

DOI: 10.24850/j-tyca-15-5-2

Artículos

Estimación de lluvias extremas mediante un enfoque de análisis regional y datos satelitales: Cusco – Perú
Estimation of extreme rainfall through a regional analysis and satellite data approach: Cusco - Perú

Luis Aragón¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9014-5515>

Waldo Lavado-Casimiro², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0051-0743>

Cristian Montesinos³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3922-6632>

Ricardo Zubieta⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4315-7695>

Wilber Laqui⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6236-8773>

¹Universidad Nacional Agraria de La Molina, Lima, Perú,
laragong70@gmail.com

²Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI),
Lima, Perú, waldo.lavado@gmail.com

³Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI),
Lima, Perú, cristianmontesinos07@gmail.com

⁴Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrósfera, Instituto Geofísico del Perú (IGP), Lima, Perú, rzubieta@igp.gob.pe



⁵Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, Puno, Perú, wlaqui@unap.edu.pe

Autor para correspondencia: Luis Aragón, laragong70@gmail.com

Resumen

La frecuencia y magnitud de los eventos climáticos extremos de precipitación han aumentado significativamente en varios países del mundo, incluido Perú. Estos hechos causan pérdidas económicas y humanas, especialmente en países en vías de desarrollo. La información y metodologías que permitan prevenir o diseñar estrategias para afrontarlas son escasas o inexistentes. El objetivo de esta investigación fue analizar la capacidad del producto satelital IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals) del satélite GPM (Global Precipitation Measurement) y datos observados a partir de estaciones meteorológicas mediante un enfoque mixto para estimar la distribución de lluvias extremas en la región del Cusco ubicado al sur del Perú. Este enfoque mixto aprovechó las ventajas que ofrecen ambas fuentes de información como es la solidez de los datos observados a lo largo de varios años y la resolución temporal horaria del producto satelital. La metodología se basó en una curva de crecimiento de cada región homogénea, factor de corrección y parámetros que estiman la función intensidad y duración para toda la región Cusco. Los resultados se evaluaron mediante validación cruzada entre los valores de precipitación diaria obtenidos del producto IMERG, enfoque mixto y precipitación observada para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100,



200, 500 y 1 000 años. Los resultados sugieren que la combinación de datos observados de lluvia y del satélite IMERG puede ser una alternativa para estimar lluvias extremas en la región Cusco.

Palabras clave: Precipitaciones máximas, regiones homogéneas, GPM-IMERG VO6, Índice de avenida, OMM, curvas IDF.

Abstract

The frequency and magnitude of extreme climatic precipitation events have increased significantly in several countries of the world, including Peru. These events cause economic and human losses, especially in developing countries. Information and methodologies to prevent or design strategies to deal with them are scarce or non-existent. The aim of this research was to analyze the capacity of the IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals) satellite product of the GPM (Global Precipitation Measurement) and observed data from meteorological stations using a mixed approach to estimate the distribution of extreme rainfall in Cusco region located in southern Perú. This mixed approach took advantage of both sources of information, such as the strength of the data observed over many years and hourly temporal resolution of the satellite product. The methodology was based on a growth curve for each homogeneous region, correction factor and parameters that estimate the intensity and duration function for the entire Cusco region. The results were evaluated by cross-validation between daily precipitation values obtained from the IMERG product, mixed approach and observed precipitation for return periods of 10, 20, 100, 500 and 1 000 years. The results suggest that the



combination of observed and rainfall data from the IMERG satellite may be an alternative to estimate extreme rainfall in the Cusco region.

Keywords: Maximum rainfall, homogeneous regions, GPM-IMERG V06, index flood, WMO, IDF curves.

Recibido: 20/10/2022

Aceptado: 25/03/2023

1. Introducción

Las proyecciones climáticas indican que los eventos de precipitaciones extremas serán más intensos y frecuentes en varios lugares del mundo, incluyendo Sudamérica y Perú (IPCC, 2015; UNESCO, 2020; MINAM, 2016). En un informe conjunto entre la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres y el Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres (CRED, 2018) se manifiesta que se registró a nivel global 3 148 desastres naturales por inundaciones entre los años 1998 y 2017. Las inundaciones fueron el desastre natural más común, representando el 43% de todos los registros. Las inundaciones también están aumentando en frecuencia e intensidad, y se espera que continúen aumentando debido al cambio climático (UNESCO, 2015).



Las precipitaciones extremas en el Perú causaron pérdidas humanas y económicas en los últimos años debido a las inundaciones repentinas y la presencia de flujos de detritos (“huaycos” como se denomina en Perú) en todo el país, siendo Cusco la región con mayor presencia de eventos de huaycos, cuyo detonante suele ser las precipitaciones intensas (SENAMHI, 2019). Algunos de estos impactos están relacionados con la fase positiva de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) en el océano Pacífico (Lavado y Espinoza, 2014). Sin embargo, las precipitaciones extremas en el Perú están también relacionadas al rol que ejerce el océano Atlántico (Espinoza et al., 2009). Por ejemplo, se describe inundaciones extremas presentadas en enero-febrero de 2010 desencadenadas por precipitaciones extremas en la cuenca del río Vilcanota, en la región Cusco al sur de los Andes peruanos (Lavado et al., 2012).

Entre los años 2003 al 2009, las emergencias registradas en el territorio peruano ante la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa como deslizamientos y derrumbes a causa de eventos hidrometeorológicos extremos, alcanzaron 1 391 emergencias y 187 000 personas afectadas, 16 000 personas damnificadas, 4 000 viviendas afectadas y más de 3 000 viviendas destruidas (INDECI, 2012). Se estima que el 40% del territorio de las regiones Cajamarca, Cusco y Huancavelica ubicadas en los Andes Peruanos tendrían muy alta susceptibilidad a movimientos de remoción en masa a raíz de eventos hidrometeorológicos extremos (MINAM, 2015; Villacorta y Fidel, 2012; INGEMMET, 2010).

Para prevenir eventos de inundación, una herramienta útil es la estimación de caudales de los ríos mediante modelación hidrológica de cuencas; no obstante, la escasez de datos de lluvia representa un



problema. Además, si los datos requeridos son a nivel horario la complejidad de obtenerlos aumenta, porque se requiere de la capacidad de reconocer la distribución espacial y temporal de datos de precipitación (Espinosa et al., 2020). En general, los datos obtenidos a partir de un pluviógrafo se consideran ideales para el análisis de precipitaciones extremas, pero debido a su cobertura espacial y tiempo de registro limitado, la regionalización puede resultar errónea especialmente en los Andes peruanos (Llauca et al., 2021), debido al rol que ejerce los Andes sobre la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones (Espinoza et al., 2009). El enfoque tradicional del análisis de frecuencia de eventos extremos se basa exclusivamente en el uso de información local y tiene como inconveniente la escasez de series de registros históricos, así como la incertidumbre asociada a la calidad (Fernández y Lavado, 2017). De acuerdo a Hosking y Wallis (1997) la escasez de datos en el tiempo se puede atenuar con su abundancia en el espacio.

La simulación de caudales diarios a partir de modelos de lluvia-escorrentamiento es a menudo insatisfactoria debido a que la variabilidad espacial de la lluvia está pobremente representada en regiones donde los datos son escasos y la topografía compleja, este es el caso de la región Andino amazónica (Collischonn et al., 2008; Zubieta et al., 2017). Una fuente alternativa de datos diarios ante estos inconvenientes, es el uso de lluvia estimada por sensores remotos (SENAMHI, 2016). De hecho, el uso de datos de precipitaciones sub diaria puede ser potencialmente útil para simular caudales en cuencas andinas, donde los episodios cortos de lluvia convectiva son más relevantes para la variabilidad hidrológica (Zubieta et al., 2019).



En este contexto y con fines de prevención, la estimación de eventos de precipitación extrema máximas en 24 horas (magnitud y frecuencia) resultan de importancia. Por ejemplo, es útil para el diseño de estructuras hidráulicas, zonificación de inundaciones y estimación económica de proyectos de protección contra inundaciones (Ngongondo et al., 2011; Noto y La Loggia, 2009). Por lo tanto, el interés suele centrarse en eventos extremos con períodos de retorno (T) mayores a 25 años, debido a sus riesgos asociados. Para estimar T , el enfoque probabilístico mediante el ajuste a una distribución de función de densidad de probabilidad (FDP) es el más utilizado.

Recientemente, se documenta con mayor frecuencia el uso del Análisis Regional de Frecuencia basado en los L-momentos (ARF-LM) para precipitaciones extremas (Cassalho et al., 2017; Malekinezhad y Zare-Garizi, 2014; Ngongondo et al., 2011; Yang et al., 2010). El ARF-LM intercambia espacio por tiempo, proporciona un marco para la caracterización de la distribución de frecuencia de la precipitación máxima y puede proporcionar estimaciones más precisas de cuantiles de lluvia. Por lo tanto, se usa el índice de avenida como una cantidad representativa de análisis de frecuencia regional (Hosking y Wallis, 1997).

El análisis regional de frecuencia es usado en lugares donde existe poca o ninguna información, varias técnicas de estimación regional fueron propuestas y aplicadas en distintas partes del mundo, sin embargo, existe consenso en que el análisis regional de frecuencia es confiable (Smith, 1989; Bradley, 1998; Viglione et al., 2007; Malekinezhad et al., 2014).

Con respecto al uso de información de precipitación provenientes de productos satelitales, las primeras experiencias en investigación indican



un mejor rendimiento del producto IMERG del satélite GPM en comparación con otros productos (Llauca et al., 2021; Salas et al., 2020; Lavado et al., 2020). Sin embargo, los rendimientos varían sustancialmente entre diferentes condiciones topográficas y climáticas, especialmente en regiones dominadas por cambios en la orografía (Asurza et al., 2018). Además, existe aún incertidumbre acerca de la utilidad del satélite GPM-IMERG para la adecuada estimación de datos de lluvia sobre zonas andinas en regiones tropicales debido al rol que ejerce la topografía en la distribución espacial y temporal de la lluvia en los Andes (Manz et al., 2017; Zubieta et al., 2017)

El año 2019, GPM actualizó sus algoritmos de datos para calibrar e incorporar los datos de la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM) en su registro de datos (Huffman et al., 2020). TRMM fue un satélite en funcionamiento desde 1997 hasta 2015 cuyos datos fueron evaluados mediante investigación (Mahavik y Tantanee, 2021). El algoritmo IMERG fusiona datos de las misiones TRMM y GPM, lo que brinda a los meteorólogos e investigadores acceso a un registro de precipitación de 20 años, desde el 1 de junio de 2000 hasta la actualidad (Tan et al., 2019).

Evaluaciones de la calidad de la información de precipitación provenientes de productos satelitales realizadas en la zona central de los Estados Unidos de América, muestran que los datos del producto IMERG Final Run están cerca de representar los valores observados en tierra, mientras que las estimaciones de los productos IMERG Early Run y el WRF (Weather Research and Forecasting) presentan valores sesgados (Zhang et al., 2018). En China, en términos de precipitación diaria varias investigaciones demostraron que el producto IMERG V05 generalmente



representa mejor las estimaciones de precipitación diaria con respecto a los productos TMPA-3B42V7 (Multi-satellite Precipitation Analysis) y TRMM (Yuan et al., 2019). Similares conclusiones fueron obtenidas por Wang (2018) que obtuvo un 20% de mejora con relación a los mismos productos, en la misma región de análisis. Tang et al. (2020) y Peng et al. (2020) encontraron que el producto IMERG V06 superó tanto estadística como hidrológicamente a productos satelitales como CMORPH (Climate Prediction Center Morphing Method), TMPA-3B42V7, CDR (PERSIANN-Climate Data Record), y al producto CHIRPS (Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations). Otros estudios como los realizados por Khodadoust et al. (2017) muestra similares resultados al comparar el producto IMERG con el producto TRMM en Irán, incluso recomiendan el producto IMERG para su aplicación en países en los cuales se carece de una adecuada instrumentación pluviométrica.

En la modelación hidrológica de la cuenca del Amazonas en los países de Perú y Ecuador se utilizó información de precipitación del producto GPM-IMERG V03D Final Run, encontrando que para la cuenca del Ucayali dentro del cual se encuentra la región Cusco y cuenca del Vilcanota motivo de la aplicación de este estudio, tanto el producto IMERG como el producto TMPA V7 y TMPA RT representan adecuadamente los caudales observados (Zubieta et al., 2017).

Para proceder a utilizar los datos de productos satelitales es necesario evaluarlos previamente con respecto a datos de pluviómetros (Moazami y Najafi, 2021). Así, pueden ser usados como entrada a modelos hidrológicos para finalmente evaluar su desempeño en la representación de caudales. Asurza et al. (2018) al usar el producto IMERG para la



modelación del río Huancané en Puno - Perú, encontró valores del coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe de 0,90 y sesgo de -30,1%. Asimismo, en la cuenca del río Vilcanota en Cusco - Perú. Llauca et al. (2021) utilizó el producto satelital IMERG Early Run (debido a que IMERG demostró tener la mejor capacidad para representar el ciclo de precipitación diaria por encima de 15 mm/día) para la modelación hidrológica con GR4H (Génie Rural à 4 paramètres Horaires) con resultados alentadores con respecto a productos como GSMaP-NRT (Global Satellite Mapping of Precipitation Near Real Time), CMORPH y HE (HydroEstimator) dado que presentó el menor sesgo en precipitación horaria en el periodo de lluvias (noviembre a marzo).

Esta investigación tiene como objetivo proponer una metodología con enfoque mixto, el cual aprovecha la información de las estaciones meteorológicas y datos obtenidos por satélite para la caracterización de lluvias extremas en la región Cusco - Perú. La metodología propone complementar las series de precipitación observadas con datos obtenidos a partir del satélite, la cual presenta registros de periodos de corta duración, pero con buena cobertura espacial. De esta forma se construyen curvas Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF) para toda la región Cusco, incluso en lugares donde no existen estaciones meteorológicas.

