

# EVALUACIÓN DE EVENTOS DE TORMENTAS PLUVIOMÉTRICAS CON INFORMACIÓN SATELITAL

ESTUDIO FINAL



**Citar:**

**Tupac-Yupanqui, R.; Lavado-Casimiro, W. y Felipe, O. (2022).** *Evaluación de eventos de tormentas pluviométricas con información satelital.* Estudio Final. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú –SENAMHI.

<https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1783>

**EVALUACIÓN DE EVENTOS DE TORMENTAS  
PLUVIOMÉTRICAS CON INFORMACIÓN  
SATELITAL**

**ESTUDIO FINAL**





## **DIRECTORIO**

PhD. Guillermo Antonio Baigorria Paz  
PRESIDENTE EJECUTIVO DEL SENAMHI

Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando  
DIRECTOR DE HIDROLOGÍA DEL SENAMHI

PhD. Waldo Sven Lavado Casimiro  
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES HIDROLÓGICAS DEL  
SENAMHI

## **REVISORES DEL ESTUDIO**

PhD. Waldo Sven Lavado Casimiro  
Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando

## **AUTORES**

MSc. Raúl Antonio Tupac Yupanqui Vélez  
PhD. Waldo Sven Lavado Casimiro  
Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando

**Lima-Perú**

**Mayo – 2022**

## Contenido

Resumen.....	7
1 Introducción .....	7
2 Área de estudio y materiales.....	9
2.1 Descripción del área de estudio .....	9
2.2 Datos de estaciones automáticas .....	10
2.3 Datos GPM .....	12
3 Métricas para la evaluación del producto satelital .....	12
3.1 Definición de un evento de precipitación .....	12
3.2 Evaluación de las propiedades de precipitación basadas en eventos de datos satelitales. ....	13
4 Resultados.....	15
6 Conclusiones .....	33
7 Referencias bibliográficas .....	34

## Contenido de figuras

<b>Figura 1.</b> Distribución espacial de las estaciones convencionales.....	10
<b>Figura 2.</b> Mapa de estaciones convencionales aceptadas y rechazadas .....	11
<b>Figura 3.</b> Gráfico de precipitación - duración para todos los eventos registrados a nivel nacional.....	15
<b>Figura 4.</b> Boxplot de para los eventos de tormentas detectados a nivel nacional .....	16
<b>Figura 5.</b> Histograma bidimensional para tormentas mayores a 10 mm.....	16
<b>Figura 6.</b> Histograma bidimensional para tormentas mayores a 20 mm.....	17
<b>Figura 7:</b> Histograma bidimensional para tormentas mayores a 50 mm .....	17
<b>Figura 8.</b> Tormentas detectadas y perfiles de tormentas representativos. Estación El Tigre .....	18
<b>Figura 9.</b> Tormentas detectadas y perfiles de tormentas representativos. Estación Puno.....	19
<b>Figura 10.</b> Tormentas detectadas y perfiles de tormentas representativos. Estación Iñapari .....	19
<b>Figura 11.</b> Número de tormentas detectadas por los datos observados .....	20
<b>Figura 12.</b> Número de tormentas detectadas por los datos del GPM .....	21
<b>Figura 13.</b> Lámina de lluvia promedio para cada estación en tierra.....	22
<b>Figura 14.</b> Lámina de lluvia promedio para los datos GPM.....	23
<b>Figura 15.</b> Duración de lluvia promedio para cada estación en tierra. ....	24
<b>Figura 16.</b> Duración de lluvia promedio para los datos GPM. ....	25
<b>Figura 17.</b> Duración de lluvia promedio para los datos GPM. ....	26
<b>Figura 18.</b> Entropías de los perfiles de tormenta entre la data observada (izq.) y satelital (der.) .....	27
<b>Figura 19.</b> Número de eventos detectados por datos observados y GPM. ....	29
<b>Figura 20.</b> Lámina de lluvia promedio detectadas por datos observados y GPM.....	30
<b>Figura 21.</b> Hietogramas adimensionales promedio entre datos observados (azul) y GPM (rojo) .....	30
<b>Figura 22.</b> Diferencia de entropías entre perfiles de tormentas generados por data observada y satelital. ....	32

# EVALUACIÓN DE EVENTOS DE TORMENTAS PLUVIOMÉTRICAS CON INFORMACIÓN SATELITAL

## Resumen

La evaluación de productos satelitales con estaciones automáticas en tierra fue realizada para la detección de tormentas considerando como principales características la detección, lámina y duración promedio de eventos de tormentas. Al ser la precipitación un variable discontinua en forma de eventos. Este tipo de evaluaciones basadas en eventos podrían proporcionar información adicional a las basadas en estadísticas de intervalo fijo, pero rara vez se realiza este tipo de análisis. Para abordar este problema, se utilizó el producto “Integrated Multisatellite Retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG-GPM)” contrastándolo con pluviómetros distribuidos en todo el territorio peruano. Primero se evaluó la viabilidad de usar un producto satelital para delinear las propiedades de los eventos de precipitación. Se definieron indicadores a nivel de tormentas siendo los principales el número de eventos registrados, la duración promedio y lámina promedio de lluvia. Estas métricas se aplicaron para ambos conjuntos de datos y se determinó que el IMERG-GPM presenta una similar lámina de lluvia en promedio con respecto a las estaciones automáticas. También, el IMERG-GPM registra eventos de mayor duración en promedio con respecto a las estaciones automáticas. Este análisis y comparación entre las estaciones automáticas y la data IMERG-GPM ha permitido identificar bondades y diferencias sustanciales siendo la sobre detección de eventos y duración promedio de lluvia las principales diferencias. Por otro lado, el IMERG-GPM ha podido representar de manera coherente la variabilidad de las tormentas en el territorio peruano siendo la región costa y sierra sur la que mejores resultados mostró.

**Palabras clave:** Tormenta, duración, IMERG-GPM, perfil, hietograma.

## 1. Introducción

El estudio de las precipitaciones es crucial por muchas aplicaciones meteorológicas, hidrológicas y ecológicas. Si bien las observaciones con indicadores sirven como una forma tradicional de medir la precipitación, la tecnología de teledetección ha crecido rápidamente en las últimas décadas y se ha convertido en otro método eficaz para estimar la precipitación. Al detectar las propiedades de las nubes que precipitan, los satélites estiman instantáneas de la tasa de precipitación de sensores infrarrojos (IR), sensores de microondas pasivos relativamente directos (PMW) o radar de precipitación (PR). Mediante de la combinación de múltiples fuentes satelitales, se han desarrollado productos grillados en tiempo cuasi globales (ejemplo: TRMM, CPC, CMORPH, PERSIANN o GPM), las cuales se han utilizado en una amplia gama de aplicaciones.

Las evaluaciones de estos productos satelitales son importantes y beneficiosas para que los usuarios comprendan las fortalezas y debilidades de estos productos ante sus aplicaciones. Tales investigaciones también ayudan a los desarrolladores a comprender

mejor las fuentes de error y las direcciones de mejora de los algoritmos. Por estas razones, se han realizados numerosas evaluaciones. Entre ellas, dos de los temas más importantes fueron como se comportaron los productos satelitales en términos de delinear varias propiedades de la precipitación y que factores influyeron sustancialmente en el rendimiento de los productos satelitales.

Todos estos estudios han contribuido a una mejor comprensión de los productos satelitales. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos se realizaron en escalas de tiempo fijas (es decir, cada hora, diariamente), dejando de lado el rendimiento del satélite desde la perspectiva de los eventos de precipitación.

A diferencia de muchos campos meteorológicos (ejemplo: humedad, temperatura), la precipitación es en realidad una variable discontinua, es decir, está presente en forma de eventos con una cierta extensión espacial y duración. Por lo tanto, la precipitación para diferentes duraciones no es independiente, sino que esta intrínsecamente vinculada siguiendo a las reglas de la dinámica y la termodinámica, que en conjunto constituyen todo el proceso de precipitación. Por tal motivo, la evaluación desde la perspectiva de un evento podría revelar información sobre la organización y evolución de la precipitación, pero no desde un punto de vista a intervalos fijos. Sin embargo, el rendimiento de estas propiedades basadas en eventos podría influir sustancialmente en la idoneidad de los productos satelitales en muchas aplicaciones atmosféricas e hidrológicas (Donohue et al., 2012; Dunkerley, 2012). Además, los estudios sobre la mayoría de los aspectos indicaron el desempeño de varios satélites en diferentes dominios espaciales y temporales, que en su mayoría se han atribuido a las diferencias en los tipos y sistemas de precipitación. Sin embargo, para el mismo sistema de precipitación, las propiedades cambiantes de las nubes precipitantes durante la evolución de su ciclo de vida también podrían conducir a un rendimiento de satélite diferente, pero apenas se han considerado, aunque está más estrechamente relacionado con la dinámica de las precipitaciones.

Sin embargo, casi ningún estudio ha realizado una evaluación sistemática basada en eventos de productos satelitales, incluso los estudios que se ocuparon en parte de las evaluaciones relacionadas con eventos fueron limitados (Mei et al., 2014, 2016; Nikolopoulos et al., 2013; Rajendran & Nakazawa, 2005; Stampoulis et al., 2013; Tadesse y Anagnostou, 2009). Some of these studies assessed the event properties of satellite products for their hydrological utilities but mostly evaluated the basin-averaged properties with limited event cases and insufficient indicators (Mei et al., 2016; Nikolopoulos et al., 2013; Stampoulis et al., 2013).

Para realizar una evaluación basada en eventos de este tipo, este estudio tiene por finalidad evaluar la capacidad de los productos satelitales para delinear las propiedades de los eventos de precipitación (ejemplo: duración del evento, tasa media de precipitación y lámina total de lluvia por evento) y el seguimiento de los errores satelitales para diversas regiones en el territorio peruano.



## 2. Área de estudio y materiales

### 2.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio comprende todo el territorio peruano, el cual se extiende desde aproximadamente 0° hasta 18° 30' latitud sur y 81° 10' hasta 68° 40' longitud oeste. El territorio peruano posee una variabilidad climática muy variada, así como regímenes hidrológicos afectados por factores topográficos (Cordillera de los Andes) y climáticos (ITZC, circulación atmosférica, ENSO, etc.).

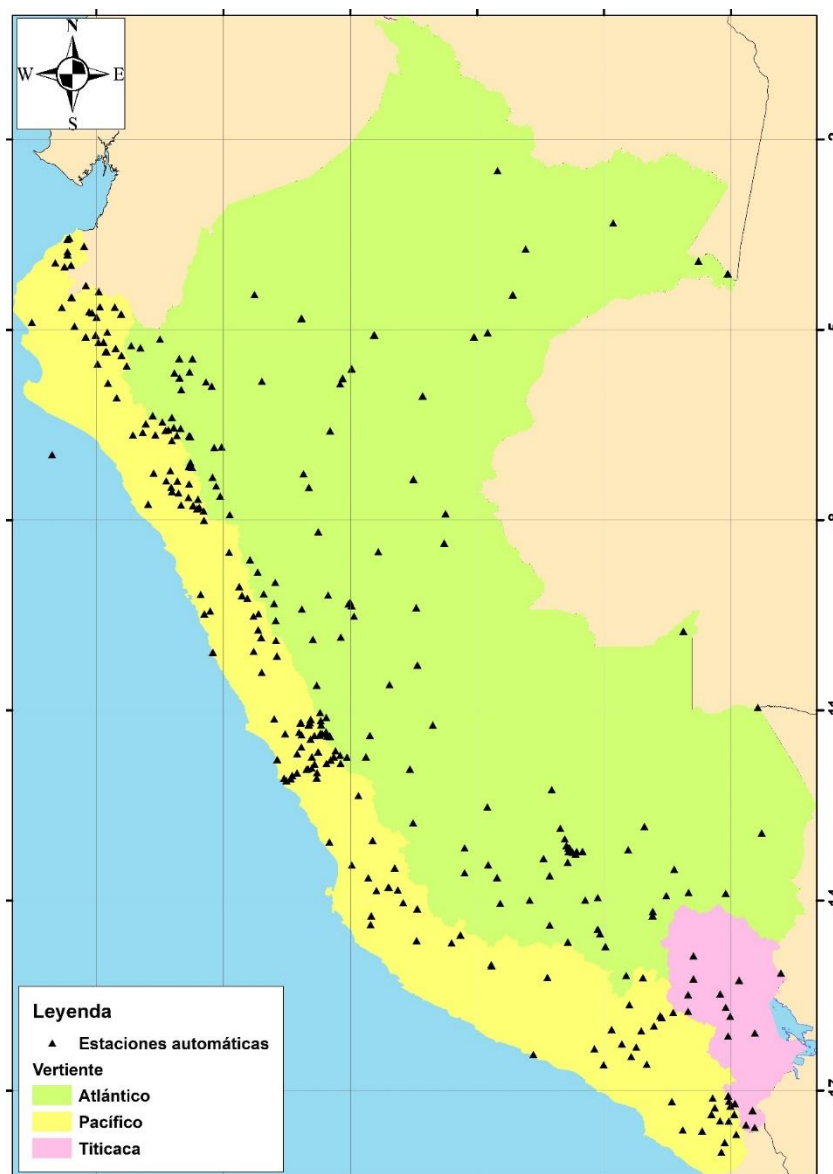
En el territorio peruano se tiene la vertiente del Pacífico que bordea la Cordillera de los Andes por el lado oeste desde los 3.4° S hasta los 18.4° S, los ríos de esta zona fluyen del este hacia el oeste siguiendo el gradiente altitudinal que va desde 6400 msnm hasta los 0 msnm (Rau et al., 2016), esta gradiente elevada favorece la ocurrencia de desbordes e inundaciones, así como procesos de erosión durante la época húmeda (Lavado et al., 2012). Sin embargo, en condiciones normales toda esta región es influenciada por el anticiclón del Pacífico Sur y la corriente de aguas frías de Humboldt lo cual genera que la costa peruana sea seca con alta humedad en el aire, siendo árida y desértica. Por el lado este de la Cordillera de los Andes se tiene la cuenca Amazónica, cuyo régimen hidrológico está influenciado por la migración de la ITCZ, transporte de humedad desde el Atlántico, temperatura superficial del Pacífico y del Atlántico. Estos factores generan una gran variabilidad espacial y temporal (interanual) de las precipitaciones a diferencia de otras regiones del Perú con valores de precipitación entre 6000 y 250 mm/año (Espinoza et al., 2009). Al sur este se tiene la cuenca endorreica del Lago Titica ubicado en el Altiplano, el régimen hidrológico está influenciado por una intensa actividad convectiva combinada por una advección de humedad desde la cuenca Amazónica durante el verano austral (Garreaud et al., 2003) mientras que durante el invierno austral el flujo de humedad del este es reemplazado por los vientos del oeste que proporcionan aire seco proveniente del océano Pacífico. Estos factores generan una fuerte estacionalidad que produce moderadas cantidades de precipitación alrededor del Lago Titicaca, con mayor abundancia de vapor de agua y precipitaciones que exceden los 1000 mm/año (Roche et al., 1990).

