA5-Land: A state of the art global reanalysis dataset for land applications. Earth System Science Data Discussions.
- Pabón, J. (2012). Tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 260-280.
- Sandoval, P. A. B. (2010). Forecast of average monthly flows in the basins of the Baker and Pascua rivers. Doctoral dissertation [University of Chile].
- Stocker, F., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., & Alexander, L. V. (2013). Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change-Abstract for decision-makers; Changements climatiques 2013. Les elements scientifiques. Contribution du groupe de travail I au cinquieme rapport d'evaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'evolution du CLIMAT-Resume a l'intention des decideurs.