

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

EVALUACIÓN DE PRODUCTOS DE ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIÓN BASADA EN INFORMACIÓN SATELITAL EN EL TERRITORIO CHILENO

**MARCO SOTO-ALVAREZ¹, HERNÁN ALCAYAGA¹, DIEGO CAAMAÑO²,
VLADIMIR ALARCÓN¹, ROSSANA ESCANILLA¹, SEBASTIÁN PALMA¹**

RESUMEN

La administración de los recursos hídricos es fundamental para el desarrollo y la sustentabilidad de los países. Es necesario complementar con nuevas tecnologías las redes de medición en terreno. En este estudio se evalúan los productos de estimación de lluvias basadas en información satelital (Satellite-based Rainfall Estimates SRE's) 3B42 V7, de la Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM), y 3IMERG, de la misión Global Precipitation Measurement (GPM). Los análisis fueron realizados sobre gran parte del territorio de Chile continental 17°S-50°S, evaluando los desempeños de ambos SRE's en sus diferentes zonas hidroclimáticas a escala diaria y estacional (otoño, invierno, primavera y verano). Los datos estimados fueron comparados con mediciones de estaciones meteorológicas entre el 12 de marzo de 2014 y el 9 de marzo de 2018. Mediante indicadores continuos y de categoría se realizó el análisis en las macro zonas Norte (17-25°S), Central (25-40°S), Sur (40-45°S) y Austral (45-50°S) de Chile.

Ambos productos obtuvieron los mejores resultados en las locaciones a baja elevación (bajo los 1000 m.s.n.m.), mientras que, a media y alta elevación, el producto 3IMERG presenta una buena habilidad en la identificación y estimación de eventos de lluvia. Ambos productos obtuvieron los mejores resultados en las temporadas húmedas del año. A nivel general, el desempeño del producto 3IMERG superó el del producto 3B42 V7 en todas las macro zonas analizadas, y puede llegar a ser una buena herramienta para el monitoreo e impacto de las perturbaciones climáticas en las macro zonas Central y Sur y la alimentación de modelos lluvia-escorrentía en zonas remotas donde es difícil la obtención de datos.

¹ Departamento de Obras Civiles, Universidad Diego Portales. – marco.sotoa@mail.udp.cl

² Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción.

1. Introducción

Los productos SRE's han sido utilizados ampliamente en todo el mundo (Cao et al. 2018; Dinku et al. 2007) por la habilidad de generar información de precipitaciones donde es difícil obtenerla. Sin embargo, Tian et al. (2009), Alarcon et al. (2015) y Zambrano-Bigiarini et al. (2017) reportan que, los productos SRE's pueden incluir errores, por lo que, utilizarlos en modelos hidrológicos pueden generar incertezas en los resultados finales. Debido a lo anterior, se han validado y calibrado productos de SRE's en diferentes partes del mundo (e.g. Bharti and Singh 2015; Cabrera et al. 2016; Caracciolo et al. 2018; Dinku et al. 2007, 2008; Rivera et al. 2018; Sharifi et al. 2016; Tan and Santo 2018; Tarek et al. 2017; Wang et al. 2017; Zadet al. 2018) y en Chile (e.g. Baez-Villanueva et al. 2018; Demaria et al. 2013; Hobouchian et al. 2017; Mendez Rivas 2016; Zambrano-Bigiarini et al. 2017). Estos estudios han encontrado que las variables de la topografía y la estacionalidad son importantes y afectan los resultados de las estimaciones de precipitación, como también lo son las resoluciones espaciales y temporales de los productos.

En Chile, factores como la topografía, nieve, viento y tipos de coberturas de nubes afectan tanto la obtención de datos en terreno como el desempeño de los SRE's (World Meteorological Organization (WMO), 2014a; Zambrano-Bigiarini et al., 2017). Entre las latitudes 17° 29'S y 25°S, los eventos de lluvia más intensos ocurren en la temporada de verano y en las zonas más altas, conocida como altiplano (Houston, 2006). En el resto del territorio, las precipitaciones ciclónicas son condicionadas por la actividad atmosférica del océano Pacífico (Barrett & Hameed, 2017). Adicionalmente, debido a la accidentada topografía del país (se encuentra entre dos cordones montañoso, la cordillera de los Andes y la cordillera de la costa), los eventos de precipitación convectivos y orográficos y la caída de nieve en las zonas altas son procesos meteorológicos importantes (e. g. Garreaud et al. 2016; Houston 2006; Insel et al. 2010).

Tan and Santo (2018), en un estudio en Malasia, compararon el producto IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals), de la misión de medición global de precipitación (GPM), y el producto 3B42, perteneciente a la misión de medición de lluvias tropicales (TRMM). Los resultados mostraron un mejor desempeño del producto IMERG en la estimación de lluvia caída respecto de los datos observados en terreno. En territorio chileno la misión TRMM ha destacado por sobre otros productos de estimación (Baez-Villanueva et al., 2018; Hobouchian et al., 2017; Mendez Rivas, 2016; Zambrano-Bigiarini et al., 2017). Por otro lado, las estimaciones de precipitación de la GPM aún no han sido analizadas lo suficiente en territorio chileno. Desde los resultados favorables de los productos de SRE's de la TRMM y GPM es necesario ampliar la evaluación de sus desempeños a escalas espaciales y temporales más amplias. El propósito de este estudio es analizar el desempeño de los productos IMERG en su tercer nivel (3IMERG) y su antecesor 3B42 en su séptima versión (3B42 V7). Este análisis fue realizado para las estimaciones de lluvia entre los años 2014 y 2018., cubriendo las diferentes macro zonas hidroclimáticas de Chile.

2. Datos y Métodos

Área de estudio

El área cubierta por este estudio corresponde a Chile continental (América del Sur), entre las latitudes ~17° S y ~56° S, y longitudes ~76°O y ~66°O (Figura 1). La extensión latitudinal de 39° (cerca de 4300 km) le da a Chile diversas características climáticas. De acuerdo con McPhee

(2018), el territorio chileno puede ser separado en diferentes macro zonas asociadas a distintos regímenes hidrológicos. Las macro zonas usadas para este trabajo son: Norte, Central, Sur y Austral (Figura 1).

