



Efectos del cambio climático en el recurso hídrico de los países andinos

Climate change impacts on the water resources of Andean countries

del Jesus, M.^{a1}, Paz, J.^b, Navas, S.^{a2}, Turienzo, E.^{c1}, Díez-Sierra, J.^{a3}, Peña, N.^{c2}

^a Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidad de Cantabria - Avda. Isabel Torres, 15, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, 39011, Santander, España.

E-mail: ^{a1}manuel.deljesus@unican.es, ^{a2}salvador.navas@unican.es, ^{a3}javier.diez@unican.es

^b TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA): C/ Velázquez 64-66 2ª pl. E-28001, Madrid, España.

E-mail: jorge.paz@tecnalia.com.

^c TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA). Parque Tecnológico de Bizkaia, C/Geldo, Edificio 700, E-48160 Derio, Bizkaia España.

E-mail: ^{c1}elena.turienzo@tecnalia.com · ^{c2}nieves.pena@tecnalia.com.

Recibido: 26/07/2019

Aceptado: 23/10/2020

Publicado: 31/10/2020

Citar como: del Jesus, M., Paz, J., Navas, S., Turienzo, E., Díez-Sierra, J., Peña, N. 2020. Climate change impacts on the water resources of Andean countries. *Ingeniería del agua*, 24(4), 219-233. <https://doi.org/10.4995/la.2020.12135>

RESUMEN

Latinoamérica presenta una alta disponibilidad y un elevado volumen de recurso hídrico. Este hecho, combinado con una abrupta topografía, permite generar importantes aprovechamientos hidroeléctricos con estructuras relativamente reducidas, lo que ha hecho proliferar este tipo de explotaciones. De manera reciente, sin embargo, ha comenzado a manifestarse inquietud respecto a los efectos que el cambio climático pueda tener sobre las centrales hidroeléctricas, y cómo esto pueda afectar a la disponibilidad y distribución de energía eléctrica en los distintos países. En el presente trabajo presentamos la metodología y principales resultados obtenidos en el estudio *Vulnerabilidad al cambio climático y medidas de adaptación de sistemas hidroeléctricos en países andinos* que ha cubierto los sistemas hidroeléctricos de Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú. Focalizaremos nuestros esfuerzos en el análisis del recurso hídrico, paso previo al análisis de la evolución del recurso hidroeléctrico, a nivel regional, donde se han generado unas bases de datos homogéneas para toda el área de estudio mediante reconstrucción temporal y espacial, haciendo uso de técnicas de krigeado. También se ha procedido a homogeneizar la información sobre tipos de suelo y usos del suelo. La hidrología se ha resuelto con el modelo hidrológico semidistribuido VIC. Se ha analizado el periodo histórico 1980-2010, y se han generado proyecciones de cambio climático para el corto plazo (2011-2040), el medio plazo (2041-2070) y el largo plazo (2071-2100) para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 utilizados en el 5º informe del IPCC (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático). Se ha tenido en cuenta además la posible evolución socioeconómica y su impacto sobre los usos del suelo.

Palabras clave | energía hidroeléctrica; cambio climático; técnicas geoestadísticas; VIC; RCP.

ABSTRACT

Latin America is characterized by a highly available, large amount of water resources. This fact, combined with an abrupt topography allows the creation of important hydropower stations with relatively small structures, what has fostered this kind of infrastructures. Recently, however, some worries have started to appear related to the effects that climate change may have on hydropower stations, and how these effects may change the spatial distribution of energy generation in the region. In this work, we present a methodology and the main results obtained in the study Climate change vulnerability and adaptation measures of hydropower stations in Andean countries that has studied the hydropower systems of Bolivia, Colombia, Ecuador and Peru. The main focus of this work is on the regional analysis of the water resources, a previous step to the analysis of the evolution of hydropower resources, where homogeneous databases of hydroclimatic variables have been generated for the whole study area, making use of spatio-temporal reconstruction through Kriging. Land use and soil type information has also been homogenized for the whole study area. Hydrology has been resolved with the semi distributed hydrologic model VIC. We have analyzed the historic period 1980-2010 and have

generated climate change projections for the short term (2011-2040), the medium term (2041-2070) and the long term (2071-2100) for scenarios RCP4.5 and RCP8.5 of the 5th Assessment Report of the IPCC. We have also considered the socio-economic evolution and its impact on land use.

Key words | *hydropower energy; climate change; geostatistics; VIC; RCP.*

INTRODUCCIÓN

La demanda de energía eléctrica de los países andinos está registrando un crecimiento durante los últimos años muy ligado al desarrollo socioeconómico, y cuenta con proyecciones de crecimiento en los años venideros (Solarin y Ozturk, 2015). Gran parte de esta energía será satisfecha por plantas hidroeléctricas, que juegan un papel clave en los sistemas energéticos de estos países (Moreno et al., 2017; van der Zwaan et al., 2014), donde se han planificado o se están ejecutando importantes proyectos hidroeléctricos que conferirán a esta fuente de energía un papel aún más relevante, alterando el mapa energético de la región.

La generación hidroeléctrica depende de la cantidad de recurso hídrico disponible, por lo que su producción es muy sensible a los cambios de precipitaciones que puedan registrarse en sus cuencas. Fruto de esta situación, los gobiernos de estos países han iniciado el análisis de vulnerabilidad de diferentes proyectos piloto, destinados a identificar cómo el cambio climático puede alterar su operación y definir planes de adaptación (Turner et al., 2017; Zhang et al., 2018).

En la mayoría de los estudios que se han realizado hasta el momento, se han considerado fijos gran parte de los componentes del sistema, como los usos del suelo o las demandas de recursos hídricos. En dichos estudios generalmente se analiza la relación entre los diferentes componentes en la situación actual (e.g. relación lluvia - caudal, energía entregada - valor de esta, etc.), asumiendo que estas relaciones se mantendrán en el futuro. No obstante, este planteamiento puede ser una simplificación excesiva, especialmente en el momento en el que el objetivo de los trabajos sea la definición de medidas de adaptación, que pueden plantearse en cada uno de los componentes del sistema.

En este estudio, llevamos a cabo una evaluación de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos de los países andinos (Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia) mediante modelado numérico, como antesala de un análisis del recurso hidroeléctrico –no incluido en este trabajo–. Además de los cambios en las dinámicas atmosféricas, consideramos los cambios en los usos del suelo, ya que estos pueden tener un efecto determinante sobre las dinámicas hidrológicas y, por tanto, sobre el recurso hídrico.

ÁREA DE ESTUDIO Y FUENTES DE DATOS

Descripción del área de estudio

La zona de estudio, mostrada en la Figura 1, comprende las naciones de Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú, que comparten la característica común de presentar un fuerte incremento de elevación en sus vertientes oeste, desde el mar hacia la cordillera de los Andes que atraviesa a todos ellos, con una caída más suave hacia el este, con aportaciones a las cuencas del Amazonas y el Orinoco.

El clima de estos cuatro países está gobernado por varios factores. El primero de ellos son las fluctuaciones de la zona de convergencia (vientos alisios) o Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ). Esta zona de bajas presiones y precipitaciones de carácter convectivo presenta una acusada estacionalidad. Durante el mes de julio, la precipitación máxima continental se localiza al norte del Ecuador, mientras el sur de la cuenca amazónica experimenta su temporada seca. Hacia finales de octubre se produce una súbita migración de la ITCZ hacia el sur, transportando ingentes cantidades de precipitación a la parte central de Sudamérica durante los meses finales e iniciales del año.

También cabe destacar el fenómeno de El Niño - Oscilación del Sur (ENOS o ENSO por sus siglas en inglés) que se manifiesta como una anomalía de la temperatura superficial del mar con respecto a la temperatura media de las capas oceánicas superficiales alrededor del Pacífico tropical, cubriendo una franja en torno al Ecuador que disminuye en anchura desde las costas occidentales de Sudamérica hacia el este. Es un fenómeno oscilatorio cuasi cíclico que se mueve entre dos fases opuestas. Una

primera, que es la que normalmente recibe el nombre de fenómeno de El Niño, caracterizada por un calentamiento de la zona anteriormente nombrada, y una segunda, en la que en lugar de calentamiento tenemos un enfriamiento y que recibe normalmente el nombre de La Niña.

