

Proyección de los impactos del cambio climático en el caudal de la cuenca del río Lurín-Perú, bajo escenarios del CMIP5-RCP

Projection of the impacts of climate change on the flow of the Lurín river basin-Peru, under CMIP5-RCP scenarios

Kátherine Jeannette Osorio Díaz¹; Lía Ramos Fernández^{*1};
Teresa Velásquez Bejarano¹

RESUMEN

Se evaluó el impacto del cambio climático para fines del siglo XXI en la cuenca del río Lurín, cuenca costera representativa de la vertiente del océano Pacífico en Perú, con régimen estacional de precipitación influenciada por la cordillera de los Andes. El downscaling estadístico de las proyecciones de precipitación y temperatura de seis modelos climáticos globales (MCG) del CMIP5, bajo tres trayectorias de concentración representativas de crecientes intensidades de emisión de gases de efecto invernadero (RCP 2,6; 4,5 y 8,5), se ingresó a un modelo hidrológico distribuido, junto con información geográfica de la zona de estudio. La corrección del error por downscaling estadístico se realizó por delta change, distribution mapping y scaling, los cuales fueron comparados con el periodo de referencia (1950-2018). Para fines del siglo XXI se espera en la zona alta que la precipitación disminuya, mientras que en las zonas media y baja aumente, llegando en la zona baja hasta valores de 95 a 221 mm en comparación con los 17 mm de precipitación de referencia. Además, se estima que la temperatura aumente y se produzcan diversas variaciones en la evapotranspiración en toda la cuenca. En el caudal anual proyectado en la zona alta se prevé una disminución del 36 al 50% y en la zona media un aumento del 14 al 44%, mientras que en la zona baja se esperan ambas tendencias, posiblemente influenciadas por la incertidumbre dependiente de la reducción de escala y resolución de los MCG. Estos resultados permitirán formular estrategias de desarrollo y adaptación, que incluyan sistemas de regulación hídrica y de riego, y así contar con adecuada y oportuna disponibilidad del recurso hídrico para el óptimo desarrollo humano en el futuro.

Palabras clave: CMIP5, MCG, modelación hidrológica, RCP, TETIS.

ABSTRACT

The impact of climate change at the end of the 21st century was evaluated in the Lurín river basin, a representative coastal basin of the Pacific Ocean slope in Peru, with a seasonal precipitation regime influenced by the Andes mountain range. The statistical downscaling of precipitation and temperature projections of six global climate models (GCM) of the CMIP5, under three representative concentration pathways of greenhouse gas emissions increasing intensities (RCP 2.6, 4.5 and 8.5) were entered into a distributed hydrological model, together with geographic information of the study area. The correction of the error by statistical downscaling was carried out by delta change, distribution mapping and scaling; which were compared with the reference period (1950-2018). By the end of the 21st century, it is expected in the upper zone that precipitation will decrease; meanwhile, in the middle and lower zones, it will increase, reaching values of 95 to 221 mm in the lower zone compared to the 17 mm of reference precipitation; moreover, an increasing temperature and various variations in evapotranspiration are expected throughout the basin. In the projected annual flow in the upper zone, a decrease of 36% to 50% is expected and in the middle zone, an increase of 14% to 44%; whereas, in the low zone, both trends are expected, possibly influenced by the uncertainty dependent on the reduction of scale and resolution of the GCM. These results will make it possible to formulate development and adaptation strategies that include water and irrigation regulation; and thus, have adequate and timely availability of water resources for optimal human development in the future.

Keywords: CMIP5, GCM, hydrological modelling, RCP, TETIS.

¹ Departamento de Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. Perú.

* Autor por correspondencia: liarf@lamolina.edu.pe

Introducción

Las variaciones de precipitación y temperatura, particularmente en regiones áridas, son vulnerables a largo plazo ante escenarios futuros de cambio climático. La ocurrencia del cambio climático se evidencia por el calentamiento de la atmósfera, aumento del nivel del mar, reducción de masa glaciar, entre otros efectos. En consecuencia, el riesgo de inundaciones, la pérdida de fuentes de agua dulce en zonas costeras y la inseguridad alimentaria son temas de análisis en la actualidad (IPCC, 2018). La disponibilidad de agua es fundamental para la producción de alimentos, la generación de energía hidroeléctrica y el desarrollo sostenible (Anjum *et al.*, 2019). A pesar de ser el Perú emisor de solo un 0,2% de los gases de efecto invernadero a nivel mundial (Gütschow *et al.*, 2019), es un país muy expuesto a los impactos del cambio climático (Tostes *et al.*, 2019).

La cuenca del río Lurín, que nace en la cordillera de los Andes, se localiza en la costa central del Perú, cuyo clima árido con escasez de lluvia e inadecuado manejo de fuentes de agua ocasiona un ineficiente desarrollo de la agricultura y ganadería, principales actividades económicas en la zona (Chapple, 2016). A ello se suma un proceso acelerado de urbanización no planificada, fuerte presión por las tierras y riesgo de convertirse en un nuevo parque industrial. Sin embargo, aún conserva áreas destinadas a la agricultura, con potenciales recursos turísticos y arqueológicos, pero con altos índices de pobreza. Además, la poca información hidrometeorológica existente genera dificultades al planificar una buena gestión del recurso hídrico (Asurza *et al.*, 2018; Hamel *et al.*, 2020). Esta situación hace que la cuenca del río Lurín tenga escasez de agua en periodos de sequía y en periodos de avenidas se pierda agua que va al océano Pacífico, lo cual podría ser regulado (ANA, 2019). A pesar de la baja disponibilidad hídrica, existen áreas destinadas a la agricultura; sin embargo, la expansión urbana, la sobreexplotación del agua subterránea, el uso ineficiente de este recurso y la inexistencia de obras de regulación se han convertido en una amenaza para las condiciones hídricas y ambientales necesarias en el desarrollo agrícola, que puede conducir a impactos agroeconómicos severos. Por lo tanto, la proyección de los recursos hídricos bajo el contexto de cambio climático es un requisito previo para la planificación, la gestión

y la explotación de estructuras hídricas (Anjum *et al.*, 2019) en la cuenca del río Lurín.

