




# Modelación hidrológica usando precipitación por satélite en la cuenca del río Huallaga en Perú

## *Hydrological modeling using satellite precipitation over the Huallaga river basin in Perú*

Diego Fabrizio Huamanchumo Sono<sup>1</sup> , Lizbeth Karina Alvarez Mamani<sup>1</sup> , Karena Quiroz Jiménez, PhD<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u20181g582@upc.edu.pe, u20171b634@upc.edu.pe, pccikqui@upc.edu.pe

**Resumen**—Este estudio trata de la evaluación de datos de precipitación obtenida por satélite del proyecto Global Precipitation Measurement (GPM) aplicado en la cuenca del río Huallaga mediante una modelación hidrológica de grande escala. La modelación es realizada a paso de tiempo diario, la calibración de los parámetros fue mediante prueba y error y los datos de caudal fueron considerados para una única estación. La serie de caudales del modelo hidrológico obtenido de la precipitación del GPM como dato de entrada fue comparado con la serie de caudales observados en la estación hidrométrica. Los resultados tuvieron un bajo desempeño en términos de eficiencia de Nash-Sutcliffe. Un análisis visual de los hidrogramas mostró una subestimación en los caudales calculados por el modelo cuando se comparó con los caudales observados en la estación de control. La conclusión de este proceso de modelación indica que la precipitación por satélite del proyecto GPM en la versión IMERG-Final aún no es confiable para la cuenca del río Huallaga.

**Palabras claves**—modelación hidrológica, precipitación por satélite, cuenca del río Huallaga.

**Abstract** – The aim of this paper is to evaluate a satellite rainfall dataset obtained from the Global Precipitation Measurement (GPM) project which was applied to the Huallaga River basin located in Peru by means of the use of a large-scale hydrologic model. The numerical modeling is performed at daily time intervals, where the calibration procedure of parameters employs a trial and error procedure, together with the use of the streamflow data from a single station. The computed streamflow series from the hydrologic model using GPM satellite precipitation as input data have been compared with the observed streamflow data, showing a poor correlation in terms of Nash-Sutcliffe efficiency. A visual analysis of the hydrographs showed an underestimation in the calculated streamflows by modeling when compared with observed streamflow at the control station. The conclusion of this modeling process indicates that the satellite precipitation from GPM in IMERG-Final version dataset is not reliable for Huallaga River basin.

**Keywords** — hydrological modeling, satellite precipitation, Huallaga River basin.

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

### I. INTRODUCCIÓN

La modelación hidrológica es una forma simplificada de los procesos físicos que suceden en una cuenca hidrográfica. Ese tipo de modelación es útil para diversos estudios como prevención de inundaciones, gestión hídrica, diseño de estructuras hidráulicas, entre otros estudios importantes [1]. Sin embargo, la modelación presenta incertidumbre en sus componentes de entrada, en la estructura del modelo escogido y en los parámetros. Un componente de entrada es la precipitación, considerada como parte esencial de la modelación y la que presenta mayores errores en su medición. La forma más común y tradicional de medición de precipitación es mediante pluviómetros instalados sobre la superficie terrestre y generalmente se encuentran instaladas de forma dispersa. Una posibilidad de error en la medición es que estos equipos presentan fallas en el registro y que sumado a una inadecuada distribución podría dificultar que los pluviómetros no consigan monitorear la totalidad de los eventos más importantes para una modelación adecuada.

La precipitación por satélite es una alternativa de observación de precipitación y son de fácil acceso. La precipitación es estimada mediante la interpretación de la radiación electromagnética en tres bandas del espectro electromagnético: visible, infrarrojo y microonda. La radiación en la banda de microonda presenta una mejor detección interactuando de forma más directa con las gotas de lluvia que caen a la superficie terrestre. En los últimos años, la base de datos de precipitación por satélite ha cambiado a medida que mejora la tecnología de los sensores. También, la combinación de información de las tres bandas junto con correcciones de precipitación mensual por pluviómetros obtenidos de agencias meteorológicas de diversos países hacen posible la mejor manera de obtener precipitación por satélite en formato de grillas para toda la superficie del planeta en escala de tiempo y espacio más fino [2].

