

Estimation of the water balance of the Colombian Pacific region

Manuela Velásquez-Restrepo & Germán Poveda

Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia. mavelasquezre@unal.edu.co, gpoveda@unal.edu.co

Received: July 18th, 2018. Received in revised form: January 28th, 2019. Accepted: January 30th, 2019.

Abstract

Using the surface water balance equation, the average annual runoff in the continental zone of the geographic domain of Central America for Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) is estimated, and results are validated along the Colombian Pacific rivers, namely Atrato, San Juan, Baudó, Patía and Mira, using historical streamflow records, as well as streamflows reported in the National Water Study. Precipitation was estimated using the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) and Climate Hazard group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS) data sets. Actual evapotranspiration was estimated using the Max Planck Institute (MPI) data sets, as well as the Choudhury and Budyko methods based estimates of potential evapotranspiration from Climatic Research Unit (CRU). Results allow concluding that the surface balance equation exhibits an almost perfect closure over the Atrato and Baudó Rivers, with errors on the order of 10-20%, whereas for the Mira River errors are on the order of 40%.

Keywords: water balance; hydrology; Colombian Pacific; precipitation; evapotranspiration; runoff.

Estimación del balance hídrico de la región Pacífica Colombiana

Resumen

Mediante la ecuación de balance hídrico superficial se estima la escurriencia media anual en la zona continental del dominio geográfico de Centro América para el programa Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) y se validan los resultados en los principales ríos de la región del Pacífico Colombiano: Atrato, San Juan, Baudó, Patía y Mira, usando los registros de caudales medios mensuales de las estaciones hidrológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), así como los caudales reportados en el Estudio Nacional del Agua. Para la estimación de los campos de precipitación se usa información de Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y Climate Hazard group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS), para la evapotranspiración real se usa información del Max Planck Institute (MPI), así como los métodos de Choudhury y Budyko partiendo de información de evapotranspiración potencial del Climatic Research Unit (CRU). Los resultados obtenidos permiten concluir que sobre la región de estudio se presentan un cierre casi perfecto en la ecuación de balance hídrico en los ríos Atrato y Baudó, con errores del orden de 10-20%, en contraste la cuenca del Río Mira presenta errores del orden de 40%.

Palabras clave: balance hídrico; hidrología; Pacífico Colombiano; precipitación; evapotranspiración; escurriencia.

1. Introducción

El asunto fundamental de la hidrología es resolver la ecuación de balance hídrico [1], en un amplio rango de escalas espaciales y temporales. Se trata de la ecuación diferencial de conservación de masa dentro de un volumen de control definido por una cuenca hidrográfica, expresada como [2],

$$\frac{dS(t)}{dt} = P(t) - AET(t) - R(t) \quad (1)$$

en donde $S(t)$ representa el almacenamiento de agua en el suelo y en los acuíferos, en función del tiempo, $P(t)$ y $AET(t)$ representan la precipitación y la evaporación real integradas en la cuenca, y $R(t)$ representa la escurriencia superficial a la salida de la cuenca. Integrando la ecuación en el largo plazo (15-20 años), el cambio de almacenamiento (lado izquierdo) es despreciable en comparación con los demás términos de la ecuación. En el largo plazo los términos $P(t)$, $AET(t)$, y $R(t)$ se pueden reemplazar por sus valores promedios de largo plazo, P , AET , y R , de acuerdo con el Teorema del Valor Medio [2], de tal manera que:

$$R = P - AET \quad (2)$$

How to cite: Velásquez-Restrepo, M. and Poveda, G., Estimación del balance hídrico de la región Pacífica Colombiana.. DYNA, 86(208), pp. 297-306, January - March, 2019

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia. 
Revista DYNA, 86(208), pp. 297-306, January - March, 2019, ISSN 0012-7353
DOI: <http://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.73587>

Los términos de esta ecuación tienen unidades de $[LT^{-1}]$, y por tanto el área de la cuenca resulta como factor de escala para la estimación del caudal, $Q [L^3T^{-1}] = RA_c$. Por tanto, la estimación del caudal medio multianual requiere estimar la precipitación y la evapotranspiración real sobre el área de la cuenca, con una distribución de la topografía como la función bidimensional del espacio [2], $f(x, y)$ de manera que

$$Q = A_c \iint [P(x, y) - AET(x, y)] dx dy \quad (3)$$

La región Pacífica también conocida como Chocó Biogeográfico se localiza en la franja entre el Océano Pacífico y la Cordillera Occidental de los Andes, desde la cuenca del Río Mataje hasta la desembocadura del Río Atrato, cerca de Panamá [3]. Es considerada una de las regiones más lluviosas [4] y biodiversas [5] del planeta. Tales características la hacen un laboratorio natural ideal para entender el funcionamiento e integridad del ciclo hidrológico en un amplio rango de escalas, y obligan a su conservación, dado que la región está siendo afectada por deforestación, monocultivos, ganadería extensiva altamente deletérea e ineficiente, y minería contaminante de sus aguas, suelos y bosques.

Este trabajo tiene por objeto estimar la escorrentía media anual en la zona continental del dominio geográfico definido por el Programa Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX), un programa de investigación regional del Programa de Investigación del Clima Mundial (WCRP; <https://www.wcrp-climate.org/>). Para tal fin, empleamos la aproximación de largo plazo de la ecuación de balance hídrico (ecn. 3), y validamos los resultados obtenidos para los principales ríos del Pacífico Colombiano: Atrato, San Juan, Baudó, Patía y Mira. Los resultados se validan mediante los registros de caudal de las estaciones hidrológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM); el valor medio multianual de caudal para las estaciones disponibles permite validar hasta el área aferente a la estación, los caudales a la salida de la cuenca se evalúan con los reportados en el Estudio Nacional del Agua – 2014 [6].

2. Metodología

Para la estimación del balance hídrico superficial (ecn. 3) se requiere estimar la precipitación y la evaporación real sobre la región de estudio. A continuación se describen las fuentes de información y las bases de datos utilizados en el presente estudio.

2.1. Información Utilizada

2.1.1. Precipitación

Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) fue un satélite lanzado en 1997 entre la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA) y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA).

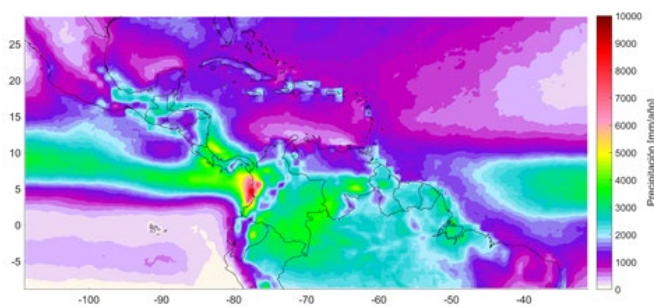


Figura 1 Precipitación promedio anual de largo plazo de la misión TRMM para el periodo de registro de 1998 a 2013.

Fuente: Los autores, 2018.

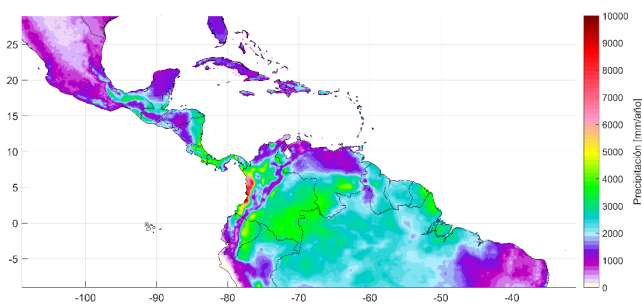


Figura 2 Precipitación promedio anual de largo plazo de la base de datos CHIRPS para el periodo de registro de 1998 a 2013.