En los últimos años, diversos autores han utilizado los resultados de Modelos Climáticos Globales (MCG) del CMIP5, que son capaces de representar los procesos físicos de la atmósfera terrestre. La información simulada de varios MCG se ha usado como información de entrada para las proyecciones hidrológicas, con el fin de evaluar los impactos del cambio climático en las respuestas hidrológicas en diferentes cuencas fluviales en todo el mundo (Anjum *et al.*, 2019). Sin embargo, la información climática obtenida de los MCG es menos precisa a escala de cuenca, debido a su baja resolución espacial, por lo que es necesario mejorar dicha resolución utilizando downscaling estadístico o dinámico (Xue *et al.*, 2014). El downscaling estadístico es capaz de proporcionar resultados de alta resolución espacial a escala de cuenca, mediante una relación empírica entre la información simulada del MCG y la obtenida a escala de cuenca, a través de estaciones meteorológicas (Mahmood y Jia, 2016).

Los modelos hidrológicos utilizan estas simulaciones climáticas como información de entrada para crear un vínculo entre el cambio climático y la respuesta hidrológica de un río en la cuenca. En este sentido, el modelo hidrológico distribuido TETIS puede proyectar los recursos hídricos futuros incorporando los impactos inducidos por el clima a escala de cuenca. Este modelo presenta ventajas como parámetros físicamente basados, usa información geográfica grillada (altitud, pendiente, cobertura vegetal, conductividad hidráulica, entre otros) y conceptualiza cada celda como un esquema de siete tanques de almacenamiento que representa el proceso hidrológico. Por ello, el modelo es una herramienta de gestión del recurso hídrico (Orozco *et al.*, 2018; Puertes *et al.*, 2020).

Hasta la fecha, ningún estudio ha informado sobre los impactos del cambio climático en la respuesta hidrológica de la cuenca del río Lurín. Por lo tanto, este trabajo pretende llenar ese vacío en la literatura investigando los impactos de las variaciones en la precipitación, temperatura y evapotranspiración en el caudal del río Lurín, bajo diferentes escenarios de cambio climático para fines del siglo XXI.

El objetivo principal del estudio fue evaluar los probables impactos del cambio climático en

el río Lurín a nivel mensual, anual y estacional, utilizando salidas de seis MCG bajo tres diferentes trayectorias de concentración representativas (RCP 2.6, 4.5 y 8.5). Las conclusiones de esta investigación serán útiles para los responsables políticos y gestores del recurso hídrico en la cuenca.

Materiales y métodos

La cuenca del río Lurín nace del deshielo del nevado Surococha y desemboca en el océano Pacífico. Se ubica en el departamento de Lima en Perú. La cuenca tiene un área de 1645,7 km² con un cauce principal de 110,4 km y pendiente de 10,9%. Anualmente la precipitación acumulada varía de 17 a 544 mm y la temperatura de 9 a 20 °C. La zona baja de la cuenca concentra la mayor densidad poblacional, que fluctúa entre los 144 y 687 habitantes/km² (Figura 1).

La información empleada en el modelo hidrológico distribuido TETIS fue la siguiente:

Información climática e hidrométrica histórica del Servicio Nacional de Meteorología e

Hidrología del Perú (SENAMHI) y la Autoridad Nacional del Agua del Perú (ANA): precipitación, temperatura (máxima y mínima) y caudal diario de 43, 36 y 3 estaciones, respectivamente, del periodo 1950-2018.

Información climática grillada proyectada para fines del siglo XXI del CMIP5 (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>): precipitación y temperatura (máxima y mínima) simulada de los MCG seleccionados se obtuvieron para bajas, medias y altas intensidades de emisión de gases de efecto invernadero (2,6; 4,5 y 8,5 W/m²). Las descripciones de los MCG utilizados para este estudio se presentan en la Tabla 1.

Información geográfica grillada: modelo de elevación digital, celdas acumuladas, direcciones de flujo, pendientes, velocidad de flujo, cobertura vegetal, almacenamiento estático, conductividad hidráulica del suelo y conductividad hidráulica del acuífero, generadas en formato ráster con resolución espacial de 250 metros.

En la Figura 2 se explica el procedimiento seguido en el estudio. Se realizó el downscaling estadístico

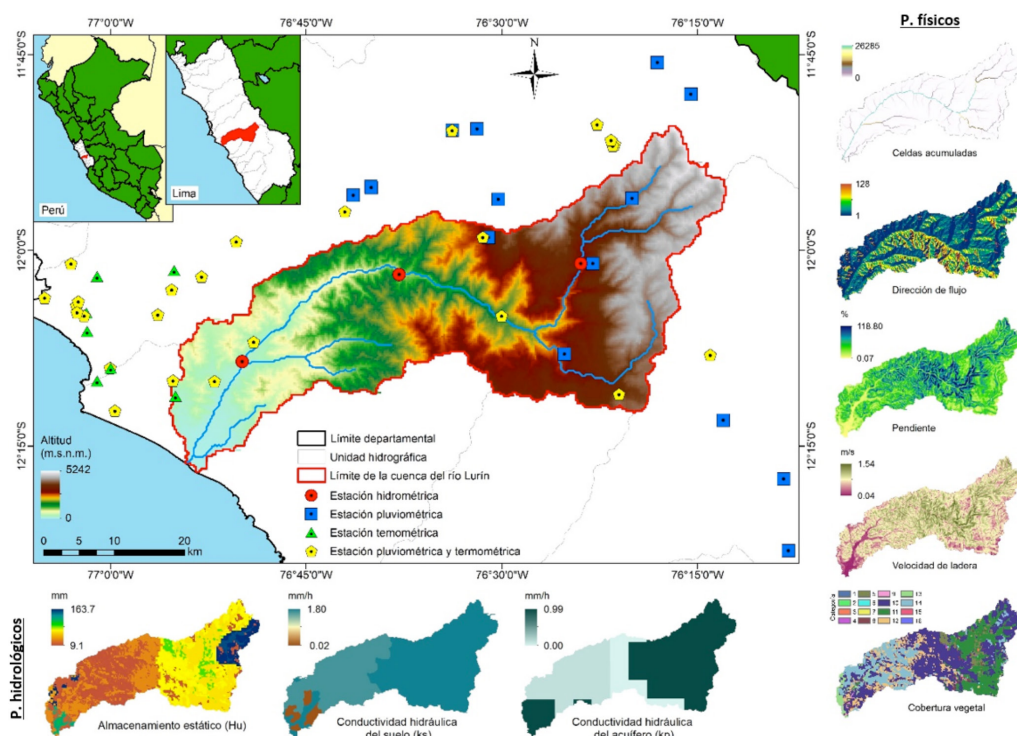


Figura 1. Distribución espacial de altitudes, estaciones hidrometeorológicas, parámetros hidrológicos y físicos en la zona de estudio.

P.: parámetros.

Tabla 1. Descripción de los modelos climáticos globales (MCG) seleccionados para este estudio.

