

Estimation of the effect of climate change on the flows of the medium-high basin of the Piura River using GCM from CMIP6.

Jhon Alberca , Jesús Mejía , Edilberto Guevara-Pérez 

^aPrograma de Doctorado en Recursos Hídricos, Escuela de Post Grado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v29i2.290>

Abstract.- The objective of the present investigation was to analyze the Global Climate Models (GCM) of the CMIP6 to determine the model that allows obtaining values of precipitation and temperature very similar to those registered in the PISCO grid data for the medium-high basin of the Piura River, and based on said model, estimate the hydrological impacts of climate change on the flows of the intermediate future (2015–2100) that allow identifying the existence of areas vulnerable to flooding in the sector adjacent to the Puente Sánchez Cerro gauging point. Of the 58 GCM, 14 were analyzed for the SSP5-8.5 scenario of the CMIP6 that have information for the study area, obtaining records of precipitation, maximum and minimum temperature, which were corrected by the Statistical Downscaling methodology with the Quantile-mapping procedure. Said information was contrasted with the PISCO data (1981–2016), and the SWAT hydrological model was used to obtain the flows at the Puente Sánchez Cerro Gauging Point, and compare them with the PECHP data (1981–2016).

Keywords: Climate change; Piura River; GCM; CMIP6.

Efecto del cambio climático sobre los caudales en la cuenca del río Piura usando GCM del CMIP6.

Resumen.- El objetivo de la presente investigación fue analizar Modelos Climáticos Globales (GCM) del CMIP6 para determinar el modelo que permita obtener valores de precipitación y temperatura muy semejantes a los registrados en la data grillada PISCO para la cuenca medio-alta del río Piura, y en base a dicho modelo, estimar los impactos hidrológicos del cambio climático en los caudales del futuro intermedio (2015–2100) que permitan identificar la existencia de zonas vulnerables a inundaciones en el sector adyacente al punto de aforo Puente Sánchez Cerro. De los 58 GCM, se analizaron 14 para el escenario SSP5-8.5 del CMIP6 que cuentan con información para el área de estudio, obteniéndose registros de precipitación, temperatura máxima y mínima, los mismos que fueron corregidos por la metodología de Downscaling estadístico con el procedimiento Quantile-mapping. Dicha información fue contrastada con la data PISCO (1981–2016), y se utilizó el modelo hidrológico SWAT para obtener los caudales en el Punto de Aforo Puente Sánchez Cerro, y compararlos con la data del PECHP (1981–2016).

Palabras clave: Cambio climático; río Piura; GCM; CMIP6.

Recibido: 27 de abril, 2022.

Aceptado: 30 de junio, 2022.

1. Introducción

La costa norte del Perú es una de las más lluviosas del país y está expuesta a la ocurrencia de eventos extremos, como los originados por el fenómeno El Niño y la Oscilación del Sur (ENSO). Últimamente, dichos eventos ocurren con más frecuencia, probablemente debido al efecto del

cambio climático, aunque hay que reconocer que se trata de una alteración climática esencialmente costeña con mayor frecuencia de ocurrencia en la costa norte. Sin embargo, el impacto del fenómeno se extiende a una extensa zona del territorio nacional, especialmente cuando, por su gran magnitud adquiere las características del denominado Mega Niño.

Existen referencias que indican la ocurrencia de unas 10 veces del Mega Niño en los últimos cinco siglos en la costa norte de Perú [1], lo que implica un periodo de retorno de orden de cincuenta años. Es por eso que se hace necesario llevar a cabo

* Autor para correspondencia:

Correo-e:albercariosjhon@gmail.com (J. Alberca)

investigaciones para determinar la vulnerabilidad de esa región y establecer si el cambio climático está ejerciendo un efecto adicional al fenómeno marítimo periódico ENSO, específicamente sobre los caudales en la cuenca del río Piura, de modo que se puedan adoptar medidas de prevención y adaptación.

Las medidas preventivas y de adaptación requieren del conocimiento de las características de los eventos, cuya estimación estadística requiere de información hidro-meteorológica, la cual es muy escasa en la región.

El acceso a mediciones meteorológicas terrestres en algunas zonas suele ser difícil, encontrando pocos datos disponibles e impidiendo a la vez utilizar datos meteorológicos para alimentar a modelos hidrológicos que proporcionen información útil para la toma de decisiones [2].

Como una alternativa de solución, surgen las estimaciones de precipitación basadas en satélites, ya que son una fuente alternativa potencial de datos de forzamiento para el modelado hidrológico, ya que cubren un área grande con una alta resolución temporal y espacial [3].

