

# MODELADO DE CAUDALES DIARIOS EN UNA CUENCA DEL SUR DEL ECUADOR CON PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA ESTIMADAS POR SATÉLITE

## DAILY DISCHARGES MODELLING IN A BASIN IN SOUTHERN ECUADOR WITH PRECIPITATION AND TEMPERATURE ESTIMATED BY SATELLITE

Luis **Balcázar**<sup>1\*</sup>, Khalidou M. **Bá**<sup>1</sup>, Carlos **Díaz-Delgado**<sup>1</sup>, Emmanuelle **Quentin**<sup>2</sup>, Saula **Minga-León**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA). Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Literario # 100. C.P. 50000 Colonia Centro, Toluca México. (lebalcazar@gmail.com, khalidou@uaemex.mx, cdiazd@uaemex.mx, saula.vero@gmail.com)

<sup>2</sup>Plataforma EpiSIG. Instituto Nacional de Investigación en Salud Pública (INSPI), Calle Iquique N14-285 y Yaguachi, C.P. 170403, Quito, Ecuador. (emmanuelle.quentin@gmail.com)

### RESUMEN

En algunas regiones del mundo, como el sur del Ecuador, los datos meteorológicos son escasos o no existen. Sin embargo, los datos de los productos estimados por satélite son una alternativa en estos lugares y en áreas remotas pueden ser la única fuente de información disponible. En este estudio se evaluaron los productos de precipitación CMORPH, PERSIANN-CDR y TRMM-3B42, y temperatura ERA-Interim sobre la cuenca del río Catamayo ubicada en el sur del Ecuador. CMORPH sobrestima en promedio 50 % la precipitación observada, mientras que PERSIANN-CDR y TRMM-3B42 subestiman en promedio 20 y 10 %. Así, el sesgo de los productos de precipitación se corrigió con las lluvias en estaciones convencionales. El modelo CEQUEAU se calibró con los datos observados y estimados (originales y corregidos) a 0.25°/-27 km de resolución espacial con el objetivo de modelar los caudales diarios del río Catamayo en la estación Vicin. La eficiencia de las modelaciones se cuantificó con los criterios matemáticos: coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), porcentaje BIAS (PBIAS) y coeficiente de determinación ( $r^2$ ). Los resultados según el criterio NSE, en los periodos de calibración y validación, fueron de 0.80 y 0.75 con los datos observados, y con los datos de satélite (originales): TRMM-3B42, 0.84 y 0.79, PERSIANN-CDR, 0.80 y 0.65 y CMORPH, 0.59 y 0.39. La corrección del sesgo de la lluvia estimada fue positiva en las modelaciones con el producto CMORPH y muy ligero con PERSIANN-CDR y TRMM-3B42. Este estudio revela la ventaja de utilizar productos de satélite para simular los caudales en cuencas poco instrumentadas, además de utilizar estos datos en su escala espacial original sobre los modelos hidrológicos distribuidos.

### ABSTRACT

In some regions of the world, like southern Ecuador, meteorological data are scarce or do not exist. However, the data from products estimated by satellite are an alternative in these places and, in remote areas, can be the sole source of information available. This study evaluated the precipitation products CMORPH, PERSIANN-CDR and TRMM-3B42, and ERA-Interim temperature on the basin of the Catamayo River, located in southern Ecuador. CMORPH overestimates in average 50 % of the precipitation observed, while PERSIANN-CDR and TRMM-3B42 underestimate in average 20 and 10 %. Thus, the bias of the precipitation products was corrected with rain gauges. The CEQUEAU model was calibrated with the observed and estimated data (original and corrected) at 0.25°/-27 km of spatial resolution with the objective of modelling the daily discharges of the Catamayo River at Vicin station. The efficiency of the modelling was quantified with the following mathematical criteria: Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE), BIAS percentage (PBIAS) and coefficient of determination ( $r^2$ ). The results according to the NSE criterion, in the periods of calibration and validation, were 0.80 and 0.75 with the observed data, and with the satellite data (original): TRMM-3B42, 0.84 and 0.79, PERSIANN-CDR, 0.80 and 0.65, and CMORPH, 0.59 and 0.39. Correction of the bias of the estimated rainfall was positive when modelling with the CMORPH product and quite low with PERSIANN-CDR and TRMM-3B42. This study reveals the advantage of using satellite products to simulate the discharges in ungauged basins, in addition to using these data in their original spatial scale on the distributed hydrological models.

\* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: marzo, 2018. Aprobado: enero, 2019.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 53: 465-486. 2019.

**Key words:** hydrological modelling, CEQUEAU, CMORPH, PERSIANN-CDR, TRMM-3B42, ERA-Interim.

**Palabras clave:** modelación hidrológica, CEQUEAU, CMORPH, PERSIANN-CDR, TRMM-3B42, ERA-Interim.

## INTRODUCCIÓN

La lluvia y temperatura diarias son las variables de entrada más importantes en los modelos hidrológicos (Bà *et al.*, 2018a). En algunas cuencas del mundo estos datos no siempre están disponibles o no tienen continuidad de los registros debido a factores operativos, limitación de recursos y la complejidad del terreno (Bà *et al.*, 2018b; Richter, 2003). Las variables meteorológicas estimadas por satélite y radar son una alternativa para el déficit de datos observados. Los datos de radar cubren áreas limitadas (Ashouri *et al.*, 2015; Huffman *et al.*, 2007) y las estimaciones de satélite son de cobertura global y resoluciones espacio-temporales relativamente finas (Hong *et al.*, 2007; Sorooshian *et al.*, 2000). Algunos datos de satélite están disponibles en tiempo real y otros tienen retardos de días o meses, pero son más eficaces que los de estaciones convencionales que pueden estar disponibles después de más tiempo.

En el sur del Ecuador, las estaciones meteorológicas por lo general se ubican en los valles secos (Rollenbeck, 2006). Las interpolaciones de lluvia y temperatura desde estos lugares por lo general subestiman las precipitaciones altas y sobrestiman las temperaturas bajas de las montañas, porque estas variables dependen de la altitud (Pourrut *et al.*, 1995; Rollenbeck, 2006). Así, las interpolaciones de los datos puntuales son poco confiables, considerando la variabilidad climática alta y la densidad baja de estaciones meteorológicas (Rollenbeck *et al.*, 2006). Los productos estimados por satélite son datos matriciales, de escala global, y tienen resoluciones espacio-temporales distintas. Los algoritmos de los productos integran principalmente datos de bandas espectrales infrarrojo (IR), microonda (MW) y visible (VIS) desde sensores e instrumentos instalados en los satélites que observan la Tierra (Joyce *et al.*, 2004; Huffman *et al.*, 2007; Ashouri *et al.*, 2015).

El CPC *MORPHing technique* (CMORPH; Joyce *et al.* 2004) es un producto de precipitación estimado por satélite (PPES) de escala casi global (60° S a 60° N), desarrollado por *National Oceanic And Atmospheric Administration* (NOAA). Este algoritmo combina las estimaciones de precipitación de la banda *passive microwave* (PMW) de múltiples satélites de órbita baja y los datos IR de algunos satélites geostacionarios.

## INTRODUCTION

Daily rainfall and temperature are the most important entry variables in hydrological models (Bà *et al.*, 2018a). In some basins of the world these data are not always available or do not have continuity in the records because of operative factors, resource limitation and complexity of the terrain (Bà *et al.*, 2018b; Richter, 2003). The meteorological data estimated by satellite and radar are an alternative for the deficit in observed data. Radar data cover limited areas (Ashouri *et al.*, 2015; Huffman *et al.*, 2007) and the satellite estimations are of global coverage and relatively fine spatial-temporal resolutions (Hong *et al.*, 2007; Sorooshian *et al.*, 2000). Some satellite data are available in real time and others have delays of days or months, but they are more effective than those from conventional gauged stations that can be available after more time. In southern Ecuador, meteorological stations are generally located in the dry valleys (Rollenbeck, 2006). Rainfall and temperature interpolations from these places generally underestimate high precipitations and overestimate low temperatures from the mountains, because these variables depend on the altitude (Pourrut *et al.*, 1995; Rollenbeck, 2006). Thus, the interpolations from punctual data are not very reliable, considering the high climate variability and the low density of meteorological stations (Rollenbeck *et al.*, 2006). Products estimated by satellite are matrix data, of global scale, and have different spatial-temporal resolutions. Algorithms of the products integrate primarily data from infrared (IR), microwave (MW) and visible (VIS) spectrum bands from sensors and instruments installed in the satellites that observe Earth (Joyce *et al.*, 2004; Huffman *et al.*, 2007; Ashouri *et al.*, 2015).

The CPC *MORPHing technique* (CMORPH; Joyce *et al.* 2004) is a Satellite Precipitation Product (SPP) of nearly global scale (60° S to 60° N), developed by the *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). This algorithm combines the precipitation estimations from the *passive microwave* (PMW) band from multiple satellites of low orbit, and the IR data from some geostationary satellites. CMORPH provides data since 1998 until today in different scales of time and space in the versions CMORPH V0.x and CMORPH V1.0 (Joyce *et al.*, 2004; data are available in <http://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/>).

CMORPH provee datos desde 1998 a la fecha actual en distintas escalas de tiempo y espacio en las versiones CMORPH V0.x y CMORPH V1.0 (Joyce *et al.*, 2004; datos disponibles en <http://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/>).

El *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM; Huffman *et al.*, 2007) es la misión conjunta de *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) y *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) para la estimación de la precipitación. El TRMM tiene tres instrumentos: 1) PR (*Precipitation Radar*), 2) TMI (TRMM *Microwave Imager*), y 3) VIRS (*Visible Infrared Scanner*) para el monitoreo de la distribución y variabilidad de la precipitación a escala casi global (50° S a 50° N) y a distintas escalas espacio-temporales.

El TMPA (TRMM *Multi-Satellite Precipitation Analysis*) tiene dos PPES que comparten parcialmente el algoritmo TRMM-3B42V7 enfocado para la investigación y el TRMM-3B42RT de aplicaciones en tiempo real. Ambos productos tienen uso amplio por la comunidad de usuarios. Los productos TRMM combinan las estimaciones de pluviometría de varios sensores de PMW a bordo de satélites de órbita baja, incluidos el TRMM, TMI, *Special Sensor Microwave Imager* (SSM/I) y otros sensores a bordo de plataformas satelitales. Además, el TRMM *Combined Instrument* (TCI) utilizado en la calibración del 3B42V7 no se usa en la versión RT [Huffman *et al.*, 2007; Mantas *et al.*, 2015; datos TRMM disponibles desde 1998 (TRMM-3B42V7) y 2002 (TRMM-3B42RT) en <ftp://trmmopen.gsfc.nasa.gov/pub/trmmdata/>].

El PPES *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks-Climate Data Record* (PERSIANN-CDR; Ashouri *et al.*, 2015) desarrollado por *Center for Hydrometeorology and Remote Sensing* (CHRS) de la Universidad de California, tiene un conjunto de datos desde 1983 a 2018. El PERSIANN-CDR es un producto casi global (60° S a 60° N) a 0.25° de resolución espacial y escala temporal diaria, mensual y anual. El producto PERSIANN-CDR se genera a partir del algoritmo PERSIANN, utiliza los datos IR GridSat-B1 y es ajustado con el producto mensual del *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP); datos disponibles en <http://chrsdata.eng.uci.edu/>.

El ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011) es un conjunto de datos de re-análisis atmosférico global generado por el *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) desde 1979 y actualizado en tiempo

The *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM; Huffman *et al.*, 2007) is the joint mission of *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) and *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) to estimate precipitation. The TRMM has three instruments: 1) PR (*Precipitation Radar*), 2) TMI (TRMM *Microwave Imager*), and 3) VIRS (*Visible Infrared Scanner*), to monitor the distribution and variability of the precipitation at nearly global scale (50° S to 50° N) and at different spatial-temporal scales.

The TMPA (TRMM *Multi-Satellite Precipitation Analysis*) has two SPP's that partially share the algorithm (1) TRMM-3B42V7 focused for the research and (2) TRMM-3B42RT for applications in real time. Both products are widely used by the community of users. TRMM products combine the estimations of pluviometry from several PMW sensors aboard low orbit satellites, including the TRMM, TMI, *Special Sensor Microwave Imager* (SSM/I) and other sensors aboard satellite platforms. In addition, the TRMM *Combined Instrument* (TCI) used in the calibration of 3B42V7 is not utilized in the RT version [Huffman *et al.*, 2007; Mantas *et al.*, 2015; TRMM data available since 1998 (TRMM-3B42V7) and 2002 (TRMM-3B42RT) in <ftp://trmmopen.gsfc.nasa.gov/pub/trmmdata/>].