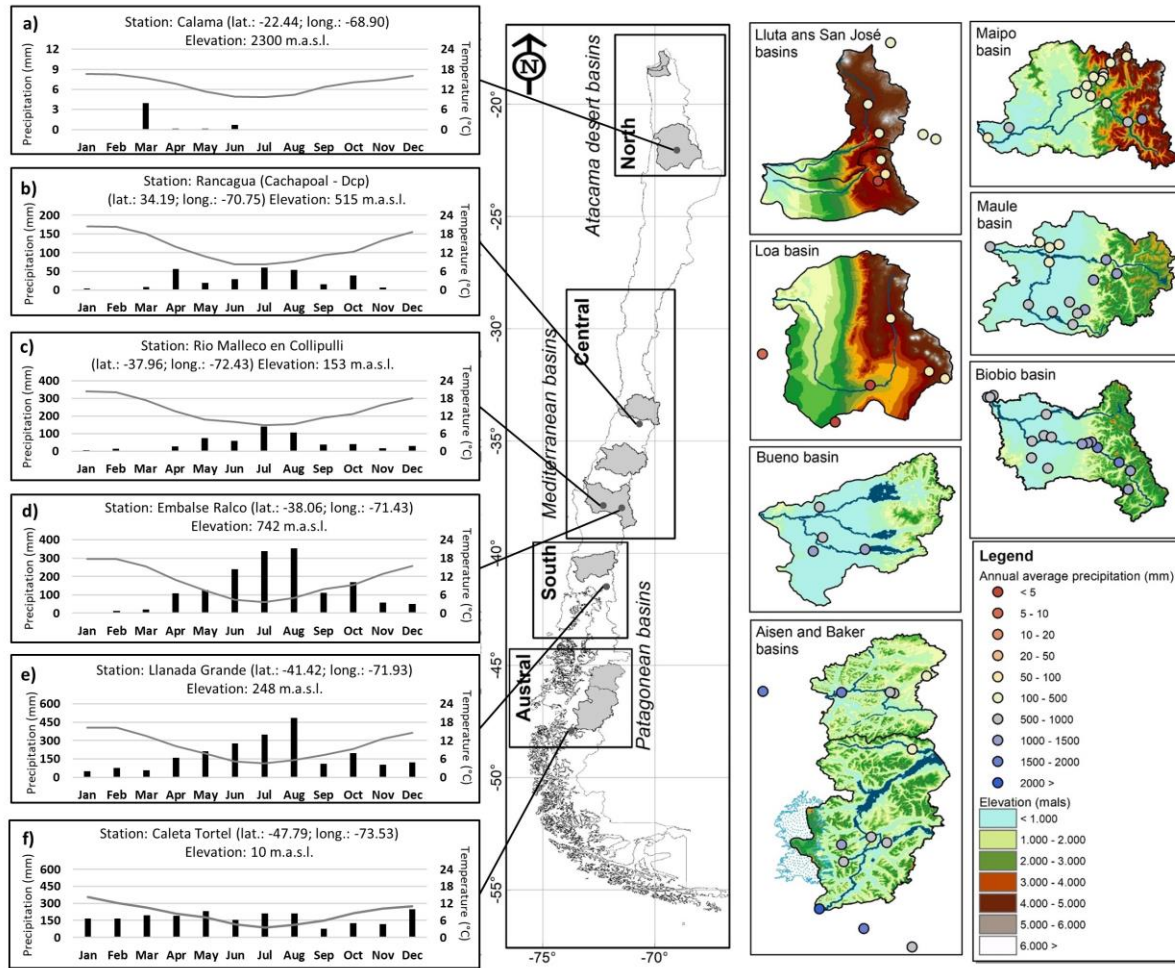


Figura 1. Área de estudio y las macro zonas definidas por sus características hidroclimáticas. Los hietogramas a), b), c), d), e) y f) corresponden a la precipitación media mensual para estaciones en cada una de las macro zonas. La línea continua muestra la variación de la temperatura media mensual (eje secundario).

Estaciones meteorológicas

Los datos de precipitación fueron obtenidos desde las estaciones meteorológicas dispuestas a través del portal web del Center for Climate and Resilience Research (www.cr2.cl). La base de datos descargada contiene información diaria desde el año 1930 hasta el presente. Debido a que en algunas de las estaciones se encuentran grandes vacíos de información., se escogieron 143 estaciones meteorológicas (17% del número total de estaciones disponibles) que contenían por lo menos el 90% de datos en el rango de análisis desde el 12 de marzo de 2014 hasta el 09 de marzo de 2018.

Satellite-based rainfall estimates (SRE's)

Las lluvias estimadas basadas en información satelital (Satellite-based rainfall estimates SRE's) desde marzo de 2014 hasta marzo de 2018 fue descargada desde el website de la NASA, el Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES-DISC) (disc.gsfc.nasa.gov/). El website contiene información usada en el estudio de la atmósfera, agua, energía y el cambio climático. Los productos están disponibles en formato NetCDF, para gran parte del planeta y el territorio chileno. A continuación, se describirán las características de los esquemas de calibración del análisis de precipitación multi-satélite del TRMM (TMPA), y la misión de medición de precipitación global (GPM), detallando los productos y equipos usados para la producción de productos de SRE's.

Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG)

La misión GPM reúne distintos proyectos internacionales usando información proveniente de distintos satélites equipados con sensores de microondas, además de la inclusión del radar de precipitación de doble frecuencia (Dual-frequency Precipitation Radar DPR) y el GPM microwave imager (GMI) (JAXA, 2018). La NASA (USA) y JAXA (Japón) comenzaron la colección de información el 28 de febrero de 2014, cubriendo un área de escaneo total entre las latitudes 60° norte y 60° sur. El sistema 3IMERG entrega dos productos en tiempo real, la versión temprana (Early version) y tardía (Late version), y una versión en post-tiempo real, llamada Final Run. La versión tardía puede ser descargada en una resolución temporal cada media hora (3IMERGHH) y mensual (3IMERGM). La versión temprana (3IMERGHH-E) y tardía (3IMERGHH-L) son cargadas al sistema después de 4-6 horas y 12-18 horas, respectivamente, luego de la obtención de la información por parte de los satélites. En cambio, las versiones finales 3IMERGHH y 3IMERGM son cargadas al sistema luego de 3 meses después de la obtención de información (Huffman et al. 2017).

TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA)

Desde la información en bruto obtenida por la TRMM, la TMPA logra calibrar la lluvia estimada usando información entregada por satélites equipados con sensores de medición de microondas pasivas (PMW), información infrarroja geoestacionaria (IR) (Kidd & Levizzani, 2011), información de precipitación medida en terreno por el centro mundial del clima (GPCC) y el análisis mensual de precipitación del sistema de monitoreo y análisis del clima (CAMS) (Huffman et al., 2007). El producto TRMM 3B42 tiene una resolución espacial de 0.25°x0.25°, entre las latitudes 50° norte y sur; y una resolución temporal de 3 horas.

