

Artículo original

## Pronóstico de la precipitación en los Andes tropicales: lecciones de las simulaciones de convección permitida

### Forecasting precipitation over the tropical Andes: Lessons from convection-permitting simulations

J. Alejandro Martínez<sup>1\*</sup>, María L. Rendón<sup>1</sup>, Luisa F. Buriticá-Ruiz<sup>1</sup>,  
Santiago Giraldo-Cárdenas<sup>1</sup>, Paola A. Arias<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

<sup>2</sup> Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA), Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

#### Resumen

Se presentan los resultados de la evaluación de 625 pronósticos diarios de precipitación en una parte de los Andes colombianos, realizados con el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) entre 2020 y 2022. Las simulaciones se hicieron en modo de “convección permitida” usando un espaciado de cuadrícula de 4 km. El desempeño del WRF se contrastó con los pronósticos del Global Forecasting System (GFS) y con datos basados en observaciones. Los pronósticos con el WRF produjeron un patrón promedio de máximos nocturnos en valles interandinos y tierras bajas similar al del Global Precipitation Measurement Mission (GPM). La precipitación diurna según el WRF tuvo lugar, sobre todo, en las montañas. Comparados con los de la GPM, los promedios estacionales evidenciaron una sobreestimación en las montañas y una subestimación en tierras bajas. Los sesgos y precipitaciones absolutas del GFS fueron de menor magnitud que los del WRF. Las correlaciones entre acumulados diarios del GPM y los pronósticos de ambos modelos tendieron a ser mayores en las temporadas secas, llegando a valores máximos de 0,62 y 0,70 con WRF y GFS, respectivamente. Los índices basados en tablas de contingencia fueron similares en el WRF y el GFS, con valores de Bias, FAR y POD cercanos a 1,1, 0,10 y 0,96, respectivamente. La inspección de dos eventos especiales de precipitaciones elevadas en sendos lugares de Antioquia estableció que tanto el WRF como varios de los modelos globales proveyeron pronósticos útiles hasta con 12 horas de anticipación. Sin embargo, las simulaciones de mayor resolución representaron mejor las estructuras y gradientes propios del terreno complejo de los Andes tropicales.

**Palabras clave:** Pronóstico meteorológico; Regiones montañosas; Meteorología de mesoescala; Modelos numéricos; WRF.

#### Abstract

We evaluated 625 daily precipitation forecasts over parts of the Colombian Andes using the Weather Research and Forecasting (WRF) model between 2020 and 2022. We run the simulations in “convection-permitting” mode using a grid spacing of 4 km. WRF’s performance was compared with forecasts from the Global Forecasting System (GFS) and observational data. On average, WRF’s forecasts produced a pattern of nighttime maxima within the inter-Andean valleys and lowlands like that of the Global Precipitation Measurement Mission (GPM). According to the WRF model, daytime precipitation mostly occurred over the mountains. Compared to GPM, the WRF model overestimated precipitation in the mountains and underestimated it in the lowlands. In the GFS model, the biases and the absolute precipitation were smaller in magnitude than in the WRF. Correlation values between daily precipitation in the GPM and the forecasts of both models tended to be higher during dry seasons, with maximum values of 0.62 and 0.70 in the WRF and the GFS, respectively. The indices based on contingency tables were similar in the WRF and the GFS, with Bias, FAR, and POD values close to 1.1, 0.10, and 0.96, respectively. The evaluation of heavy rainfall events in two

**Citación:** Martínez JA, Rendón ML, Buriticá-Ruiz LF, *et al.* Pronóstico de la precipitación en los Andes tropicales: lecciones de las simulaciones de convección permitida. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(186):145-168, enero-marzo de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1965>

**Editor:** José Daniel Pabón Caicedo

**\*Correspondencia:**

J. Alejandro Martínez;  
[john.martinez@udea.edu.co](mailto:john.martinez@udea.edu.co)

**Recibido:** 8 de agosto de 2023

**Aceptado:** 14 de diciembre de 2023

**Publicado en línea:** 1 de febrero de 2024



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

places in Antioquia established that the WRF and several global models provided forecasts up to 12 hours in advance. However, higher-resolution simulations are better for representing structures and gradients typical of the complex terrain of the tropical Andes.

**Keywords:** Weather forecast; Mountain regions; Mesoscale meteorology; Numerical models; WRF.

---

## Introducción

Los Andes tropicales colombianos están conformados por las cordilleras occidental, central y oriental. Cada cordillera tiene sus regímenes de precipitación diferenciados que dependen de diversos sistemas de mesoescala y generan complejos climas locales y regionales (Poveda, 2004). A la altura del departamento de Antioquia la cordillera central puede alcanzar altitudes de 4.080 m s.n.m, en el páramo del Sol, y descender hasta conectarse con los valles de los ríos Cauca y Magdalena. La interacción entre los valles y la alta montaña determina climas característicos en ambas laderas de la cordillera, con una gran variabilidad espacial diaria (Poveda *et al.*, 2005; Ramírez & Jaramillo, 2012; Herzog *et al.*, 2017). Según la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), en la región andina se ha presentado el 90 % de los eventos relacionados con movimientos en masa, principalmente en Antioquia: 1.393 de los 11.900 registrados entre 1921 y 2019 (UNGRD, 2021). Además, en el 2019 fue uno de los departamentos con mayor pérdida anual esperada por inundación.

Los eventos meteorológicos extremos, como las precipitaciones intensas que producen avenidas torrenciales, derrumbes e inundaciones, pueden producir graves afectaciones a los asentamientos humanos y los ecosistemas, con pérdida de vidas humanas y costosos daños en propiedades e infraestructuras. Por lo tanto, el monitoreo y el pronóstico meteorológico son actividades esenciales para prevenir la pérdida de vidas y planificar actividades: construcción de infraestructura, tráfico aéreo, generación eléctrica, etc. Sin embargo, dada la complejidad intrínseca de la atmósfera y del territorio antioqueño, los pronósticos meteorológicos (es decir, la predicción con uno o dos días de antelación) son un gran reto que requiere esfuerzos continuos de investigación antes de aprovecharlos en la práctica. Frente a este reto, es fundamental el recurso de las simulaciones atmosféricas de alta resolución para el pronóstico meteorológico en el departamento.