The *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks-Climate Data Record* (PERSIANN-CDR; Ashouri *et al.*, 2015) developed by the *Center for Hydrometeorology and Remote Sensing* (CHRS) of the University of California, has a set of data from 1983 to 2018. PERSIANN-CDR is a nearly global product (60° S to 60° N) at 0.25° of spatial resolution and daily, monthly and annual temporal scale. PERSIANN-CDR product is generated from the PERSIANN algorithm, uses the data IR GridSat-B1, and is adjusted with the monthly product from the *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP); data available in <http://chrsdata.eng.uci.edu/>.

The ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011) is a set of data of global atmospheric reanalysis generated by the *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) since 1979 and updated in real time. The ERA-Interim has air temperature data in °K at 2 m above ground level at different spatial-temporal resolutions. The ERA-Interim algorithm uses the instruments from the *TIROS Operational*

real. El PPES ERA-Interim tiene datos de temperatura del aire en °K a 2 m sobre el nivel del suelo a distintas resoluciones espacio-temporales. El algoritmo de ERA-Interim utiliza los instrumentos de los sistemas *TIROS Operational Vertical Sounder* (TOVS y ATOVS) para medir la radiancia de la atmósfera y de la Tierra. Los sistemas captan la radiación en IR-MW y canales de alta y baja frecuencia (Dee *et al.*, 2011; datos disponibles en <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>).

El uso de PPES en la modelación hidrológica es global (Lavado *et al.*, 2009; Stisen y Sandholt, 2010; Bà y Serrat-Capdevila, 2012; Zulkafli *et al.*, 2014; Bodian *et al.*, 2016; Bà *et al.*, 2018a y b).

Los modelos hidrológicos son herramientas útiles para desarrollar proyectos relacionados con la planeación, el análisis de cantidad y calidad del agua escurrida, el dimensionamiento de obras hidráulicas, el pronóstico hidrológico, la evaluación del cambio de uso del suelo, la reconstrucción de largas series de datos y en general para el apoyo en la gestión de los recursos hídricos (Refsgaard, 1997; Bà *et al.*, 2001 y 2013; Vázquez, 2010; Llanos y Bà, 2011). Los modelos de simulación lluvia-escurrimiento son (1) globales y (2) distribuidos (Bà *et al.*, 2001). En los primeros, las variables fisiográficas y meteorológicas se promedian para la cuenca y los distribuidos toman en cuenta la variabilidad espacio-temporal de los datos y los parámetros del modelo (Morin, 2009; Bà *et al.*, 2013, 2001). El modelo hidrológico distribuido CEQUEAU (Morin, 2002) lo desarrollaron en *L'Institut National de la Recherche Scientifique-Eau, Terre et Environnement* (anteriormente INRS-EAU, ahora INRS-ETE, siglas en francés de Instituto Nacional para la Investigación Científica-Agua) de la Universidad de Quebec, Canadá. Para la simulación de los caudales el modelo tiene: 1) función de producción (Figura 1A), la que se encarga del modelado vertical del agua (precipitación, evaporación e infiltración) en los reservorios suelo, subsuelo y lagos; y 2) función de transferencia (Figura 1B), que modela el agua en la red de drenaje hasta el exutorio de la cuenca. Los dos submodelos contienen 28 parámetros para la simulación de los caudales (Morin, 2009).

Los nombres de los coeficientes (Figura 1) que empiezan con la letra "H" corresponden a las profundidades de los reservorios, los que empiezan con la letra "C" representan a los coeficientes de drenaje (superficial, hipodérmico y subterráneo). El coeficiente HRIMP es la lámina para que inicie el escurrimiento,

*Vertical Sounder* systems (TOVS and ATOVS) to measure the radiance of the atmosphere and the Earth. The systems capture the radiation in IR-MW and channels of high and low frequency (Dee *et al.*, 2011; data available in <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>).

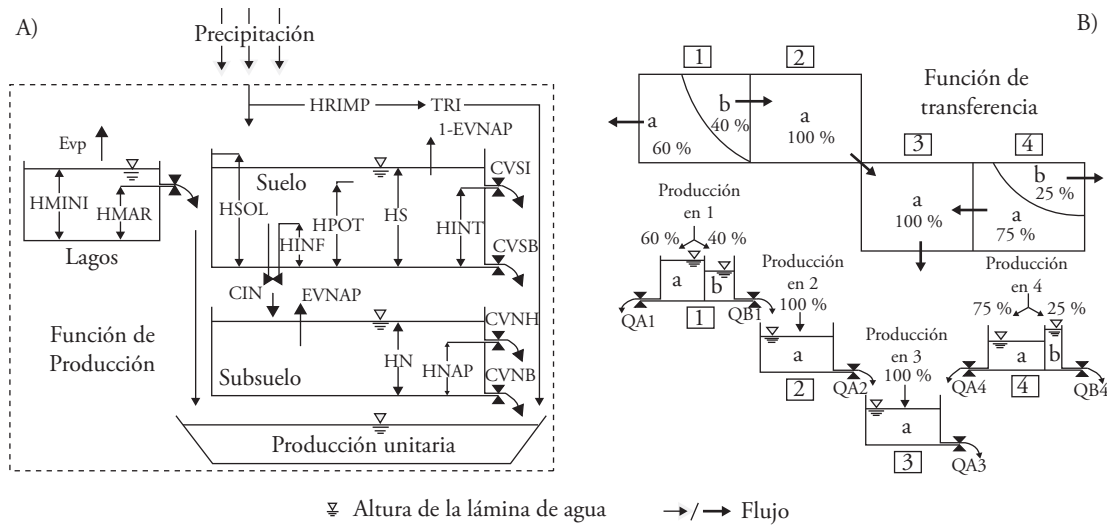
The use of SPP in hydrological modelling is global (Lavado *et al.*, 2009; Stisen and Sandholt, 2010; Bà and Serrat-Capdevila, 2012; Zulkafli *et al.*, 2014; Bodian *et al.*, 2016; Bà *et al.*, 2018a and b).

Hydrological models are useful tools to develop projects related to planning, analysis of the quantity and quality of runoff water, measuring of hydraulic works, hydrological forecast, evaluation of the change in land use, reconstruction of long series of data, and in general for the support of management of water resources (Refsgaard, 1997; Bà *et al.*, 2001 and 2013; Vázquez, 2010; Llanos and Bà, 2011). Rainfall-runoff simulation models are (1) lumped and (2) distributed (Bà *et al.*, 2001). In the first, the physiographical and meteorological variables are averaged for the basin and those distributed take into account the spatial-temporal variability land use and the parameters of the model (Morin, 2009; Bà *et al.*, 2013, 2001). The CEQUEAU distributed hydrological model (Morin, 2002) was developed at the *Institut National de la Recherche Scientifique-Eau, Terre et Environnement* (previously INRS-EAU, now INRS-ETE, French acronyms), of the University of Quebec, Canada. For the simulation of the discharges, the model has: 1) production function (Figure 1A), which is in charge of the vertical modelling of water (precipitation, evaporation and infiltration) in the soil, subsoil and lakes and marshes; and 2) routing function (Figure 1B), which models the water in the drainage network down to the exit of the basin. The two sub-models contain 28 parameters to simulate the discharges (Morin, 2009).

The names of the coefficients (Figure 1) that begin with the letter "H" correspond to the depths of the reservoirs, those that begin with the letter "C" represent the drainage coefficients (superficial, hypodermic and subterranean). The HRIMP coefficient is the sheet for the runoff to begin, TRI is the fraction of impermeable surface, CIN is the infiltration coefficient, and EVNAP is the evapotranspiration fraction in the subsoil reservoir (Morin, 2009).

The hydrological balance in the reservoirs is carried out for each step of time and in each cell,





**Figura 1.** Modelo CEQUEAU: A) función de producción y B) función de transferencia (Morin, 2002).  
**Figure 1.** CEQUEAU hydrological model: A) production function and B) routing function (Morin, 2002).

TRI es la fracción de superficie impermeable, CIN es el coeficiente de infiltración y EVNAP es la fracción de evapotranspiración en el reservorio subsuelo (Morin, 2009).

El balance hidrológico en los reservorios se realiza para cada paso de tiempo y en cada celda según las dimensiones de los coeficientes de drenaje. Después el modelo calcula el coeficiente de transferencia para cada cuadro parcial considerando el agua en la celda y el área parcial acumulada de la cuenca aguas arriba de dicho cuadro (Morin, 2009). La descripción detallada del modelo CEQUEAU la presentan Morin (2002 y 2009) y Morin y Paquet (2007).

El objetivo de esta investigación fue simular los caudales diarios del río Catamayo en la estación hidrométrica Vicin con datos meteorológicos observados y estimados por los productos CMORPH, PERSIANN-CDR, TRMM-3B42 y ERA-Interim en el modelo distribuido CEQUEAU.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La cuenca Catamayo en la estación hidrométrica Vicin (área  $\sim 4160 \text{ km}^2$  y altitud entre 260 y 3770 m) está al sur del Ecuador (centro de gravedad:  $-4.094^\circ / -79.569^\circ$ ; Figura 2A). Aguas abajo de la estación Vicin, el río Catamayo recibe aportes de otros afluentes y toma el nombre de río Chira (Perú) hasta su

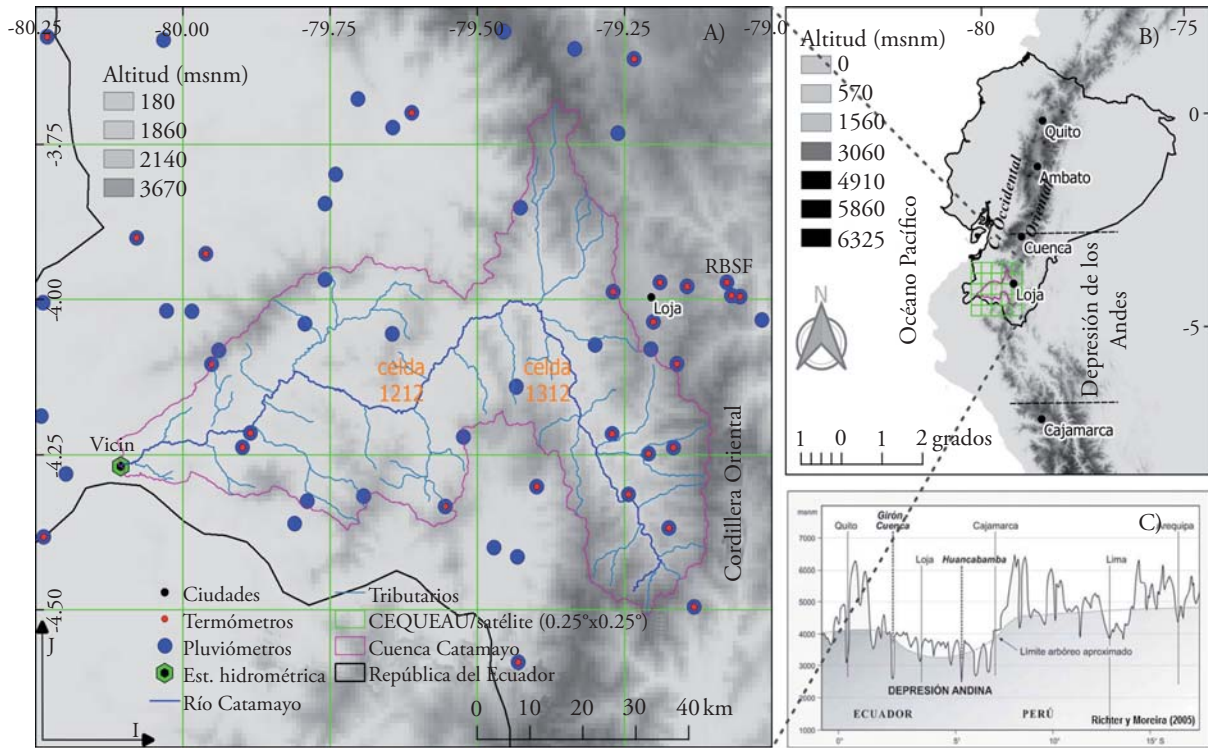
according to the dimensions of the drainage coefficients. Afterwards, the model calculates the routing function for each partial block considering the water in the cell and the partial area accumulated from the upstream basin of the block (Morin, 2009). The detailed description of the CEQUEAU model is presented by Morin (2002 and 2009) and Morin and Paquet (2007).