Los SRE's usados en esta investigación corresponden a las versiones finales de la GPM y de la TMPA: 3IMERGHH (en adelante llamado 3IMERG) y Daily 3B42 V7, respectivamente. La cobertura espacial corresponde al rango desde la latitud 17°S hasta la latitud 50°S, esta corresponde a la máxima cobertura otorgada por la TRMM. Adicionalmente, la resolución espacial para cada uno de los productos no fue modificada para lograr capturar las precipitaciones estimadas efectivas.

Comparación de datos

Los datos observados por las estaciones meteorológicas (O) fue comparada con los productos de lluvias estimadas (E) usando dos diferentes tipos de índices estadísticos: de categoría y continuos. Además, el desempeño de los productos 3IMERG y 3B42 V7 fueron comparadas en rangos temporales diarios y estacionales. La resolución espacial más fina (correspondiente al producto 3IMERG) es un acierto para zonas de alta pendiente (cordillera de la Costa y de los Andes). Las zonas topográficas fueron clasificadas como se indica a continuación: bajas (<1000 m.s.n.m.), medias (1000-2000 m.s.n.m.) y altas (>2000 m.s.n.m.).

Los índices estadísticos de categoría cuantifican la habilidad de los SRE's para identificar la ocurrencia y no-ocurrencia de eventos de precipitación a una escala diaria. Las variables de categoría utilizadas fueron: acierto (H), valor perdido (M), falsa alarma (FA) y correcto negativo (CN).

El porcentaje de estimaciones correctas PC (ecuación 1) es la fracción de eventos correctamente identificados (H+CN) sobre el total de días analizados. La probabilidad de detección, POD (ecuación 2), es la razón entre los aciertos obtenidos y el total de eventos ocurridos (H+CN). La razón de falsas alarmas, FAR (ecuación 3), es el número total de falsas alarmas generadas dividido por el número total de eventos estimados por los satélites (H+FA). El equitable threat score, ETS, (Ecuación 4) es la razón entre el número de eventos correctamente estimados (H) y el total de eventos estimados y observados (H+FA+M), ajustado por la frecuencia aleatoria de eventos estimados, H_e (ecuación 5) (Gupta et al. 2009; Kling et al. 2012; Zambrano-Bigiarini et al. 2017).

$$PC = \frac{H + CN}{N_e} \quad (1)$$

$$POD = \frac{H}{H + M} \quad (2)$$

$$FAR = \frac{FA}{H + FA} \quad (3)$$

$$ETS = \frac{H}{(H + FA + M) + H_e} \quad (4)$$

$$H_e = \frac{(H + M) * (H + FA)}{N_e} \quad (5)$$

Los índices estadísticos continuos miden el error de i) la dinámica temporal de las estimaciones de precipitación, ii) bias (sobreestimación y subestimación), y iii) la variabilidad de las magnitudes de precipitación estimada. Para el estudio de modelos hidrológicos, numerosos criterios han sido utilizados para indicar que tan ajustados se encuentran los datos estimados y observados. Basado en Gupta et al. (2009) y Kling et al. (2012) este trabajo usa el método de eficiencia modificado de Kling Gupta (ecuación 6) para analizar el ajuste entre los datos observados y estimados, KGE'. La KGE' usa la combinación de los resultados del coeficiente de correlación lineal, r (ecuación 7), del BIAS (ecuación 8), y de la razón de variabilidad, γ (Ecuación 9) para establecer la calidad de la información de los SRE's. Los valores de KGE', r , BIAS, y son 1 (ver Tabla 1).

$$KGE' = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (BIAS - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}, \quad (6)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) * (E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}} \quad (7)$$

$$BIAS = \frac{\mu_E}{\mu_O} \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{\sigma_E / \mu_E}{\sigma_O / \mu_O} \quad (9)$$

Donde O_i es el valor i observado, E_i es el valor i estimado obtenido de los SRE's, σ_E y σ_O son las desviaciones estándar de los valores estimados y observados, μ_E y μ_O son las medias aritméticas de todos los valores estimados y observados, respectivamente.

Tabla 1. Valores mínimos, máximos y óptimos para los indicadores de categoría y continuos.

Index type	Index name	Min	Max	Optimal
Categorical	PC	0	1	1
	POD	0	1	1
	FAR	0	1	0
	ETS	-1/3	1	1
Continuous	r	-1	1	1
	BIAS	$-\infty$	$+\infty$	1
	KGE'	$-\infty$	1	1
	γ	$-\infty$	$+\infty$	1

3. Resultados

Los resultados son presentados, en primer lugar, los índices de categoría y luego los índices continuos de estadística, los que fueron calculados para todo el periodo de estudio, entre marzo de 2014 a marzo de 2018. Tanto para el producto 3IMERG como para el 3B42 V7 los resultados mostraron diferencias dependiendo de la macro zona y estación del año que se analizó.

Índices de categoría

La estacionalidad inter anual del régimen de precipitaciones afecta el rendimiento de los SRE's. Esto se ve reflejado en los resultados de los índices detección para cada estación del año, los cuales son presentados en la Figura 2.

Los valores del indicador PC muestran la alta probabilidad de identificación de eventos para ambos productos ($PC > 0.5$ para todas las temporadas del año y macro zonas). Para la macro zona Norte y durante el verano (llamado invierno Altiplánico), el 3IMERG alcanza un PC máximo de 0.79, este valor corresponde al menor valor obtenido respecto de las otras estaciones del año. El valor de PC máximo en la macro zona Norte durante los meses de invierno fue 0.94. El producto 3B42 V7

obtiene un PC promedio de 0.83 en los meses de verano, este último valor es el más alto obtenido por este producto en la macro zona Norte. En la macro zona Central, los mejores valores para el indicador de PC, en el caso del 3IMERG y del 3B42 V7 se encuentran en los meses de verano, con un PC máximo de 0.83. y 0.88 respectivamente. Los valores más bajos de PC de todo el análisis realizado se obtuvieron en las macros zonas Sur y Austral (ver Figura 2). De estos valores, el producto 3IMERG tiene PC mínimo de 0.72 (Sur) y 0.67 (Austral) durante los meses de primavera. El 3B42 V7 tiene PC mínimo 0.55 (para ambas macro zonas) durante los meses de invierno.

Según el indicador de POD ambos productos son buenos detectando eventos de lluvia. En la macro zona Norte los valores más altos del POD se encuentran en los meses de verano, en esta estación los productos 3IMERG y 3B42 V7 presentan un POD máximo de 0.84 y 0.64, respectivamente (estos son los más altos de todas las macro zonas). Las macro zonas Central, Sur y Austral presentan resultados similares a lo largo de todo el año. Para estas tres macro zonas (Central, Sur y Austral), el producto 3IMERG alcanza un POD máximo de 0.75, 0.79 y 0.73, mientras que para el 3B42 V7 el POD máximo es de 0.42, 0.43 y 0.37, respectivamente. Todos los valores de POD máximo antes, mencionados son obtenidos entre las temporadas de otoño e invierno.