Dada las condiciones climáticas expuestas líneas arriba, hace que la costa del Pacífico del Perú sea principalmente una “zona seca” que solo experimenta eventos de lluvia de manera episódica. En escalas de tiempo interanuales, estos eventos de lluvia están asociados con el Fenómeno de El Niño (FEN), que es la principal influencia climática sobre las lluvias en la costa del Pacífico peruano (Lagos et al., 2008). También se puede desarrollar una temporada de lluvias debido a un leve debilitamiento del anticiclón del Pacífico sur y al desplazamiento hacia de la ITCZ (Lavado et al., 2012). Esta región exhibe una mayor variabilidad de lluvias estacionales e interanuales que las otras dos principales regiones hidrológicas del Perú: la Amazonía y la cuenca endorreica del Lago Titicaca (Lavado et al., 2012). Las precipitaciones a lo largo de la vertiente del Pacífico y la costa de América del Sur se caracterizan por un patrón complejo de variabilidad espacial y estacional relacionada con su extensión meridional y topografía prominente de la Cordillera de los Andes (Waylen y Poveda, 2002; Garreaud et al., 2009).

## 2.2 Datos de estaciones automáticas

Para el presente estudio se utilizaron los registros de precipitaciones horarias de la red nacional administradas por el SENAMHI para el territorio peruano.

La red del SENAMHI posee 328 estaciones automáticas distribuidas en todo el territorio peruano. Estos datos de precipitación se encuentran a escala horaria y abarcan desde el periodo 2014-2021. Sin embargo, estos registros también poseen datos faltantes siendo reducido el número de estaciones automáticas con registros de más 4 años. La densidad de estaciones automáticas en territorio peruano no es buena, se aprecian zonas donde no hay estaciones cercanas, esta ausencia de estaciones es más notorio en la selva tal como se aprecia en la Figura 1.



*Figura 1. Distribución espacial de las estaciones convencionales*

Según la Figura 1, se tiene que la distribución de estaciones automáticas según vertiente es de:

- Vertiente del Pacífico: 173 estaciones automáticas.
- Vertiente del Atlántico: 137 estaciones automáticas.
- Vertiente del Titicaca: 17 estaciones automáticas.

Se observa también que la cuenca del río Rímac (Pacífico central) se encuentra relativamente bien monitoreada. Diversas zonas de la vertiente del Pacífico presentan muy poca densidad de estaciones automáticas como por ejemplo el pacífico sur (Arequipa, Moquegua y zonas altas de Tacna), pacífico norte (zona desértica de Piura y Lambayeque). La vertiente del Atlántico es la región menos densa en estaciones automáticas, del mismo modo, la vertiente del Titicaca presenta una densidad de estaciones muy irregular.

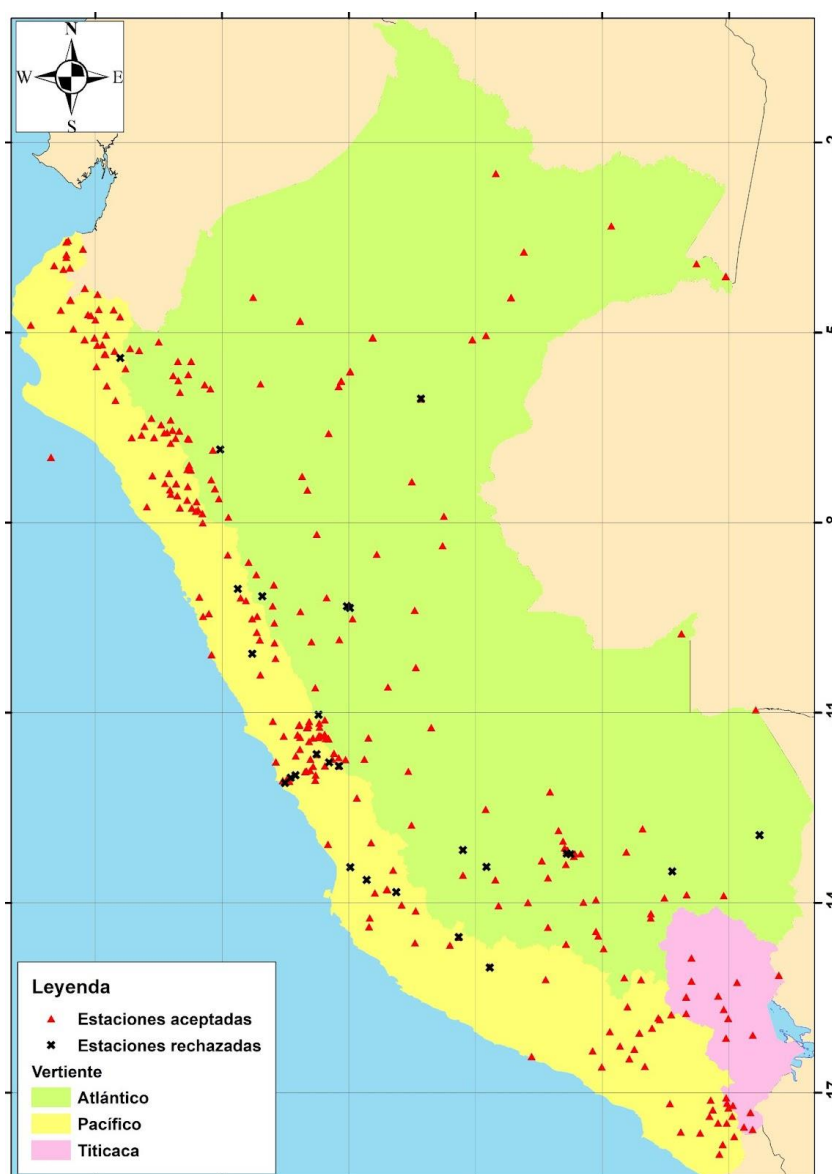


Figura 2. Mapa de estaciones convencionales aceptadas y rechazadas

El número inicial de estaciones convencionales se redujo a 280 debido al control de calidad efectuado previo al análisis. Esto es debido a que los registros están sujetos a errores los cuales dependiendo de los resultados del análisis exploratorio de datos y control calidad puede darse el caso de excluir estaciones automáticas que puedan afectar la calidad y confiabilidad de los resultados finales del presente estudio.

## 2.3 Datos GPM

En el presente trabajo se va comparar los registros de las tormentas detectadas por las estaciones automáticas con datos de sensoramiento remoto. Para tal finalidad se consideró el uso de datos del GPM.

La Medición de Precipitación Global (“Global Precipitation Measurement”) o GPM es una misión mixta en las Agencia Espacial Norteamericana (NASA) y la Agencia Espacial Japonesa (JAXA), es la sucesora de la Misión de Medición de Lluvias Tropicales o TRMM. El GPM ofrece una amplia gama de datos de precipitación en todo el globo terrestre siendo muy difundido entre la comunidad internacional. El proyecto proporciona, además, cartas de precipitación global para asistir en investigaciones en mejorar pronósticos de acontecimientos extremos, estudios de clima global para el beneficio de la sociedad.

En este estudio se utilizaron datos de la misión GPM como una fuente alternativa para los datos de las estaciones automáticas por temas de control de calidad, datos faltantes, cortos periodo de registros, poca o nula correlación con las estaciones convencionales, errores (sistemáticos y de medición) y por su poca densidad en la zona de estudio.

Los datos utilizados de la misión GPM abarcan el periodo 2001-2019 y se utilizaron las grillas en las cuales se ubican las estaciones convencionales (grilla-estación), la resolución temporal es a nivel horario (cada una hora).

La aplicación de los datos GPM en el Perú es muy diversa y se cuenta con varios estudios y temáticas como los trabajos realizados por Veliz (et al., 2018) y Zubieta (et al., 2017) para el uso de datos GPM en modelación hidrológica, estudios de climatología como el realizado por Chávez (et al., 2020), Derin (et al., 2019) cuyo trabajo evaluó el producto GPM sobre regiones complejas incluido el Perú.

## 3. Métricas para la evaluación del producto satelital

### 3.1 Definición de un evento de precipitación

En este estudio, se definió un evento de precipitación como una serie horaria de lluvias continuas ( $\geq 0.1$  mm/h) en cada grilla validada tanto para los datos observados como para los datos del GPM. Dicha definición se basa en el método de Euler considerando la discontinuidad de las observaciones de calibre en el espacio. En diferentes situaciones, los eventos de precipitación también podrían definirse de manera diferente. El método más comúnmente utilizado es el criterio de tiempo mínimo entre eventos (MIT), que

identifica dos eventos independientes cuando los tiempos sin lluvia entre ellos alcanzan o exceden un cierto intervalo (nuestra definición corresponde a MIT = 1 h).

Se aplicará el análisis exploratorio de datos para la caracterización de las tormentas detectadas, esto incluye variabilidad, intensidades y distribución temporal de las tormentas. Del mismo modo, se aplicarán técnicas gráficas para detectar las tormentas más representativas. Este análisis permitirá filtrar las estaciones con datos dudosos que pueden afectar los resultados finales del presente trabajo.

### 3.2 Evaluación de las propiedades de precipitación basadas en eventos de datos satelitales.

Las métricas que se usaremos para representar las propiedades de los eventos de precipitación se clasifican dos partes: “métricas de todo el evento” y “métricas máximas”.

Las métricas de todo el evento incluyen el número de eventos (N), la duración del evento (T, h), la profundidad del evento (D, mm) y la tasa media de precipitación del evento (R, mm / h) (Dunkerley, 2008; Haile et al., 2011; Hanel y Maca, 2014). Específicamente:

$$D = \sum_{i=1}^T I_i$$

Donde  $I_i$  (mm/h) es el ratio de precipitación en la  $i$ -ésima hora del evento.

$$R = \frac{D}{T}$$

Primero, N, así como los valores medios de T, D y R durante los períodos de estudio, tanto en los datos observados como de IMERG, se calculan en cada cuadrícula y se muestran como mapas de distribución geográfica. Este análisis tiene como objetivo revelar la diferencia de potencial entre el medidor y los datos IMERG sobre las propiedades promedio de un solo evento (excepto para N).

Para determinar las características espacio-temporales de los eventos de tormentas registrados tanto por las estaciones convencionales como para los datos del GPM, se ha comparado los perfiles de tormentas mediante gráficos normalizados y la determinación de hietogramas para todas las estaciones y grillas consideradas en el presente estudio. La aplicación del bloque alterno y su posterior normalización, permitirá obtener la estructura de los perfiles de tormentas detectados para ambas fuentes de datos.

El método del bloque alterno es una forma simple para desarrollar un hietograma de diseño utilizando datos de tormenta a nivel sub-diario, esto permitirá representar gráficamente la estructura de las tormentas. Los hietogramas están estrechamente relacionados con las tormentas de diseño asociadas a distintos periodos de retorno,

estas tormentas permitirán simular caudales de diseño para su posterior uso en ingeniería u otra especialidad. Es importante mencionar que para determinar la tormenta de diseño se recomienda contar con información de un pluviógrafo o estación meteorológica automática, ya que estos equipos proveen información instantánea. Este análisis se efectuará para todas las tormentas representativas de cada estación - grilla seleccionada, esto es, se usarán sólo las tormentas que superen el percentil 75 del total de tormentas detectadas para cada estación - grilla, esto es con la finalidad de filtrar eventos de tormentas insignificantes y enfocarse en las tormentas de altos periodos de retorno. Todos los perfiles de tormenta acumulados serán promediados para cada estación y grilla a modo de obtener un perfil único y representativo.

Estos perfiles de tormentas promediados obtenidos por los bloques alternos, serán normalizados y acumulados. Para evaluar la performance del GPM en capturar la estructura espacio-temporal de estos perfiles con respecto a los datos observados, se utilizarán diversos criterios de bondad de ajuste como:

- PBIAS:  $100 * \frac{X_s - X_o}{X_s}$
- Entropía de Shannon H:  $H(x) = \sum_i p(x_i) * \log_2 \left( \frac{1}{p(x_i)} \right)$

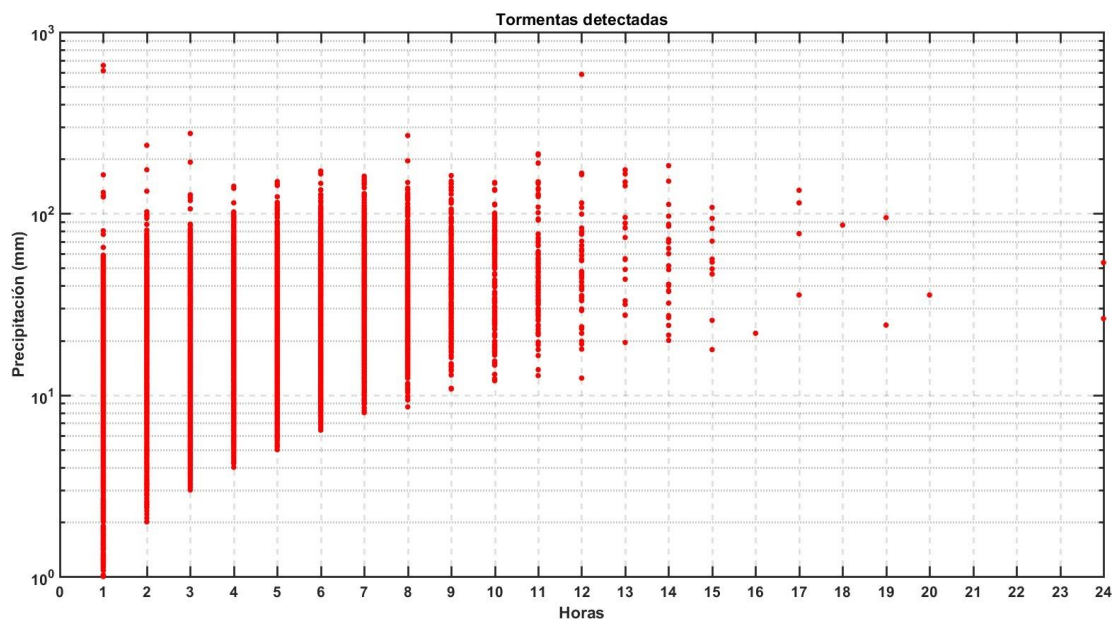
Para el caso del PBIAS básicamente es un indicador de que tan diferente o alejados son los perfiles de tormenta, se espera que sean similares porque son datos con poca variación y misma longitud, lo que interesa en este indicador es el signo, porque un signo positivo indica que el perfil de tormenta de la estación en tierra desarrolla una lámina mayor de lluvia que el obtenido por el GPM y viceversa. Para la entropía de Shannon, a la interpretación es la siguiente: cuando mayor es la entropía, mayor es el “desorden” de la data, para el caso de los perfiles, indicaría tormentas desarrolladas en un mayor intervalo de tiempo y con láminas muy variables entre intervalos de tiempo, por el contrario, una menor entropía indica un menor “desorden”, en este caso, el perfil de tormenta estaría desarrollado en un menor intervalo de tiempo.