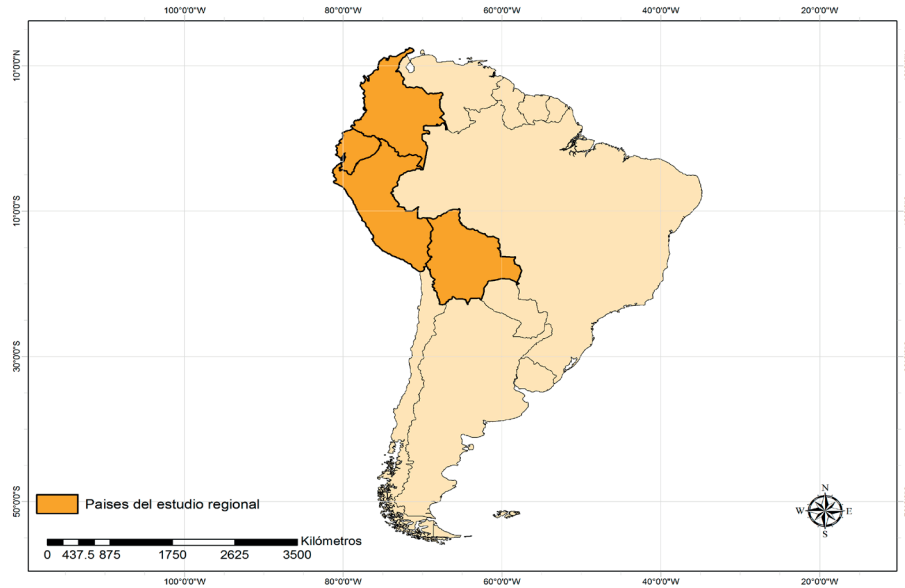


Figura 1 | Área de estudio.

Debido al acoplamiento entre el océano y la atmósfera, el calentamiento o enfriamiento del primero afecta a las dinámicas de la segunda, modificando los patrones de presiones, humedad y precipitación y por lo tanto afectando al ciclo hidrológico. Durante la fase cálida de ENSO (El Niño), se producen copiosas lluvias, especialmente en la zona norte de Perú y en Ecuador, que pueden dar lugar a inundaciones. La fase de La Niña tiene el efecto contrario. Cabe señalar que en Colombia los efectos son contrarios a los mencionados aquí. El Fenómeno de El Niño genera sequías y el de La Niña lluvias.

Finalmente, otro factor fundamental de control climático es la orografía, que condiciona fuertemente el desarrollo de lluvias convectivas y orográficas, generando zonas de concentración de precipitación y zonas de sombra. Es por ello por lo que es importante considerar las elevaciones de las áreas de estudio en la caracterización climática.

Información climatológica

Se ha hecho uso de información climática provista por los servicios meteorológicos de los países del área de estudio, así como de fuentes de datos públicas de información de precipitación histórica (Menne et al., 2012) y de reanálisis (Saha et al., 2010). Además, se ha llevado a cabo un control de calidad de las series proporcionadas por cada uno de los países para eliminar *outliers* y datos consecutivos no nulos repetidos más de 3 veces.

La distribución de estaciones no es regular, ya que en zonas situadas en la costa la densidad de estaciones es mayor que en la zona andina. La densidad de estaciones también varía dependiendo del país, Ecuador y Colombia tienen una gran densidad de estaciones, mientras que en Bolivia y Perú es más baja, como puede verse en la Figura 2.

Debido a la escasa información pluviométrica en la zona amazónica, se ha recurrido a utilizar la base de datos de precipitación diaria histórica global de la NASA (Menne et al., 2012) para obtener información de Brasil. Esta base de datos contiene información pluviométrica y termométrica de estaciones geolocalizadas a nivel mundial proporcionadas por los países. De esta forma se puede añadir información sobre las fronteras de los países y obtener una distribución de precipitación más aproximada a la realidad. La localización de los puntos utilizados de la base de datos puede observarse en la Figura 2.

El periodo de tiempo analizado en la serie de precipitación y temperatura ha sido desde 1981 hasta 2010, periodo de tiempo que se establece como referencia para posteriormente analizar la influencia del cambio climático. La elección de este periodo viene condicionada por el periodo histórico de referencia fijado por las instituciones nacionales de los diversos países para evaluar la disponibilidad del recurso hídrico a efectos de analizar el recurso hidroeléctrico.

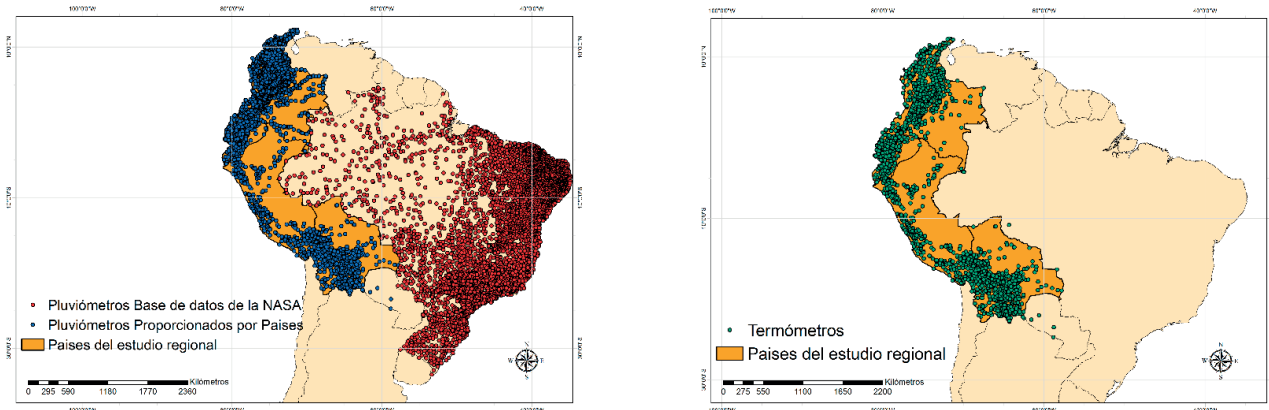


Figura 2 | Pluviómetros y termómetros utilizados.

Además de la precipitación y la temperatura, el modelo hidrológico VIC necesita la incorporación de otras variables climáticas adicionales, como son: la presión atmosférica, la radiación de onda corta, la radiación de onda larga, la presión de vapor y la velocidad del viento. Estas variables necesarias para el cálculo del balance de agua en la región de estudio, se obtienen de la base de datos global de reanálisis CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) (Fuka et al., 2014).

Información hidrológica

Para la calibración del modelo hidrológico es necesario utilizar series de caudal real con una cobertura temporal mínima del periodo de estudio, por esta razón, del total de afloros proporcionados por los servicios hidrológicos de cada país se han seleccionado aquellos con un mayor número de registros en continuo. Una vez que se tienen los afloros con mayor cobertura temporal, se escogen aquellos que se encuentran más cerca del punto de desagüe de la cuenca (Figura 3).

