



Evaluación de los productos Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y Global Precipitation Measurement (GPM) en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Huancané, Perú

Assessment of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) and Global Precipitation Measurement (GPM) products in hydrological modeling of the Huancane river basin, Peru

Flavio Alexander Asurza Véliz^{1,2}; Cayo Leónidas Ramos Taípe^{1,*}; Waldo Sven Lavado Casimiro²

¹ Universidad Nacional Agraria La Molina; Av. La Molina s/n La Molina, Lima, Peru.

² Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú; Jr. Cahuide 785 Jesús María, Lima, Peru.

Received October 30, 2017. Accepted February 11, 2018.

Resumen

El objetivo de esta investigación fue evaluar los productos grillados de precipitación de la *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) y de la *Global Precipitation Measurement* (GPM), en el modelamiento hidrológico en la cuenca del río Huancané, del Altiplano peruano. Al comparar la precipitación media diaria de los productos 3B42RT, 3B42V7 e IMERG respecto a la lluvia media diaria de la cuenca (abril 2014 – diciembre 2015), IMERG representa mejor los patrones de precipitación (R^2 : 0,38) pero no cuantifica adecuadamente la intensidad (BIAS: -32%). El producto 3B42V7 capta muy bien la intensidad de lluvia en contraste con el 3B42RT que presenta elevadas sobrestimaciones. Una evaluación de estos productos sin corregir en el modelo hidrológico GR4J, evidencia que, el producto 3B42V7 es la mejor opción para la estimación de las descargas en periodos de avenida. Sin embargo, al realizar la corrección del sesgo al promedio de IMERG, las estimaciones de lluvia mejoran (R^2 : 0,9; BIAS: -10,1%), en consecuencia, IMERG corregido sería el mejor producto de precipitación. Estos resultados preliminares están limitados al análisis de un corto periodo, sin embargo, a medida que se liberan más datos del IMERG, serán necesarios más estudios que exploren su utilidad en aspectos de hidrología y cambio climático.

Palabras clave: modelamiento hidrológico; productos satelitales; Altiplano peruano; IMERG; modelo GR4J.

Abstract

The aim of this research was to evaluate the gridded precipitation products of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) and the Global Precipitation Measurement (GPM), in hydrological modeling in the Huancané river basin of the Peruvian Altiplano. When comparing the average daily rainfall of the 3B42RT, 3B42V7 and IMERG products with respect to the average daily rainfall of the basin (April 2014 - December 2015), IMERG best represents the precipitation patterns (R^2 : 0.38) but does not adequately quantify the intensity (BIAS: -32%). The 3B42V7 product captures the rain intensity very well in contrast to the 3B42RT, which presents high overestimates. An evaluation of these uncorrected products in the hydrological model GR4J, shows that, the 3B42V7 product is the best option for the estimation of the discharges in avenue periods. However, when correcting the bias to the IMERG average, rainfall estimates improve (R^2 : 0.9; BIAS: -10.1%), therefore, corrected IMERG would be the best precipitation product. These preliminary results are limited to the analysis of a short period, however, as more IMERG data are released, more studies will be needed to explore their usefulness in hydrology and climate change.

Keywords: hydrologic modelling; satellite products; Peruvian Altiplano; IMERG; model GR4J.

* Corresponding author
E-mail: cramost@lamolina.edu.pe (C. Ramos).

1. Introducción

La precipitación pluvial es una variable climática de gran importancia para los sistemas hidrológico, agrícola, industrial y energético. El entendimiento de su comportamiento temporal y espacial es de sumo interés, especialmente en los estudios de riesgos climáticos, donde la disponibilidad de información de alta resolución y de buena calidad es esencial (Carrasco et al., 2010). Sin embargo, las mediciones de pluviómetros convencionales son relativamente escasas y están mal distribuidos, especialmente en los océanos o las regiones en desarrollo. En Perú, este problema es muchas veces una limitante para la evaluación hidrológica de una cuenca; sin embargo, en las últimas décadas, el rápido desarrollo de la tecnología de teledetección ha traído una oportunidad sin precedentes para la estimación de la precipitación (Chen y Li, 2016).

En la actualidad se encuentran a libre disposición los productos de la *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), la cual ha estado proporcionando mediciones de precipitación sobre los vastos océanos y continentes dispersos en las zonas tropicales y subtropicales (35°N - 35°S) desde noviembre de 1997. A lo largo de los años, numerosos estudios han sido desarrollados a partir de los productos TRMM; los cuales evidencian que en zonas de topografía compleja las precipitaciones están asociadas a un significativo sesgo y errores aleatorios (Nikolopoulos et al., 2012). En ese contexto, surge *The Global Precipitation Mission* (GPM) con la finalidad de ser la siguiente generación de productos satelitales de precipitación y con la misión principal de mejorar el entendimiento de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación global (Hou et al., 2011). El TRMM y el GPM ofrecen distintos productos grillados de precipitación- El TRMM provee los productos 3B42 *real-time* (3B42RT) y 3B42 versión 7 (3B42V7), los cuales han sido ampliamente estudiados y aplicados a la simulación y predicción hidrológica (Ochoa et al., 2014; Zulkafli et al., 2014; El Kenawy et al., 2015; Yupanqui et al., 2015; Beria et al., 2017; Zubieta et al., 2017). De igual manera, el GPM ofrece el producto *Day-1 multi-satellite precipitation* dado por el algoritmo *Integrated Multisatellite Retrievals for GPM* (IMERG).

Tanto el TRMM como el GPM estarán en órbita paralelamente hasta mediados del 2017, después de la fecha los productos 3B42 serán reemplazados dando lugar a la era del GPM (Huffman, 2015). En ese

contexto, es necesario realizar una comparación detallada para determinar si el producto del GPM estima mejor las precipitaciones respecto a los productos del TRMM, y, en consecuencia, evaluar si es de utilidad para la estimación de caudales.