Mientras que el PBIAS es un indicador del error entre ambos perfiles, la entropía de Shannon, en cambio, lo cuantifica. Mientras mayor sea la diferencia entre ambas entropías, mayor será el grado de error del GPM y por consiguiente, su habilidad de detectar estructuras de tormentas similares a las estaciones en tierra.

Estos análisis nos permitirán identificar en que regiones el GPM puede representar las estructuras de las tormentas con relación a las estaciones en tierra, servirá para tomar una decisión si usar o no esta fuente de información en regiones donde no se disponga de datos y su posterior aplicación para la disagregación horario de eventos de lluvia.

## 4. Resultados

En la Figura 3 se muestra la gráfica precipitación – duración de todas las tormentas detectadas para todas las estaciones automáticas a nivel nacional. Para todos los casos, se filtraron los eventos de tormentas menores a 2 mm.



**Figura 3.** Gráfico de precipitación - duración para todos los eventos registrados a nivel nacional

La Figura 3 muestra que las mayores tormentas ocurren entre 1 a 8 horas de duración con elevadas magnitudes. Esto da entender que las tormentas detectadas se desarrollan generalmente en menos de 10 horas, no necesariamente una tormenta de mayor duración genera una mayor lámina de lluvia. Se puede inferir que se tiene un régimen de tormentas de relativa corta duración para lo cual, el criterio adoptado de filtrar tormentas de hasta 24 horas de duración es un acierto.

Con respecto a la variabilidad horaria de las tormentas, la Figura 4, muestra mediante Boxplots la variación de las tormentas detectadas para distintas duraciones.

La Figura 4 muestra un claro comportamiento sesgado hacia la izquierda para duraciones de tormentas inferiores a 8 horas. Esto indica que se tienen muchas tormentas detectadas para cortas duraciones.

En los análisis anteriores se ha considerado todas las tormentas detectadas mayores a 1 mm, esto es con la finalidad de obtener un mejor entendimiento de la variación de estas tormentas con respecto a la duración. En este análisis, se van a evaluar mediante histogramas bidimensionales las tormentas extremas, para ello se aplicarán umbrales de precipitación elevados para considerar únicamente aquellas tormentas con elevados periodos de retorno.

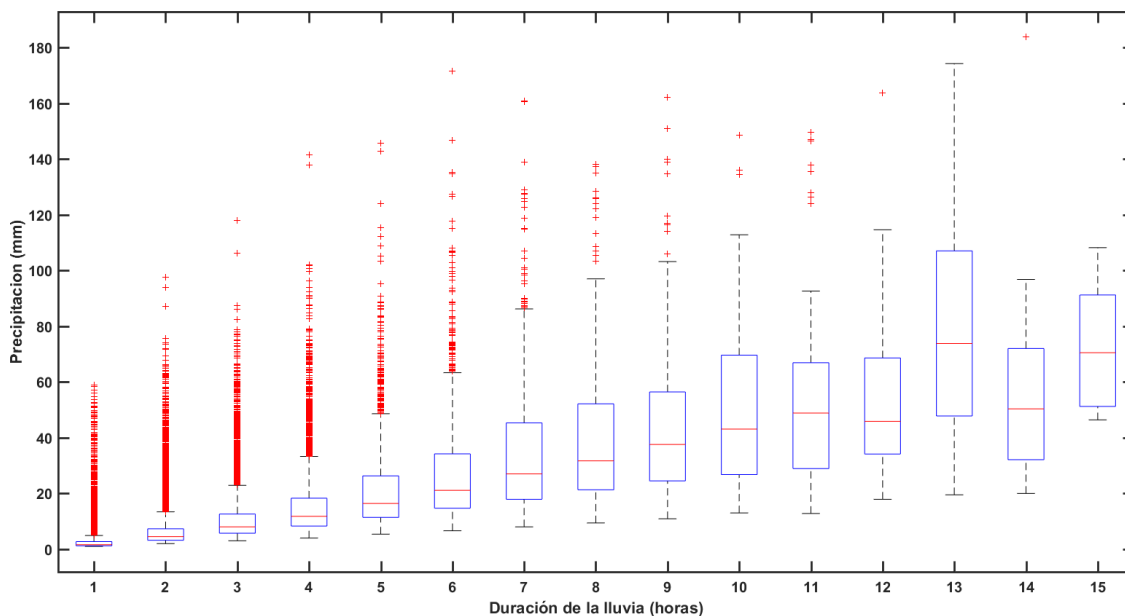


Figura 4. Boxplot de para los eventos de tormentas detectados a nivel nacional

La Figura 5 muestra una clara concentración de eventos mayores a 10 mm entre 2 a 3 horas de duración. Se infiere que se tienen muchos eventos de corta duración y relativa baja lámina de lluvia.

Ahora se repetirá el mismo análisis aplicando un umbral de 20 mm, el histograma bidimensional se muestra en la Figura 6.

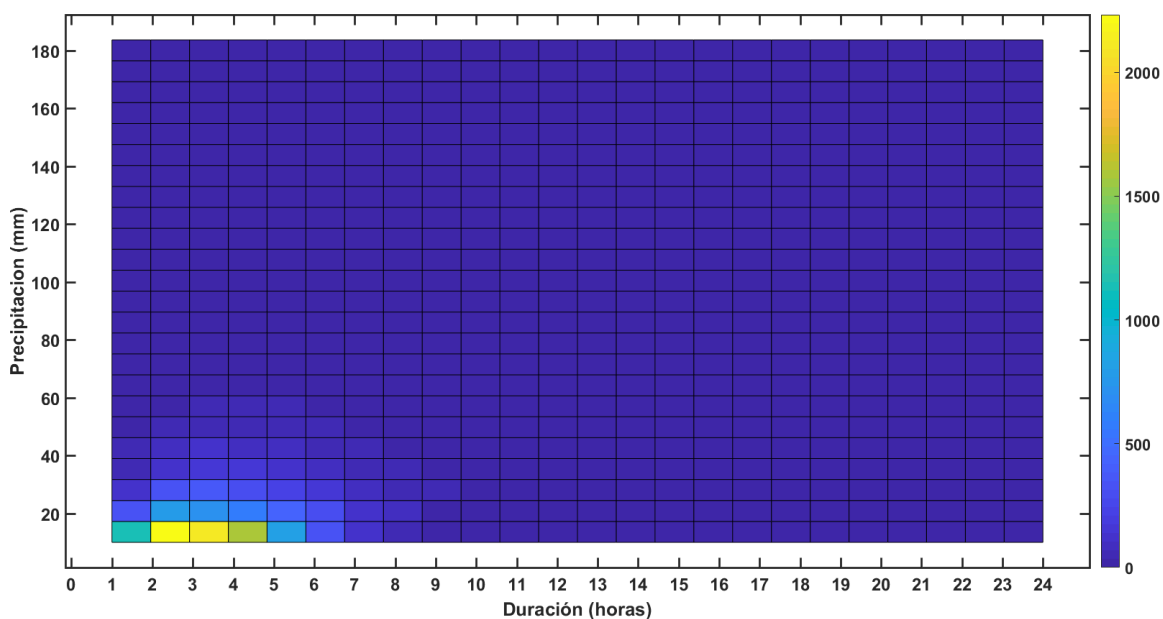
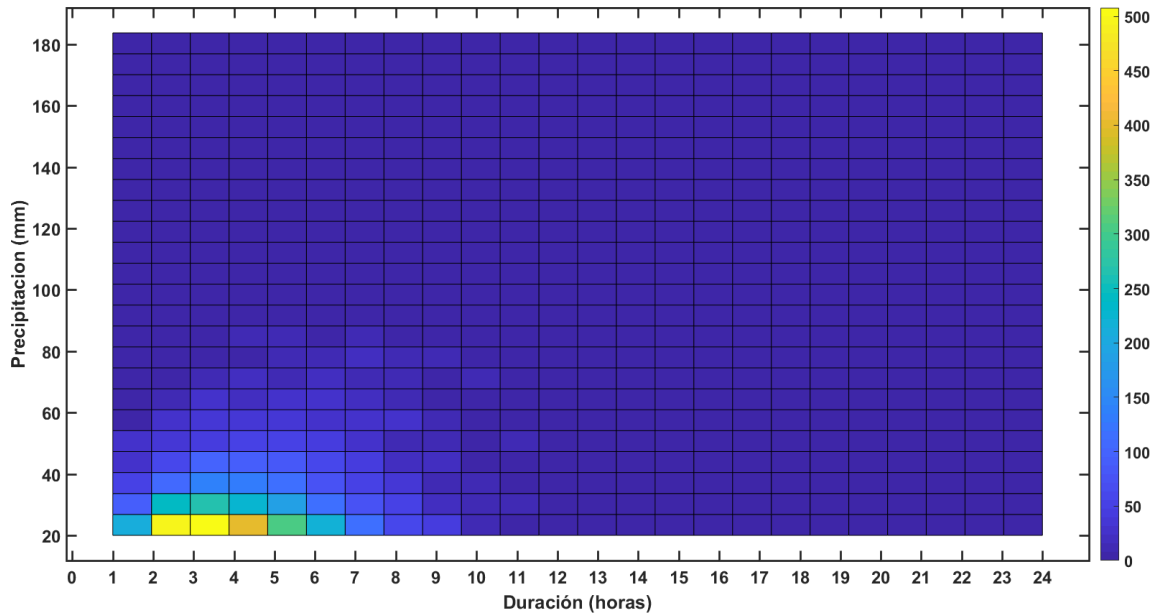


Figura 5. Histograma bidimensional para tormentas mayores a 10 mm

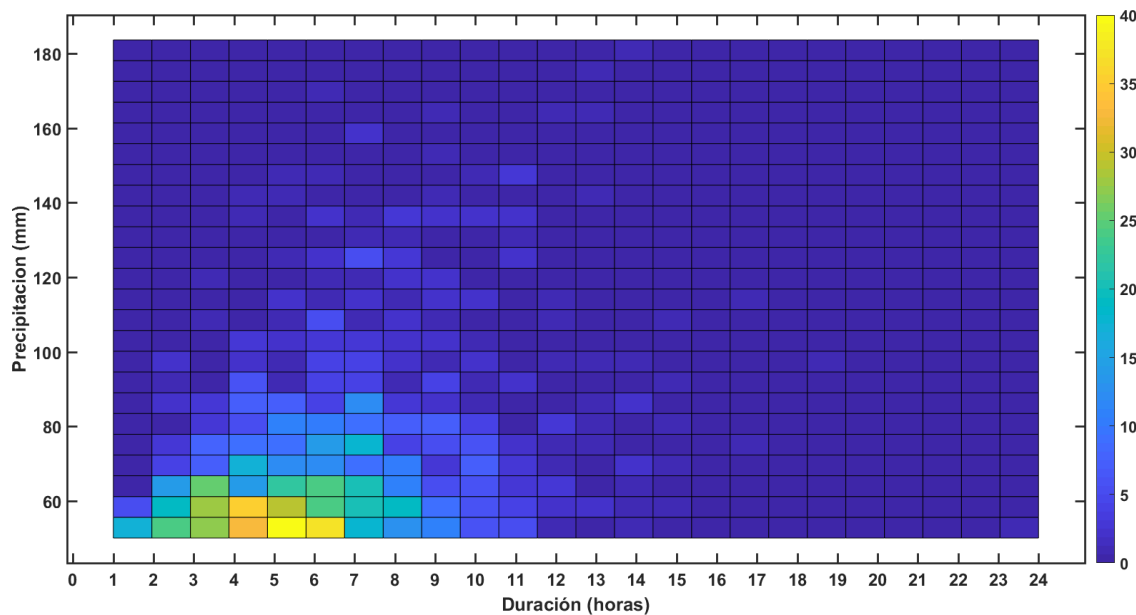




**Figura 6.** Histograma bidimensional para tormentas mayores a 20 mm

La Figura 6 muestra un comportamiento similar al de la Figura 5, un gran número de tormentas mayores a 20 mm se han generado entre 2 a 3 horas, pero también para duraciones entre 3 a 4 horas. Se ve el mismo patrón de eventos de corta duración. Destaca también un número aceptable de eventos entre 20 a 40 mm para duraciones de lluvia entre 2 a 5 horas.