Fuente: Los autores, 2018.

El algoritmo de análisis de precipitación multisatélite TRMM ha generado dos productos principales, uno post-tiempo real (3B42) y otro casi en tiempo real (3B42RT) con una resolución espacial de 0.25° . Debido al agotamiento del combustible, el satélite TRMM fue retirado el 8 de abril de 2015 después de 17 años de funcionamiento. Fue reemplazado por Global Precipitation Measurement (GPM) a principios de 2014 [7]. Para nuestro propósito usamos el producto 3B42 de TRMM desde enero de 1998 hasta diciembre de 2015, con resolución temporal mensual, en el dominio geográfico de Centro América para CORDEX. En la Fig. 2 se muestra la distribución de la precipitación promedio anual según el producto 3B42 de TRMM, para el periodo de registro de 1998 a 2013.

Climate Hazard group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS) es un conjunto de datos de alta resolución, basado en interpolación inteligente, que incorpora imágenes satelitales con datos de estaciones in situ para crear series temporales de lluvia, con cobertura espacial de casi todo el globo terrestre ($50^\circ N$ - $50^\circ S$). Posee una resolución espacial de 0.05° y cubre el período entre enero de 1981 hasta el presente [8]. Para nuestro propósito usamos información desde enero de 1981 hasta diciembre de 2015 con resolución temporal mensual, en el dominio geográfico de Centro América para CORDEX. En la Fig. 1 se muestra la precipitación promedio anual de largo plazo para el periodo de registro de 1998 a 2013.

2.1.2. Evapotranspiración

El Max Planck Institute (MPI) proporciona una estimación de la evapotranspiración real (AET) global de 1982 a 2008 con una escala espacial de 0.5° , a partir de la información de la red

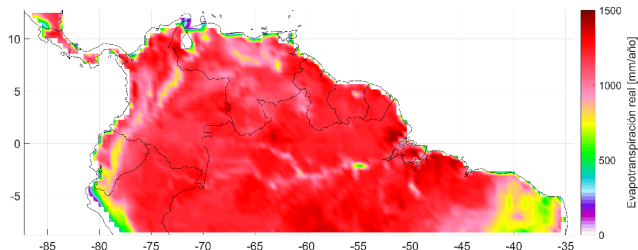


Figura 3 Evapotranspiración real promedio anual de largo plazo de MPI para el periodo de registro de 1998 a 2008.

Fuente: Los autores, 2018.

global FLUXNET² de mediciones continuas in situ de los intercambios tierra-atmósfera, incluido el vapor de agua. La estimación integra medidas puntuales de *AET* en los sitios de observación de FLUXNET con observaciones meteorológicas y de teleobservación y un algoritmo de aprendizaje automático (MTE-Model Tree Ensemble) [9]. Para estimar el balance de agua se usaron los campos de evaporotranspiración real de MPI desde enero de 1982 hasta diciembre de 2008, con resolución temporal mensual, para todas las longitudes del dominio geográfico de estudio entre 12,75° N y 8,75° S. En la Fig. 3 se muestra la distribución de la evaporotranspiración real promedio anual de largo plazo para el periodo de registro de 1998 a 2008.

La Climatic Research Unit (CRU) es ampliamente reconocida como una de las instituciones líderes en el estudio del cambio climático natural y antropogénico [10]. La serie CRU TS (Climatic Research Unit TimeSeries) es un conjunto de datos con resolución espacial de 0.5°x0.5°, y periodo de registro de 1901 hasta la actualidad, basado en el análisis de los registros de más de 4.000 estaciones meteorológicas. Específicamente, la evaporotranspiración potencial (*PET*) se estima a partir de una variante de la ecuación de Penman-Monteith, propuesta por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), usando los campos de temperatura media (TMP), rango de temperatura diurna (DTR), presión de vapor (VAP), cobertura de nubes (CLD) y velocidad del viento (WND), campos estimados también por CRU [11]. Se usó el producto CRU TS con resolución temporal mensual desde enero de 1981 hasta diciembre de 2013, en el dominio geográfico de Centro América para CORDEX. En la Fig. 4 se muestra la distribución de la evaporotranspiración potencial promedio de largo plazo para el periodo entre 1998 y 2008.

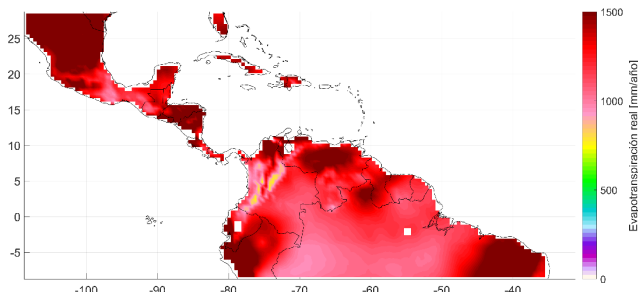


Figura 4 Evapotranspiración potencial promedio anual de largo plazo de MPI para el periodo de registro de 1998 a 2008.

Fuente: Los autores.

2.1.3. Estimación de evaporotranspiración real

Debido a la escasa disponibilidad de información de evaporotranspiración real en el dominio geográfico de análisis, fue necesario estimarla mediante las metodologías de Budyko y Choudhury, los cuales se describen a continuación.

2.1.3.1. Método Budyko.

Budyko propuso una expresión para modelar los balances acoplados de agua y energía basados en dos ecuaciones previamente formuladas por Schreiber (1904) y Ol'dekop (1911). La relación propuesta por Schreiber sugiere que la relación de evaporación es asintótica y se aproxima a la unidad ($AET/P \rightarrow 1$) para grandes valores del índice de aridez, dado que en regiones extremadamente áridas toda la precipitación se convierte esencialmente en evaporotranspiración ($AET=P$). Además, la evaporotranspiración real anual se aproxima a la precipitación anual en regiones donde la energía disponible excede en gran medida la cantidad requerida para evaporar toda la cantidad anual de precipitación, mientras que en regiones húmedas donde la energía disponible es una fracción de la cantidad requerida para evaporar la precipitación anual, la evaporotranspiración real se aproxima a la evaporotranspiración potencial. Ol'dekop desarrolló una expresión similar aunque utilizando una relación de tangente hiperbólica [12].

Budyko encontró que la ecuación de Schreiber subestimaba la evaporotranspiración mientras que la ecuación de Ol'dekop la sobreestimaba, y por lo tanto propuso una nueva ecuación usando la media geométrica entre ambas [12]:

$$\frac{AET}{P} = \left[\frac{PET}{P} \tanh\left(\frac{P}{PET}\right) \left(1 - e^{-\frac{PET}{P}}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

2.1.3.2 Método Choudhury.

Pike (1964) había propuesto una ecuación similar a una encontrada previamente por Turc (1954), basada en 254 cuencas de áreas entre 5 – 626.000 km² procedentes de cuatro continentes (África, Asia, Europa y América del Norte). Reconociendo que las cuencas consideradas por Turc (1954), Budyko (1958) y Pike (1964) tenían áreas muy diferentes [13], Choudhury (1999) propone la ecuación:

$$AET = \frac{P}{\left[1 + \left(\frac{P}{PET}\right)^{\alpha}\right]^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (5)$$

en donde $\alpha = 1.8$, para cuencas grandes y $\alpha = 2.6$ para parcelas, y por lo tanto el parámetro α depende de la escala espacial [14].

2.1.4. Caudal

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) cuenta con una red hidrometeorológica de 2.800 estaciones; de estas, 778 son hidrológicas y 2.022, meteorológicas [15].

² FLUXNET es una red global que mide los intercambios de dióxido de carbono, vapor de agua y energía entre la biosfera y la atmósfera.