De otro lado, en la estimación caudales es importante la cuantificación del efecto del cambio climático en los componentes hidrológicos dentro de la cuenca. La actividad humana ha impactado sustancialmente el equilibrio ambiental en la Tierra debido al uso excesivo de hidrocarburos, que han liberado millones de toneladas de monóxido de carbono y otros elementos que son dañinos para la atmósfera y han afectado el comportamiento del clima a nivel global [4, 5, 6]. En este sentido, especialmente en el contexto de la política ambiental, el término Cambio Climático ha llegado a ser sinónimo de Calentamiento Global Antropogénico [7]. Por eso, estos temas están recibiendo considerable interés científico y político debido al desconocimiento en la dinámica de los ríos que es todavía más incierta bajo un escenario de Cambio Climático y cambios acelerados de los usos del suelo [8].

Una forma de solventar la falta de información y evaluar apropiadamente el impacto potencial del Cambio Climático en la hidrología de la cuenca, es a través de la formulación de escenarios a escala de

cuenca creados a partir de las predicciones de un Modelo Global del Clima (Global Climate Models - GCM) [9].

En el Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, se utilizaron modelos de circulación general (GCM) para dar una visión general de la situación actual y proporcionar proyecciones de posibles cambios en el clima [10].

Los GCM son capaces de reproducir matemáticamente de una forma adecuada, los principales procesos que ocurren en los cinco componentes del sistema climático: atmósfera, océano, criósfera, geósfera y biósfera. Consisten en programas informáticos que se ejecutan en superordenadores con los que se resuelve numéricamente un conjunto de ecuaciones que expresan las leyes y principios de la física que gobiernan el sistema climático terrestre [11].

Un problema de los GCM es que los modelos climáticos difieren especialmente para la precipitación [12]. Sin embargo, el uso de una variedad de modelos también puede ser una ventaja, por ejemplo, para muestrear la incertidumbre potencial en las condiciones iniciales y también en las proyecciones futuras [13]. Por tanto, aunque los GCM no son perfectos, no dejan de representar una valiosa herramienta para evaluar el cambio climático.

El objetivo de la presente investigación es determinar la influencia del cambio climático en la determinación de los caudales del río Piura hasta la zona adyacente al punto de aforo de la estación Puente Sánchez Cerro, entre los distritos de Piura y Castilla, que constituyen áreas urbanas de gran vulnerabilidad frente a las inundaciones, utilizando la base de datos PISCO de SENAMHI, modelos de lluvia escurrentía como SWAT y los modelos climáticos globales.

2. Metodología

El esquema metodológico empleado en esta investigación se muestra a detalle en la Figura 1.

2.1. Área de estudio y punto de aforo

El área de estudio abarca la parte alta y media de la cuenca del río Piura, en el departamento de

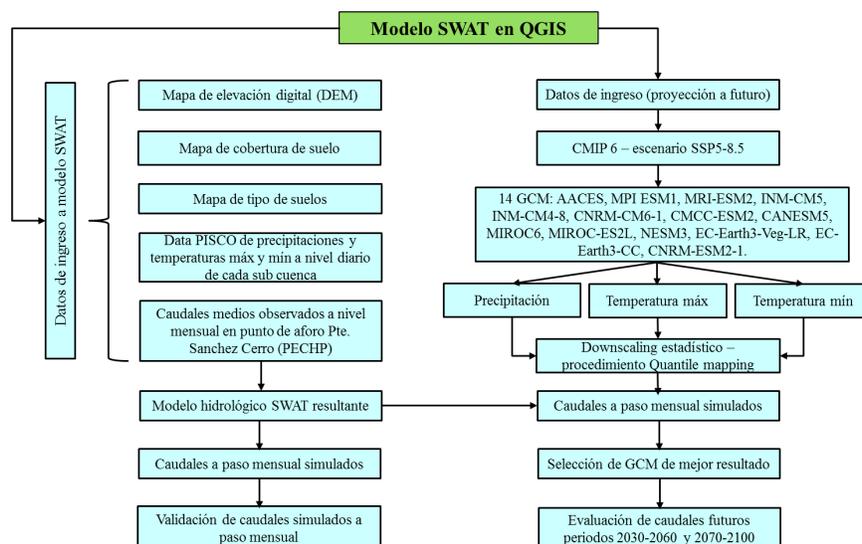


Figura 1: Esquema metodológico

Piura, en el norte del Perú, y que pertenece a la red hidrográfica de la vertiente del pacífico. El cauce principal de la cuenca es el río Piura, que nace a 3600 msnm en la provincia de Huancabamba bajo en nombre de río Canchaque, y que al unirse con el río Bigote adopta la denominación de río Piura, recorriendo un total de 280 kilómetros hasta su desembocadura en el océano Pacífico [14].