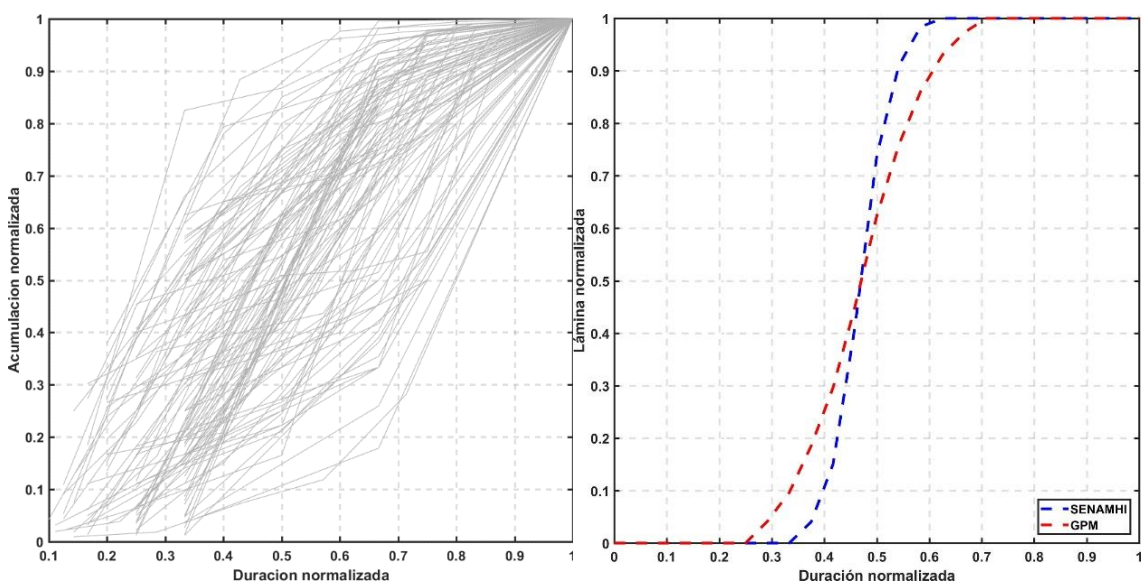
Si se aplica un umbral extremo de 50 mm, el cual representa tormentas para elevados periodos de retorno, la Figura 7 muestra una gran cantidad de eventos registrados entre 4 a 6 horas de duración, generalmente, para magnitudes entre 50 a 60 mm.



**Figura 7:** Histograma bidimensional para tormentas mayores a 50 mm

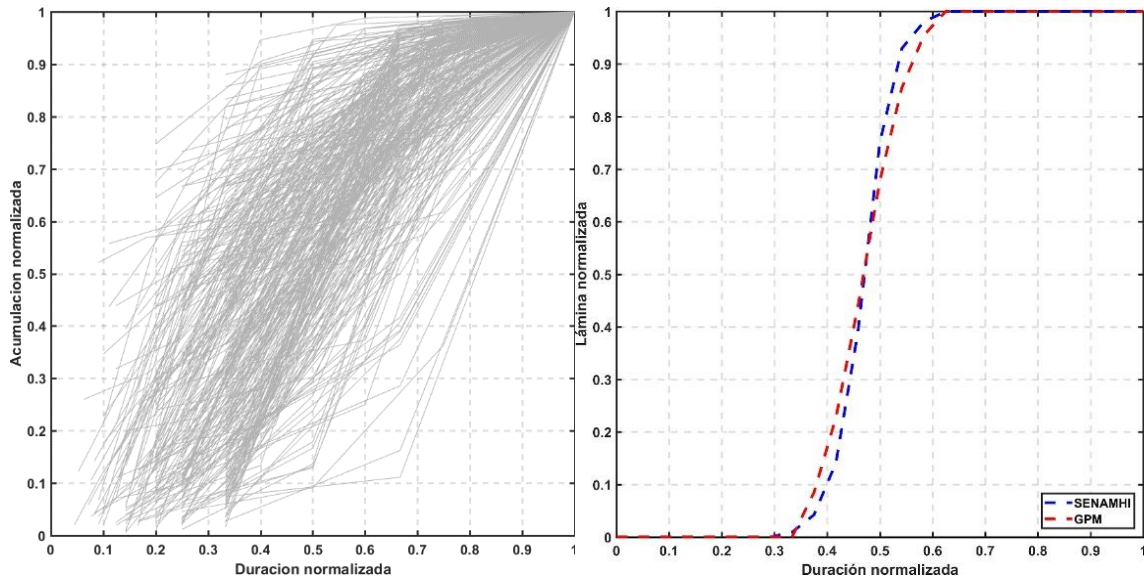
Como una comparación entre los registros de las estaciones convencionales y los datos del GPM, se procedió a comparar perfiles de tormentas para distintas ubicaciones geográficas en el territorio peruano.

La Figura 8 muestra los perfiles de tormentas para la estación El Tigre, ubicada en la costa norte, región muy afectada por el clima tropical y la influencia de la corriente de El Niño. Se aprecia que las tormentas para los datos observados (izquierda), tienen perfiles cóncavos como convexos. A la derecha se observa el perfil de tormenta representativo para dicha estación con su respectiva grilla GPM, se observa un cierto grado de ajuste entre ambos perfiles. Se observa también que el GPM tiende a generar un perfil de tormenta de mayor duración con respecto a la estación en tierra y el tiempo para pico del evento también es mayor.



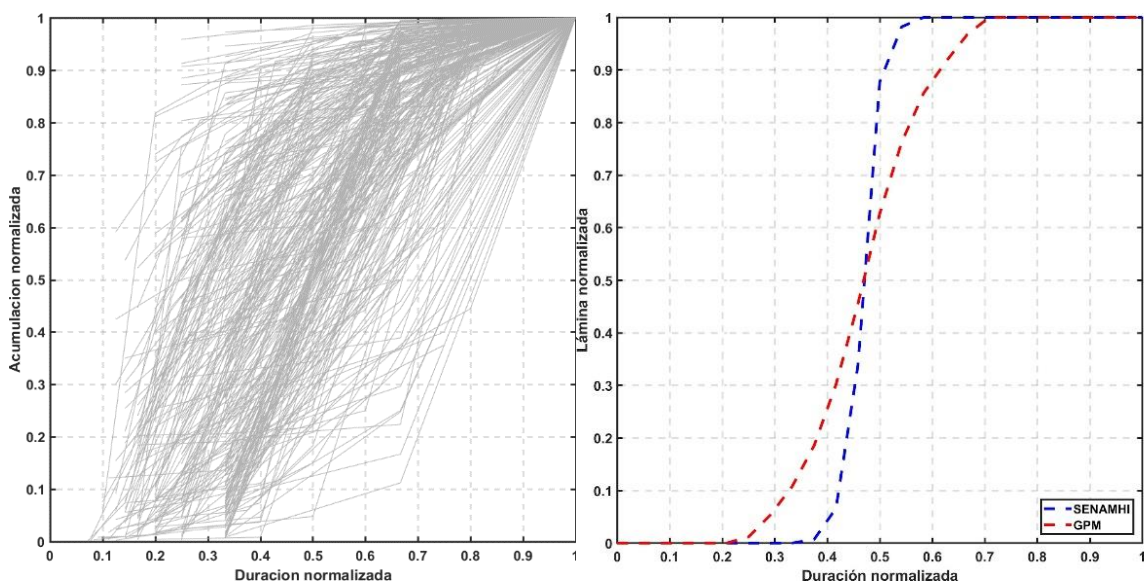
**Figura 8.** Tormentas detectadas y perfiles de tormentas representativos. Estación El Tigre

La Figura 9 muestra los perfiles de tormentas para la estación Puno ubicada en el altiplano. Se aprecia que las tormentas para los datos observados (izquierda), tienden a ser más intensas (perfil cóncavo), es decir, llegan en menor tiempo al pico de la tormenta. A la derecha se observa el perfil de tormenta representativo para dicha estación con su respectiva grilla GPM, se observa una excelente representación con respecto al perfil generado con la estación en tierra. Para este punto, el GPM demuestra tener un buen grado de ajuste con respecto a los datos observados.



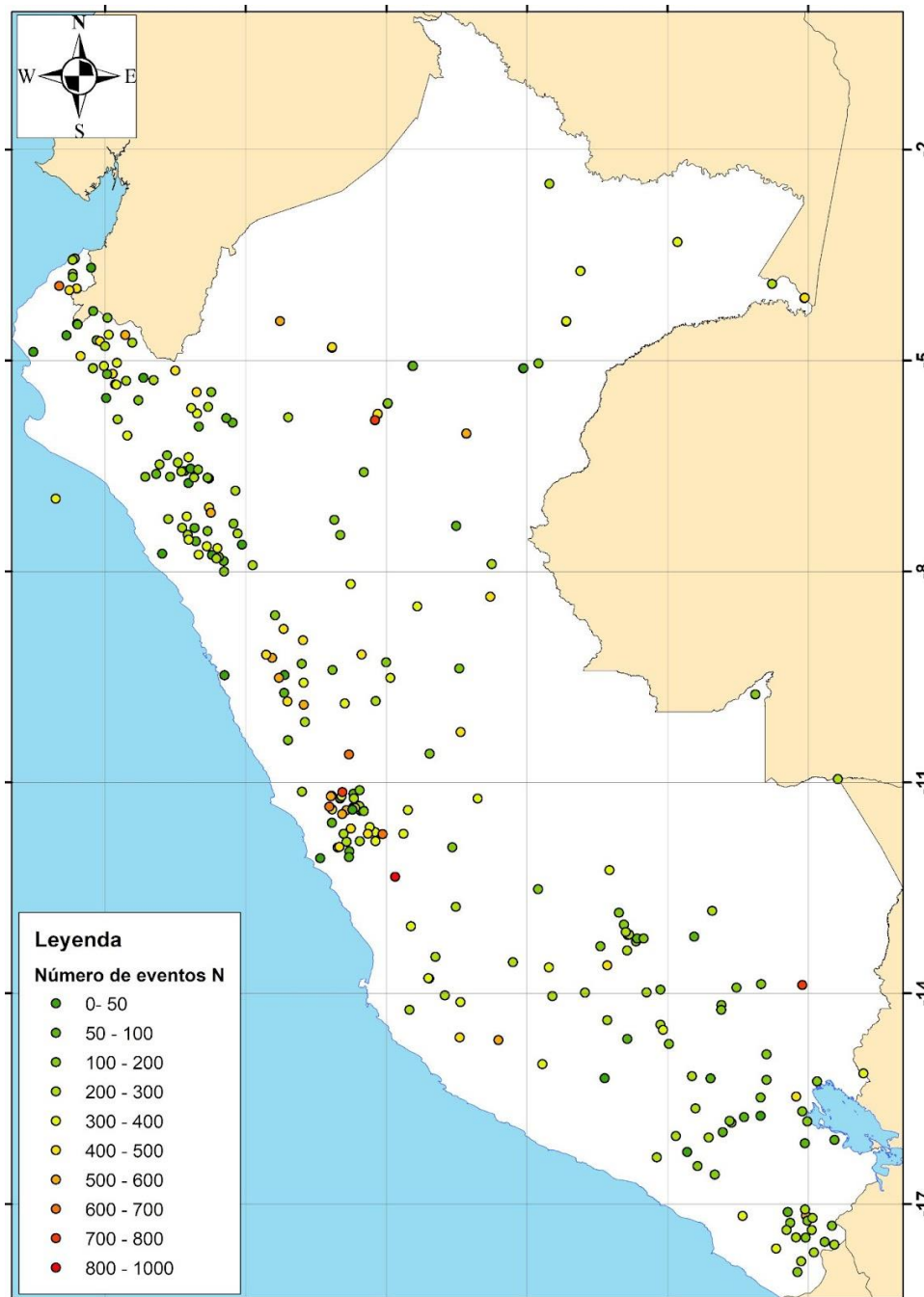
**Figura 9.** Tormentas detectadas y perfiles de tormentas representativos. Estación Puno

La Figura 10 muestra los perfiles de tormentas para la estación Iñapari ubicada en la selva sur, región de clima tropical y afectado por la ITCZ y los vientos provenientes del Atlántico. Se aprecia que las tormentas para los datos observados (izquierda), presentan distintos perfiles de tormenta (forma convexa y cóncava) siendo muy variables las estructuras de estos eventos detectados. A la derecha se observa el perfil de tormenta representativo para dicha estación con su respectiva grilla GPM, se observa diferencias en el grado de ajuste entre ambos perfiles. Se observa también que el GPM tiende a generar un perfil de tormenta de mayor duración con respecto a la estación en tierra y el tiempo para pico del evento también es mayor. En esta ubicación se aprecia que el GPM tiene ciertas dificultades en representar los perfiles de tormenta registrados por la estación en tierra.