La primera misión de precipitación global fue el Proyecto Tropical Rainfall Measuring Mission TRMM ofreciendo precipitación en formato grillado de 0.25° a cada 3 horas. Posteriormente, nuevas tecnologías en los sensores llevaron a la creación de una nueva misión llamada *Global Precipitation*

Measurement (GPM) que reemplazaría a su antecesor TRMM. Esa nueva misión presenta el proyecto de precipitación llamada *Integrated Multi-satellitE Retrievals for the Global Precipitation Measurement* (IMERG). Esa base de datos usa además de la información remota obtenida de los sensores, análisis de precipitación de pluviómetros con datos acumulados mensuales. La precipitación obtenida es también en formato grillado en tamaño más fino de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  a cada 30 minutos. Tres productos de precipitación son obtenidos de IMERG, siendo el *Final*, *Late* y *Early*. Los tres productos antes mencionados son estimados mediante algoritmos matemáticos considerando información obtenida de las tres bandas e métodos de interpolación. Para la precipitación de *Final*, este presenta corrección con pluviómetros y el tiempo de disponibilidad es de 3.5 meses después de la observación. Ya para los casos de *Late* y *Early*, la precipitación es liberada después de 14 horas e 4 horas de sucedido la lluvia, respectivamente [3].

Diversos estudios aplicando precipitación IMERG en diversos tipos de modelos hidrológicos fueron realizados en diversas cuencas del Perú. Para algunas cuencas hidrográficas de la vertiente amazónica mostraron resultados de interés [4,5,6]. Diversos productos de precipitación obtenidos mediante métodos de interpolación combinado satélite con pluviómetros mostraron resultados prometedores [7,8,9]. La cuenca del río Huallaga es una región que presenta una topografía muy compleja donde el agua discurre desde la cordillera de los Andes atravesando la planicie amazónica. Además, es una cuenca con bastante presencia productiva y de preservación ecológica. El agua de los cursos de los ríos es aprovechada para diversas demandas de uso principalmente al de agrícola. Las estaciones pluviométricas instaladas sobre la cuenca del río Huallaga son pobremente distribuidas e irregulares lo que dificultaría los resultados en una modelación hidrológica. En ese sentido, este trabajo pretende estudiar la precipitación por satélite del producto *Final* del IMERG (IMERG-Final) en la cuenca del río Huallaga a escala de tiempo diario mediante un modelo de simulación hidrológica de gran escala.

## II. METODOLOGÍA

### A. Cuenca del río Huallaga

La cuenca del río Huallaga está ubicada en la zona nororiental del Perú, forma parte importante de las nacientes del río Amazonas desembocando en la vertiente Atlántica. Sus límites son por el oeste con la cordillera de los Andes y su área de drenaje es de aproximadamente  $70000 \text{ km}^2$  hasta la estación hidrométrica Chazuta sobre el río Huallaga (Fig. 1).

La altitud de la cuenca varía desde un valor mínimo de 130 m.s.n.m. hasta un valor máximo de 4500 m.s.n.m. y sus límites políticos están conformados por las regiones de Huánuco, San Martín y Loreto. La temperatura media anual es cercana a los  $20^\circ \text{C}$ , la precipitación media anual es de aproximadamente 1700 mm, siendo la mayoría de las precipitaciones recibidas entre los meses de diciembre a marzo

y presenta un caudal medio de  $3250 \text{ m}^3/\text{s}$ . La cantidad de lluvia máxima está muy relacionada con la dirección y la fuerza de los vientos Alisios que vienen del noreste del Atlántico y pasan a través de la cuenca amazónica.

Los datos de caudal fueron recolectados de la estación hidrométrica Chazuta, extraída de la base de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) para el periodo 2001 – 2009.