Los resultados del índice de razón de falsas alarmas (FAR), al igual que en el caso de los dos índices anteriores (PC and POD), presenta los mejores resultados para la macro zona Norte durante el invierno Altiplánico. El 3IMERG obtiene mayor índice FAR que el 3B42 V7, por lo tanto, en esta macro zona el 3B42 V7 entrega una menor cantidad de falsas alarmas. Sin embargo, esta condición se invierte durante las estaciones de otoño, invierno y primavera donde el desempeño del 3IMERG es mejor en que el del 3B42 V7 (para estas tres estaciones el FAR promedio fue de 0.80 para el 3IMERG y de 0.87 para el 3B42 V7). Al igual que en la macro zona Norte, en las macro zonas Centro, Sur y Austral el producto 3IMERG obtiene un mayor FAR (FAR promedio de 0.39) que el producto 3B24 V7 (FAR promedio de 0.32).

De los resultados del indicador ETS se evidencia que los valores son todos superiores a cero, sin embargo, ambos productos, 3IMERG y 3B42 V7, no tienen la capacidad de capturar la fracción de eventos de lluvia de manera correcta (en general, para ambos SRE's el ETS fue menor que 0.33 en todas las macro zonas y estaciones del año). En la macro zona Norte, durante los meses de verano (invierno Altiplánico) el valor de ETS fue de 0.33 para ambos productos, este valor corresponde al máximo obtenido para las macrozonas y estaciones del año. En la macro zona Central los valores más altos de ETS se hayan en las temporadas de otoño e invierno. En esta misma macro zona el producto 3IMERG obtiene en la temporada de invierno un ETS promedio de 0.24, mientras que el producto 3B42 V7 obtiene para la temporada de otoño un ETS promedio de 0.21. En la macro zona Sur el producto 3IMERG concentra los mejores resultados durante la temporada del año seca (primavera y verano) con un ETS máximo de 0.29 (primavera). Para esta misma macro zona, los mejores resultados del producto 3B42 es un ETS máximo de 0.16 (otoño). Finalmente, en la macro zona Austral los mejores resultados del indicador ETS, para ambos productos, se presentan en los meses de verano y otoño. El valor máximo de ETS para producto 3IMERG fue de 0.28 (verano), mientras que el valor máximo de ETS para producto 3B42 V7 fue de 0.15 (otoño).

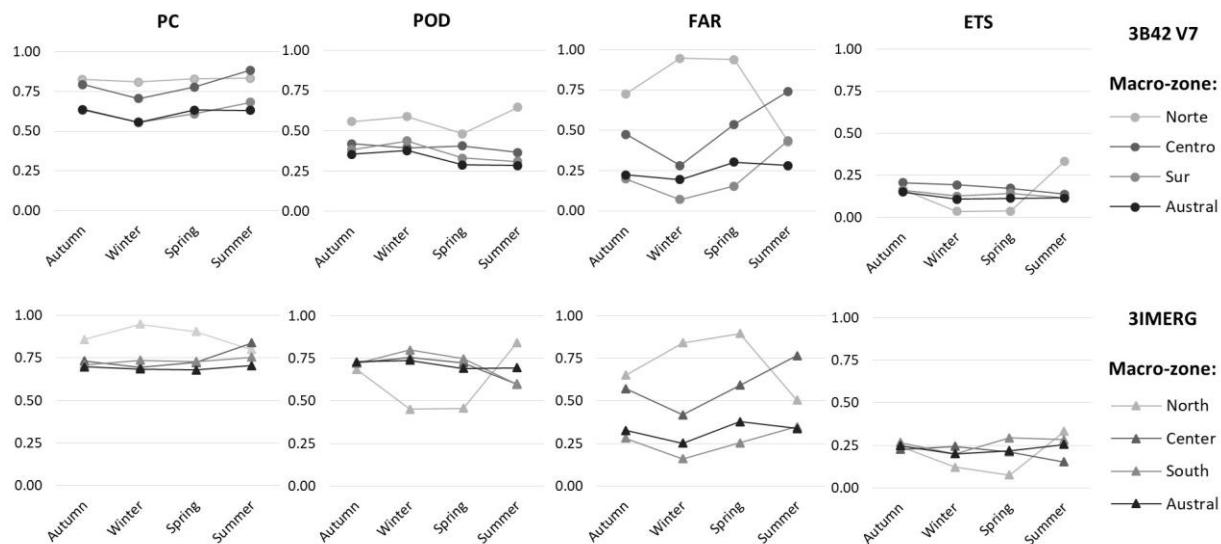


Figura 2. Índices de detección (PC, POD, FAR y ETS) para cada macro zona para las temporadas del año de otoño (MAM), invierno (JJA), primavera (SON) y verano (DEF).

Los altos promedios de POD y FAR obtenidos en la macro zona Norte por este estudio concuerdan con lo observado por Mantas et al. (2014) en la zona sur del Perú para el producto 3B42 V7. En la macro zona Central, los índices POD y FAR obtenidos en este estudio en temporadas del año húmedas (3IMERG, POD=0.73 y FAR=0.49; 3B42 V7, POD=0.40 y FAR=0.37) son mejores que los obtenidos en temporadas del año secas (3IMERG, POD=0.66 y FAR=0.67; 3B42 V7, POD=0.38 y FAR=0.63). Los buenos resultados de POD para temporadas húmedas en la zona central de Chile fueron obtenidos por Hobouchian et al. (2017).

Índices continuos

Para el análisis de correlación de Pearson r se utilizaron diferentes rangos de intensidad de precipitación (I en mm/día) basados en la World Meteorological Organization (WMO) (2014b), considerando una clase adicional, debido a la sensibilidad de los SRE's. la clasificación de intensidades utilizada fue de precipitaciones livianas ($1 \text{ mm/día} < I < 2.5 \text{ mm/día}$), moderadas ($2.5 \text{ mm/día} < I < 10 \text{ mm/día}$), fuertes ($10 \text{ mm/día} < I < 50 \text{ mm/día}$) y violentas ($I > 50 \text{ mm/día}$). El desempeño de ambos sensores basados en el coeficiente r son mostrados en la Figura 3, utilizando un gráfico de cajas y pestañas.