Los objetivos de este estudio fueron: 1) Comparar estadísticamente y evaluar el desempeño y mejora de los productos de precipitación del GPM respecto al TRMM, 2) Evaluar los productos 3B42RT, 3B42V7 e IMERG en el modelamiento hidrológico en una cuenca del Altiplano peruano: cuenca del río Huancané, 3) Aplicar el método de corrección del sesgo por el promedio al producto IMERG y evaluar su desempeño en el modelamiento hidrológico. Este estudio espera brindar un primer alcance de la utilidad del nuevo producto de precipitación del GPM, y que los resultados expuestos puedan contribuir en subsecuentes investigaciones.

2. Materiales y métodos

Área de estudio

La cuenca del río Huancané tiene una superficie aproximadamente de 3631 km², su cota máxima es 5086 msnm., y una cota mínima de 3661 msnm, que corresponde al cerro Surupana a la desembocadura del río en el lago Titicaca, respectivamente. Se encuentra entre los paralelos 14,3° y 15,6° latitud sur y entre los meridianos 69,2° y 70,4° longitud oeste (Figura 1). La longitud de su río principal desde sus nacientes hasta su desembocadura, llega a medir aproximadamente 142 km. La precipitación sobre el Altiplano se encuentra prácticamente concentrada en el verano austral (diciembre, enero y febrero), especialmente a lo largo del parte suroeste del mismo, donde más del 70% de precipitación ocurre de diciembre a febrero. El promedio multianual de la precipitación sobre la cuenca del río Huancané es de 664 mm/año. La compleja combinación topográfica y climática de la cuenca hace que sea vulnerable a los eventos de inundación. En base a lo expuesto por Choquehuanca y Mamani (2008), las inundaciones en Huancané han estado fuertemente relacionadas con el nivel del lago Titicaca, presentándose así dos fuertes inundaciones entre los años 1982 y 1986, y los años 2003 y 2004. Las catastróficas consecuencias de estas inundaciones se debieron principalmente a los desbordes de los ríos Huancané y Ramis, presentándose pérdidas de tierras de cultivo, viviendas, animales, locales escolares y postas sanitarias, e interrupción de las principales carreteras. Un factor que imposibilita una toma de

decisiones adecuada para una mejor gestión del riesgo de inundaciones es la escasa disponibilidad de información pluviométrica dado el bajo número de estaciones dentro de la cuenca.

Datos de estaciones y datos de caudal

La información pluviométrica fue recopilada de las estaciones meteorológicas administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Se recopiló información de lluvia acumulada diaria a partir de once estaciones meteorológicas convencionales para un período común comprendido entre 2000 y 2015. Las estaciones pertenecen a la cuenca del río Huancané y de cuencas aledañas, abarcando así toda el área de estudio. De las mismas estaciones se obtuvieron los datos de temperatura máxima y mínima para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) a través de las ecuaciones del método de Hargreaves (Samani, 2000).

Adicionalmente, se obtuvo los datos de caudales medios diarios correspondientes a la estación hidrométrica limnigráfica Puente Carretera Huancané desde el 2000 al 2015, usados para la evaluación del desempeño en el modelamiento hidrológico.

Datos de precipitación del TRMM y GPM

El TRMM es una misión conjunta entre la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) y Agencia de Exploración Espacial de Japón (JAXA), diseñado para monitorear y estudiar la lluvia en los trópicos (NASA y JAXA, 2006). Lanzado en noviembre de 1997, cuenta principalmente con tres instrumentos de lluvia: el Imágenes microondas del TRMM (TMI), el Radar de Precipitación (PR), y el Escáner Visible e Infrarrojo (VIRS). La información registrada por estos sensores ha sido dispuesta por la NASA en tres niveles, los cuales se distinguen por el procesamiento que reciben. En el nivel 3 se tiene el 3B42 (descargado de: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/>), que provee estimados de precipitación cada 3 horas a una resolución de 0,25°. Se encuentran disponibles desde enero de 1998 hasta el presente (Macritchie, 2015), consistiendo en dos productos: el *near-real-time* (3B42RT de aquí en adelante) y el *research-grade* (3B42V7 de aquí en adelante). El primero es menos preciso, pero proporciona estimaciones de precipitación rápidas (aproximadamente entre 6 a 9 horas) adecuados para las actividades de monitoreo y modelado en tiempo casi real.