El punto de aforo que se consideró para la delimitación del área de estudio fue la estación hidrométrica ubicada en el Puente Sánchez Cerro, entre los distritos de Piura y Castilla, ya que dicha estación cuenta con información de los caudales máximos y medios observados en el río Piura. Como resultado de la delimitación, se obtuvieron 16 sub cuencas para el área de estudio, las mismas que se aprecian en la Figura 2.

2.2. Datos

Es necesario tener en cuenta que la información sobre precipitaciones temporales y de distribución espacial son clave para realizar una simulación y predicción eficaz de los procesos hidrológicos. Por ello, los datos de precipitación y temperatura máxima y mínima se obtuvieron de un producto grillado a nivel nacional denominado “Peruvian Interpolated data of SENAMHI’s Climatological and Hydrological Observations” [15], el cual contiene información espacial de precipitación y temperatura del Perú desde el 1 de enero de 1981

hasta el 31 de diciembre del 2016 y que cuenta con una resolución espacial de 10 km × 10 km. Se generaron 16 estaciones en los centroides de cada sub cuenca. Dicha data se procesó en el software R como se puede observar en la Figura 3.

Asimismo, del satélite ALOS PALSAR se obtuvo el mapa del modelo digital de elevación (DEM por sus siglas en inglés) de 12,5 m de resolución espacial.

Respecto al mapa de cobertura de suelo se obtuvo de la web globallandcover.com con una resolución de 30 m y el mapa de tipo de suelo se obtuvo del mapa mundial de suelos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) con una resolución de 8 km.

2.3. Modelo hidrológico SWAT

Para el procesamiento de la información, se hizo uso de un modelo hidrológico el cual se define como la caracterización simplificada del funcionamiento hidrológico de un sistema real [16]. Los modelos hidrológicos son altamente usados en las investigaciones actuales relacionadas a recursos hídricos, climáticos, etc. En este caso, se utilizó el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), el mismo que fue procesado y validado en el programa QGIS.

SWAT es un modelo conceptual de tiempo continuo que se desarrolló a principios de la década de 1990 para ayudar a los administradores

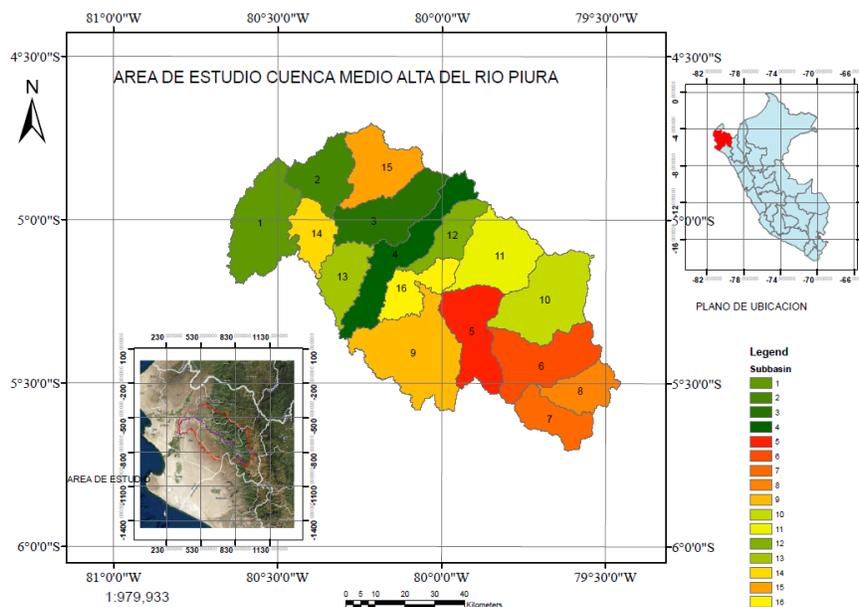


Figura 2: Delimitación del área de estudio (cuenca medio-alta del río Piura)

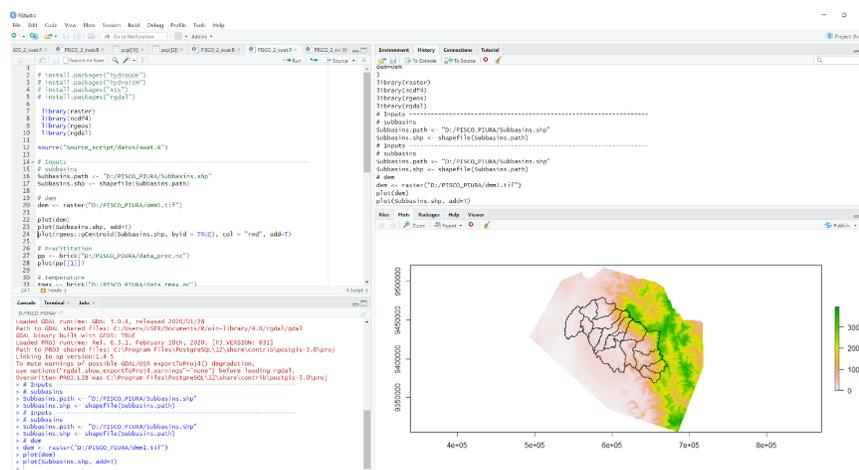


Figura 3: Subcuencas del área de estudio cargadas en el programa R

de recursos hídricos a evaluar el impacto de la gestión y el clima en los suministros de agua y la contaminación de fuentes difusas en cuencas hidrográficas y grandes cuencas fluviales [17].