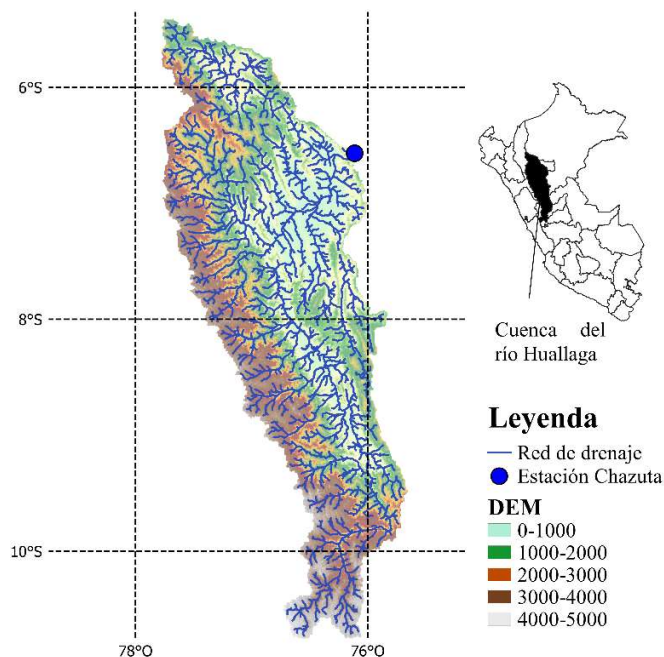


Fig. 1 Localización de la Cuenca del río Huallaga

### B. Modelación hidrológica

El modelo hidrológico aplicado es el Modelo de Grandes Bacías (MGB-IPH) desarrollado por [10]. Es un modelo semi-distribuido utilizado para determinar principalmente caudales y niveles de los ríos de cuencas hidrográficas mayores a  $10000 \text{ km}^2$ . Divide la cuenca en minicuevas ligadas por una red de ríos y cada minicuenca es dividida en bloques según el uso y tipo de suelo llamados Unidades de Respuesta Hidrológica (URH). El MGB-IPH tiene su base teórica en ecuaciones que simulan procesos de interceptación, evapotranspiración, balance hídrico en el suelo, escurrimiento superficial, subsuperficial y subterráneo, y propagación de caudales en el río.

En el modelo MGB-IPH, hay dos tipos de parámetros: fijos y variables. Los parámetros fijos son mantenidos constantes y están relacionados al albedo, índice de área foliar, altura promedio de vegetación y resistencia superficial. Por otro lado, los parámetros que varían son determinados mediante un proceso de calibración. Algunos parámetros son la capacidad de almacenamiento máximo ( $W_m$ ), parámetro que

maneja la correlación entre el almacenamiento-saturación ( $b$ ), parámetro que controla el caudal durante las sequías ( $K_{bas}$ ), parámetro que controla la cantidad de agua que está debajo de la superficie del suelo. La Tabla 1 muestra el rango de valores máximo y mínimo en que varían los parámetros del modelo hidrológico MGB-IPH.

TABLA I  
VALORES MÍNIMOS Y MÁXIMOS DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO MGB-IPH

Parámetros	Valor Mínimo	Valor Máximo
$W_m$	50	1000
$b$	0.12	1.6
$K_{BAS}$	0.05	5
$K_{INT}$	4	40
CS	1	20
CI	50	200
CB	1200	8000

Este conjunto de parámetros es único para cada sub-bacia limitado a una estación hidrométrica con datos observados. El proceso de calibración del modelo es realizado de modo que pueden ser alterados para buscar un mejor ajuste respecto a los datos de caudal observados y simulados. Los parámetros de almacenamiento ( $W_m$ ) y de las escorrentías ( $K_{BAS}$ ,  $K_{INT}$ ) son probablemente los más sensibles, por lo tanto, requieren una atención especial en el proceso de calibración.

La calibración puede ser manual o automática. La calibración manual es un proceso iterativo en el que los parámetros se ajustan en cada simulación hasta que se logra una comparación satisfactoria entre los hidrogramas calculados y observados. En cambio, la calibración automática utiliza un algoritmo de optimización. En este estudio, se empleará una calibración manual para ajustar los parámetros del modelo hidrológico.