Código (MCG+RCP)	MCG	Instituto	Resolución espacial* (km en 12° S)
CANES 2.6 CANES 4.5 CANES 8.5	CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCMA)	2,8°×2,8° (306×309) km
CCSM 2.6 CCSM 4.5 CCSM 8.5	CCSM4	National Center for Atmospheric Research (NCAR)	1,3°×0,9° (136×104) km
CNRM 2.6 CNRM 4.5 CNRM 8.5	CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques-Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique (CNRM-CERFACS)	1,4°×1,4° (153×155) km
CSIRO 2.6 CSIRO 4.5 CSIRO 8.5	CSIRO-Mk3.6	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO)	1,9°×1,9° (204×206) km
MPI 2.6 MPI 4.5 MPI 8.5	MPI-ESM-MR	Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M)	1,9°×1,9° (204×206) km
MRI 2.6 MRI 4.5 MRI 8.5	MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute (MRI)	1,1°×1,1° (123×124) km

* Fuente: ENES (2019).

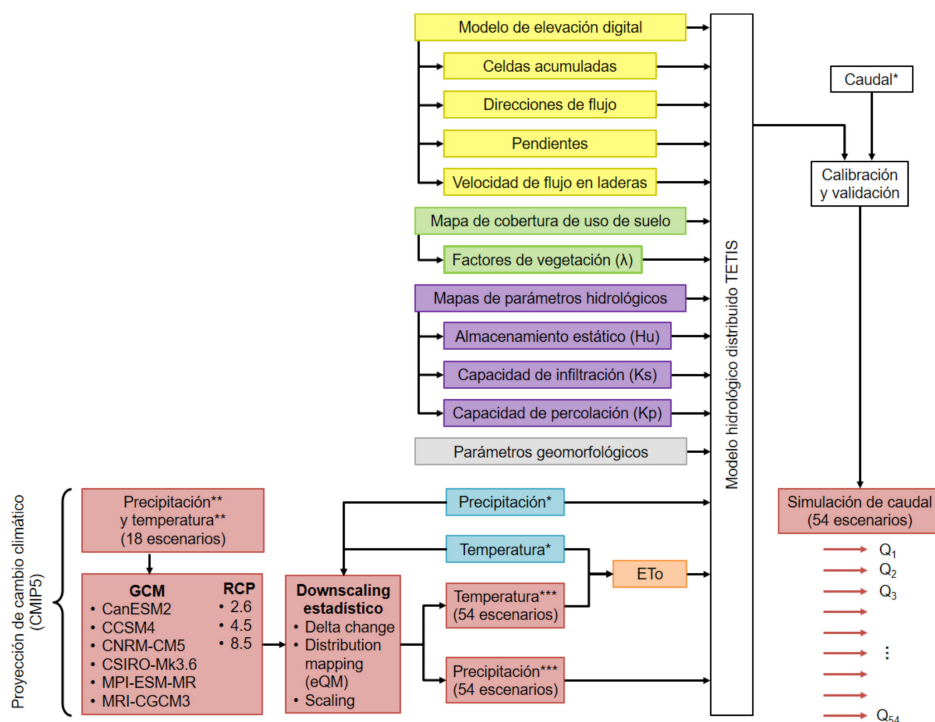


Figura 2. Flujo del procedimiento secuencial seguido en el estudio.

*histórica, **futura sin corregir, ***futura corregida. CMIP5: Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados Quinta Fase, GCM: modelo climático global, RCP: trayectoria de concentración representativa, ETo: evapotranspiración de referencia, Q: caudal.

con corrección del error por delta change, distribution mapping y scaling, según la metodología propuesta por Teutschbein y Seibert (2012), obteniéndose información climática mensual para el periodo 2051-2100 en las estaciones de precipitación y temperatura mostradas en la Figura 1. La evapotranspiración de referencia (ET₀) se estimó con el método de Hargreaves: $ET_0 = C * Ra * (T_m + 17,8) * (TD^{0,5})$, previamente ajustado el factor C para la cuenca seca (≤ 2000 msnm) y cuenca húmeda (> 2000 msnm), con información resultante del método de FAO-Penman-Monteith.

Se obtuvo la distribución espacial de la variación de la precipitación, temperatura y ET₀ proyectada para fines del siglo XXI respecto de la histórica (1950-2018), para 54 escenarios de cambio climático (6 MCG x 3 RCP x 3 métodos downscaling).

Con el modelo TETIS calibrado y validado, se ingresó la información climática mensual resultante del downscaling estadístico, con la cual se proyectó el caudal en diferentes puntos de la red hídrica de la cuenca (Tabla 2). Se analizó la variación mensual, anual y estacional del caudal proyectado y, finalmente, se obtuvieron distribuciones espaciales de caudal, según RCP.

Resultados y discusión

La eficiencia de la información histórica MCG obtenida por downscaling estadístico con corrección del error por delta change, distribution mapping y scaling (tres métodos), respecto de la observada en el periodo 1977-2005, se analizó con el diagrama de Taylor (Figura 3), usando la desviación estándar (DE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de correlación (CC). Las líneas punteadas negras, verdes y azules representan a la DE, RMSE y CC, respectivamente (Taylor, 2001). Los métodos delta change y distribution mapping muestran eficiencias similares en los seis MCG; en cambio, el método scaling presenta mejores eficiencias con los modelos climáticos CNRM (precipitación), CSIRO (temperatura máxima) y CCSM (temperatura mínima). Como la precipitación proyectada acumulada anual para el modelo climático CSIRO es cuatro veces mayor que los demás escenarios, se decidió excluir este MCG a fin de reducir la incertidumbre.

Proyección y obtención de patrones de cambio de precipitación y temperatura: en la Figura 4 se muestra que la precipitación acumulada

Tabla 2. Ubicación de los caudales proyectados en el río Lurín para fines del siglo XXI.