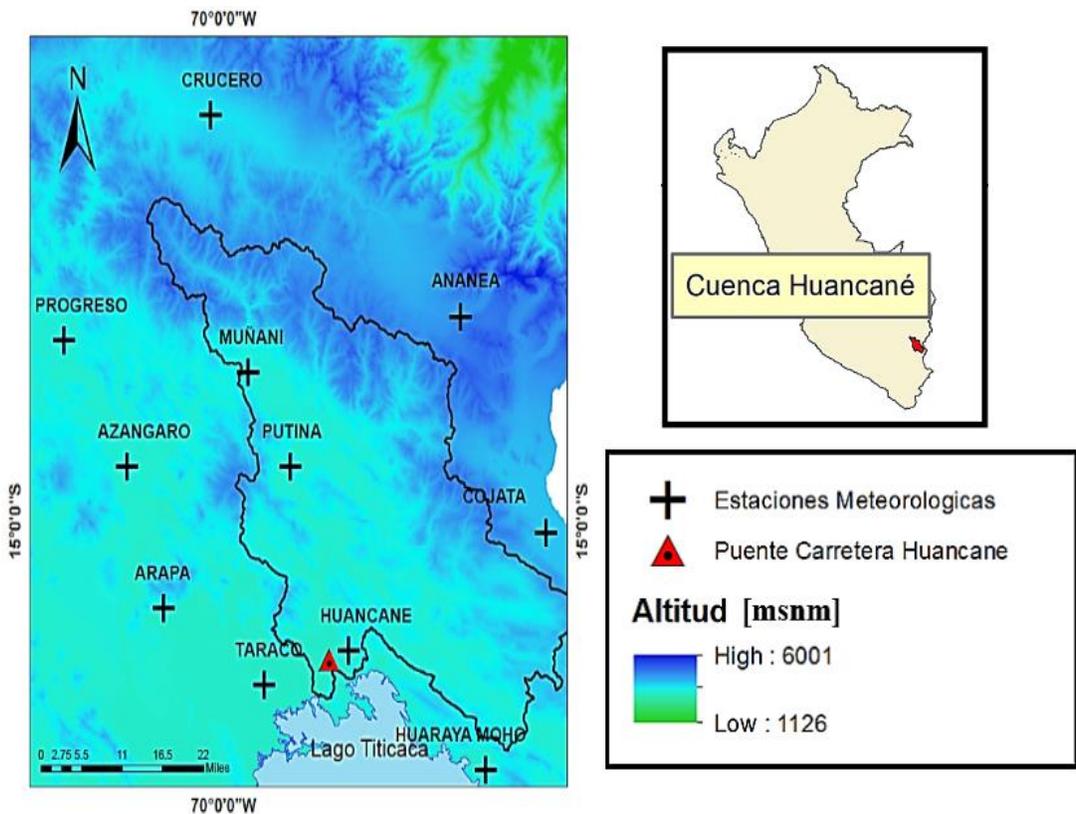


Figura 1. Ubicación del área de estudio con las estaciones meteorológicas utilizadas y la estación hidrométrica Puente Huancané.

Tabla 1

Lista de las métricas estadísticas usadas para la comparación de la precipitación y evaluación hidrológica

| Métrica estadística | Ecuación | Valor ideal |
|---|--|-------------|
| Desviación estándar ^b (DE) | $\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})^2}$ | 0 |
| Coefficiente de correlación de Pearson (CC) | $CC = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r})}{\sigma_f * \sigma_n}$ | 1 |
| Sesgo estadístico (BIAS) | $BIAS = \frac{1}{N} * \frac{\sum_{n=1}^N (f_n - r_n)^2}{\sum_{n=1}^N r_n} * 100$ | 0 |
| Raíz del error medio cuadrático (RMSE) | $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - r_n)^2}$ | 0 |
| Raíz del error medio cuadrático centrado (RMSD) | $RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(f_n - \bar{f}) - (r_n - \bar{r})]^2}$ | 0 |
| Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) | $NSE = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (r_n - f_n)^2}{(\sum_{n=1}^N (r_n - \bar{r})^2)}$ | 1 |
| Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe logarítmico (NSEL) | $NSEL = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (\ln(r_n) - \ln(f_n))^2}{(\sum_{n=1}^N (\ln(r_n) - \ln(\bar{r}))^2)}$ | 1 |

^a Variables: n, número de la muestra; f_n , la variable a comparar f representa la estimación de la lluvia satelital o el caudal simulado; r_n , la variable de referencia r representa la lluvia de estación o el caudal observado.

^b La fórmula de la DE es para la variable a comparar que es también válida para la variable observada reemplazando f por r .

El segundo, disponible aproximadamente dos meses después de la observación, se calibra con los datos de estaciones con lluvia observada. El producto resultante es más preciso y adecuado para la investigación (Huffman et al., 2010). La descarga de los datos TRMM se hizo para el periodo 2000 al 2015.

Basado en el éxito del TRMM, el GPM es una red internacional de satélites que proporcionan las observaciones globales de la próxima generación de lluvia y nieve. Mejora la predicción de eventos extremos que causan desastres naturales, y extiende las capacidades actuales de usar información precisa y oportuna de la precipitación para beneficiar directamente a la sociedad. Sus principales instrumentos son el radar de precipitación de frecuencia dual (DPR) y el Imágenes microondas del GPM (GMI), los cuales, en combinación, permiten una mejor estimación de la precipitación nival y lluvias ligeras (Hou et al., 2011). Al igual que el TRMM, el GPM ofrece tres niveles de procesamiento de la información registrada por los satélites, es así que en el nivel 3 el producto IMERG proporciona estimaciones de precipitación a una resolución espacial de 0,05° sobre un periodo actual de registro que va desde mediados de marzo de 2014 hasta el presente (descargado de: <https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/gpm>). Análogo al 3B42, el IMERG tiene dos productos *real time: Early y Late*. Luego que la calibración a partir de la lluvia mensual de estaciones en tierra es llevada a cabo, el producto IMERG *Final Run* (IMERG de aquí en adelante) es generado (Huffman et al., 2015). Nótese que este producto fue el que se usó en la

presente investigación. La descarga de los datos GPM se hizo para el periodo 2014 al 2015.

La extracción de la data de precipitación de los productos 3B42RT, 3B42V7 e IMERG, se hizo a nivel estación-píxel, es decir, un valor de lluvia correspondiente a un valor de píxel de acuerdo a la ubicación de las 11 estaciones meteorológicas utilizadas.

Modelo hidrológico agrupado GR4J

El modelo GR4J está basado en cuatro parámetros que tienen como datos de entrada la precipitación diaria y la evapotranspiración potencial. Está compuesto por cuatro parámetros X1: representa la máxima capacidad del reservorio de producción (mm), X2: representa el coeficiente de intercambio de aguas subterráneas (mm), X3: representa la máxima capacidad del reservorio de enrutamiento (mm), X4: representa la ordenada del tiempo pico del hidrograma unitario (día). El modelo GR4J brinda mejores resultados que otros modelos de lluvia, para ello el modelo fue evaluado en 429 cuencas de diferentes climas, incluyendo climas tropicales (Harlan et al., 2010).

