

DOI: 10.24850/j-tyca-2024-05-01

Artículos

Estimación de lluvias extremas mediante un enfoque de análisis regional y datos satelitales en Cusco, Perú
Estimation of extreme rainfall through a regional analysis and satellite data approach in Cusco, Peru

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 de forma significativa 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

Publicado Online: 04/04/2023

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 registraron a nivel global 3 148 fenómenos naturales que provocaron desastres por inundaciones entre los años 1998 y 2017. Las inundaciones fueron el desastre de origen natural más común, representando el 43 % de todos los registros. Las inundaciones también están aumentando en frecuencia e intensidad, y se espera que continúen a la alza 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 denominan en Perú) en todo el país, siendo Cusco la región con mayor presencia de eventos

de huaycos, cuyo detonante suelen 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 & Espinoza, 2014). Sin embargo, las precipitaciones extremas en el Perú están también relacionadas con el rol que ejerce el océano Atlántico (Espinoza *et al.*, 2009). Por ejemplo, se describen 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, Taylor, Sven, & Guyot, 2012).

Entre 2003 y 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 & 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, pues se requiere de la capacidad de reconocer la distribución espacial y temporal de datos de precipitación

(Espinosa-López, Ibáñez-Castillo, Arteaga-Ramírez, & Galeana-Pizaña, 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, en especial en los Andes peruanos (Llauca *et al.*, 2021) debido al papel que ejercen 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 con la calidad (Fernández & Lavado, 2017). De acuerdo con 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-escurrimiento 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; tal es el caso de la región andino amazónica (Collischonn, Collischonn, & Tucci, 2008; Zubieta, Getirana, Espinoza, Lavado, & Aragon, 2017). Una fuente alternativa de datos diarios ante estos inconvenientes es el uso de lluvia estimada por sensores remotos (SENAMHI, 2016). De hecho, el empleo de datos de precipitaciones subdiarios 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 máxima en 24 horas (magnitud y frecuencia) resulta 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, Xu, Tallaksen, Alemaw, & Chirwa, 2011; Noto & La Loggia, 2009). Por lo tanto, el interés suele centrarse en eventos extremos con periodos 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.

De manera reciente 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 & Zare, 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 & Wallis, 1997).

El análisis regional de frecuencia se usa en lugares donde existe poca o ninguna información; se propusieron varias técnicas de estimación regional y se aplicaron en distintas partes del mundo; sin embargo, existe consenso en que el análisis regional de frecuencia es confiable (Smith, 1989; Bradley, 1998; Viglione, Laio, & Claps, 2007; Malekinezhad & Zare, 2014).

En cuanto 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, Rosales, Alvarez, & Asención, 2020; Lavado-Casimiro *et al.*, 2020). Sin embargo, los rendimientos varían sustancialmente entre diferentes condiciones topográficas y climáticas, en particular en regiones dominadas por cambios en la orografía (Asurza, Ramos, & Lavado, 2018). Además, aún existe 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).

En 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 de 1997 a 2015, cuyos datos se evaluaron mediante investigación (Mahavik & 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, Huffman, Bolvin, & Nelkin, 2019).

Evaluaciones de la calidad de la información de precipitación provenientes de productos satelitales realizadas en la zona central de EUA 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, Lin, & Bras, 2018). En China, en términos de precipitación diaria, varias investigaciones demostraron que el producto IMERG V05 por general representa mejor las estimaciones de precipitación diaria con respecto a los productos TMPA-3B42V7 (Multi-Satellite Precipitation Analysis) y TRMM (Yuan *et al.*, 2019). Wang, Tang, Han, Guo y Hong (2018) llegaron a conclusiones similares y obtuvieron un 20 % de mejora en relación con 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 de Khodadoust, Saghafian y Moazami (2017), muestran resultados similares al comparar el producto IMERG con el producto TRMM en Irán, incluso recomiendan el producto IMERG para su aplicación en países donde se carece de una adecuada instrumentación pluviométrica.

En la modelación hidrológica de la cuenca del Amazonas en Perú y Ecuador se utilizó información de precipitación del producto GPM-IMERG V03D Final Run; se encontró que para la cuenca del Ucayali —donde está la región Cusco— y la cuenca del Vilcanota (motivo de la aplicación de este estudio) tanto el producto IMERG como el producto TMPA V7 y TMPA RT representan de modo adecuado los caudales observados (Zubieta *et al.*, 2017).

Para utilizar los datos de productos satelitales es necesario evaluarlos de forma previo en cuanto a datos de pluviómetros (Moazami & Najafi, 2021). Así, se pueden usar 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, encontraron 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 en relación con 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.

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 de 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 & SENAMHI, 2012).

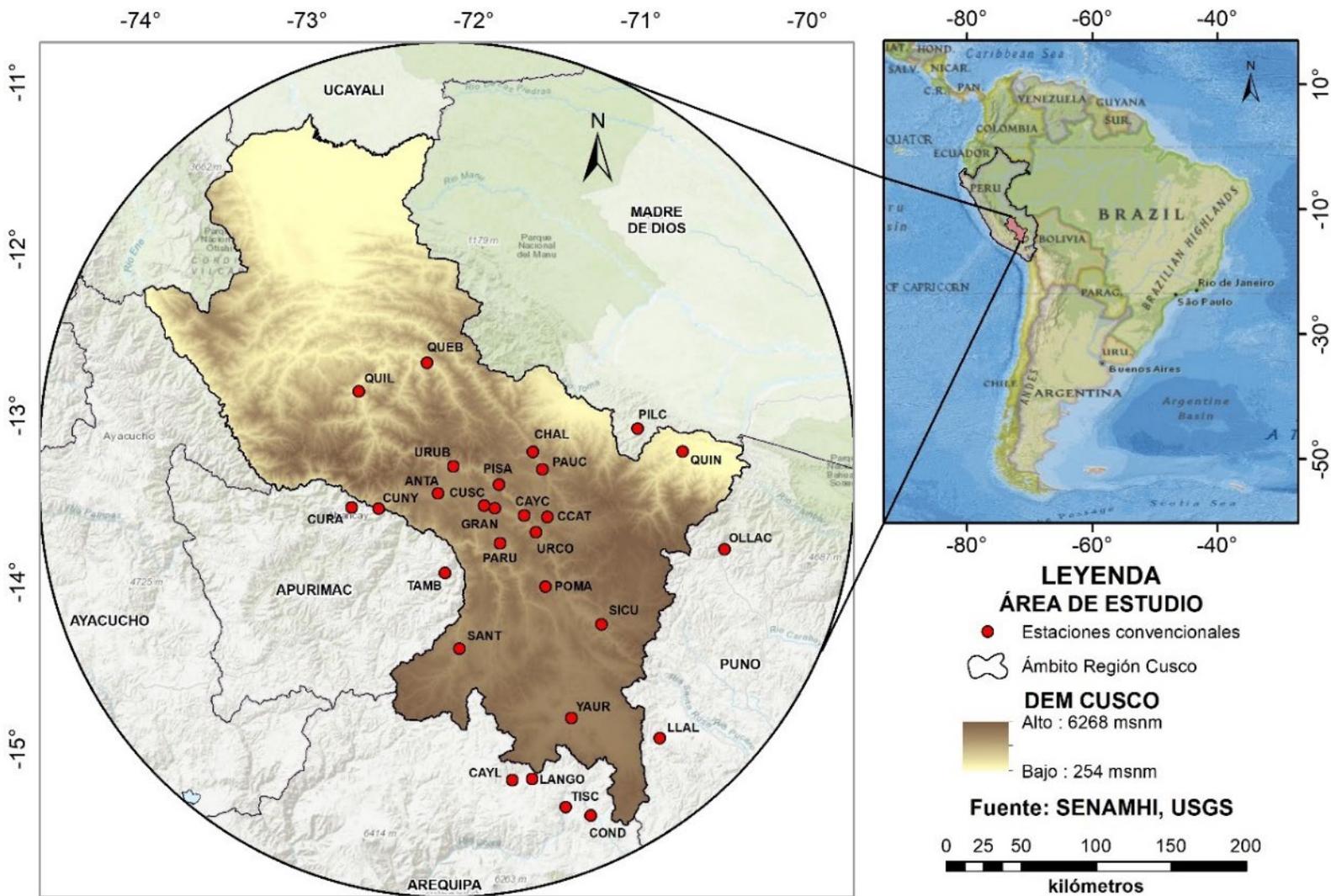


Figura 1. Región Cusco y estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis regional de frecuencias.