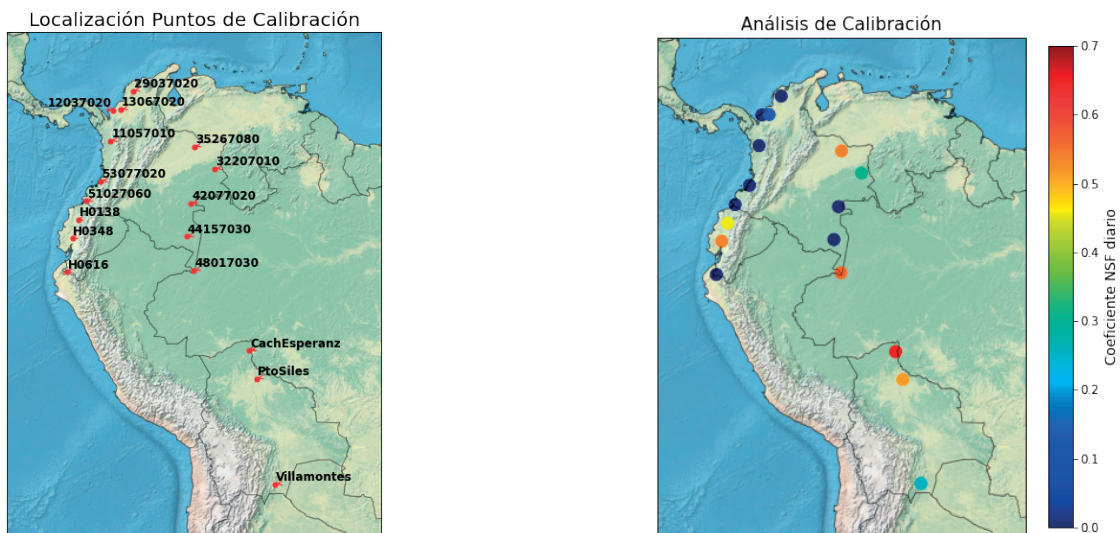


Figura 3 | Estaciones foronómicas utilizadas y análisis del coeficiente Nash-Sutcliffe a nivel diario durante el proceso de calibración.

Información sobre el territorio

Otra información necesaria para modelar hidrológicamente la zona de estudio, son las propiedades litológicas y edafológicas de las distintas capas de suelo existentes (Figura 4). Para ello, se ha recurrido a la base de datos *Harmonized World Soil Database v. 1.2* (Nachtergaele et al., 2009). Para caracterizar la tipología de suelo en los distintos países de estudio se utiliza la clasificación USDA con dos niveles obtenidos a partir de la base de datos definida anteriormente. A cada clase de suelo se le atribuyen una serie de propiedades que serán necesarias incluir en el modelado hidrológico.

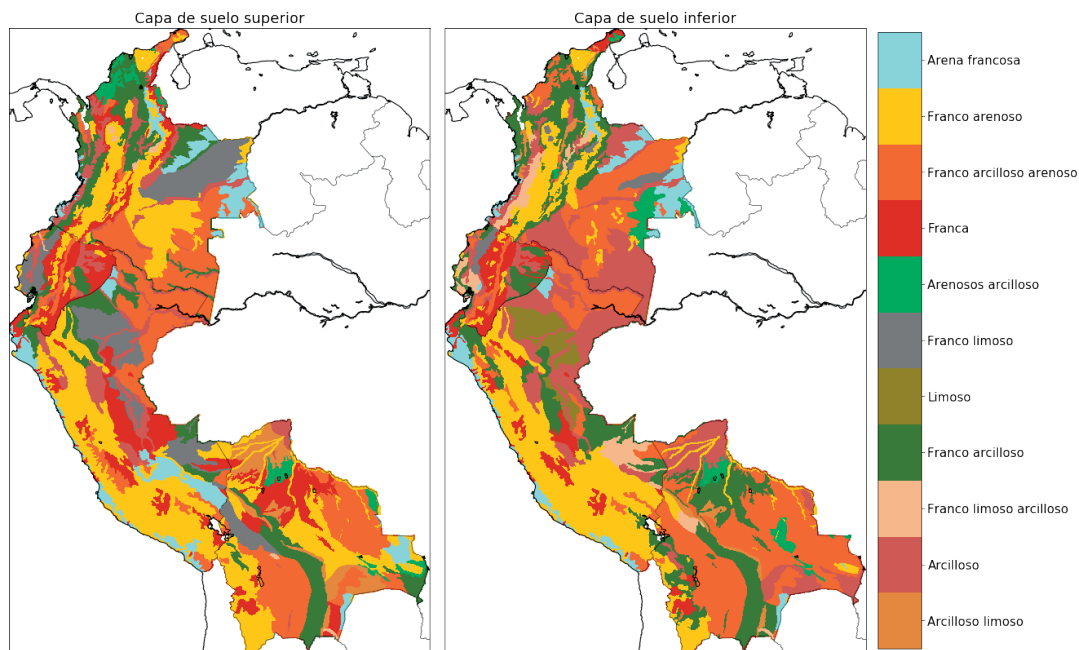


Figura 4 | Mapa de suelos para distintos niveles.

Las propiedades que definen cada una de las tipologías de suelo son el contenido de arcilla, el contenido de arena, la densidad aparente, la capacidad de campo, el punto de marchitez, la porosidad, la conductividad hidráulica y la pendiente de la curva de retención (Dept. of Civil and Env. Engineering University of Washington, 2018). Otras propiedades del suelo como la presión de burbujeo y la saturación residual se han obtenido a partir de otra base de datos (Rawls et al., 1982). Los valores obtenidos de las bases de datos constituyen la referencia -valores iniciales- para la simulación.

METODOLOGÍA

Reconstrucción de dinámicas climáticas - Precipitación

Una vez realizado el control de calidad y homogenización de los datos de precipitación, se ha procedido a realizar una interpolación espacial y temporal para generar la información sobre una malla de puntos distribuidos uniformemente sobre el área de estudio. La interpolación ha considerado la altitud y la distancia a las estaciones pluviométricas utilizadas. Tras el control de calidad, todos los datos resultantes se incluyen en el proceso de interpolación sin realizar ninguna selección de puntos.

La reconstrucción o relleno de las series observadas se ha realizado mediante krigeado. El proceso consta de dos pasos, el primero para estimar si en un punto determinado va a llover y el segundo para estimar la magnitud de dicha lluvia (Herrera et al., 2012). Para el primer paso se utiliza la técnica de krigeado indicador. Para el segundo paso se ha utilizado la técnica de krigeado universal, que utiliza la información pluviométrica observada como variable principal e introduce como deriva externa (*drift*) la elevación

de cada uno de los puntos, extraída de un MDT con una resolución de 1 km, obtenido de la base de datos global de HydroSheds (Lehner et al., 2008). La reconstrucción se realiza usando las librerías *sp* (<https://cran.r-project.org/web/packages/sp/sp.pdf>) y *gstat* (<https://cran.r-project.org/web/packages/gstat/gstat.pdf>) del software R.

Para evaluar los resultados de la interpolación se utiliza la técnica de validación cruzada. Esta técnica consiste en predecir la precipitación en un punto donde existe un pluviómetro, pero sin utilizar dicho pluviómetro en la interpolación. Después, se compara la predicción del modelo con las lecturas del pluviómetro para evaluar la calidad predictiva de la interpolación. Los parámetros estadísticos analizados para evaluar la calidad de la interpolación han sido: el coeficiente de correlación de Pearson ($\rho_{X,Y}$), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y el sesgo de los datos expresado en porcentaje (BIAS %).

La Figura 5 muestra la alta correlación existente en los pluviómetros de validación en Colombia y Ecuador; en el caso de Bolivia y Perú esta correlación disminuye debido a la cantidad de información pluviométrica de bases de datos globales utilizada en la interpolación.