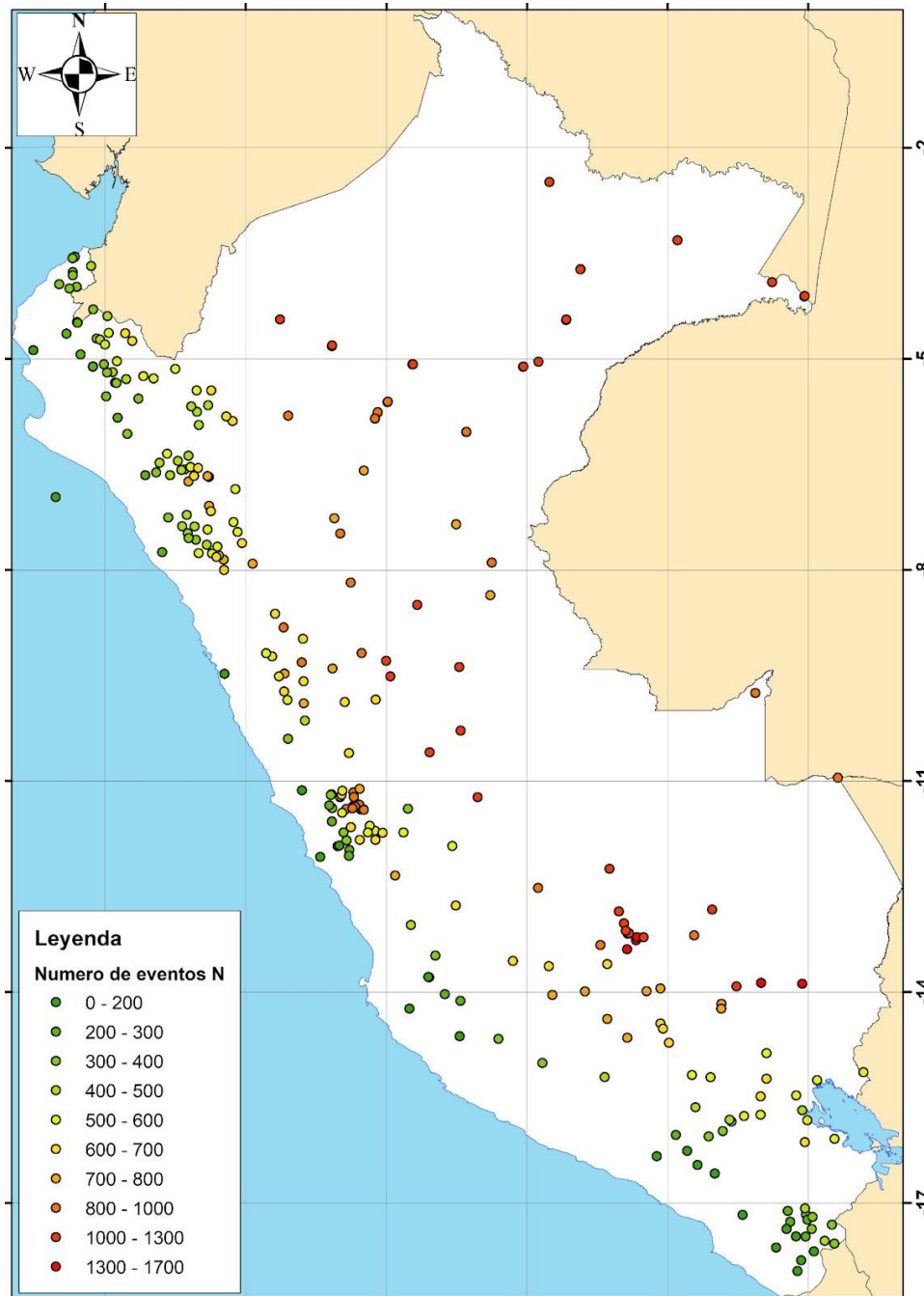
**Figura 10.** Tormentas detectadas y perfiles de tormentas representativos. Estación Iñapari

Con respecto a las métricas definidas en la sección anterior, la Figura 11 muestra los valores de N que representa el número de eventos de tormentas registrados. Se observa que en la mayoría de las estaciones se han detectado entre 0 a 200 eventos de tormentas para el periodo 2014-2020. Este valor está influenciado también por la cantidad de datos faltantes. Las regiones que presentan los mayores eventos registrados son la selva norte, selva central, sierra norte y sierra central. La costa norte y costa sur presentan los menores valores de tormentas detectadas.



*Figura 11. Número de tormentas detectadas por los datos observados*

En la Figura 12 muestra los valores de N que representa el número de eventos de tormentas registrados para los datos del GPM. Se aprecia un número de eventos muy marcado con relación a la vertiente hidrográfica: la mayoría de eventos detectados se encuentra en la selva seguido por la sierra, altiplano. La menor cantidad de eventos registrados se ubica en la costa. El GPM tiende a detectar más eventos de tormenta con respecto a las estaciones en tierra. Sin embargo, esto puede ser por la falta de datos, vacíos e inconsistencia en los registros de las estaciones en tierra.



*Figura 12. Número de tormentas detectadas por los datos del GPM*

La Figura 13 muestra la profundidad o lámina promedio de lluvia por cada estación en tierra (D). Se observa que las mayores láminas de lluvias en promedio se presentan en la selva norte, selva sur y el altiplano. Las menores láminas de lluvia en promedio se presentan en toda la costa baja.

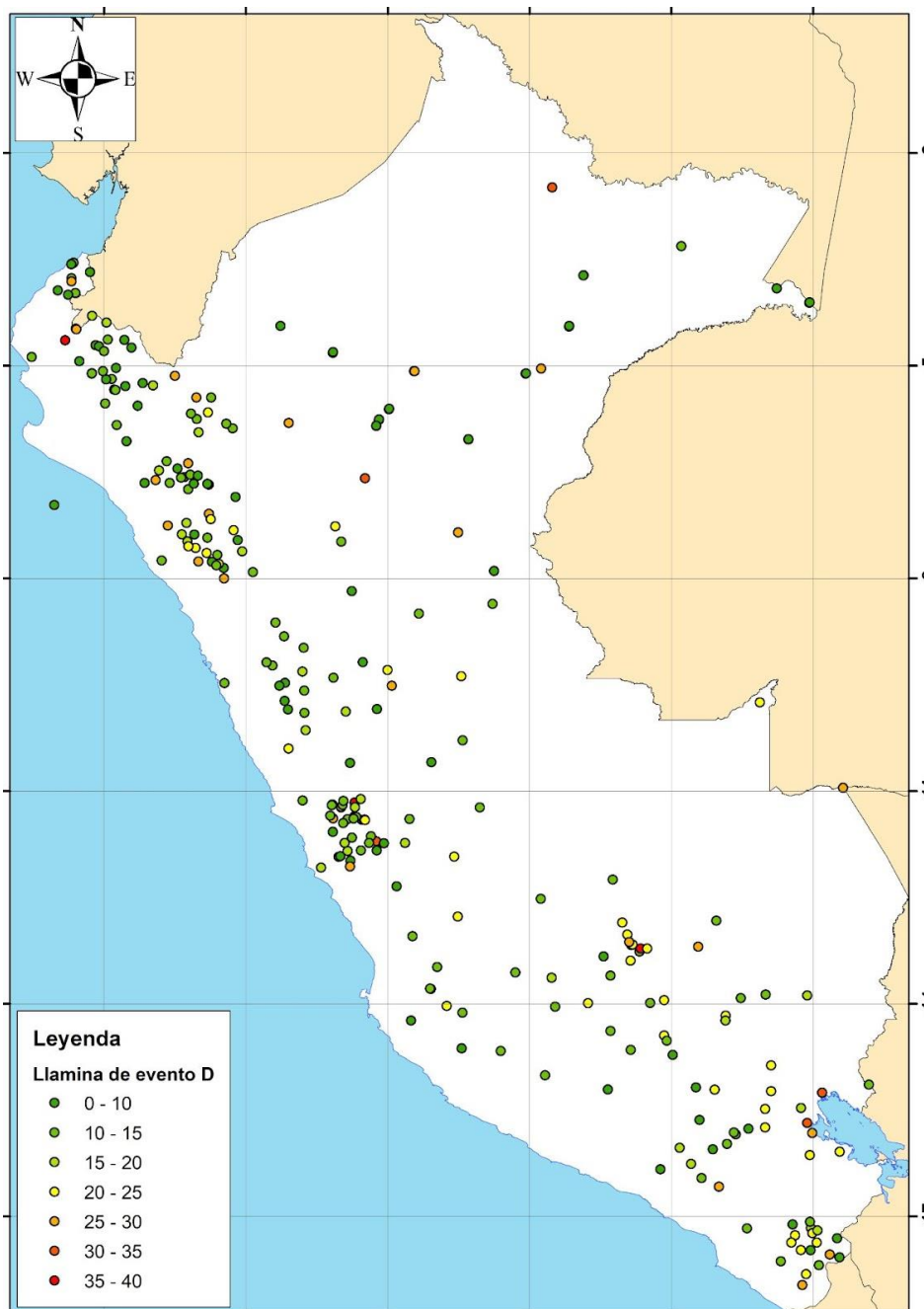


Figura 13. Lámina de lluvia promedio para cada estación en tierra.

En la Figura 14 muestra la lámina promedio de lluvia para las grillas del GPM consideradas. Las mayores láminas de lluvia se encuentran en la selva y en la costa norte. Esto es coherente, en la selva se hallan las mayores precipitaciones y la costa

norte es una zona afectada por El Niño. Por otro lado, las menores láminas de lluvias se encuentran en la costa central y sur.

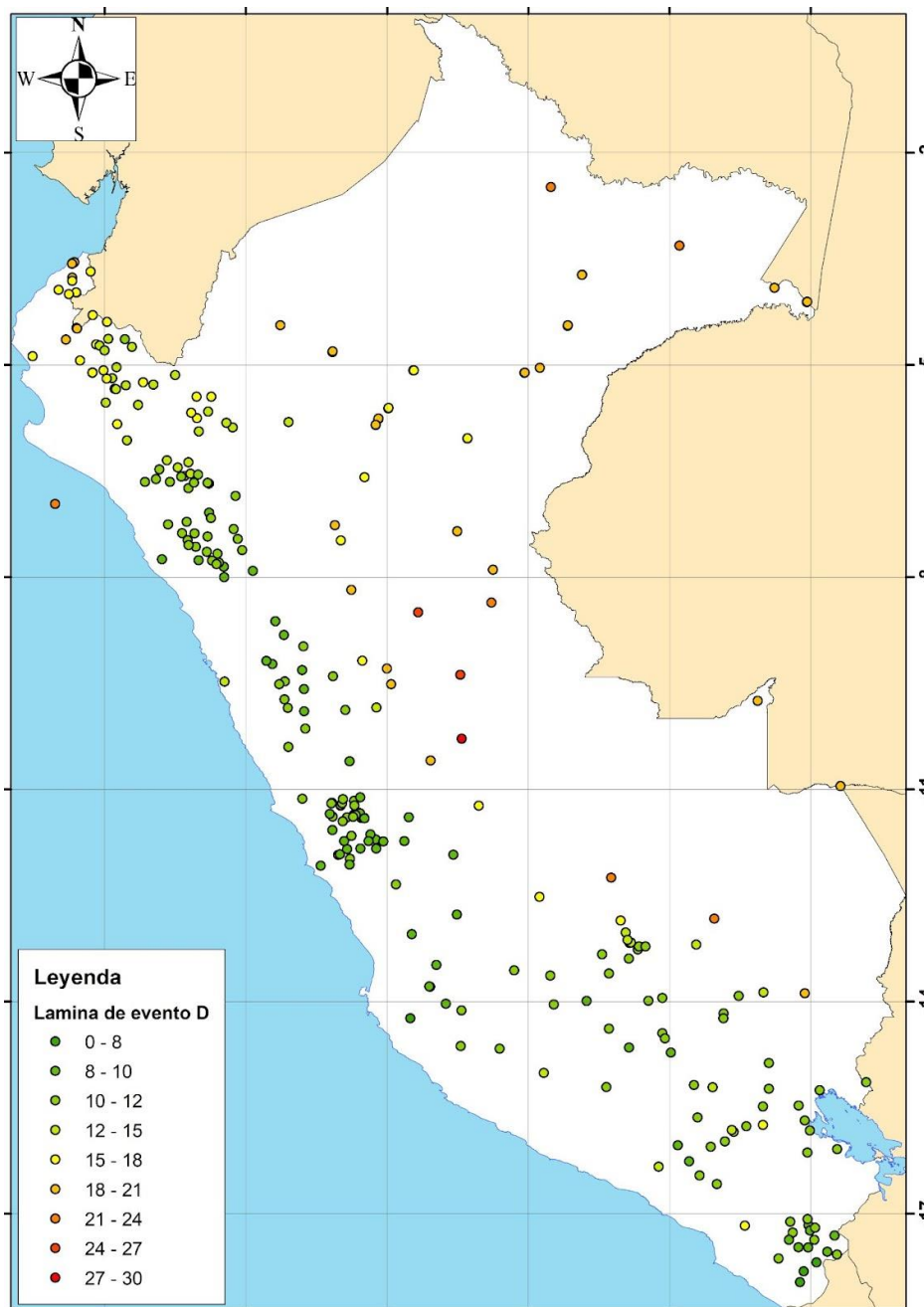
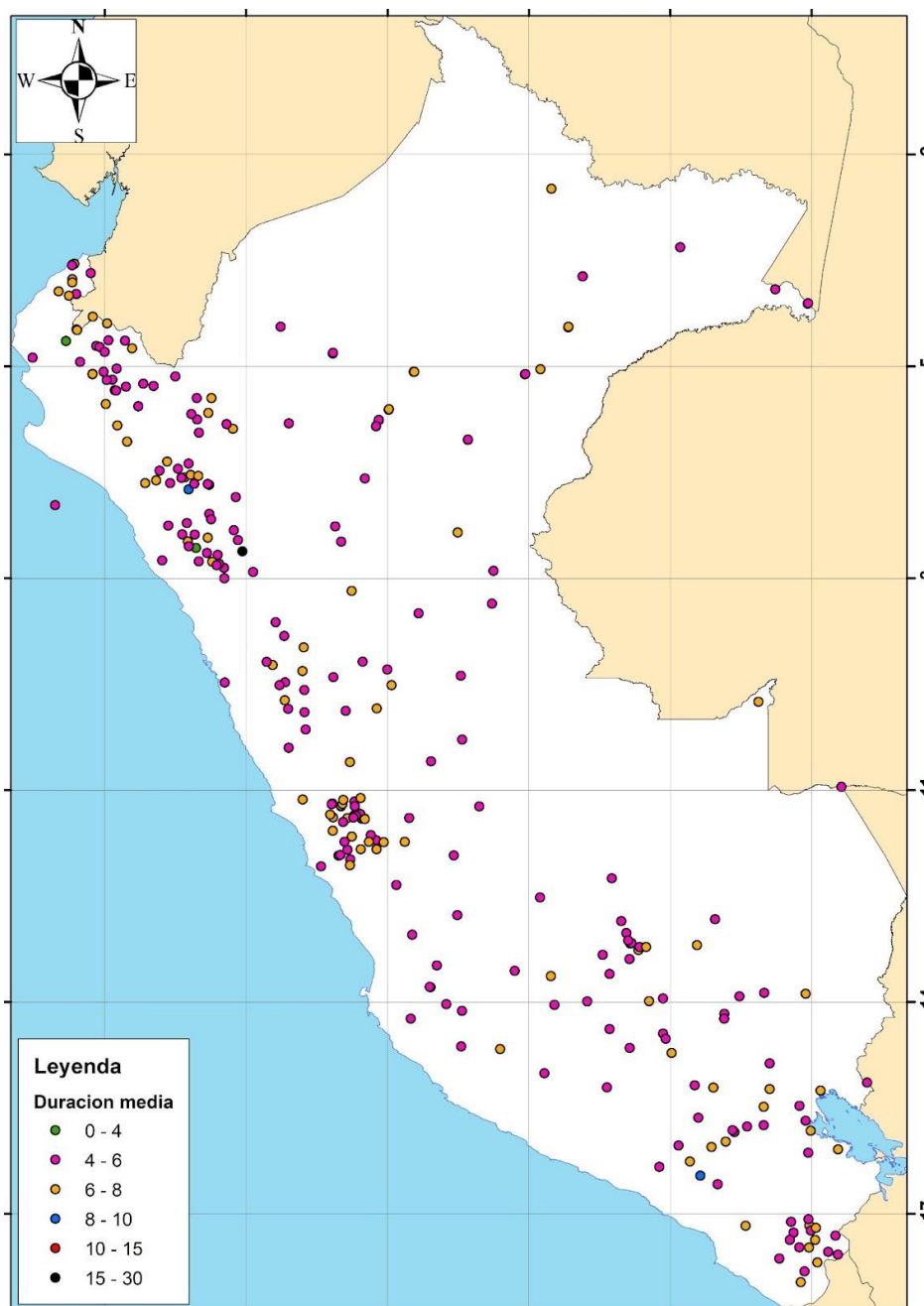


Figura 14. Lámina de lluvia promedio para los datos GPM.