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 glaciar, con hielo perenne y temperaturas muy bajas (sur del Cusco); a menor altitud (noreste del Cusco) se caracteriza por zonas con

caracteres climáticos que van desde el templado hasta semicálido, con precipitaciones y humedad en la estación de verano, resultando ser los más altos del Perú (SENAMHI, 2021). La región está particularmente 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, Seimon, & Kelly, 2014; Lavado & Espinoza, 2014).

Materiales y métodos

Datos utilizados

El conjunto de datos recopilado consiste en las precipitaciones diarias máximas anuales (PDMA), provenientes de 29 estaciones meteorológicas, distribuidas dentro y cerca de 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 a partir de las estaciones presentaron falta de datos debido a periodos no operativos. Estos registros se sometieron 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 de 2000 a 2019, que combina todos los pasivos de microondas (PMW) e infrarrojos (IR) de los satélites de la constelación GPM. Este producto se obtuvo de la página web de la

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

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

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

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 (Kasi, Maheswaran, & Jarajapu, 2022).

IMERG presenta tres productos: "Early" (cuatro 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 se recomienda para investigaciones, dado que provee estimaciones más confiables (Huffman *et al.*, 2019; Moazami & Najafi, 2021) y fue el que se usó en esta investigación.

Metodología

Los datos diarios obtenidos del IMERG se sometieron a pruebas de identificación de datos atípicos de Grubbs (Barbato, Barini, Genta, & Levi, 2011). En la mayoría de las estaciones se encontraron datos atípicos, en especial en los años 2017, 2018 y 2019, que mostraron valores altos (sobreestimación); en 2007 mostraron valores bajos. Esta práctica mejoró de forma sustancial la calidad de la información (Figura 2). Esta sobreestimación también la observaron Zubieta *et al.* (2017).

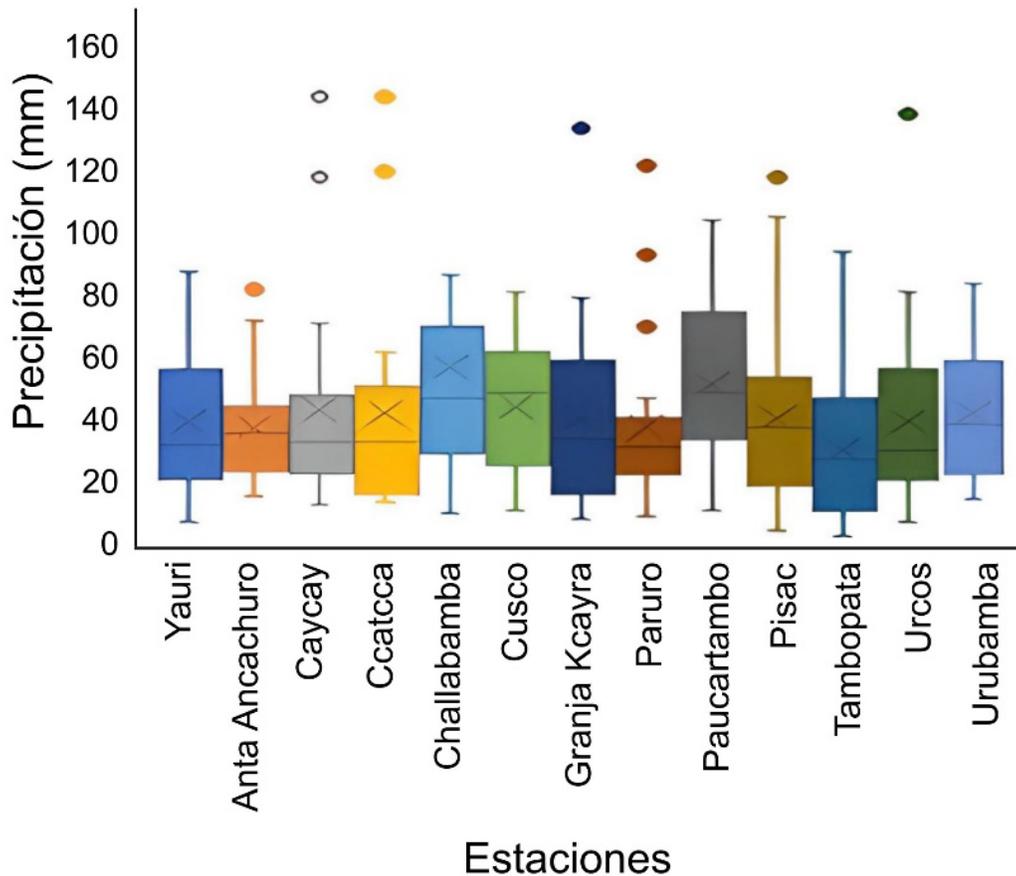


Figura 2. Identificación de valores atípicos en los datos provenientes del producto IMERG.

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, a fin 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 .

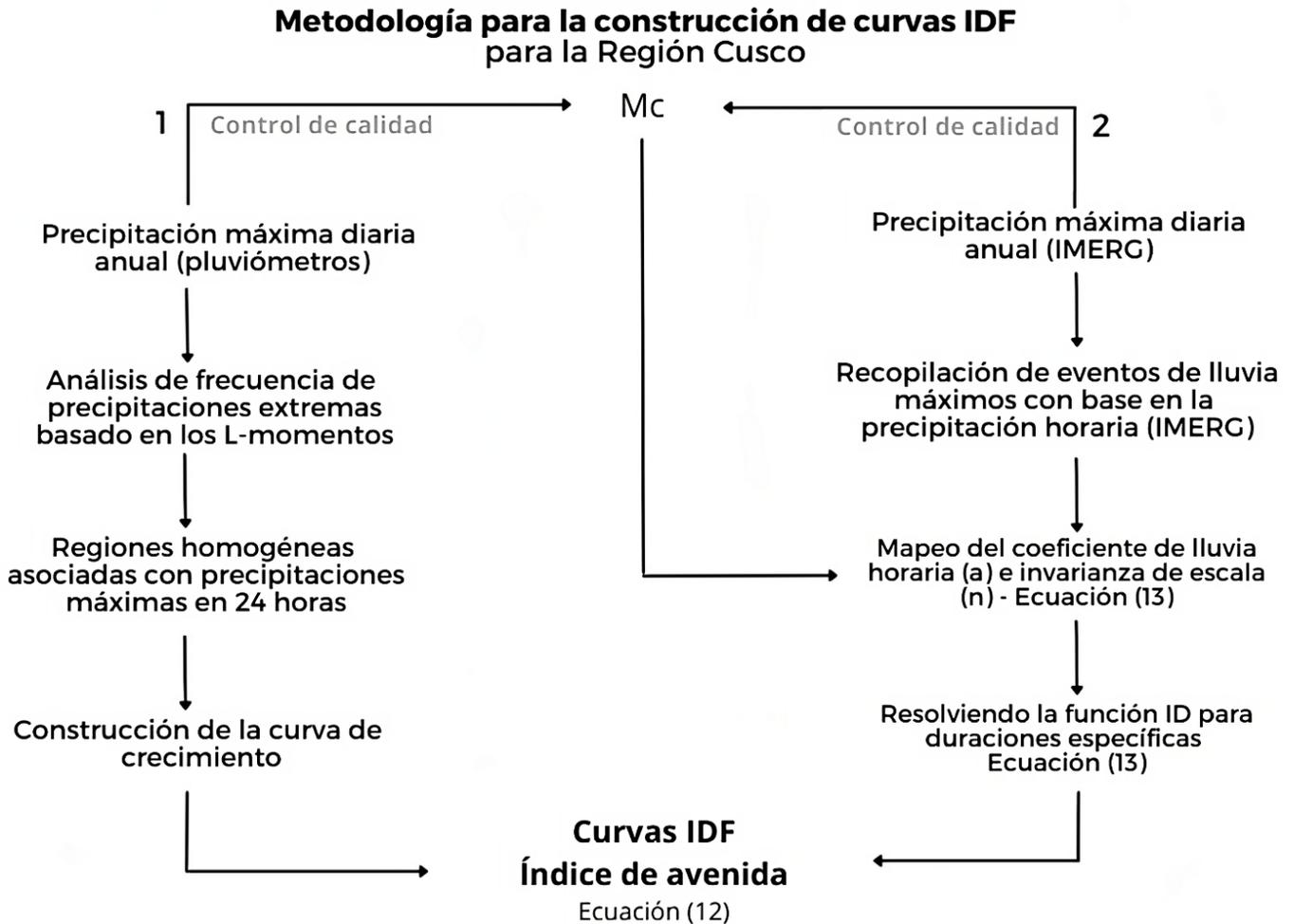


Figura 3. Metodología con enfoque mixto adoptada para la construcción de curvas IDF, M_c =Factor de corrección.