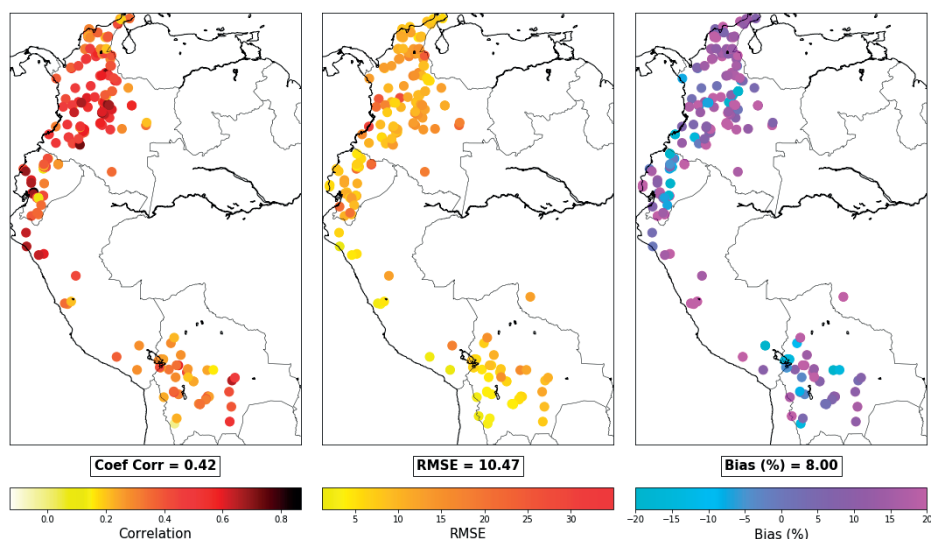


Figura 5 | Resultados estadísticos de la validación cruzada.

En ocasiones, las predicciones de los modelos de precipitación y escorrentía son insatisfactorias porque la variabilidad espacial en la precipitación está escasamente representada (Collischonn et al., 2008). Por esta razón existe la necesidad de contar para el análisis climático con una alta densidad de pluviómetros distribuidos por toda el área de estudio.

En la Figura 6 se muestra la precipitación media mensual distribuida en los países de estudio. En dicha figura se ha analizado la precipitación media mensual del período 1981-2010, para observar cómo cambia su distribución espacial y poder entender la variabilidad estacional en los países de estudio. Puede observarse claramente el ciclo anual, que es especialmente pronunciado en Bolivia y Perú. También se observa la gran heterogeneidad espacial de la distribución de precipitación, con zonas que concentran una gran cantidad de precipitación, como es la franja costera pacífica de Colombia, y otras zonas donde la precipitación es escasa, como por ejemplo la franja costera sur de Perú.

Reconstrucción de dinámicas climáticas - Temperatura

Un elevado número de estaciones termométricas de cada país muestra grandes irregularidades, incluyendo un gran número de huecos, cambios bruscos en la media de una misma serie en cortos periodos de tiempo, y un excesivo número de *outliers*. Además, la cobertura temporal es escasa en distintas localizaciones para poder analizar y reconstruir la distribución espacial y temporal, por lo que, tras el análisis previo realizado, se ha decidido utilizar datos de la base de datos de reanálisis global CFSR

(*Climate Forecast System Reanalysis*) para obtener la temperatura media diaria (Saha et al., 2010). Se elige utilizar esta información debido a la alta correlación existente con respecto a la temperatura real (Bao y Zhang, 2013).

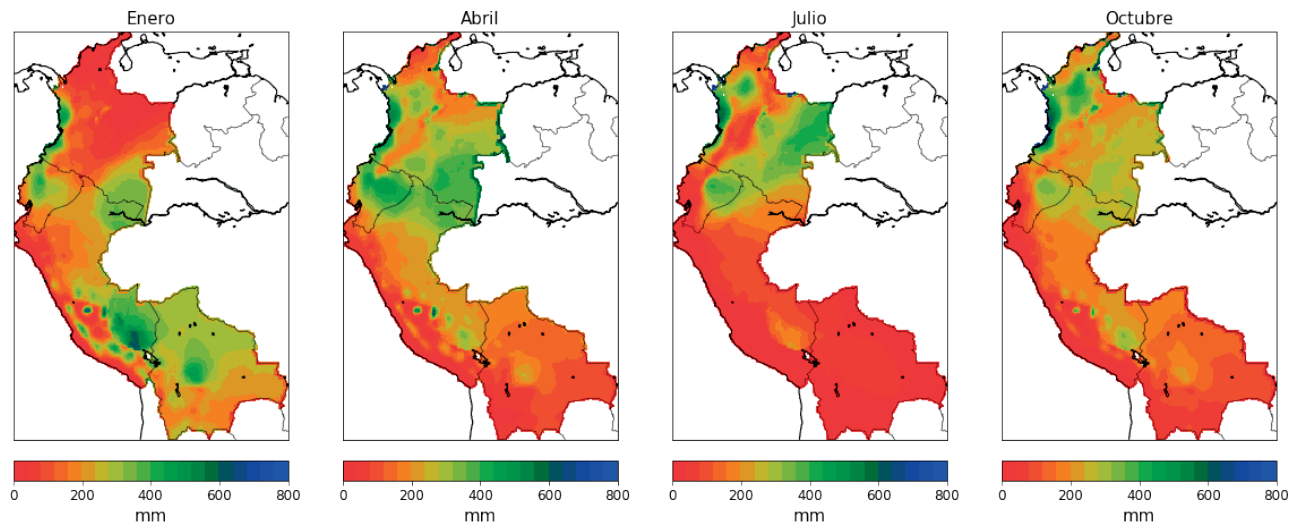


Figura 6 | Precipitación media mensual durante el período 1979-2010.

Adicionalmente, evaluando las series reales con más datos, se ha podido observar que existe siempre un cierto sesgo con respecto a los datos de CFSR, como se puede ver en la Figura 7. Esto es debido a que las temperaturas medias de los datos observados se obtienen calculando el valor medio entre la temperatura mínima y la máxima, sin embargo, la temperatura media de CFSR es obtenida a partir de las temperaturas proporcionadas cada 6 horas.



Figura 7 | Comparativa entre las series de temperatura observada y de CFSR.

En el área de estudio, la correlación varía dependiendo de la zona, como se puede apreciar en la Figura 8. Esto es debido a la calidad de los datos observados. En las estaciones que contenían datos homogéneos sin irregularidades en la serie, la correlación es cercana a 1 y el error se minimiza, mientras que en las estaciones en las que la series son anómalas el resultado de correlación y error empeora. Además, en la Figura 8 se comprueba que el error en la mayor parte de los casos es negativo rondando los -6°C , como consecuencia de obtener la temperatura media de forma diferente.

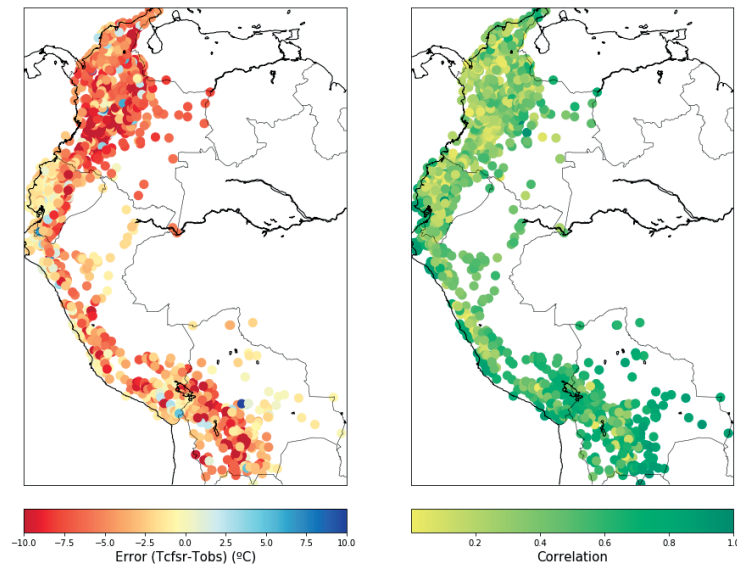


Figura 8 | Análisis comparativo entre las series de temperatura observada y de CFSR.

En la Figura 9 se presentan los mapas de la temperatura media mensual en los países de estudio. Al igual que en la precipitación, se ha analizado la temperatura media mensual del período 1981-2010 para observar la variación espacial y temporal a lo largo del año en los países de estudio. En el caso de los mapas de temperatura, puede observarse que los patrones espaciales son mucho menos cambiantes que en el caso de la precipitación. Se observa también la señal anual, pero está más localizada, y representa las fluctuaciones de la temperatura en localizaciones concretas, y no cambios en patrones espaciales a gran escala.