Métricas estadísticas descriptivas

Varias métricas estadísticas fueron utilizadas en este estudio para evaluar el desempeño de los distintos productos de precipitación satelital (Tabla 1). El coeficiente de determinación (R^2) se usó para establecer la relación lineal entre las variables a comparar; la raíz del error medio cuadrático (RMSE), para medir la diferencia promedio entre las variables a comparar; el sesgo estadístico (BIAS), para

estimar el porcentaje de subestimación o sobrestimación entre las variables; y el diagrama de Taylor, el cual utiliza la ley de cosenos para representar en una sola gráfica cómo varían simultáneamente tres estadísticos: la desviación estandar (DE), el coeficiente de correlación de Pearson (CC) y la raíz del error medio cuadrático centrado (RMSD) (Taylor, 2005). Adicionalmente el índice de Nash-Sutcliffe (NSE) y el índice de NSE logarítmico fueron usados para evaluar el desempeño en el modelamiento hidrológico para los caudales altos y bajos respectivamente.

3. Resultados y discusión

Evaluación y comparación estacional

La evaluación y comparación fue llevado a cabo entre las precipitaciones medias al nivel de la cuenca del río Huancané, estimadas con método de inverso a la distancia al cuadrado (Shepard, 1968) para la precipitación observada de estaciones y la estimada por los productos 3B42RT, 3B42V7 e IMERG. El periodo de evaluación abarca desde abril del 2014 hasta diciembre del 2015.

Un primer análisis de la precipitación media de la cuenca por cada producto satelital se observa en el diagrama de Taylor (Figura 2a), el cual resume los resultados de las estimaciones de lluvia del 3B42RT, 3B42V7 e IMERG respecto a la precipitación observada, en donde definitivamente el IMERG es el mejor producto satelital. Un factor que no es evaluado en el diagrama es el BIAS, de esta manera el mismo análisis se obtuvo a partir del diagrama de dispersión. El producto IMERG es el que presente mejor bondad de ajuste ($R^2 = 0,38$) en contraste con el 3B42V7 ($R^2 = 0,12$) y del 3B42RT ($R^2 = 0,1$). Por otro lado, si cuantificamos la intensidad de precipitación, el producto 3B42V7 es el de mejor desempeño presentando una pequeña sobreestimación (BIAS = 7,9%), en comparación con la muy alta sobrestimación del 3B42RT (BIAS = 55,6%) y la considerable subestimación del IMERG (BIAS = -31,8%). Resultados similares se observaron en Tan y Duan (2017) y Beria et al. (2017).

El comportamiento estacional de la precipitación para la cuenca del río Huancané presenta un incremento en los meses de diciembre a abril (periodo de Avenidas) y una disminución en los meses de mayo a noviembre (periodo de Estiaje). Este patrón es captado por los cuatro productos satelitales tal como se observa

en la Figura 2b. El resultado muestra principalmente que el IMERG presenta deficiencias para captar las intensidades de la lluvia en el periodo de crecidas, en contraste con el producto 3B42V7 y 3B42RT.

Evaluación y comparación espacial

Como primer análisis, la variación espacial del R^2 dentro del área de influencia de la zona de estudio. La variación del producto IMERG, el cual presenta valores de R^2 que van desde 0,2 a 0,35, este se incrementa hacia los lados nor-oeste y sur-oeste de la cuenca, y disminuye hacia el lado este. Para el producto 3B42RT presenta valores de R^2 que varían en el rango de 0,01 a 0,08, este se incrementa hacia el lado este de la cuenca, y disminuye hacia el oeste. Para el producto 3B42V7 presenta el mismo patrón y rango de variación que el 3B42RT. La variación espacial del BIAS dentro del área de influencia de la zona de estudio, para el producto IMERG, presenta una marcada subestimación que varía en el rango de -20% a 40%, este se incrementa hacia los lados sur-este y nor-oeste de la cuenca, y disminuye hacia el norte y sur-oeste.

Para el producto 3B42RT presenta una notoria sobrestimación que varía en el rango de 20% a 120%. Esta se incrementa hacia los lados nor-oeste y sur-este de la cuenca, y disminuye hacia el sur-este. Para el producto 3B42V7 presenta una aceptable variación del BIAS que va desde -20% a 60%. Esta se incrementa hacia los lados norte y sur-oeste de la cuenca, y disminuye hacia el lado sur-este.

Por otro lado, respecto a la variación del R^2 respecto a la altitud de las estaciones meteorológicas utilizadas se observa una considerable mejora en cuanto a capturar los patrones de precipitación, si bien el desempeño no es satisfactorio y no hay un patrón claro de una buena correlación para la zona de estudio, en altitudes cercanas a los 4000 msnm el IMERG estima mejor la lluvia. El producto 3B42RT representa mejor la intensidad de lluvia entre los 4300 y 4400 msnm, pero en general el porcentaje de sobrestimación es muy alta.

El IMERG sigue un patrón similar del BIAS que el 3B42V7 respecto a la altitud; ambos entre los 3900 y 4100 msnm captan mejor las intensidades. Estos resultados coinciden con lo expuesto por Scheel et al. (2010) y Condom et al. (2011) respecto al bajo desempeño del TRMM en zonas altas y de compleja topografía.