Nº	Punto de simulación	Zona	Este (m)	Norte (m)	Altitud (msnm)
1	Confluencia 1	Alta	348019	8674530	3073
2	Confluencia 2	Alta	348254	8674276	3096
3	Estación San Damián	Alta	347694	8671194	2868
4	Confluencia 3	Alta	341520	8661781	1838
5	Confluencia 4	Alta	341516	8661277	1809
6	Antioquía	Media	335519	8664033	1533
7	Estación Antapucro	Media	322449	8669492	1004
8	Cieneguilla	Baja	303016	8659533	269
9	Estación Manchay	Baja	300683	8657074	240
10	Confluencia 5	Baja	309772	8658031	698
11	Confluencia 6	Baja	309524	8657535	600
12	Quebrada Tinajas	Baja	300949	8656771	222
13	Bocatoma Lurín	Baja	295770	8647538	52
14	Confluencia 7	Baja	294017	8644035	20
15	Confluencia 8	Baja	294267	8643529	14
16	Desembocadura	Baja	293513	8643037	13

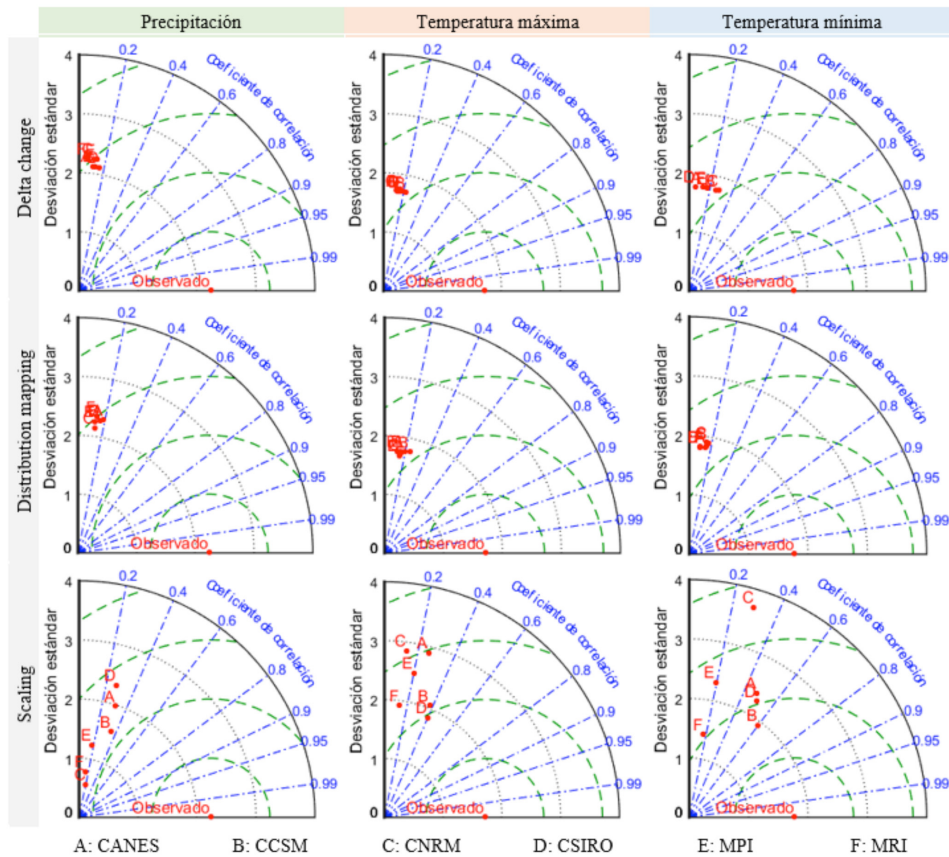


Figura 3. Eficiencia de la información histórica MCG obtenida por downscaling estadístico respecto de la información observada. Período de análisis: 1977-2005. eQM: distribution mapping.

anual para el periodo 2051-2100 respecto de la histórica (1963-2018) variaría de -19 a 1181% , con máximos en la zona baja de la cuenca en el escenario CNRM 8.5 (eQM). Estas variaciones estarían en un rango de $[-19$ a $869\%]$ RCP 2.6, $[-17$ a $998\%]$ RCP 4.5 y $[-17$ a $1181\%]$ RCP 8.5. Además, en la zona baja de la cuenca, la precipitación proyectada se incrementaría respecto de la histórica (17 mm) de 95 a 221 mm en los 45 escenarios de cambio climático; en la zona media se incrementaría respecto de la histórica (158 mm) de 172 a 467 mm también en los 45 escenarios; y en la zona alta se reduciría respecto de la histórica (544 mm) de 462 a 541 mm en 29 escenarios.

Al respecto, Salas *et al.* (2020) indican que el uso de los MCG a escala de cuenca (escalas pequeñas), generalmente ocasiona grandes incertidumbres debido a la dinámica de la circulación atmosférica que incluye el fenómeno de variabilidad de baja frecuencia. Este fenómeno

impacta principalmente en el calor del océano (Penduff *et al.*, 2018), con un incremento de su temperatura debido a la termodinámica del vapor de agua, que a su vez conduce a un aumento de la precipitación, y esto es lo que, probablemente, esté ocurriendo en la parte baja de la cuenca del río Lurín, cercana al océano Pacífico.

En la Figura 5 se muestra que la temperatura promedio anual para el periodo 2051-2100 respecto de la histórica (1950-2018) variaría de $-0,2$ a 11 °C, con máximos en la zona alta de la cuenca en el escenario MPI 8.5 (eQM). Estas variaciones estarían en un rango de $[-0,2$ a 7 °C] RCP 2.6, $[-0,1$ a 8 °C] RCP 4.5 y $[-0,1$ a 11 °C] RCP 8.5. Además, en la zona baja de la cuenca, la temperatura proyectada se mantendría o incrementaría respecto de la histórica (20 °C) de 20 a 26 °C; en la zona media se incrementaría respecto de la histórica (17 °C) de 18 a 24 °C; y en la zona alta, la temperatura proyectada también se incrementaría respecto de la



Figura 4. Distribución espacial de la variación porcentual anual de precipitación proyectada para fines del siglo XXI respecto de la histórica (1963-2018) para 45 escenarios de cambio climático. eQM: distribution mapping.

histórica (9 °C) de 13 a 20 °C, en los 45 escenarios de cambio climático para los tres RCP.