La estimación del factor M_c y el cálculo de los parámetros a y n se hicieron para cada estación meteorológica; sin embargo, el factor de

crecimiento se estimó por región homogénea, tal como lo plantean Qamar *et al.* (2017).

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 periodo de retorno (T). Los valores de T empleados 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;

" 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 subhorarios.

De acuerdo con 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 & Najafi, 2021).

Para llevar a cabo 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 Mc que se utiliza en la corrección de datos satelitales (Hunink, Immerzeel, & Droogers, 2014).

Luego se estimaron los factores de corrección para las 29 estaciones, obteniendo valores que varían desde 0.61 para la estación de Urubamba hasta 1.1 para la estación de Tambobamba. Dichos valores de Mc se usan 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 Mc muestran que los datos del IMERG presentan valores superiores a los observados.

Por último, con el uso del paquete R y con base en la información descargada del IMERG de precipitaciones máximas con distinta duración, se pudieron 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 emplearon predictores físicos estandarizados (altitud, latitud, longitud y precipitación media anual); luego se adaptó el método de agrupamiento jerárquico de Ward en consideración con las estadísticas de los L-momentos (Charrad, Ghazzali, Boiteau, & Niknafs, 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, Vogel, Foufoula-Georgiou, 1993; Hosking & Wallis, 1997; Anctil, Larouche, Viau, & Parent, 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 & Srinivasan, 1999).

Los L-momentos son combinaciones lineales de momentos ponderados (MP), según la definición de Hosking (1990), y Landwehr, Greenwood, Matalas y Wallis (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; $F_x(X)$, la función de distribución acumulativa, y r es 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 es el valor j -ésimo. Para cualquier distribución, los primeros cuatro L-momentos se calculan con facilidad 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 , la medida de escala; λ_3 , la medida de desviación, y λ_4 es la medida de curtosis. Las relaciones de los L-momentos (L-coeficiente de variación, L-asimetría y L-curtosis) se definen como sigue:

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

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 $u_i = [t^{(i)}, t_3^{(i)}, t_4^{(i)}]^T$ 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

T₄. 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 se utiliza para analizar la heterogeneidad en cada una de las regiones homogéneas propuestas (Wallis, Schaefer, Barker, & Taylor, 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 $|Z^{DIST}|$ 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 & 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, a fin de identificar de forma gráfica la función más cercana a la muestra de estudio (Kumar, Chatterjee, Kumar, Lohani, & Singh, 2003; Lin & Chen, 2006).

Después de haber identificado la distribución de frecuencia adecuada para cada región homogénea se estiman los cuantiles para diferentes periodos 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 por lo general se toma como la media de la precipitación diaria máxima anual. Este hecho hace que la información resultante con base en 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. Asimismo, para cada simulación se calcularon los errores en la curva de crecimiento simulada y los cuantiles, y luego se estimaron el sesgo, error cuadrático medio (RMSE) y límites de error del 90 %.

Previo a analizar la relación entre datos de lluvia observada y satelital se empleó el factor de corrección M_c 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).

Resultados

Regiones homogéneas

Luego del análisis regional de frecuencia basado en los L-momentos se definieron cuatro 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.

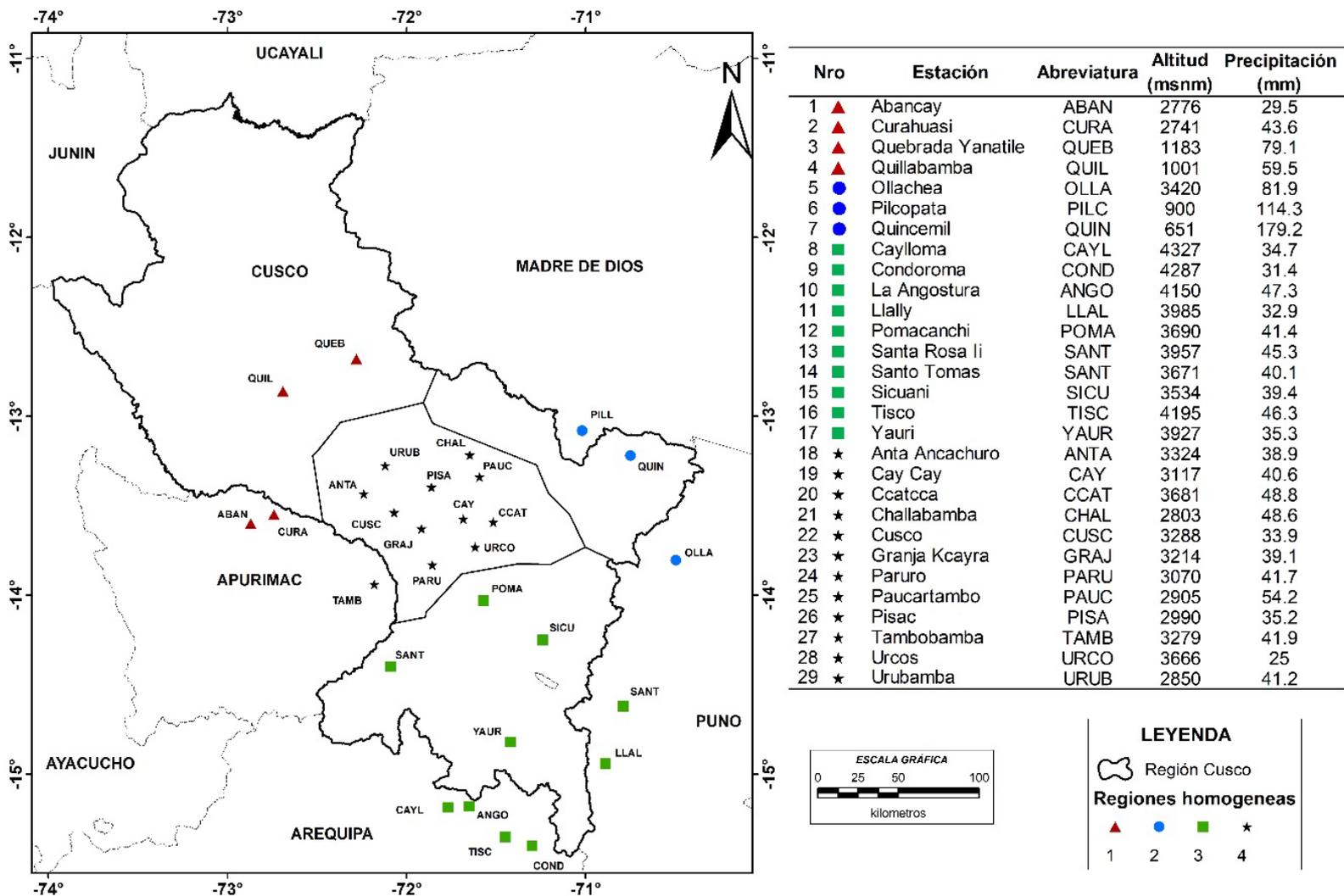


Figura 4. Distribución espacial de las estaciones meteorológicas por región homogénea.

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.