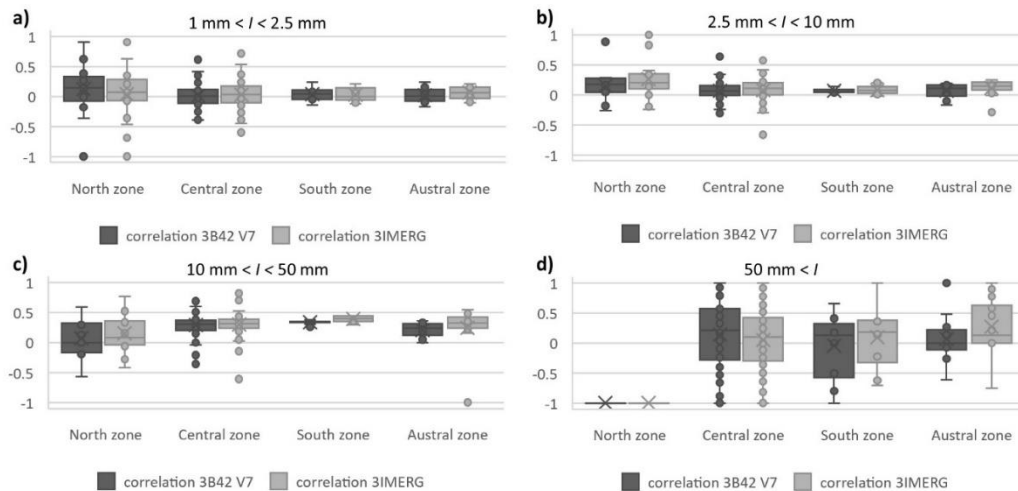


Figura 3. Resultados del análisis de correlación lineal r entre los datos de los SRE's y los observados por las estaciones meteorológicas en cada macro zona y para diferentes rangos de intensidad de lluvia. Los valores medios de cada macro zona están marcados con una X.

De la Figura 3, es posible constatar que los valores de correlación promedio son poco significativos, cercanos a una correlación nula ($r=0$). Además, para ambos SRE's, estos valores no presentan una gran dispersión, excepto para lluvias donde $I > 50$ mm/día, donde también mejora el valor del indicador r . En general, el producto 3IMERG obtiene mejores resultados que el 3B42 V7. La macro zona Sur, r presenta una menor dispersión respecto al promedio (ver Figura 3b, 3c, 3d), en estas macro zonas se concentran la mayor cantidad de eventos de lluvia con umbrales de intensidad entre de los 10-50 mm/día.

El índice BIAS fue calculado para todas las tormentas en el período de tiempo estudiado. Los resultados son presentados en la Figura 4, donde la altura de lluvia estimada por el producto 3IMERG es más cercana a los observados (BIAS más cercano a 1) en comparación con la estimada por el producto 3B42 V7.

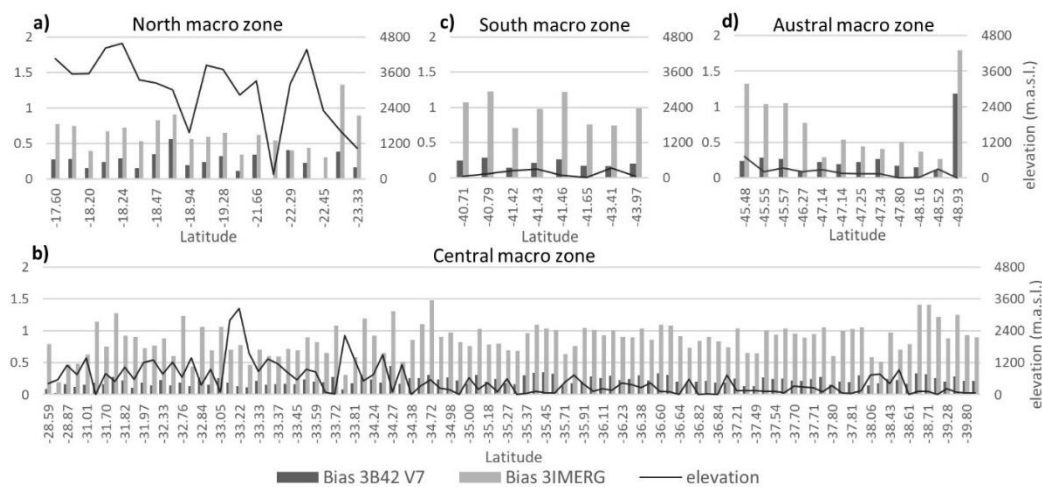


Figura 4. Resultados para BIAS de los productos 3IMERG y 3B42 V7 para las macro zonas a) Norte, b) Central, c) Sur y d) Austral. En el eje secundario se presentan las alturas de las estaciones meteorológicas.

El mejor desempeño para el 3IMERG ocurrió en la macro zona Sur con un BIAS promedio de 1.08. El mejor desempeño del 3B42 V7 fue en la macro zona Austral con un BIAS promedio de 0.27.

Los resultados para el análisis del indicador de desempeño KGE' para toda el área de estudio se presentan la Figura 5. Los resultados muestran que en la gran mayoría de los casos la 3IMERG obtiene un mejor desempeño en comparación con su predecesor 3B42 V7.

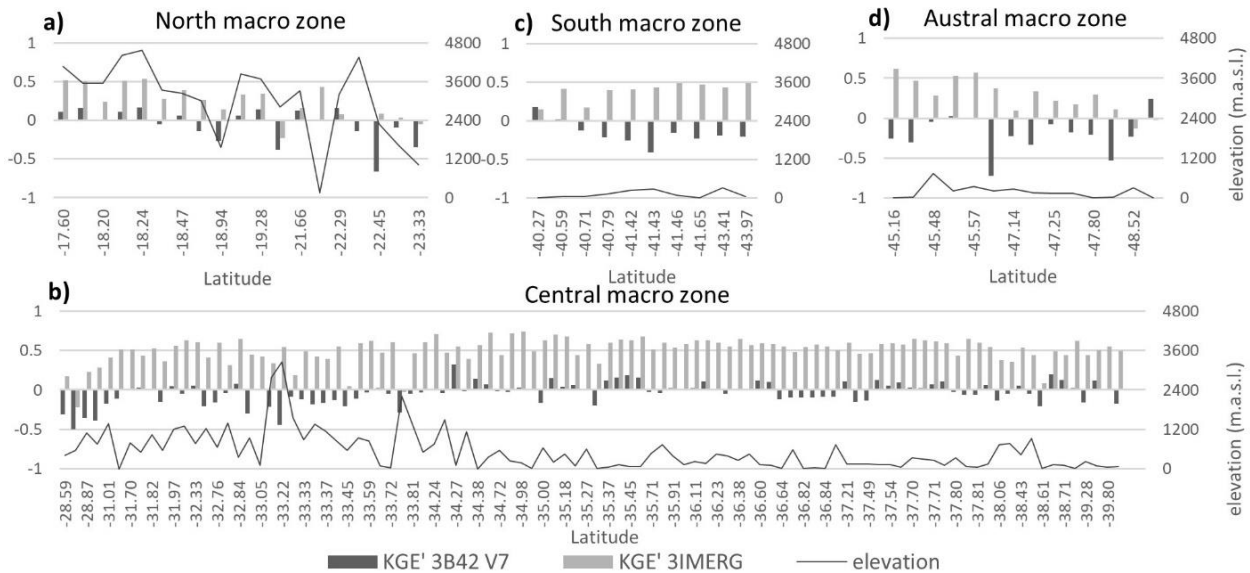


Figura 5. Resultados de KGE' para cada macro zona. El segundo eje representa la elevación de las estaciones meteorológicas.