2. Área de estudio

La región de Cusco está ubicada en la parte sur oriental del Perú, en las coordenadas $-13^{\circ}31'21.5''$ y $-71^{\circ}58.04'$. Presenta una extensión aproximada de 71 986 km², con elevaciones que van desde 254 a 6 268 msnm.

Limita al norte con las selvas de Junín y Ucayali, al oeste con la selva de Ayacucho y la sierra de Apurímac, al sur con las zonas altas de Arequipa y Puno y al este con el gran llano amazónico de Madre de Dios (Figura 1). La temperatura máxima en la región Cusco varía de 8 a 12 °C sobre las zonas más altas de la cordillera, típicos del clima frío semiseco, principalmente en la parte centro y sur de la región Cusco, hasta máximos que varían de 24 a 32 °C, sobre la región de selva alta y baja ubicada en la parte norte de la región Cusco, la cual se caracteriza por un clima cálido húmedo a muy húmedo. La precipitación media anual varía de 200 mm en zonas de alta montaña a 5 000 mm en zonas amazónicas (PACC y SENAMHI, 2012).

El departamento de Cusco presenta las regiones de sierra y selva que en su transición varían a valles interandinos y montañas de modo que a mayor altitud se caracteriza por presentar lluvia y frío con humedad, así como clima glaciario, con hielo perenne y temperaturas muy bajas (sur del Cusco). Mientras que a menor altitud (noreste del Cusco) se caracteriza por zonas con caracteres climáticos que van desde el templado hasta semi cálido, con precipitaciones y humedad en la estación de verano,



resultando ser los más altos del Perú (SENAMHI, 2021). La región particularmente está influenciada por anomalías interanuales de El Niño con un mayor transporte de humedad hacia el oriente durante El Niño y con regímenes mejorados de flujo seco del occidente durante La Niña (Bergmann et al., 2021; Perry et al., 2014; Lavado y Espinoza, 2014).

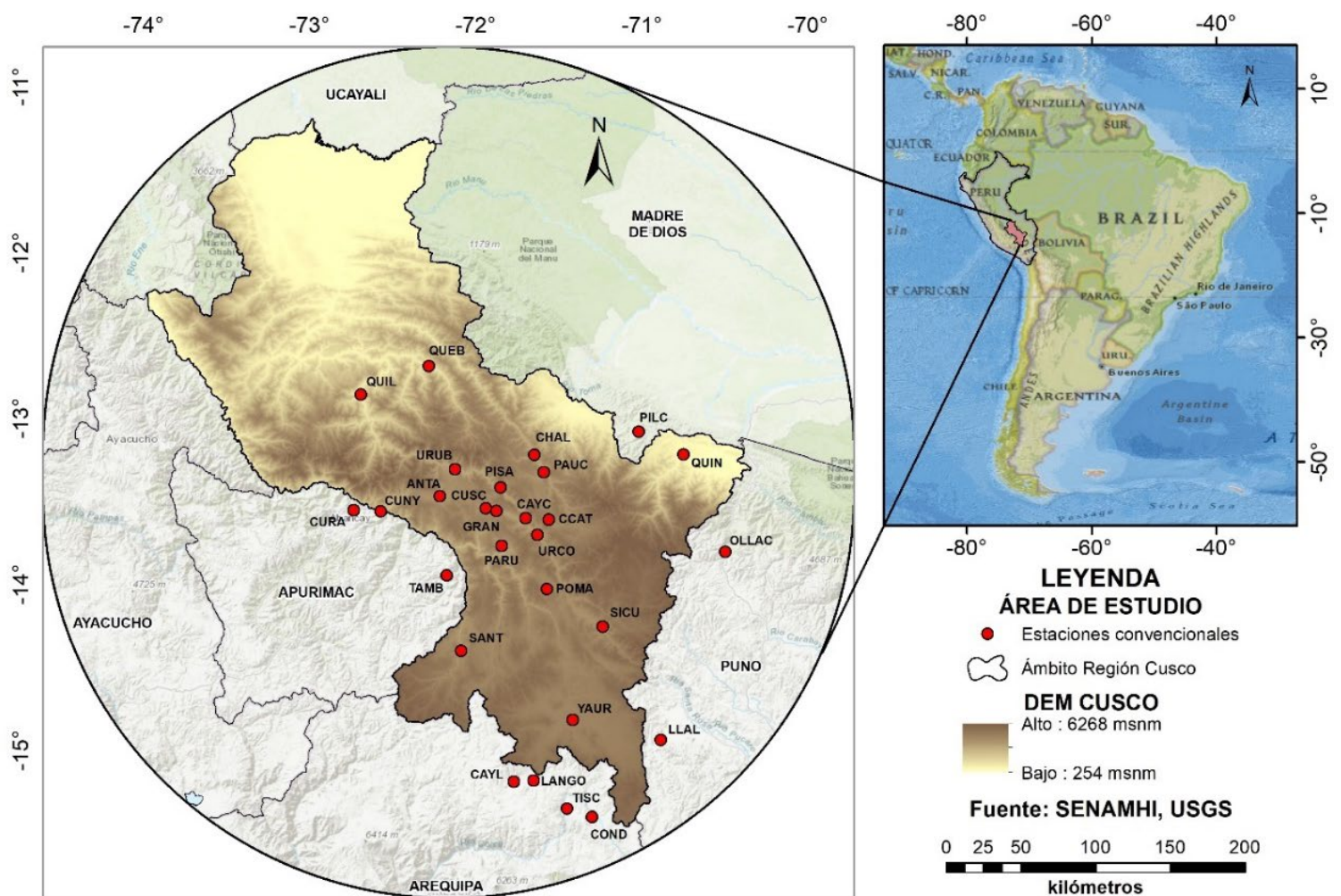


Figura 1. Ámbito Región Cusco y estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis regional de frecuencias.

3. Materiales y métodos

3.1 Datos utilizados

El conjunto de datos recopilado consiste en las Precipitaciones Diarias Máximas Anuales (PDMA), provenientes de 29 estaciones meteorológicas, distribuidas dentro y cercanas a la región Cusco (Tabla 1). Estaciones que son gestionadas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Algunas series de datos observados provistas a partir de las estaciones presentaron falta de datos, debido a periodos no operativos. Estos registros fueron sometidos a control de calidad, homogeneización y complementación de datos faltantes mediante el uso del paquete desarrollado en el software R denominado CLIMATOL (Guijarro, 2019). De igual forma, se recopilaron datos en formato ráster del producto IMERG Final Run, del satélite GPM (Versión 06B) con resolución espacial de 0.1° para un periodo de registro comprendido entre los años 2000 al 2019, que combina todos los pasivos de microondas (PMW) e infrarrojos (IR) de los satélites de la constelación GPM. Este producto fue obtenido de la página web de la Administración Nacional de

Aeronáutica y el Espacio (NASA)
(https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGDF_06).

La razón principal para la adopción del conjunto de datos IMERG es que el GPM dispone de series de datos con resolución de hasta 30 minutos, particularmente adecuado para el cálculo de curvas de intensidad, duración y frecuencia (Venkatesh et al., 2022).

IMERG presenta tres productos el "Early" (4 horas después de la lectura), "Late" (14 horas después de la lectura) y "Final Run" que es el resultado de un procesamiento de 3.5 meses después de la lectura y calibrada con información observada en tierra (Tan et al., 2019). Este producto es recomendado para investigaciones dado que provee estimaciones más confiables (Huffman et al., 2019; Moazami y Najafi, 2021) y fue el utilizado en esta investigación.

Tabla 1. Valores de altitud y precipitación máxima anual en las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio

Nro.	Estación	Altitud (msnm)	Precipitación (mm)	Nro.	Estación	Altitud (msnm)	Precipitación (mm)
1	Abancay	2 776	29.5	16	Tisco	4 195	46.3
2	Curahuasi	2 741	43.6	17	Yauri	3 927	35.3
3	Quebrada Yanatile	1 183	79.1	18	Anta Ancachuro	3 324	38.9
4	Quillabamba	1 001	59.9	19	Cay Cay	3 117	40.6
5	Ollachea	3 420	81.9	20	Ccatcca	3 681	48.8
6	Pilcopata	900	114.3	21	Challabamba	2 803	48.6
7	Quincemil	651	179.2	22	Cusco	3 288	33.9
8	Caylloma	4 327	34.7	23	Granja Kayra	3 214	39.1
9	Condoroma	4 287	31.4	24	Paruro	3 070	41.7
10	La Angostura	4 150	47.3	25	Paucartambo	2 905	54.2
11	Llally	3 985	32.9	26	Pisac	2 990	35.2
12	Pomacanchi	3 690	41.4	27	Tambobamba	3 279	41.9
13	Santa Rosa	3 957	45.3	28	Urcos	3 666	25.0
14	Santo Tomas	3 671	40.1	29	Urubamba	2 850	41.2
15	Sicuaní	3 534	39.4				

3.2 Metodología

Los datos diarios obtenidos del IMERG fueron sometidos a pruebas de identificación de datos atípicos de Grubbs (Barbato et al., 2011). En la mayoría de las estaciones se encontraron datos atípicos, especialmente en los años 2017, 2018 y 2019 que mostraron valores altos (sobre estimación) y en el año 2007 mostraron valores bajos. Esta práctica mejoró sustancialmente la calidad de la información (Figura 2). Esta sobre estimación también fue observada por Zubieta et al. (2017).

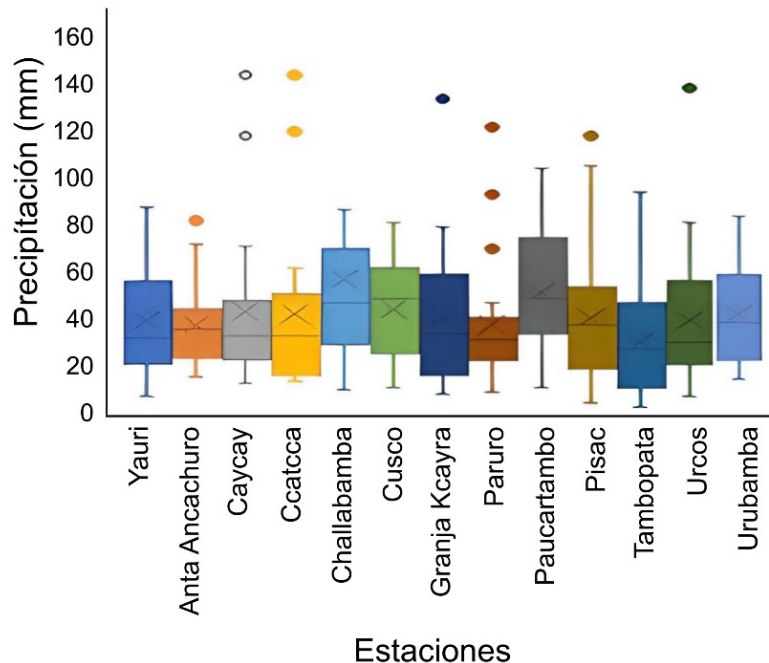


Figura 2. Identificación de valores atípicos en los datos provenientes del producto IMERG

En la Figura 3, se detalla la metodología seguida del enfoque mixto: 1) Con base en la información de precipitación observada se efectuó el Análisis Regional de Frecuencia, donde se definen regiones homogéneas para finalmente construir las curvas de crecimiento por región homogénea; y 2) Recopilación de eventos máximos de lluvia horaria del producto satelital IMERG con el objetivo de obtener los coeficientes de lluvia horaria “ a ” e invarianza de escala “ n ”, mediante la solución de la ecuación 2. Además, se realiza una regresión lineal entre información de precipitación diaria observada y datos IMERG para obtener el factor M_c .

La estimación del factor M_c y el cálculo de los parámetros a y n , fueron efectuados para cada estación meteorológica; sin embargo, el factor de crecimiento se estimó por región homogénea tal como lo plantea Qamar et al. (2017)

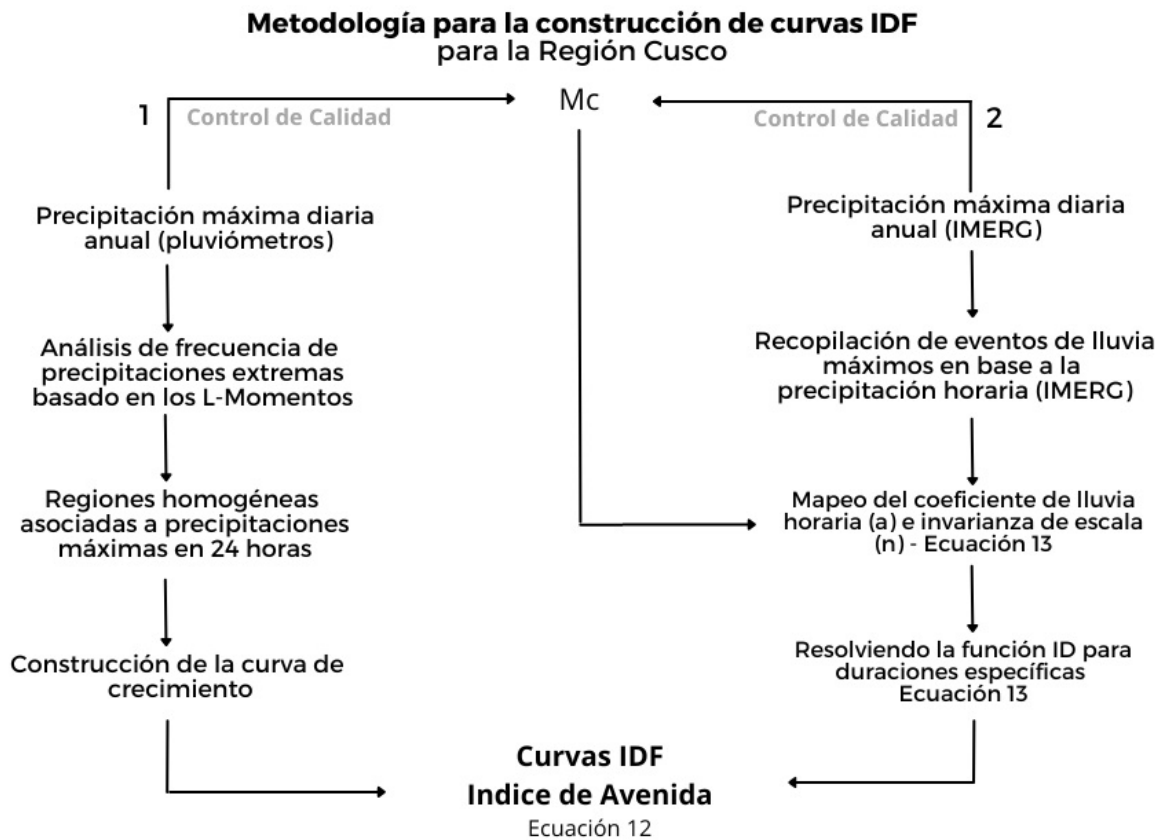


Figura 3. Metodología con enfoque mixto adoptada para la construcción de curvas IDF, Mc =Factor de corrección