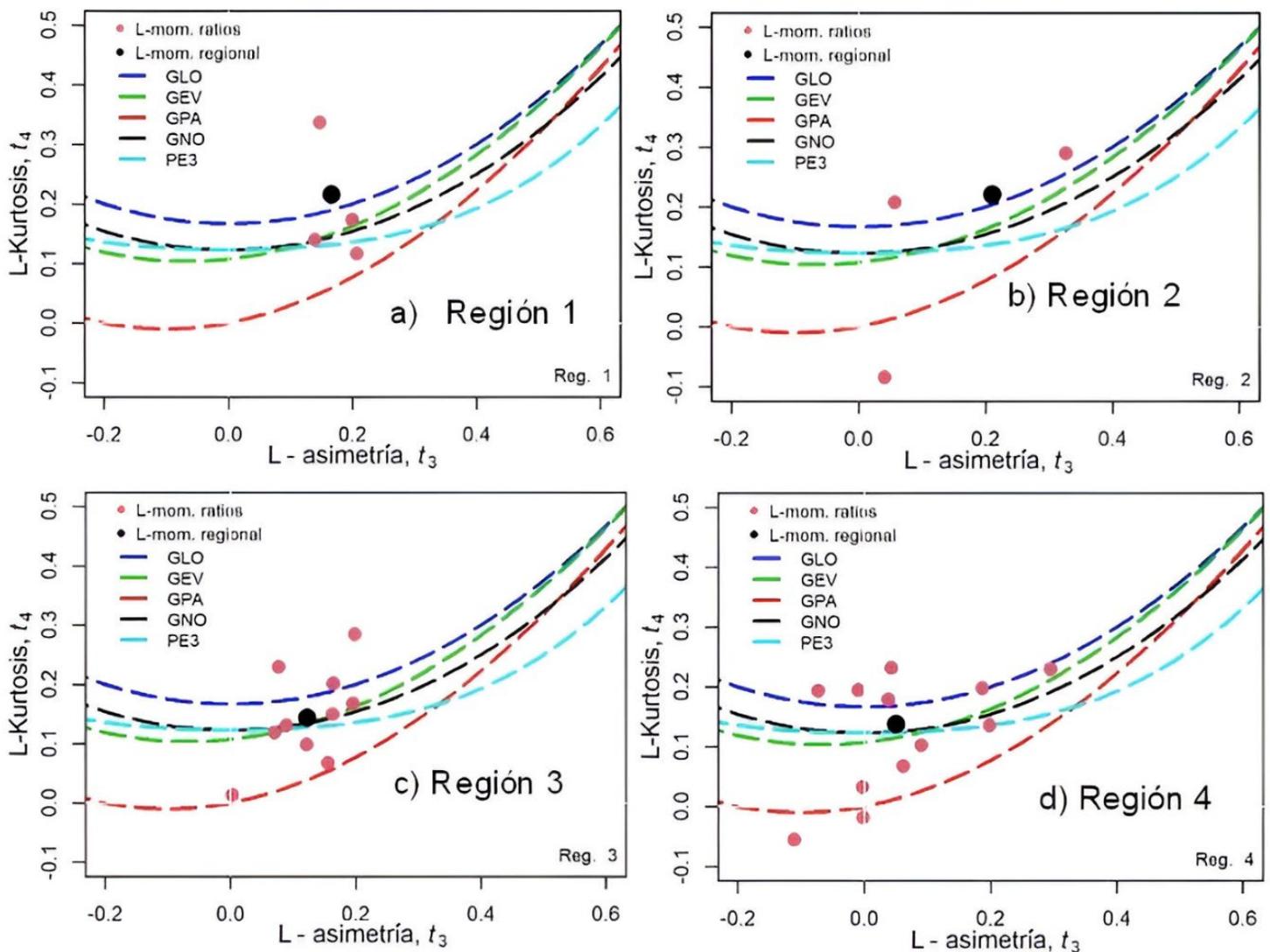


Figura 5. Diagrama de los L-momentos de las distribuciones en las regiones identificadas: a) región 1, distribución elegida GLO; b) región 2, distribución elegida GLO; c) región 3, distribución elegida GNO, y d) región 4, distribución elegida GNO.

Se determinaron los factores de crecimiento (FC) para los periodos de retorno (T_r) de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 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 se debe tal vez 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; la región 3 presenta condiciones intermedias. Esta similitud entre las regiones 1 y 2 pueden deberse al régimen climático estacional, ya que se ubican sobre todo en zonas amazónicas; mientras que las regiones 3 y 4 están ubicadas en zonas andinas.

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 |

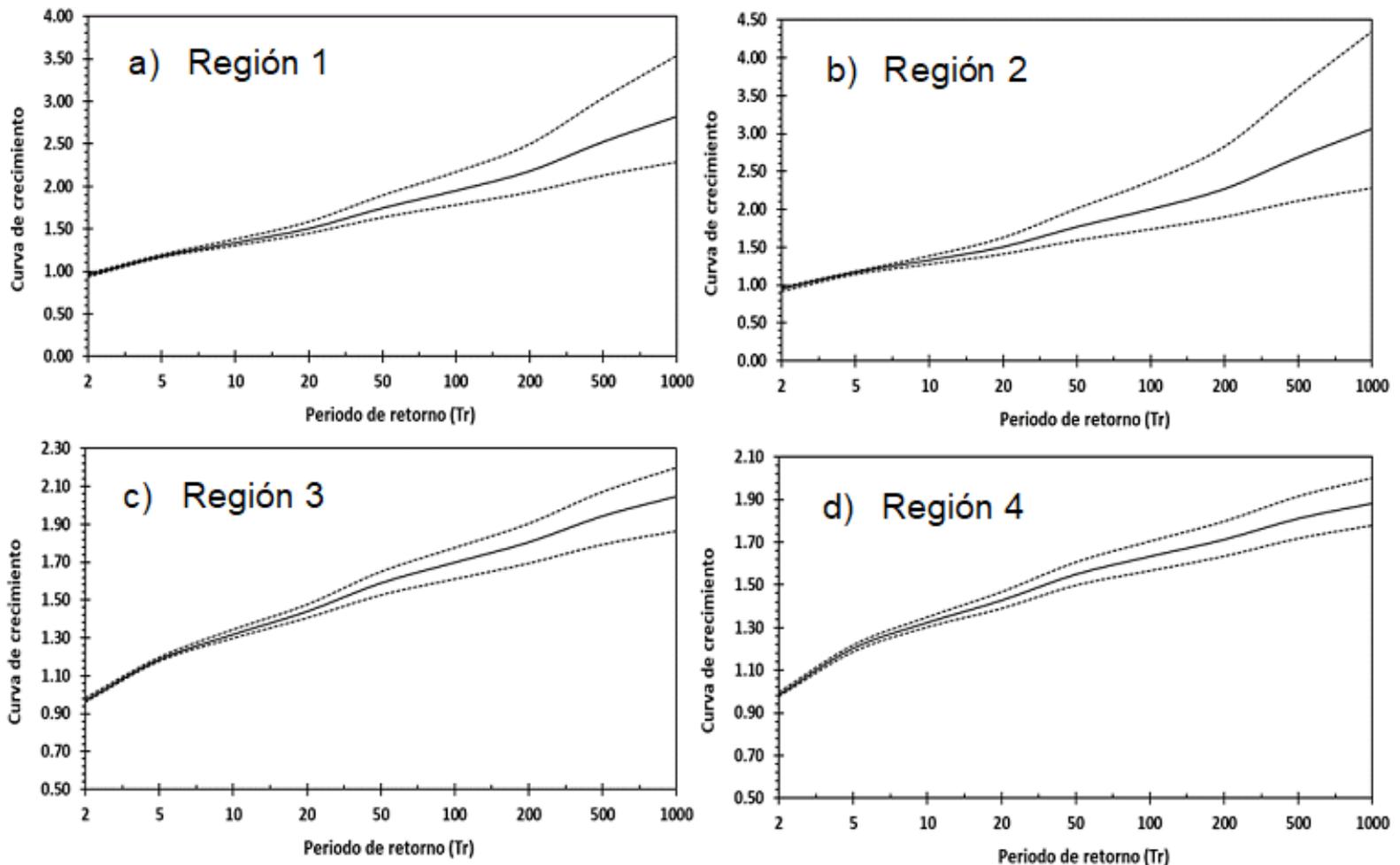


Figura 6. Curva de crecimiento adimensional por región homogénea.