Obtención de patrones de ETo: en la Figura 6 se observa que la ETo acumulada anual para el periodo 2051-2100 respecto de la histórica (1950-2018) variaría de -25 a 26%, con máximos

en la zona alta de la cuenca en el escenario CCSM 8.5 (scaling). Estas variaciones estarían en un rango de [-12 a 19%] RCP 2.6, [-16 a 20%] RCP 4.5 y [-25 a 26%] RCP 8.5, observándose que en todos los escenarios, la ETo se reduciría en la zona baja de la cuenca. Además, en la zona baja de la cuenca,

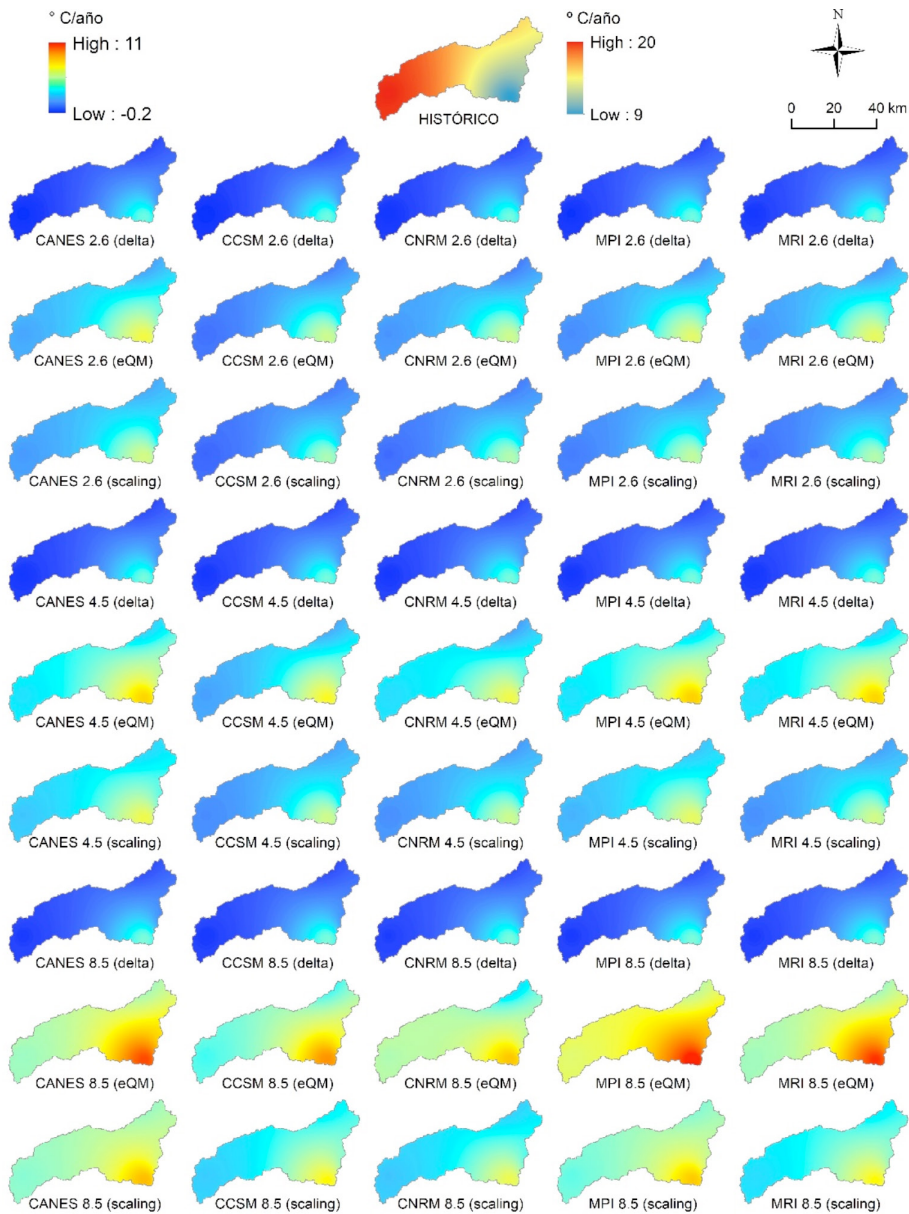


Figura 5. Distribución espacial de la variación anual de temperatura proyectada para fines del siglo XXI respecto de la histórica (1950-2018) para 45 escenarios de cambio climático. eQM: distribution mapping.

la ETo proyectada se incrementaría respecto de la histórica (985 mm) de 990 a 1149 mm en 34 escenarios de cambio climático; en la zona media se reduciría respecto de la histórica (1189 mm) de 948 a 1183 mm en 35 escenarios; y en la zona alta se incrementaría respecto de la histórica (1355 mm) de 1366 a 1643 mm en los 45 escenarios.

La calibración y validación del modelo hidrológico distribuido TETIS se muestra en la

Figura 7, con eficiencias de “buena” a “muy buena”, según Donigian (2002) y Moriasi *et al.* (2007).

Los parámetros de calibración denominados factores correctores se indican en la Tabla 3.

Proyección del caudal en la red hídrica de la cuenca, destacando la zona alta (San Damián), media (Antapucro) y baja (Manchay): en la Figura 8 se observa que en la estación San Damián, el caudal promedio mensual para el



Figura 6. Distribución espacial de la variación porcentual anual de evapotranspiración de referencia (ET₀) proyectada para fines del siglo XXI respecto de la histórica (1950-2018) para 45 escenarios de cambio climático. eQM: distribution mapping.

periodo 2051-2100 respecto del histórico (1969-1972) presentaría mayor variación en el periodo seco (mayo-septiembre) de $[-65$ a -38%] RCP 2.6 y $[-64$ a 0%] RCP 4.5; y en el periodo húmedo (octubre-abril), de $[-57$ a 26%] RCP 8.5, mostrando en promedio, una reducción en ambos periodos para los tres RCP. A nivel estacional, el caudal en San Damián presentaría mayor variación en

otoño de $[-83$ a -16%] RCP 2.6, $[-79$ a -1%] RCP 4.5 y $[-80$ a 16%] RCP 8.5, mostrando en promedio, una reducción del caudal para los tres RCP. Dicha reducción del caudal proyectado se debería a la reducción de la precipitación proyectada y al incremento de la ET₀ proyectada, dejando menor escorrentía disponible para la generación de caudal.

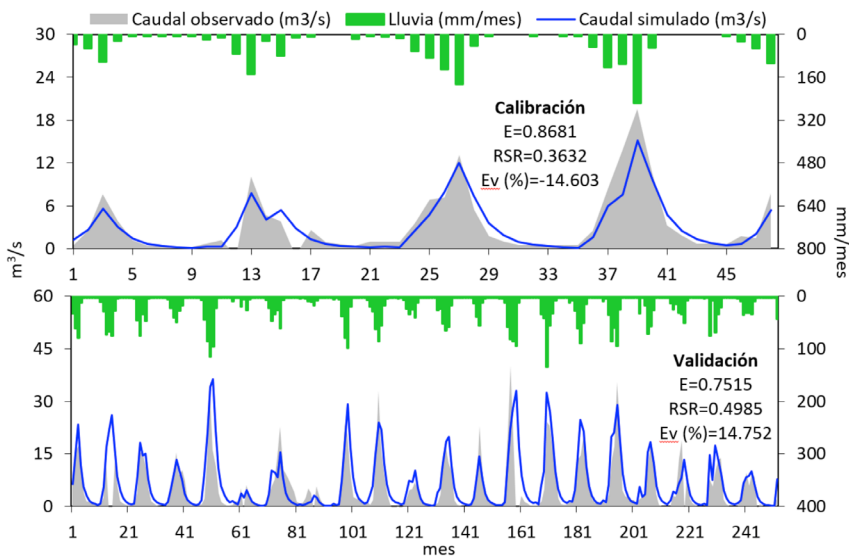


Figura 7. Calibración y validación mensual del modelo hidrológico distribuido TETIS en las estaciones San Damián y Manchay, respectivamente. Periodo de análisis: 1969-1972 y 1985-2005, respectivamente. E: Nash-Sutcliffe, RSR: error cuadrático medio normalizado, Ev (%): error en volumen en porcentaje.