Tabla 1.

Estaciones hidrológicas del IDEAM ubicadas en las cuencas de los ríos Atrato, San Juan, Patía y Mira.

Nº	Código	Nombre	Latitud	Longitud
1	11077010	Bellavista	6,56	-76,88
2	54097010	Peñitas	4,29	-77,02
3	52077020	Los Nortes	1,74	-77,53
4	51027060	San Juan de Mira	1.42	-78.67

Fuente: Los autores, 2018.

Para validar los caudales estimados a partir del balance hídrico en las principales cuencas del Pacífico Colombiano, se usaron series de caudal de 4 estaciones hidrológicas del IDEAM, Bellavista, Peñitas, Los Nortes y San Juan de Mira, de los ríos Atrato, San Juan, Patía y Mira, respectivamente. La estimación de caudal del Río Baudó no pudo ser evaluada debido a que no se contó con una serie de caudal en esta cuenca. En la Tabla 1 se detallan las estaciones utilizadas.

En la Fig. 5 se muestra el ciclo anual de caudales promedios de las estaciones de hidrológicas, estimado con registros diarios de enero de 1968 a diciembre de 2013 y de marzo de 1969 a abril de 2012, para las estaciones Bellavista y Peñitas, respectivamente; y con registros mensuales de enero de 1985 a diciembre de 1999 y de enero de 1981 a diciembre de 2004 para las estaciones Los Nortes y San Juan de Mira, respectivamente. También se muestra el ciclo anual de escorrentía, considerando el área aferente a cada estación.

4. Resultados

Se estimaron los campos de escorrentía media anual en el dominio geográfico de Centro América para CORDEX, a una escala espacial de 0.5° (~50 km) usando la ecuación de balance hídrico de largo plazo. Se obtienen múltiples campos de escorrentía promedio anual de largo plazo considerando todas las posibles combinaciones entre los campos de precipitación y evapotranspiración real promedio anual. Esta última se estimó a partir de los métodos de Choudhury y Budyko y para diferentes ventanas de tiempo.

En la Fig. 6 se muestran algunos de los mapas de escorrentía obtenidos. Los mapas estimados con los campos de evapotranspiración real de MPI no se encuentran en el dominio geográfico mencionado debido a que la información disponible en esta base de datos no cubre la zona de estudio en su totalidad.

4.1. Río Atrato

El Río Atrato es el más grande de la región del Pacífico colombiano, con una superficie aproximada de 36.400 km². Nace en la Cordillera Occidental a 3.800 metros sobre el nivel del mar y desemboca en el Golfo de Urabá después de un trayecto de más de 600 km.

El Estudio Nacional del Agua 2014 reporta para el Río Atrato un caudal medio anual de 4.137 m³/s. La estación hidrológica Bellavista está localizada en el municipio de Bojayá, y hasta este punto la cuenca tiene un área de drenaje de 15.358 km² y un caudal medio anual de 2.498 m³/s.

En la Fig. 7 se muestran la cuenca hidrográfica, la ubicación de la estación hidrológica Bellavista y la distribución de alturas de la cuenca del Río Atrato. En la Fig. 8 se muestra mapa

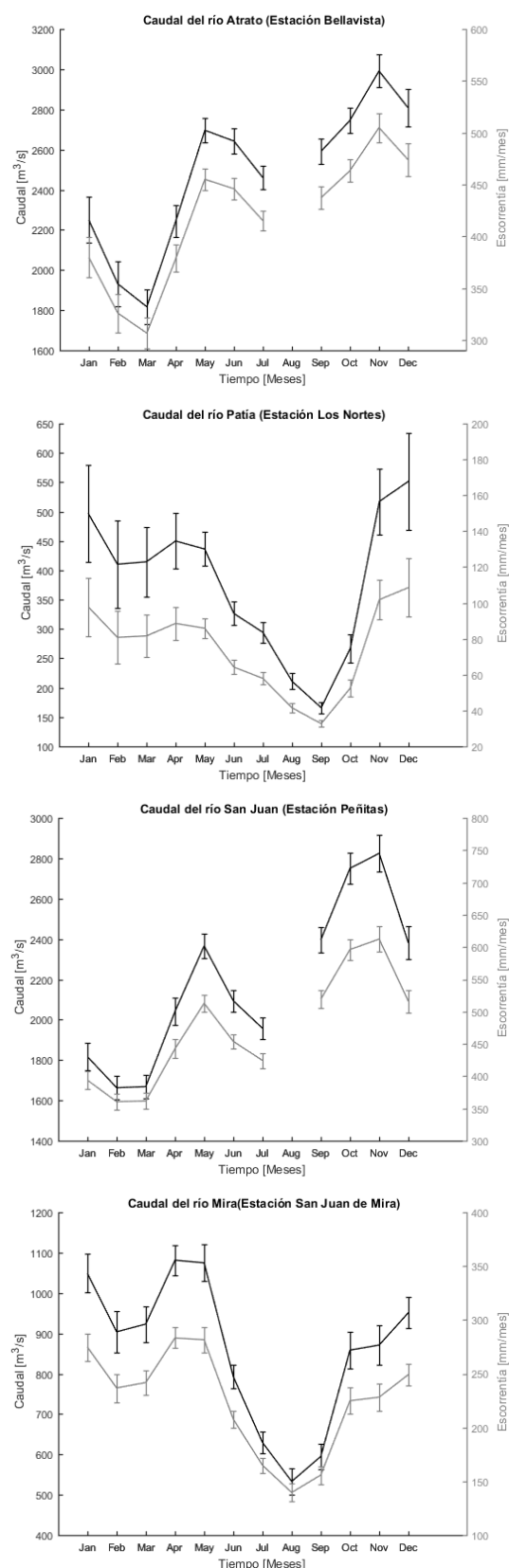


Figura 5 Ciclo anual de caudales y escorrentía estimado a partir de las series de las estaciones Bellavista, Peñitas, Los Nortes y San Juan de Mira, ubicadas en las cuencas de los ríos Atrato, San Juan, Patía y Mira, respectivamente. Fuente: Los autores, 2018.

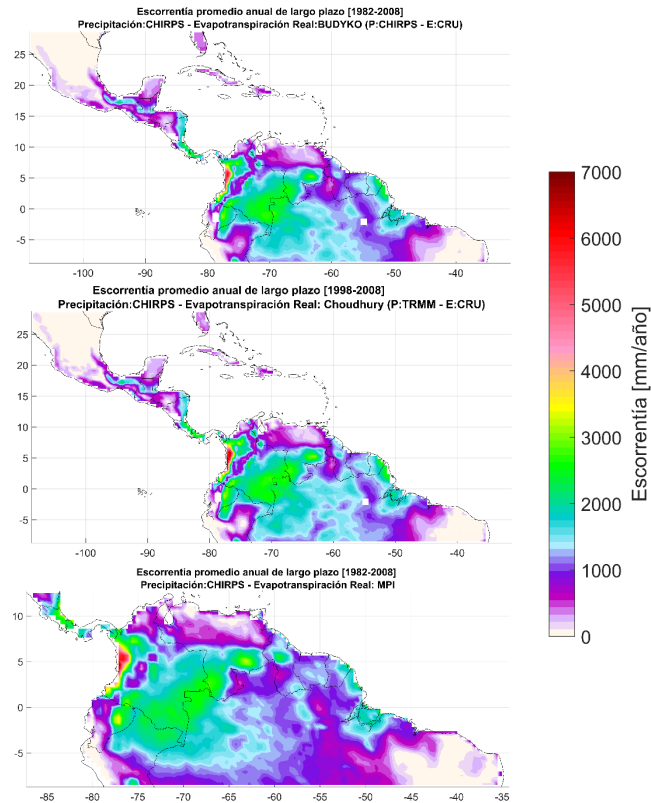


Figura 6 Escorrentía promedio anual de largo plazo, estimada con las diferentes fuentes de información de precipitación y evapotranspiración para diferentes periodos de registro.
Fuente: Los autores, 2018.

de la precipitación media anual de largo plazo de la cuenca estimada con la información de la base de datos CHIRPS y de la Misión TRMM y en la Fig. 9 se presentan la distribución espacial y el ciclo anual promedio de la precipitación usando la información de la base de datos CHIRPS.