Los modelos de pronóstico meteorológico en Colombia son una parte integral de la gestión del riesgo y de los sistemas de alertas tempranas. Algunas instituciones, como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Sistema de Alertas Tempranas del Valle de Aburrá (SIATA), emplean el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) (Skamarock *et al.*, 2019) para la predicción de variables meteorológicas como la temperatura y la precipitación a escalas nacional y regional, respectivamente. La verificación de las simulaciones para el pronóstico de precipitación del IDEAM ha dado buenos resultados en ciudades como Quibdó, Providencia, San Andrés y Rionegro, pero errores en Riohacha, Cali, Valledupar e Ibagué (Ruiz *et al.*, s.f.). Los pronósticos meteorológicos presentan grandes sesgos porque, al ser numéricos, tienen limitaciones para representar las condiciones atmosféricas de la región andina debido a la complejidad de la topografía de las tres cordilleras y los valles interandinos.

En diversos estudios se ha encontrado que el WRF proporciona buenas predicciones meteorológicas y que, comparado con otros modelos, resulta el más acertado para predecir la cantidad de tormentas intensas durante el tiempo de simulación o reproducir las principales características de la precipitación en áreas montañosas (Gálvez & Douglas, 2006; Wang *et al.*, 2006; Gómez-Ríos *et al.*, 2023). Por el contrario, en regiones con topografía compleja, este modelo suele sobreestimar la precipitación (Colle *et al.*, 1999; Jiménez, 2014), principalmente cuando la topografía está relacionada con fuertes procesos convectivos (Jiménez, 2014; Gómez-Ríos *et al.*, 2023). Asimismo, suele subestimar la precipitación nocturna en algunas regiones, lo cual estaría asociado con la sobreestimación de las precipitaciones durante la tarde, que deja condiciones termodinámicas poco favorables para las precipitaciones de la noche (Álvarez & León, 2015). Además de la

evaluación de las simulaciones de la precipitación con el modelo WRF, algunos estudios se han enfocado en el análisis de otras variables. Por ejemplo, **Urrego et al.** (2019) y **Cano et al.** (2022) evaluaron pronósticos de radiación solar sobre el Valle de Aburrá obtenidos con el WRF a partir de la información de piranómetros ubicados en la región. Los dos estudios sugieren que el WRF provee información útil sobre las variaciones del total diario de energía solar en superficie, aunque tiende a sobreestimar la radiación solar incidente.

Dada la importancia de los pronósticos meteorológicos en una región con topografía compleja como el departamento de Antioquia, en este trabajo se evaluó el desempeño del modelo WRF para simular la distribución espacial y temporal de los eventos de precipitación en partes de Antioquia durante cerca de 625 días en el período de 2020 a 2022. Los resultados se contrastaron con el comportamiento de modelos globales operados por centros internacionales. Se presentan aquí los resultados de la comparación estadística entre la precipitación según el WRF y las estimaciones satelitales. Primero se compararon la precipitación diurna con la nocturna y las variaciones estacionales de los promedios diarios; después se analizaron las correlaciones entre los acumulados diarios en diferentes temporadas y se evaluó el desempeño del WRF en términos de índices basados en tablas de contingencia. Estos análisis se contrastaron con los pronósticos del Global Forecasting System (GFS). Por último, se incluyeron dos ejemplos de eventos especiales de precipitación durante enero del 2023.

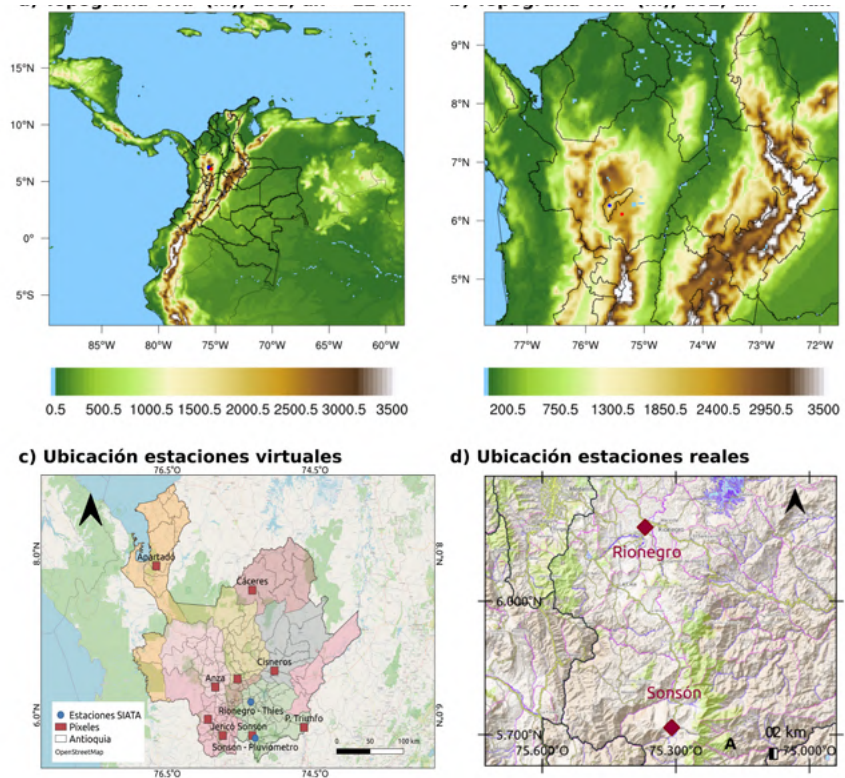
## Datos y metodología

### *Simulaciones regionales con el WRF*

Se estudiaron simulaciones hecha con la versión V4.0.2 del modelo atmosférico WRF (**Skamarock et al.**, 2019), el cual se emplea para múltiples fines, desde pronósticos meteorológicos hasta simulaciones climáticas. Con el modelo WRF se generaron simulaciones de las condiciones atmosféricas a partir de las condiciones iniciales y de frontera de los campos del GFS. Las condiciones iniciales correspondieron a las 00:00 UTC (es decir, 19:00 LT del día anterior), y las simulaciones del WRF representaban las condiciones atmosféricas de las siguientes 54 horas (es decir, desde las 19:00 LT del día 0 hasta las 01:00 LT del día 3). Se consideraron las primeras 12 horas de simulación como el *spin-up* del modelo, y los análisis estadísticos presentados correspondieron a las 24 horas siguientes (es decir, desde las 07:00 LT del día 1 hasta las 07:00 LT del día 2). Este tipo de simulaciones corresponden en sentido estricto a un re-escalamiento de los pronósticos del GFS, ya que no se realiza ningún procedimiento adicional como la asimilación de datos.