### C. Índices de desempeño

Es posible realizar una evaluación de la relación que existe entre los caudales simulados y calculados mediante los siguientes índices de desempeño: el coeficiente (Nash), el coeficiente Nash para logaritmos (Nash – Log) y la relación entre los volúmenes medidos y calculados (Bias).

Mediante estos índices se pretende evaluar la similitud entre los caudales calculados y los observados, a la vez que se determina si la lluvia obtenida por satélite puede complementar la medición de pluviómetros en la cuenca del río Huallaga. El primer índice se ve fuertemente influenciado por los caudales máximos; siendo que si muestra el valor de 1 califica como una calibración perfecta. Asimismo, el segundo índice se ve más influenciado por los caudales mínimos. El tercer índice expresa el porcentaje entre la diferencia de los caudales en relación al caudal observado y un buen ajuste generalmente varía entre los valores de -10% a +10%.

También, se evalúa visualmente la similitud entre los hidrogramas simulados y observados en términos de los caudales picos de caudal, periodos de estiaje y/o recesión de los hidrogramas.

## III. RESULTADOS

### A. Pre-procesamiento del MGB-IPH

El modelo MGB-IPH tiene una interface gráfica en el programa QGIS tanto para el pre-procesamiento y simulación en la que se incluye la calibración de los parámetros. El preprocesamiento consiste en dividir a la cuenca en pequeñas unidades llamadas minicuecas a partir de un Modelo Digital de Elevación. En este caso se empleó MERIT DEM: *Multi-Error-Removed Improved-Terrain* de 500 m de resolución.

Se realizó el pre-procesamiento a partir del modelo digital de elevación mencionado anteriormente. En ese proceso se consiguió definir las áreas acumuladas de los flujos según la elevación topográfica, el inicio de los cursos de los ríos y finalmente las minicuecas. El modelo MGB-IPH define un punto central dentro de la minicueca llamado centroide, es en ese punto geométrico donde se calcula la precipitación mediante método de interpolación. En resumen, se obtuvo 1819 minicuecas donde el área varía  $0.5 \text{ km}^2$  y  $395 \text{ km}^2$ , como se muestra en la Fig. 2.

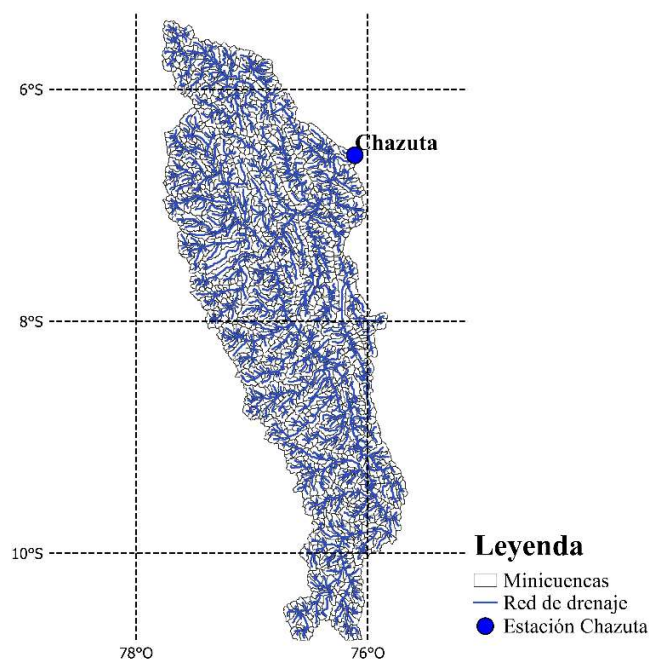


Fig. 2 Discretización de la cuenca del río Huallaga en minicuecas para la simulación del MGB-IPH

Además, la interface del MGB-IPH presenta opciones de base de datos globales, tal es el caso de datos climáticos obtenidos del *Climate Research Unit* (CRU). En este trabajo, se opta por usar esa base de datos ofrecida por la interface para los valores de temperatura media del aire, velocidad del viento, humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar y brillo solar.