Los mejores resultados para el KGE' se observan en la macro zona Central, donde el 3IMERG presenta un KGE' máximo de 0.74, muy por sobre del 3B42 V7 que obtiene un KGE' máximo de 0.32. En esta macro zona los KGE' promedios del 3IMERG y 3B42 V7 son de 0.50-0.04, respectivamente.

4. Discusión y Análisis

En términos generales, el desempeño obtenido por el producto 3IMERG supera al del producto 3B42 V7, esto corresponde al avance en los equipos utilizados en la estimación de precipitaciones. La mayor resolución temporal y espacial del producto 3IMERG da como resultado una mejora en la medición de precipitaciones cuando estas son del tipo ciclónico (también cuando estas presentan un componente orográfico; e.g. el caso de la macro zona Central) y convectivas (e.g. el caso de la macro zona Norte), de corta duración y espacialmente poco extendidas. Resultados similares, sobre la mejora en las estimaciones del 3IMERG para eventos de corta duración fueron encontrados por Tan and Duan (2017) y Xu et al. (2017). La mejor capacidad del 3IMERG se explica por el aumento del rango de banda de frecuencia del DPR (pasando de 13.60 GHz en el TRMM a 35.55 GHz en el GPM). Además, la mayor cantidad de canales incluidos en el sensor GMI, entrega una mejor estimación y sensibilidad de eventos de menor intensidad (>0.5 mm) y para un menor paso de tiempo (0.5 hr.), incluyendo la identificación de partículas de hielo (JAXA, 2018). La intensidad

de la precipitación es un factor que influye en el desempeño de los SRE's, los mejores valores de los índices continuos (Figura 3), se obtienen para los eventos intensos (10-50 mm/día) y violentos (>50 mm/día).

Los resultados encontrados en este estudio son consistentes con los obtenidos por otros estudios realizados en esta zona y en otras partes del mundo. Como se observa en la Figura 2, existe una mejora en el desempeño de los SRE's entre la estación del año seca y la húmeda, esta es una tendencia que se repite en otras partes del mundo como Pakistán (Hussain et al., 2018) y Brazil (Salles et al., 2019). Zambrano-Bigiarini (2017), para las diferentes macro zonas de Chile, encontró que el TRMM (producto 3B42 V7) tiene mejores resultados que otros SRE's (e.g. CMORPH, PERSIANN, CHIRPS, MSWEP), sin embargo, concluyó que ninguno de los SRE's analizados representa una fuente confiable de datos de precipitación. Por otro lado, Mendez (2016), para la macro zona Central de Chile, obtuvo mejores rendimientos (tanto en la identificación de eventos como en la estimación de volúmenes de lluvia caída), con el producto 3IMERG que para el 3B42 V7.

Considerando los resultados encontrados para los índices de detección para locaciones a altas elevaciones en la macro zona Central, y para las locaciones donde se cumplen climas de hielo y nieves permanentes en las macro zonas Sur y Austral, una de las dificultades para los SRE's radica en la distinción entre precipitación líquida y sólida. Según Hussain et al. (2018), señala que, para zonas montañosas y glaciares, la presencia de nubes frías y campos de hielos dificultan las estimaciones de los SRE's, debido a que la temperatura umbral de las nubes para discriminar precipitaciones nieve y lluvia es difícil de determinar. Como consecuencia de esto, las nubes que tienen temperaturas por sobre este umbral pueden ser erróneamente identificadas como lluvia cuando no lo son. De acuerdo a lo anterior, para las estaciones ubicadas en las zonas altas (sobre 2000 m.a.s.l.) los resultados de las estimaciones de los productos están condicionados por factores climáticos y topográficos (ver Tabla 2).

Tabla 2. Media aritmética para los índices de categoría y continuos para todas las estaciones a baja (0-1000 m.a.s.l.), mediana (1000-2000 m.a.s.l.) y mayor (2000 m.a.s.l. <) altura.

	Elevación (m.s.n.m.)		
	0-1000 (3IMERG ; 3B42 V7)	1000-2000 (3IMERG ; 3B42 V7)	2000< (3IMERG ; 3B42 V7)
PC	0.75 ; 0.82	0.74 ; 0.86	0.81 ; 0.78
POD	0.85 ; 0.50	0.78 ; 0.44	0.77 ; 0.61
FAR	0.60 ; 0.46	0.85 ; 0.82	0.78 ; 0.84
ETS	0.25 ; 0.25	0.09 ; 0.10	0.16 ; 0.09
r	0.63 ; 0.55	0.57 ; 0.50	0.55 ; 0.46
BIAS	0.91 ; 0.23	0.67 ; 0.18	0.59 ; 0.24
KGE'	0.48 ; -0.06	0.35 ; -0.12	0.27 ; -0.07

De la Tabla 2 se puede ver que el índice PC para el 3IMERG es menor que el obtenido por el producto 3B42 V7 a bajas y medias elevaciones. A altas elevaciones el producto 3IMERG obtiene un mayor porcentaje de identificaciones correctas comparado con el 3B42 V7.

Los resultados del BIAS índice obtenidos en las macro zonas Central (BIAS promedio de 0.86) y Sur (BIAS promedio de 0.21) concuerdan por estudios anteriores realizados en estas macro zonas

(Mendez, 2016; Baez-Villanueva et al., 2018; and Rivera et al., 2018), donde los SRE's subestiman los montos de precipitaciones. La presencia de la Cordillera de la Costa y de la Cordillera los Andes en la generación y distribución de precipitaciones (Garreaud et al., 2016; Viale & Nuñez, 2010) es un factor importante en los resultados obtenidos en este estudio. Estos resultados se asemejan a lo descrito por Asong et al. (2017) en la zona de las Rocky Mountains (Canadá) y Caracciolo et al. (2018) en las islas de Sicilia y Cerdeña, donde 3IMERG tuvo subestimaciones. En estas dos áreas la influencia del clima marítimo y la influencia de efectos orográficos es muy relevante.