Las simulaciones WRF incluyen dos dominios (**Figura 1a, b**). El dominio externo (d01) comprende toda Colombia, además de varios países vecinos. El tamaño de la celda en d01 es de 12 km, con 290 (260) celdas en la dirección este-oeste (norte-sur). Se usa también un “ajuste espectral” (*spectral-nudging*) para longitudes de onda mayores a 1.700 km. El dominio interno (d02) tiene un tamaño de celda de 4 km, con 169 (151) celdas en la dirección este-oeste (norte-sur). Este dominio es mucho más pequeño en términos de número de celdas debido a restricciones computacionales. En el d02 se usa, asimismo, *spectral nudging* para los campos de viento, temperatura, humedad y presión por encima de la capa límite planetaria (*planetary boundary layer*, PBL), en este caso para longitudes de onda mayores a 700 km. En ambos dominios se usa el *spectral nudging* para mantener parte de la información sinóptica del GFS, lo que es importante en el caso de ondas tropicales y otras estructuras. Ambos dominios tienen 50 niveles en la vertical, con el tope en 30 hPa.

En la **tabla 1** se presentan las parametrizaciones usadas en las simulaciones. En el dominio de 12 km (es decir, el d01) se usó el esquema de cúmulos de New Tiedtke, en tanto que en el de 4 km (es decir, el d02) se esperó que las mayores estructuras convectivas fueran explícitamente resueltas por el modelo, lo que implicó que la simulación de d02 se corriera en modo de “convección permitida”. El resto de las parametrizaciones fueron las mismas en ambos dominios y se escogieron porque generalmente muestran un buen desempeño para nuestra región de estudio según se constató en los estudios de **Urrego**



**Figura 1.** a) Dominio externo del WRF. b) Dominio anidado del WRF. c) Ubicación de puntos para comparación entre GPM, WRF y GFS (estaciones virtuales: cuadros rojos). d) Ubicación de estaciones meteorológicas que representan observaciones *in situ* (ver puntos azules en (c) para ubicación relativa)

**Tabla 1.** Parametrizaciones usadas en las simulaciones con el modelo WRF (V4.0.2). Cuadrícula d01: dx = 12 km, 290 x 260. Cuadrícula d02: dx= 4 km, 169 x 151. Niveles verticales: 50. Tope: 30 hPa

Parametrización	Opción usada
Cúmulus	New Tiedtke (solo d01)
Microfísica	Morrison
Radiación	RRTMG
Capa límite planetaria	YSU
Modelo de superficie terrestre	Noah

*et al.* (2019), *Cano et al.* (2022), *Ruiz et al.* (2022), *Espinosa* (2019, 2022), *Carmona* (2021), *Fernández* (2021), *Morales* (2021) y *Camacho* (2023). Se almacenaron diversos campos de los dos dominios con intervalos de muestreo diferentes: 1 hora para d01 y 15 minutos para d02.

El desempeño del modelo empleado para el pronóstico de la precipitación se evaluó con un subconjunto de las simulaciones realizadas. El análisis se enfocó en el periodo 2020-2022 con simulaciones orientadas al pronóstico casi diario. En la **tabla 2** se registra la cantidad de días por mes con simulaciones WRF durante el periodo de análisis estadístico del estudio (marzo de 2020 a julio de 2022). Otras fechas, antes y después del periodo analizado, están disponibles en nuestro sitio web (**Figura 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1965/3943>); algunas de ellas se emplearon posteriormente en dos ejemplos del 2023.

**Tabla 2.** Número de días por mes disponibles para el análisis estadístico de este estudio (2020-2022) en las simulaciones WRF y en común en “Todos”: WRF, GFS, GPM y observaciones *in situ*. Total de días comunes: 625

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
WRF	50	54	67	72	76	68	42	50	60	62	45	55
Todos	47	52	66	65	70	39	31	50	60	61	30	54

### **Modelo global GFS**

El Global Forecasting System (GFS) ([https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical\\_forecast\\_systems/gfs.php](https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php)) de Estados Unidos es un sistema de pronósticos para todo el globo. Por motivos prácticos, se usan los pronósticos de precipitación de GFS inicializados a las 06:00 UTC (01:00 LT) en la comparación con el WRF (inicializado a las 00:00 UTC), ya que ambas simulaciones están disponibles en las primeras horas de la mañana. En este sentido, se le dio prioridad a las simulaciones disponibles a una hora fija con fines operacionales (por ejemplo, para entregar información a los responsables de decisiones y a otros usuarios a las 7 am de cada día), en lugar de comparar la misma hora de inicialización (00:00 UTC). Una desventaja es que los modelos no empiezan desde una misma condición inicial, pero la evaluación resultante permite evaluar de forma realista el valor agregado de correr el WRF con una mayor resolución (en condiciones de GFS) que simplemente esperar el pronóstico más actualizado (pero con menor resolución espacial) del GFS para su uso en las primeras horas de la mañana.

Los campos de precipitación del GFS se descargaron casi diariamente durante el periodo de interés (2020-2022) en el sitio <https://ftp.ncep.noaa.gov/data/nccf/com/gfs/prod> con una resolución de 0,25° (no debe confundirse esta con el tamaño de la celda original del modelo, de 13 km aproximadamente) (**sección 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1965/3943>).

### **Información satelital**

En este estudio se usaron las estimaciones de precipitación de la Global Precipitation Measurement (GPM) (**Huffman et al.**, 2019) para evaluar el desempeño de los modelos de pronóstico WRF y GFS. Para ello, se descargaron los datos de la GPM correspondientes a una región que cubre Antioquia y se agregaron en diferentes ventanas temporales, a partir de una hora y hasta 24, según el modelo o la métrica de desempeño considerada (ver abajo). El análisis incluyó no solamente la comparación entre campos sino también la definición de estaciones virtuales de la GPM, empleado como conjunto de referencia (**Figura 1c**), para el análisis de correlaciones y tablas de contingencia (mayores detalles en la **sección 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1965/3943>).

### **Estaciones meteorológicas**

Se empleó la información de la red de estaciones meteorológicas del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA) para medir el desempeño de los pronósticos de precipitación en el oriente antioqueño en dos estaciones (“Rionegro” y “Sonsón”) ubicadas en esta subregión (**Figura 1d**). Estas estaciones contenían información horaria de la precipitación en el periodo 2020-2022, aunque con algunos intervalos de datos perdidos. Dichos registros horarios correspondían a diferentes escalas de tiempo: las 3-horaria, 6-horaria, 12-horaria y diaria (**Buriticá**, 2023), así como acumulados diarios de precipitación de los registros horarios entre las 7 am del día de interés y las 7 am del día siguiente (es decir, la misma definición que la de los acumulados diarios del WRF) (**Tabla 3**).