En la Fig. 3 se puede visualizar las Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) obtenidas dentro de la cuenca, las cuales mediante un análisis sencillo de sus valores, se pudo

determinar aquellos que representan una mayor importancia al momento de buscar un mejor ajuste en el proceso de calibración.

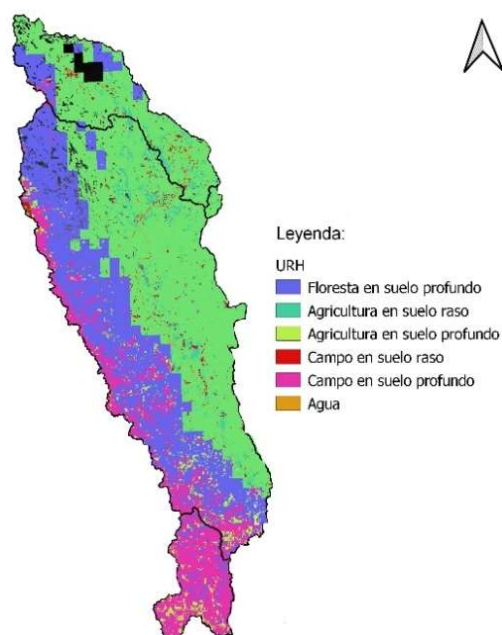


Fig. 3. Unidades de Respuesta Hidrológica de la cuenca del río Huallaga para la simulación del MGB-IPH.

La precipitación por el modelo MGB-IPH está calculada en el centroide de la minicuenca y es representativa para toda la minicuenca. Un proceso de interpolación llamado inversa distancia al cuadrado fue realizado para obtener la precipitación de IMERG-Final en puntos grillados para los centroides y ese procedimiento fue repetido para cada intervalo de tiempo. Además, son definidos los valores de los parámetros fijos para toda la cuenca y los calibrables para cada unidad de respuesta hidrológica de acuerdo al tipo de suelo y al uso dado, que permite la definición del comportamiento hidrológico.

### B. Simulación hidrológica con IMERG-Final

El periodo de simulación es de 2001-2009, ese periodo fue escogido debido a la disponibilidad de datos de caudal en la estación Chazuta. La precipitación diaria fue acumulada de cada archivo de 30 minutos y acumulada de 12 UTC a 12 UTC, horario en que se considera que el personal técnico registra el acumulo de la precipitación de los pluviómetros.

La Fig. 4 muestra la precipitación media anual obtenida por IMERG-Final calculada para el periodo comprendido entre los años 2001-2009. La figura muestra una variación entre 700 mm a 3000 mm en todo el ámbito de la cuenca del río Huallaga. Precipitaciones superiores a 3000mm se presenta en el lado Sudeste de la cuenca. Mientras que precipitaciones mínimas se presentan en la región Sur donde existe una mayor altitud topográfica superior a 4000 m. Ya en la región central las precipitaciones van entre 700 mm a 2000 mm.

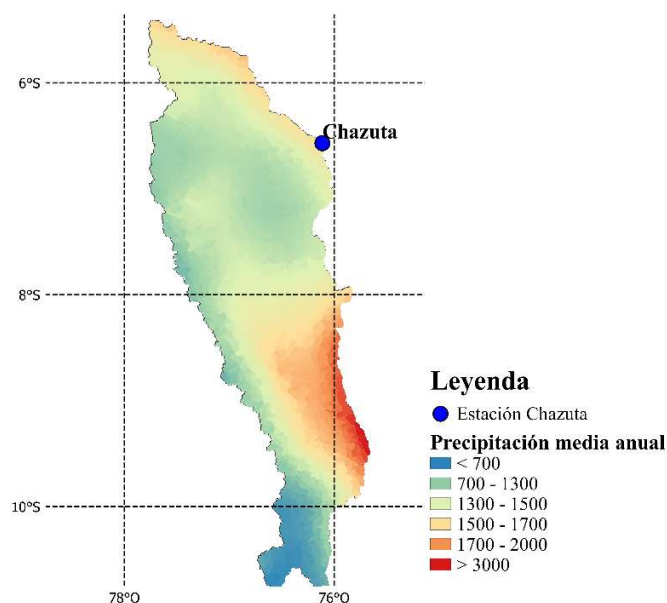


Fig. 4. Campo de precipitación media anual calculado por el producto IMERG-Final para o periodo 2001-2009.