4.2. Río Baudó

La cuenca del Río Baudó tiene una superficie aproximada de 5.400 km² (incluyendo las cuencas de los ríos Directos Pacífico - Baudó). Entre el límite occidental de la divisoria de aguas del Río Baudó y el océano Pacífico, se encuentran ríos que desembocan directamente en el océano Pacífico, denominados Directos Pacífico-Baudó, principalmente los ríos, Nuquí, Virudó y Catripe.

El Estudio Nacional del Agua 2014 reporta un caudal medio anual de 1.023 m³/s incluyendo el aporte de los ríos Directos Pacífico. En la cuenca del Río Baudó no se encuentra disponible información de series de caudal debido a que no hay estaciones hidrológicas dentro de la cuenca.

En la Fig. 10 se muestran la cuenca hidrográfica y la distribución de alturas de la cuenca del Río Baudó. En la Fig. 11 se muestra el mapa de la precipitación media anual de largo plazo de la cuenca y en la Fig. 12 se muestra el régimen de precipitación.

4.3. Río San Juan

El Río San Juan nace en el Cerro de Caramanta, en la

Cordillera Occidental de los Andes, departamento de Risaralda, a una altura aproximada de 3000 metros sobre el nivel del mar. La cuenca tiene una superficie aproximada de 15.000 km² y desemboca en el Océano Pacífico formando un gran delta.

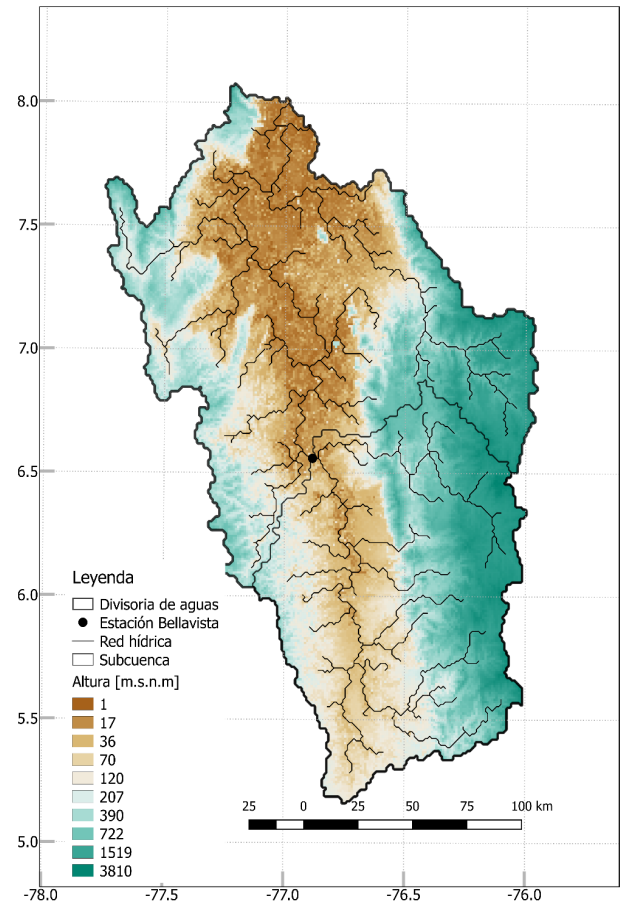


Figura 7 Divisoria de aguas, red hídrica, ubicación de la estación hidrológica Bellavista y distribución de alturas de la cuenca del Río Atrato.
Fuente: Los autores, 2018.

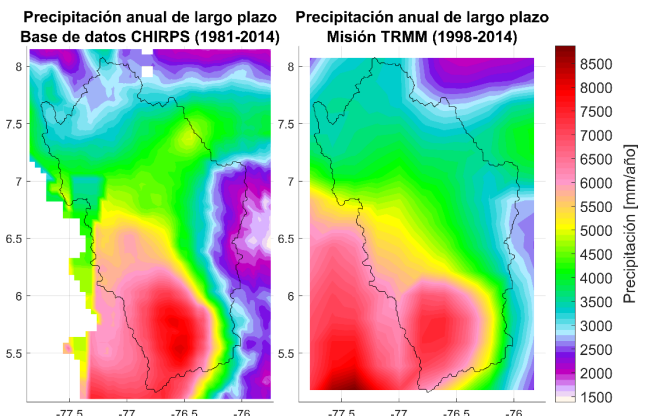


Figura 8 Mapa de la precipitación media anual de largo plazo de la cuenca del Río Atrato a partir de la información de la base de datos CHIRPS en el periodo de registro 1981-2014 (izquierda) y de la misión TRMM en el periodo de registro 1998-2014 (derecha).
Fuente: Los autores, 2018.

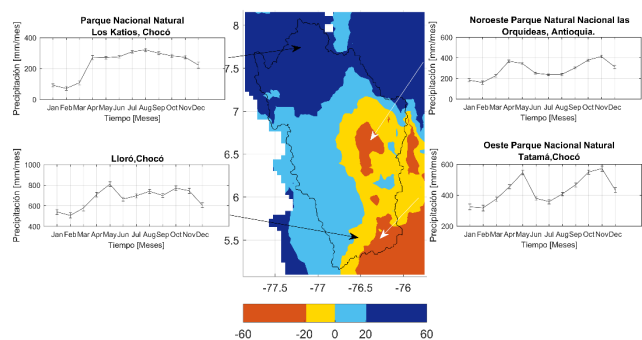


Figura 9 Régimen anual de precipitación en la cuenca del Río Atrato. Los rangos representan las diferencias porcentuales entre la amplitud de las varianzas explicadas por los ciclos anuales y semianuales. Régimen unimodal (Positivo) – Régimen bimodal (Negativo) – Transición (-20%,20%).
Fuente: Los autores, 2018.

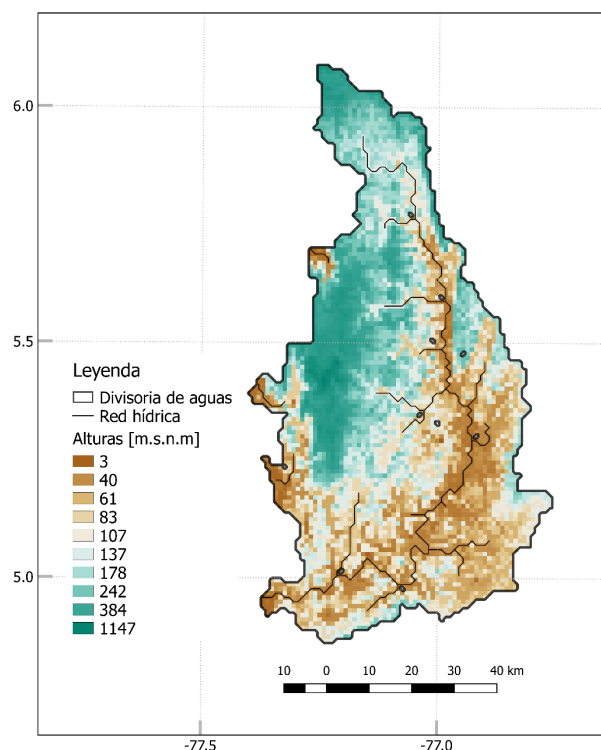


Figura 10 Divisoria de aguas, red hídrica y distribución de alturas de la cuenca del Río Baudó.
Fuente: Los autores, 2018.