### **Métodos de evaluación de los pronósticos**

La evaluación de la precipitación con el WRF se basó primordialmente en la comparación con las estimaciones satelitales de la GPM cualitativas (comparando los campos con la

**Tabla 3.** Generalidades de las estaciones SIATA empleadas

Municipio	Código	Datos perdidos (%)	Longitud (°)	Latitud (°)
Sonsón	227,228	12,10%	-75,30937	5,71597
Rionegro	199	25,90%	-75,36900	6,16629

resolución original de cada conjunto de datos) y cuantitativas (a partir de la diferencia de campos, además de correlaciones y tablas de contingencia de estaciones virtuales basadas en la GPM). Se hicieron análisis similares para el GFS y se evaluaron el WRF, el GFS y la GPM con respecto a dos estaciones meteorológicas en superficie.

Los coeficientes de correlación de Spearman proveen información sobre la covariabilidad de los modelos y los datos basados en observaciones, independientemente de las diferencias en las magnitudes típicas propias de cada conjunto de datos. Los acumulados diarios de precipitación de los modelos y la GPM se separaron según el mes del año al cual pertenecían, y para cada mes se calcularon los coeficientes de correlación de Spearman del modelo y la GPM en cada una de las estaciones virtuales definidas.

El análisis de las tablas de contingencia permite explorar mejor la capacidad de los modelos para pronosticar días “con lluvia” en contraste con días “sin lluvia”, sin importar la variación continua de los valores de los acumulados diarios de precipitación. En nuestro estudio se dividió cada muestra de datos (GPM, WRF o GFS) en dos partes: aquellos días con valores iguales o menores al percentil 5 de cada distribución, se catalogaron como días “sin lluvia”, y el resto de las fechas (con valores mayores al percentil 5 de cada distribución) se etiquetaron como días “con lluvia”. De este modo, un día “con lluvia” en el modelo y en las observaciones podía tener acumulados de precipitación muy diferentes. Es decir, el análisis de la tabla de contingencia basada en esta clasificación permitió indagar por la cantidad de veces en que el modelo se comportó de forma cualitativamente similar a las observaciones en términos de presencia o ausencia de lluvia.

Nuestros resultados se centran en índices de desempeño derivados de las tablas de contingencia, incluidos los escalares de Bias (B), porción correcta (PC), probabilidad de detección (POD) y probabilidad de falsas alarmas (FAR) (Wilks, 2006). La PC corresponde al número de días que se pronosticaron correctamente como días con o sin lluvia con respecto al total de días analizados. El Bias corresponde al número total de días con lluvia en el modelo comparado con las observaciones. El FAR representa el número de veces en que se pronosticó erróneamente un día con lluvia con respecto al total de días con lluvia en el modelo. El POD corresponde al número de días con lluvia pronosticados exitosamente con respecto al total de días con lluvia en las observaciones (para detalles adicionales ver **material suplementario 3S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1965/3943>). Aquí se presentan los resultados del análisis de los pronósticos de la precipitación acumulada en periodos de 12 horas (intervalos de 07:00 - 19:00 LT y 19:00 - 07:00 LT del día siguiente) y de 24 horas (precipitación diaria en la ventana de 07:00 LT a 07:00 LT del día siguiente). Para este fin, la información de todas las bases de datos usadas (GPM, IDEAM, WRF y GFS) se acumuló con la de los intervalos de 12 y 24 horas a partir de sus resoluciones temporales originales.

En la **tabla 2** se muestra la cantidad de días por mes con datos disponibles del WRF, los comunes de las observaciones (IDEAM y GPM) y del GFS (“Todos”). Las fechas comunes para la comparación y la evaluación fueron 625, distribuidas entre el 2020 y el 2022. La temporada seca de mitad de año estuvo entre las menos muestreadas por estos conjuntos de datos. Además, el periodo 2020-2022 se caracterizó por condiciones propias de La Niña, lo que usualmente representa anomalías positivas de precipitación en la región de estudio.

### *Eventos especiales de precipitación*

Para el estudio de los dos eventos especiales de precipitación, se usó la información de una estación del IDEAM, cuatro estaciones del Sistema de Alerta y Monitoreo de

Antioquia (SAMA) y 25 estaciones del SIATA, así como estimaciones satelitales de la GPM y pronósticos del GFS y el WRF. Además, se emplearon pronósticos de precipitación de otros dos modelos globales disponibles para esas fechas: el modelo Icosahedral Nonhydrostatic (ICON) y el Global Environmental Multiscale Model (GEM). Los pronósticos de ICON los hace el servicio meteorológico alemán (DWD) usando una configuración con un tamaño equivalente a una cuadrícula de 13 km ([https://www.dwd.de/EN/research/weatherforecasting/num\\_modelling/01\\_num\\_weather\\_prediction\\_modells/icon\\_description.html](https://www.dwd.de/EN/research/weatherforecasting/num_modelling/01_num_weather_prediction_modells/icon_description.html)). El modelo GEM lo emplea el servicio meteorológico de Canadá, con un tamaño de cuadrícula de 15 km ([https://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn/gef\\_html\\_public/index.html](https://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn/gef_html_public/index.html)). Los pronósticos de ICON y GEM usados aquí para los dos eventos tienen como hora de inicialización las 00:00U TC (7 p.m. del día anterior a la fecha de interés), teniendo en cuenta la disponibilidad operacional.