The aim of this study was to simulate daily discharges of the Catamayo River at Vicin gauging station with observed and estimated meteorological data by the CMORPH, PERSIANN-CDR, TRMM-3B42 and ERA-Interim products using the CEQUEAU distributed model.

## MATERIALS AND METHODS

### Study area

The Catamayo basin at the Vicin gauging station (area  $\sim 4160 \text{ km}^2$  and altitude between 260 and 3770 masl) is located in southern Ecuador (center of gravity:  $-4.094^\circ / -79.569^\circ$ ; Figure 2A). Downstream from the Vicin gauging station, the Catamayo River receives contributions from other tributaries and takes the name of Chira River (Peru) down to its estuary in the Pacific Ocean. In the Andean Region (southern Ecuador and northern Peru), the elevation of the Andes decreases compared to the northern and southern Andes, known as the “Andes Depression” (Richter *et al.*, 2016), latitude  $-2^\circ$  to  $-7^\circ$  (Figures



**Figura 2.** Localización del área de estudio: A) estaciones hidro-meteorológicas sobre un MNA y división del área (0.25°×0.25°); B y C) Depresión de los Andes.

**Figure 2.** Location of the study area: A) hydro-meteorological gauges stations on a DEM and division of the area (0.25°×0.25°); B and C) Depression of the Andes.

desembocadura en el Océano Pacífico. En la Región Andina (sur del Ecuador y norte del Perú) la elevación de los Andes disminuye con respecto a los Andes del norte y del sur, conocida como “Depresión de los Andes” (Richter *et al.*, 2016), latitud  $-2^{\circ}$  a  $-7^{\circ}$  (Figuras 2B y 2C). La depresión de la cordillera origina una compleja topografía, formando diversos pisos altitudinales y microclimas, distintos al resto de la Región Andina (Richter *et al.*, 2009; Ochoa *et al.*, 2016). En el norte del Ecuador, los Andes se dividen en dos cordilleras casi paralelas (oriental y occidental). Las ciudades grandes como Quito y Ambato se ubican en los valles formados por las dos cordilleras (Figura 2B). Sin embargo, en el área de estudio la cordillera occidental se deforma y se desplaza hacia el oeste, formando un relieve accidentado alternado entre valles y pendientes en cortas distancias (Richter *et al.*, 2009). La topografía del área de estudio se representa con un Modelo Numérico de Altitud (MNA) de  $\sim 90$  m (Figura 2A) y los Andes con un MNA de  $\sim 900$  m (Figura 2B).

La precipitación en el este, en las laderas orientales de la cordillera, es mayor a 2000 mm al año y el máximo puede superar 5000 mm al año en ciertos lugares de la cordillera (Richter, 2003; Rollenbeck, 2006). Las altas precipitaciones se atribuyen a los vientos alisios del este que llevan humedad desde la cuenca

2B and 2C). The depression of the mountain chain originates a complex topography, forming various altitudinal levels and microclimates, different from the rest of the Andean Region (Richter *et al.*, 2009; Ochoa *et al.*, 2016). In northern Ecuador, the Andes are divided into two nearly parallel mountain chains (eastern and western). Large cities like Quito and Ambato are located in the valleys formed by the two mountain chains (Figure 2B). However, in the study area the western mountain chain is deformed and displaced to the west, forming an uneven relief alternating between valleys and slopes in short distances (Richter *et al.*, 2009). The topography of the study area is represented with a Digital Elevation Model (DEM) of  $\sim 90$  m (Figure 2A) and the Andes with a DEM of  $\sim 900$  m (Figure 2B).

Precipitation in the eastern slopes of the mountain chain, is higher than 2000 mm per year and the maximum can be over 5000 mm per year in certain places of the mountain chain (Richter, 2003; Rollenbeck, 2006). The high precipitations are attributed to the trade winds from the east, which carry moisture from the Amazon basin (Rollenbeck, 2006; Richter *et al.*, 2009). The rainfall in these areas are frequent during the year, but with intensities  $<5$  mm  $h^{-1}$  (Rollenbeck and Bendix, 2011). The period of September-April is more varied, westerly flow causes

amazónica (Rollenbeck, 2006; Richter *et al.*, 2009). Las lluvias en estas áreas son frecuentes durante el año, pero con intensidades  $<5 \text{ mm h}^{-1}$  (Rollenbeck y Bendix, 2011). El periodo septiembre-abril es más variado, los flujos del aire desde el oeste causan lluvias convectivas en las laderas occidentales de la cordillera (Rollenbeck, 2006). En el oeste, la precipitación es cerca de 1000 mm por año y en algunos valles es inferior a 400 mm al año, como el valle de Catamayo (Richter, 2003; Richter *et al.*, 2016). Estas áreas están influenciadas por masas de aire secas derivadas desde el Pacífico por la corriente de Humboldt y por lo tanto son mucho más secas, excepto durante El Niño (Buytaert *et al.*, 2006). La temperatura en el Ecuador no varía durante el año, pero disminuye en ascenso altitudinal, y el gradiente térmico es entre  $-0.47$  y  $-0.65 \text{ }^\circ\text{C } 100 \text{ m}^{-1}$  (Pourrut *et al.*, 1995). En la cuenca Catamayo, Ochoa *et al.* (2016) reportaron que en las áreas bajo los 1400 msnm, la temperatura media anual es mayor a  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ , entre 1400 y 2200 msnm, fluctúa entre  $15.5$  y  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  y sobre los 2200 msnm es menor a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Entradas del modelo

El modelo CEQUEAU para su funcionamiento requiere archivos fisiográficos de cuenca y datos meteorológicos espacializados en celdas (Figuras 2A y 2B); además, caudales observados diarios de estaciones hidrométricas. Los datos de entrada se escriben en archivos de texto en un formato legible por el modelo (Morin, 2009).

### Archivos fisiográficos

La información fisiográfica se obtuvo con la aplicación de Guerra-Cobián (2007) en el entorno de Idrisi (Morin, 2002). Esta herramienta requiere de: 1) un MNA, se utilizó el *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM, Jarvis *et al.*, 2008) con resolución de 3 seg de arco ( $0.0008333^\circ$ ,  $\sim 90 \text{ m}$ ); 2) un mapa de cobertura del suelo reclasificado (1: cuerpos de agua, 2: bosques, 3: ciénegas y 4: otros), se utilizó un mapa desarrollado por los Ministerios de Ambiente y Agricultura del Ecuador, con escala 1:100000 (MAE-MAGAP, 2013) y proyectado a la resolución del MNA; 3) un vector de las estaciones meteorológicas; y 4) un vector de la estación hidrométrica. El tamaño de celda (modelo CEQUEAU) se utilizó a  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  ( $\sim 27 \text{ km} \times \sim 27 \text{ km}$  en el Ecuador). La división del área genera una malla de  $5 \times 5$ . Las coordenadas de las celdas del modelo se enumeraron desde la esquina inferior izquierda como  $I=10$ ,  $J=10$ , esto garantiza únicamente coordenadas positivas en la malla de celdas (Figura 2A).

### Datos observados

En este estudio se utilizaron observaciones diarias de precipitación y temperatura de la base de datos del Servicio Meteorológico

convective rains in the western slopes of the mountain chain (Rollenbeck, 2006). In the west, the precipitation is close to 1000 mm per year and in some valleys it is lower than 400 mm per year, as in the Catamayo Valley (Richter, 2003; Richter *et al.*, 2016). These areas are influenced by dry air masses derived from the Pacific by the Humboldt Current and are therefore much drier, except during El Niño (Buytaert *et al.*, 2006). The temperature in Ecuador does not vary during the year, but it decreases in altitudinal ascent, and the thermic gradient is between  $-0.47$  and  $-0.65 \text{ }^\circ\text{C } 100 \text{ m}^{-1}$  (Pourrut *et al.*, 1995). In the Catamayo basin, Ochoa *et al.* (2016) reported that in the areas below 1400 masl, the mean annual temperature is higher than  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ , between 1400 and 2200 masl it fluctuates between  $15.5$  and  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ , and above 2200 masl it is under  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Entries of the model

For its functioning, the CEQUEAU model requires physiographic records of the basin and meteorological data that are spaced in cells (Figures 2A and 2B), and in addition, daily observed discharges from gauging stations. The entry data are written in text files in a format that is legible by the model (Morin, 2009).

### Physiographic files

Physiographic data were obtained with the Guerra-Cobián (2007) application in the Idrisi geographic information system (Morin, 2002). This tool requires: 1) a DEM, the *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM, Jarvis *et al.*, 2008) was used with resolution of 3 arc second ( $0.0008333^\circ$ ,  $\sim 90 \text{ m}$ ); 2) a map of reclassified ground coverage (1: bodies of water, 2: forests, 3: lakes and marshes, and 4: others), a map developed by the Ministries of Environment and Agriculture from Ecuador was used, with scale 1:100000 (MAE-MAGAP, 2013) and projected at the resolution of the DEM; 3) a vector of the meteorological stations; and 4) a vector of the gauging station.

The size of the cell (CEQUEAU model) was used at  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  ( $\sim 27 \text{ km} \times \sim 27 \text{ km}$  in Ecuador). The division of the area generates a mesh of  $5 \times 5$ . The coordinates of the cells of the model were numbered from the lower left corner as  $I=10$ ,  $J=10$ , guaranteeing only positive coordinates in the mesh of cells (Figure 2A).

### Observed data

In this study, daily observations of precipitation and temperature were used from the database of Ecuador's Meteorological Service - *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador* (INAMHI, <http://www.>

del Ecuador - Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI, <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/biblioteca>) y la Estación Científica San Francisco (ECSEF, <http://www.tropicalmountainforest.org>). En el área de estudio se localizaron 57 estaciones y en la cuenca Catamayo se encontraron solo 23 pluviómetros y 10 termómetros con registros diarios de 2005 a 2015 (Figura 2A). Los registros meteorológicos son escasos temporalmente, por ello se eligieron las estaciones que tienen por lo menos un año continuo de observaciones diarias.

Para detectar datos atípicos se realizó un análisis gráfico exploratorio. Por prueba-error se observó que los valores extraordinarios “valores sospechosos” se separan a partir de 3 desviaciones estándar (Ecuación 1) del valor esperado de estaciones vecinas. Para detectar valores atípicos es común 1.5 o tres veces el intervalo intercuartílico de los datos (De Luque, 2011). En este estudio el intervalo fue para establecer valores fuera de contexto, los cuales pueden tener errores informáticos o en la transcripción de datos.

$$s = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \right)^{1/2} \quad (1)$$

donde  $s$  es la desviación estándar de la serie de datos de la estación,  $x_i$  es la observación en el día  $i$ ,  $\bar{x}$  es el promedio del conjunto de los datos, y  $n$  son los grados de libertad de la muestra.

La precipitación media y temperatura media de la cuenca se obtuvieron por métodos de interpolación. Este proceso lo realiza internamente el modelo CEQUEAU utilizando polígonos de Thiessen (Morin, 2009).

Los caudales diarios observados en la estación Vicin se utilizaron para calibrar y validar el modelo CEQUEAU. La estación Vicin tiene datos disponibles en el periodo 2005-2015, con ausencia de datos en los años 2012 y 2013. Debido a la falta de información continua en esta estación, se consideró únicamente la serie de datos 2005-2011 para la simulación de los caudales, el periodo 2005-2008 para la calibración y 2009-2011 para la validación.

### Procesamiento de datos satelitales

En esta investigación se usaron los datos de los PPES: CMORPH V1.0, PERSIANN-CDR y TRMM-3B42 V7, y temperatura ERA-Interim. Estos datos son de cobertura global, resolución espacial de 0.25° y escala temporal de 1 día (Cuadro 1).

Los datos de satélite (formato raster) se descargaron de los servidores oficiales de NOAA, NASA, CHRS y ECMWF. Cada uno de los productos se agruparon temporalmente y se procesaron

serviciometeorologico.gob.ec/biblioteca) and the San Francisco Scientific Station (ECSEF, <http://www.tropicalmountainforest.org>). In the study area, there were 57 gauges but inside the Catamayo basin there were only 23 rain gauges and 10 thermometers with daily records between 2005 and 2015 (Figure 2A). The meteorological records are temporally scarce, which is why the stations that have at least one continuous year of daily observations were chosen.