Función Intensidad Duración

Se adoptó la propuesta basada en el concepto de índice de avenida, enfoque regional utilizado en diferentes investigaciones (Dalrymple,



1960; Smith, 1989; Awadallah, 2015; Qamar et al., 2017). Con base en este enfoque la precipitación viene dada por:

$$h(d, T) = \bar{h}(d) \cdot K(T) \quad (1)$$

Donde: $\bar{h}(d)$ es el valor medio de la distribución y que depende solo de la duración del evento, mientras que $K(T)$ es el factor de crecimiento y representa el factor de incremento, resultado de la búsqueda de eventos atípicos para un determinado período de retorno (T). Los valores de T utilizados en este análisis varían entre 2 y 1 000 años. El valor medio de la lluvia $\bar{h}(d)$, también llamada función ID, se puede expresar como una función de la duración d (en horas) del evento extrayendo los parámetros a y n (WMO, 1983; OMM, 1994; Qamar et al., 2017)

$$\bar{h}(d) = ad^n \quad (2)$$

Donde a es el coeficiente de duración de la lluvia que define la profundidad media de la lluvia en un intervalo de tiempo igual a una hora; y " n " Es el exponente de la invariancia de escala que gobierna la forma de la curva y el grado en que depende de la duración de la precipitación. Esta forma de curva suele ser adecuada para las curvas ID horarias y diarias, mientras que no es adecuada para los extremos sub horarios.

De acuerdo a la metodología propuesta por Qamar et al. (2017) para obtener la función Intensidad Duración (ID) se debe aprovechar la información satelital ya sea de resolución diaria, así como horaria, los cuales fueron posibles en esta investigación dado que se utilizó la información ofrecida por el producto satelital IMERG V06 (Huffman et al., 2019; Moazami y Najafi, 2021)

Para realizar el proceso de corrección de los datos satelitales del producto IMERG con respecto a los datos observados, se acumularon los datos del pluviómetro y satelitales disponibles a paso diario en intervalos de 1, 2, 3 y 7 días y se ajustaron mediante una regresión lineal. Para obtener el valor del factor de corrección o factor de sesgo M_c que son utilizados en la corrección de datos satelitales (Hunink et al., 2014).

Luego se estimaron los factores de corrección para las 29 estaciones, obteniendo valores que varían desde 0.61 para la estación de Urubamba y de 1.1 para la estación de Tambobamba. Estos valores de M_c son utilizados como un coeficiente multiplicativo para obtener los datos finalmente corregidos de precipitaciones máximas diarias anuales provenientes del satélite en cualquier punto requerido de la región Cusco. Los valores de M_c muestran que los datos del IMERG presentan valores superiores a los observados.

Finalmente, con el uso del paquete R y con base a la información descargada del IMERG de precipitaciones máximas con distinta duración se pudo seleccionar para cada estación los eventos de lluvia para efectuar las regresiones que conduzcan a la obtención de los parámetros a y n , que devienen de la linealización de la ecuación 2, resultando el espacio

$\log \bar{h}$ vs $\log d$ para duraciones de 3, 6, 9, 12 y 24 horas y así contar con las curvas de Intensidad y Duración (ID).

■ Análisis Regional de Frecuencia y Regiones homogéneas

Para identificar áreas con similar comportamiento hidrológico (regiones homogéneas) se siguió el procedimiento recomendado por Hosking y Wallis (1997) que consiste en un agrupamiento inicial y refinamiento manual de regiones, para dicho propósito se empleó predictores físicos estandarizados (altitud, latitud, longitud y precipitación media anual); posteriormente, se adaptó el método de agrupamiento jerárquico de Ward en consideración con las estadísticas de los L-momentos (Charrad et al., 2014). Finalmente, basado en el último agrupamiento se acondicionan las regiones considerando los estadísticos de discordancia (D_i) y heterogeneidad (H).

Los L-momentos introducidos por Hosking (1990) se utilizan ampliamente para ajustar funciones de distribución al análisis regional (Stedinger et al., 1993; Hosking y Wallis, 1997; Anctil et al., 2002; Yurekli, 2005). La linealidad de los L-momentos en comparación con los momentos convencionales tiene la ventaja de ser insensible a los valores extremos (Stedinger et al.; 1993; Sankarasubramanian y Srinivasan, 1999).



Los L-momentos son combinaciones lineales de Momentos Ponderados (MP) según la definición de Hosking (1990) y Landwehr et al. (1979), la cual resume la teoría de los momentos ponderados de la siguiente manera:

$$\beta_r = E\{X[F_x(x)]^r\} \quad (3)$$

Donde β_r es el i_{th} orden de los MP, $E\{X\}$ el valor esperado, $F_x(X)$ es la función de distribución acumulativa y "r" el valor r-ésimo. Hosking y Wallis (1997) definieron un estimador insesgado de una muestra MP designada (b_i), y obtuvieron un estimador insesgado de la muestra de los primeros cuatro L-momentos por el estimador de la muestra de MP. La muestra no sesgada estimada de MP para cualquier distribución se puede calcular a partir de Landwehr et al. (1979):

$$b_r = n^{-1} \sum_{j=1}^{n-r} \frac{\binom{n-j}{r}}{\binom{n-1}{r}} x_j \quad (4)$$

Donde (x_j) es un conjunto ordenado de observaciones como $x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \dots x_n$; donde n es el número de datos de muestra y "j" el valor j-ésimo. Para cualquier distribución, los primeros cuatro L-momentos se calculan fácilmente a partir de los MP:

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &= b_1 \\
 \lambda_2 &= 2b_2 - b_1 \\
 \lambda_3 &= 6b_3 - 6b_2 + b_1 \\
 \lambda_4 &= 20b_4 - 30b_3 + 12b_2 - b_1
 \end{aligned} \tag{5}$$

Donde λ_1 es la media de la distribución, λ_2 es la medida de escala, λ_3 medida de desviación y λ_4 medida de curtosis. Las relaciones de los L-momentos (L-Coeficiente de variación, L-Asimetría y L-Curtosis) se definen como sigue:

$$\begin{aligned}
 \tau_2 &= \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \\
 \tau_3 &= \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \\
 \tau_4 &= \lambda_4 / \lambda_2
 \end{aligned} \tag{6}$$

Para validar la homogeneidad de una región en términos de relaciones de L- momentos, se utilizó la prueba de discordancia propuesta por Hosking y Wallis (1993).

Sea $u_1 = [t^{(i)}, t_3^{(i)}, t_4^{(i)}]^T$, el vector que contiene los vectores t, t_3, t_4 en el sitio "i" donde el superíndice T denota transposición de un vector o matriz.

Sea $\bar{u} = N^{-1} \sum_{i=1}^N u_i$, el promedio regional no ponderado de los L-momentos para cada grupo, donde N es el tamaño de la muestra en cada grupo. La medida de discordancia para el sitio i se define entonces como:

$$D_i = \frac{1}{3}(u_i - \bar{u})^T S^{-1}(u_i - \bar{u}) \quad (7)$$

En la ecuación anterior, S^{-1} es la inversa de la matriz S , Donde: $S = (N - 1)^{-1} \sum_1^N (u_1 - \bar{u})(u_i - \bar{u})$. Hosking y Wallis (1997) propusieron el criterio de $D_i \geq 3$ (Ecuación 7) para excluir una estación de la región homogénea. La relación entre sitios se utiliza para identificar sitios coherentes con una distribución de frecuencia similar. La prueba de heterogeneidad H_i , compara las muestras de las relaciones de los L-momentos con los parámetros de distribución kappa. Mide la heterogeneidad entre sitios en la misma región. Hosking y Wallis (1997) Propusieron la siguiente estadística:

$$H_i = \frac{V_1 - \mu_v}{\sigma_v} \quad (8)$$

Donde: V y σ_v son la media y desviación estándar de los valores simulados de V_1 . Los V_1 se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$V_1 = \left\{ \sum_{i=1}^N n_i [t^i - \bar{t}]^2 / \sum_{i=1}^N n_i \right\}^{1/2} \quad (9)$$

Las simulaciones se llevan a cabo utilizando una distribución flexible con el promedio regional de las relaciones de los L-momentos 1, τ , τ_3 y τ_4 .

Siguiendo a Hosking y Wallis (1997) se usó la distribución kappa de cuatro parámetros con la función de cuantiles:

$$x(F) = \xi + \alpha\{1 - [(1 - F^h)/h]^k\}/k \quad (10)$$

Medidas de heterogeneidad como la estadística $H1$ han sido desarrolladas por Hosking y Wallis (1997) como un indicador del grado de heterogeneidad en los L-momentos para un grupo de sitios/estaciones. La estadística $H1$ mide la variabilidad relativa del coeficiente de variación (L-CV) observado a partir de la muestra, y es utilizada para analizar la heterogeneidad en cada una de las regiones homogéneas propuestas (Wallis et al., 2007)

Existen dos medidas adicionales de heterogeneidad, denominadas $H2$ y $H3$. Sin embargo, no se recomienda su uso debido a que se ha comprobado que presentan una notable falta de potencia estadística (Viglione et al., 2007). El fundamento teórico y procedimiento de cálculo de la medida de heterogeneidad $H1$ está ampliamente descrito por Hosking y Wallis (1986).

La región se considera «aceptablemente homogénea» si $H < 1$, «posiblemente heterogénea» si $1 \leq H \leq 2$, y «definitivamente heterogénea» si $H \geq 2$.

- ✓ $H1$: medida de homogeneidad en términos de L-CV
- ✓ $H2$: medida de homogeneidad en términos de L-CS
- ✓ $H3$: medida de homogeneidad en términos de L-CK

El estadístico $|Z^{DIST}|$, juzga qué tan bien la L-asimetría simulada y la L-curtosis de una distribución ajustada coinciden con el promedio regional de L-asimetría y L-curtosis que fueron obtenidos de valores de los datos observados (Hosking, 1990). El criterio de bondad de ajuste para cada distribución se define mediante el estadístico $|Z^{DIST}|$, en función de las distintas distribuciones candidatas.

$$Z^{DIST} = (\tau_4^{DIST} - \tau_4^R + B_4) / \sigma_4 \quad (11)$$

Con τ_4^R = valor promedio de τ_4 de los datos de la región B_4 , σ_4 = sesgo y desviación estándar de τ_4 , respectivamente y se definen de la siguiente manera:

$$B_4 = N_{sim}^{-1} = \sum_{m=1}^{N_{sim}} (\tau_4^{(m)} - \tau_4^R) \quad (12)$$

$$\sigma_4 = \left[(N_{sim} - 1)^{-1} \left\{ \sum_{m=1}^{N_{sim}} (\tau_4^{(m)} - \tau_4^R)^2 - N_{sim} B_4^2 \right\} \right]^{1/2} \quad (13)$$

Donde N_{sim} = número fijo de simulaciones de datos regionales generados utilizando una distribución Kappa (Hosking, 1990) $m=mth$ región simulada obtenida utilizando una distribución Kappa. El ajuste se considera adecuado si $|Z^{DIST}|$, está lo suficiente cerca de cero. Si $|Z^{DIST}| \leq 1.64$; El ajuste es razonable. Si es aceptable más de una distribución

candidata, la que tenga el $|Z^{\text{DIST}}|$ más bajo se considera la más adecuada. Además, la elección de la función de distribución y la bondad de ajuste de las funciones de distribución se verifican utilizando el diagrama de L-momentos (Hosking y Wallis, 1997) para cada grupo derivado de la regionalización de la precipitación diaria máxima anual de las estaciones en toda el área de estudio. La idea detrás del uso de diagramas de L-momentos se basa en el aprovechamiento de combinaciones únicas de coeficientes de asimetría y curtosis, con el fin de identificar gráficamente la función más cercana a la muestra de estudio (Kumar et al., 2003; Lin y Chen, 2006).

Después de haber identificado la distribución de frecuencia adecuada para cada región homogénea, se estiman los cuantiles para diferentes períodos de retorno utilizando el método del índice de avenida. El método asume que los datos de precipitación máxima diaria en diferentes sitios en una región homogénea presentan la misma distribución, excepto por un parámetro de escala específico del sitio o un factor índice (Dalrymple, 1960). El factor de escala se denomina como un índice de avenida y generalmente se toma como la media de la precipitación diaria máxima anual. Este hecho hace que la información resultante en base a esta metodología sea útil para zonas donde no existen estaciones meteorológicas.

Las estimaciones de cuantiles $\hat{Q}(F)$ con probabilidad de no excedencia F en un sitio en una región con N sitios se calculan mediante: $Q_i(F) = l_i K(T)(F)$, donde $K(T)$ es una función cuantílica adimensional común (curva de crecimiento regional) y " l_i " es el valor índice de avenida, que representa

el cuantil T-año de la distribución regional normalizada (Ngongondo et al., 2011).