## Análisis y resultados

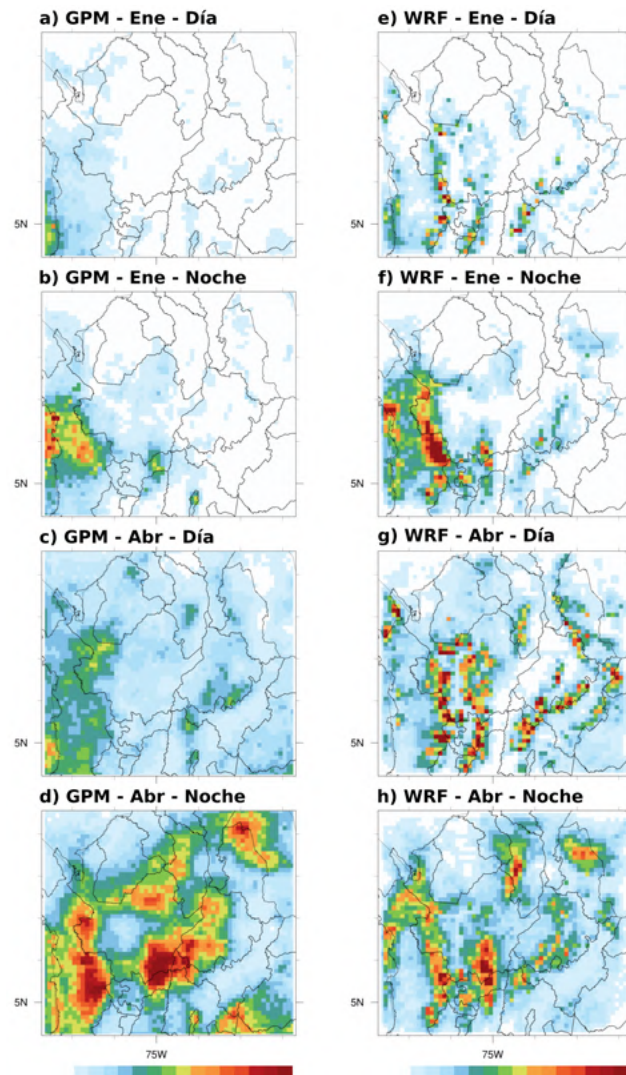
En esta sección se hace primero el análisis estadístico del desempeño del WRF y el GFS en el pronóstico de precipitación en la región correspondiente al dominio interno (tamaño de celda de 4 km) del WRF (**Figura 1b**). Las comparaciones entre los diferentes conjuntos de datos corresponden al conjunto común de días con información (625 días).

### *Contraste entre día y noche en el WRF y la GPM*

El ciclo diurno es una característica importante de la precipitación (**Poveda et al., 2005**). En las **figuras 2 y 3** se muestran los acumulados de 12 horas, que representan las precipitaciones diurnas (entre 7 am y 7 pm LT) y las nocturnas (entre 7 pm y 7 am LT), según el WRF y la GPM. Estos campos incluyen tanto los meses típicamente lluviosos del año (abril y octubre), como los de temporada seca (enero y julio). La comparación entre el WRF y la GPM sugiere que el modelo representa la disminución de las lluvias que tiene lugar durante la época más seca del año en esta región (ilustrada con los campos de enero), y el incremento relativo en los meses de temporada lluviosa (abril y octubre). En julio se registraron precipitaciones más fuertes que en enero tanto en las observaciones de la GPM como en los pronósticos del WRF.

También es notable la capacidad del modelo para simular precipitaciones diurnas y nocturnas con patrones similares a los de la GPM. Especialmente durante la noche, la GPM registró valores mucho mayores que durante el día, especialmente en el costado occidental de la cordillera occidental (incluidas partes de Chocó, así como del suroeste y del Urabá antioqueños). Algunas de estas precipitaciones están asociadas al efecto de las brisas marinas desde el Pacífico (**Mapes et al., 2003**) y a la actividad estacional y sinóptica de los vientos de bajo nivel del oeste, incluido el chorro del Chocó (**Sierra et al., 2015; Mejía et al., 2021**). Además, debe tenerse en cuenta la influencia de las precipitaciones asociadas a los sistemas convectivos de mesoescala (SCM) sobre el Pacífico colombiano (**Sakamoto et al., 2011; Zuluaga & Houze, 2015; Jaramillo et al., 2017**). Al norte de la región de estudio los mayores acumulados nocturnos se registran en el nororiente de Antioquia y partes de Córdoba, Sucre y Bolívar (incluida la Serranía de San Lucas). Una parte sustancial de esta precipitación está asociada con los SCM, los cuales se inician en las primeras horas de la noche y continúan su desarrollo y decaimiento durante la madrugada y las primeras horas de la mañana (**Zuluaga & Houze, 2015; Hernández-Deckers, 2020**). Durante abril y octubre se notan también grandes acumulados en el valle del Magdalena y en sus cercanías, incluido el oriente de Antioquia (altiplano del Oriente y Magdalena Medio) y partes de Santander. Dichas precipitaciones pueden estar asociadas tanto a circulaciones de valle nocturnas en el valle del Magdalena (**Gómez-Ríos et al., 2023**), como a incursiones desde el sur por el Magdalena o vientos de bajo nivel de tipo chorro nocturno desde el Caribe (**Camacho, 2023**).

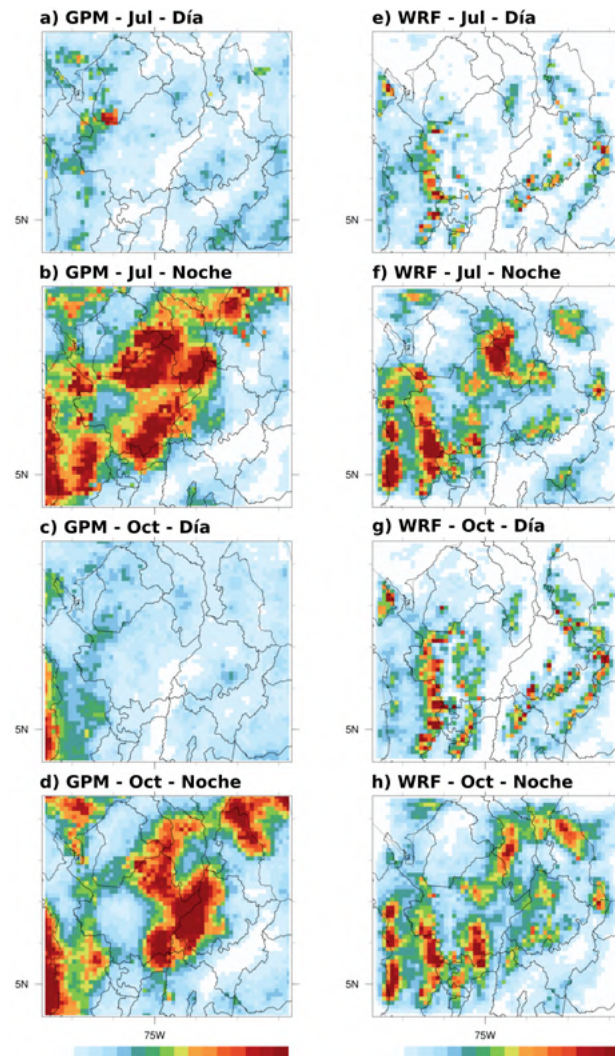
Durante la noche, el WRF registró los mayores acumulados en zonas similares a las de la GPM, aunque con patrones menos extendidos. Esto es especialmente notable en las lluvias en el Magdalena (entre Antioquia y Santander) y al oeste de la cordillera occidental



**Figura 2.** Promedios para enero (Ene) y abril (Abr) de precipitación acumulada (mm/12hr) en ventanas de 12 horas según el GPM (a-d) y el WRF (e-h). Ambas fuentes se grafican en la cuadrícula del GPM (0,1°). Los acumulados para “Día” se calculan entre las 7 am y las 7 pm LT. Los acumulados para “Noche” se calculan entre las 7 pm y las 7 am LT del día siguiente.