El Estudio Nacional del Agua 2014 reporta para el Río San Juan un caudal promedio anual de 2.649 m³/s. La estación hidrológica Peñitas está localizada en el municipio de Litoral de San Juan en el departamento del Chocó; hasta este punto la cuenca del Río San Juan tiene un área de drenaje de 11.955 km² y un caudal medio anual de 2.215 m³/s.

En la Fig. 13 se muestran la cuenca hidrográfica, la ubicación de la estación hidrológica Peñitas y la distribución de alturas de la cuenca del Río San Juan. En la Fig. 14 se muestra mapa de la precipitación media anual de largo plazo de la cuenca, y en la Fig. 15 se muestra el régimen de precipitación.

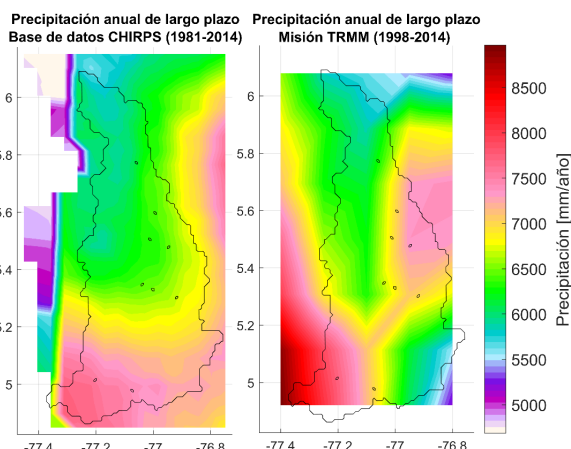


Figura 11 Mapa de precipitación media anual de largo plazo de la cuenca del Río Baudó a partir de la información de la base de datos CHIRPS en el periodo de registro 1981-2014 (izquierda) y de la misión TRMM en el periodo de registro 1998-2014 (derecha).
Fuente: Los autores, 2018.

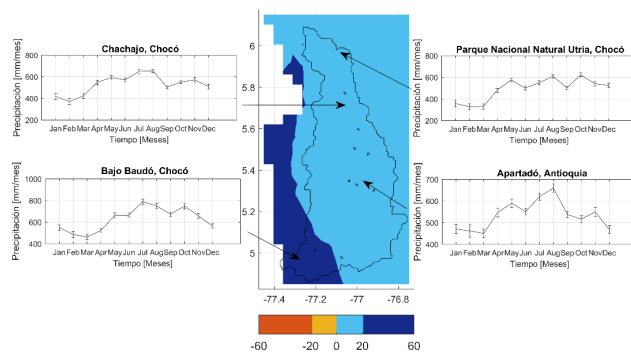


Figura 12 Régimen anual de precipitación en la cuenca del Río Baudó. Los rangos representan las diferencias porcentuales entre la amplitud de las varianzas explicadas por los ciclos anuales y semianuales. Régimen unimodal (Positivo) – Régimen bimodal (Negativo) – Transición (-20%,20%).
Fuente: Los autores, 2018.

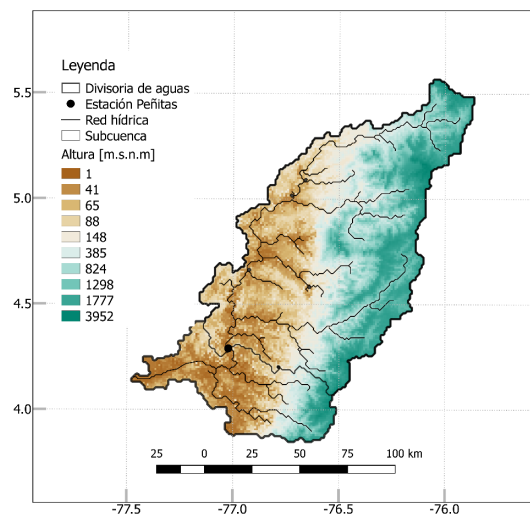


Figura 13 Divisoria de aguas, red hídrica, ubicación de la estación hidrológica Peñitas y distribución de alturas de la cuenca del Río San Juan.
Fuente: Los autores, 2018.

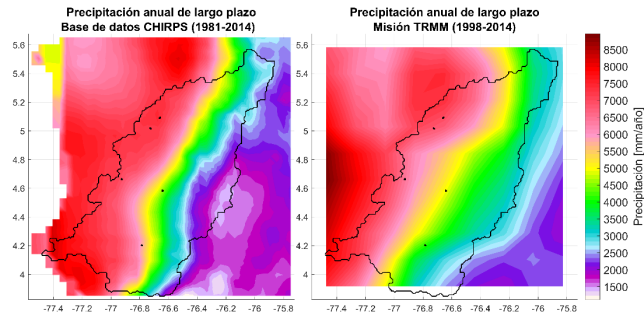


Figura 14 Mapa de precipitación media anual de largo plazo de la cuenca del Río San Juan a partir de la información de la base de datos CHIRPS en el periodo de registro 1981-2014 (izquierda) y de la misión TRMM en el periodo de registro 1998-2014 (derecha).

Fuente: Los autores, 2018.

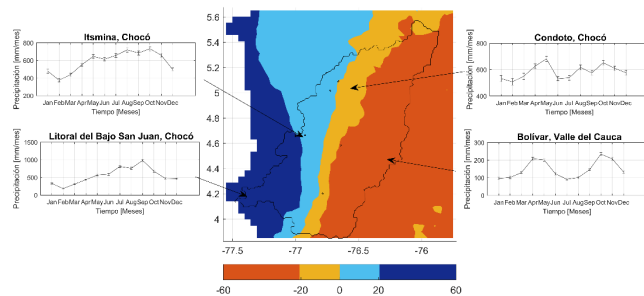


Figura 15 Régimen anual de precipitación en la cuenca del Río San Juan. Los rangos representan las diferencias porcentuales entre la amplitud de las varianzas explicadas por los ciclos anuales y semianuales. Régimen unimodal (Positivo) – Régimen bimodal (Negativo) – Transición (-20%,20%).

Fuente: Los autores, 2018.

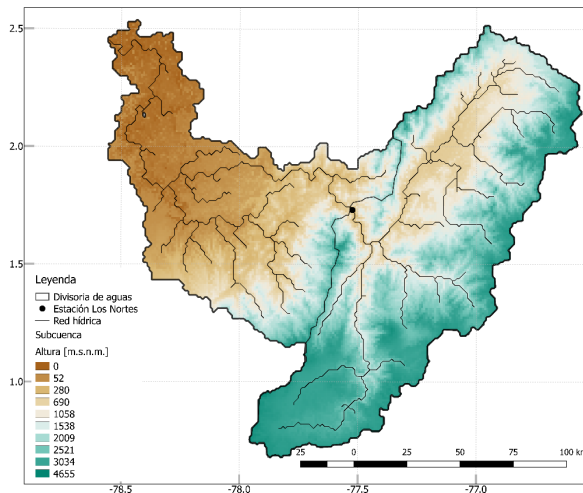


Figura 16 Divisoria de aguas, red hídrica, ubicación de la estación hidrológica Los Nortes y distribución de alturas de la cuenca del río Patía.

Fuente: Los autores, 2018.

4.4. Río Patía

El Río Patía nace en las montañas de Paletará y Sotará en la vertiente occidental de la cordillera central en el departamento del Cauca. Su cuenca abarca una superficie

aproximada de 23.000 km² y una longitud de 360 kilómetros.