La Figura 15 muestra la duración promedio de lluvia para cada estación en tierra. Se aprecia que predominan los eventos entre 4 a 6 horas y 6 a 8 horas de duración. Esto ya se había visto en el análisis exploratorio de datos, predominan las tormentas entre 4 a 8 horas, casi no se presentan eventos de más de 12 horas de duración.



**Figura 15.** Duración de lluvia promedio para cada estación en tierra.

En la Figura 16 se muestra la duración promedio de los eventos de tormenta registrados para las grillas GPM. Se aprecia que predominan las duraciones entre 8 a 10 horas y 10 a 12 horas. Esto explica porque los perfiles de tormentas generados con los datos del GPM presentan una distribución casi uniforme durante el desarrollo de la tormenta, es decir, no predomina un perfil cóncavo o convexo.



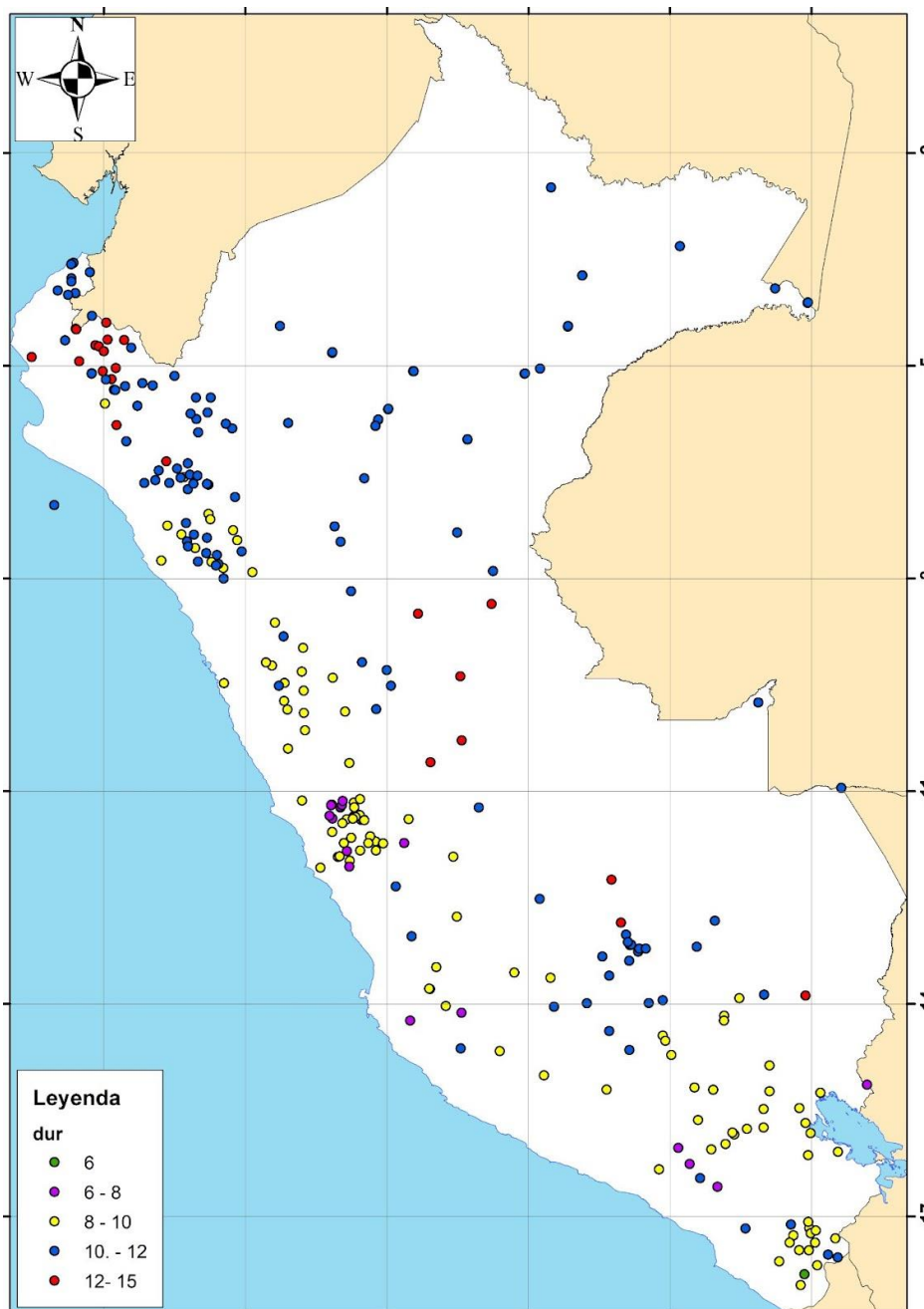


Figura 16. Duración de lluvia promedio para los datos GPM.

En general, se puede inferir que los datos del GPM tienden a detectar un mayor número de tormentas, similar lámina de lluvia en promedio y con mayor duración con respecto a las tormentas detectadas por las estaciones en tierra. Del mismo modo, los perfiles de tormenta indican que los datos del GPM tienden a distribuir de manera más uniforme a nivel temporal y de lámina de lluvia con respecto a las estaciones en tierra.

Con respecto a los criterios de bondad de ajuste, la Figura 17 muestra el signo del PBIAS obtenido entre los perfiles representativos generados para las estaciones y grillas consideradas.

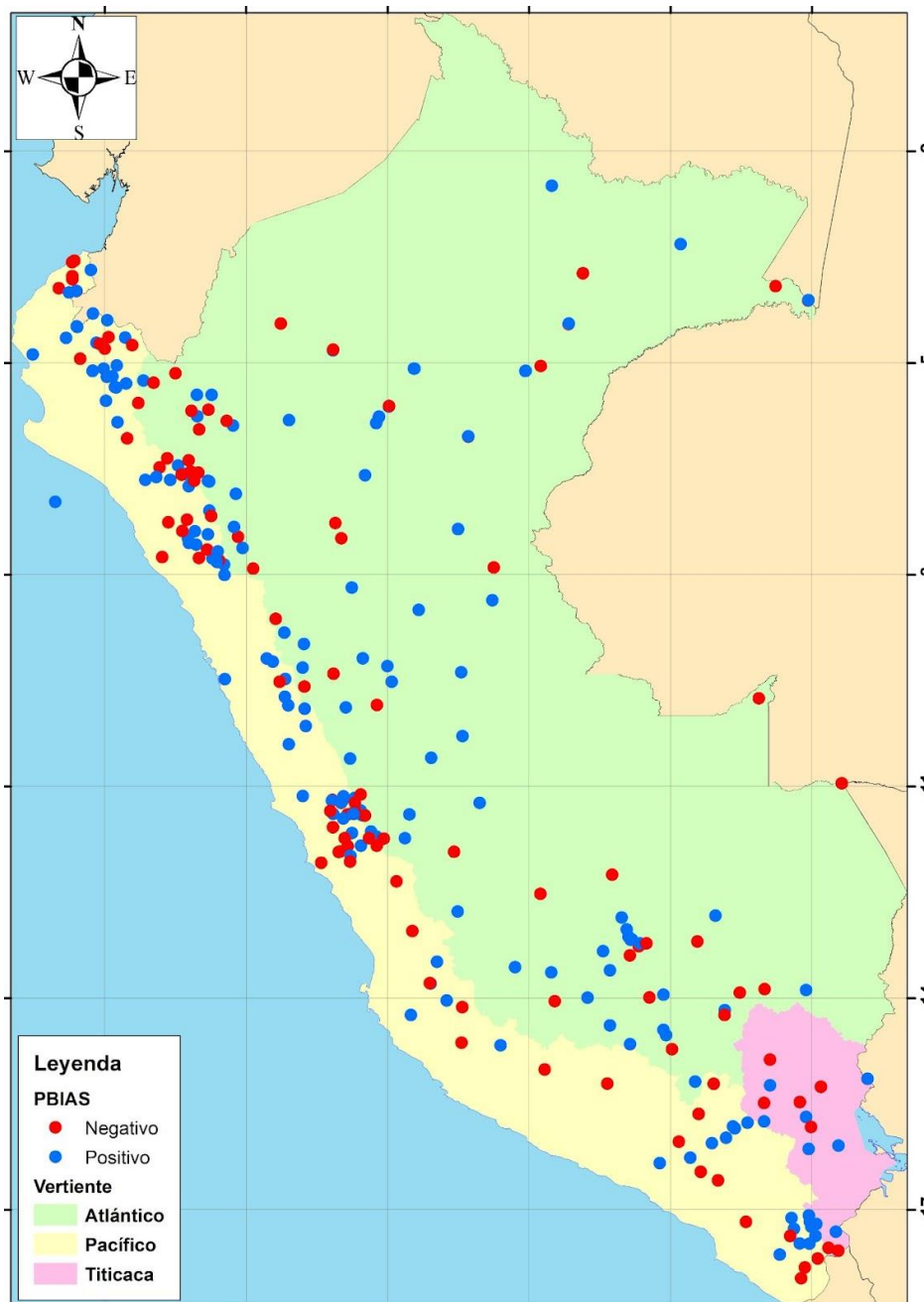
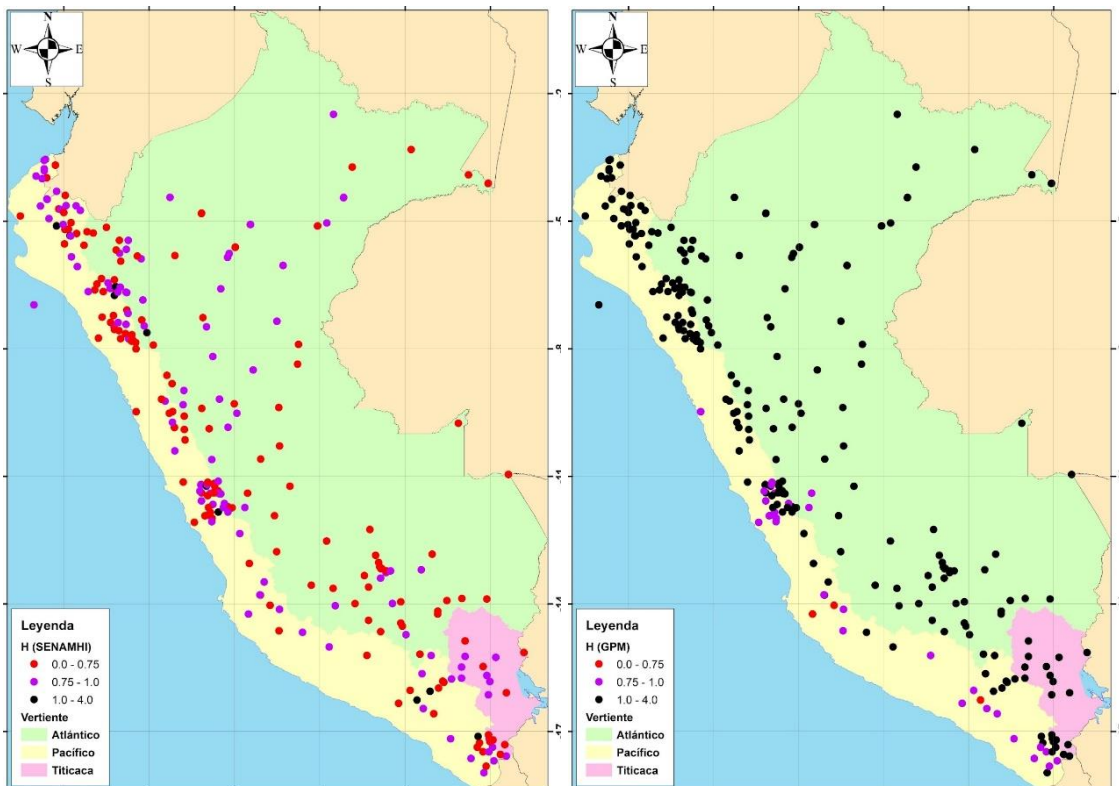


Figura 17. Duración de lluvia promedio para los datos GPM.

La Figura 17 muestra que no hay un patrón definido entre el signo del PBIAS, el signo positivo indica que el perfil de tormenta representativo de la estación en tierra genera una mayor lámina de lluvia que el perfil obtenido por el GPM. De las 281 estaciones analizadas, 113 presentan un PBIAS negativo, lo cual indica que hay una predominancia del GPM a subestimar las láminas de lluvia registradas por las estaciones en tierra.

Con respecto a la entropía de Shannon (H), el cual mide el grado de “desorden” la Figura 18 muestra que los perfiles de tormenta representativos generados por las estaciones en tierra, presentan valores de H menores a 1.0, lo cual indica que son perfiles cuyas características se desarrollan en menor tiempo, lo cual los hace más intensos (por desarrollar lluvia en menor cantidad de tiempo). A diferencia del H generado por los perfiles del GPM, los cuales superan el 1.0 indicando que son más caóticos, abarcan más tiempo en desarrollarse y por consiguiente son menos intensos.