Tabla 3. Factores correctores a nivel mensual en San Damián. Periodo de análisis: de enero de 1969 a diciembre de 1972.

Factor corrector (FC)		
FC-1	Almacenamiento estático	0,33400
FC-2	Evapotranspiración	0,38220
FC-3	Infiltración	0,03060
FC-4	Escurrentía directa	0,00010
FC-5	Percolación	0,00140
FC-6	Interflujo	326,84838
FC-7	Pérdidas subterráneas	0,00000
FC-8	Flujo subterráneo	440,23968
FC-9	Velocidad en los cauces	0,93410
Factor de interpolación de la lluvia con la cota (mm/m)		0,00003

P.: parámetros, msnm: metros sobre el nivel del mar.

En la Figura 9 se observa que en la estación Antapucro, el caudal promedio mensual para el periodo 2051-2100 respecto del histórico (1968-2018) presentaría mayor variación en el periodo seco de [69 a 390%] RCP 2.6, [84 a 437%] RCP 4.5 y [131 a 493%] RCP 8.5, mostrando en promedio, un incremento para los tres RCP. De la misma forma, a nivel estacional, el caudal en Antapucro presentaría mayor variación en primavera de [79 a 720%] RCP 2.6, [84 a 682%] RCP 4.5 y [88 a 686%] RCP 8.5, mostrando en promedio, un

incremento del caudal para los tres RCP. Dicho incremento del caudal proyectado se debería al aumento de la precipitación proyectada y a la reducción de la ETo proyectada, dejando mayor escurrentía disponible para la generación de caudal.

En la Figura 10 se muestra que en la estación Manchay, el caudal promedio mensual para el periodo 2051-2100 respecto del histórico (1950-2006) presentaría mayor variación en el periodo seco de [45 a 229%] RCP 2.6, [59 a 266%] RCP 4.5 y [101 a 286%] RCP 8.5, indicando en promedio, un incremento para los tres RCP. A nivel estacional, el caudal en Manchay presentaría mayor variación en primavera de [66 a 628%] RCP 2.6, [71 a 593%] RCP 4.5 y [75 a 604%] RCP 8.5, mostrando en promedio, un incremento del caudal para los tres RCP. Dicho incremento del caudal proyectado se debería al mayor aumento de la precipitación proyectada en comparación con el menor incremento de la ETo proyectada, dejando mayor escurrentía disponible para la generación de caudal.

En la Figura 11 se observa el caudal promedio anual proyectado para el periodo 2051-2100 en los puntos de simulación de la red hídrica de la cuenca (Tabla 2), con sus respectivos diagramas de cajas: el caudal promedio anual variaría de [0,8 a 3,5] m³/s, [4,6 a 7,8] m³/s y [6,6 a 9,6] m³/s en las zonas alta, media y baja, respectivamente. El caudal promedio anual para el periodo 2051-2100 en San Damián

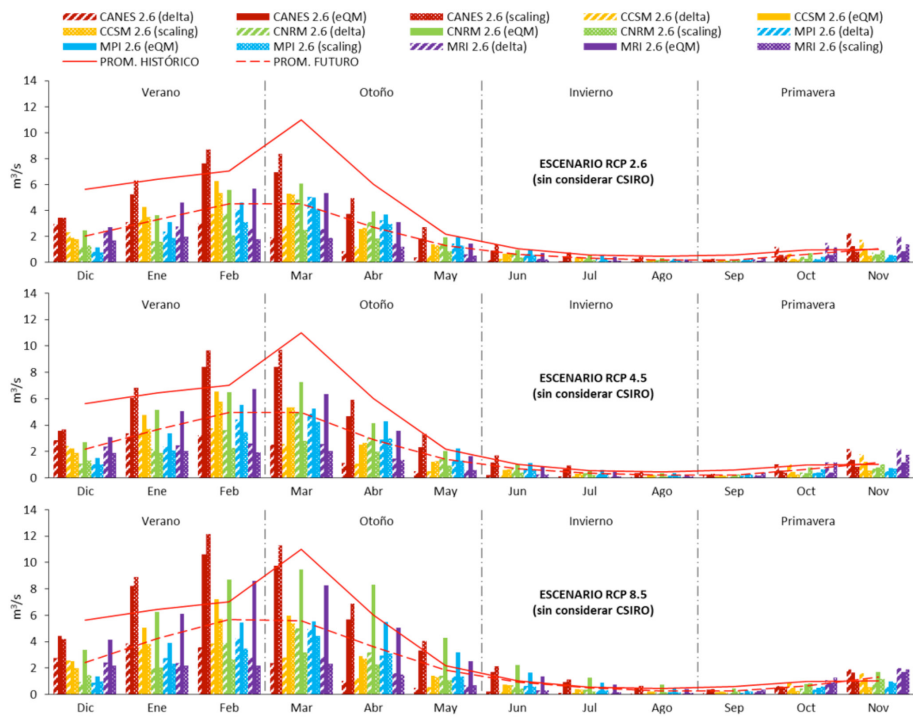


Figura 8. Caudal proyectado en la estación San Damián (2842 msnm) para fines del siglo XXI para 45 escenarios de cambio climático (15 escenarios por RCP). eQM: distribution mapping, PROM.: promedio.