El Estudio Nacional del Agua 2014 reporta para el Río Patía un caudal medio anual de 1453 m³/s. La estación hidrológica Los Nortes está localizada en el municipio de Cumbitará en el departamento de Nariño; hasta este punto la cuenca del Río Patía tiene un área de drenaje de 13.169 km² y un caudal medio anual de 383 m³/s.

En la Fig. 16 se muestran la cuenca hidrográfica, la ubicación de la estación hidrológica Los Nortes y la distribución de alturas de la cuenca del Río Patía. En la Fig. 17 se muestra mapa de precipitación media anual de largo plazo de la cuenca y en la Fig. 18 se muestra el régimen de precipitación.

4.5. Río Mira

La cuenca del Río Mira abarca una superficie aproximada de 11.000 km². Nace en el noroeste de Ecuador y se extiende por el extremo sur-occidental de Colombia, departamento de Nariño.

El Estudio Nacional del Agua 2014 reporta que en la zona hidrográfica del Río Mira se reciben aportes del territorio ecuatoriano estimados en 509 m³/s lo cual incrementa el caudal medio anual estimado para el Río Mira a 969 m³/s. La estación hidrológica San Juan de Mira está localizada en el municipio de Tumaco en el departamento de Nariño; hasta este punto la cuenca del Río Mira tiene un área de drenaje de 9.894 km² y un caudal medio anual de 855 m³/s.

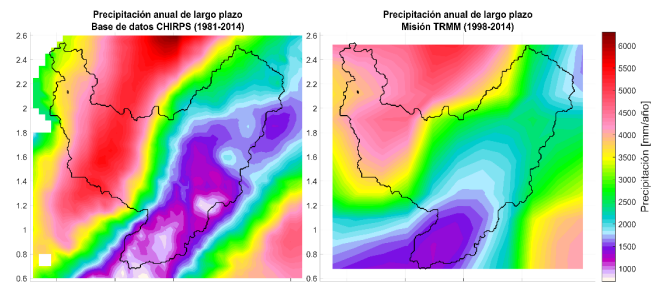


Figura 17 Mapa de precipitación media anual de largo plazo de la cuenca del Río Patía a partir de la información de la base de datos CHIRPS en el periodo de registro 1981-2014 (izquierda) y de la misión TRMM en el periodo de registro 1998-2014 (derecha).

Fuente: Los autores, 2018.

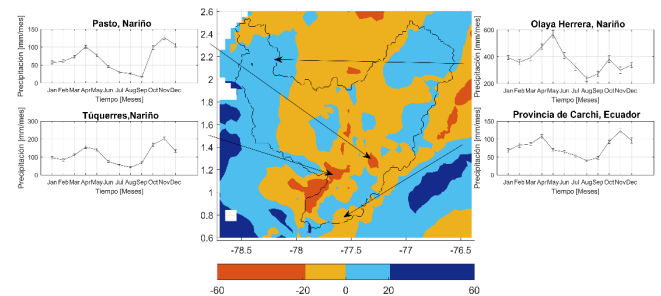


Figura 18 Régimen anual de precipitación en la cuenca del Río Patía. Los rangos representan las diferencias porcentuales entre la amplitud de las varianzas explicadas por los ciclos anuales y semianuales. Régimen unimodal (Positivo) – Régimen bimodal (Negativo) – Transición (-20%,20%).

Fuente: Los autores, 2018.

En la Fig. 19 se muestran la cuenca hidrográfica, la ubicación de la estación hidrológica Los Nortes y la distribución de alturas de la cuenca del Río Patía. En la Fig. 20 se muestra el mapa de precipitación promedio anual de largo plazo de la cuenca, y en la Fig. 21 se muestra el régimen de precipitación.

Los valores de caudal medio anual en la desembocadura de los ríos Atrato, San Juan, Baudó, Patía y Mira estimados mediante el balance hídrico se validaron con los registrados en el Estudio Nacional del Agua (ENA, 2014). Estos valores reportados fueron estimados también mediante un balance hidrológico, a partir de registros de precipitación de las estaciones disponibles en el país y una estimación de la evapotranspiración real. Sin embargo, no reportan los períodos de tiempo usados para la estimación de la precipitación y evapotranspiración en cada una de las cuencas. Por tal razón las comparaciones entre los valores estimados en este trabajo y los reportados en el ENA probablemente no coincidan en los períodos de tiempo de estimación.

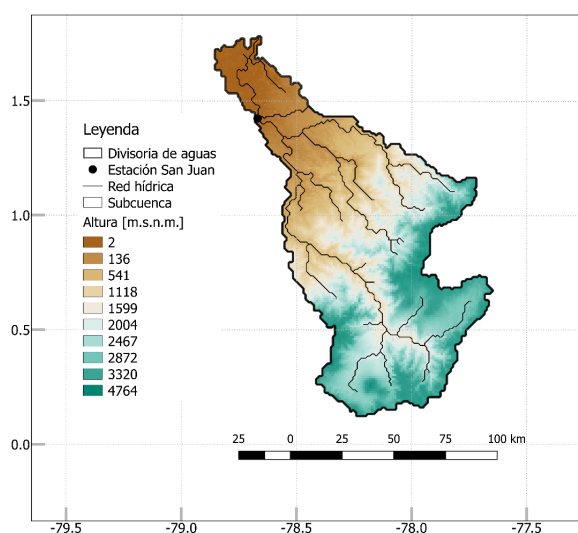


Figura 19 Divisoria de aguas, red hídrica, ubicación de la estación hidrológica San Juan de Mira y distribución de alturas de la cuenca del Río Mira. Fuente: Los autores, 2018.

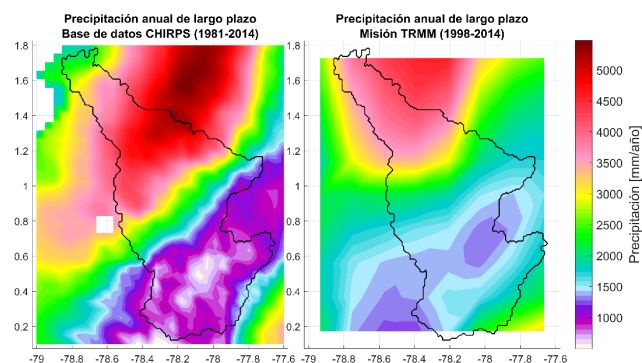


Figura 20 Mapa de precipitación media anual de largo plazo de la cuenca del Río Mira a partir de la información de la base de datos CHIRPS en el periodo de registro 1981-2014 (izquierda) y de la misión TRMM en el periodo de registro 1998-2014 (derecha). Fuente: Los autores, 2018.

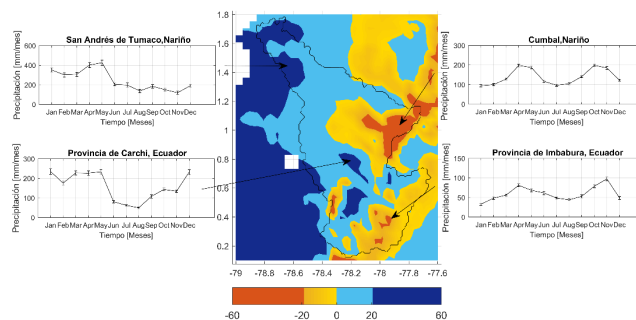


Figura 21 Régimen anual de precipitación en la cuenca del Río Mira. Los rangos representan las diferencias porcentuales entre la amplitud de las varianzas explicadas por los ciclos anuales y semianuales. Régimen unimodal (Positivo) – Régimen bimodal (Negativo) – Transición (-20%,20%). Fuente: Los autores, 2018.