La disponibilidad de datos de precipitación del producto satelital IMERG (V06B) permitió obtener una gran variedad de registros de tormentas que varían en intensidad y duración. Estos registros permiten analizar eventos de lluvia extrema y finalmente estimar los parámetros regionales a (coeficiente de duración de lluvia) y n (coeficiente de invarianza escalar). Parámetros útiles para optimizar tanto la profundidad de la lluvia como la forma de la curva.

Empleando los parámetros regionales para la distribución identificada, la curva de crecimiento regional se calcula y se multiplica por la precipitación máxima anual promedio específica de la estación para obtener los cuantiles de precipitación deseados para la estación relevante. Para cada región homogénea, se simula una región que tiene el mismo número de estaciones, registro de datos en cada estación, heterogeneidad, promedio regional y relaciones de L-momentos promedio regionales como los datos observados. Así mismo, para cada simulación, se calcularon los errores en la curva de crecimiento simulada y los cuantiles y luego se estimaron el sesgo, el error cuadrático medio (RMSE) y los límites de error del 90 %.

Previo a analizar la relación entre datos de lluvia observada y satelital se empleó el factor de corrección Mc para mejorar la calidad de los datos estimados provistos por el producto IMERG. Finalmente, se realizó una regresión lineal entre los máximos anuales basados en datos observados y satelitales para la duración diaria (Qamar et al., 2017).



4. Resultados

4.1 Regiones homogéneas

Luego del Análisis Regional de Frecuencia basado en los L-momentos se definieron 4 regiones bajo los siguientes criterios: una región se considera «aceptablemente homogénea» si $H_1 < 1$, «posiblemente heterogénea» si $1 \leq H_1 \leq 2$, y «definitivamente heterogénea» si $H_1 \geq 2$ (Tabla 2 y Figura 4). Quiere decir que la hipótesis de agrupamiento efectuada es aceptablemente homogénea para las cuatro regiones dado que en la columna H_1 de la Tabla 2, los valores para R1 a R4 son menores a 1.

Tabla 2. Valores de H_1 , H_2 y H_3 para las regiones homogéneas

Regiones	H_1	H_2	H_3
R1	0.1508	-1.2183	0.1543
R2	0.2250	1.5889	1.5057
R3	-0.0324	-0.3788	0.1326
R4	0.4967	1.1569	2.7210

Nota: H_1 , H_2 y H_3 se refieren a la medida de homogeneidad en términos de L-Coeficiente de variación, L-Asimetría y L-Curtosis respectivamente.

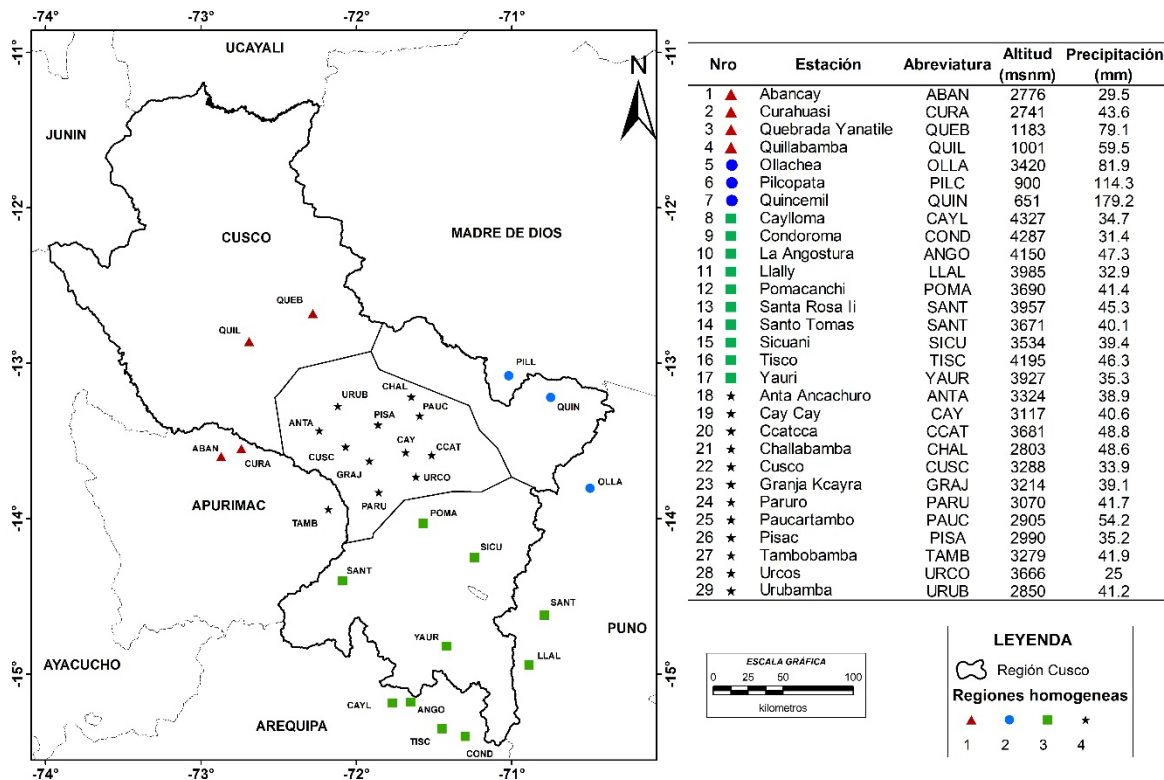


Figura 4. Distribución espacial de las estaciones meteorológicas por región homogénea

Con base en el estadístico $|Z^{DIST}|$, se describe que la función de distribución de probabilidad GLO se ajusta a las regiones 1 y 2, mientras la distribución GNO se ajusta a las regiones 3 y 4 (Tabla 3)

Tabla 3. Valores de $[Z^{DIST}]$ para cada distribución evaluada por región homogénea

$[Z^{DIST}]$						
Región	Logístico generalizado (GLO)	Valor Extremo Generalizado (GEV)	Normal Generalizado (GNO)	Pearson Tipo III (PE3)	Pareto Generalizado (GPA)	Mejor FDP
R1	-1.5792	-2.7285	-2.8571	-3.2205	-5.2662	GLO
R2	-0.7625	-1.4159	-1.5995	-1.9636	-2.9551	GLO
R3	1.7853	-0.5513	-0.5082	-0.8762	-5.4179	GNO
R4	1.8727	-1.3917	-0.8087	-0.8832	-7.6164	GNO

Según lo planteado por Hosking y Wallis (1997) se considera que el ajuste de una distribución es aceptable si el valor del estadístico $|Z^{DIST}|$ es cercano a cero. La estimación de los cuantiles se realiza una vez escogida una función de distribución, aplicando la prueba de bondad de mejor ajuste.

En la Figura 5, se aprecia la ubicación de los L-momentos promedio regionales con ratios teóricos de L-asimetría / L-curtosis para las diferentes FDP. De esta manera se corrobora que las FDP ubicadas en las regiones 1 y 2, están más cerca de la curva GLO y GEV. Por lo que la

distribución GLO resulta con mejor estadístico $|Z^{DIST}|$. En el caso de las regiones 3 y 4 las curvas GNO y PE3 presentan mejores ajustes; sin embargo, GNO fue superior.

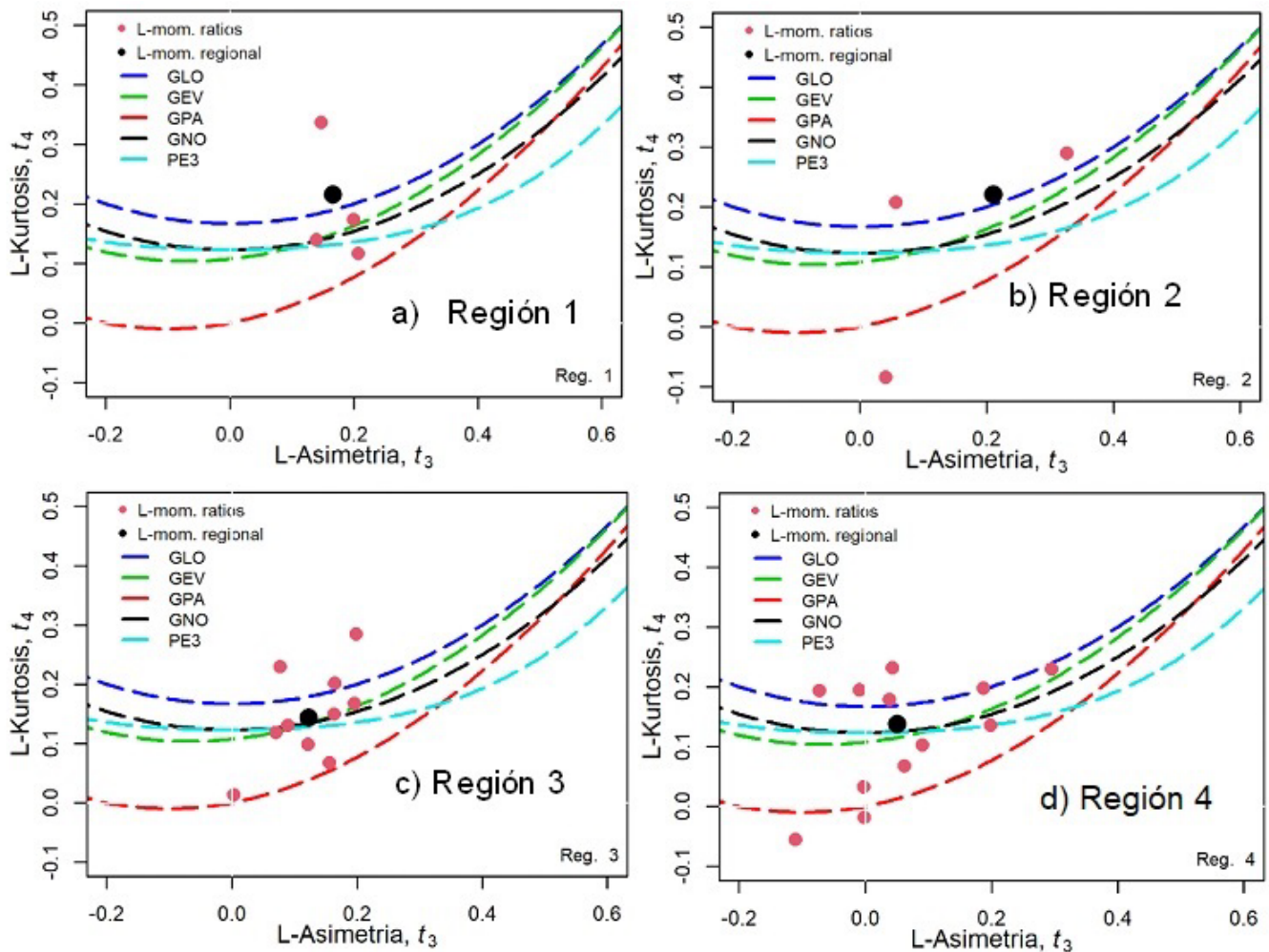


Figura 5. Diagrama de los L-Momentos de las distribuciones en las regiones identificadas: a) Región 1 – distribución elegida GLO, b) Región 2 – distribución elegida GLO, c) Región 3 – distribución elegida GNO y d) Región 4– distribución elegida GNO

Tabla 4. Valores del Factor de Crecimiento (Tr: Periodo de retorno)

Tr (años)	Región 1	Región 2	Región 3	Región 4
2	0.96	0.95	0.97	0.99
5	1.18	1.17	1.19	1.20
10	1.34	1.33	1.32	1.33
20	1.51	1.50	1.44	1.43
50	1.75	1.77	1.59	1.55
100	1.95	2.00	1.70	1.64
200	2.18	2.27	1.81	1.71
500	2.53	2.69	1.94	1.81
1000	2.82	3.07	2.05	1.88

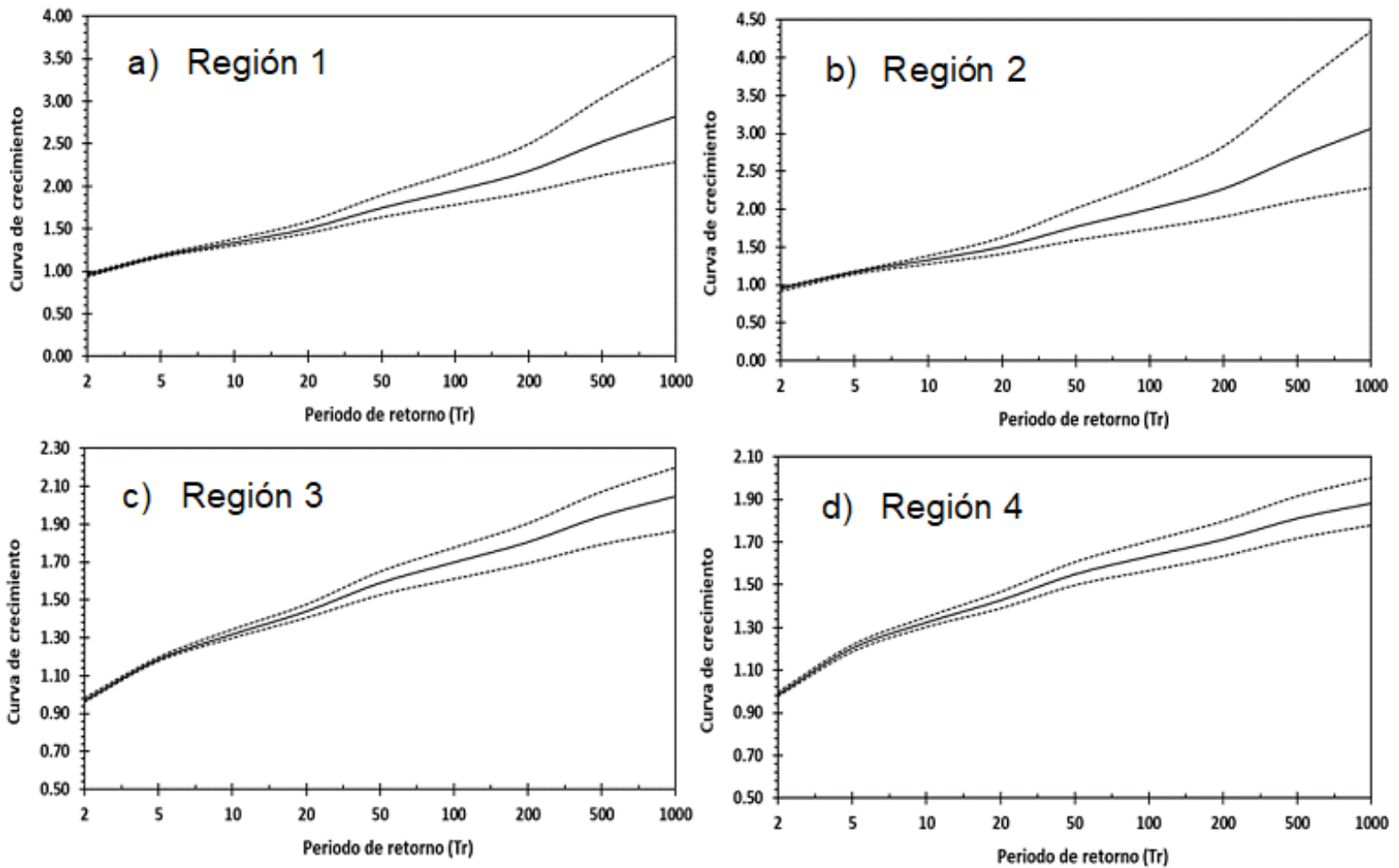


Figura 6. Curva de crecimiento adimensional por región homogénea

Se determinaron los factores de crecimiento (FC) para los periodos de retorno (T_r) de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1 000 años (Tabla 4 y Figura 6). Los resultados sugieren una mayor incertidumbre en la región 2, de hecho, para un periodo de retorno de 1 000 años se tienen valores de FC más altos que en otras regiones. Esto es posiblemente debido a la limitada serie de datos observados. En contraste, la región