A graphic exploratory analysis was carried out to detect atypical data. By trial and error, it was observed that the extraordinary values “suspicious values” are separated based on 3 standard deviations (Equation 1) of the expected value from neighboring stations. To detect atypical values, it is common to see 1.5 or 3 times the interquartile interval of the data (De Luque, 2011). In this study the interval was used to establish values out of context, which can have information errors or in the data transcription.

$$s = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \right)^{1/2} \quad (1)$$

where  $s$  is the standard deviation of the series of data from the station,  $x_i$  is the observation on day  $i$ ,  $\bar{x}$  is the average of the set of data, and  $n$  are the degrees of freedom of the sample.

The mean precipitation and the mean temperature of the basin were obtained through interpolation methods. This process is performed internally by the CEQUEAU model using Thiessen polygons (Morin, 2009).

The daily discharges observed at Vicin station were used to calibrate and validate the CEQUEAU model. The Vicin gauging station has data available in the period 2005-2015, with absence of data in the years 2012 and 2013. Due to the lack of continuous information in this station, only the series of data 2005-2011 was considered for the simulation of the discharges, the period 2005-2008 for the calibration, and 2009-2011 for the validation.

### Processing of satellite data

In this study, data were used from the SPP: CMORPH V1.0, PERSIANN-CDR and TRMM-3B42 V7, and ERA-Interim temperature. These data are of global coverage, spatial resolution of 0.25° and temporal scale of 1 day (Table 1).

The satellite data (raster format) were downloaded from official servers by NOAA, NASA, CHRS and ECMWF. Each



**Cuadro 1.** Características de los productos de satélite.

**Table 1.** Characteristics of the satellite products.

Producto	Tipo	Periodo	Retardo	Resolución espacial	Resolución temporal	Cobertura
CMORPH	P	enero 1983–2018	2-3 días	0.25°	1 día	60°S-60°N
PERSIANN-CDR	P	enero 2003–2018	3 meses	0.25°	1 día	60°S-60°N
TRMM-3B42	P	marzo 2000–2018	3-4 días	0.25°	1 día	50°S-60°N
ERA-Interim	T	enero 1979–2018	2 meses	0.25°	1 día	90°S-60°N

P: precipitación; T: temperatura. ♦ P: precipitation; T: temperature.

por separado. En el caso de TRMM-3B42 se rotaron las imágenes de 0°:360° a -180°:180°. Luego se recortan las imágenes en el área de estudio y se extraen los datos de los píxeles. Además, se removió el “efecto llovizna” de los PPES, los valores de lluvia <1 mm diarios se reemplazaron con cero según lo recomendado por Piani *et al.* (2009) y Valdés-Pineda *et al.* (2016). En el caso de la temperatura ERA-Interim, la unidad se transformó con la relación °C = °K -273.15 (Thompson y Taylor, 2008).

**Evaluación de datos satelitales**

Los datos de los productos de satélite se evaluaron con los datos observados de estaciones meteorológicas ubicadas en los píxeles correspondientes. El coeficiente de determinación se utilizó para medir la bondad de ajuste de los datos observados y estimados a nivel mensual en el periodo 2005 a 2015. Cuando un píxel contiene más de una estación meteorológica, la variable observada se promedia para tener una mejor representación de la lluvia/temperatura en el área del píxel. Debido a que no son comparables los valores de un punto con los valores que representa un área, con escala temporal diaria, la validación de los datos observados y estimados se realizó a nivel mensual. Los datos agrupados en escala temporal amplia reducen el sesgo y permite observar a mayor detalle la dinámica del fenómeno. Los análisis de los datos meteorológicos (observados y estimados) y la serie de caudales se realizaron en el lenguaje R (Hijmans *et al.*, 2016; Wickham y Chang, 2016; R Core Team, 2016; Wickham, 2017).

**Corrección de los datos de satélite**

Aunque los algoritmos de versiones recientes han mejorado el grado de precisión de la lluvia estimada, otros estudios reportan el sesgo de los PPES (Serrat-Capdevila *et al.*, 2016; Valdés-Pineda *et al.*, 2016; Bâ *et al.*, 2018a). El sesgo de los PPES se corrigió usando las lluvias observadas. La Ecuación (2) es una modificación de la propuesta por Worqlul *et al.* (2017) para obtener los coeficientes de corrección. Debido a los distintos regímenes de lluvia en la cuenca Catamayo, el área se dividió en cuenca

one of the products were grouped temporarily and processed separately. In the case of TRMM-3B42 the images of 0°:360° were rotated to -180°:180°. Then the images were cut in the study area and the data from pixels were extracted. In addition, the “drizzle effect” was removed from the SPP’s, the rainfall values of <1 mm daily were replaced with zero according to recommendations by Piani *et al.* (2009) and Valdés-Pineda *et al.* (2016). In the case of ERA-Interim temperature, the unit was transformed with the relation °C = °K -273.15 (Thompson and Taylor, 2008).

**Evaluation of satellite data**

Data from satellite products were evaluated with observed data from meteorological stations located in the corresponding pixels. The coefficient of determination was used to measure the goodness of fit of the observed data and estimated at the monthly level in the period 2005 to 2015. When a pixel contains more than one meteorological station, the variable observed is averaged to obtain a better representation of the rainfall/temperature in the pixel area. Due to the fact that the values from one point are not comparable to the values that represent an area, with daily temporal scale, validation of the observed and estimated data were carried out at the monthly level. The data grouped in broad temporal scale reduce the bias and allow observing in greater detail the dynamics of the phenomenon. The analysis of meteorological data (observed and estimated) and the series of discharges were performed in the language R (Hijmans *et al.*, 2016; Wickham and Chang, 2016; R Core Team, 2016; Wickham, 2017).

**Satellite data correction**

Although the algorithms of recent versions have improved the degree of accuracy of the estimated rainfall, other studies report the bias of the SPP’s (Serrat-Capdevila *et al.*, 2016; Valdés-Pineda *et al.*, 2016; Bâ *et al.*, 2018 a). The bias of the SPP’s were corrected using the observed rainfall. Equation (2)

alta (este) y cuenca baja (oeste). Los coeficientes de corrección se obtuvieron por separado para evitar que los valores extremos se compensen entre sí. Los coeficientes cercanos a 1 indican buen ajuste del PPES. Arbitrariamente 20 % del error relativo entre el valor medio observado y estimado se considera aceptable.

$$PPES_{cor(d)} = PPES_{(d)} \left( \frac{\overline{Pobs(m)}}{PPES_{(m)}} \right) \quad (2)$$

donde  $PPES_{(d)}$  es la precipitación diaria estimada por el producto de satélite,  $PPES_{cor(d)}$  es la lluvia diaria corregida del producto de satélite,  $\overline{Pobs(m)}$  y  $PPES_{(m)}$  son, respectivamente, el promedio mensual de precipitación observada y estimada y  $n$  es el número de años de la serie.

### Calibración y validación del modelo

Los parámetros del modelo CEQUEAU se calibraron por prueba-error, optimización y por retroacción combinando las dos técnicas. El objetivo de los métodos de optimización es encontrar los mejores valores de los parámetros para maximizar o minimizar el criterio matemático que permite juzgar la bondad de ajuste de las simulaciones. El modelo CEQUEAU utiliza el método de Powell (Powell, 1964). A partir de un valor inicial para cada parámetro, este algoritmo realiza búsquedas secuenciales de los valores del conjunto de parámetros que minimizan el error cuadrático medio entre los caudales observados y simulados o maximizan el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, Nash y Sutcliffe, 1970). En este proceso se utilizó el NSE (Ecuación 3). El rango de NSE varía entre  $-\infty$  a 1, y 1 es el valor óptimo. Además, como otros criterios de bondad se utilizaron como referencia el coeficiente de determinación ( $r^2$ , Harrell *et al.*, 1996) (Ecuación 4) y el porcentaje BIAS (PBIAS, Gupta *et al.*, 1999) (Ecuación 5).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qsim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - \bar{Qobs})^2} \quad (3)$$

$$r^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - \bar{Qobs})(Qsim_i - \bar{Qsim})}{\left( \sum_{i=1}^n (Qobs_i - \bar{Qobs})^2 \right)^{1/2} \left( \sum_{i=1}^n (Qsim_i - \bar{Qsim})^2 \right)^{1/2}} \right)^2 \quad (4)$$

is a modification of the one proposed by Worqlul *et al.* (2017) to obtain the correction coefficients. Because of the different rainfall regimes in the Catamayo basin, the area was divided into high basin (east) and low basin (west). The correction coefficients were obtained separately to prevent the extreme values from compensating each other. The coefficients close to 1 indicated good adjustment of the SPP. Arbitrarily, 20 % of the relative error between the mean observed and estimated value is considered acceptable.

$$SPP_{cor(d)} = SPP_{(d)} \left( \frac{\overline{Pobs(m)}}{SPP_{(m)}} \right) \quad (2)$$

where  $SPP_{(d)}$  is the daily precipitation estimated by the satellite product,  $SPP_{cor(d)}$  is the daily rainfall corrected from the satellite product,  $\overline{Pobs(m)}$  and  $SPP_{(m)}$  are, respectively, the monthly average of observed and estimated precipitation, and  $n$  is the number of years of the series.

### Calibration and validation of the model

The parameters of the CEQUEAU model were calibrated by trial and error, optimization and retroaction combining the two techniques. The objective of optimization methods is to find the best values of the parameters to maximize or minimize the mathematical criterion that allows judging the goodness of fit of the simulations. The CEQUEAU model uses the Powell method (Powell, 1964). Based on an initial value for each parameter, this algorithm performs sequential searches of the values from the set of parameters that minimize the mean quadratic error between the observed and simulated discharges or maximize the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE, Nash and Sutcliffe, 1970). NSE was used in this process (Equation 3). The NSE range varies between  $-\infty$  to 1, with 1 being the optimal value. In addition, the coefficient of determination ( $r^2$ , Harrell *et al.*, 1996) (Equation 4) and the BIAS percentage (PBIAS, Gupta *et al.*, 1999) (Equation 5) were used for reference as other criteria of goodness.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qsim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - \bar{Qobs})^2} \quad (3)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i})} \times 100 \quad (5)$$

donde  $Q_{obs_i}$  y  $Q_{sim}$  son el caudal observado y simulado en el día  $i$ ,  $\bar{Q}_{obs}$  y  $\bar{Q}_{sim}$  son el caudal medio observado y simulado.

La eficiencia de los modelos se categorizó de acuerdo con la clasificación de Moriasi *et al.* (2015) para pasos de tiempo diario (Cuadro 2).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis de precipitación

En el periodo 2005 a 2015 la precipitación media de la cuenca Catamayo fue 1130 mm y la estimada por los productos de satélite fueron 1520, 920 mm y 1020 mm para CMORPH, PERSIANN-CDR y TRMM-3B42. Los productos TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR reprodujeron mejor el fenómeno; el patrón también se observó con la lluvia media mensual (Figuras 3A y 3B). La precipitación en la cuenca Catamayo correspondió con lo reportado por Ochoa *et al.* (2016), quienes observaron que la precipitación en la cuenca baja fue de 400 a 650 mm al año y mayor a 1100 mm en la cuenca alta (Figura 3C). La distribución espacio-temporal de la lluvia en la cuenca del río Catamayo fue heterogénea. Richter *et al.* (2009) observaron un gradiente de precipitación en la cordillera, la precipitación aumentó de 300 a 700 mm cada 100 m entre 3000 y 3500 m de altitud, y a 1000 y 1500 m; en el oeste fue moderado, 45 mm por cada 100 m de altitud. Los hietogramas de la parte alta de la cuenca (Figura 3A) no mostraron meses secos, las láminas de lluvia en promedio fueron alrededor de 50 mm por mes entre junio y septiembre y en los

$$r^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim_i} - \bar{Q}_{sim})}{\left( \sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs})^2 \right)^{1/2} \left( \sum_{i=1}^n (Q_{sim_i} - \bar{Q}_{sim})^2 \right)^{1/2}} \right)^2 \quad (4)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i})} \times 100 \quad (5)$$

where  $Q_{obs_i}$  and  $Q_{sim}$  are the observed and simulated discharge on day  $i$ ,  $\bar{Q}_{obs}$  and  $\bar{Q}_{sim}$  are the mean observed and simulated discharge.

The efficiency of the models was categorized based on the classification by Moriasi *et al.* (2015) for steps of daily time (Table 2).