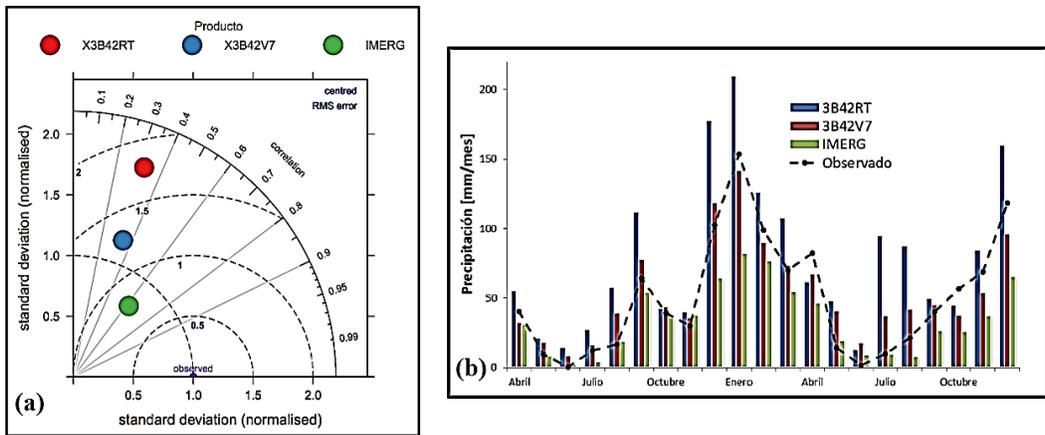


Figura 2. (a) Diagrama de Taylor para la evaluación estadística de la precipitación media areal de los productos satelitales. (b) Estacionalidad de las lluvias mensuales de los productos 3B42RT, 3B42V7 e IMERG en comparación con la precipitación media areal de la cuenca.

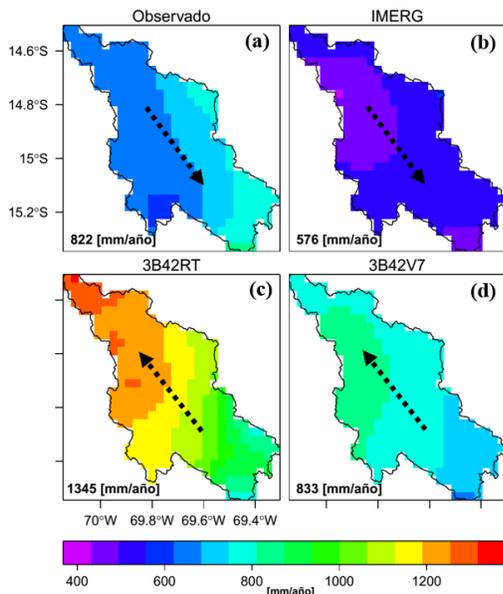


Figura 3. Representación espacial de la precipitación acumulada para la cuenca de estudio en el año hidrológico 2014-2015. Nótese la variabilidad espacial de la intensidad de la precipitación indicada por las flechas. (a) Lluvia observada, (b) producto IMERG, (c) producto 3B42RT, (d) producto 3B42V7.

De igual manera el análisis de la precipitación acumulada para el año hidrológico 2014-2015 se presenta distribuida espacialmente en toda la cuenca (Figura 3). Se observa claramente la subestimación (para el IMERG) y sobreestimación (para el 3B42RT y 3B42V7) si observamos el valor acumulado anual por cada producto. Un claro patrón es definido por la precipitación observada la cual aumenta según su intensidad de norte a sur en la cuenca de estudio, patrón que es bien captado por el IMERG aunque en menor intensidad. Sin embargo, los productos 3B42RT y 3B42V7 presenta el mismo patrón de distribución de

la precipitación, pero difieren en comparación con el observado, ya que esta aumenta de sur a norte. Esto demuestra que la correlación de la lluvia es mejor representada por el IMERG.

Evidentemente la precipitación satelital estimada por el TRMM para la zona de estudio debe ser corregida. De igual manera el IMERG, presenta un bajo desempeño en base a los estadísticos y debería ser corregido para su aplicabilidad en el modelamiento hidrológico. Siguiendo con la metodología planteada en la presente investigación, en primer lugar, se procedió a simular las descargas diarias con los datos en bruto.

Evaluación en el modelamiento hidrológico
El desempeño para la predicción de caudales a partir de los tres productos satelitales de precipitación fue realizado utilizando el juego de parámetros obtenidos de la calibración con los datos observados. La evaluación se hizo con el modelo hidrológico agrupado GR4J tomando como datos de entrada la precipitación media y evapotranspiración potencial media para la cuenca. El modelo GR4J fue calibrado a partir de la precipitación media areal observada para el periodo de 01/09/2001 hasta 31/08/2008. Luego, se comparó el desempeño a partir de la lluvia observada, el producto 3B42RT y 3B42V7 para el periodo de validación I comprendido desde 01/09/2010 hasta 31/03/2014. Luego, los productos mencionados y añadiendo el IMERG, fueron evaluados para el periodo de validación II, comprendido desde 01/04/2014 hasta 31/12/2015 utilizando el mismo juego de parámetros. Un resumen para el escenario de simulación propuesto se observa en la [Tabla 2](#).

Tabla 2

Esquema explicativo para la evaluación hidrológica. Periodos de tiempo, datos de entrada y parámetros

| Escenario | Tipo de Análisis | Periodo de tiempo | Precipitación | Parámetros |
|---------------|------------------|-------------------|-----------------|------------|
| I | Calibración | 01/09/2001 | Media observada | Para 1 |
| | | 31/08/2008 | | |
| | Validación I | 01/09/2008 | Todos los datos | Para 1 |
| | | 31/03/2014 | | |
| Validación II | 01/04/2014 | Todos los datos | Para 1 | |
| | 31/12/2015 | | | |

^a Para 1 son los parámetros calibrados usando la precipitación media observada sobre la cuenca a partir de las 11 estaciones para el periodo 2001-2008.

Escenario de simulación I

El escenario I presenta un buen desempeño del modelo para simular los caudales máximos (NSE/BIAS: 0,89/-1,8%) tal como se observa en la **Figura 4a**. Los caudales bajos son bien representados (NSEL: 0,89). En general las métricas para el periodo de calibración son muy satisfactorias.