En SWAT, una cuenca se divide en múltiples subcuencas, que luego se subdividen en unidades de respuesta hidrológica (HRU) que consisten en características únicas de uso de la tierra, manejo, topografía y suelo. La simulación de la hidrología de la cuenca se realiza en la fase terrestre, que controla la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y cargas de plaguicidas al canal principal en cada subcuenca, y en la fase de enrutamiento, que es el

movimiento de agua, sedimentos, etc., a través de los arroyos de las subcuencas hasta sus salidas [18].

Los datos de entrada del área de estudio que necesita el modelo hidrológico SWAT, cargado en el programa QGIS, son la información de precipitación y temperatura, el modelo digital de elevación, tipo de suelo y la cobertura de suelo, descritos anteriormente.

2.4. Datos hidrológicos registrados para validación de resultados

Fue necesario contar con información hidrométrica que indique los caudales de salida (caudales

observados) en el punto de aforo con la finalidad de poder comparar los caudales calculados mediante el modelo hidrológico SWAT, y así validar el modelo. Para tal efecto, se obtuvo la información de registros de caudales máximos mensuales (en m^3/s) en la estación Puente Sánchez Cerro (ubicada en el río Piura, ciudad de Piura) del Proyecto Especial Chira – Piura (PECHP), desde el enero de 1981 hasta diciembre del 2020.

2.5. Proyección de datos climáticos

A pesar de la estación hidrométrica existente en el punto de aforo de la cuenca medio-alta del río Piura, para poder proyectar los caudales futuros teniendo en cuenta los efectos del cambio climático se utilizaron catorce Modelos Climáticos Globales (GCM) en el escenario SSPP-8.5, que forman parte de la sexta fase del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 - CMIP6).

Para descargar la data de los catorce GCM se utilizó el portal web: <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home> de Copernicus. Este portal almacena y distribuye un conjunto de datos que provienen de simulaciones de los 58 GCM acoplados. Para la presente investigación, se seleccionaron los 14 GCM que se describen a continuación: AACES (AUSTRALIA), MPI ESM1 GERMANIA, MRI_ESM2 (JAPON), INM-CM5 (RUSIA), INM-CM4-8 (RUSIA), CNRM-CM6-1 (FRANCIA), CMCC-ESM2 (ITALIA), CANESM5 (CANADA), MIROC6 (JAPON), MIROC-ES2L (JAPON), NESM3 (CHINA), EC-Earth3-Veg-LR (EUROPA), EC-Earth3-CC (EUROPA) y CNRM-ESM2-1 (FRANCIA). Las variables descargadas de los 14 GCM mencionados fueron precipitación y temperatura máxima y mínima, en formato Excel, para el centroide de cada subcuenca, desde el 1 de enero de 1981 hasta el 31 de diciembre de 2014 (para analizar el escenario presente) y desde el 1 de enero de 2015 hasta el 31 de diciembre de 2100 (para analizar el escenario futuro).

El primer escenario (presente) permitirá evaluar cuál de los catorce GCM analizados permite obtener valores con mejor grado de aproximación en comparación con los obtenidos de la data

grillada PISCO, mientras que el segundo escenario (futuro) permitirá obtener los caudales proyectados a futuro utilizando el GCM mediante el cual se obtuvieron valores con mejor aproximación. Para tal efecto, se utiliza el coeficiente estadístico Nash Sutcliffe para medir el grado de aproximación de los resultados.

3. Resultados

3.1. Validación de modelo hidrológico SWAT con la data grillada PISCO

La simulación de caudales con la data de precipitación y temperatura grillada PISCO del año 1981 hasta el año 2016 en el modelo hidrológico PISCO, con un periodo de calentamiento de 3 años, en comparación con la data observada caudales medios mensuales en el punto de aforo con información cargada desde el 1 de enero de 1984 hasta el 31 de diciembre de 2016, se observa que existe un coeficiente Nash Sutcliffe = 0,94; y un coeficiente de correlación de Pearson $r = 0,97$, como se observa en la Figura 4. Por tanto, se queda validada la data ingresada al modelo SWAT.