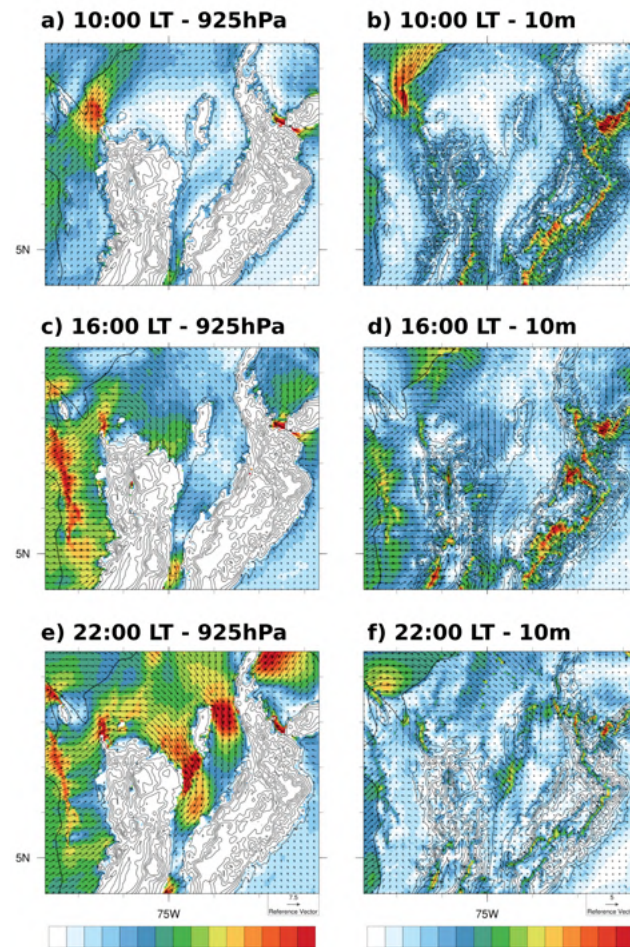
(sobre Chocó). Excepto por lo pronosticado en julio, el WRF no representó bien el patrón nocturno de precipitaciones entre Antioquia, Córdoba, Sucre y Bolívar (incluidas Ayapel y partes de La Mojana), estando los máximos en esta zona asociados a la Serranía de San Lucas (Bolívar). Por último, es notable el patrón de precipitaciones diurnas del WRF sobre y cerca de la topografía (**Figuras 2e, g y 3e, g**; ver también la **Figura 1b** como referencia), el cual no es aparente en los campos de la GPM. Es bien conocido que en varias partes de los Andes tropicales de Colombia hay un pico de precipitación en horas de la tarde (**Poveda *et al.*, 2005**). En este sentido, hay que tener en cuenta que productos satelitales similares a la GPM tienen sesgos en la estimación de la precipitación en la región (**Jaramillo *et al.*, 2017**; **Vallejo-Bernal *et al.*, 2021**); en este caso, pronosticó tiempo seco en las horas de la tarde, probablemente debido a que no se consideraron las lluvias asociadas con estructuras menos profundas. En contraste, pese a los sesgos de magnitud del WRF, este habría capturado mejor que la GPM el pico de la tarde en la actividad convectiva y la precipitación asociada en áreas de los Andes tropicales.





**Figura 3.** Promedios para julio y octubre de precipitación acumulada (mm/12hr) en ventanas de 12 horas según el GPM (a-d) y el WRF (e-h). Ambas fuentes se grafican en la cuadrícula del GPM (0,1°). Los acumulados para “Día” se calculan entre las 7 am y las 7 pm LT. Los acumulados para “Noche” se calculan entre las 7 pm y las 7 am LT del día siguiente.

El contraste de la precipitación diurna y la nocturna tiene que ver parcialmente con el ciclo diurno de los vientos en la región. Por ejemplo, durante junio, julio y agosto, los vientos a 925hPa no son muy fuertes en la mañana, pero sí se empiezan a notar vientos superficiales apuntando hacia la parte alta de las montañas (pendiente arriba) gracias al calentamiento diferencial del terreno (Figura 4 a, b, respectivamente). Durante la tarde se notan, además, los efectos de las brisas marinas tanto del Pacífico como del Caribe (Figura 4 c, d). Los vientos pendiente arriba contribuyen a la convección de menor escala en las cordilleras y los patrones de mesoescala resultantes de las brisas marinas y su interacción con el terreno favorecen zonas de convergencia de mesoescala, por ejemplo en el costado occidental de la cordillera Occidental (Chocó y occidente de Antioquia) y partes de La Mojana (Bajo Cauca). Durante la noche los vientos en la capa límite pueden acelerarse debido a una disminución del arrastre asociado con la turbulencia de la capa límite convectiva diurna (Figura 4e). Este desacople da lugar a estructuras como los chorros nocturnos y los vientos de brecha (ambos asociados con máximos de viento) y los diferentes *hot spots* de convergencia de mesoescala alrededor de los Andes, incluidos



**Figura 4.** Promedios de campos de vientos para diferentes horas del día durante la temporada junio-julio-agosto según simulaciones del WRF entre 2021 y 2022. Izquierda: nivel de 925hPa. Derecha: vientos a 10 m sobre la superficie. Los contornos de colores indican la magnitud de viento en  $\text{m s}^{-1}$ .