**Figura 18.** Entropías de los perfiles de tormenta entre la data observada (izq.) y satelital (der.)

La Figura 18, muestra también que el GPM presenta bajas entropías en la costa central y sur del Perú. Resalta la zona de la cuenca del río Rímac (costa central) donde los valores de H del GPM son menores a 1.0.

## 5. Discusión

Los eventos de tormenta detectados por las estaciones en tierra han mostrado un sesgo hacia la izquierda con respecto a las duraciones de tormenta, las mayores tormentas ocurren entre 1 a 8 horas de duración con elevadas magnitudes. Esto da entender que las tormentas detectadas se desarrollan generalmente en menos de 10 horas, no necesariamente una tormenta de mayor duración genera una mayor lámina de lluvia. Se puede inferir que se tiene un régimen de tormentas de relativa corta duración por lo que la consideración de asumir tormentas de 24 horas de duración para diversos

diseños en ingeniería no es del todo apropiada tomando en cuenta los perfiles de tormenta detectados.

También se observa una clara concentración de eventos mayores a 10 mm entre 2 a 3 horas de duración. Se infiere que se tienen muchos eventos de corta duración y relativa baja lámina de lluvia. Para tormentas mayores a 20 mm se generan entre 2 a 3 horas, pero también para duraciones entre 3 a 4 horas. Se ve el mismo patrón de eventos de corta duración. Destaca también un número aceptable de eventos entre 20 a 40 mm para duraciones de lluvia entre 2 a 5 horas. Para el caso de tormentas mayores a 50 mm, se observó que estos eventos se produjeron entre 4 a 6 horas de duración. En general predominan las tormentas de corta duración a nivel del territorio peruano.

Sin embargo, hay que tener en cuenta las fuentes de error detectadas en los registros de las estaciones en tierra, el análisis exploratorio de datos determinó estaciones con un registro dudoso y/o distinto con relación a las demás estaciones, se pudo detectar los siguientes errores al momento de revisar los valores de lluvia registrada:

- Valores nulos: se encontró que un número de estaciones presentan valores nulos en todo su registro o la suma total de todo el periodo de registro era cercano a cero.
- Registro continuo de precipitaciones con valores dudosos y/o absurdos, esto fue error muy frecuente. Se encontró que varias estaciones presentaban valores muy elevados y en algunos casos, valores iguales de precipitación elevada para días continuos de registro.
- Registros de enorme duración, este también fue otro error muy frecuente, algunas estaciones mostraron eventos de días o incluso más de una semana de duración tanto en época húmeda y seca.
- Registros puntuales absurdos, un error frecuente en muchas estaciones donde presentaban valores muy elevados (generalmente 150 o 234 mm) para una hora de duración y con valores nulos antes y después de dicho evento. En ese caso, se procedió a reemplazar esos valores absurdos con ceros, ya que en todos los casos los valores antecedente y posterior eran ceros.

Con respecto a la variabilidad de las tormentas detectadas, el 78% del total de tormentas registradas tiene duraciones entre 3 a 8 horas lo cual indica una intensidad alta a moderada. Le siguen las tormentas con duraciones entre 8 a 12 horas con 16%, 12 a 16 horas con 4% y 16 a 20 horas con 20 a 24 horas con 1% cada una. Se comprueba que las tormentas registradas son de relativa corta duración.

Por otro lado, la comparación de perfiles de tormenta entre las estaciones en tierra y los datos del GPM mostró que los eventos detectados por datos observados presentan perfiles de tormenta cóncavos, es decir, la mayor lámina de lluvia se presenta en las primeras horas del eventos a diferencia de los perfiles de tormentas registrados por los datos del GPM que mostraron perfiles de tormentas más uniformes con distribución de lámina de lluvia también uniforme en toda la duración del evento de tormenta.

La comparación a nivel geográfico mostró que en la región costa, se aprecia que las tormentas para los datos observados, tienden en su mayoría a ser más verticales (perfil

cóncavo), es decir, las láminas de lluvia se generan en corto tiempo. Por el contrario, las tormentas detectadas por el GPM, tienen unos perfiles más variados y se distribuyen de una manera más uniforme. Para el caso del GPM, no se puede afirmar que detecta eventos de tormentas de alta intensidad, sino más bien, de baja a moderada intensidad con respecto a las tormentas registradas por las estaciones en tierra. También se observó que el GPM tienden a sobre-detectar más eventos de tormentas en la costa central y sur del Perú, lo cual es un indicio de la sobrestimación de lluvia que muestran los productos satelitales en la costa peruana. Este comportamiento también se ha evidenciado en la sierra peruana, donde se aprecia que las tormentas para los datos observados tienden a ser más intensos que uniformes (predomina el perfil cóncavo). Las tormentas detectadas por el GPM son casi similares en número, pero uniformes a lo largo del tiempo (se mantiene la tendencia a distribuirlas de manera uniforme). En el caso de la región selva, se aprecia que las tormentas para los datos observados presentan distintos perfiles de tormenta (forma convexa y cóncava). Las tormentas detectadas por el GPM son mayores en número y también presentan gran variedad de perfiles, no hay un patrón definido. En esta región el IMERG tienden a detectar más eventos con respecto a las estaciones en tierra y muestran perfiles de tormentas muy variados, similar a los datos observados.

La detección de eventos de tormentas es un detalle muy importante que se debe tomar en cuenta a la hora de usar estos productos satelitales, porque a pesar de detectar más eventos de lluvia, las láminas de lluvia en promedio, tienden a ser menores que las registradas por las estaciones en tierra. La Figura 19 muestra que las estaciones convencionales detectan entre 100 a 200 eventos de tormenta principalmente. Por el contrario, el GPM tiende a sobrestimar el número de eventos de tormentas. Esto se debe a que el algoritmo de detección de tormentas de las fuentes satelitales tiende a detectar más eventos de tormenta en la costa peruana, además, es posible que un número importante de eventos registrados por el GPM no generen láminas de lluvia apreciables.

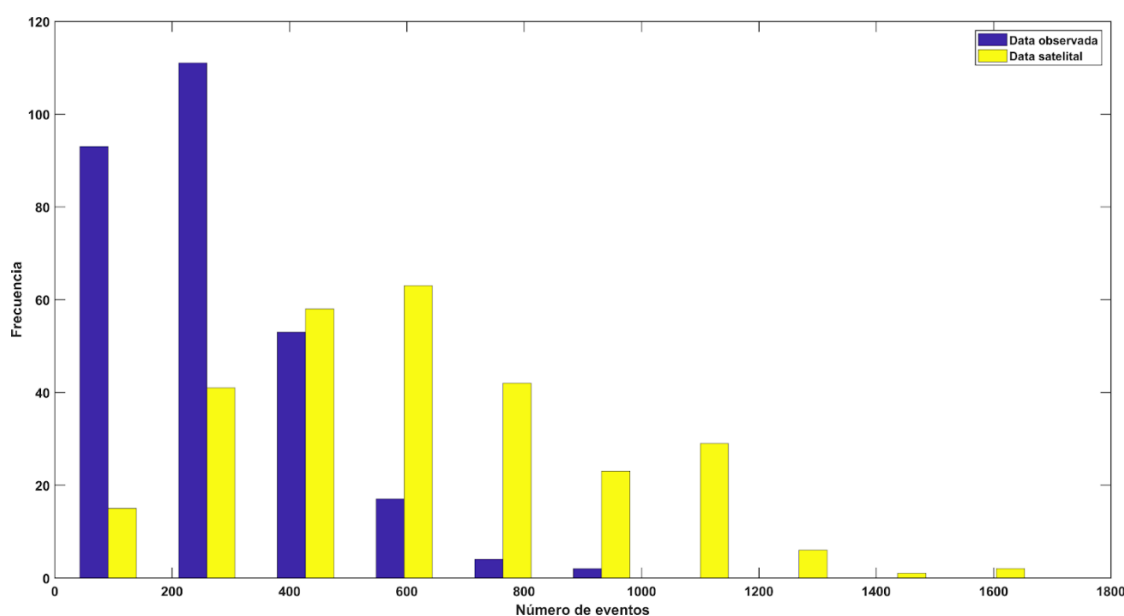


Figura 19. Número de eventos detectados por datos observados y GPM.

El mismo comportamiento sesgado hacia la izquierda se muestra para el caso de la lámina promedio. La Figura 20 muestra que las estaciones convencionales detectan eventos con láminas de lluvia muy variadas, principalmente entre 8 a 15 mm. El GPM muestra una predominancia en detectar eventos entre 10 a 15 mm pero no detecta eventos con láminas de lluvia mayores a 20 mm en general, algo que las estaciones convencionales sí han logrado detectar (se observan eventos con láminas de lluvia promedio superiores a 30 mm).

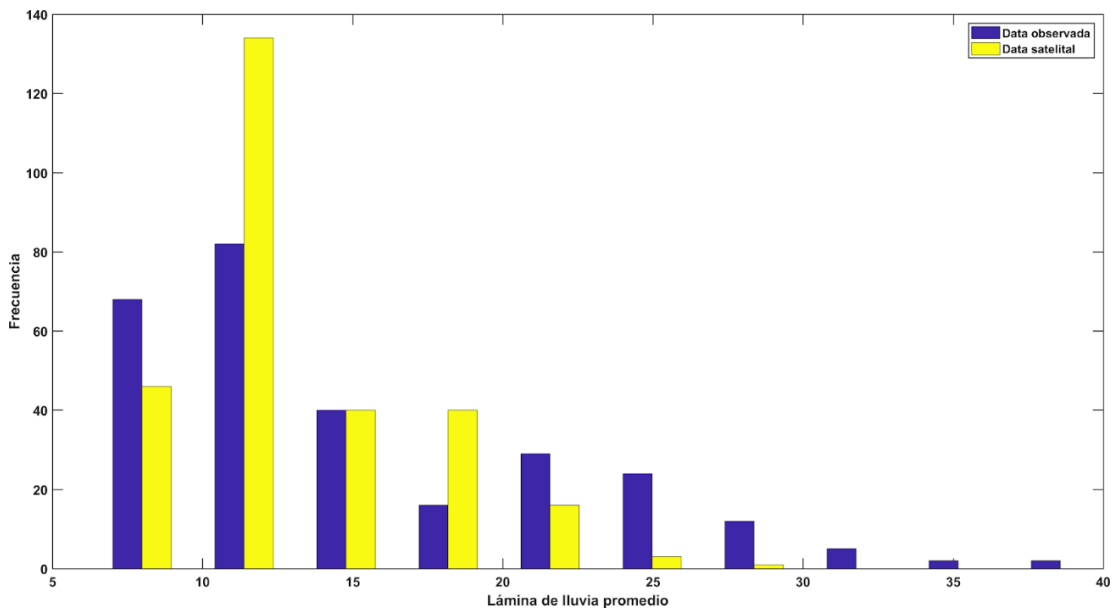


Figura 20. Lámina de lluvia promedio detectadas por datos observados y GPM.

Un análisis de los hietogramas adimensionales de tormentas entre todas las estaciones en tierra con su contraparte grilla GPM se muestra en la Figura 21.