3.2. Coeficientes estadísticos para cada GCM

Con la data de precipitación y temperatura máxima y mínima descargada por cada GCM del CMIP6 (del 1 de enero de 1981 al 31 de diciembre del 2014 y desde el 1 de enero del 2015 hasta el 31 de diciembre del 2100) y para la región demarcada en el área de la cuenca, se procesó en el programa R y se descargó en formato CSV. Asimismo, mediante un script en R se le aplicó una corrección estadística Downscaling – procedimiento Quantile mapping, el mismo que permite regionalizar los datos descargados de los GCM. Con la data ya corregida e ingresada en formato .txt en el modelo hidrológico SWAT validado, se obtuvieron los resultados del Coef. de Correlación de Pearson y Coef. Nash Sutcliffe que se detallan en la Tabla 1:

Por tanto, se verifica que el modelo con mejor comportamiento estadístico durante los años 1984–2016 es MPI ESM1 GERMANIA que tiene un mejor Coeficiente Nash Sutcliffe, parámetro que nos permite verificar el ajuste de los caudales. Además, aunque tiene un menor Coef. R^2 en

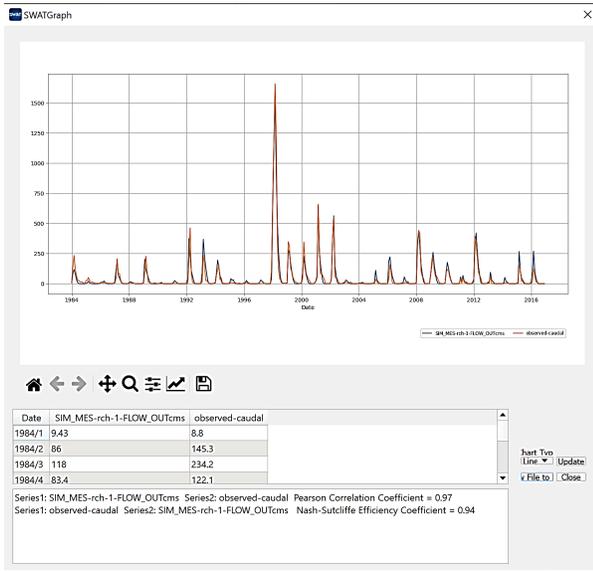


Figura 4: Comparación de caudales simulados en SWAT y los caudales registrados por el PECHP

Tabla 1: Valores de Coeficiente de Correlación de Pearson y Coeficiente Nash Sutcliffe obtenidos con los datos de los 14 GCM

Modelos	Coef. Correlación Pearson	Coef. Nash Sutcliffe
AACES (AUSTRALIA)	0,27	0,03
MPI ESM1 GERMANIA	0,33	0,07
MRI_ESM2 (JAPON)	0,21	-0,12
INM-CM5 (RUSIA)	0,42	-0,29
INM-CM4-8 (RUSIA)	0,12	-0,79
CNRM-CM6-1 (FRANCIA)	0,29	0,01
CMCC-ESM2 (ITALIA)	0,05	-0,44
CANESM5 (CANADA)	0,29	-0,01
MIROC6 (JAPON)	0,12	-0,15
MIROC-ES2L (JAPON)	0,13	-0,16
NESM3 (CHINA)	0,19	-0,01
EC-Earth3-Veg-LR (EUROPA)	0,22	0
EC-Earth3-CC (EUROPA)	0,31	0,06
CNRM-ESM2-1 (FRANCIA)	0,13	-0,16

comparación con el modelo INM-CM5, este parámetro tiene menor grado de influencia dado

que se usa sobre todo para datos meteorológicos o completar datos. Por tanto, el modelo GCM MPI ESM1 GERMANIA se tomará en cuenta para verificar los caudales del futuro inmediato (2022–2029) y del futuro intermedio, para lo cual se consideraron los rangos abarcados entre los años (2030–2060) y (2070–2100).

3.3. Valores de caudales de los 14 GCM

Respecto a los caudales simulados en el modelo hidrológico SWAT con los datos de los 14 GCM, se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 5, Figura 6, Figura 7 y Figura 8.