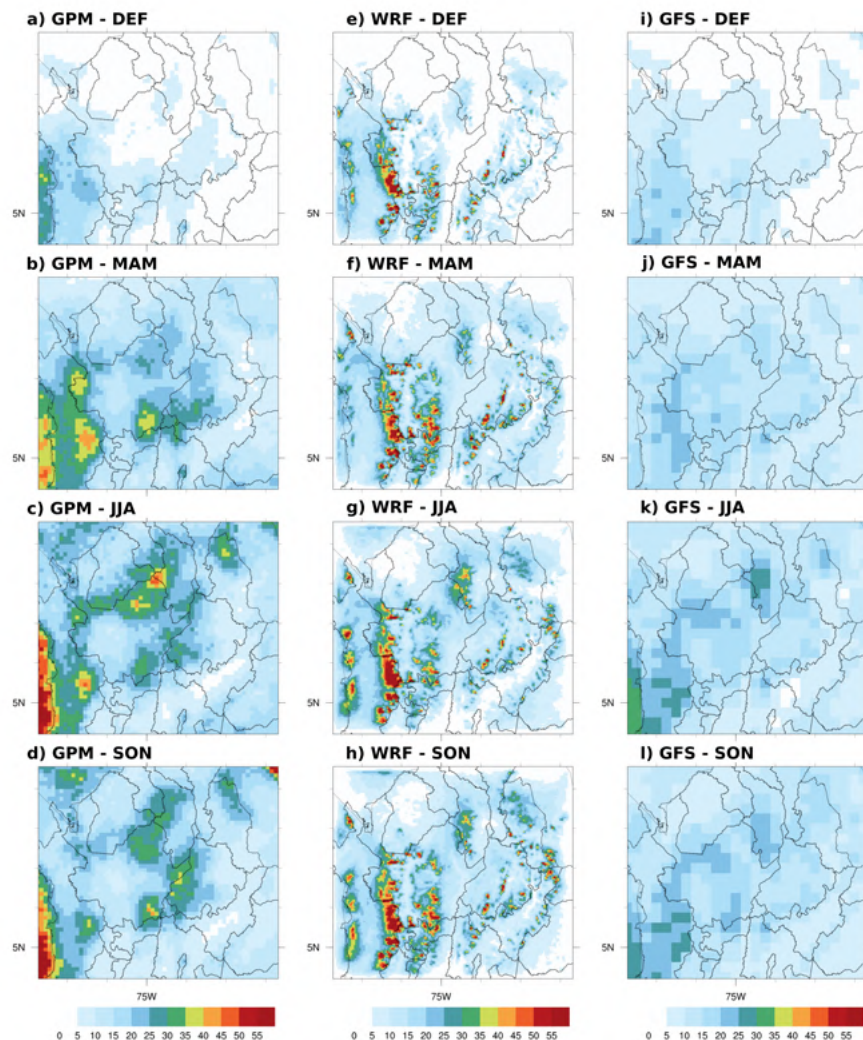
algunos a lo largo del valle del Magdalena (Magdalena Medio y Oriente antioqueño). De esta forma, mientras que la circulación pendiente arriba está relacionada con las lluvias en las cordilleras durante el día (especialmente la tarde) (**Figura 3e**), la convergencia de mesoescala está relacionada con las lluvias en el costado occidental de la cordillera Occidental en la tarde y noche, y en La Mojana, el Magdalena Medio y el Oriente de Antioquia en horas de la noche (**Figura 3f**).

#### **Comportamiento estacional del WRF y el GFS**

Los promedios estacionales de la precipitación total diaria dan una idea de las zonas más lluviosas en la región de estudio y de su comportamiento a lo largo del año (**Figura 5**). Los campos de la GPM (**Figura 5 a-d**) muestran el trimestre diciembre-enero-febrero (DEF) como el más seco del año, con valores por debajo de los 10 mm/día. Durante el periodo de estudio 2020-2022, tanto los trimestres climatológicamente caracterizados como las temporadas lluviosas (marzo-abril-mayo, MAM, y septiembre-octubre-noviembre, SON) como la temporada de junio-julio-agosto (JJA) mostraron acumulados notables de precipitaciones, con zonas alrededor de los Andes que superaron los 25 mm/día. Sobre tierra, específicamente el costado occidental de la cordillera Occidental (entre Chocó y Antioquia) y el costado oriental de la cordillera Central (en el valle del Magdalena), según la GPM los promedios pueden superar los 45 mm/día, en tanto que sobre el mar fácilmente

superan los 55 mm/día. Debe tenerse precaución con las mayores magnitudes estimadas por la GPM, ya que podrían corresponder a sobreestimaciones, pero, de todas maneras, proveen una imagen de las regiones y temporadas más lluviosas.

El WRF, por su parte, mostró variaciones estacionales similares a las de la GPM (**Figuras 5 e-h**), aunque con patrones menos extendidos y estructuras disminuidas o ausentes sobre partes del valle del Magdalena y el norte de Antioquia. Además, los promedios diarios en el WRF registraron una parte notable de la precipitación localizada sobre las cadenas montañosas o en sus laderas. En este sentido, la cuadrícula de 4 km del WRF evidenció dos efectos marcados de la topografía en la distribución de las precipitaciones gracias a los efectos de la distribución de las montañas: i) el calentamiento diferencial diurno (fuentes de calor elevadas) y sus consecuencias en la formación de convección sobre el terreno elevado y las circulaciones térmicas, y ii) el efecto mecánico de las montañas en el flujo atmosférico. Estos dos efectos combinados, entre otros, ayudan a dar forma a estructuras locales y de mesoescala en los vientos de bajo nivel que pueden favorecer regiones de convergencia y proveer forzamiento para la convección (**Figura 4**). La comparación ocasional con campos de radar (**Figura 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/>



**Figura 5.** Promedios estacionales de precipitación diaria (mm/día) según la GPM (**a-d**), el WRF (**e-h**) y el GFS (**i-l**). Cada fuente se grafica en su cuadrícula original: GPM: 0,10°, WRF: 4km (~0,036°), GFS: 0,25°

article/view/1965/3943) sugiere que las estructuras simuladas por el WRF asociadas a la topografía tienden a proveer una imagen realista, al menos en un sentido espacial. Sin embargo, nuestras simulaciones con el WRF tendieron a producir mayores acumulados diarios sobre tierra que las estimaciones de la GPM, con máximos locales que fácilmente superaban los 30 mm/día. Esta característica parece corresponder a un sobreestimado real de la precipitación en el WRF, como lo sugieren las comparaciones directas con estaciones en superficie (Buriticá, 2023).

