



Validación de la precipitación estimada por satélite TRMM y su aplicación en la modelación hidrológica del río Ramis Puno Perú

Efrain Lujano Laura¹, Oscar G Felipe Obando², Apolinario Lujano Laura³ José P. Quispe Aragón⁴

^{1,2}Ingeniero Agrícola, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología

^{3,4}Ingeniero Agrícola, Autoridad Nacional del Agua correspondencia: elujano28@gmail.com ofelipe@senamhi.gob.pe

INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Art. Recibido 25/mayo/2015
Art. Aceptado 13/agosto/2015
online: 14/setiembre/2015

PALABRAS CLAVE:

* Lluvia por satélite
* modelo hidrológico GR2M
* TRMM

ARTICLE INFO

Article Received 25/may/2015
Article Accepted 13/august/2015
online:14/setember/2015

KEY WORDS

* Satellite rain
* hydrological model GR2M
* TRMM

RESUMEN

La investigación se realizó en la cuenca Ramis, ubicado al norte de la región hidrográfica del Titicaca (lado peruano), teniendo como objetivo validar las precipitaciones estimadas por satélite y su aplicación en la modelación hidrológica del río Ramis. La validación de precipitaciones estimadas por satélite, se realizó mediante una comparación entre datos observados en ambos casos para el periodo enero de 1998 a diciembre 2013, los cuales fueron evaluados mediante los indicadores estadísticos de sesgo porcentual y coeficiente de determinación. Para el caso de la modelación hidrológica, se efectuó mediante el modelo hidrológico GR2M el cual consistió en las etapas de calibración y validación. La significancia estadística de las simulaciones de caudales fue evaluada mediante los indicadores de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el sesgo porcentual. Los resultados obtenidos indican en considerar fiable la lluvia estimada por satélite y se puedan utilizar como alternativa en zonas sin información, dado que el coeficiente de determinación en la validación de precipitaciones es igual a 0.86 con un sesgo porcentual de +21.7% y como datos de entrada en la modelación hidrológica para transformar lluvia en escorrentía, es aceptable con eficiencias de Nash-Sutcliffe igual 0.78 en la etapa de calibración y 0.75 en la validación. Se concluye que el producto de estimación satelital es válido en la cuenca del río Ramis.

Validation of TRMM satellite estimated rainfall and their application in hydrological modeling of river Ramis Puno Perú

ABSTRACT

The research was conducted at the Ramis basin, located north of the river region of Titicaca (Peruvian side), aiming to validate the estimated satellite and its application in hydrological modeling of river Ramis rainfall. The validation of satellite estimated rainfall was performed by a comparison of observed data in both cases for the period January 1998 to December 2013, which were evaluated by statistical indicators of bias percentage and coefficient of determination. In the case of hydrological modeling it was performed by GR2M hydrological model which consisted of calibration and validation stages. The statistical significance of the simulations was assessed by flow indicators Nash-Sutcliffe efficiency and percentage bias. Results indicate in considering the estimated satellite can be used as an alternative in areas without information, as the coefficient of determination on the validation of rainfall is equal to 0.86 with a percentage bias + 21.7% and as reliable rainfall data entry into the hydrologic modeling to transform rainfall runoff is acceptable with Nash-Sutcliffe efficiencies equal 0.78 in the calibration step and 0.75 in the validation. It is concluded that satellite product estimate is valid in the Ramis River Basin.

INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Ramis es uno de los principales aportantes de recurso hídrico al lago Titicaca, en la cual existen estaciones meteorológicas que registran variables de precipitación, cuya captación de lluvia solo es representativa en un radio de 25 km² al rededor de cada una según la OMM (2011) y que en muchos lugares no se cumple este criterio sobre todo en las zonas altas de la cuenca, existiendo vacíos que podrían influir directamente en la modelación hidrológica. Una posible alternativa de solución a este problema es el uso de lluvias estimadas por sensoramiento remoto debido a que se encuentran uniformemente distribuidos resultando de gran ayuda en el modelamiento hidrológico.

El Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), es una conjunción de exploración espacial entre la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) y la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa (JAXA), diseñada para monitorear y estudiar las lluvias tropicales y subtropicales, lanzado el 27 de noviembre de 1997 a una altura de 350 km, brindando información de alta cobertura espacial y alta resolución temporal. La lluvia del TRMM, utilizada en el presente trabajo, es producida por el algoritmo 3B43, con resolución temporal mensual, resolución espacial horizontal de 0.25° x 0.25°, cobertura geográfica de 50°S - 50°N en latitud y 180°W-180°E en longitud, abarcando una mayor extensión e información espacio-temporal que las obtenidas por las estaciones meteorológicas convencionales, sin embargo la información que utilizan los algoritmos tiene una fuerte relación en términos físicos con los hidrometeoros, que resultan en el dato de precipitación, pero cada satélite individualmente provee información en intervalos de tiempo y espacio que no son suficientes para obtener un dato preciso de la ocurrencia de precipitación (Huffman, Adler, Bolvin, Gu, Nelkin, Bowman, Hong, Stocker y Wolff, 2007; Huffman y Bolvin, 2014). Por ello las estimaciones están sujetos a errores los cuales deben ser validados a través de datos observados de pluviómetros para su utilización (Joyce, Janowiak, Arkin y Xie, 2004; Aghakouchak, Nasrollahi y Habib, 2009), o analizar como variables de entrada a los modelos hidrológicos (Quiroz, Collischonn y Lavado, 2011).

Las aplicaciones realizadas usando la lluvia estimada por satélite como datos de entrada a modelos hidrológicos, podemos mencionar los estudios realizados por Collischonn, Collischonn y Tucci (2008) donde realizaron una modelización hidrológica en la cuenca amazónica, utilizaron estimaciones de precipitación TRMM; Nóbrega, Souza y Souza (2008) analizaron los datos de satélite TRMM en un modelo hidrológico semi distribuido en la cuenca del río Jamari; Lavado, Labat, Guyot, Ronchail y Ordoñez (2009) validaron la lluvia utilizando TRMM en dos cuencas amazónicas peruanas y aplicaron en modelos mensuales de balance hídrico; Dinku, Connor y Ceccato (2010) realizaron una comparación sobre regiones montañosas de África y América del Sur; Quiroz et al. (2011) realizaron la modelización hidrológica usando estimaciones de lluvia por satélite en la cuenca del río Huallaga, Perú; Almazroui (2011) realizó una calibración de la lluvia estimada por el TRMM en Arabia Saudita; Su, Hong y

Lettenmaier (2008) evaluaron las lluvias TRMM y utilizaron las salidas como datos de entrada para la predicción hidrológica en la cuenca de la Plata entre otros.

Estudios recientes como los de Kizza, Westerberg, Rodhe y Ntale (2012); Li, Zhang y Xu (2012); Li, Zhang y Xu (2014); Ouma, Owiti, Kiporir, Kibiyi y Teteishi (2012); Mantas, Liu, Caro y Pereira (2015) concluyeron que las estimaciones de precipitación provenientes del TRMM constituyen una alternativa aceptable y que estas puedan ser incluidas en modelos hidrológicos, para áreas donde no se dispone de una adecuada distribución espacial de estaciones meteorológicas.

El objetivo del presente estudio fue validar las precipitaciones estimadas por el algoritmo 3B43 del TRMM con datos pluviométricos en la cuenca del río Ramis y su aplicación en la modelación hidrológica, los cuales pueden ser utilizados como una alternativa en cuencas poco instrumentadas, fortaleciendo en parte la gestión de recursos hídricos en las cuencas hidrográficas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La cuenca del río Ramis, se encuentra ubicada dentro de la región hidrográfica del Titicaca, entre las coordenadas UTM (WGS84, zona 19 sur); Este: 453,876 m – 271,772 m, Norte: 8' 104,442 m – 8' 447,692 m y altitud comprendida entre los 3,820 a 5,750 m.s.n.m. El área hasta el punto de confluencia de la estación hidrológica es de 14,676.67 km² (Fig. 1). El límite hidrográfico se realizó mediante una aplicación automática de model builder (ArcGIS) y el uso de modelos digitales de elevación (DEM) obtenido de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