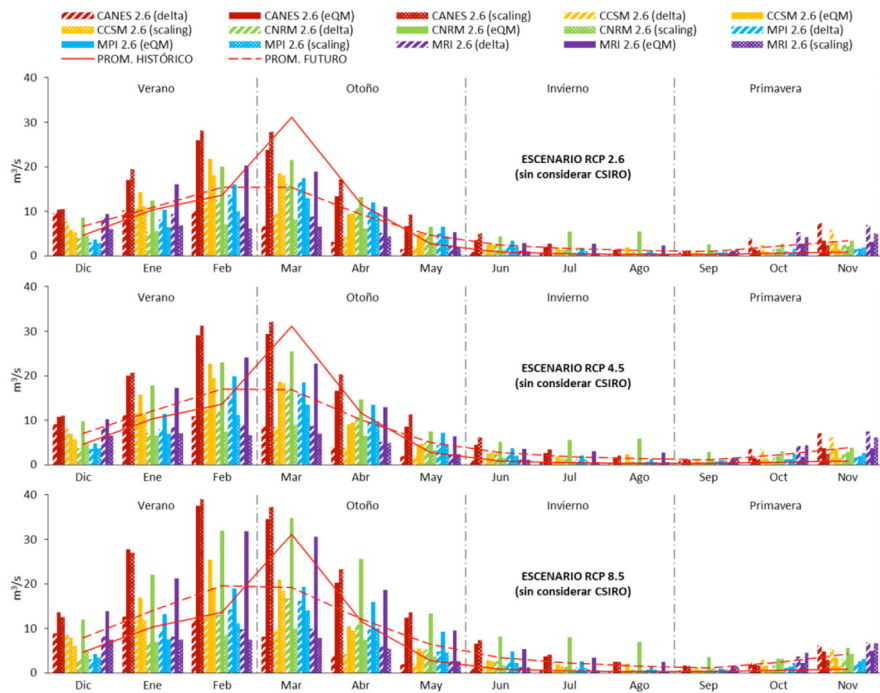


Figura 9. Caudal proyectado en la estación Antapucro (1300 msnm) para fines del siglo XXI para 45 escenarios de cambio climático (15 escenarios por RCP). eQM: distribution mapping, PROM.: promedio.

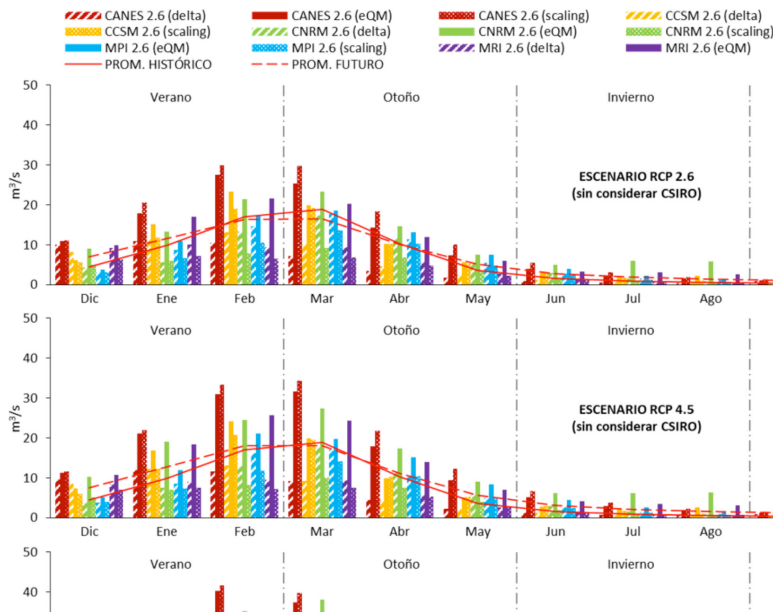


Figura 10. Caudal proyectado en la estación Manchay (229 msnm) para fines del siglo XXI para 45 escenarios de cambio climático (15 escenarios por RCP).

eQM: distribution mapping, PROM.: promedioeQM: distribution mapping, PROM.: promedio.

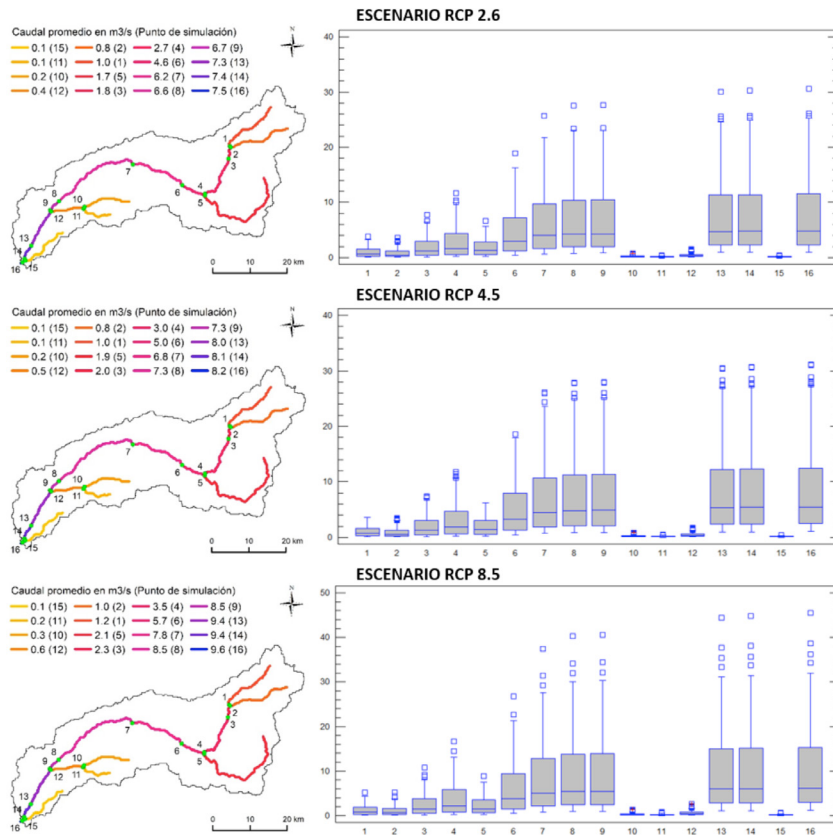


Figura 11. Distribución espacial y diagrama de cajas del caudal anual proyectado en la red hídrica del río Rurín para fines del siglo XXI según 45 escenarios de cambio climático (15 escenarios por RCP).