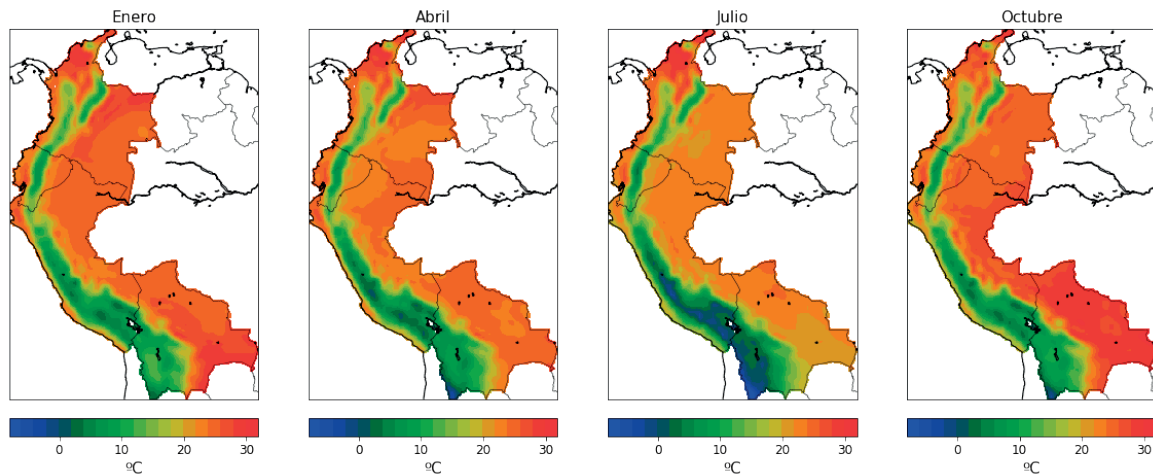


Figura 9 | Temperatura media mensual durante el período 1979-2010.

Homogeneización de los usos del suelo

Para definir los usos del suelo se han utilizado las distintas bases de datos proporcionadas por cada uno de los países en formato vectorial. Cada país tiene información de coberturas para distintos años, por lo que para establecer los usos del suelo del conjunto de los 4 países ha sido necesario seleccionar aquellas capas de los años más próximos entre sí para asegurar la homogeneidad de los mapas generados. Una vez seleccionada la información de usos del suelo para cada país, esta se ha reclasificado de forma

similar para todo ellos. La reclasificación se ha realizado de forma interpretativa, agrupando aquellos usos del suelo con respuestas hidrológicas similares.

Se han establecido 15 categorías de usos del suelo de referencia para toda el área de estudio. Cada tipología de vegetación que cubre la superficie de suelo está caracterizada por una serie de parámetros que van a condicionar el ciclo hidrológico en la misma. Una vez que los usos del suelo de cada país han sido homogeneizados, se realiza la unión de las 4 capas de información obtenidas tras la clasificación, de esta forma dicha información podrá incorporarse al modelo hidrológico y los resultados obtenidos para cada país podrán ser comparables entre sí. La distribución de usos del suelo armonizada, generada mediante ensamblaje de la información existente en los cuatro países se puede ver en la Figura 10.

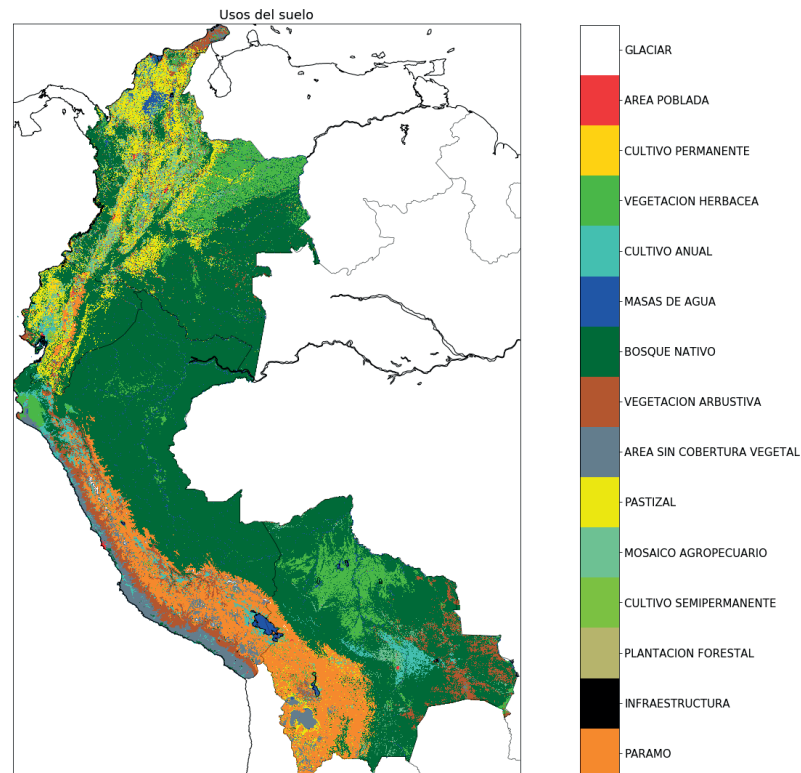


Figura 10 | Usos del suelo.

Calibración y validación del modelo hidrológico

A la hora de valorar la medida de la bondad de ajuste de los caudales procedentes de las simulaciones, se ha calculado a nivel diario el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y la desviación porcentual de volumen (PBIAS).

El coeficiente de eficiencia NSE es uno de los más usados en Hidrología para la comprobación de que los ajustes simulados son aceptables. El rango de variación del citado coeficiente de eficiencia se sitúa entre $-\infty$ y 1, correspondiendo este último valor a un ajuste perfecto. Con respecto a la medida de la desviación del volumen, expresa cuantitativamente la relación entre el volumen del hidrograma observado y el simulado. El ajuste perfecto indica un valor de PBIAS=0, por lo que en el proceso de calibración se debe buscar el valor más bajo del mismo. Esta medida de bondad de ajuste es adecuada para análisis mensuales y anuales del balance de masa que se pretende obtener en la cuenca de análisis objeto de este estudio.

Valores positivos del coeficiente PBIAS, indican infraestimación de los valores de caudales simulados por el modelo. Por el contrario, valores negativos del mismo indican sobreestimación de los caudales simulados por el modelo con respecto a los observados en las estaciones utilizadas durante el proceso de calibración (Moriassi et al., 2007).

En función de la combinación del valor de dichos coeficientes (NSE y PBIAS), se pueden distinguir distintos niveles de calidad del ajuste, según se indica en la Tabla 1:

Tabla 1 | Niveles de calidad del ajuste a nivel diario, según el valor del coeficiente de NSE y PBIAS (Moriasi et al., 2007).

CALIDAD DE AJUSTE	NSE	PBIAS (%)
Excelente	$0,75 < \text{NSE} \leq 1,00$	$\text{PBIAS} \leq \pm 10$
Buena	$0,65 < \text{NSE} \leq 0,75$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} \leq \pm 15$
Aceptable	$0,50 < \text{NSE} \leq 0,65$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} \leq \pm 25$
No aceptable	$\text{NSE} \leq 0,50$	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$

Calibrado y validado el modelo, los parámetros óptimos han sido aplicados para la proyección de caudales actual para la línea base. En la Figura 3 se muestran los coeficientes de NSE obtenidos al nivel diario en cada uno de los aforos utilizados. En la Figura 11 se muestra un ejemplo del análisis comparativo entre la serie de caudales real y simulado en una localización determinada durante el proceso de calibración. Aunque durante el proceso de calibración algunos valores del coeficiente NSE entraría en el rango “No aceptable” según la Tabla 1, esto es en gran medida debido al tamaño de celda empleado, que en ocasiones impide capturar la configuración real en las confluencias y por tanto capturar los caudales reales. Se capta la variabilidad temporal pero los valores absolutos pueden situarse por encima o por debajo del caudal real. Esta limitación en la calibración puede asumirse para este estudio, porque se trata de evaluar el cambio relativo y no únicamente los valores absolutos del recurso.