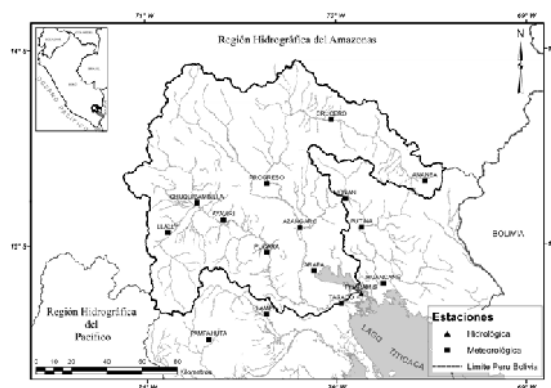


Fig. 1. Localización geográfica de la cuenca del río Ramis, al norte de la región hidrográfica del Titicaca del Perú, los cuadrados representan la ubicación espacial de las estaciones hidrometeorológicas.

Datos utilizados

Se utilizó información hidrometeorológica de 16 estaciones (Tabla 1) que corresponde a variables de precipitación total mensual y descargas medias mensuales del periodo enero 1998 a diciembre 2013 ubicadas en la zona de estudio y administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI - Perú). Las precipitaciones observadas fueron interpoladas mediante el método de Kriging utilizando para ello el Hydracress, sobre la región de estudio con la misma

resolución espacial (0.25°x0.25°) de las obtenidas por satélite TRMM.

La base histórica de precipitación estimada por el satélite TRMM corresponde al mismo periodo de la precipitación observada. La evapotranspiración de referencia (ET_o), se adquirió de la base de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI – Perú) en formato grid, el cual fue estimado mediante el método de Hargreaves modificado a nivel nacional.

Tabla 1. Características de ubicación de las estaciones hidrometeorológicas

N°	Estación	Este	Norte	Altitud	N°	Estación	Este	Norte	Altitud
		[m]	[m]	[msnm]			[m]	[m]	[msnm]
1	Ananea	442448	8377140	4653	9	Lampa	352861	8301728	3929
2	Arapa	379823	8326267	3892	10	Llaly	297126	8347800	4211
3	Ayaviri	328602	8355116	3921	11	Muñani	397530	8367203	3923
4	Azangaro	371897	8350772	3840	12	Progreso	352946	8375575	3952
5	Pampahuta	320200	8287459	4292	13	Pucara	353035	8336523	3869
6	Lampa	352861	8301728	3929	14	Putina	406640	8350905	3853
7	Chuquibambilla	313519	8364727	3899	15	Taraco	395292	8307846	3817
8	Huancané	419032	8319216	3860	16	HLG Pte. Ramis	406368	8313374	3815

Modelo hidrológico GR2M

Se basa en la conceptualización del ciclo hidrológico, propuesto para reconstruir caudales a partir de la precipitación y evapotranspiración. En términos generales, el modelo GR2M es un modelo conceptual de dos depósitos o reservorios, el reservorio suelo que corresponde a la función de producción; y el reservorio de agua gravitacional, donde el aporte es instantáneo al inicio y después con el paso del tiempo se vacía gradualmente, el nivel de este reservorio determina el gasto que puede liberar (Mouelhi, Michel, Perrin y Andréassian, 2006). Su evaluación puede ser de manera cuantitativa y cualitativa, la primera consiste en determinar el valor óptimo de una función objetivo, el cual se realiza con técnicas de optimización, la función objetivo resume los resultados de comparación entre los valores observados y los valores calculados por el modelo. Por otra parte, la evaluación cualitativa se basa en la comparación gráfica entre los valores calculados y los valores observados una descripción más detallada se puede encontrar en Mouelhi et al. (2006).

Evaluación estadística

Eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE)

El criterio numérico utilizado para cuantificar los resultados fue propuesto por Nash y Sutcliffe (1970) como indicador adimensional de la bondad de ajuste el cual mide cuanto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Este indicador es ampliamente utilizado en la evaluación de modelos hidrológicos (McCuen, Knight y Cutter, 2006). La eficiencia de NSE (Ec. 1) Fue clasificado bajo los criterios de

muy bueno 0.90, bueno de 0.80 – 0.90, aceptable de 0.65 - 0.80 e insatisfactorio <0.65 según Ritter y Muñoz (2013).