## RESULTS AND DISCUSSION

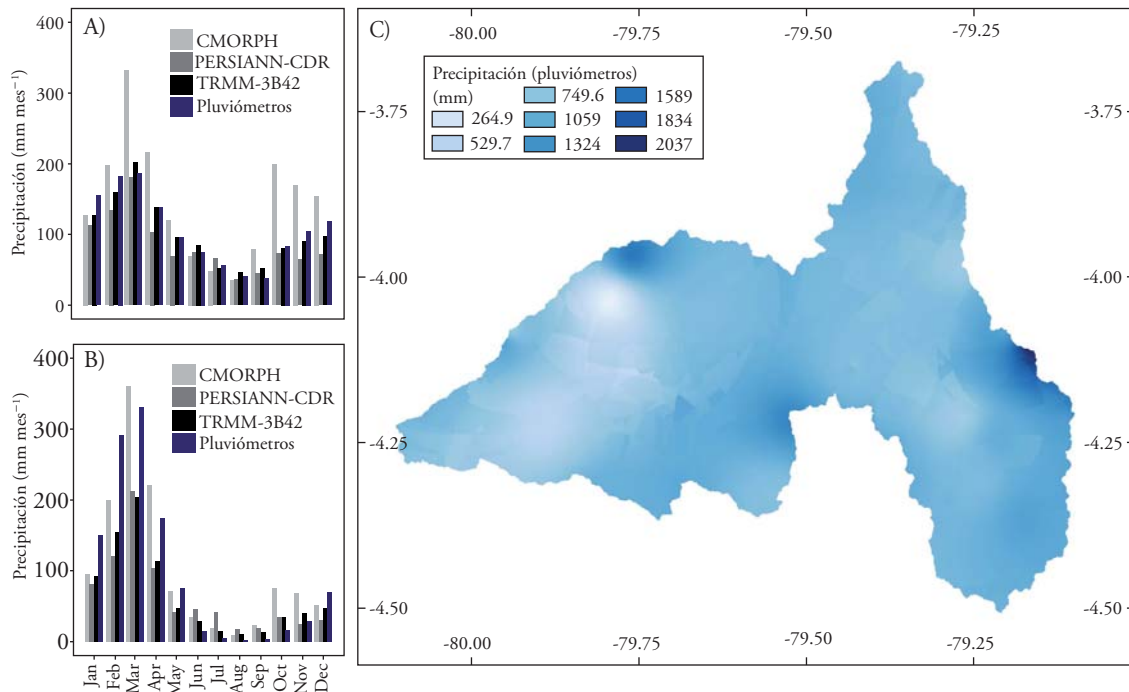
### Precipitation analysis

In the period 2005 to 2015 the mean precipitation of the Catamayo basin was 1130 mm and the one estimated by satellite products were 1520, 920 mm and 1020 mm for CMORPH, PERSIANN-CDR and TRMM-3B42. The TRMM-3B42 and PERSIANN-CDR products reproduced the phenomenon best; the pattern was also observed with the mean monthly rainfall (Figures 3A and 3B). The precipitation in the Catamayo basin corresponded to what was reported by Ochoa *et al.* (2016), who observed that the precipitation in the low basin was 400 to 650 mm per year and higher than 1100 mm in the high basin (Figure 3C). Spatio-temporal distribution of the rainfall in the Catamayo

**Cuadro 2.** Eficiencia de un modelo hidrológico para pasos de tiempo diario, según Moriasi *et al.* (2015).

**Table 2.** Classification of the efficiency of the hydrological model (Moriasi *et al.*, 2015).

Eficiencia	NSE (-)	PBIAS (%)	$r^2$ (-)
Muy bueno	$NSE > 0.80$	$PBIAS < \pm 5$	$r^2 > 0.85$
Bueno	$0.70 < NSE \leq 0.80$	$\pm 5 \leq PBIAS < \pm 10$	$0.75 < r^2 \leq 0.85$
Satisfactorio	$0.50 < NSE \leq 0.70$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0.60 < r^2 \leq 0.75$
No satisfactorio	$NSE < 0.50$	$PBIAS \geq \pm 15$	$r^2 < 0.60$



**Figura 3.** Precipitación de la cuenca Catamayo: A) media mensual de la cuenca alta, B) media mensual de la cuenca baja, y C) precipitación media anual, en el periodo 2005-2015.

**Figure 3.** Precipitation of the Catamayo basin: A) monthly mean of the high basin, B) monthly mean of the low basin, and C) mean annual precipitation, in the period 2005-2015.

meses húmedos entre 100 y 200 mm por mes. Esto se debe a la lluvia orográfica que ocurre con frecuencia en la parte alta de la cordillera. CMORPH sobrestimó las láminas de lluvia mayores hasta en 100 %; PERSIANN-CDR y TRMM-3B42 las subestimaron entre 20 y 10 %. En los meses poco húmedos, junio a agosto, los tres productos reprodujeron mejor la precipitación observada. La subestimación del producto TRMM-3B42 también la observaron Chen *et al.* (2013) en regiones húmedas de China, y el producto subestimó la lluvia en 20 %. Bâ *et al.* (2018a y b) encontraron que el producto PERSIANN-CDR subestimó la lluvia en subcuencas de los ríos Senegal y Níger, en África occidental, y según Serrat-Capdevila *et al.* (2016) con CMORPH la sobrestimación es 30 % de la lluvia en zonas tropicales de África.

La subestimación de la lluvia en la parte alta puede deberse a la corrección por la PR, la reflectancia alta asociada con la orografía y con las partículas de hielo (>5000 m de altitud) que se derriten a medida que se precipitan desde lo alto (llamado banda brillante) (Fu y Liu, 2007). El PR tiene dificultad para estimar con exactitud las precipitaciones en regiones

River basin was heterogeneous. Richter *et al.* (2009) observed a precipitation gradient on the mountain chain, the precipitation increased from 300 to 700 mm every 100 m between 3000 and 3500 m of altitude, and at 1000 and 1500 m; in the west, it was moderate, 45 mm for every 100 m of altitude. Hyetographs from the high part of the basin (Figure 3A) did not show dry months, the rain sheets were around 50 mm per month in average between June and September, and in the humid months between 100 and 200 mm per month. This is due to the orographic rain that is frequently present in the high part of the mountain chain. CMORPH overestimated the greater rain sheets in up to 100 %; PERSIANN-CDR and TRMM-3B42 underestimated them in between 20 and 10 %. In the months of low humidity, June to August, the three products reproduced the precipitation observed better. The fact that TRMM-3B42 underestimated rainfall was pointed out by Chen *et al.* (2013) in humid regions of China by 20 %. Bâ *et al.* (2018 a and b) found that PERSIANN-CDR product underestimated the rainfall in sub-basins of the Senegal and Niger rivers,



altas debido a la contaminación de la banda brillante (Fu y Liu, 2007; Chen *et al.*, 2013). La lluvia en la parte baja de la cuenca (Figura 3B) tuvo amplitud mayor entre meses secos y húmedos y los productos mostraron un patrón de lluvia similar a la parte alta. Los productos PERSIANN-CDR y TRMM-3B42 subestimaron alrededor de 30 %, y CMORPH sobrestimó 20 % la lluvia de la temporada húmeda. En el periodo seco los tres productos sobrestimaron alrededor de 70 % las láminas delgadas de lluvia. El periodo junio a septiembre es el más seco y las láminas delgadas de lluvia las registran los pluviómetros en lugares altos, como los poblados de Celica (1300 mm por año y altitud ~2200 m) y Catacocha (700 mm por año y altitud ~1700 m) (Richter, 2003).

Los coeficientes BIAS (Cuadros 3 y 4) correspondieron con los hietogramas mensuales y los coeficientes PERSIANN-CDR y TRMM-3B42 fueron cercanos a la unidad. Pero, los coeficientes influyeron más sobre los meses secos de la cuenca baja, donde las láminas delgadas de lluvia fueron sobrestimadas por todos los productos.

Los coeficientes de determinación revelaron correlación alta de los PPES, el valor menor fue ( $r^2=0.47$ ) para PERSIANN-CDR de la celda 1312 (Figura 4). Las correlaciones en la mayoría de las celdas resultaron satisfactorias ( $r^2 \geq 0.50$ ) y se observaron sesgos. Los PPES corregidos mejoraron los coeficientes de determinación, principalmente con CMORPH

in western Africa and, according to Serrat-Capdevila *et al.* (2016), CMORPH overestimated rainfall in tropical zones of Africa by 30 %.

Underestimating the rainfall in the high part can be because of the correction by PR, the high reflectance associated to the orography and the ice particles (>5000 m of altitude) that melt as they precipitate from above (called brilliant band) (Fu and Liu, 2007). The PR has difficulty in estimating accurately the precipitations in high regions because of the contamination of the brilliant band (Fu and Liu, 2007; Chen *et al.*, 2013). The rainfall in the low part of the basin (Figure 3B) had broader amplitude between dry and humid months and the products showed a rainfall pattern similar to that of the high basin. The PERSIANN-CDR and TRMM-3B42 products underestimated around 30 %, and CMORPH overestimated by 20 % the rainfall from the humid season. In the dry period the three products overestimated around 70 % of the thin rain sheets. The period of June to September is the driest and the thin rain sheets were recorded by pluviometers in high places, such as the towns of Celica (1300 mm per year and altitude ~2200 m) and Catacocha (700 mm per year and altitude ~1700 m) (Richter, 2003).

The BIAS coefficients (Tables 3 and 4) corresponded to the monthly hietographs and the coefficients PERSIANN-CDR and TRMM-3B42

**Cuadro 3.** Coeficientes de corrección BIAS (cuenca alta).

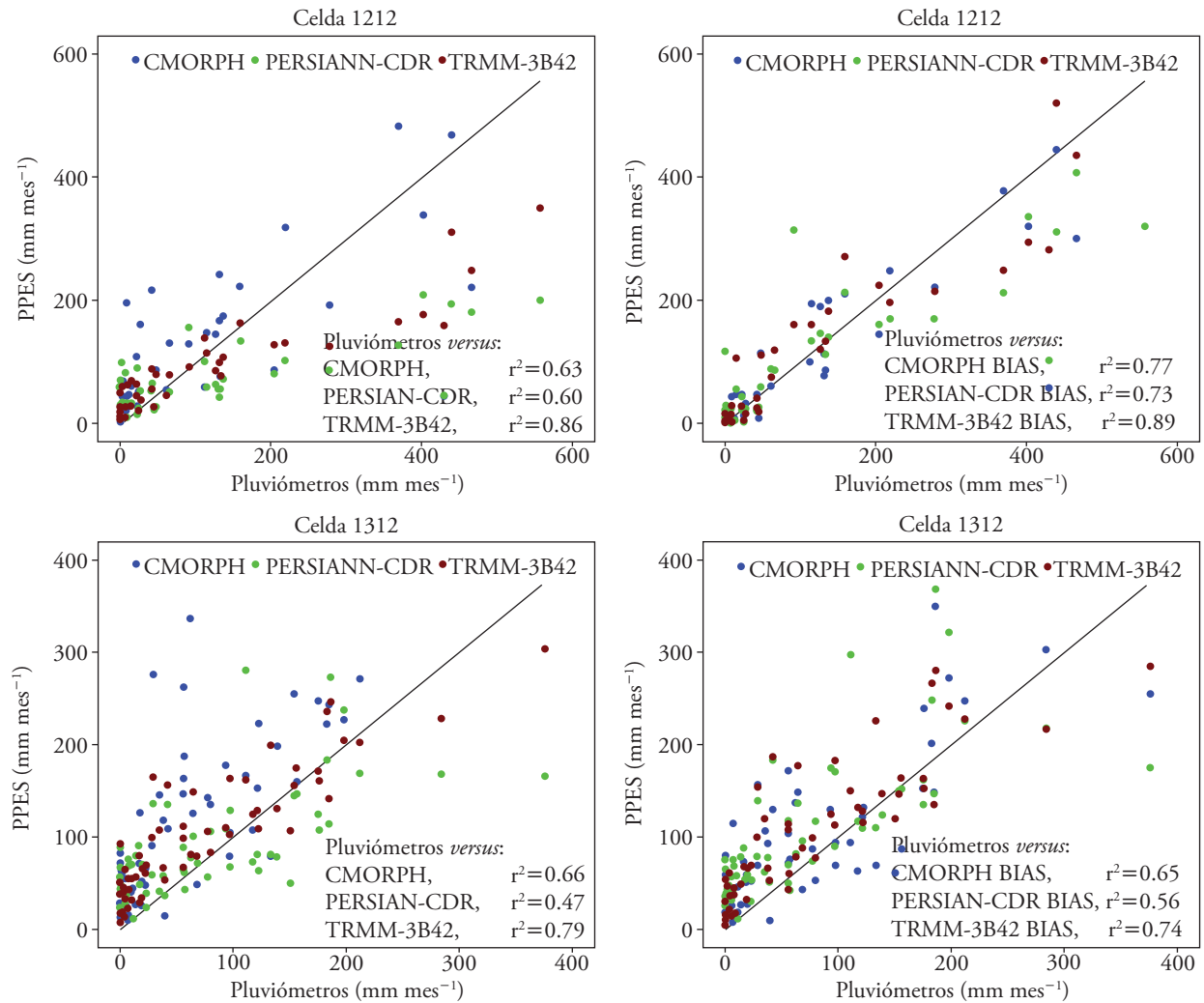
**Table 3.** BIAS correction coefficients (high basin).