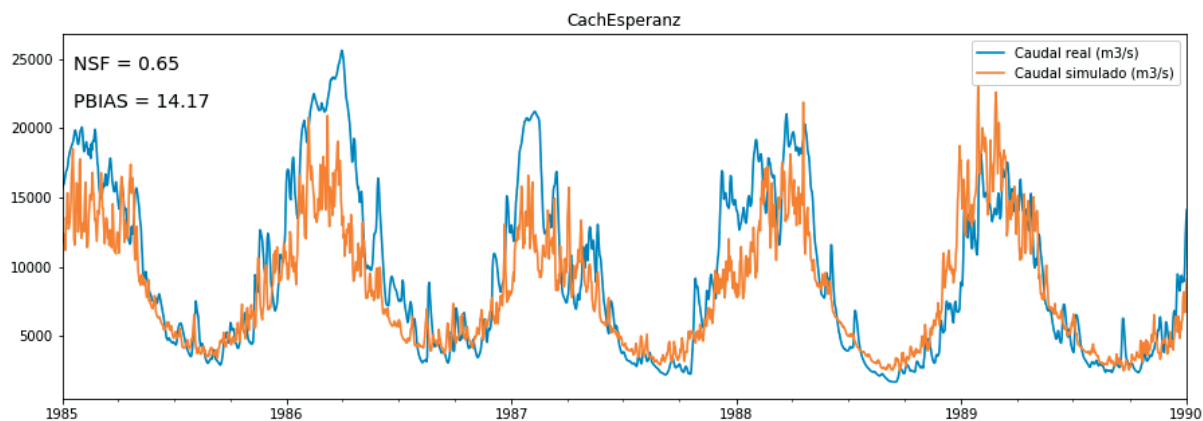


Figura 11 | Calibración del aforo CachEsperanz.

Incorporación del cambio climático

Para evaluar el efecto del cambio climático en el régimen de caudales se utilizan los resultados de modelos GCM (*General Circulation Model*), que proporcionan proyecciones climáticas. Estos modelos simulan numéricamente las interacciones de la atmósfera, los océanos, el relieve terrestre y el hielo. Se utilizan para el estudio de las dinámicas del sistema climático con el propósito de obtener proyecciones del clima futuro. Los principales forzamientos de los GCM para generar proyecciones a futuro son la radiación solar y las concentraciones de gases y aerosoles, tanto de origen antropogénico como natural (gases de efecto invernadero, aerosoles provenientes de erupciones volcánicas, quema de biomasa, y contaminación).

La incertidumbre asociada a la posible evolución futura del sistema socioeconómico global, y por tanto de las emisiones de gases en el futuro, se modela mediante el uso de rutas de concentración representativas o *Representative Concentration Pathways* (RCP), escenarios sintéticos de concentración de gases de efecto invernadero (principalmente vinculadas al desarrollo industrial y energético) y cambios en el uso del suelo (generados por deforestación, desarrollo agrícola, etc.) que proporcionan situaciones de referencia para la simulación climática de acuerdo a distintas situaciones plausibles de desarrollo socioeconómico. En el presente

estudio se usan el RCP 4.5 y el RCP 8.5. que representan respectivamente una evolución relativamente optimista y otra pesimista de los factores que determinan la evolución del cambio climático.

Los cambios que reflejan las proyecciones atmosféricas de los GCM para cada escenario, representan la incertidumbre asociada a la evolución del sistema socioeconómico y climático. Estas representaciones cuantitativas de la incertidumbre tienden a propagarse a los elementos de interés mediante modelos de impacto (Tebaldi y Knutti, 2007). Por ejemplo, los modelos de gestión de los recursos hídricos, de los cultivos o los económicos pueden ser utilizados para estudiar las estrategias de toma de decisiones.

Las distintas proyecciones de cambio climático han sido obtenidas del conjunto de datos de proyecciones diarias de *Global Earth Exchange* de la NASA (NEX-GDDP) compuesto por escenarios climáticos para todo el mundo que se derivan de las ejecuciones de GCM realizadas en la Fase 5 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5) y en dos de los cuatro escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. Las ejecuciones CMIP5 se desarrollaron en apoyo del Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC AR5). El conjunto de datos NEX-GDDP incluye proyecciones a escala reducida para RCP 4.5 y RCP 8.5 de los 21 modelos. Cada una de las proyecciones climáticas incluye la temperatura máxima diaria, la temperatura mínima y la precipitación para los períodos de 1950 a 2100. La resolución espacial del conjunto de datos es de 0,25 grados (~25 km×25 km). Se ha utilizado la técnica de las deltas (cambios absolutos para la temperatura y relativos para la precipitación) para la corrección del sesgo en los modelos climáticos. Una descripción completa del método se puede encontrar en (Charron, 2016).

Actualización de los usos del suelo

Los escenarios de usos del suelo se han generado a partir de la cartografía facilitada por cada uno de los países, que se ha empleado para generar una cuadrícula uniforme empleando la clasificación unificada anteriormente descrita.

Los escenarios para las próximas décadas se han generado considerando las tendencias aportadas por la Ruta de Desarrollo Socioeconómico SSP2 (Popp et al., 2017) y empleando una técnica de autómatas celulares (Benenson y Torrens, 2004). En Colombia y Ecuador es posible evaluar las tendencias históricas de cambios de usos del suelo. Estas tendencias son coherentes con los escenarios propuestos para las próximas décadas, aunque las tendencias más marcadas (crecimiento urbano y deforestación) se verán moderadas a medida que avance el siglo XXI. La Figura 12 muestra con trazo sólido las tendencias registradas en Ecuador a partir de la información histórica facilitada por el Sistema Único de Información Ambiental (SUIA) y, con trazo discontinuo, los escenarios futuros generados a partir de la Ruta de Desarrollo Socioeconómico SSP2.

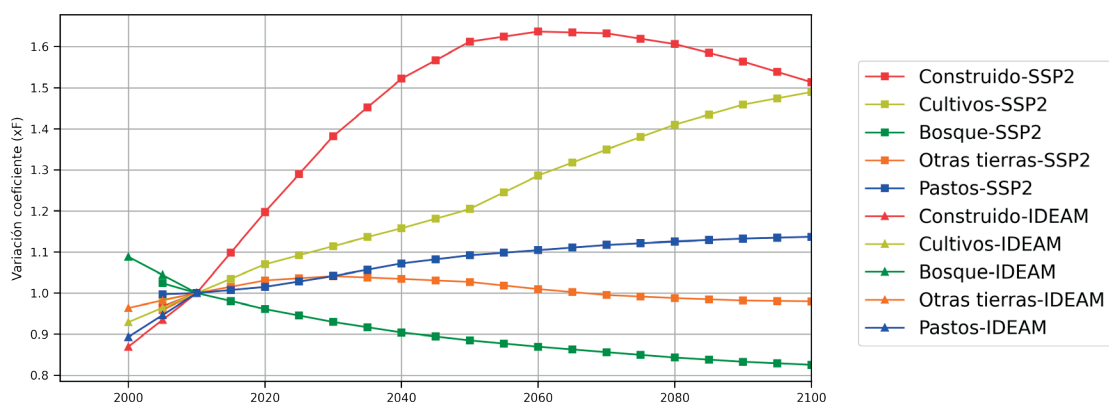


Figura 12 | Proyecciones de usos del suelo para Ecuador.

Estas tendencias se transforman en mapas de cambio de usos del suelo mediante la utilización de autómatas celulares cuyas reglas permiten compatibilizar los cambios a gran escala con el mantenimiento de las relaciones locales de vecindad.

RESULTADOS

Efectos del cambio climático sobre la precipitación y la temperatura

Para analizar cómo influye el cambio climático en la precipitación y temperatura se han utilizado figuras como las que se presentan a continuación (Figura 13). De esta forma se puede observar cómo es la distribución espacial de los cambios que se producirán en el futuro para los escenarios analizados.