Sesgo porcentual (BIAS)

Indica la tendencia promedio de los datos simulados de ser mayores o menores que los datos observados (Gupta, Sorooshian y Yapo, 1999). Un BIAS positivo implica que la tendencia del modelo es a simular valores a la izquierda de las observaciones, y viceversa cuando es negativo. Moriasi, Arnold, Van Liew, Bingner, Harmel y Veith (2007), menciona que el valor óptimo del BIAS es 0.0, con valores de baja magnitud que indican modelos de simulación precisa (Ec. 2).

Coefficiente de determinación (R²)

El coeficiente de determinación describe la proporción de la varianza en los datos observados que puede ser explicada por el modelo (Legates y McCabe, 1999). El R² fue clasificado bajo los criterios de muy bueno >0.95, bueno de 0.85 – 0.95, satisfactorio de 0.65 - 0.85 e insatisfactorio <0.65 (Andersen, Refsgaard y Jensen, 2001). Las expresiones matemáticas son:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \tag{1}$$

$$BIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)}{\sum_{i=1}^N y_i} \right] * 100 \tag{2}$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\left[\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (3)$$

donde, y_i es el valor observado, \hat{y}_i valor calculado y \bar{y} el promedio de los datos observados.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Validación de precipitaciones

Los valores obtenidos de precipitación total mensual de las estimaciones por satélite TRMM producto 3B43 considerados para el periodo enero 1998 a diciembre de 2013, indican un comportamiento similar al observado. El coeficiente de determinación espacial en la cuenca Ramis varía de 0.49 a 0.91 (Fig. 2), resultados similares fueron obtenidos por Lavado et al. (2009); Li et al. (2014); Mantas et al. (2015) al utilizar productos de satélite TRMM. Las estimaciones del algoritmo 3B43 del TRMM para la cuenca Ramis, muestran una baja calidad en la zona este de la cuenca donde se encuentran ubicadas las estaciones meteorológicas de Crucero y Ananea, teniendo una mejor representación en el resto de la cuenca Ramis. Las estimaciones del TRMM, replican de manera eficiente los valores observados de las estaciones Progreso, Chuquibambilla, Muñani, Pucara, Arapa, Ayaviri, Azángaro, Llallay, Lampa, Pampahuta, Huanané, Putina, Taraco y Muñani con indicadores estadísticos R^2 comprendidos entre 0.65 y 0.91, considerados como «satisfactorios» y «buenos» según la clasificación de Andersen et al. (2001) tal como se muestra en la (Fig. 2).

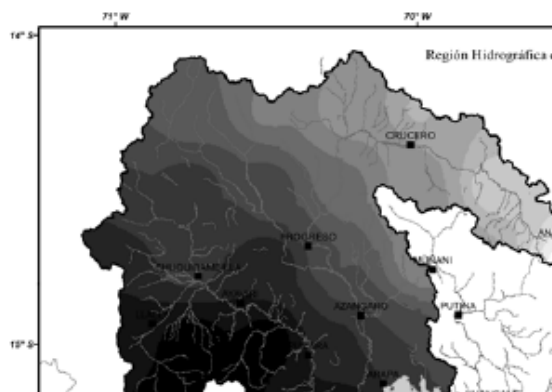


Fig. 2. Coeficiente de determinación (R^2) espacial entre valores observados y simulados

Así mismo los valores medios de precipitación de ambas bases, interpolados con el método de Kriging muestran un comportamiento similar a la estacionalidad de los valores observados (Fig. 3a) con un coeficiente de determinación igual a 0.86 representando un ajuste «bueno» (Fig. 3b), estos resultados de R^2 , son aceptados según los criterios establecidos por Andersen et al. (2001). Mantas et al. (2015) afirman que las regiones con mayores coeficientes de correlación y mejor Bias son generalmente aquellos con fuertes gradientes de precipitación estacional (temporada «húmedo» y «seco»), además indican que los datos del TRMM son especialmente útiles cuando se suman a las escalas de tiempo más largas (de 16 días a mensual). Así mismo Collischonn et al. (2008) encontraron resultados alentadores en su trabajo, concluyendo que las estimaciones del TRMM, todavía difieren de las mediciones puntuales, pero, cuando los datos son promediados sobre la cuenca, los resultados son muy similares a los obtenidos a partir de datos pluviométricos.