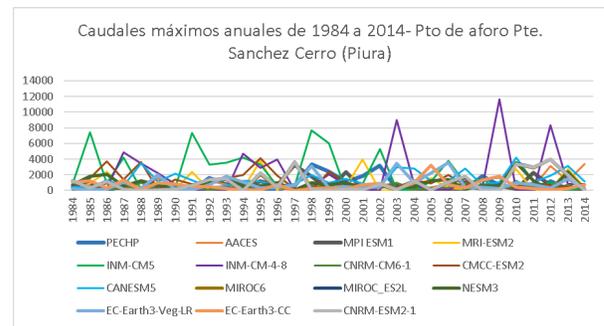


Figura 5: Comparación entre los registros históricos de caudales del PECH y los caudales simulados para cada GCM (1984–2014)

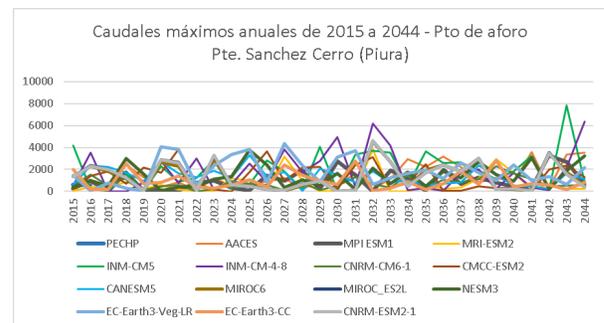


Figura 6: Comparación entre los registros históricos de caudales del PECH y los caudales simulados para cada GCM (2015–2044)

Como se mencionó anteriormente, el modelo climático global seleccionado para estimar los caudales futuros fue el MPI ESM1 GERMANIA. Al comparar los caudales observados del PECHP y los caudales simulados a partir de los datos de precipitación y temperatura del GCM mencionado,

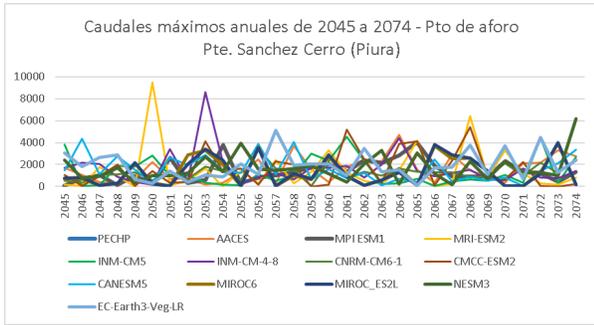


Figura 7: Comparación entre los registros históricos de caudales del PECH y los caudales simulados para cada GCM (2045–2074)

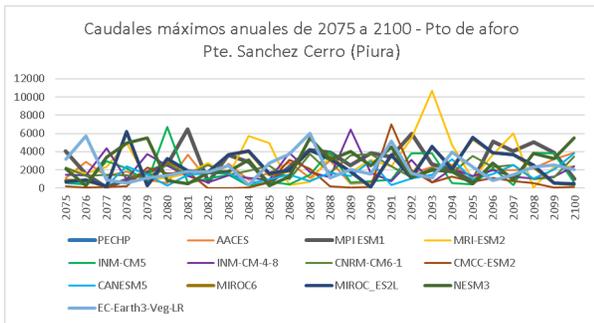


Figura 8: Comparación entre los registros históricos de caudales del PECH y los caudales simulados para cada GCM (2075–2100)

se observa en ambos casos una tendencia creciente de los caudales, pero no un crecimiento proporcional, sino que la línea de tendencia de los caudales proyectados refleja un crecimiento mayor a lo largo de los años, tal como lo muestra la Figura 9.

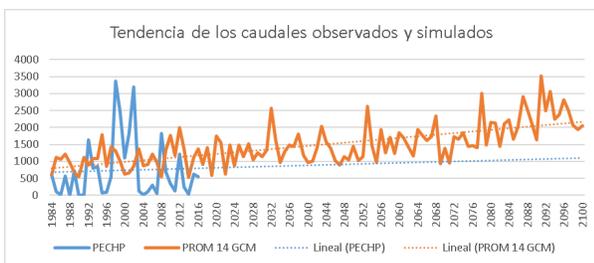


Figura 9: Comparación de los registros históricos de caudales del PECH con los simulados en SWAT y su comportamiento en el futuro intermedio (2030–2100)

Los resultados se analizaron en los rangos 2022–2029, 2030–2060 y 2070–2100. En el primer rango

se obtuvo un caudal máximo en el punto de aforo Punte Sánchez Cerro de 1.930 m³/s para el año 2028, mientras que en el segundo rango el caudal máximo obtenido fue de 3.790 m³/s para el año 2054 y en el tercer rango de 6.490 m³/s para el año 2081. Lo antes descrito se puede observar en la Figura 10, Figura 11 y Figura 12.



Figura 10: Caudales proyectados para el periodo 2022–2029 por efecto del cambio climático utilizando el modelo climático MPI ESM1 (Germania)



Figura 11: Caudales proyectados para el periodo 2030–2060 por efecto del cambio climático



Figura 12: Caudales proyectados para el periodo 2030–2060 por efecto del cambio climático

Conclusiones

Indistintamente del GCM utilizado para obtener caudales futuros en los periodos 2030–2060 y 2070–2100, todos los modelos climáticos analizados marcan una clara tendencia a incrementar los caudales en el futuro debido al efecto del cambio climático.