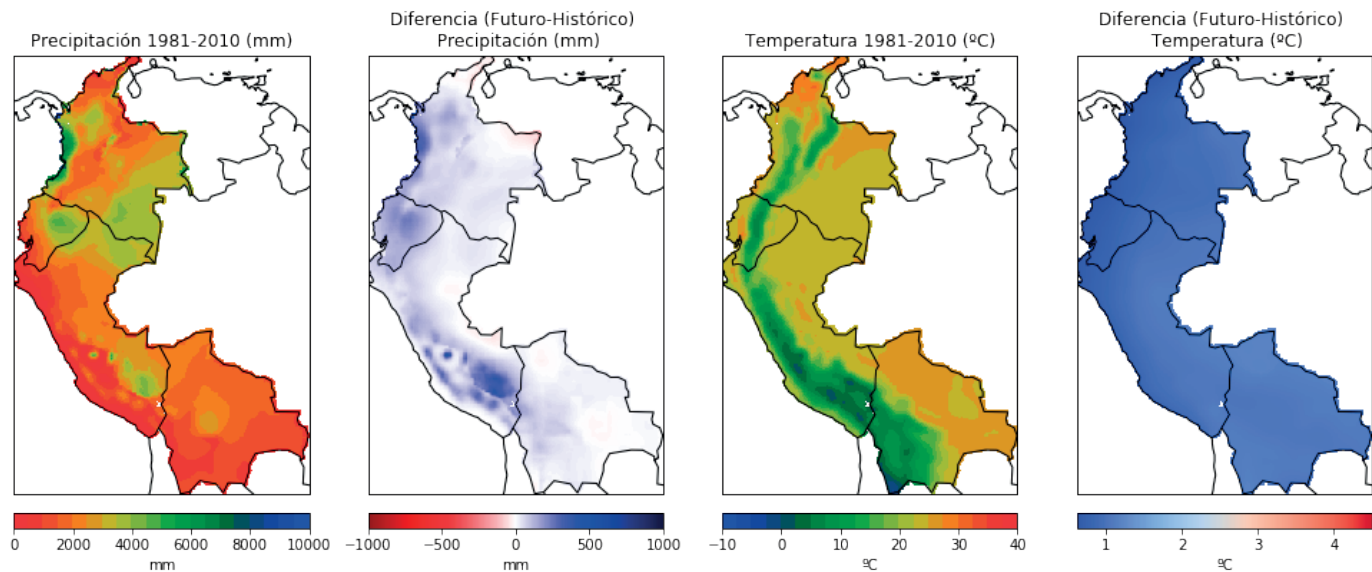


Figura 13 | Variación de la precipitación y temperatura para el escenario 2011-2040 RCP 4.5.

En todos los períodos analizados los mayores incrementos de precipitación respecto de la línea base se producen en el RCP 8.5, llegando a observarse en algunos puntos incrementos de la precipitación media anual del orden del 15% en el corto plazo y de hasta el 20% en el largo plazo en la zona más occidental de los países de estudio. También existen zonas donde se producirá un decremento que va desde el 5% en el medio plazo hasta el 15% a largo plazo en la zona más septentrional de Colombia y en la parte central de Bolivia. Los mayores incrementos para el RCP 4.5 se producen en la cordillera de los Andes entre Perú y Bolivia, mientras que los menores incrementos se producen en Colombia, Bolivia y Perú. Se aprecia una ligera disminución en la zona norte de Colombia y en la zona amazónica de Bolivia y Perú.

Se observan los mayores incrementos en la temperatura media en el RCP 8.5, llegando a alcanzar incrementos de 1 °C en el corto plazo y de hasta 3 °C en el largo plazo. El incremento de temperatura para el RCP 4.5 es prácticamente similar en toda el área de estudio; en la zona colindante con el océano Pacífico el incremento es menor, mientras que hacia el interior de la zona amazónica el incremento comienza a ser ligeramente mayor. Sin embargo, para el RCP 8.5 el incremento en la zona amazónica comienza a ser mayor que en la zona del Pacífico y no es tan uniforme como la distribución de temperatura para el RCP 4.5.

Efectos del cambio climático en los caudales

Se han obtenido las proyecciones de caudales como cambios sobre la situación actual (1981-2010) en cada uno de los países de la zona de estudio (Figura 14).

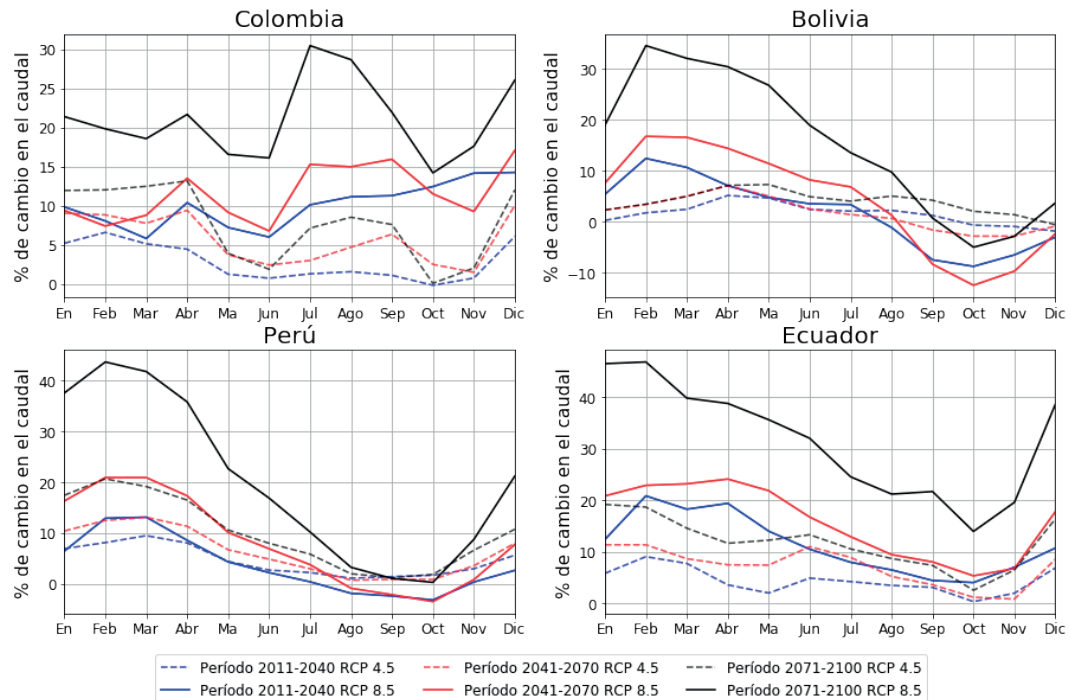


Figura 14 | Cambio porcentual medio del caudal medio mensual en cada uno de los países estudiados para el corto plazo (líneas azules), el medio plazo (líneas rojas) y el largo plazo (líneas negras), bajo el escenario RCP4.5 (líneas punteadas) y el RCP8.5 (líneas sólidas).

La Figura 14 muestra el cambio porcentual medio en cada país de los caudales medios mensuales en distintos periodos horizonte bajo los escenarios de cambio climático considerados. Se aprecian cambios generalizados en todos los países. En algunos casos, como en Colombia los cambios son bastante homogéneos a lo largo del tiempo, mientras que en Bolivia y Perú presentan una marcada estacionalidad. Las reducciones son prácticamente despreciables, concentradas en los meses de septiembre, octubre y noviembre, y quedan totalmente compensadas por los incrementos en otras épocas del año. Este cambio en la estacionalidad de los caudales puede requerir cambios en las políticas de explotación para adaptarse a los cambios inducidos por el cambio climático. Los cambios proyectados en el recurso van a ser aumentos importantes, de hasta el 40% en algunos puntos; mayores para el escenario RCP 8.5 que para el RCP 4.5, y aumentando hacia finales de siglo, salvo en los meses de octubre y noviembre en Colombia, en que esta ordenación se pierde.