En la Fig. 3a se observa que los valores son sobrestimados en mayor parte de la serie histórica, tanto en lo que respecta meses de avenidas y estiaje, presentando poca frecuencia de subestimaciones en los periodos de avenidas como el 2004, 2005, 2007, 2009 y 2013, pero evaluando ambas bases históricas con el indicador estadístico BIAS, indica una sobrestimación de +21.7% para todo el periodo analizado, los cuales no son significativos y los valores estimados son «aceptables» según las discreciones de Mori et al. (2007) y Gupta et al. (1999).

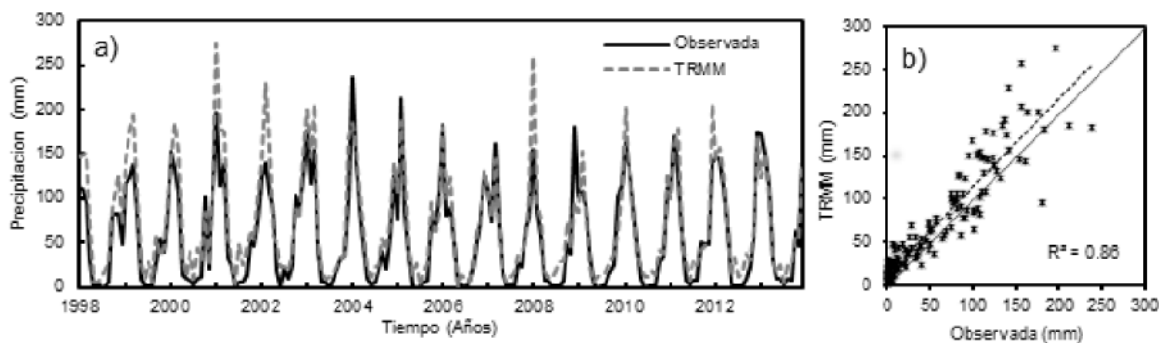


Fig. 3. a) Distribución temporal y b) diagrama de dispersión de precipitación areal mensual observada y estimada por el algoritmo TRMM 3B43 en la cuenca Ramis: periodo de análisis enero de 1998 a diciembre del 2013.

Aplicación de la precipitación estimada por satélite en la modelación hidrológica

Calibración y validación del modelo GR2M

Los resultados en la fase de calibración del modelo hidrológico utilizando datos observados de precipitación para la cuenca del río Ramis, muestran eficiencias de $NSE = 0.90$, mientras que los caudales simulados por la lluvia estimada de satélite TRMM al ser comparados estadísticamente con los caudales observados alcanzan una eficiencia de 0.78 (Tabla 1), para ambos casos según la referencia de Ritter y Muñoz (2013) son interpretados como ajuste «muy bueno» y «aceptable» respectivamente. Así mismo el indicador BIAS en esta fase, muestra subestimaciones de -0.30% y -10.7% para ambos casos, las subestimaciones no son significativas y las simulaciones según Moriasi et al. (2007), son precisas. Los hidrogramas comparativos entre caudales observados y simulados para la fase de calibración, se muestran en la Fig. 4.

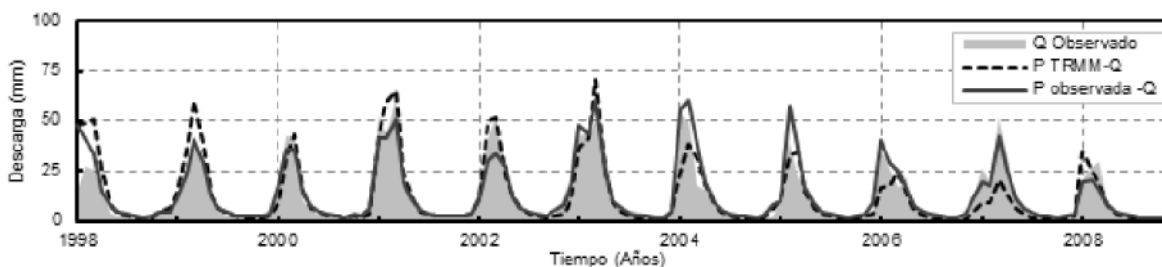


Fig. 4. Caudales medios mensuales observados y simulados – fase de calibración.