La simulación hidrológica fue realizada a través de la interface gráfica del modelo MGB-IPH creado específicamente en el entorno del QGIS. En esa interface es posible crear el proyecto de simulación, el mismo que incluye calibración y la visualización de los resultados que se muestran en los gráficos a seguir. Un ejemplo de visualización del entorno mencionado es mostrado en la Fig. 5. En el lado izquierdo de la Figura se muestra la ventana de dialogo para los datos de entrada del modelo. En este trabajo se utilizaron las opciones de geometría, hidrología, climatología y parámetros. En el lado derecho de la misma Figura se muestra la ventana de dialogo para la simulación que incluye un código numeral que identifica la minicuenca asociada a la localización de la estación Chazuta, el tipo de método para el tránsito de avenidas del río y el tipo de calibración.

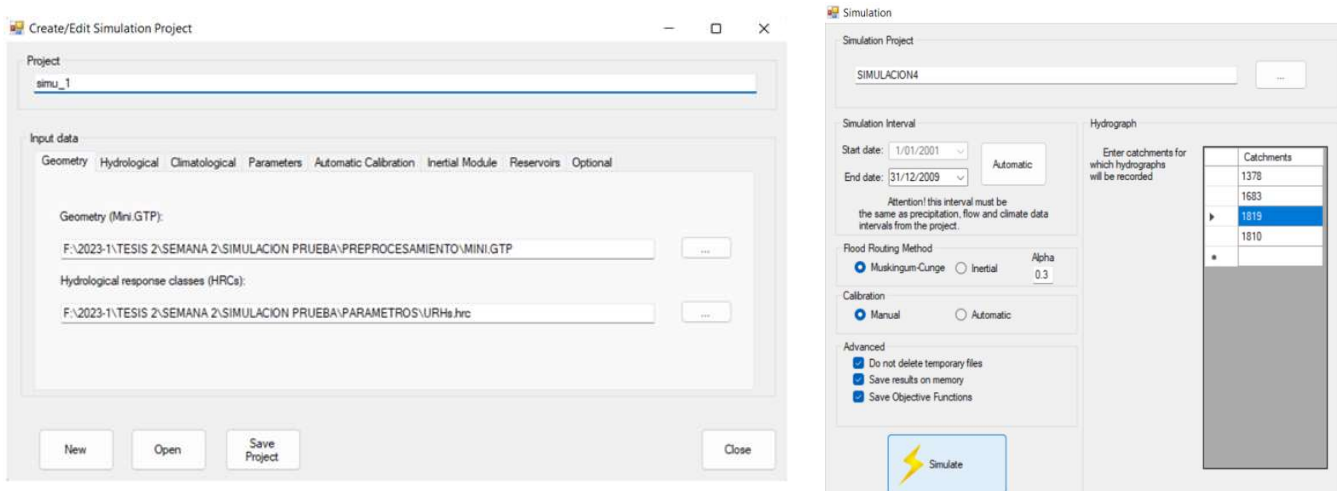


Fig. 5 Visualización del proyecto de simulación de la interface del modelo MGB-IPH en QGIS.

Las primeras simulaciones se realizaron usando valores medios entre los rangos máximos y mínimos de los parámetros definidos por el modelo MGB-IPH.

Luego de realizar varias calibraciones por prueba y error se encontró un conjunto de parámetros que se ajustó mejor al momento de visualizar los hidrogramas calculados por el modelo y observado en la estación Chazuta, el cual está mostrado en la Tabla II.