CONCLUSIONES

De forma general, la tendencia que se aprecia es un incremento en la proyección de los caudales en la mayor parte de los puntos estudiados en los escenarios analizados. Este incremento viene producido por un aumento de la escorrentía generada por el aumento en la precipitación ligado al cambio climático. Es importante tener en cuenta que los aumentos de caudal pueden ser superlineales en relación a los cambios de precipitación, es decir, que a una duplicación de la precipitación le puede corresponder un cambio de uno a seis veces en el caudal relativo (Karl y Riebsame, 1989).

El cambio en el régimen de caudales no afecta únicamente a los valores medios, sino también a los valores mínimos y máximos. El cambio climático puede provocar el desplazamiento temporal de las estaciones húmeda y seca, su cambio de duración, y la modificación de la humedad media del suelo debido al cambio en la evapotranspiración de la vegetación. Estos cambios además de afectar a los valores medios de los caudales pueden afectar a los valores mínimos y máximos del caudal medio. Puede observarse que la tendencia general es hacia el aumento de los caudales medios máximos y mínimos, inducido por el incremento generalizado de las precipitaciones.

Estos aumentos de los valores máximos y mínimos del caudal medio podrían facilitar la aparición de eventos de inundación, en función de cómo varíen los valores extremos de la precipitación y el caudal. Sin embargo, es importante no confundir los valores máximos y mínimos del caudal medio, con los extremos máximo y mínimo del caudal, que son a los que normalmente nos referimos al hablar de valores extremos. El análisis de cambio climático realizado es adecuado para el estudio de las variaciones del caudal medio, pero no permite discernir el comportamiento extremo de las cuencas, entre otros motivos porque los modelos climáticos no capturan adecuadamente la información de los extremos.

Otro elemento importante inductor de cambios en el caudal sería la fusión de la nieve, y zonas de glaciación, debido al incremento de temperaturas. El efecto inducido por la fusión de la nieve es menos súbito que el de la precipitación, ya que no afecta a la escorrentía sino al flujo base. Este efecto puede tener una mayor repercusión sobre el aumento de los valores mínimos del caudal medio que la generación de caudal por escorrentía. La atribución concreta, sin embargo, dada la amplitud del área de estudio y el tipo de modelo impuesto por la misma, es complicada y por tanto tan sólo se puede destacar su intervención en los cambios sin poder proporcionar su importancia relativa, que será variable además en función de las condiciones de cada localización.

Considerando la importancia de los cambios previstos y su marcada estacionalidad, con meses en los que los caudales se ven incrementados frente a otros en los que los promedios se mantienen cercanos a los valores históricos o incluso se reducen, es posible afirmar que el recurso hídrico de la región se ve marcadamente modificado y, con carácter general, incrementado.

A partir de estos resultados, sería necesario analizar el efecto sobre el recurso hidroeléctrico. La regulación y la interconexión del sistema energético puede ayudar a suavizar los efectos de los cambios analizados sobre el recurso hídrico, aunque el incremento general de este parece indicar una posible evolución positiva del recurso hidroeléctrico. Sin embargo, el cambio en la estacionalidad puede dificultar la regulación e incluso incrementar los procesos erosivos y por tanto, el aterramiento de los embalses, complicando la operativa y reduciendo la eficiencia de los aprovechamientos hidroeléctricos. Por tanto, resulta imprescindible llevar a cabo un análisis detallado del sistema hidroeléctrico para obtener conclusiones robustas, si bien, en base a lo observado sobre el recurso, esta tarea puede afrontarse con cierto optimismo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y a la Organización Latinoamericana de la Energía (OLADE) la financiación aportada para la realización del estudio. Manuel del Jesus, Salvador Navas y Javier Díez-Sierra agradecen, además, a la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) la financiación aportada a través del proyecto BIA2016-78397-P (AEI/FEDER, UE).

REFERENCIAS

- Bao, X., Zhang, F. 2013. Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau. *Journal of Climate*, 26(1), 206-214. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00056.1>
- Benenson, I., Torrens, P. 2004. *Geosimulation: Automata-Based Modeling of Urban Phenomena*. John Wiley & Sons Limited. <https://doi.org/10.1002/0470020997>
- Charron, I. 2016. A Guidebook on Climate Scenarios: Using Climate Information to Guide Adaptation Research and Decisions, 2016 Edition. *Ouranos*, 94 p.
- Collischonn, B., Collischonn, W., Tucci, C.E.M. 2008. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology*, 360(1-4), 207-216. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2008.07.032>
- Dept. of Civil and Env. Engineering University of Washington. 2018. Variable Infiltration Capacity (VIC). Macroscale Hydrologic Model. Obtenido de <https://vic.readthedocs.io/en/master/Documentation/Drivers/Classic/SoilParam/>

- Fuka, D.R., Walter, M.T., Macalister, C., Degaetano, A.T., Steenhuis, T.S., Easton, Z.M. 2014. Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrological Processes*, 28(22), 5613-5623. <https://doi.org/10.1002/hyp.10073>
- Herrera, S., Gutiérrez, J.M., Ancell, R., Pons, M.R., Frías, M.D., Fernández, J. 2012. Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *International Journal of Climatology*, 32(1), 74-85. <https://doi.org/10.1002/joc.2256>
- Karl, T.R., Riebsame, W.E. 1989. The impact of decadal fluctuations in mean precipitation and temperature on runoff: A sensitivity study over the United States. *Climatic Change*, 15(3), 423-447. <https://doi.org/10.1007/BF00240466>
- Lehner, B., Verdin, K., Jarvis, A. 2008. New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos*, 89(10), 93-94. <https://doi.org/10.1029/2008EO100001>
- Menne, M.J., Durre, I., Vose, R.S., Gleason, B.E., Houston, T.G. 2012. An overview of the global historical climatology network-daily database. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29(7), 897-910. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00103.1>
- Moreno, R., Ferreira, R., Barroso, L., Rudnick, H., Pereira, E. 2017. Facilitating the Integration of Renewables in Latin America: The Role of Hydropower Generation and Other Energy Storage Technologies. *IEEE Power and Energy Magazine*, 15(5), 68-80. <https://doi.org/10.1109/MPE.2017.2708862>
- Moriasi, 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. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nachtergaele, F., Velthuizen, H. Van, Verelst, L., Batjes, N., Dijkshoorn, K., Engelen, V. Van, ... Shi, X. 2009. Harmonized World Soil Database (version 1). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
- Popp, A., Calvin, K., Fujimori, S., Havlik, P., Humpenöder, F., Stehfest, E., ... Vuuren, D.P. va. 2017. Land-use futures in the shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*, 42, 331-345. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.10.002>
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., Saxton, K.E. 1982. Estimation of Soil Water Properties. *Transactions of the ASAE*, 25, 1316-1320, 1328. <https://doi.org/10.13031/2013.33720>
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., ... Goldberg, M. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015-1057. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>
- Solarin, S.A., Ozturk, I. 2015. On the causal dynamics between hydroelectricity consumption and economic growth in Latin America countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1857-1868. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.003>
- Tebaldi, C., Knutti, R. 2007. The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1857), 2053-2075. <https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2076>
- Turner, S.W.D., Hejazi, M., Kim, S.H., Clarke, L., Edmonds, J. 2017. Climate impacts on hydropower and consequences for global electricity supply investment needs. *Energy*, 141, 2081-2090. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.089>
- van der Zwaan, B., Kober, T., Calderon, S., Clarke, L., Daenzer, K., Kitous, A., ... Di Sbroiavacca, N. 2014. Energy technology roll-out for climate change mitigation: A multi-model study for Latin America. *Energy Economics*, 56, 526-542. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.11.019>
- Zhang, X., Li, H.Y., Deng, Z.D., Ringler, C., Gao, Y., Hejazi, M.I., Leung, L.R. 2018. Impacts of climate change, policy and Water-Energy-Food nexus on hydropower development. *Renewable Energy*, 116(October), 827-834. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.030>