	Mes											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CMORPH	1.21	0.92	0.58	0.62	0.80	1.04	1.13	1.09	0.47	0.42	0.60	0.75
PERSIANN-CDR	1.36	1.35	1.06	1.30	1.37	0.99	0.85	1.05	0.84	1.13	1.60	1.62
TRMM-3B42	1.23	1.13	0.95	0.96	1.02	0.87	1.04	0.80	0.69	0.98	1.08	1.21

**Cuadro 4.** Coeficientes de corrección BIAS (cuenca baja).

**Table 4.** BIAS correction coefficients (low basin).

	Mes											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CMORPH	1.70	1.36	0.95	0.87	0.78	1.16	0.43	0.28	0.18	0.23	0.48	1.32
PERSIANN-CDR	2.01	2.25	1.61	1.66	1.97	0.32	0.11	0.16	0.23	0.51	1.30	2.29
TRMM-3B42	1.75	1.76	1.68	1.53	1.72	0.51	0.34	0.26	0.29	0.49	0.78	1.43



**Figura 4.** Correlación de la precipitación en las celdas 1212 y 1312 en el periodo 2005 a 2015: PPES originales y PPES corregidos.  
**Figure 4.** Correlation of precipitation in cells 1212 and 1312 in the period 2005 to 2015: original SPP's and corrected SPP's.

(Figura 4). El incremento mínimo de los coeficientes de determinación en TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR pudo deberse a que estos productos los validan otros datos: TRMM-3B42 se calibra con el TCI y PERSIANN-CDR se ajusta con el GPCP (Huffman *et al.*, 2007 y 2010; Ashouri *et al.*, 2015; Mantas *et al.*, 2015).

Los análisis de datos observados facilitaron la detección de valores fuera de contexto en las estaciones Celica y Catacocha. Después de analizar con la Ecuación 1 y gráficos “boxplot” dos datos considerados “sospechosos” se eliminaron.

were the ones close to one. However, the coefficients influenced more the dry months of the low basin, where the thin rain sheets were overestimated by all the products.

The coefficients of determination revealed high correlation of the SPP, the lowest value was ( $r^2=0.47$ ) for PERSIANN-CDR from the cell 1312 (Figure 4). The correlations in most of the cells were satisfactory ( $r^2 \geq 0.50$ ) and biases were observed. The corrected SPP improved the coefficients of determination, mainly with CMORPH (Figure 4). The minimal increase of the coefficients of determination in TRMM-

### Análisis de temperatura

La correlación de la temperatura observada y ERA-Interim no fue satisfactoria, los  $r^2$  en todas las celdas no rebasaron 0.5. El sesgo se atribuye a la densidad baja de estaciones (1 termómetro por pixel) y a la ubicación de la estación meteorológica en el pixel, que puede no ser representativa del área del pixel de ERA-Interim. La temperatura media observada de 18.3 °C y ERA-Interim de 16.3 °C (Figura 5) fueron equivalentes a la observada por Ochoa *et al.* (2016). Debido a esto y la densidad baja de termómetros no se corrigió el sesgo de las temperaturas estimadas y se consideraron los datos originales del producto ERA-Interim en la modelación de los caudales.

### Análisis de caudales modelados

La combinación prueba-error y optimización en la calibración del modelo ayudaron a detectar los parámetros más sensibles que gobiernan el escurrimiento. Se observó que los parámetros más influyentes son aquellos que dan respuesta rápida a la lluvia para el escurrimiento superficial y el escurrimiento hipodérmico.

La eficiencia de la modelación sobre la cuenca del río Catamayo varió entre satisfactoria y muy buena en los periodos de calibración y validación. Al considerar el NSE (Cuadro 2) la eficiencia fue muy buena y buena con TRMM-3B42, buena y satisfactoria con PERSIANN-CDR, satisfactoria y no satisfactoria con CMORPH y buena y satisfactoria con los datos observados (Figura 6).

El rendimiento del modelo para cada año, tomando en cuenta el NSE fue satisfactorio con TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR. Los resultados de los modelos considerando PBIAS y  $r^2$  fueron satisfactorios en el siguiente orden (en relación con el número de años): TRMM-3B42, pluviómetros, PERSIANN-CDR y CMORPH. TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR no mejoraron con la corrección bias y en algunos años los valores de los criterios numéricos disminuyeron (Cuadro 5). Los coeficientes bajos de Nash en algunos años se atribuyen a la calidad de los datos observados; en 2007 y 2009 se observaron caudales extraordinarios, que no se modelan en magnitud. La relación lluvia-escurrimiento no explica estos caudales extremos; esto se observa inclusive en las modelaciones con los datos observados.

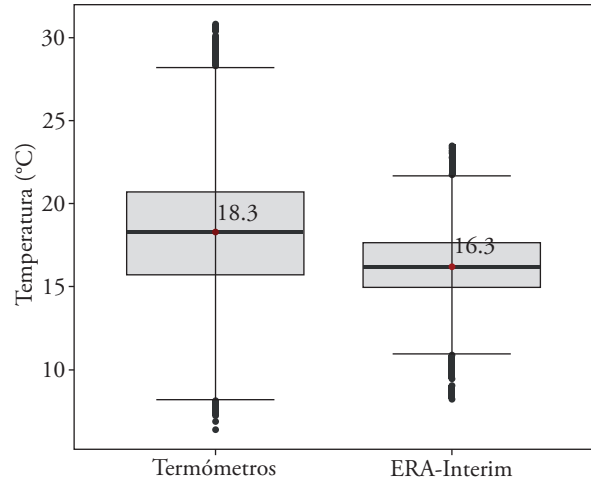


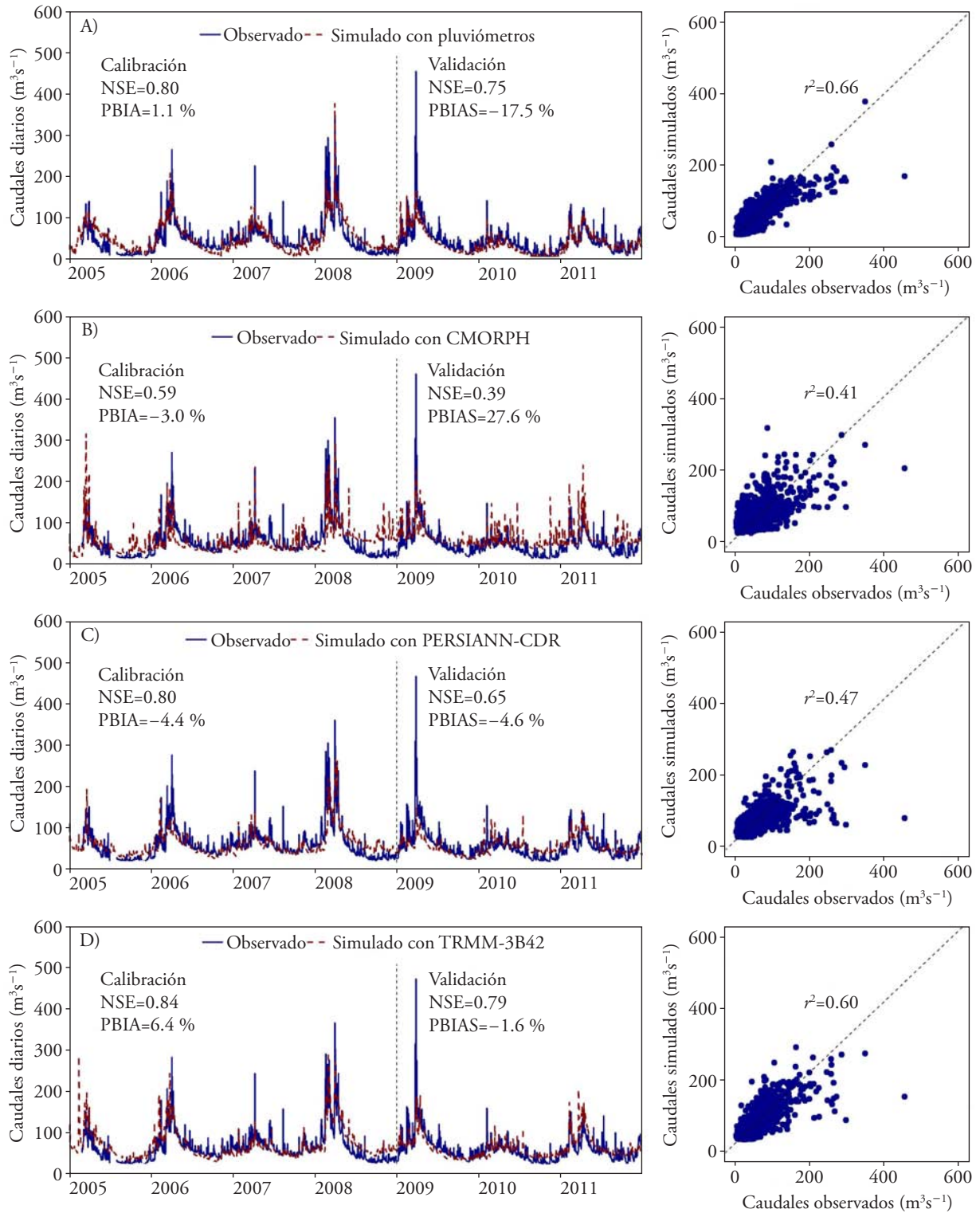
Figura 5. Temperatura de la cuenca Catamayo en el periodo 2005 -2015.

Figure 5. Temperature of the Catamayo basin in the period 2005 -2015.

3B42 and PERSIANN-CDR could be because these products are validated by other data: TRMM-3B42 was calibrated with TCI and PERSIANN-CDR is adjusted with the GPCP (Huffman *et al.*, 2007 and 2010; Ashouri *et al.*, 2015; Mantas *et al.*, 2015). The analysis of observed data facilitated the detection of the values outside the context of Celica and Catacocha stations. After analyzing with Equation 1 and “boxplot” graphs, two pieces of data considered “suspicious” were eliminated.

### Temperature analysis

The correlation of temperature observed and ERA-Interim was not satisfactory, the  $r^2$  in all the cells did not exceed 0.5. The bias is attributed to the low density of stations (1 thermometer per pixel) and the location of the meteorological station in the pixel, which may not be representative of the pixel area of ERA-Interim. The mean temperature observed of 18.3 °C and ERA-Interim of 16.3 °C (Figure 5) were equivalent to the one observed by Ochoa *et al.* (2016). Because of this and the low density of thermometers, the bias of the estimated temperatures was not corrected and the original ERA-Interim data were considered when the discharges were modelled.



**Figura 6.** Hidrogramas diarios observado y simulado, caudales observados versus simulados.  
**Figure 6.** Observed and simulated daily hydrographs, observed versus simulated discharges.