Debido a que no hay estaciones hidrológicas cerca a la desembocadura de los ríos de análisis, se utiliza también una relación caudal-área para estimar el caudal a la salida de la cuenca, partiendo de las series hidrológicas de las estaciones que se encuentran ubicadas aguas arriba de la desembocadura, a los efectos de comparar el caudal calculado mediante la relación caudal-área con los caudales estimados mediante la ecuación de balance hídrico. En la Tabla 2 se reportan algunos de los resultados de caudal promedio anual a la salida de la cuenca estimados mediante la ecuación de balance hídrico de largo plazo y los errores relativos respecto a los caudales de referencia del ENA y de la relación caudal-área.

Tabla 2.

Caudal promedio anual de los ríos Atrato, Baudó, Patía, Mira y San Juan estimado con las diferentes combinaciones de P y AET , para diferentes períodos de registro. Y errores relativos de los caudales estimados respecto a los reportados por el ENA y los obtenidos por la relación de áreas (Relac.).

Río	Precip.	AET Real Método P/PET	Período de registro	Caudal estimado [m³/s]	Error ENA [%]	Error Relac. [%]
Atrato	TRMM	Choudhury	1998-2013	4164,6	0,7	30,6
		CHIRPS/CRU				
	TRMM	Choudhury	1998-2013	4164,2	0,7	30,6
Baudó	CHIRPS	Budyko	1998-2008	1021,6	0,1	-
		CHIRPS/CRU				
	CHIRPS	Budyko	1998-2008	1021,5	0,1	-
Patía	CHIRPS	Choudhury	1982-2008	1210,6	16,7	83,9
		CHIRPS/CRU				
	TRMM	Budyko	1998-2008	1367,7	5,9	107,8
Mira	CHIRPS	Choudhury	1998-2008	565,7	41,6	39,7
		CHIRPS/CRU				
	CHIRPS	Budyko	1998-2013	566,9	41,5	39,6
San Juan	TRMM	Choudhury	1998-2008	2132,4	19,5	28,9
		CHIRPS/CRU				
	TRMM	Budyko	1998-2008	2139,6	19,2	28,7

Fuente: Los autores, 2018.

Tabla 3.

Caudal promedio anual de los ríos Atrato, Patía, Mira y San Juan hasta la estación hidrológica correspondiente, estimado con las diferentes combinaciones de *P* y *AET*, para diferentes periodos de registro. En la columna 6 se muestra el error relativo de los caudales estimados respecto al valor obtenido en cada estación.

Río	Precipitación	AET	Periodo de registro	Caudal estimado [m³/s]	Error [%]
Atrato	TRMM	MPI	1998-2008	2173,7	12,98
Patía	CHIRPS	MPI	1998-2008	375,7	1,96
Mira	CHIRPS	MPI	1998-2008	472,1	44,79
San Juan	TRMM	MPI	1998-2008	1604,6	27,56

Fuente: Los autores, 2018.

Tabla 4.

Caudal promedio anual de los ríos Atrato, Patía, Mira y San Juan hasta la estación hidrológica correspondiente, estimados con los registros de precipitación de la base de datos CHIRPS y la misión TRMM y con la evapotranspiración real de MPI, para diferentes periodos de registro. En la columna 6 se muestran los errores relativos de los caudales estimados respecto al valor obtenido en la estación hidrológica.

Río	Precipitación	AET Real Método P/PET	Periodo de registro	Caudal estimado [m³/s]	Error [%]
Atrato	CHIRPS	Choudhury TRMM/CRU	1998-2013	2243,6	10,2
	CHIRPS	Budyko CHIRPS/CRU	1998-2008	2259,9	9,5
Patía	CHIRPS	Choudhury CHIRPS/CRU	1982-2008	413,0	7,8
	CHIRPS	Budyko CHIRPS/CRU	1982-2008	411,5	7,4
Mira	CHIRPS	Choudhury CHIRPS/CRU	1998-2013	506,9	40,7
	CHIRPS	Budyko CHIRPS/CRU	1998-2013	507,7	40,6
San Juan	TRMM	Choudhury CHIRPS/CRU	1998-2008	1684,4	24,0
	TRMM	Budyko CHIRPS/CRU	1998-2008	1689,9	23,7

Fuente: Los autores, 2018.

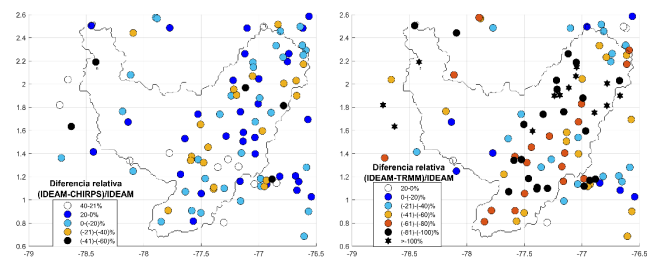


Figura 22 Comparación entre las series de precipitación de las estaciones del IDEAM y las series de la base de datos CHIRPS (izquierda) y de la Misión TRMM (derecha) en la cuenca del Río Patía.

Fuente: Los autores, 2018.

A partir de los campos de escorrentía se estimó el caudal promedio anual de los ríos Atrato, Patía, Mira y San Juan hasta las estaciones hidrológicas correspondientes

(Bellavista, Los Nortes, San Juan de Mira y Peñitas, respectivamente) y se estimó el error entre los caudales estimados y el caudal obtenido con los registros in situ (Tablas 3 y 4).

Adicionalmente, se calcularon las diferencias relativas entre la precipitación media anual de largo plazo estimada a partir de los registros de cada una de las estaciones de precipitación del IDEAM y las series estimadas con los datos de CHIRPS y TRMM en los pixeles correspondientes, encontrando una buena coherencia entre la información in situ y satelital, especialmente de la base de datos CHIRPS. Esto confirma la robustez estadística de los análisis realizados con esta información. Con el fin de ilustrar el análisis que se hizo para todas las cuencas, en la Fig. 22 se muestran las diferencias relativas entre la precipitación media anual de las estaciones de precipitación del IDEAM y la información satelital en la cuenca del Río Patía.

5. Conclusiones

Se usó la ecuación de balance hídrico de largo plazo para estimar los caudales medios anuales de los principales ríos sobre la red hidrográfica del Pacífico. Para tal fin se utilizaron mapas de la precipitación y de evapotranspiración real media anual sobre el dominio geográfico de CORDEX, que incluye la totalidad del territorio colombiano. La validez del balance de largo plazo ha sido verificada con registros de caudales en las cuencas de los ríos Atrato, San Juan, Patía y Mira. Los errores de estimación son del orden de 10-20% en la subcuenca del Río Atrato, hasta la estación Bellavista, y a la salida de la cuenca el error de estimación respecto al valor reportado por el Estudio Nacional del Agua es del orden de 1 a 8%, confirmando la calidad de las estimaciones para las cuencas de áreas considerables a la escala espacial usada.

Los errores de estimación obtenidos hasta las estaciones hidrológicas Peñitas y San Juan de Mira ubicadas en las cuencas de los ríos San Juan y Mira, respectivamente, son en promedio del 40%. Del mismo modo los errores de estimación del caudal a la salida de las cuencas son del orden de 20 - 40%, estimados con relación a los valores reportados por Estudio Nacional del Agua.

La cuenca del Río Baudó posee la menor área de drenaje de las 5 estudiadas. Debido a la resolución espacial usada para estimar los campos de escorrentía se esperaría que los errores de estimación fueran mayores; sin embargo, en la cuenca del Río Baudó se presentan los menores errores de estimación, respecto al valor reportado por el ENA. Es importante resaltar que debido a que la red de estaciones del IDEAM no incluye ninguna estación hidrológica sobre la cuenca del Río Baudó no se realizó la validación con registros in situ.