Para la etapa de validación de caudales medios mensuales del río Ramis con aplicación del modelo GR2M, utilizando datos de precipitación observada para el periodo enero 2009 a diciembre 2013, muestran como resultado una eficiencia de $NSE = 0.87$, mientras que al utilizar precipitaciones estimadas por satélite TRMM se obtiene un $NSE = 0.75$ (Tabla 1). Nash y Sutcliffe (1970) indican que no hay nada preciso en el sentido de este criterio debido a que los grados de libertad del modelo son desconocidos. Sin embargo, se puede afirmar que un criterio de menos de 0.60 o 60% no proporciona un resultado satisfactorio entre los hidrogramas observados y los simulados por el modelo (Niel, Paturel y Servat, 2003).

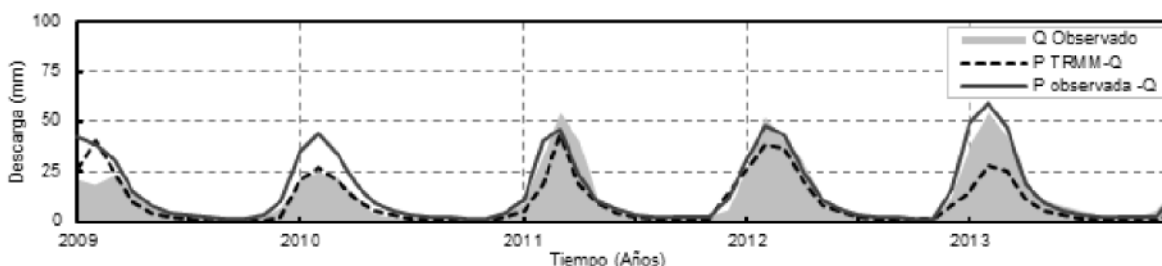


Fig. 5. Caudales medios mensuales observados y simulados – fase de validación. Las abreviaturas Q observado, P TRMM-Q y P observada-Q son caudales observados río Ramis, caudales simulados con precipitación obtenida por satélite TRMM y caudales simulados con precipitación observada respectivamente.

Los indicadores estadísticos de eficiencia NSE obtenidos en la fase de validación nos muestran resultados «buenos» y «aceptables» respectivamente. Así mismo el indicador BIAS en esta fase, muestra una sobrestimación de $+10.6\%$ en las simulaciones de caudales a partir de datos de precipitación observada y una subestimación de -30.1% en las simulaciones de caudales a partir de datos de precipitación obtenida por satélite TRMM, las simulaciones obtenidas son resultados «buenos» y «satisfactorios» según las discreciones de Gupta et al. (1999). La comparación gráfica de hidrogramas observados y simulados para la fase de validación, se muestran en las Fig. 5.

Tabla 1. Indicadores estadísticos de Nash y Sutcliffe (NSE), sesgo porcentual (BIAS), calibración 70% del total de datos (enero 1998-diciembre 2008), validación 30% del total de datos (enero 2009- diciembre 2013).

Precipitación	Indicador estadístico	Observado		TRMM	
		Calibración	Validación	Calibración	Validación
Observado	NS	0.90	0.87	0.78	0.75
TRMM	BIAS (%)	-0.30	10.6	-10.7	-30.1

CONCLUSIONES

Las precipitaciones estimadas por el algoritmo 3B43 del TRMM para la zona evaluada, muestran una eficiencia buena, afirmando que reproducen con cierta precisión el patrón del ciclo estacional considerándose datos fiables, los cuales pueden ser utilizados como datos de entrada en modelos hidrológicos en zonas sin información, constituyendo como una alternativa en el fortalecimiento de la gestión de recursos hídricos en cuencas hidrográficas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer muy especialmente al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) que facilitaron la información hidrometeorológica, para la realización del presente trabajo de investigación.