Relación entre datos de lluvia tanto satelital como observados y factor M_c

Para analizar el vínculo entre la lluvia observada y aquella obtenida por el satélite IMERG, se seleccionaron dos estaciones (Urubamba y Tambobamba). Los valores encontrados para M_c variaron desde 0.61 para la estación de Urubamba hasta un valor de $M_c = 1.1$ para la estación de

Tambobamba (Figura 7). Tales 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.

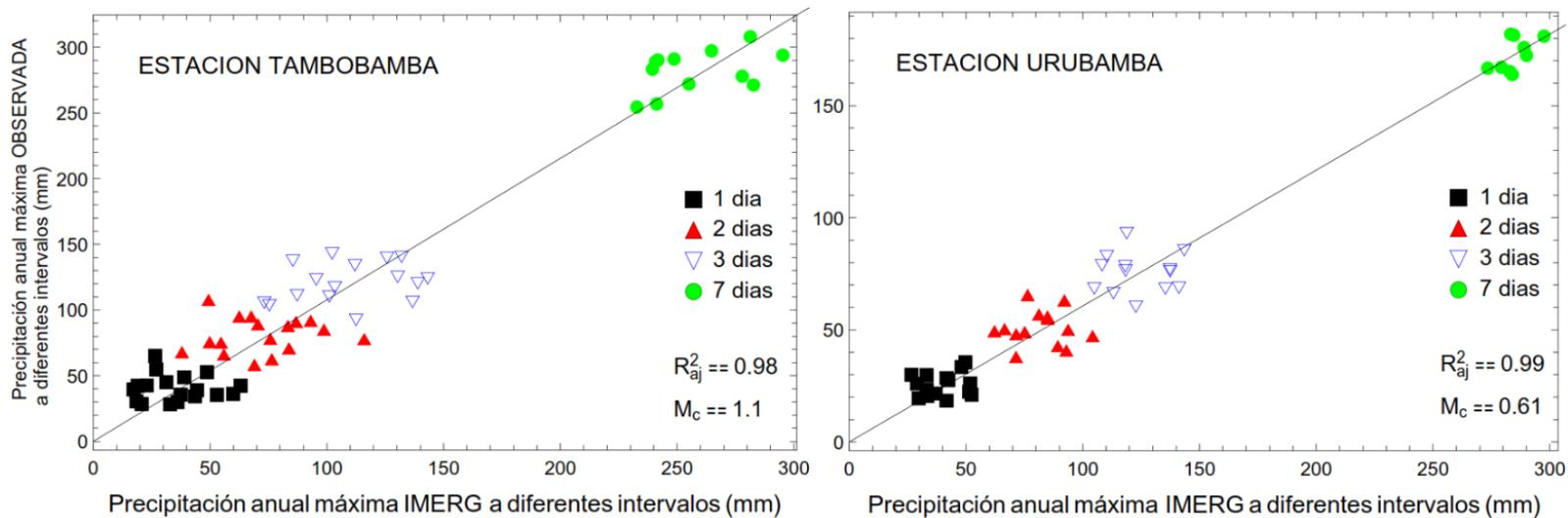


Figura 7. Estimación del factor de corrección M_c con base en los datos diarios observados, y datos IMERG para las estaciones de Tambobamba y Urubamba.

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).

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).

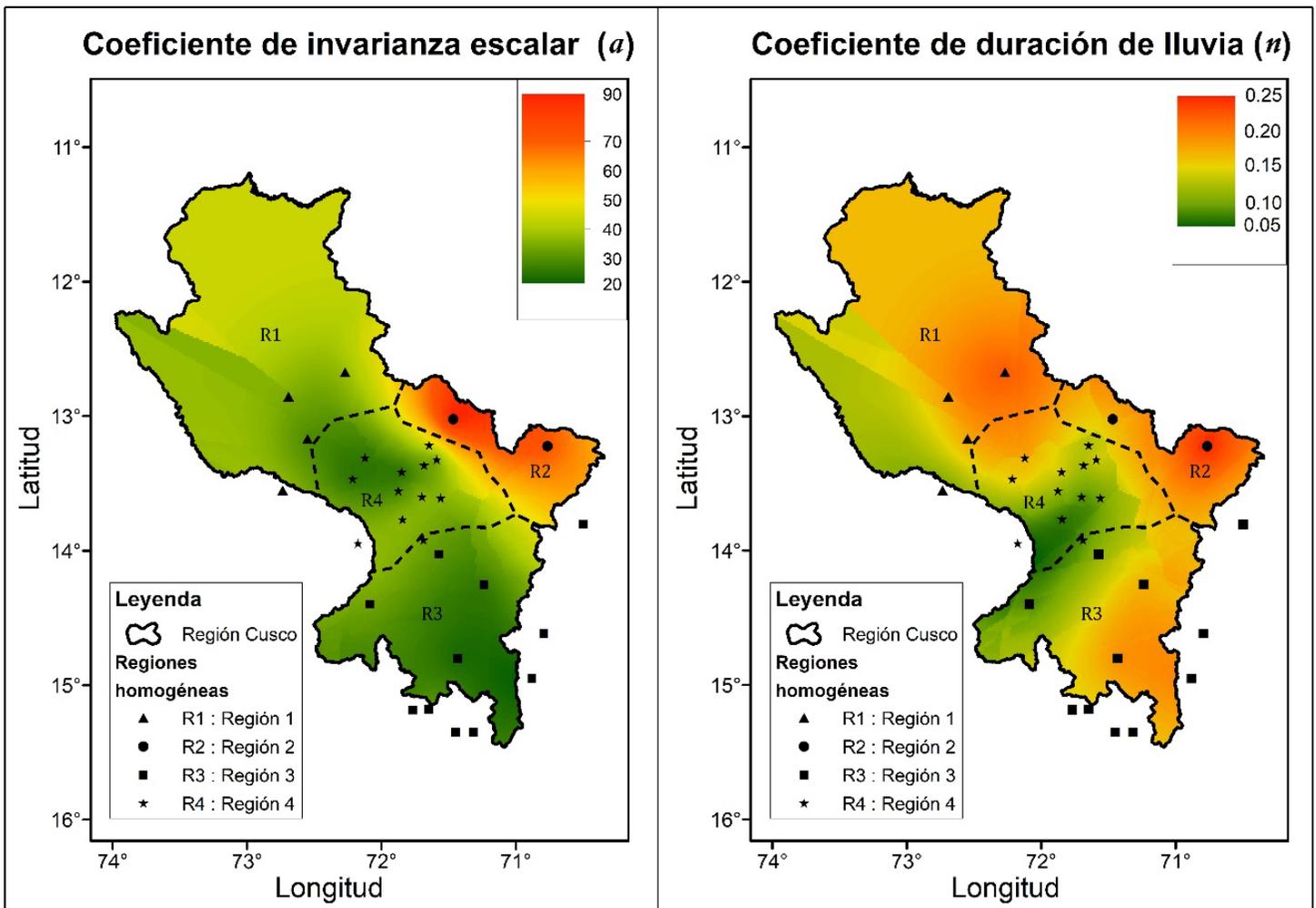


Figura 8. Mapeo del coeficiente de duración de lluvia horaria " a " y del exponente de la invarianza de escala " n " en la región Cusco.

Los valores de a encontrados para la zona de sierra de la región del Cusco son 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).

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).