4 presenta los menores valores de FC. Asimismo, se puede observar que la región 1 tiene un comportamiento similar a la región 2 y la región 3 presenta condiciones intermedias. Esta similitud entre las regiones 1 y 2, pueden deberse al régimen climático estacional, ya que se ubican principalmente en zonas amazónicas, mientras que las regiones 3 y 4 están ubicadas en zonas andinas.

4.2 Relación entre datos de lluvia tanto satelital como observados – factor Mc

Para analizar el vínculo entre la lluvia observada y aquella obtenida por el satélite IMERG, dos estaciones fueron seleccionadas (Urubamba y Tambobamba). Los valores encontrados para Mc variaron desde 0.61 para la estación de Urubamba, hasta un valor de $Mc = 1.1$ para la estación de Tambobamba (Figura 7). Estos resultados muestran la importancia de la aplicación del factor de corrección dado que valores como 0.61 sugieren la necesidad de corregir información satelital para su aplicación.

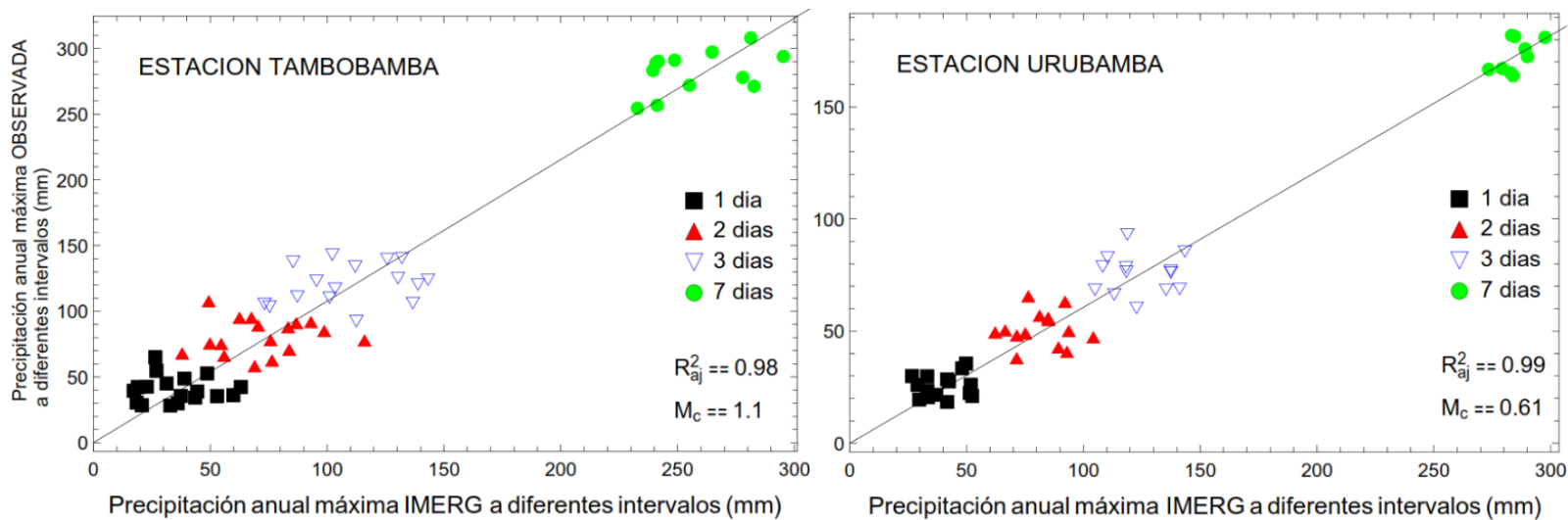


Figura 7. Estimación del Factor de Corrección M_c con base en los datos diarios observados y datos IMERG para las estaciones de Tambobamba y Urubamba

A diferentes intervalos (1, 2, 3, 7 días), se observa una relación significativa entre la precipitación anual máxima obtenida a partir de datos satelitales IMERG y datos observados, para las estaciones Tambobamba ($R^2 \sim 0.98$, $p < 0.01$) y Urubamba ($R^2 \sim 0.99$, $p < 0.01$), estaciones ubicadas en el centro del área de estudio (Figura 1).

4.3 Distribución espacial de eventos extremos: Función Intensidad Duración

Inicialmente, se estimó el coeficiente de duración de lluvia a el cual presenta valores menores a 40 (considerados valores bajos) en la zona andina de la región del Cusco, mientras que en la selva de Quincemil, Pilcopata y Tambobamba presenta valores mayores a 60 (considerados valores altos). Por otro lado, el coeficiente de invarianza escalar n presenta valores menores a 0.15 (considerados valores bajos) en la parte oeste de la región y valores mayores a 0.15 en la parte norte y sur este de la región (Figura 8).

Los valores de a encontrados para la zona de sierra de la región del Cusco presenta valores bajos menores a 40 (la zona andina del Cusco registra una precipitación máxima anual media de 45 mm/día), mientras que en la zona amazónica del Cusco presenta valores altos mayores a 60 (La selva del Cusco registra una precipitación máxima anual media de 100 mm/día) (Figura 8).

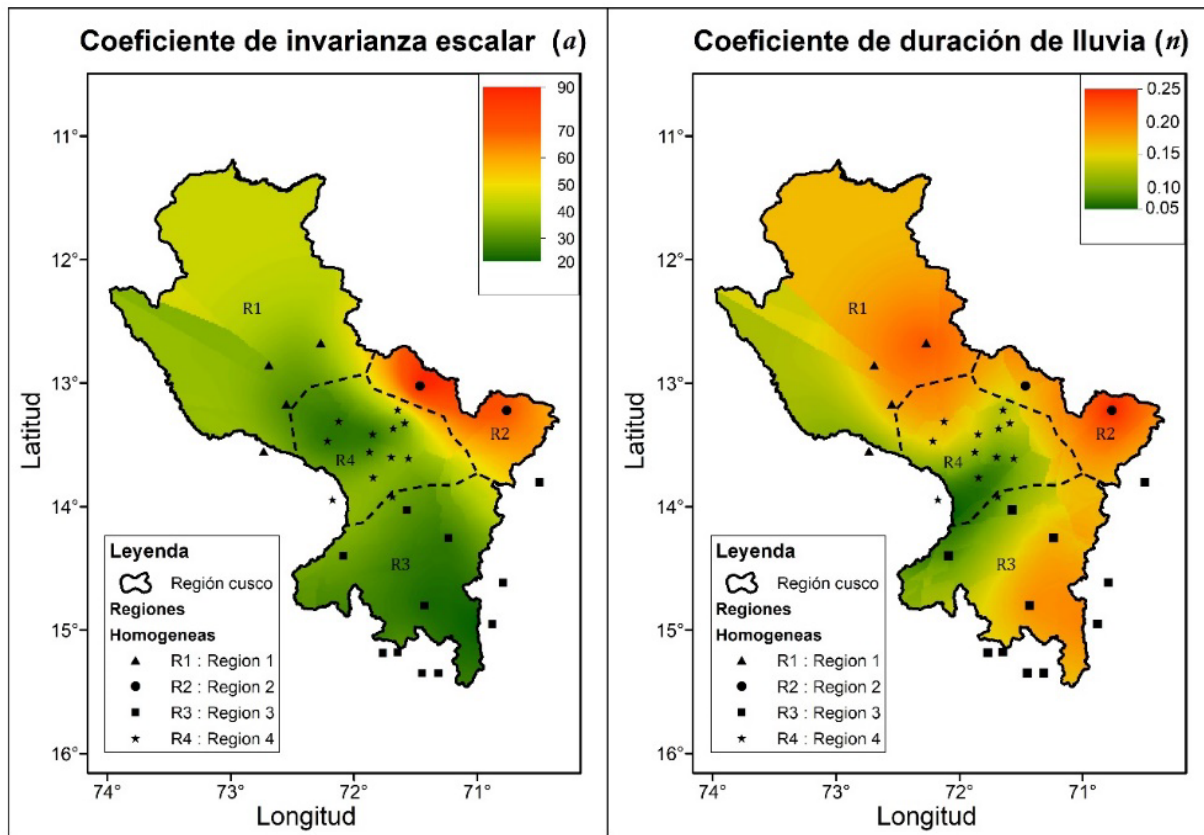


Figura 8. Mapeo del coeficiente de duración de lluvia horaria " a " y del exponente de la invarianza de escala " n " en la región Cusco

Bajo la hipótesis de que el valor del factor M_c se mantiene constante para diferentes duraciones de tiempo, el valor medio de la lluvia (ecuación 2) $\bar{h}(d)$ puede ser multiplicado por el factor M_c para obtener la aproximación de la lluvia en el punto de interés requerido. Así, posteriormente fue posible obtener la distribución espacial de $\bar{h}(d)$ para la región Cusco (Figura 9).

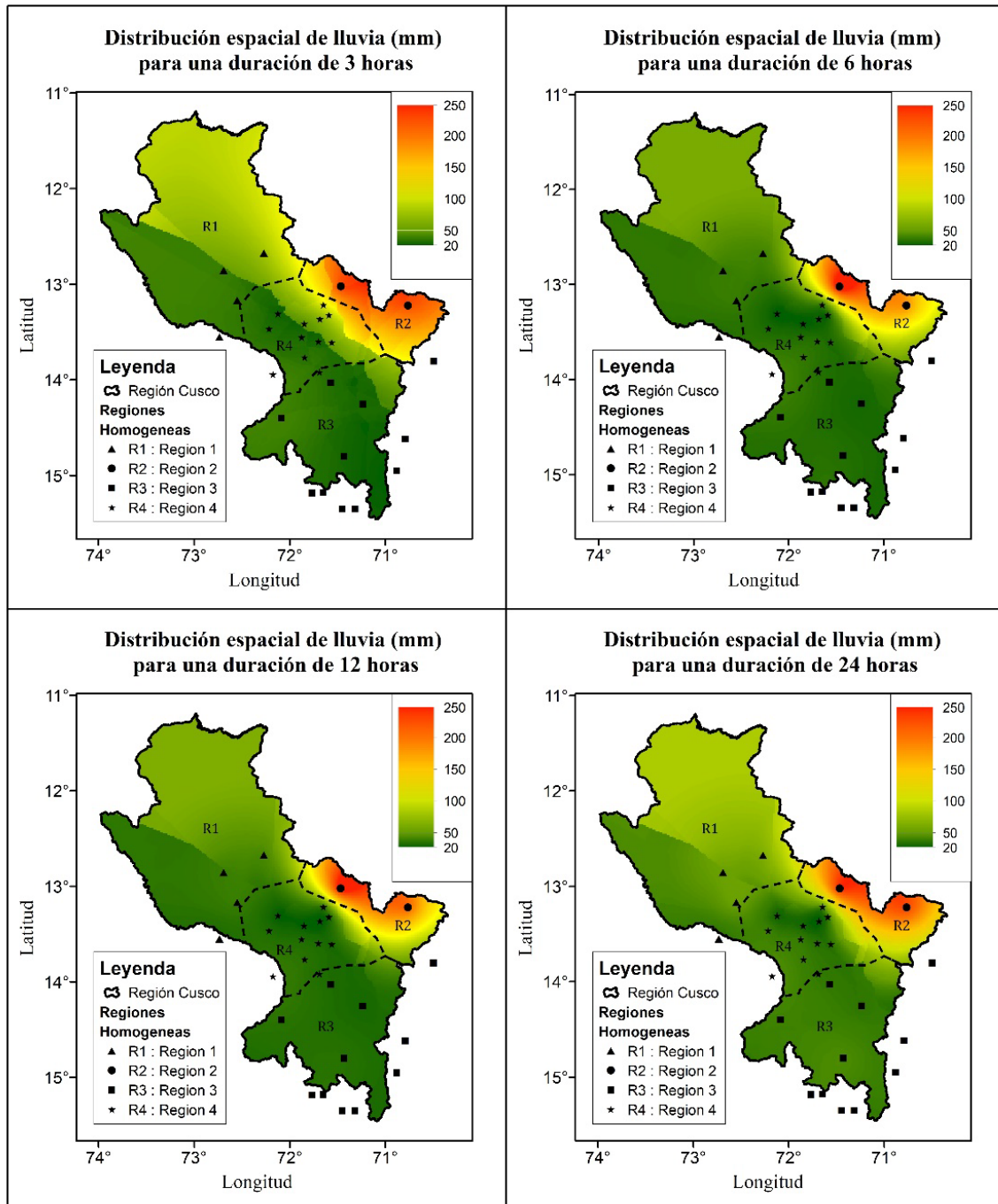


Figura 9. Mapeo de $\bar{h}(d)$ en la región Cusco para duraciones de 3, 6, 12 y 24 horas

Con base en estos valores obtenidos, se generan mapas raster mediante interpolación para periodos de retorno de 20 y 100 años y para duraciones de 3, 6, 12 y 24 horas (Figura 10 y 11). El enfoque mixto (que emplea datos IMERG en regiones donde no se cuenta con datos observados) propuesto en esta investigación muestra mapas cuyos resultados se aproximan más a los datos observados validando de esta forma la metodología propuesta. En los mapas se aprecian valores altos en las zonas de Quincemil y Chontachaca, valores bajos en las localidades de Espinar y Cusco, así como valores medios y transiciones en la ceja de selva, selva norte y sectores próximos a Challabamba y Paucartambo.