Por su parte la cuenca del Río Patía presenta una particularidad que puede estar asociada con la diferencia de la precipitación media anual entre la parte baja y alta de la cuenca, todas las estimaciones realizadas hasta la estación hidrológica Los Nortes que incluían la información de precipitación de la misión TRMM exhiben errores de estimación superiores al 48%, alcanzando en algunos casos hasta 64%. En contraste, las estimaciones realizadas con la precipitación de la base de datos CHIRPS exhiben errores

entre 1 y 15%. Se puede concluir entonces que debido a que la resolución espacial de TRMM es 5 veces más gruesa que la de CHIRPS, TRMM no logra captar la variabilidad de la precipitación en la cuenca, y al remuestrear ambas bases de datos, el promedio estimado para CHIRPS representa de manera más adecuada la precipitación en cada uno de los píxeles que se encuentran sobre el área de la cuenca.

Al validar la coherencia entre la información in situ y satelital se evidenció una marcada sobrestimación de la precipitación por parte de la misión TRMM. En todas las cuencas estudiadas fue predominante tal sobrestimación y altos porcentajes de error, superior al 40%. Este resultado permite concluir que la información satelital, en general, no estima adecuadamente la precipitación de la región [16].

Para cuantificar la incertidumbre de la estimación del caudal medio con el modelo de balance hídrico de largo plazo, se debe disponer de los campos de incertidumbre de la precipitación y evapotranspiración, y la incertidumbre en la estimación del área de la cuenca [17]. Sin embargo, es importante mencionar que en este trabajo no se estimaron ninguno de estos campos de incertidumbre y por tanto no se cuantificó la incertidumbre del caudal medio.

Agradecimientos

El trabajo de Manuela Velásquez Restrepo fue financiado por la convocatoria 660 de COLCIENCIAS, proyecto Influencia de la Corriente en Chorro del Chocó sobre la Hidroclimatología de la Región Pacífica Colombiana. El trabajo de G. Poveda fue apoyado por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Referencias

- [1] Dooge, J.C.I., Parameterization of hydrologic processes., in: Land surface processes in atmospheric general circulation models., Eagleson, P.S., Ed., Cambridge: Cambridge University Press., 1982, pp. 243-288.
- [2] Poveda, G. et al., Linking long-term water balances and statistical scaling to estimate river flows along the drainage network of Colombia, *J. Hydrol. Eng.*, 12, pp. 4-13, 2007. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:1(4)
- [3] Instituto de Ciencias Naturales, Colombia diversidad biótica IV. El Chocó biogeográfico/Costa Pacífica., 1a ed. Bogotá D.C., 2004.
- [4] Poveda, G. and Mesa, O., La corriente de chorro superficial del oeste ('del CHOCÓ') y otras dos corrientes de chorro atmosféricas sobre Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO, *Rev. la Acad. Colomb. Ciencias Exactas Fis. y Nat.*, 23, pp. 517-528, 1999.
- [5] Urrego, L.E., Molina, L.A., Urrego, D.H. and Ramírez, L.F., Holocene space-time succession of the Middle Atrato wetlands, Chocó biogeographic region, Colombia. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 234(1), pp. 45-61, 2006. DOI: 10.1016/j.palaeo.2005.10.018
- [6] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Estudio nacional del agua, [En línea], Bogotá D.C., 2015. [fecha de consulta 10 de junio de 2018]. Disponible en: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/EN_A_2014.pdf
- [7] Tan, M.L. and Duan, Z., Assessment of GPM and TRMM precipitation products over Singapore, *Remote Sens.*, 9(7), 2017. DOI: 10.3390/rs9070720
- [8] Funk, C. et al., The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes, *Sci. Data*, [online]. 2, pp. 150066, 2015. [consulted: June 10th of 2018]. Available at: <https://www.nature.com/articles/sdata201566>
- [9] Jung, M. et al., Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply, *Nature*, [online]. 467(7318), pp. 951-954, 2010. DOI: 10.1038/nature09396
- [10] University of East Anglia., About the climatic research unit. [online]. [consulted: June 10th of 2018]. Available at: <http://www.cru.uea.ac.uk/about-cru>.
- [11] Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J. and Lister, D.H., Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset, *Int. J. Climatol. Int. J. Clim.*, 2013. DOI: 10.1002/joc.3711
- [12] Carmona, A.M., Poveda, G., Sivapalan, M., Vallejo-Bernal, S.M. and Bustamante, E., A scaling approach to Budyko's framework and the complementary relationship of evapotranspiration in humid environments: case study of the Amazon River basin, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20(2), pp. 589-603, 2016. DOI: 10.5194/hess-20-589-2016
- [13] Choudhury, B., Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model, *J. Hydrol.*, 216(1), pp. 99-110, 1999. DOI: 10.1016/S0022-1694(98)00293-5
- [14] Salazar, L.F. and Poveda, G., Validation of diverse evapotranspiration estimation methods using the long-term waterbalance in the Amazon river basin, *Proc. 8 ICSHMO, Foz do Iguaçu*, pp. 815-820, 2006.
- [15] Franco, O., García, M., Vargas, O., González, M. y Jaramillo, O., Estudio nacional del agua. Cap. 2: Marco Metodológico, 2010.
- [16] Vallejo-Bernal, S.M. et al., Ground validation of TRMM 3B43 precipitation data over Colombia. Part III: Monthly and Seasonal Timescales, *Inter. Jour. Climatol.*, Sometido, 2019.
- [17] Alvarez, O.D., Vélez, J. y Poveda, G., Incertidumbre asociada con la estimación del balance hídrico de largo plazo. In XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, 2008, Bogotá D.C., 2008.

M. Velásquez-Restrepo, recibió el título de Ing. Civil en 2017. Es estudiante de Maestría en Ingeniería- Recursos Hidráulicos, ambos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Actualmente es Joven Investigadora de Colciencias. Trabajó en 2016 como investigadora de apoyo en el proyecto Influencia de la corriente en chorro del Chocó sobre la hidroclimatología de la región Pacífica Colombiana. Su trabajo dirigido de grado titulado Estimación del Balance Hídrico en la Región Pacífica Colombiana, recibió el reconocimiento a mejor trabajo de grado en ingeniería civil, versión XXVI, 2017. Realizó una práctica profesional y trabajó como profesional de apoyo en ISAGEN entre 2016 y 2017. ORCID: 0000-0003-1683-8206

G.Poveda, es Ingeniero Civil, Magíster, PhD en Ingeniería - Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Universidad de California, Davis. Post-Doctorado, Hidro-Ecología, Universidad de Colorado, Boulder. Integrante del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) e investigador visitante en varios países. Miembro de Número de la Academia Colombiana de Ciencias y Miembro Correspondiente de la Real Academia de Ciencias de España. Integrante de los comités científicos de: Interacciones entre los Ciclos Globales de Agua y Energía (GEWEX); Experimento de Gran Escala de la Biosfera- Atmósfera en la Amazonia (LBA); Cambio Ambiental Global y Salud Humana (GECHH); Clima de los Mares Interamericanos (IASCLIP); Consejo Internacional para la Ciencia, América Latina y Caribe; WWF-Colombia; Parque Explora. Autor y coautor de 7 libros, y más de 350 artículos en revistas y presentaciones sobre hidrología, climatología, oceanografía, recursos hídricos, matemáticas aplicadas, cambio climático, El Niño, La Niña y sus impactos ambientales y socio-económicos. https://www.researchgate.net/profile/German_Poveda ORCID: 0000-0002-7907-6360