Tal como se aprecia en la Figura 11 y Figura 12, existe la probabilidad que ocurran fenómenos parecidos al fenómeno del niño costero ocurrido

en el año 2017, en el que se produjo un caudal de $2.754,5 \text{ m}^3/\text{s}$, asimismo fenómenos que superen el fenómeno del niño ocurrido en el año 1988 donde se produjo un caudal de $3.367 \text{ m}^3/\text{s}$.

Con la data del GCM MPI ESM1 GERMANIA y utilizando el modelo hidrológico SWAT, se estima que en el periodo 2030–2060 se registrará un caudal máximo de $3.790 \text{ m}^3/\text{s}$ y en el periodo 2070–2100 un caudal máximo de $6.490 \text{ m}^3/\text{s}$, ambos en el punto de aforo Puente Sánchez Cerro.

Las proyecciones futuras realizadas considerando el efecto del cambio climático manifiestan que se registrarán caudales muy superiores a los permitidos, por lo que se producirá el inminente desborde del río en la zona en análisis, generando la inundación de la zona histórica del distrito de Piura (margen derecho) y la zona comercial del distrito de Castilla (margen izquierdo). Esto concuerda con otras investigaciones realizadas sobre el tema, donde por ejemplo se recalca que en la zona alta de Piura se evidenciaría un incremento de temperatura entre $0,2$ y 2°C hacia 2030 [19]. Asimismo, para el caso de las precipitaciones, resultados de estudios ya realizados afirman que éstas se incrementarían para la costa norte del Perú [20], por lo que al incrementar la temperatura y las precipitaciones, es coherente que los caudales futuros aumenten, como se ha demostrado en la presente investigación.

Con el caudal futuro calculado en el periodo 2030–2060 de $3.790 \text{ m}^3/\text{s}$ se realizó la simulación hidráulica en el punto de aforo, verificándose el desborde en las zonas laterales del río Piura, generando inundaciones tal como se muestra en la Figura 13.

4. Recomendaciones

Es fundamental alertar a las autoridades locales y regionales competentes para que puedan evaluar el escenario crítico que se producirá en un futuro, y ello pueda influir en la toma de decisiones que se hagan en el presente, tales como medidas de adaptación, reubicación y/o expropiación de la población asentada a ambos márgenes del río Piura.

Asimismo, es importante gestionar y supervisar proyectos de construcción de defensas ribereñas (planeamiento, diseño y ejecución) tales como

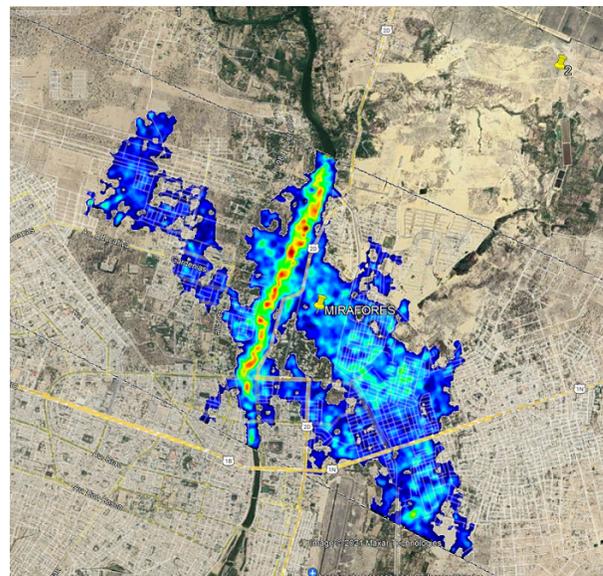


Figura 13: Simulación con el caudal de $3.790 \text{ m}^3/\text{s}$ (caudal máx del periodo 2030–2060) en el punto de aforo Puente Sánchez Cerro

muros de contención, ensanchamiento de la sección hidráulica, etc. que protejan y aseguren la estabilidad de los terraplenes a ambos márgenes del río Piura en la zona de estudio, permitiendo así mitigar los daños que puedan ocasionar debido a una probable inundación fluvial.

Finalmente, se recomienda realizar una investigación más profunda y detallada de los efectos adversos generados por máximas avenidas en el futuro intermedio, no sólo en el área de estudio de la presente investigación, sino aguas arriba y aguas abajo, donde no sólo existe una gran cantidad de centros poblados asentados a la ribera del río, sino también extensas áreas de parcelas agrícolas, que se verían afectadas, o incluso podrían desaparecer.