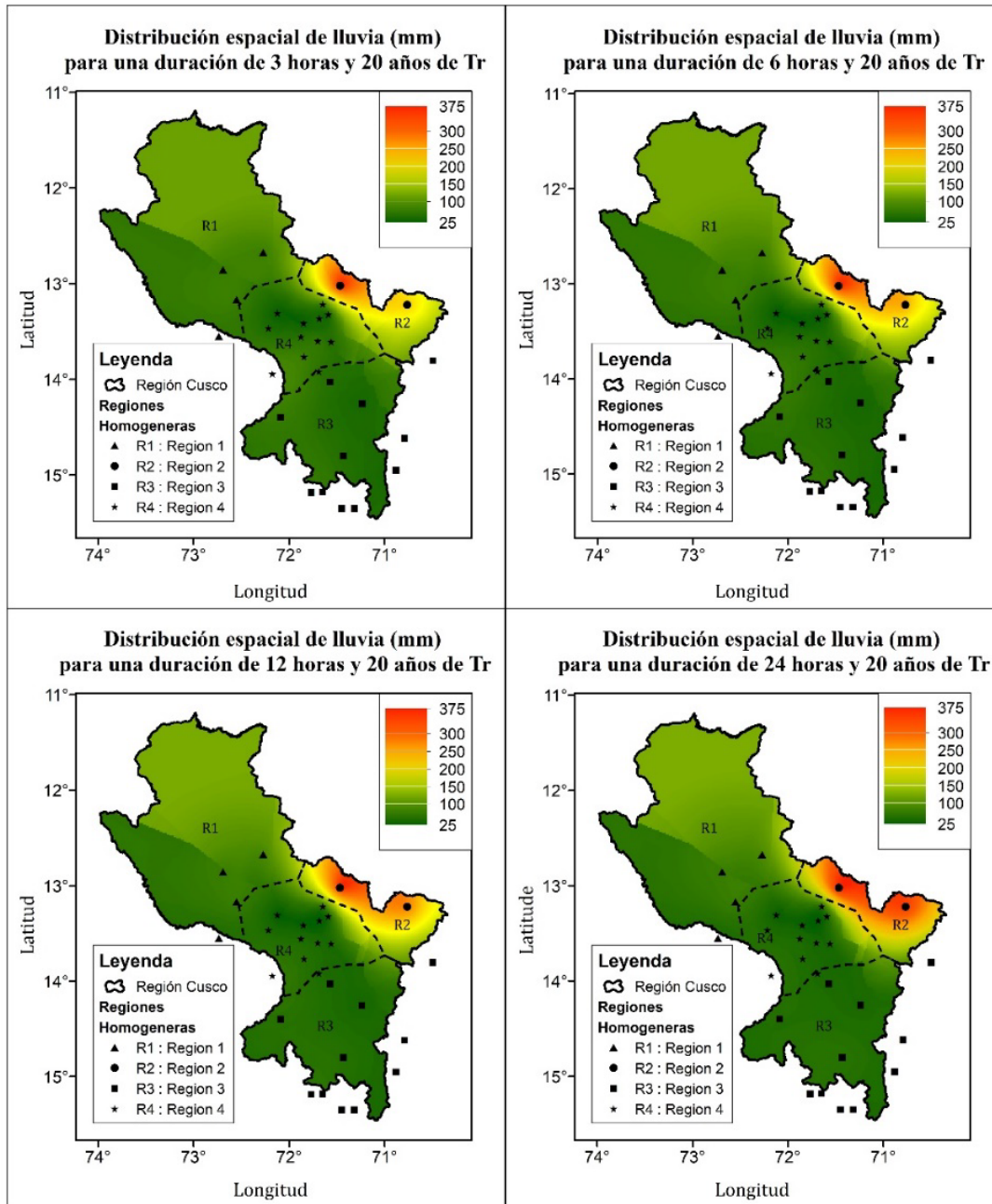


Figura 10. Mapas de lluvias extremas para duraciones de 3, 6, 12, y 24 horas y periodo de retorno de 20 años

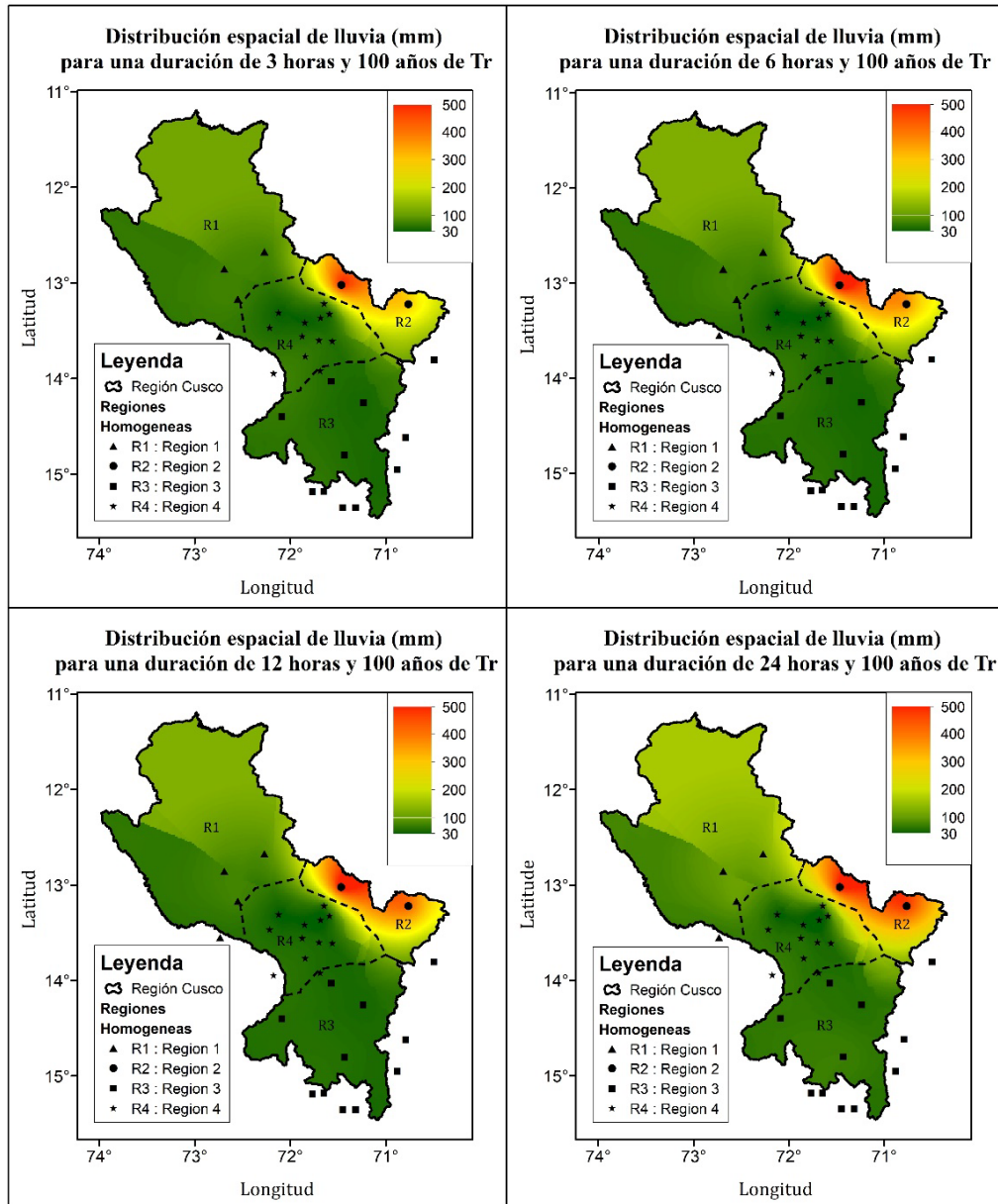


Figura 11. Mapas de lluvias extremas para duraciones de 3, 6, 12, y 24 horas y periodo de retorno de 100 años

4.4 Incertidumbre de los resultados obtenidos

Se compararon valores a partir del uso del enfoque mixto y del producto IMERG con valores obtenidos a partir de pluviómetros. En contexto, se encontró que el enfoque mixto presenta valores del RMSE más cercanos a cero y valores de RMSE menores a los obtenidos a partir del producto IMERG. Así mismo, las estaciones que presentan valores más bajos de RMSE son las estaciones de Granja Kayra, Paruro y Tambobamba en la región central oeste del Cusco (Región 1). En contraste, la Región 4 donde se encuentra la estación de Quincemil que presenta valores más altos (Tabla 5).

Tabla 5. Valores del Error Cuadrático Medio (RMSE) para diferentes periodos de retorno en las Estaciones Representativas de cada Región

Región	Estación	Tr Año	IMERG	Enfoque mixto
Región 1	Granja Kayra	2	3.19	1.04
		5	4.09	1.27
		10	4.64	1.40
		20	5.19	1.51
		50	5.97	1.64
		100	6.62	1.72
		200	7.34	1.81
		500	8.37	1.91
		1000	9.23	1.99

Región	Estación	Tr Año	IMERG	Enfoque mixto
	Urubamba	2	3.58	0.64
		5	4.67	0.78
		10	5.36	0.85
		20	6.05	0.92
		50	7.02	1.00
		100	7.82	1.05
		200	8.67	1.10
		500	9.89	1.17
		1000	10.88	1.21
	Paruro	2	3.02	1.22
		5	3.85	1.49
		10	4.42	1.64
		20	5.02	1.77
		50	5.91	1.92
		100	6.67	2.03
		200	7.49	2.13
		500	8.69	2.25
		1000	9.68	2.34
	Tambobamba	2	3.22	0.58
		5	4.13	0.70
		10	4.74	0.78
		20	5.37	0.84
		50	6.28	0.91
		100	7.04	0.96
		200	7.85	1.00
		500	9.02	1.06
		1000	9.96	1.10



Región	Estación	Tr Año	IMERG	Enfoque mixto
Región 2	Quillabamba	2	4.48	0.66
		5	6.11	0.81
		10	7.44	0.92
		20	9.06	1.03
		50	11.87	1.20
		100	14.67	1.34
		200	18.18	1.49
		500	24.12	1.73
		1000	29.77	1.93
	Quebrada Yanatile	2	6.67	0.71
		5	8.41	0.88
		10	9.89	1.00
		20	11.76	1.12
		50	15.13	1.30
		100	18.58	1.45
		200	22.95	1.62
		500	30.43	1.88
		1000	37.58	2.10
Región 3	Santo Tomas	2	4.30	0.24
		5	5.66	0.29
		10	6.49	0.33
		20	7.29	0.36
		50	8.39	0.40
		100	9.27	0.42
		200	10.20	0.45
		500	11.51	0.48
		1000	12.57	0.51



Región	Estación	Tr Año	IMERG	Enfoque mixto
	Caylloma	2	4.30	0.24
		5	5.66	0.29
		10	6.49	0.33
		20	7.29	0.36
		50	8.39	0.40
		100	9.27	0.42
		200	10.20	0.45
		500	11.51	0.48
		1000	12.57	0.51
	La Angostura	2	3.65	2.82
		5	4.82	3.45
		10	5.62	3.84
		20	6.45	4.19
		50	7.66	4.63
		100	8.65	4.94
		200	9.71	5.25
		500	11.21	5.66
		1000	12.42	5.96
	Yauri	2	3.92	0.98
		5	5.11	1.19
		10	5.93	1.33
		20	6.78	1.45
		50	8.01	1.60
		100	9.03	1.71
		200	10.12	1.82
		500	11.67	1.96
		1000	12.91	2.06

Región	Estación	Tr Año	IMERG	Enfoque mixto
Región 4	Ollachea	2	6.16	0.29
		5	6.60	0.36
		10	7.12	0.41
		20	7.90	0.46
		50	9.45	0.54
		100	11.09	0.61
		200	13.16	0.69
		500	16.56	0.82
		1000	19.64	0.94
	Quincemil	2	17.79	1.34
		5	20.31	1.64
		10	22.89	1.87
		20	26.06	2.11
		50	31.33	2.49
		100	36.25	2.81
		200	42.03	3.19
		500	51.07	3.78
		1000	59.04	4.31

Por otro lado, la metodología del estudio se evaluó mediante el método de validación cruzada entre los valores de precipitación diaria obtenidos del producto IMERG, enfoque mixto y precipitación observada (Figura 12). Esto se realizó para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1 000 años, se puede notar en la mayoría de los casos que existe sobreestimación en los valores extremos de lluvia al emplear datos provenientes del producto IMERG. Esta sobreestimación de valores extremos es más notoria para las estaciones de Urubamba, Quillabamba,

Quincemil y Quebrada Yanatile (a excepción de la estación Tambobamba que presenta data similar a la observada). Mientras que, los valores que se obtienen mediante el enfoque mixto resultan muy parecidos a la data observada.