El periodo de validación I a partir de los datos observados sigue presentando una buena estimación de los caudales altos (NSE: 0,79) y bajos (NSEL: 0,80). Se observa una mayor subestimación (BIAS: -5,2%) debido principalmente a que no se simula satisfactoriamente el caudal máximo del año hidrológico 2012-2013. El producto 3B42RT (**Figura 4c**) tiende a sobreestimar en un gran porcentaje los caudales observados (BIAS: 119,9%), y no los representa satisfactoriamente (NSE/NSEL: -1,33/0,43).

El producto 3B42V7 tiende en general a sobreestimar los caudales (BIAS: 22,2%) pero en menor proporción al producto 3B42RT (**Figura 4d**), además tiene un buen

desempeño para los caudales bajos (NSEL: 0,80) y no muy bueno para los caudales altos (NSE: 0,32).

Para el periodo de validación II, se evaluaron los productos 3B42RT, 3B42V7 e IMERG. En la **Figura 5a**, a partir de la precipitación observada, el resultado muestra un buen desempeño para la simulación de los caudales picos (NSE: 0,84), caudales bajos (NSEL: 0,89) y una ligera subestimación (BIAS: -12%). El producto 3B42RT (**Figura 5b**), al igual que en la validación I, sobreestima altamente al caudal observado (BIAS: 131,1%), y también tiene una baja representatividad de los caudales picos y bajos (NSE/NSEL: -2,91/-0,07). El producto 3B42V7 (**Figura 5c**) ofrece un mejor desempeño estimando satisfactoriamente los caudales picos y bajos (NSE/NSEL: 0,64/0,62) y con una tendencia a sobreestimarlos ligeramente (BIAS: 7,1%). Finalmente, para intereses del presente estudio, el IMERG es usado para la simulación de caudales (**Figura 5d**), sin embargo, las métricas indican que no tiene un buen desempeño. Presenta una gran subestimación y no representa bien los caudales picos (BIAS/NSE: -64,4%/0,11), aunque si logra estimar satisfactoriamente los caudales bajos (NSEL: 0,56). La deficiencia en representar los caudales máximos se debe a la poca capacidad que tiene el producto IMERG para representar la intensidad de la lluvia en periodo de crecidas.

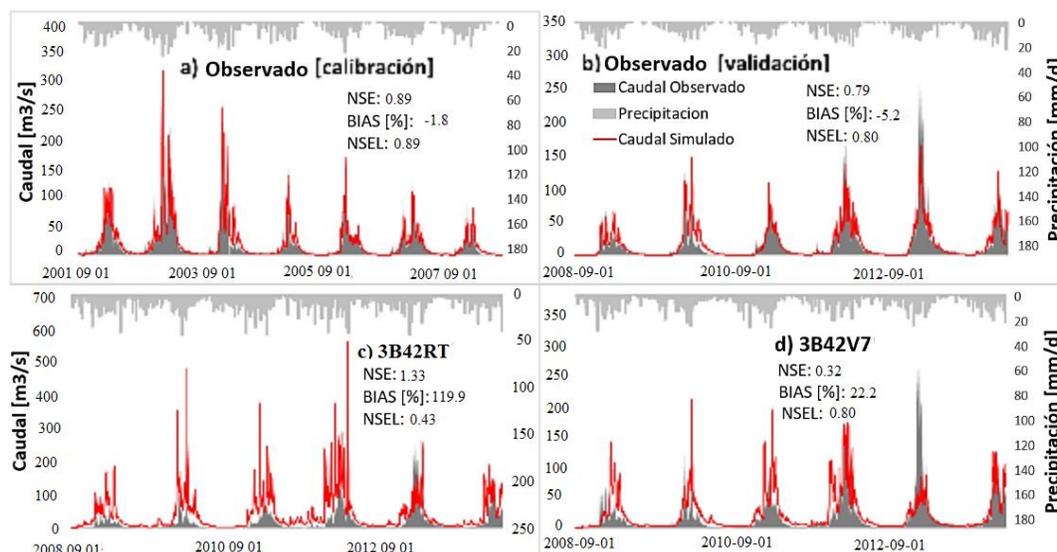


Figura 4. Escenario de simulación I. a) calibración a partir de los datos observados, b) validación I a partir de los datos observados, c) validación I a partir del producto 3B42RT, y d) validación I a partir del producto 3B42V7.

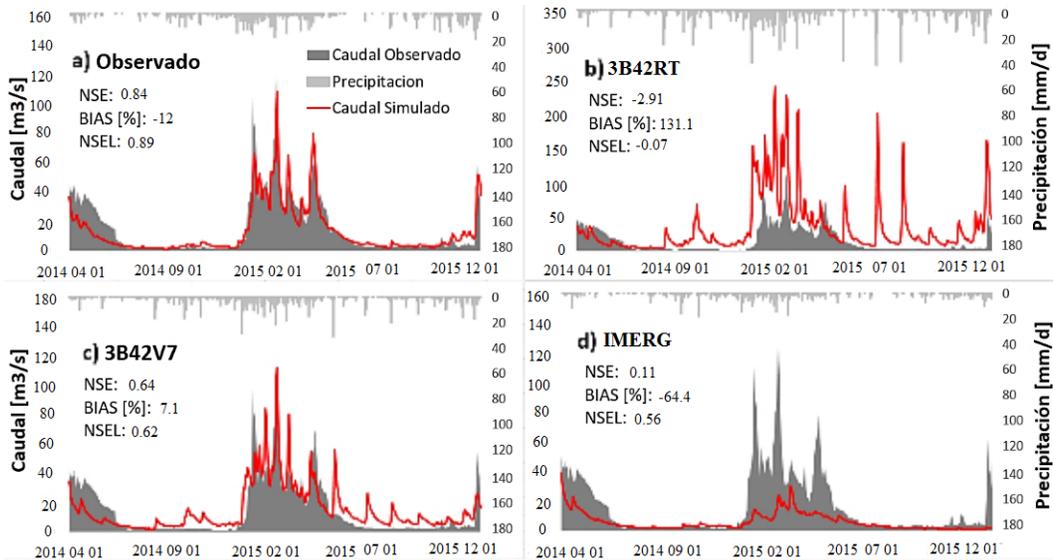


Figura 5. Escenario de simulación I. a) validación II a partir de los datos observados, b) validación II a partir del producto 3B42RT, c) validación II a partir del producto 3B42V7, y d) validación II a partir del producto IMERG.