**Cuadro 5.** Eficiencia de las modelaciones.

Table 5. Efficiency of the model

Datos	Año	Datos originales				PPES corregidos				N (días)
		NSE (-)	PBIAS (%)	r <sup>2</sup> (-)	CO	NSE (-)	PBIAS (%)	r <sup>2</sup> (-)	CO	
Observados	2005Δ	0.16	63.0	0.60	†					268
	2006Δ	0.40	-4.8	0.66	§ †					363
	2007Δ	-0.09	-23.2	0.42						365
	2008Δ	0.48	14.6	0.70	§ †					366
	2009□	0.42	-16.9	0.47						360
	2010□	0.28	-36.5	0.47						365
	2011□	0.46	-5.1	0.63	§ †					364
CMORPH/ ERA-Interim	2005Δ	0.04	50.9	0.42		0.26	47.1	0.64	†	268
	2006Δ	0.30	-20.6	0.38		0.35	-14.2	0.45	§	363
	2007Δ	-0.01	-16.3	0.28		-0.07	-30.8	0.32		365
	2008Δ	0.16	21.0	0.41		0.19	24.9	0.60	†	366
	2009□	0.32	7.2	0.45	§	0.39	-1.9	0.37	§	360
	2010□	-0.32	56.9	0.14		0.07	20.0	0.29		365
	2011□	0.07	33.2	0.28		0.13	14.8	0.46		363
PERSIANN-CDR/ ERA-Interim	2005Δ	0.42	-27.6	0.59		0.45	0.9	0.47	§	268
	2006Δ	0.45	16.2	0.48		0.32	-14.8	0.37	§	363
	2007Δ	0.17	19.8	0.38		0.01	-24.0	0.25		365
	2008Δ	0.53	-18.0	0.58	¶§	0.48	14.6	0.49	§	366
	2009□	0.31	36.2	0.33		0.26	-29.4	0.31		360
	2010□	0.09	-31.2	0.35		0.18	17.3	0.30		365
	2011□	0.37	-7.3	0.48	§	0.25	9.5	0.44	§	364
TRMM-3B42/ ERA-Interim	2005Δ	0.20	57.7	0.60	†	0.48	50.7	0.63	†	268
	2006Δ	0.35	-3.6	0.56	§	0.31	-3.6	0.47	§	363
	2007Δ	0.24	-21.5	0.36		0.00	-28.9	0.33		365
	2008Δ	0.60	24.0	0.74	¶ †	0.56	23.9	0.69	¶ †	365
	2009□	0.33	-24.8	0.39		0.37	-27.0	0.37		360
	2010□	0.24	13.3	0.37	§	0.34	5.6	0.45	§	365
	2011□	0.17	18.0	0.51		0.27	10.7	0.55	§	364

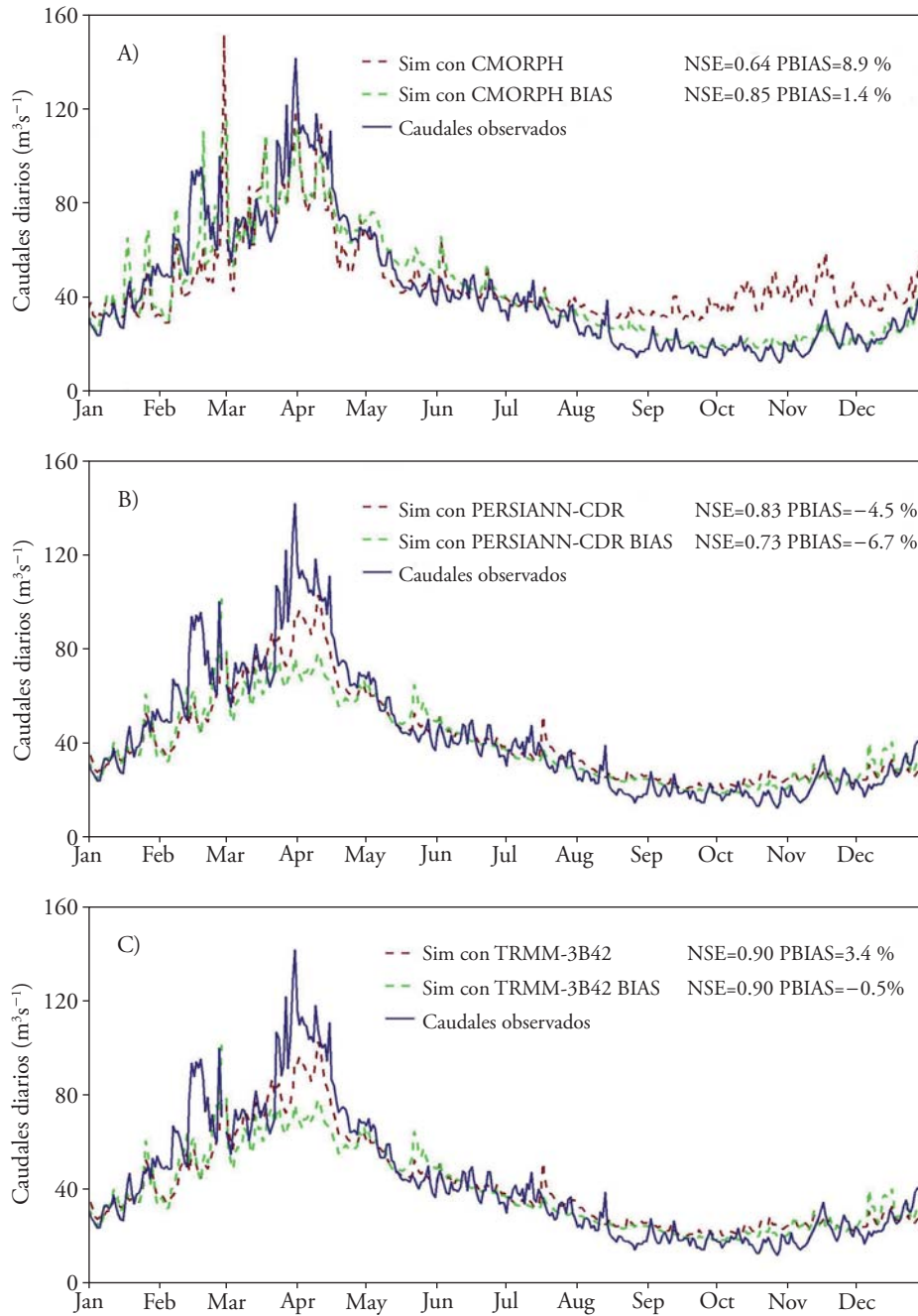
Δ Calibración, □ validación, ¶ satisfactorio con  $NSE \geq 0.5$ , § satisfactorio con  $PBIAS < \pm 15$ , † satisfactorio con  $r^2 \geq 0.6$ , CO: criterio objetivo, N: número de datos. ¶ Δ Calibration, □ validation, ¶ satisfactory with  $NSE \geq 0.5$ , § satisfactory with  $PBIAS < \pm 15$ , † satisfactory with  $r^2 \geq 0.6$ , CO: objective criterion, N: number of data.

Los hidrogramas diarios interanuales (Figura 7) muestran los caudales modelados con los productos originales y corregidos. Los caudales modelados con CMORPH BIAS se ajustaron a los caudales mínimos de agosto a noviembre y el criterio numérico NSE incrementó 21 % la eficiencia. El producto PERSIANN-CDR no mejoró; al contrario, las dimensiones de los picos en la temporada húmeda subestimaron el observado. El producto TRMM-3B42 BIAS pareció igual respecto a NSE y PBIAS. Después de implementar las lluvias de los PPES corregidos, los modelos no se recalibraron con el propósito de verificar el efecto de la validación en cada uno de los productos.

### Analysis of modelled discharges

The trial and error and optimization combination in the calibration of the model helped to detect the most sensitive parameters that govern the runoff. It was observed that the most influential parameters are those that give a fast response to the rainfall for the superficial runoff and hypodermic runoff.

The efficiency of the modelling on the Catamayo River basin varied between satisfactory and very good in the calibration and validation periods. When considering the NSE (Table 2) the efficiency was very good and good with TRMM-3B42, good and satisfactory with PERSIANN-CDR, satisfactory



**Figura 7.** Hidrogramas diarios interanuales observado y simulado con datos estimados originales y corregidos.  
**Figure 7.** Observed and simulated inter-annual daily hydrographs with original and corrected estimated data.

En la cuenca Catamayo se han realizado pocos estudios de modelación hidrológica a pasos de tiempo diario. Oñate-Valdivieso *et al.* (2016) utilizaron dos modelos hidrológicos (Témez y SWAT) para modelar los caudales medios mensuales en seis subcuencas del sur del Ecuador y norte del Perú. Los resultados en el río Catamayo en la estación Puente Boquerón no

and not satisfactory with CMORPH, and good and satisfactory with the observed data (Figure 6).

The performance of the model for each year, taking into account the NSE, was satisfactory with TRMM-3B42 and PERSIANN-CDR. Results considered PBIAS and  $r^2$  were satisfactory (in relation to the number of years): TRMM-3B42,

fueron satisfactorios con los dos modelos, el NSE fue  $-0.82$  (Témez) y  $0.20$  (SWAT). El bajo rendimiento del modelo se atribuye a la poca cantidad de datos observados requeridos por los modelos. Balcázar *et al.* (2018) utilizaron los productos de precipitación PERSIANN y temperatura ERA-Interim en el modelo distribuido CEQUEAU, para modelar los caudales diarios en la cuenca del río Catamayo en Vicin. La eficiencia de este modelo fue satisfactoria con los productos PERSIANN-CDR/ERA-Interim, NSE fue  $0.80$  y  $0.70$  para la calibración y validación, respectivamente.

### CONCLUSIONES

Los productos satelitales de precipitación evaluados sobre la cuenca Catamayo mostraron correlaciones satisfactorias, pero en algunos pixeles se encontraron sesgos importantes que después se corrigieron. La corrección tuvo efecto positivo en el producto CMORPH y ligera con PERSIANN-CDR y TRMM-3B42, debido a que los dos últimos se corrigieron con otros datos. La correlación de la temperatura ERA-Interim es baja por la poca cantidad de datos y la topografía compleja del lugar, y el sesgo de estos datos no se corrigió.

El rendimiento del modelo distribuido CEQUEAU utilizando los productos PERSIANN-CDR y TRMM-3B42/ERA-Interim fue satisfactorio en los periodos de calibración y validación, así como en algunos años. Estos resultados de simulación de caudales pueden ser de gran utilidad para los proyectos de abastecimiento de agua y en la gestión de los recursos hídricos de la región.

El estudio revela que los datos de satélite se pueden utilizar sin corrección en la modelación de caudales en cuencas pobremente instrumentadas, como las del sur del Ecuador. Asimismo, el uso de productos de satélite en los modelos hidrológicos distribuidos permite usar cada pixel del producto como celda del modelo, evitando preprocesos de interpolación. Una vez que se conoce la eficiencia de los productos de satélite, éstos son más eficaces que los datos observados, puesto que en algunos casos están accesibles casi en tiempo real.

### AGRADECIMIENTOS

El presente estudio se desarrolló en el marco de los proyectos: CONACYT 248553 y UAEM/Quebec 4192/2016E.

pluviometers, PERSIANN-CDR and CMORPH. TRMM-3B42 and PERSIANN-CDR did not improve with corrected bias and, in some years, the values of numeric criteria decreased (Table 5). The low Nash coefficients in some years are attributed to the quality of the observed data; in 2007 and 2009 extraordinary discharges were observed, which are not modelled in magnitude. Rainfall-runoff relation does not explain these extreme discharges; this is observed even in the modelling with the observed data (Figure 6).

Inter-annual daily hydrographs (Figure 7) show the modelled discharges with the original and corrected products. Discharges modelled with CMORPH BIAS were adjusted to the minimal discharges from August to November, and the numerical criterion NSE increased the efficiency in 21 %. The PERSIANN-CDR product did not improve; on the contrary, the dimensions of the peaks in the humid season underestimated the one observed. The TRMM-3B42 BIAS product seemed equal compared to NSE and PBIAS. After implementing the rainfall of the corrected SPP, the models were not recalibrated with the purpose of verifying the effect of the validation in each one of the products.

In the Catamayo basin, few studies of hydrological modelling have been carried out at steps of daily time. Oñate-Valdivieso *et al.* (2016) used two hydrological models (Témez and SWAT) to model mean monthly discharges in six sub-basins in southern Ecuador and northern Peru. The results in the Catamayo River at Puente Boquerón gauging station were not satisfactory with the two models; the NSE was  $-0.82$  (Témez) and  $0.20$  (SWAT). The low performance of the model is attributed to the low number of observed data required by the models. Balcázar *et al.* (2018) used the PERSIANN precipitation products and ERA-Interim temperature in the CEQUEAU distributed model, to model the daily discharges in the Catamayo River basin at Vicin gauging station. The efficiency of this model was satisfactory with the PERSIANN-CDR/ERA-Interim products, NSE was  $0.80$  and  $0.70$  for calibration and validation, respectively.

### CONCLUSIONS

The satellite precipitation products evaluated from the Catamayo basin showed satisfactory

Agradecemos a las instituciones que proveen los datos: INAMHI, ECSEF, NOAA, NASA, CHRS y ECMWF. A los revisores anónimos por su aporte para mejorar el presente trabajo.