BIBLIOGRAFIA

- Aghakouchak, A., Nasrollahi, N., y Habib, E. (2009). Accounting for uncertainties of the TRMM satellite estimates. *Remote Sensing*, 1(3), 606-619.
- Almazroui, M. (2011). Calibration of TRMM rainfall climatology over Saudi Arabia during 1998–2009. *Atmospheric Research*, 99, 400-4014.
- Andersen, J., Refsgaard, J., y Jensen, K.H. (2001). Distributed hydrological modelling of the Senegal River basin—model construction and validation. *Journal Hydrological*, 247, 200–214.
- Collischonn, B., Collischonn, W., y Tucci, C.E. (2008). Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology*, 360, 207-216.
- Dinku T., Connor, S., y Ceccato, P. (2010). Comparison of CMORPH and TRMM-3B42 over mountainous regions of Africa and South America. *Satellite for Surface Hydrology*, 193-204.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S. y Yapo, P. O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135-143.
- Huffman, G.J., y Bolvin, D.T. (2014). TRMM and Other Data Precipitation Data Set Documentation. Laboratory for Atmospheres, NASA Goddard Space Flight Center and Science Systems and Applications. Recuperado de: ftp://precip.gsfc.nasa.gov/pub/trmmdocs/3B42_3B43_doc.pdf
- Huffman, G. J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Gu, G., Nelkin, E.J., Bowman, K.P., Hong, Y., Stocker, E.F., y Wolff, D.B. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8, 38-55.
- Joyce, R.J., Janowiak, J.E., Arkin, P.A. y Xie, P. (2004). CMORPH: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 5 (3), 487-503.
- Kizza, M., Westerberg, I., Rodhe, A., y Ntale, H. L. (2012). Estimating areal rainfall over lake Victoria and its basin using ground-based and satellite data. *Journal of Hydrology*, 464, 401-411.
- Lavado, W. S., Labat, D., Guyot, J.L., Ronchail, J. y Ordoñez, J. J. (2009). Validación de lluvia utilizando TRMM en dos cuencas amazónicas peruanas y su aplicación en modelos mensuales de balance hídrico. *Revista Peruana Geo-atmosférica*, 1, 11-19.
- Legates, D. R., y McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of goodness-of-fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233–241.
- Li, X. H., Zhang, Q., y Xu, C. Y. (2012). Suitability of the TRMM satellite rainfalls in driving a distributed hydrological model for water balance computations in the Xinjiang catchment, Poyang lake basin. *Journal of Hydrology*, 426-427, 28-38.
- Li, X., Zhang, Q., y Xu, C., 2014. Assessing the performance of satellite-based precipitation products and its dependence on topography over Poyang Lake basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 115, 713–729.
- Mantas, V. M., Liu, Z., Caro, C., y Pereira, A.J.S.C. (2015). Validation of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) products in the Peruvian Andes. *Atmospheric Research*, 163, 132-145.
- McCuen, R.H., Knight, Z. y Cutter, A.G. (2006). Evaluation of the Nash Sutcliffe Efficiency Index. *Journal Hydrology Engineering*, 11, 597-602.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., y Veith, T.L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed

- Simulation. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Moudhi, S., C. Michel, C. Perrin, y Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318, 200-214.
- Nash, J.E. y Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Niel, H., Paturel, J. E. y Servat, E. (2003). Study of parameter stability of a lumped hydrologic model in a context of climatic variability. *Journal of Hydrology*, 278, 213-230
- Nóbrega, R.S., Souza, E. P. y Souza F.A.S. (2008). Análise da utilização de dados do satélite TRMM em modelo hidrológico Semi distribuído na bacia do rio Jamari. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 1(1), 47-61.
- Organización Meteorológica Mundial (2011). Guía de prácticas hidrológicas, gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas. Volumen II.
- Ouma, Y. O., Owiti, T., Kiporir, E., Kibiy, J., y Tateishi R. (2012). Multitemporal comparative analysis of TRMM-3B42 satellite-estimated rainfall with surface gauge data at basin scales: daily, decadal and monthly evaluations. *International Journal of Remote Sensing*, 33(24), 7662-7684.
- Ritter, A., y Muñoz, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480, 33-45.
- Su, F., Hong, Y., y Lettenmaier, D. P. (2008). Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and its Utility in Hydrologic Prediction in the La Plata Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 9, 622-640.
- Quiroz, K.J., Collischonn, W. y Lavado W.S. (2011). Modelización hidrológica usando estimaciones de lluvia por satélite en la cuenca del río Hualлага, Perú. *Revista Peruana Geomatemática*, 3, 51-62.