5. Conclusiones

La evaluación realizada evidenció que, a pesar del avance tecnológico en los SRE's aún existen las incertezas no menores en los productos de las misiones satelitales TMPA y GPM. El análisis realizado a lo largo de más de 3600 km en el territorio chileno, mostró que los factores más importantes que afectan la estimación de lluvia son: i) las características hidroclimáticas de la zona, ii) la estación del año que se esté evaluando (húmeda/seca) y iii) el relieve (topografía). Los resultados a nivel general muestran que el producto 3IMERG de la GPM y el producto 3B42 V7 del TRMM no logran captar satisfactoriamente los eventos de lluvia en las diferentes macro zonas analizadas. Algunas excepciones, donde los montos de lluvias son estimados con un mayor grado de precisión por los SRE's, ocurren en zonas hidroclimáticas que presentan altas intensidades de lluvia y donde el efecto orográfico es menos marcado (ciertas áreas de las macro zonas Central y Sur). Adicionalmente, se observó que el producto 3IMERG, respecto de su antecesor 3B42 V7, obtiene mejores resultados en la capacidad de identificación y estimación de lluvia caída.

De la comparación de los desempeños de los productos 3IMERG y 3B42 V7 en las diferentes macro zonas hidroclimáticas de Chile mediante indicadores se pueden resumir las siguientes conclusiones:

- Ambos SRE's, obtuvieron los mejores resultados de PC en la temporada seca del año, mientras que, para el POD, FAR and ETS se obtuvieron los mejores resultados en la temporada húmeda del año. En la macro zona Norte, los índices POD, FAR y ETS fueron los más altos en verano (invierno Altiplánico corresponde a la temporada del año húmeda), mientras que los mejores valores en el resto de las macro zonas (Central, Sur y Austral) fueron obtenidos durante los meses de otoño e invierno (temporada del año húmeda).
- Mediante el análisis de correlación de Pearson r se obtuvo que para precipitaciones de intensidades en el rango de los 10–50 mm/día, los SRE's mejoran su capacidad de identificación y estimación de eventos de lluvia. Según el análisis de BIAS, las estimaciones del producto 3IMERG para toda la zona de estudio, son más precisas que el producto 3B42 V7. Estos resultados pueden aportar al análisis de crecidas y balances hídricos en áreas con baja densidad de estaciones (e.g. macro zona Norte).
- Respecto de la dinámica temporal y volumétrica de los eventos de lluvia analizados, usando el índice KGE', se confirmó que el 3IMERG es capaz de obtener mejores resultados que el 3B42 V7.
- En zonas de alto gradiente de elevación, los eventos de precipitación son más difíciles de detectar y cuantificar, tanto por el rápido ascenso de las masas de aire y su condensación, como por la distinción entre precipitación líquida y sólida. Bajo estas condiciones, la identificación y cuantificación de la altura de lluvia en la Cordillera de la Costa y

Cordillera de los Andes (donde los eventos de lluvia son principalmente ciclónicos y algunas veces con forzantes orográficas) por el 3IMERG es mejor que el 3B42 V7. Se puede concluir que el producto 3IMERG ha superado ampliamente a su predecesor 3B42 V7. Un desafío a futuro para los sensores remotos de precipitación corresponde a su utilización en zonas donde los gradientes de elevación son un factor importante en la generación de precipitaciones. El producto 3IMERG puede ser una potente fuente de datos para estudios del impacto de perturbaciones climáticas sobre los ciclos hidrológicos en las zonas Centro y Sur de Chile. Adicionalmente, su utilidad en zonas remotas o donde el acceso complejo es fundamental para la obtención de datos donde difícilmente se podrían instalar estaciones. Este es el caso de la zona altiplánica del norte, lugar donde además se producen eventos de naturaleza convectiva (especialmente poco extendidos) y en zonas de acceso complejo como gran parte de los Andes Chilenos. Finalmente, este producto entrega la posibilidad de alimentar modelos de lluvia-escorrentía, para el estudio de crecidas, ampliando la información espacial de las estaciones en tierra. Dada la diversidad climática y geográfica de Chile, este estudio puede ayudar a evaluar el comportamiento de los productos 3IMERG y 3B42 V7 para otras zonas del planeta con similitudes hidroclimática.

REFERENCIAS

- Alarcon, V. J., Alcayaga, H., & Alvarez, E. (2015). Assimilation of TRMM Precipitation into a Hydrological Model of a Southern Andes Watershed (pp. 468–476). https://doi.org/10.1007/978-3-319-21470-2_34
- Asong, Z. E., Razavi, S., Wheeler, H. S., & Wong, J. S. (2017). Evaluation of Integrated Multisatellite Retrievals for GPM (IMERG) over Southern Canada against Ground Precipitation Observations: A Preliminary Assessment. *Journal of Hydrometeorology*, 18(4), 1033–1050. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-16-0187.1>
- Baez-Villanueva, O. M., Zambrano-Bigiarini, M., Ribbe, L., Nauditt, A., Giraldo-Osorio, J. D., & Thinh, N. X. (2018). Temporal and spatial evaluation of satellite rainfall estimates over different regions in Latin-America. *Atmospheric Research*, 213(December 2017), 34–50. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.05.011>
- Barrett, B. S., & Hameed, S. (2017). Seasonal Variability in Precipitation in Central and Southern Chile: Modulation by the South Pacific High. *Journal of Climate*, 30(1), 55–69. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0019.1>
- Bharti, V., & Singh, C. (2015). Evaluation of error in TRMM 3B42V7 precipitation estimates over the Himalayan region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(24), 12458–12473. <https://doi.org/10.1002/2015JD023779>
- Cabrera, J., Yupanqui, R. T., & Rau, P. (2016). Validation of TRMM Daily Precipitation Data for Extreme Events Analysis. the Case of Piura Watershed in Peru. *Procedia Engineering*, 154, 154–157. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.436>
- Cao, Y., Zhang, W., & Wang, W. (2018). Evaluation of TRMM 3B43 data over the Yangtze River Delta of China. *Scientific Reports*, 8(1), 5290. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23603-z>
- Caracciolo, D., Francipane, A., Viola, F., Noto, L. V., & Deidda, R. (2018). Performances of GPM satellite precipitation over the two major Mediterranean islands. *Atmospheric Research*, 213(June), 309–322. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.010>
- Demaria, E. M. C., Maurer, E. P., Thrasher, B., Vicuña, S., & Meza, F. J. (2013). Climate change impacts on an alpine watershed in Chile: Do new model projections change the story? *Journal of Hydrology*, 502, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.027>