## LITERATURA CITADA

- Ashouri, H., K. L. Hsu, S. Sorooshian, D. K. Braithwaite, K. R. Knapp, L. D. Cecil, B. R. Nelson, and O. P. Prat. 2015. PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 96: 69–83.
- Bà, K., L. Balcázar, V. Diaz-Mercado, F. Ortiz, M. Gómez-Albores and C. Díaz-Delgado (2018). Hydrological Evaluation of PERSIANN-CDR Rainfall over Upper Senegal River and Bani River Basins. *Remote Sensing*, 10(12), 19. <https://doi.org/10.3390/rs10121884>.
- Bà, K., V. Diaz-Mercado, L. Balcázar, F. Ortiz, M. A. Gómez-Albores, and C. Díaz-Delgado. 2018b. Performance evaluation of satellite precipitation and its use for distributed hydrological modelling on Western Africa basins. *In: 3RD International Conference on African Large River Basin Hydrology (ICALRBH)*. Alger. p. 3.
- Bà, K.M., C. Díaz-Delgado, E. Quentin, V. H. Guerra-Cobián, J. I. Ojeda-Chihuahua, C. Alin-Andrei, y R. Franco-Plata. 2013. Modelado hidrológico de grandes cuencas: caso de estudio del río Senegal, África Occidental. *Tecnol. Cienc. Agua IV*: 129–136.
- Bà, K. M., C. Díaz-Delgado, y V. Rodríguez O. 2001. Simulación de caudales de los ríos Amacuzac y San Jerónimo en el Estado de Mexico, México. *Ing. Hid. Méx.* XVI: 177–126.
- Bà, K.M., y A. Serrat-Capdevila. 2012. Modelación hidrológica con precipitación estimada por imágenes satelitales: El caso del río La Sierra (México). *In: González Sosa, E., C. Díaz-Delgado, V. H. Guerra-Cobián, A. A. Gutiérrez López, y N. M. Ramos Salinas (eds). La Importancia de las Inundaciones en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en México*. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México. pp: 261–287.
- Balcázar, L., G. Gaona, K. Bà, S. Minga-León, D. Mejía y C. Díaz-Delgado (2018). Eficiencia del modelo Cequeau utilizando Persiann y Era-Interim sobre una cuenca del sur del Ecuador. *En XXV Congreso Nacional de Hidráulica* (p. 5). Ciudad de México: Asociación Mexicana de Hidráulica.
- Bodian, A., A. Dezetter, A. Deme and L. Diop (2016). Hydrological Evaluation of TRMM Rainfall over the Upper Senegal River Basin. *Hydrology*, 3(15), 18. <https://doi.org/10.3390/hydrology3020015>.
- Buytaert, W., R. Céleri, B. De Bièvre, F. Cisneros, G. Wyseure, J. Deckers, and R. Hofstede. 2006. Human impact on the hydrology of the Andean paramos. *Earth-Science Rev.* 79: 53–72.
- Chen, S., Y. Hong, Q. Cao, J. J. Gourley, P. Kirstetter, B. Yong, Y. Tian, Z. Zhang, Y. Shen, J. Hu, and J. Hardy. 2013. Similarity and difference of the two successive V6 and V7 TRMM multisatellite precipitation analysis performance over China. *J. Geophys. Res.* 118: 13060–13074.
- De Luque S., A. L. 2011. Cualificación y homogenización de las series climáticas mensuales de precipitación de Canarias. *Memoria Metodológica*. Canarias. 91 p.
- correlations, although in some pixels important biases were found that were corrected later. The correction had a positive effect on the CMORPH product and a slight one with PERSIANN-CDR and TRMM-3B42, because the two latter were corrected with other data. The correlation of the ERA-Interim temperature is low because of the reduced number of data and the complex topography of the basin, and because the bias of these data was not corrected.
- The performance of the CEQUEAU distributed model using PERSIANN-CDR and TRMM-3B42/ERA-Interim products were satisfactory for the calibration and validation periods, as well as for some years. Simulation results of discharges can be of great use for projects of water supply and for the management of the water resources of the region.
- The study reveals that the satellite data can be used without correction in modelling the discharges in poorly gauged basins, such as those in southern Ecuador. Likewise, the use of satellite products in the distributed hydrological models allows using each pixel of the product as a cell of the model, avoiding interpolation pre-processes. Once the efficiency of satellite products is known, these are more effective than the observed data, since in some cases they are accessible nearly in real time.

—End of the English version—



- Dee, D. P., S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, and S. Kobayashi. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *R. Meteorol. Soc.* 137: 553–597.
- Fu, Y., and G. Liu. 2007. Possible misidentification of rain type by TRMM PR over Tibetan Plateau. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 46: 667–672.
- Guerra-Cobián, V. H. 2007. Análisis del efecto de discretización espacial en el modelado de cuencas hidrológicas utilizando el modelo distribuido CEQUEAU-ONU. Tesis de Doctorado. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México. 231 p.
- Gupta, H. V., S. Sorooshian, and P. O. Yapo. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrol. Eng.* 4: 135–143.
- Harrell Jr, F. E., K. L. Lee, and D. B. Mark. 1996. Multivariable prognostic models: issues in developing models, evaluating assumptions and adequacy, and measuring and reducing errors. *Stat. Med.* 15: 361–387.



- Hijmans, R. J., J. van Etten, J. Cheng, M. Mattiuzzi, M. Sumner, J. A. Greenberg, O. Perpinan, A. Bevan, E. Racine, and A. Shortridge. 2016. raster: Geographic Data Analysis and Modeling. <https://cran.r-project.org/package=raster> (Consulta: enero 2017).
- Hong, Y., D. Gochis, J.-T. Cheng, K.-L. Hsu, and S. Sorrosian. 2007. Evaluation of PERSIANN-CCS rainfall measurement using the NAME event rain Gauge Network. *J. Hydrometeorol.* 8: 469–482.
- Huffman, G. J., A. R. F Adler, D. T. Bolvin, G. Gu, E. J. Nelkin, K. P. Bowman, Y. Hong, E. F. Stocker, and D. B. Wolff, 2007. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J. Hydrometeorol.* 8: 38–55.
- Jarvis, A., H. I. Reuter, A. Nelson, and E. Guevara. 2008. Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). <http://srtm.csi.cgiar.org> (Consulta: enero 2016).
- Joyce, R. J., J. E. Janowiak, P. A. Arkin, and P. Xie. 2004. CMORPH: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *J. Hydrometeorol.* 5: 487–503.
- Lavado, W., D. Labat, G. Jean-Loup, J. Ronchail, and J. J. Ordóñez. 2009. TRMM rainfall data estimation over the Peruvian Amazon-Andes basin and its assimilation into a monthly water balance model. *In: Proc. Symposium HS.2 at the Join IAHS & IAH Convention.* IAHS Publ., Hyderabad, India. pp: 245–252.
- Llanos, H., y K. Bâ. 2011. Simulación de caudales de los ríos Nervión e Ibaizabal. País Vasco. *Rev. Geol. Apl. Ing. Amb.* 1: 13–23.
- MAE-MAGAP, 2013. Mapa de cobertura y uso de la tierra del Ecuador continental, escala 1:100.000. Quito, Ecuador. <http://mapainteractivo.ambiente.gob.ec/> (Consulta: noviembre 2016).
- Mantas, V.M., Z. Liu, C. Caro, and A. J. S. C. Pereira. 2015. Validation of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) products in the Peruvian Andes. *Atmos. Res.* 163: 132–145.
- Moriasi, D. N., M. W. Gitau, N. Pai, and P. Daggupati. 2015. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. *Am. Soc. Agric. Biol. Eng.* 58: 1763–1785.
- Morin, G., 2009. CEQUEAU hydrological model. Québec, Canada. 89 p.
- Morin, G., 2002. CEQUEAU hydrological model. *In: Singh, V. P., and D. Frevert (eds). Mathematical Models of Large Watershed Hydrology.* Baton Rouge. pp: 507–576.
- Morin, G., and P. Paquet. 2007. Modèle hydrologique CEQUEAU, INRS-ETE. Québec. Report Investigation No. R000926, 458 p.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual model. *J. Hydrol.* 10: 282–290.
- Ochoa, P.A., A. Fries, D. Mejía, J. I. Burneo, J. D. Ruíz-Sinoga, and A. Cerdà. 2016. Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes. *Catena* 140: 31–42.
- Oñate-Valdivieso, F., J. Bosque-Sendra, A. Sastre-Merlin, and V. M. Ponce. 2016. Calibration, validation and evaluation of a lumped hydrologic model in a mountain area in Southern Ecuador. *Agrociencia* 50: 945–963.
- Piani, C., J. O. Harter, and E. Coppola. 2009. Statistical bias correction for daily precipitation in Regional Climate Models over Europe. *Theor. Appl. Clim.* 99: 187–192.
- Pourrut, P., O. Róvere, I. Romo, y H. Villacrés. 1995. Clima del Ecuador *In: Pourrut, P. (ed). El Agua en el Ecuador: Clima, Precipitaciones, Escorrentia.* Institut français de recherche scientifique pour le développement en Coopéation, Corporación Editora Nacional, Colegio de Geógrafos de Ecuador, Quito, Ecuador. pp: 13–26.
- R Core Team, 2016. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/> (Consulta: enero 2017).
- Refsgaard, J. C. 1997. Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *J. Hydrol.* 198: 69–97.
- Richter, M. (2003). Using epiphytes and soil temperatures for eco-climatic interpretations in southern Ecuador. *Erdkunde*, 57(3), 161–181
- Richter, M., E. Beck, R. Rollenbeck, and J. Bendix (2013). The Study Area. *In: Bendix, J., E. Beck, A. Bräuning, F. Makeschin, R. Mosandl, S. Scheu, and W. Wilcke (Eds.), Ecosystem Services, Biodiversity and Environmental Change in a Tropical Mountain Ecosystem of South Ecuador* (pp. 3–17). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-38137-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-38137-9_1).
- Richter, M., K. Diertl, P. Emck, T. Peters, and E. Beck. 2009. Reasons for an outstanding plant diversity in the tropical Andes of Southern Ecuador. *Landsch. Online* 12: 1–35.
- Rollenbeck, R., 2006. Variability of precipitation in the Reserva Biológica San Francisco/Southern Ecuador. *J. Lyona* 9: 43–51.
- Rollenbeck, R., P. Fabian, and J. Bendix. 2006. Advances in geosciences precipitation dynamics and chemical properties in tropical mountain forests of Ecuador. *Adv. Geosci.* 6: 73–76.
- Serrat-Capdevila, A., M. Merino, J. B. Valdes, and M. Durcik. 2016. Evaluation of the performance of three satellite precipitation products over Africa. *Remote Sens.* 8: 1–22.
- Sorooshian, S., K. L. Hsu, X. Gao, H. V. Gupta, B. Imam, and D. Braithwaite. 2000. Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bull. Am. Meteorol. Soc* 81: 2035–2046.
- Stisen, S., and I. Sandholt. 2010. Evaluation of remote-sensing-based rainfall products through predictive capability in hydrological runoff modelling. *Hydrol. Process* 24: 879–891.
- Thompson, A., and B. N. Taylor. 2008. Guide for the Use of the International System of Units (SI). <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication811e2008.pdf>. (Consulta: noviembre 2018).
- Valdés-Pineda, R., E. M. C. Demaría, J. B. Valdés, S. Wi, and A. Serrat-Capdevila. 2016. Bias correction of daily satellite-based rainfall estimates for hydrologic forecasting in the Upper Zambezi, Africa. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 437: 1–28.
- Vázquez, R. F., 2010. Modelación hidrológica de una microcuenca Altoandina ubicada en el Austro Ecuatoriano. *Mas-kana* 1: 79–90.

- Wickham, H., 2017. tidyverse: Easily install and load the “Tidyverse”. <https://cran.r-project.org/package=tidyverse> (Consulta: abril 2018).
- Wickham, H., and W. Chang. 2009. Package ggplot2: ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York. 978-0-387-98140-6. <http://ggplot2.org>.
- Worqlul, A. W., E. K. Ayana, B. H. P. Maathuis, C. MacAlister, W. D. Philpot, J. M. Osorio Leyton, and T. S. Steenhuis. 2017. Performance of bias corrected MPEG rainfall estimate for rainfall-runoff simulation in the Upper Blue Nile Basin. *J. Hydrol.* 556: 1182–1191.
- Zulkafli, Z., B. Wouter, C. Onof, B. Manz, E. Tarnavsky, W. Lavado, and G. Jean-Loup. 2014. A comparative performance analysis of TRMM 3B42 (TMPA) Versions 6 and 7 for hydrological applications over Andean – Amazon River Basins. *J. Hydrol.* 15: 581–592.