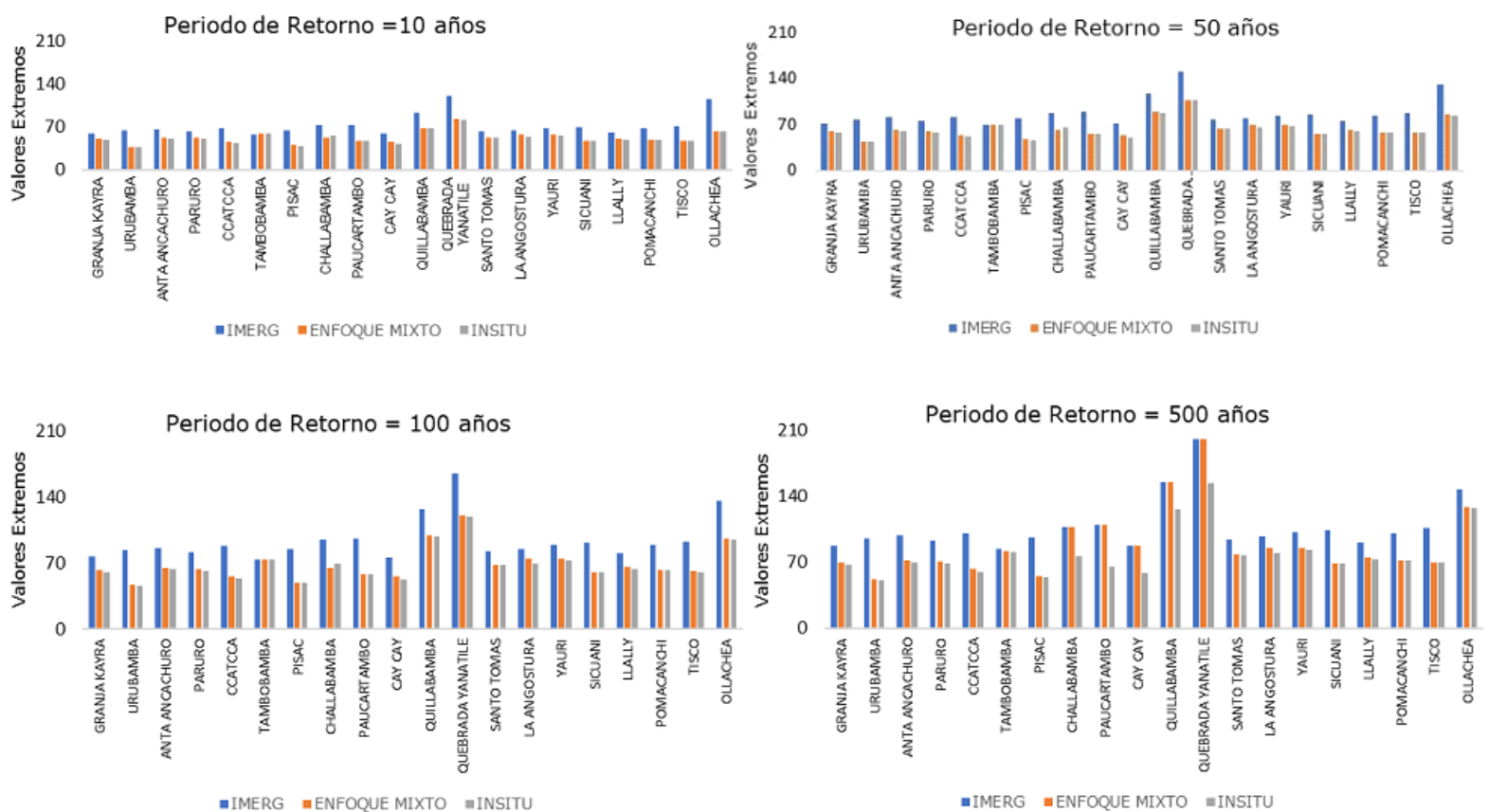


Figura 12. Comparación de valores de precipitación obtenidos mediante datos del IMERG, enfoque mixto y datos observados para diferentes periodos de retorno y estaciones representativas



5. Discusión

La densidad promedio de estaciones considerada en esta investigación hace que el área de influencia por estación meteorológica sea de 2 482 km², considerada muy superior a la densidad recomendada por la OMM, la cual considera que las distancias entre estaciones debieran ser de 25 a 30 km para zonas planas y de 12.5 a 15 km en zonas de montaña (densidad promedio de 225 km² por estación) (WMO, 1970; OMM, 2010). Ante ello, resulta relevante incrementar el número de estaciones meteorológicas en el departamento del Cusco y del Perú (Rojas et al., 2021). No obstante, surge en las últimas décadas la importancia y/o necesidad de evaluar la aplicabilidad de datos satelitales en la estimación de eventos hidro climáticos extremos en zonas andinas y amazónicas del Perú con fines de prevención (Zubieta et al., 2019). Este es el caso del producto en IMERG (Final Run, GPM Versión 06B) del satélite GPM, el cual es recomendado para investigaciones dado que provee datos más adecuadas para la estimación de variables hidrológicas (Zubieta et al., 2017; Huffman et al., 2019; Moazami y Najafi, 2021).

Para estimar la distribución de probabilidad de lluvias extremas ante diferente duración (días) y diferente tiempo de retorno. Nuestro estudio sugiere que, para alcanzar un mayor rendimiento, los valores de precipitación satelital deben ser sometidos previamente a un factor multiplicativo (Mc). La estimación de este factor Mc y el cálculo de los



parámetros necesarios a y n , fueron efectuados por cada estación meteorológica, sin embargo, el factor de crecimiento se estimó por región homogénea. Este estudio pone a disposición mapas de lluvias máximas extremas (duración de 3, 6, 12 y 24 horas), correspondiente a periodos de retorno de 20 y 100 años. Estos mapas pueden ser útiles para el diseño de infraestructura hidráulica para sistemas de drenaje pluvial o control de inundaciones (Fernández y Lavado, 2017).

El empleo de productos IMERG para análisis de frecuencias y representación de caudales extremos pueden conducir a rendimientos satisfactorios (Jiang et al., 2022; Xiaoyang et al., 2022). De hecho, en nuestro estudio, en comparación a datos observados, el análisis de RMSE muestra que los valores de precipitación obtenidos a partir del enfoque mixto presentan valores más adecuados para representar lluvia extrema, que aquellos obtenidos mediante el empleo de solo datos satelitales IMERG.

Las regiones homogéneas 1 y 2 ubicadas en la zona central y sur del Cusco presentan los valores más bajos de RMSE. Esto sugiere que el uso del enfoque mixto es más adecuado para la representación de eventos de lluvia extrema bajo diferentes tiempos de duración y diferente tiempo de retorno en zonas andinas. Esto es posiblemente asociado a eventos de convección proveniente de flujos de humedad del este, muy frecuente durante la temporada de lluvias en zonas de alta montaña (Flores-Rojas et al., 2021). Esto es consistente con la fuerte estacionalidad de la lluvia en zonas andinas la cual se rige en la región de los Andes peruanos (Espinoza et al., 2009)

Del mismo modo, se aprecia que las estaciones de la región 1 y 2 presentan mejores valores de RMSE que la región 3 y 4. En comparación a las regiones 1 y 2, está reducida representación de eventos de lluvia extrema (mayores valores de RMSE) en las regiones 3 y 4 sugiere que el uso del enfoque mixto sobre las regiones amazónicas puede ser limitado. Este nivel de incertidumbre puede probablemente ser debido a la limitada cantidad de estaciones meteorológicas analizadas sobre regiones amazónicas en el este del Cusco. De hecho, en contexto, la disponibilidad de datos climáticos para investigaciones en el Perú, se caracteriza por contar con mayor número de estaciones principalmente en zonas andinas que en zonas amazónicas (Zubieta et al., 2017; Lavado et al., 2012).

La comparación del número de eventos extremos estimados a partir de datos IMERG sugiere una sobreestimación con respecto a datos observados en la cantidad de eventos extremos identificados principalmente en zonas amazónicas del norte y este del Cusco. Esto es consistente con la distribución espacial de lluvias extremas para diferentes duraciones (3, 6, 12 y 24) y diferentes periodos de retorno (20 y 100 años) que muestra que las más intensas lluvias, como era esperado, es sobre regiones amazónicas. No obstante, la utilización del enfoque mixto dispone una mejor aproximación de estos eventos extremos de lluvia ya sea en zonas andinas o amazónicas. Nuestros hallazgos sugieren que el enfoque mixto, como método alternativo, puede ser utilizado para generar información de IDF en zonas no monitoreadas o carente de datos (Fernández y Lavado, 2017).

6. Conclusiones

Esta investigación documenta la aplicación del análisis regional de frecuencias de precipitaciones máximas en 24 horas, se propone 4 regiones homogéneas para la región Cusco ubicada en los Andes del sur del Perú. Basados en series de tiempo de lluvia (observada y satelital IMERG-GPM) y predictores físicos estandarizados como altitud, latitud y longitud, se empleó la técnica L-momentos para finalmente estimar funciones de distribución de probabilidad con el mejor ajuste para cada región homogénea que condujeron a la estimación de distribución espacial de eventos de lluvia extrema para diferentes duraciones y diferente tiempo de retorno. En base a la precipitación de satélite, las regiones homogéneas posibilitan estimar valores de intensidad duración y frecuencia.

La resolución temporal de datos satelitales IMERG (30 minutos) permite identificar eventos de tormentas, que junto con los datos observados contribuyó a proponer un método de enfoque mixto (observado y satelital), para la estimación de lluvias extremas en zonas andino y amazónicas de la región Cusco en el sur del Perú.

En comparación a datos observados, nuestros hallazgos indican que el enfoque mixto provee resultados más adecuados que los datos satelitales IMERG. Esto sugiere que la metodología adoptada es una propuesta alternativa para estimar valores de máximas precipitaciones en lugares



no monitoreados o carentes de información de la región Cusco. Los resultados más precisos pueden ser alcanzados en zonas andinas que en amazónicas.

El análisis de incertidumbre desarrollado sugiere que el uso de los resultados de este estudio con fines de diseño de ingeniería debe ser tomado considerando las bandas de confianza de las curvas de crecimiento regional. Además de prever que el período de las series de tiempo utilizadas en algunas regiones es corto, y que el número de estaciones para el análisis regional de frecuencia fue muy limitado para las regiones amazónicas del Cusco.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional Agraria de La Molina por su constante apoyo para la conclusión de este artículo.

8. Referencias

Ancil, F., Viau, A., Parent, L. E., Larouche, W., Viau, A. A., & Parent, L.-
étienne. (2002). *Interprétation de l'indicateur standardisé de
précipitation à l'aide d'une analyse statistique régionale*.
82(January), 115-125. <https://doi.org/DOI:10.4141/S00-080>



- Asurza, F., Ramos, C., & Lavado, W. (2018). Assessment of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) and Global Precipitation Measurement (GPM) products in hydrological modeling of the Huancane river basin, Peru. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 53-62. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.01.06>
- Awadallah, A. G. (2015). Regional intensity-duration-frequency curves for Jeddah region, Saudi Arabia, using ordinary and L-moments approaches: Regional I-D-F for Jeddah, Saudi Arabia. *Journal of Flood Risk Management*, 8(3), 195-207. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12085>
- Barbato, G., Barini, E. M., Genta, G., & Levi, R. (2011). Features and performance of some outlier detection methods. *Journal of Applied Statistics*, 38(10), 2133-2149. <https://doi.org/10.1080/02664763.2010.545119>
- Bergmann, Fernández, Gleixner, & Laudien. (2021). *Cambio Climático y migraciones en el Perú*. <https://publications.iom.int/system/files/pdf/assessing-the-evidence-peru-es.pdf>
- Bradley, A. A. (1998), Regional frequency analysis methods for evaluating changes in hydrologic extremes, *Water Resour. Res.*, 34(4), 741–750, doi:10.1029/98WR00096.
- Cassalho, F., Beskow, S., Vargas, M. M., Moura, M. M. de, Ávila, L. F., & Mello, C. R. de. (2017). Hydrological regionalization of maximum stream flows using an approach based on L-moments. *Rbrh*, 22(0). <https://doi.org/10.1590/2318-0331.021720160064>

- Charrad, M., Ghazzali, . N., Boiteau, V., & Niknafs, A. (2014). NbClust: An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set. *Journal of Statistical Software*, 61(6), 1–36. <https://doi.org/10.18637/jss.v061.i06>
- Chokmani, K., & Ouarda, T. B. M. J. (2004). Physiographical space-based kriging for regional flood frequency estimation at ungauged sites: Physiographical space-based kriging. *Water Resources Research*, 40(12). <https://doi.org/10.1029/2003WR002983>
- Collischonn, B., Collischonn, W., & Tucci, C. E. M. (2008). Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology*, 360(1-4), 207-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.032>
- CRED, U. (2018). *Economic Losses, Poverty & DISASTERS, 1998-2017*. https://www.preventionweb.net/files/61119_credeconomiclosses.pdf
- Dalrymple, T. (1960). Flood-Frequency Analyses. *Manual of Hydrology Part 3. Flood-flow techniques. Usgpo, 1543-A*, 80. <https://doi.org/doi.org/10.3133/wsp1543A>
- Espinosa, J. A., Ibáñez, L. A., Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México, Arteaga-Ramírez, R., Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México, Galeana-Pizaña, J. M. (2020). Modelo hidrológico distribuido con imágenes GPM-IMERG en la cuenca del río Huaynamota, Nayarit, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(5), 344-383. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-05-09>