- Dinku, T., Ceccato, P., Grover-Kopec, E., Lemma, M., Connor, S. J., & Ropelewski, C. F. (2007). Validation of satellite rainfall products over East Africa's complex topography. *International Journal of Remote Sensing*, 28(7), 1503–1526. <https://doi.org/10.1080/01431160600954688>
- Dinku, T., Chidzambwa, S., Ceccato, P., Connor, S. J., & Ropelewski, C. F. (2008). Validation of high-resolution satellite rainfall products over complex terrain. *International Journal of Remote Sensing*, 29(14), 4097–4110. <https://doi.org/10.1080/01431160701772526>
- Garreaud, R., Falvey, M., & Montecinos, A. (2016). Orographic Precipitation in Coastal Southern Chile: Mean Distribution, Temporal Variability, and Linear Contribution. *Journal of Hydrometeorology*, 17(4), 1185–1202. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0170.1>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Hobouchian, M. P., Salio, P., García Skabar, Y., Vila, D., & Garreaud, R. (2017). Assessment of satellite precipitation estimates over the slopes of the subtropical Andes. *Atmospheric Research*, 190, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.02.006>
- Houston, J. (2006). Variability of precipitation in the Atacama Desert: its causes and hydrological impact. *International Journal of Climatology*, 26(15), 2181–2198. <https://doi.org/10.1002/joc.1359>
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., & Nelkin, E. J. (2017). *Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) Technical Documentation*. Recuperado de https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_doc.pdf
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., ... Stocker, E. F. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), 38–55. <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>
- Hussain, Y., Satgé, F., Hussain, M. B., Martínez-Carvajal, H., Bonnet, M. P., Cárdenas-Soto, M., ... Akhter, G. (2018). Performance of CMORPH, TMPA, and PERSIANN rainfall datasets over plain, mountainous, and glacial regions of Pakistan. *Theoretical and Applied Climatology*, 131(3–4), 1119–1132. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-2027-z>
- Insel, N., Poulsen, C. J., & Ehlers, T. A. (2010). Influence of the Andes Mountains on South American moisture transport, convection, and precipitation. *Climate Dynamics*, 35(7–8), 1477–1492. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0637-1>
- JAXA. (2018). *GPM Data Utilization Handbook*. (JAXA, Ed.) (3.1). Recuperado de https://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/data_utilization/GPM_data_util_handbook_E.pdf
- Kidd, C., & Levizzani, V. (2011). Status of satellite precipitation retrievals. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(4), 1109–1116. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1109-2011>
- Kling, H., Fuchs, M., & Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424–425, 264–277. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011>
- McPhee, J. (2018). *Water Policy in Chile*. (G. Donoso, Ed.), *Water Policy in Chile* (Vol. 21). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76702-4>
- Mendez Rivas, R. A. (2016). *Productos de precipitación satelital de alta resolución espacial y temporal en zonas de topografía compleja*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Recuperado de

https://repositorio.uc.cl/bitstream/handle/11534/21480/RUTH_ARACELLY_MÉNDEZ_RIVAS_.pdf?sequence=1

Rivera, J. A., Marianetti, G., & Hinrichs, S. (2018). Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina. *Atmospheric Research*, 213(January), 437–449. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.023>

Salles, L., Satgé, F., Roig, H., Almeida, T., Olivetti, D., & Ferreira, W. (2019). Seasonal Effect on Spatial and Temporal Consistency of the New GPM-Based IMERG-v5 and GSMaP-v7 Satellite Precipitation Estimates in Brazil's Central Plateau Region. *Water*, 11(4), 668. <https://doi.org/10.3390/w11040668>

Sharifi, E., Steinacker, R., & Saghafian, B. (2016). Assessment of GPM-IMERG and other precipitation products against gauge data under different topographic and climatic conditions in Iran: Preliminary results. *Remote Sensing*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/rs8020135>

Tan, M. L., & Duan, Z. (2017). Assessment of GPM and TRMM precipitation products over Singapore. *Remote Sensing*, 9(7), 1–16. <https://doi.org/10.3390/rs9070720>

Tan, M. L., & Santo, H. (2018). Comparison of GPM IMERG, TMPA 3B42 and PERSIANN-CDR satellite precipitation products over Malaysia. *Atmospheric Research*, 202(July 2017), 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.006>

Tarek, M. H., Hassan, A., Bhattacharjee, J., Choudhury, S. H., & Badruzzaman, A. B. M. (2017). Assessment of TRMM data for precipitation measurement in Bangladesh. *Meteorological Applications*, 24(3), 349–359. <https://doi.org/10.1002/met.1633>

Tian, Y., Peters-Lidard, C. D., Eylander, J. B., Joyce, R. J., Huffman, G. J., Adler, R. F., ... Zeng, J. (2009). Component analysis of errors in Satellite-based precipitation estimates. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(24), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2009JD011949>

Viale, M., & Nuñez, M. N. (2010). Climatology of Winter Orographic Precipitation over the Subtropical Central Andes and Associated Synoptic and Regional Characteristics. *Journal of Hydrometeorology*, 12(4), 481–507. <https://doi.org/10.1175/2010jhm1284.1>

Wang, G., Zhang, P., Liang, L., & Zhang, S. (2017). Evaluation of precipitation from CMORPH, GPCP-2, TRMM 3B43, GPCC, and ITPCAS with ground-based measurements in the Qinling-Daba Mountains, China. *PLOS ONE*, 12(10), e0185147. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185147>

World Meteorological Organization (WMO). (2014a). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (2014 updat, Vol. I & II). Geneva: World Meteorological Organization (WMO). Recuperado de https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4147

World Meteorological Organization (WMO). (2014b). PART I: Measurement of meteorological variables. En *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Geneva.

Xu, R., Tian, F., Yang, L., Hu, H., Lu, H., & Hou, A. (2017). Ground validation of GPM IMERG and trmm 3B42V7 rainfall products over Southern Tibetan plateau based on a high-density rain gauge network. *Journal of Geophysical Research*, 122(2), 910–924. <https://doi.org/10.1002/2016JD025418>

Zad, S. N. M., Zulkafli, Z., & Muharram, F. M. (2018). Satellite rainfall (TRMM 3B42-V7) performance assessment and adjustment over Pahang river basin, Malaysia. *Remote Sensing*, 10(3), 1–24. <https://doi.org/10.3390/rs10030388>

Zambrano-Bigiarini, M., Nauditt, A., Birkel, C., Verbist, K., & Ribbe, L. (2017). Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(2), 1295–1320. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1295-2017>