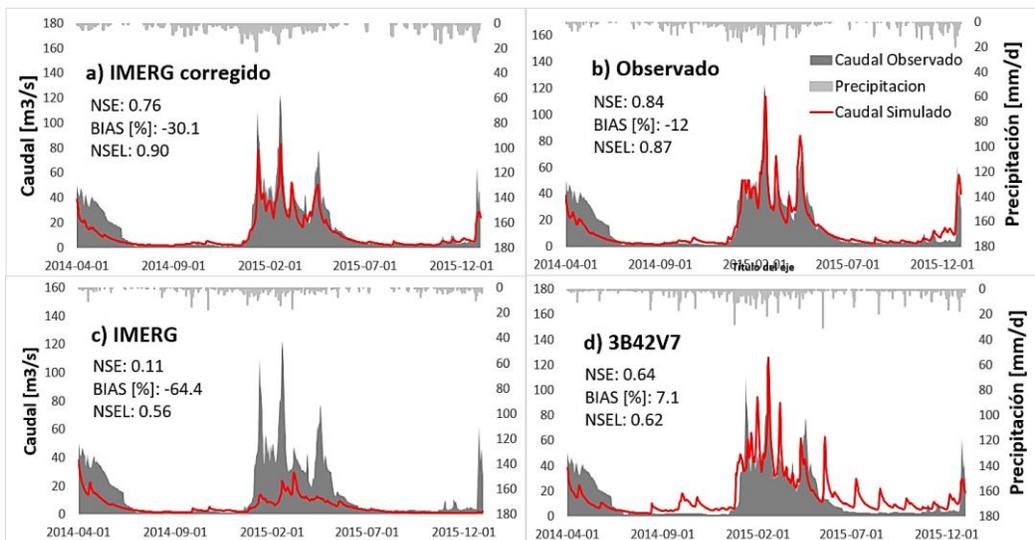


Figura 6. Comparación del desempeño de: a) IMERG corregido, b) datos observados, c) IMERG sin corregir y d) 3B42V7 para el periodo de validación II.

Evaluación del IMERG corregido en el modelamiento hidrológico

Evidentemente, basado en los indicadores del R^2 y el BIAS, el IMERG presenta deficiencias para representar la intensidad de la lluvia en la cuenca del río Huancané. En consecuencia, la estimación de las descargas es deficiente siendo el producto 3B42V7 el más indicado para su uso en ausencia de data observada (resultado similar observado en Beria et al., 2017). Sin embargo, esta deficiencia del IMERG puede ser corregida aplicando métodos de corrección del sesgo. El método de corrección al promedio (Lee et al., 2015) es aplicado en la presente investigación.

Las métricas de desempeño mejoran considerablemente al comparar las precipitaciones medias de la cuenca, la correlación mejora a 0,95 y el BIAS se reduce hasta -10,1%. En cuanto a la aplicación del IMERG corregido para la simulación hidrológica, en primer lugar, se logra mejorar los estadísticos respecto a lo presentado en el Escenario I. Los caudales son mejor estimados (NSE/NSEL= 0,76/0,90), y la subestimación se reduce (BIAS: -30,1%). En segundo lugar, al comparar el mejor resultado del Escenario I utilizando el 3B42V7 con el IMERG corregido, las métricas evidencian una mejora a favor de este último producto (Figura 6). Si bien el

producto 3B42V7 sigue presentando un mejor BIAS (3B42V7/IMERG: 7,1%/-30,1%), se presenta una considerable mejora en cuanto a la estimación de los caudales bajos NSEL (3B42V7/IMERG: 0,62/0,90) y altos NSE (3B42V7/IMERG: 0,64/0,76).

4. Conclusión

El producto 3B42RT (3B42V7) presenta una baja bondad de ajuste y sobrestima excesivamente (sobrestima ligeramente) la precipitación observada. El producto IMERG capta mejor y con menor error la precipitación, sin embargo, en el análisis mensual se evidencia que no cuantifica adecuadamente la intensidad de lluvia. La precipitación es mejor captada en altitudes menores a 4000 msnm dentro de la cuenca del río Huancané para el caso del IMERG. En el mismo análisis, la variación del porcentaje de BIAS respecto a la altitud sigue la misma tendencia para los tres productos; a altitudes próximas a 3900 msnm (4300 msnm) los productos 3B42V7 e IMERG (el producto 3B42RT) capturan mejor las intensidades de precipitación.

En el Escenario I, calibrado a partir de la precipitación observada, el IMERG muestra un bajo desempeño. Los caudales altos no son bien representados mostrando una considerable subestimación para el periodo de avenidas del año hidrológico 2014-2015. Para el mismo periodo, el producto 3B42RT es el menos confiable debido a las altas sobreestimaciones y baja representatividad de la estacionalidad; por otro lado, el 3B42V7 representa mucho mejor las descargas diarias, siendo el mejor producto a usar en ausencia de precipitación observada. El IMERG corregido presenta una considerable mejora, permitiendo captar muy bien la estacionalidad de la lluvia y reduciendo significativamente la subestimación. En consecuencia, su aplicación en el modelamiento hidrológico permite estimar mejor los caudales. En el Escenario I, las descargas diarias son más representativas respecto al 3B42V7. Los patrones son mejor captados y se corrige la subestimación que presentaba; sin embargo, no permite una mejor estimación del caudal máximo para el año hidrológico 2014-2015.