TABLE II  
VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO MGB-IPH PARA LA ESTACIÓN CHAZUTA EN LA CUENCA DEL RIO HUALLAGA

URH	$W_m$	$b$	$K_{bas}$	$K_{int}$
Floresta en suelo profundo	50	0.1	5	40
Agricultura en suelo raso	200	0.1	5	40
Agricultura en suelo Profundo	200	0.1	5	40
Campos en suelo Raso	200	0.1	5	40
Campo en suelo Profundo	50	0.1	5	40

Esos parámetros muestran valores de almacenamiento máximo ( $W_m$ ) de 50 mm, un valor de 0.1 para el parámetro que determina la forma de la correlación entre el almacenamiento y la saturación ( $b$ ), lo cual es considerado muy bajo dentro de los límites recomendados por el modelo

MGB-IPH. Caso contrario sucede con los siguientes parámetros, cuyos valores son los máximos recomendados por el modelo, con un valor de 5 para el parámetro que controla el flujo durante la estación seca ( $K_{bas}$ ) y por último, el parámetro que controla la cantidad de agua de la capa del suelo que se elimina debajo de la superficie ( $K_{int}$ ) con un valor de 40.

La Fig.6 muestra los hidrogramas para la modelización usando precipitación IMERG-Final (línea roja), también se observa los caudales observados en la estación Chazuta (línea azul). La razón por la cual aún existe una ligera lejanía, se debe que los parámetros del modelo aún pueden ser mejor calibrados, una opción podría ser la optimización automática, además de que se han considerado parámetros homogéneos en toda la cuenca y solo se está tomando en cuenta la estación hidrométrica Chazuta, como resultado el coeficiente de Nash tiene un valor por debajo de 1.00. Además, se observa que la simulación con IMERG-Final subestima los caudales en periodos húmedos, presenta algunos valores máximos atípicos como el próximo a la fecha del 01/01/06.

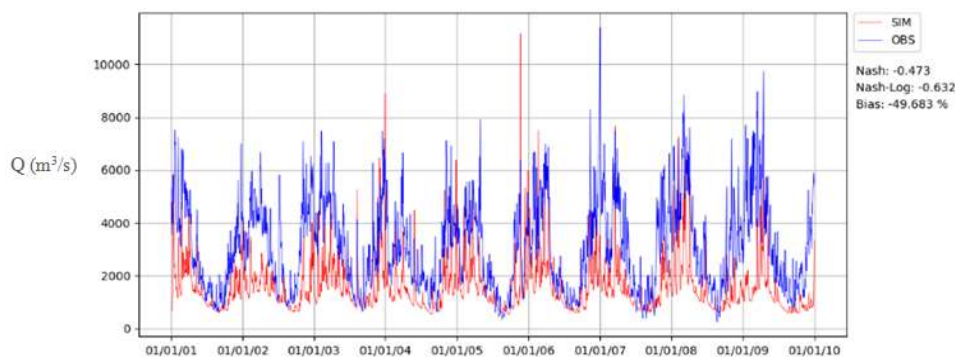


Fig. 6 Hidrograma calculado con IMERG-Final y observado en la estación Chazuta para la cuenca del rio Huallaga

Asimismo, para una mejor comparación de los caudales máximos y mínimos se emplea las curvas de permanencia, herramienta que indica el porcentaje del tiempo en el que el caudal de un río es igual o mayor que un determinado valor. En la Fig.7 se visualiza un alejamiento entre las curvas de permanencia simulada con IMERG-Final (curva roja) y la observada (curva azul). El eje de las ordenadas está en escala logarítmica para poder visualizar mejor los caudales que son de menor valor. Para conseguir aproximar los picos de caudales se debe disminuir de forma considerable el parámetro de almacenamiento máximo ( $W_m$ ) que ya se encuentra cercano al valor mínimo establecido por el modelo. Significa que una mejor aproximación resultará de obtener un conjunto de parámetros fuera del rango permisible.