5. Referencias

- [1] A. Rocha, “La costa norte peruana y su vulnerabilidad frente al Fenómeno de El Niño,” *Revista Técnica del Capítulo de Ingeniería Civil del Colegio de Ingenieros del Perú*, vol. 8, no. 29, 2006.
- [2] N. Andres, F. Vegas, W. Lavado, and M. Zappa, “Water resources and climate change impact modelling on a daily time scale in the Peruvian Andes,” *Hydrological Sciences Journal*, vol. 59, no. 11, pp. 2043–2059, 2014. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.862336>
- [3] F. Su, Y. Hong, and D. Lettenmaier, “Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA)

- and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin,” *Journal of Hydrometeorology*, vol. 9, no. 4, pp. 622–640, 2008. <https://doi.org/10.1175/2007JHM944.1>
- [4] IPCC, “Cambio Climático 2014: informe de síntesis,” Contribución de los Grupos I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo de Expertos sobre el Cambio Climático,” IPCC, Ginebra, Suiza, Informe técnico, 2014.
- [5] T. Barker, “Climate Change 2007”: An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” IPCC, Geneva, Switzerland, Tech report, 2007.
- [6] S. Ardoin-Bardin, A. Dezetter, E. Servat, J. Paturel, G. Mahé, H. Niel, and C. Dieulin, “Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa,” *Hydrological Sciences Journal*, vol. 54, no. 1, pp. 77–89, 2009. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.1.77>
- [7] A. Moya, J. Ortega, and X. Jurado, “Evaluación del Modelo Climático Global MIROC5 y estimaciones de temperatura y precipitaciones para las zonas sur y norte del Perú,” *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, vol. 5, no. 2, pp. 8–15, 2015. <https://doi.org/10.18259/acs.2015028>
- [8] P. Burlando and R. Rosso, “Effects of transient climate change on basin hydrology. 1. Precipitation scenarios for the Arno River, central Italy,” *Hydrological Processes*, vol. 16, no. 6, pp. 1151–1175, 2002. <https://doi.org/10.1002/hyp.1055>
- [9] P. Burlando and R. Rosso, “Effects of transient climate change on basin hydrology. 2. Impacts on runoff variability in the Arno River, central Italy,” *Hydrological Processes*, vol. 16, no. 6, pp. 1177–1199, 2002. <https://doi.org/10.1002/hyp.1056>
- [10] K. L. Denman, G. Brasseur, A. Chidthaisong, P. Ciais, P. M. Cox, R. E. Dickinson, D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S. Ramachandran, P. L. da Silva Dias, S. C. Wofsy, and X. Zhang, “Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry,” in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. Miller, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [11] K. McGuffie and A. Henderson-Sellers, *A Climate Modelling Primer*, 3rd ed. Chichester: Wiley J, Sons, editors, 2005.
- [12] A. Dai, “Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models,” *Journal of Climate*, vol. 19, no. 18, pp. 4605–4630, 2006. <https://doi.org/10.1175/JCLI3884.1>
- [13] D. A. Randall, R. A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fiechfet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R. J. Stouffer, A. Sumi, and K. E. Taylor, “Climate Models and Their Evaluation,” in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. Miller, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [14] G. R. de Piura-ANA-GTZ/PDRS, *Proceso de elaboración del plan de gestión de la cuenca del río Piura – Aspectos metodológicos*, Folleto 2, 1ra. Ed. ed. Lima, Perú: Editorial y Gráfica EBRA E.I.R.L., 2009.
- [15] C. Aybar, W. Lavado, A. Huerta, C. Fernández, F. Vega, E. Sabino, and O. Felipe, “Uso del Producto Grillado PISCO de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico,” SENAMHI, Lima-Perú, Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017, 2017.
- [16] J. Arnold and N. Fohrer, “SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling,” *Hydrological Processes Journal*, vol. 19, no. 3, pp. 563–572, 2005. <https://doi.org/10.1002/hyp.5611>
- [17] K. Abbaspour, E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang, and B. Kløve, “A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model,” *Journal of Hydrology*, vol. 524, pp. 733–752, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- [18] S. N. de Meteorología e Hidrología, “Escenarios climáticos en el Perú para el año 2030,” SENAMHI, Centro de Predicción Numérica, Lima, Informe técnico, 2009.
- [19] M. del Ambiente del Perú, “Segunda Comunicación Nacional del Perú a la Convención de Naciones Unidas sobre Cambio Climático,” MINAM, Consejo Nacional del Ambiente, Lima, Informe técnico, 2010.
- [20] S. S. Moradkhani, H., “General Review of Rainfall-Runoff Modeling: Model Calibration, Data Assimilation, and Uncertainty Analysis,” in *Hydrological Modelling and the Water Cycle. Water Science and Technology Library*, S. Sorooshian, K. Hsu, E. Coppola, B. Tomassetti, M. Verdecchia, and G. Visconti, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.