- Espinoza, J. C., Guyot, J. L., Ronchail, J., Cochonneau, G., Filizola, N., Fraizy, P., Labat, D., de Oliveira, E., Ordoñez, J. J., & Vauchel, P. (2009). Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974–2004). *Journal of Hydrology*, 375(3-4), 297-311. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.004>
- Fernández, C. A., & Lavado, W. (2017). Regional maximum rainfall analysis using L-moments at the Titicaca Lake drainage, Peru. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3-4), 1295-1307. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1845-3>
- Flores-Rojas, J. L.; Moya-Álvarez, A. S.; Valdivia-Prado, J. M.; Piñas-Laura, M.; Kumar, S.; Karam, H. A.; Villalobos-Puma, E.; Martínez-Castro, D.; Silva, Y. (2021) On the Dynamic Mechanisms of Intense Rainfall Events in the Central Andes of Peru, Mantaro Valley. *Atmos. Res.* 248, 105188. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105188>.
- Guijarro, J. A. (2019). Homogeneización de series climáticas con Climatol, Versión 3.1.1. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), D.T. en Islas Baleares, España. http://www.climatol.eu/homog_climatol-es.pdf
- Hosking, J. R. M. (1990). L-Moments: Analysis and Estimation of Distributions Using Linear Combinations of Order Statistics. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 52(1), 105-124. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1990.tb01775.x>

- Hosking, J. R. M., & Wallis, J. R. (1986). The Value of Historical Data in Flood Frequency Analysis. *Water Resources Research*, 22(11), 1606-1612. <https://doi.org/10.1029/WR022i011p01606>
- Hosking, J. R. M., & Wallis, J. R. (1993). Some Statistics Useful in Regional Frequency Analysis. *IBM Research division, Yorktown Heights, New York*, 29(92), 271-281. <https://doi.org/10.1029/92WR01980>
- Hosking, J. R. M., & Wallis, J. R. (1997). *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments* (1.^a ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511529443>
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K.-L., Joyce, R. J., Kidd, C., Nelkin, E. J., Sorooshian, S., Stocker, E. F., Tan, J., Wolff, D. B., & Xie, P. (2020). Integrated Multi-satellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission (IMERG). En V. Levizzani, C. Kidd, D. B. Kirschbaum, C. D. Kummerow, K. Nakamura, & F. J. Turk (Eds.), *Satellite Precipitation Measurement* (Vol. 67, pp. 343-353). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_19
- Huffman, G. J., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Kidd, C., Nelkin, E. J., Sorooshian, S., Tan, J., & Xie, P. (2019). *NASA/GSFC NASA/GSFC Code 612 Greenbelt, MD 2077*. 38.
- Hunink, J. E., Immerzeel, W. W., & Droogers, P. (2014). A High-resolution Precipitation 2-step mapping Procedure (HiP2P): Development and application to a tropical mountainous area. *Remote Sensing of Environment*, 140, 179-188. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.036>



- INDECI. (2012). *Evaluación del Impacto socio económico de la temporada de lluvias 2010 en la región del Cusco*.
<http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc1934/doc1934-contenido.pdf>
- INGEMMET. (2010). *Mapa de Susceptibilidad por movimientos en masa del Perú*.
http://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA%20PUBLICAR/INGEMMET/Mapa_Susceptibilidad_movimientos_en_masa_Peru_2010.pdf
- IPCC. (2015). *El Quinto Informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático*.
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Jiang, S.; Ding, Y.; Liu, R.; Wei, L.; Liu, Y.; Ren, M.; Ren, L. (2017). Assessing the Potential of IMERG and TMPA Satellite Precipitation Products for Flood Simulations and Frequency Analyses over a Typical Humid Basin in South China. *Remote Sens.* 14, 4406.
<https://doi.org/10.3390/rs14174406>
- Khodadoust, S., Saghafian, B., & Moazami, S. (2017). Comprehensive evaluation of 3-hourly TRMM and half-hourly GPM-IMERG satellite precipitation products. *International Journal of Remote Sensing*, 38(2), 558-571. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1268735>
- Kumar, R., Chatterjee, C., Kumar, S., Lohani, A. K., & Singh, R. D. (2003). Development of regional flood frequency relationships using L-moments for middle Ganga plains subzone 1(f) of India. *Water Resources Management*, 17(4), 243-257.
<https://doi.org/10.1023/A:1024770124523>

- Landwehr, J. M., Greenwood, J. A., Matalas, N. C., & Wallis, J. R. (1979). Probability weighted moments: Definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. *Water Resources Research*, 15(5), 1049-1054. <https://doi.org/10.1029/WR015i005p01049>
- Lavado, C., Taylor, P., Sven, W., & Guyot, J. L. (2012). *Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969 – 2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969 – 2004): Pacific*. December 2014, 37-41. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.672985>
- Lavado, W., & Espinoza, J. C. (2014). Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú (1965-2007). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29(2), 171-182. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862014000200003>
- Lavado, W., Jimenes, Llauca, H., & Leon. (2020). *The first system for flash flood monitoring and forecasting in Peru*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-3759>
- Lin, G. F., & Chen, L. H. (2006). Identification of homogeneous regions for regional frequency analysis using the self-organizing map. *Journal of Hydrology*, 324(1-4), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.009>

- Llauca, H., Lavado, W., León, K., Jimenez, J., Traverso, K., & Rau, P. (2021). Assessing Near Real-Time Satellite Precipitation Products for flood simulations at sub-daily scales in a sparsely gauged watershed in Peruvian Andes. *Remote Sensing*, 13(4), 826. <https://doi.org/10.3390/rs13040826>
- Mahavik, N., & Tantanee, S. (2021). Seasonal characteristics of precipitating cloud properties and structures in the inland of the Indochina peninsula: A legacy of 16 years of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite. *Geographia Technica*, 16(1), 48-66. https://doi.org/10.21163/GT_2021.161.05
- Malekinezhad, H., & Zare, A. (2014). Regional frequency analysis of daily rainfall extremes using L-moments approach. *Atmosfera*, 27(4), 411-427. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(14\)70039-6](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(14)70039-6)
- Manz, B., Páez, S., Horna, N., Buytaert, W., Ochoa, B., Lavado, W., & Willems, B. (2017). Comparative Ground Validation of IMERG and TMPA at variable spatiotemporal scales in the Tropical Andes. *Journal of Hydrometeorology*, 18(9), 2469-2489. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0277.1>
- MINAM. (2015). *Mapa de susceptibilidad física del Perú*. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/01/MAPA-DE-SUSCEPTIBILIDAD-FISICA.pdf>

- MINAM. (2016). *El Perú y el Cambio Climático. Tercera comunicación nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*.
<https://sinia.minam.gob.pe/documentos/tercera-comunicacion-nacional-peru-convencion-marco-las-naciones>
- Moazami, S., & Najafi, M. R. (2021). A comprehensive evaluation of GPM-IMERG V06 and MRMS with hourly ground-based precipitation observations across Canada. *Journal of Hydrology*, 594, 125929.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125929>
- Ngongondo, C. S., Xu, C. Y., Tallaksen, L. M., Alemaw, B., & Chirwa, T. (2011). Regional frequency analysis of rainfall extremes in Southern Malawi using the index rainfall and L-moments approaches. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(7), 939-955. <https://doi.org/10.1007/s00477-011-0480-x>
- Noto, L. V., & La Loggia, G. (2009). Use of L-moments approach for regional flood frequency analysis in Sicily, Italy. *Water Resources Management*, 23(11), 2207-2229.
<https://doi.org/10.1007/s11269-008-9378-x>
- OMM. (1994). *Guía de practicas hidrológicas—Adquisición y Proceso de Datos, Analisis, predicción y otras aplicaciones, OMM-Nº 168*. OMM.
- OMM. (2010). *Guía del Sistema Mundial de Observación*. 252.
- PACC, & SENAMHI. (2012). *Caracterización climática de las regiones Apurímac y Cusco*.
<http://siar.minam.gob.pe/apurimac/documentos/caracterizacion-climatica-las-regiones-apurimac-cusco-0>



- Peng, F., Zhao, S., Chen, C., Cong, D., Wang, Y., & Ouyang, H. (2020). Evaluation and comparison of the precipitation detection ability of multiple satellite products in a typical agriculture area of China. *Atmospheric Research*, 236, 104814. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104814>
- Perry, L. B., Seimon, A., & Kelly, G. M. (2014). Precipitation delivery in the tropical high Andes of southern Peru: New findings and paleoclimatic implications: Precipitation delivery in tropical high Andes of southern Perú. *International Journal of Climatology*, 34(1), 197-215. <https://doi.org/10.1002/joc.3679>
- Qamar, M. U., Azmat, M., Shahid, M. A., Ganora, D., Ahmad, S., Cheema, M. J. M., Faiz, M. A., Sarwar, A., Shafeeque, M., & Khan, M. I. (2017). Rainfall Extremes: A Novel Modeling Approach for Regionalization. *Water Resources Management*, 31(6), 1975-1994. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1626-5>
- Rojas, N. B., Salas, R., Silva, J. O., Oliva, M., Gómez, D., Terrones, R. E., Iliquín, D., Barrena, M., & Barboza, E. (2021). Site selection for a network of weather stations using AHP and near analysis in a GIS Environment in Amazonas, NW Peru. *Climate*, 9(12), 169. <https://doi.org/10.3390/cli9120169>
- Salas, A.-J., Rosales, E.-R., Alvarez, C.E., & Asención, R.-M. (2020). *Comparación del producto de precipitación GPM IMERA y PISCO sobre la intercuenca alto Madre de Dios, Perú*. 08, 8.

- Sankarasubramanian, A., & Srinivasan, K. (1999). Investigation and comparison of sampling properties of L-moments and conventional moments. *Journal of Hydrology*, 218(1-2), 13-34. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00018-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00018-9)
- SENAMHI. (2019). *Movimiento en Masa por lluvias Intensas en el Perú*. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-81.pdf>
- SENAMHI. (2021). *Climas del Perú*.
- SENAMHI, M. (2016). *Asimilación y Evaluación de datos de precipitación en base a satélite en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vicanota*. 68.
- Smith, J. A. (1989). Regional flood frequency analysis using extreme order statistics of the annual peak record. *Water Resources Research*, 25(2), 311-317. <https://doi.org/10.1029/WR025i002p00311>
- Stedinger, Jerry R; Vogel, Richard; Georgiou, E. (1993). Frequency Analysis of Extreme events. *Engineering*.
- Tan, J., Huffman, G. J., Bolvin, D. T., & Nelkin, E. J. (2019). IMERG V06: Changes to the Morphing Algorithm. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 36(12), 2471-2482. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0114.1>
- Tang, S., Li, R., He, J., Wang, H., Fan, X., & Yao, S. (2020). Comparative Evaluation of the GPM IMERG Early, Late, and Final hourly precipitation products using the CMPA data over Sichuan Basin of China. *Water*, 12(2), 554. <https://doi.org/10.3390/w12020554>

- UNESCO (Ed.). (2015). *Water for a sustainable world*. UNESCO.
- UNESCO. (2020). *Agua y Cambio Climático*.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611.locale=es>
- Venkatesh, Maheswaran, & Devacharan. (2022). *Framework for developing IDF curves using satellite precipitation: A case study using GPM-IMERG V6 data*. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00708-0>
- Viglione, A., Laio, F., & Claps, P. (2007). A comparison of homogeneity tests for regional frequency analysis: Homogeneity tests for regional frequency analysis. *Water Resources Research*, 43(3).
<https://doi.org/10.1029/2006WR005095>
- Villacorta, S., & Fidel, L. (2012). *Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú*. 7.
- Wallis, J. R., Schaefer, M. G., Barker, B. L., & Taylor, G. H. (2007). Regional precipitation-frequency analysis and spatial mapping for 24-hour and 2-hour durations for Washington State. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(1), 415-442.
<https://doi.org/10.5194/hess-11-415-2007>
- Wang, C., Tang, G., Han, Z., Guo, X., & Hong, Y. (2018). Global intercomparison and regional evaluation of GPM IMERG Version-03, Version-04 and its latest Version-05 precipitation products: Similarity, difference and improvements. *Journal of Hydrology*, 564, 342-356. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.064>
- WMO. (1970). *The planning of meteorological station networks*. 265.



- WMO. (1983). *Guide to Hydrological practices, Vol II. Analysis, forecasting and other applications, WMO N° 168, 4th ed., Geneva, Switzerland,* 183.
https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10027
- Xiaoyang Chen, Dehua Zhu, Min Wang et al. Regional Precipitation frequency analysis for 24-hour duration using L-moments approach in Shaoguan, South China, 31 March 2022, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1508456/v1>]
- Yang, T., Shao, Q., Hao, Z. C., Chen, X., Zhang, Z., Xu, C. Y., & Sun, L. (2010). Regional frequency analysis and spatio-temporal pattern characterization of rainfall extremes in the Pearl River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 380(3-4), 386-405.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.013>
- Yuan, F., Zhang, L., Soe, K., Ren, L., Zhao, C., Zhu, Y., Jiang, S., & Liu, Y. (2019). Applications of TRMM- and GPM-Era Multiple-Satellite Precipitation Products for flood simulations at sub-daily scales in a sparsely gauged watershed in Myanmar. *Remote Sensing*, 11(2), 140. <https://doi.org/10.3390/rs11020140>
- Yurekli, K. (2005). *Regional Frequency Analysis of Maximum Daily Rainfalls Based on L-Moment Approach L- Moment*. 22(1), 37-44.
- Zhang, J., Lin, L.-F., & Bras, R. L. (2018). Evaluation of the quality of precipitation products: A case study using WRF and IMERG data over the central United States. *Journal of Hydrometeorology*, 19(12), 2007-2020. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0153.1>

- Zubieta, R., Getirana, A., Espinoza, J. C., Lavado, 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. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3543-2017>
- Zubieta, R., Saavedra, M., Espinoza, J. C., Ronchail, J., Sulca, J., Drapeau, G., & Martin-Vide, J. (2019). Assessing precipitation concentration in the Amazon basin from different satellite-based data sets. *International Journal of Climatology*, 39(7), 3171-3187. <https://doi.org/10.1002/joc.6009>