(zona alta), Antapucro (zona media) y Manchay (zona baja) respecto del histórico [3,6, 5,4 y 7,4] m³/s, respectivamente, variaría porcentualmente de [(-91 a 185), (-87 a 512), (-90 a 381)] RCP 2.6; [(-88 a 195), (-82 a 533), (-86 a 401)] RCP 4.5 y [(-86 a 298), (-78 a 743), (-83 a 563)] RCP 8.5, respectivamente. En promedio para los tres RCP, el caudal anual en la zona alta se reduciría de -50 al -36%, en la zona media aumentaría de 14 al 44% y en la zona baja variaría de -10 a 14%. Estos resultados brindarían oportunidades a los responsables de la toma de decisiones para aprovechar los recursos hídricos disponibles en mayor cuantía durante periodos húmedos, a fin de mitigar los efectos negativos de los periodos secos. Asimismo, para adoptar medidas orientadas a enfrentar la reducción de caudal proyectado en la zona alta de la cuenca, donde nace el río Lurín.

Conclusiones

Los recursos hídricos de la cuenca del río Lurín se evaluaron en condiciones climáticas cambiantes con seis Modelos Climáticos Globales (MCG), tres trayectorias de concentración representativas (2,6; 4,5 y 8,5) y tres métodos de corrección del error por downscaling estadístico. Para fines del siglo XXI en el escenario más crítico (RCP 8.5), se obtuvo que la precipitación, temperatura y evapotranspiración espacial anual variarían de -17 a 1181%, de -0,1 a 11 °C y de -25 a 26%, respectivamente, manifestando en promedio, un incremento en las tres variables climáticas.

El caudal anual proyectado para fines del siglo XXI en el RCP 8.5 variaría de -86 a 298%, de -78 a 743% y de -83 a 563% para las zonas alta, media y baja de la cuenca, respectivamente, obteniéndose que en la zona alta, el periodo húmedo (octubre-abril) variaría de -57 a 26%; y en las zonas media y baja, el periodo seco (mayo-septiembre) variaría de 131 a 493% y de 101 a 286%, respectivamente. El caudal anual se reduciría en el periodo húmedo en la zona alta y se incrementaría en el periodo seco en las zonas media y baja de la cuenca, debido a las diferentes variaciones de precipitación y ETo proyectadas en las distintas zonas de la cuenca del río Lurín.

Para fines del siglo XXI en los RCP 2,6; 4,5 y 8,5, el caudal anual en la zona alta se reduciría en promedio de -50 a -36%; en la zona media se incrementaría en promedio de 14 a 44%, pero en la zona baja de la cuenca, con mayor densidad poblacional, variaría en promedio de -10 a 14%. Por lo tanto, es necesario tomar medidas de mitigación frente a este cambio climático, para reducir los impactos negativos en la disponibilidad hídrica de la cuenca, de modo que el diseño y operación de sistemas de regulación hídrica sean más eficientes en el futuro.

Agradecimientos

Al proyecto “Sistema de gestión del recurso hídrico superficial y subterráneo para el uso seguro del agua ante escenarios de cambio climático en la cuenca del río Lurín” (Convenio de Financiamiento N° 0157-2017-FONDECYT).

Literatura citada

- Anjum, M.; Ding Y.; Shangguan, D.
Simulation of the projected climate change impacts on the river flow regimes under CMIP5 RCP scenarios in the westerlies dominated belt, northern Pakistan. *Atmospheric Research*, 227: 233-248. 2019.
- Autoridad Nacional del Agua del Perú.
2019. Diagnóstico inicial para el plan de gestión de recursos hídricos de las cuencas Chillón, Rímac, Lurín y Chilca. Lima, Perú. 151 p.
- Asurza, F.; Ramos, C.; Lavado, W.
2018. Evaluación de los productos Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y Global Precipitation Measurement (GPM) en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Huancané, Perú. *Scientia Agropecuaria*, 9(1): 53-62.
- Chapple, K.; Montero, S.
2016. From learning to fragile governance: Regional economic development in rural Peru. *Journal of Rural Studies*, 44: 143-152.
- Donigian, A.S.
2002. Watershed model calibration and validation: The HSPF experience. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2002(8): 44-73.
- Gütschow, J.; Jeffery, L.; Gieseke, R.; Günther, A.
2019. The PRIMAP-hist national historical emissions time series (1850-2017), v. 2.1. 2019. GFZ (Deutsches Geo Forschungszentrum) Data Services. <https://doi.org/10.5880/PIK.2019.018>.
- Hamel, P.; Valencia, J.; Schmitt, R.; Shrestha, M.; Piman, T.; Sharp, R.P.; Francesconi, W.; Guswa, A.J.
2020. Modeling seasonal water yield for landscape management: Applications in Peru and Myanmar. *Environmental Management*, 270: 110792.
- IPCC.
2018. Global Warming of 1.5 °C. Incheon, Intergovernmental Panel on Climate Change. South Korea. 616 p.

- Mahmood, R.; Jia, S.
2016. Assessment of impacts of climate change on the water Resources of the transboundary Jhelum River Basin of Pakistan and India. *Water*, 8: 246.
- Moriassi, D.N.; Arnold, J.G.; Van Liew, M.W.; Bingner, R.L.; Harmel, R.D.; Veith, T.L.
2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3): 885-900.
- Orozco, I.; Ramírez, A.I.; Francés, F.
2018. Modelación de los impactos del cambio climático sobre los flujos y almacenamientos en una cuenca de alta montaña. *Ingeniería del Agua*, 22(3): 125-139.
- Penduff, T.G.; Sérazin, S.; Leroux, S.; Close, J.-M.; Molines, B.; Barnier, L.; Bessières, L.; Terray, G. Maze.
2018. Chaotic variability of ocean heat content: Climate-relevant features and observational implications. *Oceanography*, 31(2): 63-71.
- Puertes, C.; González-Sanchis, M.; Lidón, A.; Bautista, I.; Del Campo, A.D.; Lull, C.; Francés, F.
2020. Improving the modelling and understanding of carbon-nitrogen-water interactions in a semiarid Mediterranean oak forest. *Ecological Modelling*, 420: 108976.
- Salas, D.J.; Anderson, L.-M.; Papalexioú, M.S.; Frances, F.
2020. PMP and Climate Variability and Change: A Review. *J. Hydrol. Eng.*, 2020, 25(12): 03120002.
- Taylor, K.E.
2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, 106(D7): 7183-7192. 2001.
- Teutschbein, C.; Seibert, J.
2012. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456-457: 12-29.
- Tostes, M.; Villavicencio, A.; Motta, C.
2019. Vulnerability Index Elaboration for Climate Change Adaptation in Peru. *European Journal of Sustainable Development*, 8(5): 102-114.
- Xue, Y.; Janjic, Z.; Dudhia, J.; Vasic, R.; De Sales, F.
2014. A review on regional dynamical downscaling in intraseasonal to seasonal simulation/prediction and major factors that affect downscaling ability. *Atmos. Res.* 147-148: 68-85.