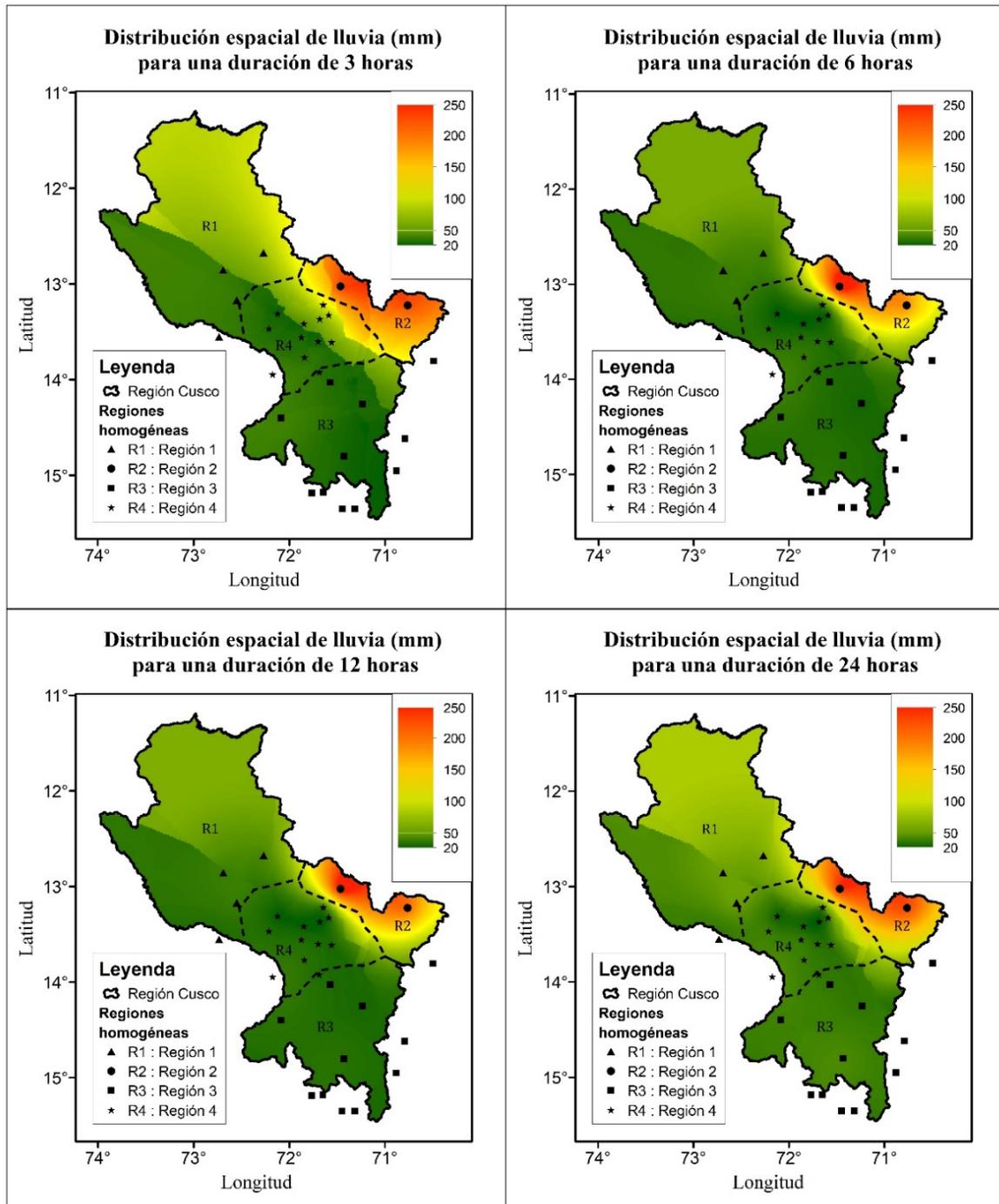


Figura 9. Mapeo de $\bar{h}(d)$ en la región Cusco para duraciones de 3, 6, 12 y 24 horas.

Con base en estos valores obtenidos, se generan mapas ráster mediante interpolación para periodos de retorno de 20 y 100 años, y para duraciones de 3, 6, 12 y 24 horas (Figura 10 y Figura 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; y valores medios y transiciones en la ceja de selva, selva norte y sectores próximos a Challabamba y Paucartambo.

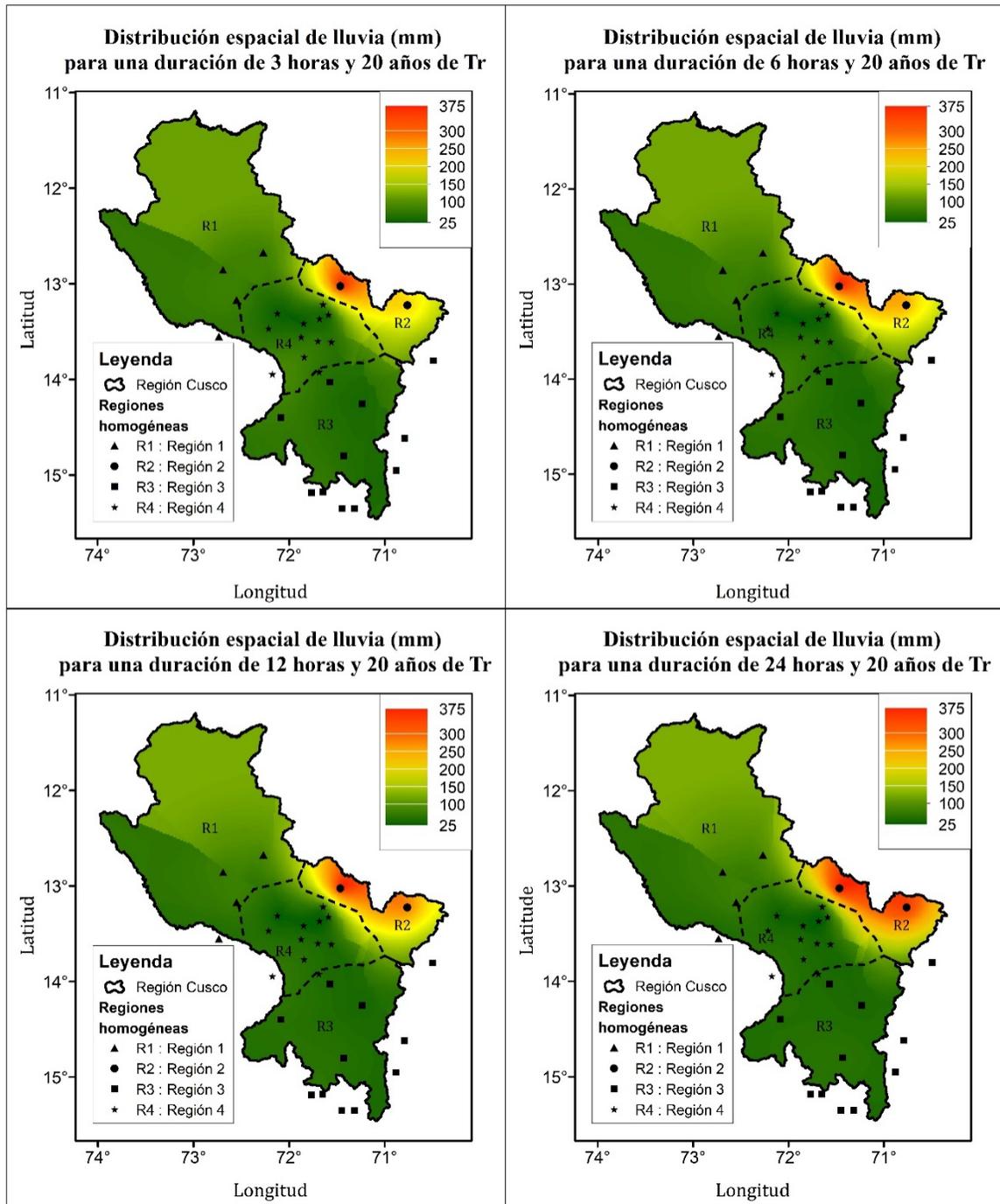


Figura 10. Mapas de lluvias extremas para duraciones de 3, 6, 12, y 24 horas y periodo de retorno de 20 años.