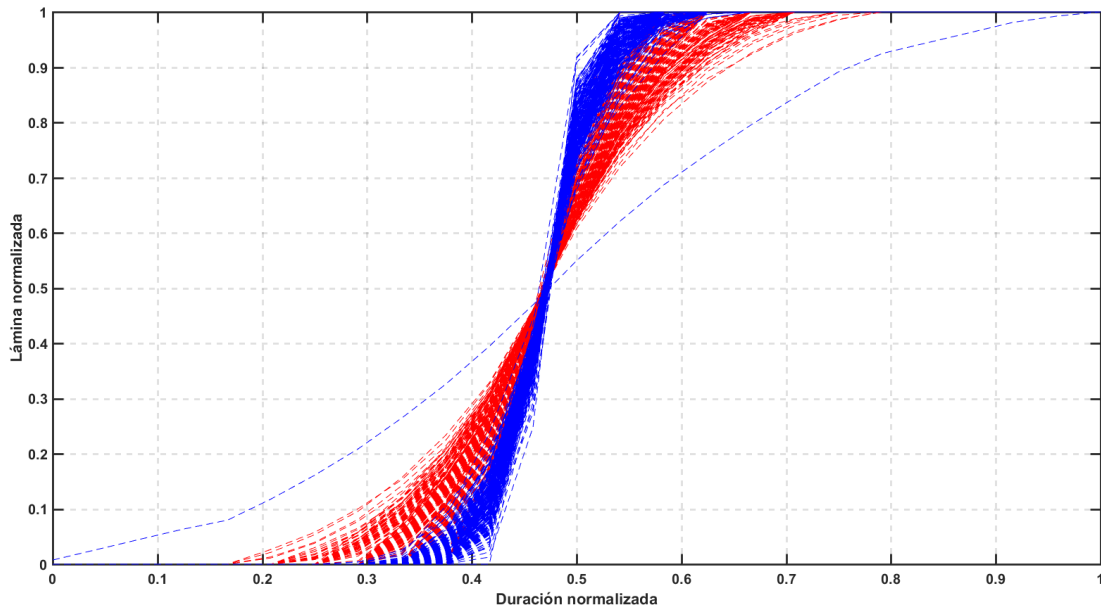


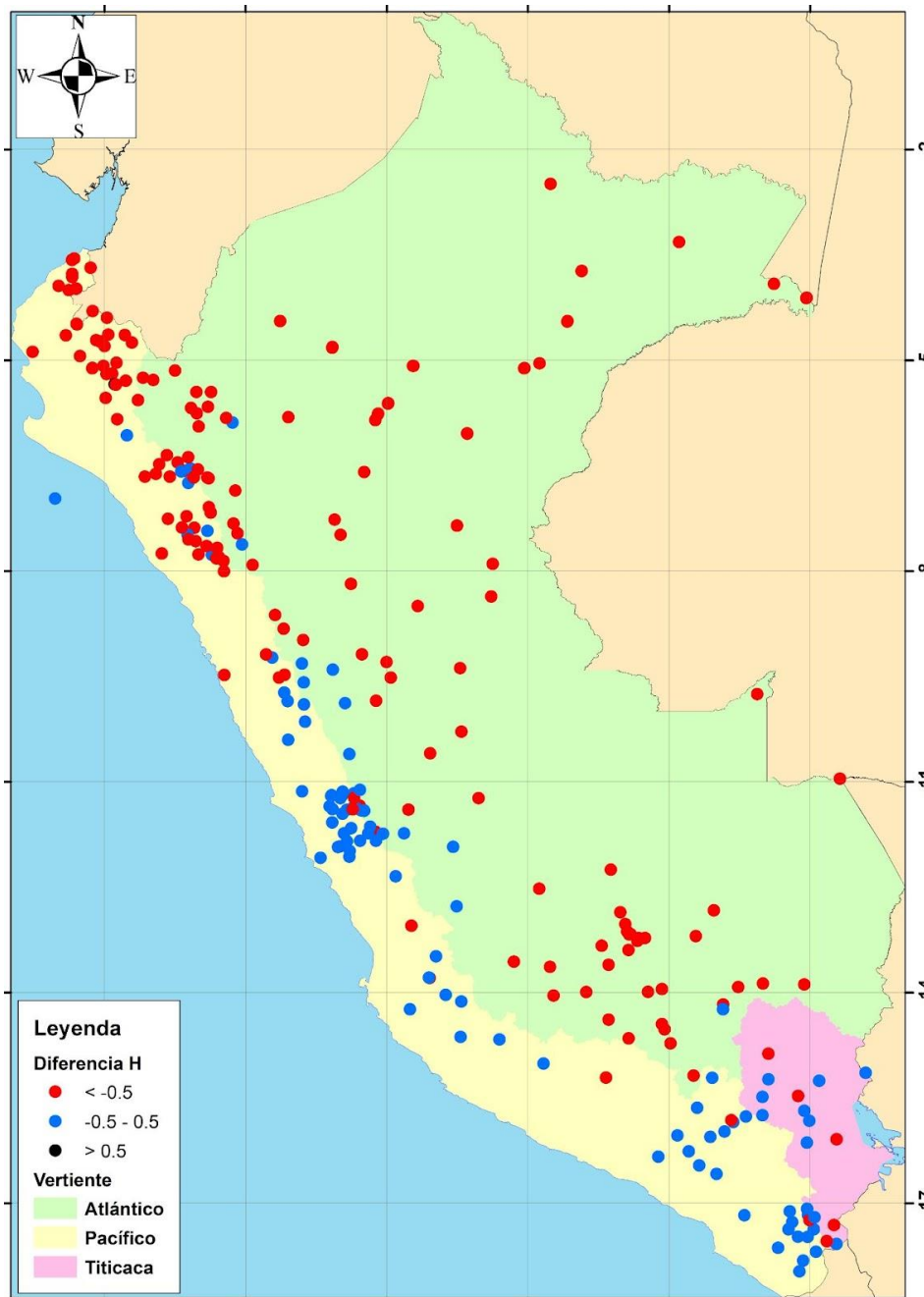
Figura 21. Hietogramas adimensionales promedio entre datos observados (azul) y GPM (rojo)

La Figura 21 muestra la diferencia entre las estructuras de tormentas observadas y detectadas por las estaciones en tierra y la misión GPM respectivamente. Es claro que los registros observados presentan tormentas de menor duración, pero más intensas con respecto a las tormentas detectadas por el GPM. Otra característica interesante es el hecho de asumir eventos de tormenta de 24 horas de duración para diseños en ingeniería, se ha visto que las tormentas observadas no duran, en su mayoría, más de 8 horas siendo muy pocos los casos de eventos mayores a 10 horas de duración. La Figura 21 también muestra que aún los registros del GPM no serían una fuente del todo confiable para usarlos en todo el territorio peruano como un sustituto de los datos observados.

El análisis de métricas indica que a pesar de la sobre-detección de eventos de lluvia y eventos de mayor de duración por parte del GPM, esto no es causal de una sobrestimación de lluvia del mismo. En diversos estudios se ha mostrado que los productos satelitales de lluvia, tienden a subestimar la precipitación en el territorio peruano con excepción de la costa.

Los criterios de ajuste indican una tendencia a la subestimación de las precipitaciones por parte del GPM y esto se refleja también en la estructura de los perfiles de tormenta representativos, el GPM muestra perfiles con entropías mayores a los obtenidos por las estaciones en tierra dando a entender que predominan los eventos de largas duraciones, menores intensidades en la mayoría de los casos y menores láminas de lluvia.

El análisis de entropías ha permitido determinar en qué regiones el GPM capta de manera aceptable los eventos de tormentas con respecto a las estaciones en tierra. Si aplicamos un intervalo de -0.5 a 0.5 para la diferencia entre los valores H obtenidos para los perfiles de tormenta representativos entre las estaciones en tierra y los datos GPM se obtiene la Figura 21.



**Figura 22.** Diferencia de entropías entre perfiles de tormentas generados por data observada y satelital.

La Figura 21 muestra que la costa central y sur, el altiplano y la sierra alta (central y sur) son las regiones donde el GPM presenta entropías similares a los datos observados si aplicamos el umbral de -0.5 a 0.5, lo cual sería un buen punto de partida para futuros análisis en estas regiones.

El uso de los productos satelitales de lluvia con fines de desagregación sub-diaria, es aún un tema en discusión, dada la todavía inexactitud de estos productos, de reproducir de manera fiable, no solo la cantidad de lluvia sino también, la habilidad de reproducir la estructura y características espacio-temporal de las tormentas con respecto a datos observados.



## 6. Conclusiones

Las mayores tormentas ocurren entre 1 a 8 horas de duración con elevadas magnitudes. Esto da entender que las tormentas detectadas se desarrollan generalmente en menos de 10 horas, no necesariamente una tormenta de mayor duración genera una mayor lámina de lluvia. Se puede inferir que se tiene un régimen de tormentas de relativa corta duración.

Se muestra una clara concentración de eventos mayores a 10 mm entre 2 a 3 horas de duración. Se infiere que se tienen muchos eventos de corta duración y relativa baja lámina de lluvia. Para tormentas mayores a 20 mm se generan entre 2 a 3 horas, pero también para duraciones entre 3 a 4 horas. Se ve el mismo patrón de eventos de corta duración. Destaca también un número aceptable de eventos entre 20 a 40 mm para duraciones de lluvia entre 2 a 5 horas. Finalmente, para tormentas mayores a 50 mm se generaron entre 4 a 6 horas de duración. En general predominan las tormentas de corta duración.

El GPM tiende a detectar un mayor número de tormentas, similar lámina de lluvia en promedio y con mayor duración con respecto a las tormentas detectadas por las estaciones automáticas.

Por otro lado, el IMERG-GPM ha podido identificar de manera coherente la variabilidad de las tormentas en el territorio peruano, esto es, mayores tormentas y láminas de lluvia para la selva y costa norte. Menores tormentas, duración y lámina promedio para la costa central y sur.

Las estaciones en tierra tienden a detectar tormentas con intensidades entre 5 a 6 horas. Por el contrario, el GPM tiende a detectar eventos con menores intensidades y con duraciones de tormenta mayores a las estaciones convencionales, no se aprecia un patrón predominante a diferencia de las estaciones convencionales (entre 5 a 6 horas).

El GPM tiende a sobrestimar la detección de tormentas con mayores duraciones de eventos y menor intensidad a diferencia de las estaciones convencionales que detectan menores eventos de tormentas, con menores duraciones y mayor intensidad. Esto se refleja en las láminas promedios de lluvia, las estaciones convencionales muestran una mayor lámina de lluvia en promedio, con respecto a los datos del GPM.

Los hietogramas adimensionales representativos de diseño generados por los datos observados y GPM, mostraron diferencias significativas en varias regiones del Perú por lo que todavía no se recomienda usar estos datos satelitales para la disgregación sub-diaria de eventos de tormentas a nivel del territorio nacional. Sin embargo, el análisis de entropía ha permitido detectar que las regiones de la costa central y sur junto con la sierra alta central y sur, son sectores donde el GPM presenta entropía similar o con diferencias hasta  $\pm 0.5$  lo cual indica que en estas regiones el GPM tiende a generar información similar a los datos observados.

## 7. Referencias bibliográficas

- Chavez, S. P., Silva, Y. & Barros, A. P. (2020). High-elevation monsoon precipitation processes in the central Andes of Peru. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 125 (4), e2020JD032947. <https://doi.org/10.1029/2020JD032947>
- Derin, Y.; Anagnostou, E.; Berne, A.; Borga, M.; Boudevillain, B.; Buytaert, W.; Chang, C.-H.; Chen, H.; Delrieu, G.; Hsu, Y.C.; Lavado-Casimiro, W.; Manz, B.; Moges, S.; Nikolopoulos, E.I.; Sahl, D.; Salerno, F.; Rodríguez-Sánchez, J.-P.; Vergara, H.J.; Yilmaz, K.K. Evaluation of GPM-era Global Satellite Precipitation Products over Multiple Complex Terrain Regions. *Remote Sens.* 2019, 11, 2936.
- Dunkerley, D. (2008). Identifying individual rain events from pluviograph records: A review with analysis of data from an Australian dryland site. *Hydrological Processes*, 22(26), 5024–5036. <https://doi.org/10.1002/hyp.7122>
- Donohue, R. J., Roderick, M. L., & McVicar, T. R. (2012). Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model. *Journal of Hydrology*, 436, 35–50. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.033>
- Eman Ahmed Hassan El- Sayed (2018), Development of synthetic rainfall distribution curves for Sinai area, *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 9, Issue 4, Pages 1949-1957, ISSN 2090-4479, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.01.010>.
- Espinoza JC., J. Ronchail, J.L. Guyot, Cocheneau G., N Filizola, W. Lavado, E. de Oliveira, R. Pombosa and P. Vauchel. (2009). Spatio – Temporal rainfall variability in the Amazon Basin Countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 29, 1574-1594.
- Garreaud R, Vuille M, Clement AC. 2003. The climate of the Altiplano: Observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 194 (1-3): 5–22 doi: 10.1016/S0031-0182(03)00269-4
- Haile, A. T., Rientjes, T. H. M., Habib, E., Jetten, V., & Gebremichael, M. (2011). Rain event properties at the source of the Blue Nile River. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(3), 1023–1034. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1023-2011>
- Hanel, M., & Maca, P. (2014). Spatial variability and interdependence of rain event characteristics in the Czech Republic. *Hydrological Processes*, 28(6), 2929–2944. <https://doi.org/10.1002/hyp.9845>
- Kendon, E. J., Roberts, N. M., Fowler, H. J., Roberts, M. J., Chan, S. C., & Senior, C. A. (2014). Heavier summer downpours with climate change revealed by weather forecast resolution model. *Nature Climate Change*, 4(7), 570–576. <https://doi.org/10.1038/Nclimate2258>

- Lavado WS, Ronchail J, Labat D, Espinoza JC, Guyot JL. (2012). Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrol. Sci. J.* 57(4): 1–18.
- Lee, H., Waliser, D. E., Ferraro, R., Iguchi, T., Peters-Lidard, C. D., Tian, B. J., et al. (2017). Evaluating hourly rainfall characteristics over the US Great Plains in dynamically downscaled climate model simulations using NASA-Unified WRF. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(14), 7371–7384. <https://doi.org/10.1002/2017jd026564>
- Liu, G., & Wu, R. G. (2016). Spatial and temporal characteristics of summer precipitation events spanning different numbers of days over Asia. *International Journal of Climatology*, 36(5), 2288–2302. <https://doi.org/10.1002/joc.4495>
- Nikolopoulos, E. I., Anagnostou, E. N., & Borga, M. (2013). Using high-resolution satellite rainfall products to simulate a major flash flood event in northern Italy. *Journal of Hydrometeorology*, 14(1), 171–185. <https://doi.org/10.1175/Jhm-D-12-09.1>
- Rajendran, K., & Nakazawa, T. (2005). Systematic differences between TRMM 3G68 PR and TMI rainfall estimates and the possible association with life cycle of convection. *Sola*, 1, 165–168. <https://doi.org/10.2151/sola.2005-043>
- Rau, P., Bourrel, L., Labat, D., Melo, P., Dewitte, B., Frappart, F., Lavado, W., & Felipe, O. (2017). Regionalization of rainfall over the Peruvian Pacific slope and coast. *International Journal of Climatology*, 37(1), 143-158.
- Roche MA, Aliaga A, Campos J, Peña J, Cortés J, Rocha N. 1990. Hétérogénéité des précipitations sur la cordillère des Andes boliviennes. *Hydrology in Mountainous Regions, 1- Hydrological Measurements; the Water Cycle 193 (the Water Cycle): 381–388*
- Stampoulis, D., Anagnostou, E. N., & Nikolopoulos, E. I. (2013). Assessment of high-resolution satellite-based rainfall estimates over the Mediterranean during heavy precipitation events. *Journal of Hydrometeorology*, 14(5), 1500–1514. <https://doi.org/10.1175/Jhm-D-12-0167.1>
- Tadesse, A., & Anagnostou, E. N. (2009). The effect of storm life cycle on satellite rainfall estimation error. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(4), 769–777. <https://doi.org/10.1175/2008jtecha1129.1>
- Véliz A, Flavio Alexander, Ramos Taípe, Cayo Leónidas, & Lavado Casimiro, Waldo Sven. (2018). Evaluación de los productos Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y Global Precipitation Measurement (GPM) en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Huancañé, Perú. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 53-62. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.01.06>
- Vent te Chow, (1994). *Hidrología Aplicada*. McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A. 1994, Santa Fé Bogotá.

- Yu, R. C., Li, J., Yuan, W. H., & Chen, H. M. (2010). Changes in characteristics of late-summer precipitation over eastern China in the past 40 years revealed by hourly precipitation data. *Journal of Climate*, 23(12), 3390–3396. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3454.1>
- Zubieta, R., Getirana, A., Espinoza, J. C., Lavado-Casimiro, W., & Aragon, L. (2017). Hydrological modeling of the Peruvian–Ecuadorian Amazon Basin using GPM-IMERG satellite-based precipitation dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21 (7), 3543-3555. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3543-2017>