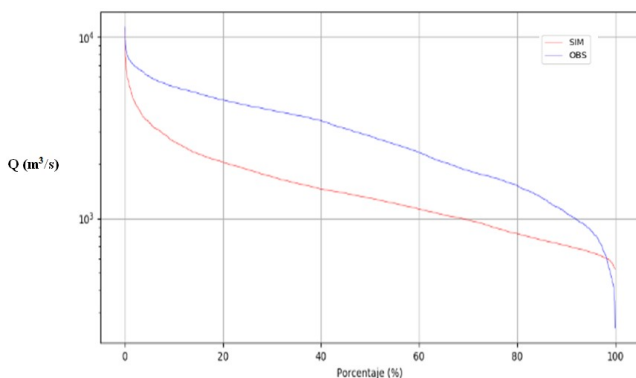


Fig. 7 Curva de permanencia para la estación Chazuta en la cuenca del río Huallaga.

#### IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo muestra un análisis preliminar de modelización hidrológica usando datos de precipitación por satélite la cuenca del río Huallaga. Se trabajó con un producto de precipitación que presenta una corrección con datos pluviométricos.

Los resultados de calibración de parámetros muestran una fuerte subestimación de caudal simulado con precipitación IMERG-Final cuando se compara con los observados, esa tendencia es observada mejor en la curva de permanencia.

El conjunto de parámetros obtenidos después de la calibración manual muestra que el parámetro más influyente es de almacenamiento máximo, y muestra ya un valor al límite establecido por el modelo MGB-IPH. En conclusión, el producto de precipitación por satélite IMERG-Final no es aún confiable para propósitos de modelización hidrológica en la cuenca del río Huallaga. Se recomienda ensayar con otros productos de precipitación regional combinada con pluviómetros.

#### REFERENCIAS

- [1] K. Beven, *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*, Second Edition, John Wiley & Sons, 2012.
- [2] F. Tapiador, J. Turk, W. Petersen, A. Hou, E. García-Ortega, L. Machado, C.F. Angelis, P. Salio, C. Kidd, G. Huffman, and M. de Castro, "Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications," *Atmospheric Research*, vol. 104-105, pp. 70-97, February 2012.
- [3] G. Huffman, D. Bolvin, D. Braithwaite, K. Hsu, R. Joyce, C. Kidd, E. Nelkin, S. Sorooshian, E. Stocker, J. Tan, D. Wolff, and P. Xie, "Integrated Multi-satellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission (IMERG)," *Satellite Precipitation Measurement*, Satellite Precipitation Measurement, vol. 67, pp. 343-353, April 2020.
- [4] R. Zubieta, A. Getirana, J.C. Espinoza, W. Lavado-Casimiro, and Luis Aragon, "Hydrological modeling of the Peruvian-Ecuadorian Amazon Basin using GPM-IMERG satellite-based precipitation dataset," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, no. 7, pp. 3543-3555, July 2017.
- [5] H. Llauca, W. Lavado-Casimiro, K. León, J. Jimenez, K. Traverso, and P. Rau, "Assessing Near Real-Time Satellite Precipitation Products for Flood Simulations at Sub-Daily Scales in a Sparsely Gauged Watershed in Peruvian Andes," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 4, February 2021.
- [6] L. Arias, M. Ribeiro, C. Rogério, R. Junqueira, and J. da Silva, "Hydrological modeling in a region with sparsely observed data in the eastern Central Andes of Peru, Amazon," *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 121, pp. 1-12, 2021.
- [7] K. Quiroz, W. Collischonn, and W. Lavado, "Modelización hidrológica usando estimaciones de lluvia por satélite en la cuenca del río Huallaga, Perú," *REVISTA PERUANA GEO-ATMOSFÉRICA RPGA*, pp. 51-62, 2011.
- [8] C. Aybar, C. Fernández, A. Huerta, W. Lavado, F. Vega, and O. Felipe-Obando, "Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 65, no. 5, pp. 770-785, August 2019.
- [9] C. Fernandez-Palomino, F. Hattermann, V. Krysanova, F. Vega-Jácome, and Axel Bronstert, "Towards a more consistent eco-hydrological modelling through multi-objective calibration: a case study in the Andean Vilcanota River basin, Peru," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 66, no. 1, pp. 59-74, November 2020.
- [10] W. Collischonn, D. Allasia, B. Da Silva, and C. Tucci, "The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 52, no. 5, pp. 878-895, January 2007.