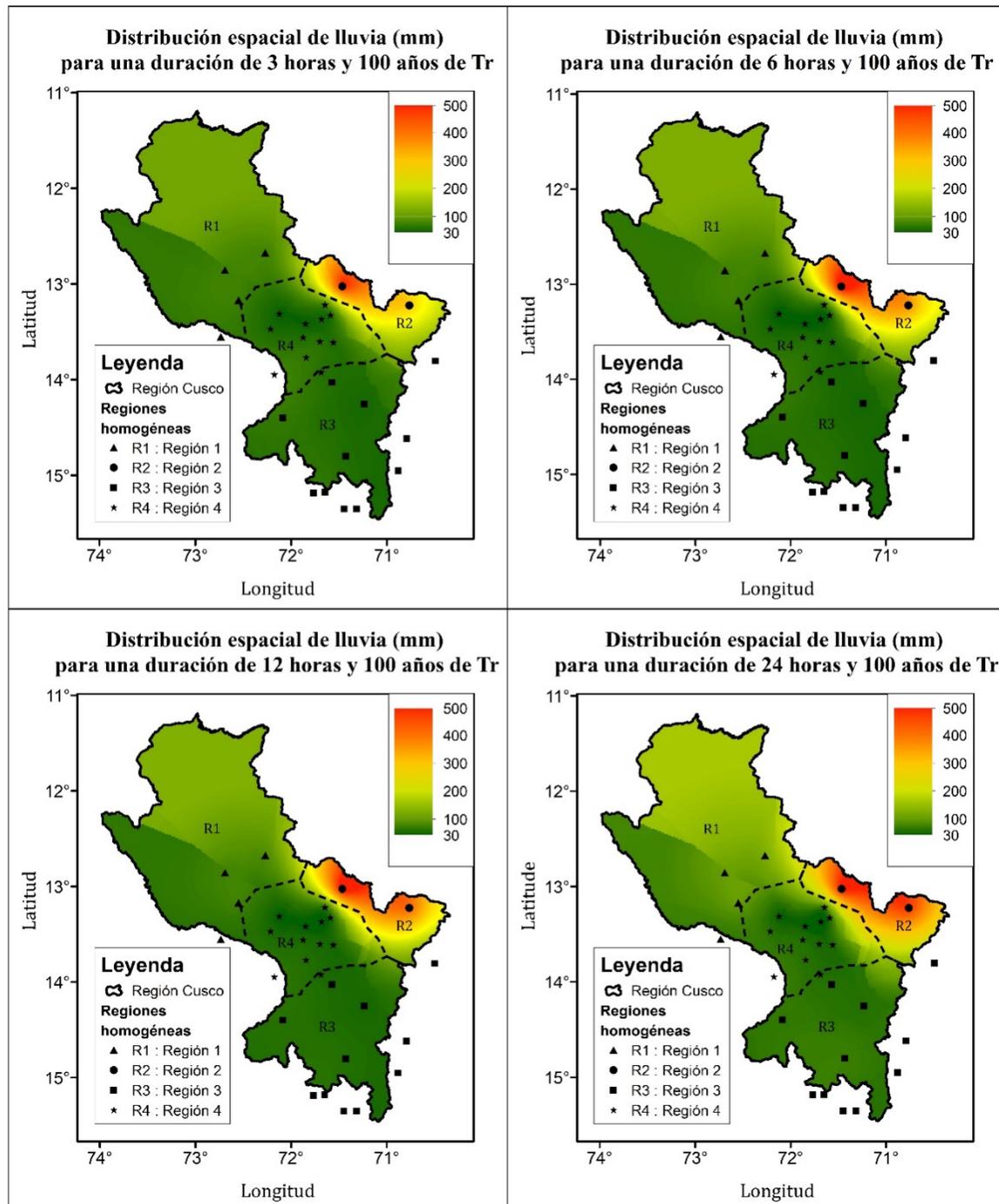


Figura 11. Mapas de lluvias extremas para duraciones de 3, 6, 12, y 24 horas y periodo de retorno de 100 años.

Incertidumbre de los resultados obtenidos

Se compararon valores a partir del uso del enfoque mixto y del producto IMERG con valores obtenidos desde 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. Asimismo, las estaciones que presentan valores más bajos de RMSE son 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, 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 |
| | | 1 000 | 9.23 | 1.99 |
| | 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 | | |
| 1 000 | 10.88 | 1.21 | | |

| Región | Estación | Tr Año | IMERG | Enfoque mixto |
|----------|-------------------|--------|-------|---------------|
| | 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 |
| | | 1 000 | 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 |
| | | 1 000 | 9.96 | 1.10 |
| 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 |
| | | 1 000 | 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 |
| | | 1 000 | 37.58 | 2.10 |

| Región | Estación | Tr Año | IMERG | Enfoque mixto |
|----------|--------------|--------|-------|---------------|
| 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 |
| | | 1 000 | 12.57 | 0.51 |
| | 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 |
| | | 1 000 | 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 |
| | | 1 000 | 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 |
| | | 1 000 | 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 |
| | | 1 000 | 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 |
| | | 1 000 | 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.

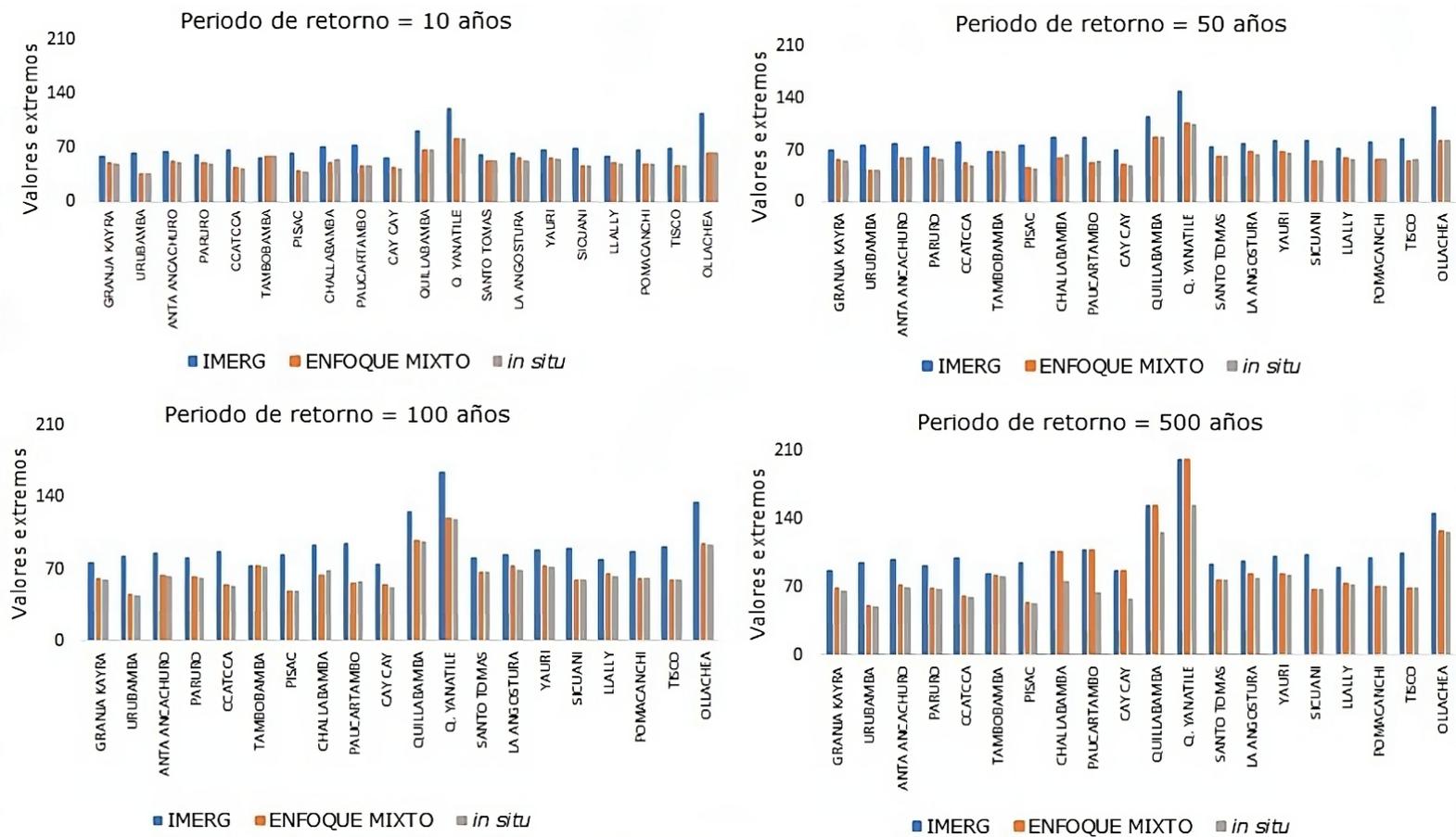


Figura 12. Comparación de valores de precipitación obtenidos mediante datos del IMERG, enfoque mixto y datos observados para diferentes periodos de retorno y estaciones representativas.