Los resultados presentados pueden ser probablemente también aplicable a otras cuencas ubicadas en el altiplano.

Agradecimiento

Los autores de este artículo agradecen al SENAMHI por todo el apoyo científico y técnico proporcionado durante el trabajo de

modelización hidrológica y análisis de resultados. El esfuerzo de la comunidad de investigación del TRMM y GPM, son también altamente apreciados por permitir la libre disponibilidad de los datos de precipitación de sus productos satelitales.

Referencias Bibliográficas

- Beria, H.; Nanda, T.; Bisht, D.S.; Chatterjee, C. 2017. Does the GPM mission improve the systematic error component in satellite rainfall estimates over TRMM? An evaluation at a pan-India scale. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21: 6117–6134.
- Carrasco, M.; Yarlequé, C.; Posadas, A. 2010. Datos faltantes de precipitación pluvial diaria mediante la Transformada Wavelet. *Revista Peruana Geo-Atmosférica* 88(2): 76-88.
- Chen, F.; Li, X. 2016. Evaluation of IMERG and TRMM 3B43 monthly precipitation products over mainland China. *Remote Sensing* 8(6): 1-18.
- Choquehuanca, A.; Mamani, H. 2008. Las inundaciones en Huancané. *Espacio y Desarrollo* 20: 59-68.
- Condom, T.; Rau, P.; Espinoza, J.C. 2011. Correction of TRMM 3B43 monthly precipitation data over the mountainous areas of Peru during the period 1998-2007. *Hydrological Processes* 25(12): 1924-1933.
- Harlan, D.; Wangsadipura, M.; Munajat, C.M. 2010. Rainfall-Runoff Modeling of Citarum Hulu River Basin by Using GR4J. *Proceedings of the World Congress on Engineering* 2010 II: 4-8.
- Hou, A.; Gail, J.; Kummerow, C.; Marshall, J. 2011. Global precipitation measurement. *Meteorological Applications* 18(3): 334-353.
- Huffman, G.J. 2015. 28 July 2015 TMPA-to-IMERG Transition 1. IMERG Release Notes July (2015): 1-3.
- Huffman, G.J.; Adler, R.F.; Bolvin, D.T.; Nelkin, E.J. 2010. The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA). *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology* 2010: 3-22.
- Huffman, G.J.; Bolvin, D.T.; Nelkin, E.J. 2015. Day 1 IMERG Final Run Release Notes. IMERG Release Notes January (2015): 1-9.
- El Kenawy, A.M.; Lopez-Moreno, J.I.; McCabe, M.F.; Vicente-Serrano, S.M. 2015. Evaluation of the TMPA-3B42 precipitation product using a high-density rain gauge network over complex terrain in northeastern Iberia. *Global and Planetary Change* 133: 188-200.
- Lee, J.-K.; Kim, J.-H.; Suk, M.-K. 2015. Application of bias correction methods to improve the accuracy of quantitative radar rainfall in Korea. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions* 8(4): 4011-4047.
- Macritchie, K. 2015. Document for the Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM). 2015: 69.
- NASA; JAXA. 2006. Key TRMM Facts. In: *Earth Science Reference Handbook: A Guide to NASA's Earth Science Program and Earth Observing Satellite Missions*. 243-254 pp.
- Nikolopoulos, E.I.; Anagnostou, E.N.; Borga, M. 2012. Using High-Resolution Satellite Rainfall Products to Simulate a Major Flash Flood Event in Northern Italy (En null). *Journal of Hydrometeorology* 14(1): 171-185.
- Ochoa, A.; Pineda, L.; Crespo, P.; Willems, P. 2014. Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific-Andean region of Ecuador and Peru. *Hydrology and Earth System Sciences* 18(8): 3179-3193.
- Samani, Z. 2000. Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 126(4): 265-267.
- Shepard, D. 1968. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data, *Proc. 23rd National Conference ACM, ACM*, 517-524.

- Scheel, M.L.M.; Rohrer, M.; Huggel, C.; Villar, D.; Silvestre, E.; Huffman, G.J. 2010. Evaluation of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution (English). *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 7(5): 8545-8586.
- Tan, M.; Duan, Z. 2017. Assessment of GPM and TRMM Precipitation Products over Singapore. *Remote Sensing* 9(7):720.
- Taylor, K.E. 2005. Taylor Diagram Primer. Disponible en: https://pcmdi.llnl.gov/staff/taylor/CV/Taylor_diagram_primer.pdf?id=87.
- Yupanqui, T.R.; Cabrera, J.; Rau, P. 2015. Evaluation of TRMM precipitation data for estimation of daily stream flows. *36th IAHR World Congress 1998(1)*: 1-13.
- Zubieta, R.; Getirana, A.; Espinoza, J.C.; Lavado-Casimiro, W.; Aragon, L. 2017. Hydrological modeling of the Peruvian-Ecuadorian Amazon Basin using GPM-IMERG satellite-based precipitation dataset. *Hydrology and Earth System Sciences* 21(7): 3543-3555.
- Zulkafli, Z.; Buytaert, W.; Onof, C.; Manz, B.; Tarnavsky, E.; Lavado, W.; Guyot, J.-L. 2014. A Comparative Performance Analysis of TRMM 3B42 (TMPA) Versions 6 and 7 for Hydrological Applications over Andean-Amazon River Basins. *Journal of Hydrometeorology* 15(2): 581-592.