Discusión

La densidad promedio de estaciones consideradas 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 Organización Meteorológica Mundial (OMM), la cual indica 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, en las últimas décadas surge la importancia y/o necesidad de evaluar la aplicabilidad de datos satelitales en la estimación de eventos hidroclicmáticos extremos en zonas andinas y amazónicas del Perú con fines de prevención (Zubieta *et al.*, 2019). Tal 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 & 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 (M_c). La estimación de este factor M_c y el cálculo de los parámetros necesarios a y n se hizo por cada estación meteorológica; sin embargo, el factor de crecimiento se valoró 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. Dichos mapas pueden ser útiles para el diseño de infraestructura hidráulica para sistemas de drenaje pluvial o control de inundaciones (Fernández & Lavado, 2017).

El empleo de productos IMERG para análisis de frecuencias y representación de caudales extremos puede conducir a rendimientos satisfactorios (Jiang *et al.*, 2022; Chen, Zhu, Wang, & Liao, 2022). De hecho, en nuestro estudio, en comparación con 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. Ello 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 se asocia posiblemente con 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 las regiones 3 y 4. En comparación a las regiones 1 y 2, la 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. Tal nivel de incertidumbre se puede deber 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, en particular en zonas amazónicas del norte y este del Cusco. Ello 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, el uso 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 utilizarse para generar información de IDF en zonas no monitoreadas o carente de datos (Fernández & Lavado, 2017).

Conclusiones

Esta investigación documenta la aplicación del análisis regional de frecuencias de precipitaciones máximas en 24 horas; se proponen 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. A partir de 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 con 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 periodo 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.

Agradecimientos

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

Referencias

- Ancil, F., Larouche, W., Viau, A. A., & Parent, L. E. (2002). Exploration de l'indicateur standardisé de précipitation à l'aide d'une analyse statistique régionale. *Canadian Journal of Soil Science*, 82(1), 115-125. 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. DOI: 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. DOI: 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. DOI: 10.1080/02664763.2010.545119

- Bergmann, J., Vinke, K., Fernández-Palomino, C. A., Gornott, C., Gleixner, S., Laudien, R., Lobanova, A., Ludescher, J., & Schellnhuber, H. J. (2021). *Cambio climático y migraciones en el Perú*. Recuperado de <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 Resources Research*, 34(4), 741-750. DOI: 10.1029/98WR00096
- Cassalho, F., Beskow, S., Vargas, M. M., De Moura, M. M., Fernandes-Ávila, L., & De Mello, C. R. (2017). Hydrological regionalization of maximum stream flows using an approach based on L-moments. *RBRH*, 22(0). DOI: 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. DOI: 10.18637/jss.v061.i06
- 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. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.07.032
- CRED, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2018). *Economic losses, poverty & disasters, 1998-2017*. Recuperado de https://www.preventionweb.net/files/61119_credeconomiclosses.pdf

- Dalrymple, T. (1960). *Flood-Frequency analyses. Manual of hydrology. Part 3. Flood-flow techniques.* Recuperado de <https://pubs.usgs.gov/publication/wsp1543A>
- Espinosa-López, J. A., Ibáñez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramírez, R., & 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. DOI: 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. DOI: 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. DOI: 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. *Atmospheric Research*, 248, 105188. DOI: <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.* Recuperado de 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. DOI: 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. DOI: 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. DOI: 10.1029/92WR01980
- Hosking, J. R. M., & Wallis, J. R. (1997). *Regional frequency analysis: An approach based on L-moments*. DOI: 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). In: Levizzani, V., Kidd, C., Kirschbaum, D. B., Kummerow, C. D., Nakamura, K., & Turk, F. J. (eds.). *Satellite Precipitation Measurement*. Vol. 67 (pp. 343-353). DOI: 10.1007/978-3-030-24568-9_19
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., 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. Recuperado de https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_A_TBD_V06.pdf

- 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. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.036
- INDECI, Instituto Nacional de Defensa Civil. (2012). *Evaluación del impacto socio económico de la temporada de lluvias 2010 en la región del Cusco*. Recuperado de <http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc1934/doc1934-contenido.pdf>
- INGEMMET, Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (2010). *Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú*. Recuperado de http://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA%20PUBLICAR/INGEMMET/Mapa_Susceptibilidad_movimientos_en_masa_Peru_2010.pdf
- IPCC, Panel Intergubernamental del Cambio Climático. (2015). *El Quinto Informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático*. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Jiang, S., Ding, Y., Liu, R., Wei, L., Liu, Y., Ren, M., & Ren, L. (2022). 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 Sensing*, 14(17), 4406. DOI: 10.3390/rs14174406
- Kasi, V., Maheswaran, R., & Jarajapu, D. C. (2022). *Framework for developing IDF curves using satellite precipitation: A case study using GPM-IMERG V6 data*. *Earth Science Informatics*, 15(11), 1-17. DOI: 10.1007/s12145-021-00708-0

- 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. DOI: 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. DOI: 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. DOI: 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*. *Hydrological Sciences Journal*, 57(4), 37-41. DOI: 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. DOI: 10.1590/S0102-77862014000200003
- Lavado-Casimiro, W., Jimenez, J. C., Llauca, H., Leon, K., Oria, C., Llacza, A., Huerta, A., Felipe, O., Acuña, J., Rau, P., & Abad, J. (2020). *The first system for flash flood monitoring and forecasting in Peru*. DOI: 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. DOI: 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. DOI: 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. DOI: 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. DOI: 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. DOI: 10.1175/JHM-D-16-0277.1
- MINAM, Ministerio del Ambiente. (2015). *Mapa de susceptibilidad física del Perú*. Recuperado de <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/01/MAPA-DE-SUSCEPTIBILIDAD-FISICA.pdf>

- MINAM, Ministerio del Ambiente. (2016). *El Perú y el cambio climático. Tercera comunicación nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Recuperado de <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. DOI: 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. DOI: 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. DOI: 10.1007/s11269-008-9378-x
- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (1994). *Guía de prácticas hidrológicas. Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones* (OMM-N° 168). Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial.
- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (2010). *Guía del Sistema Mundial de Observación* (OMM-N° 252). Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial.

- PACC & SENAMHI, Programas de Adaptación al Cambio Climático & Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2012). *Caracterización climática de las regiones Apurímac y Cusco*. Recuperado de <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. DOI: 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. DOI: 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. DOI: 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. DOI: 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. Revista El CEPROSIMAD*, 8(2), 38.45. DOI: 10.56636/ceprosimad.v8i2.99
- 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. DOI: 10.1016/S0022-1694(99)00018-9
- SENAMHI, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2019). *Movimiento en masa por lluvias intensas en el Perú*. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-81.pdf>
- SENAMHI, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2021). *Climas del Perú*. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>
- SENAMHI, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2016). *Asimilación y evaluación de datos de precipitación en base a satélite en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vicanota*. Recuperado de <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/109>
- Smith, J. A. (1989). Regional flood frequency analysis using extreme order statistics of the annual peak record. *Water Resources Research*, 25(2), 311-317. DOI: 10.1029/WR025i002p00311
- Stedinger, J. R., Vogel, R. M., Foufoula-Georgiou, E. (1993). *Chapter 18. Frequency analysis of extreme events*. Recuperado de <https://sites.tufts.edu/richardvogel/files/2019/04/frequencyAnalysis.pdf>

- 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. DOI: 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. DOI: 10.3390/w12020554
- UNESCO, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2015). *Water for a sustainable world*. París, Francia: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- UNESCO, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2020). *Agua y cambio climático*. Recuperado de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611.locale=es>
- 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). DOI: 10.1029/2006WR005095
- Villacorta, S., & Fidel, L. (2012). Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 69(3), 393-399. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/148683454.pdf>

- 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. DOI: 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. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.06.064
- WMO, World Meteorological Organization. (1970). *The planning of meteorological station networks*. 265. Recuperado de <https://library.wmo.int/records/item/28777-the-planning-of-meteorological-station-networks>
- WMO, World Meteorological Organization. (1983). *Guide to hydrological practices. Vol II. Analysis, forecasting and other applications*. Recuperado de https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10027
- 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. DOI: 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. DOI: 10.3390/rs11020140
- Yurekli, K. (2005). Regional frequency analysis of maximum daily rainfalls based on L-moment approach L-Moment. *GOÜ. Ziraat Fakültesi Dergisi*, 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. DOI: 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. DOI: 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. DOI: 10.1002/joc.6009