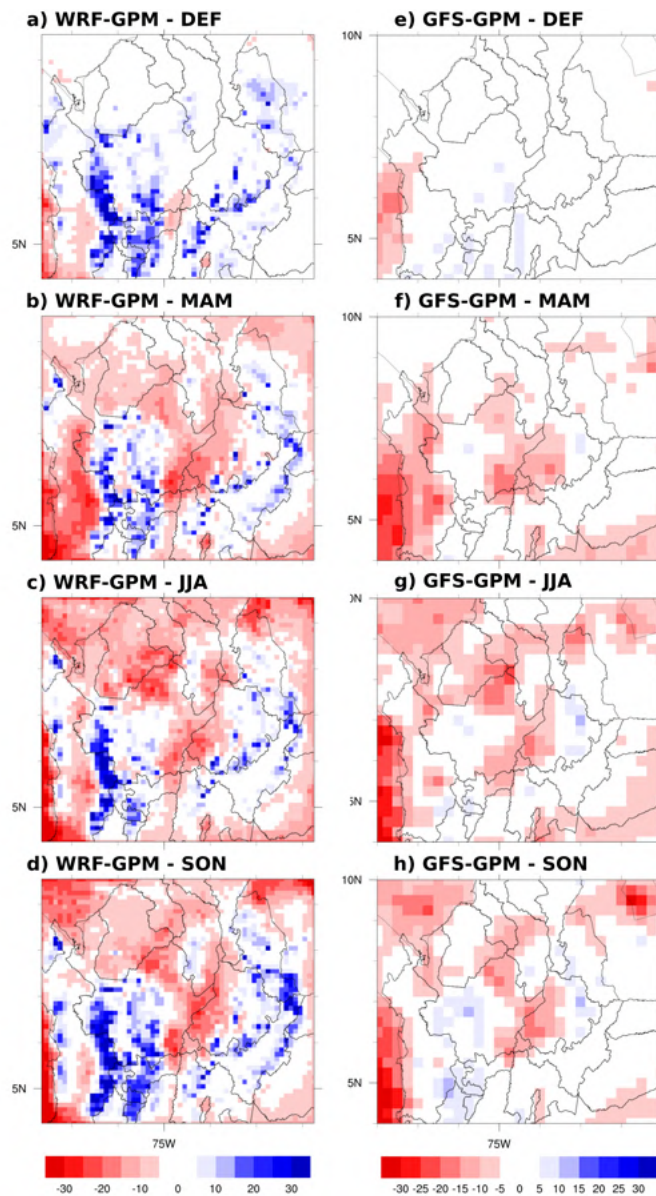
En el caso del GFS (Figuras 5 i-l), los campos a  $0,25^\circ$  mostraron, naturalmente, estructuras mucho más gruesas que los de la GPM o el WRF. Es notable, además, que los promedios diarios estacionales fueron mucho menores en el GFS que en la GPM (y que en el WRF, en general), con valores entre los 5 y los 25 mm/día. Tanto los cambios estacionales como las estructuras simuladas por el GFS tendieron a parecerse a los de la GPM, aunque la diferencia media en las magnitudes no parece explicar la ausencia del patrón marcado de lluvias sobre el Magdalena (entre Antioquia y Santander) que sugiere la GPM. A escalas de cientos de kilómetros (la mitad o un cuarto de un departamento), el GFS produjo estructuras espaciales similares a las de la GPM y el WRF, pero no proporcionó detalles en las escalas más finas ni ofreció los fuertes gradientes que probablemente sean más propios de los Andes tropicales.

Las diferencias entre el WRF y el GFS y la GPM pueden verse más claramente en la figura 6. En los dos modelos se presentaron subestimaciones en las regiones bajas, principalmente sobre el valle del Magdalena (entre Antioquia y Santander), el norte de Antioquia, La Mojana y la costa Pacífica, pero las magnitudes de tales subestimaciones con respecto a la GPM fueron mayores en el WRF. En cuanto a las regiones de montaña, es evidente que WRF presentó mayores sesgos, con sobreestimaciones durante todas las temporadas del año, en tanto que con el GFS las diferencias absolutas fueron casi nulas, con excepción de algunas regiones durante los trimestres de junio a agosto (JJA) y de septiembre a noviembre (SON).

#### ***Desempeño de los pronósticos diarios: correlaciones y tablas de contingencia***

Para identificar mejor el comportamiento diario de los pronósticos sugeridos por los modelos, se hizo un análisis basado en coeficientes de correlación y tablas de contingencia a partir de los acumulados diarios de precipitación. Como primera aproximación, se usaron estaciones virtuales con datos de la GPM que representaban las cabeceras urbanas de nueve municipios del departamento ubicados en zonas expuestas a diferentes regímenes de precipitación (Figura 1c y Figura 5). En particular, los municipios de Apartadó, Cáceres y Puerto Triunfo están más expuestos a los sistemas atmosféricos formados en tierras bajas, algunos de ellos asociados a los grandes patrones de precipitación descritos más arriba (Figuras 2-5). Los demás municipios están, en general, en tierras más altas, en terreno más complejo, aunque algunos de ellos (como Salgar y Sonsón) pueden verse afectados por estructuras atmosféricas de mayor escala asociadas con dinámicas del occidente de la cordillera Occidental y el valle del Magdalena, respectivamente.

En ambos modelos las mayores correlaciones (Tabla 4) se encontraron en julio y agosto y diciembre y enero en la mayoría de las estaciones virtuales, con valores de hasta 0,62. Estos periodos corresponden también a temporadas climatológicamente menos lluviosas, cuando la zona de convergencia intertropical (*Intertropical Convergence Zone*, ITCZ) está algo más alejada de la región de estudio o se ha suprimido. Así, los mayores valores de correlación en estos meses podrían sugerir el efecto de variaciones asociadas con estructuras sinópticas, las cuales podrían estar mejor representadas por ambos modelos. En contraste, los meses climatológicamente más lluviosos, como abril, septiembre y octubre, presentan algunos de los valores más bajos de correlación, lo que sugeriría que la actividad en estos meses tiene una componente sinóptica o subsinóptica menor que fuerza parte de la precipitación, ya que hay suficiente energía y agua precipitable para lluvias de rápido desarrollo cuando la ITCZ está más localizada sobre la región de estudio. En general, el GFS tuvo valores de correlación algo mayores que los del WRF, aunque las



**Figura 6.** Diferencias en precipitación promedio diaria (mm/día) entre: (a-d) WRF y GPM, en cuadrícula de la GPM de 0,1°; (e-h) GFS y GPM, en cuadrícula GFS de 0,25°

diferencias en promedio no fueron muy grandes. En este sentido, ambos modelos tendrían un desempeño similar en el pronóstico de fluctuaciones en la precipitación diaria (día a día) al de las estaciones virtuales escogidas. Por último, no se notó una estratificación clara dependiente de la altura de las estaciones virtuales (comparar primeras tres filas y las últimas seis).

A partir de las tablas de contingencia obtenidas para el WRF y el GFS y comparadas con la GPM, se estimaron los índices en la **tabla 5**. La PC de los pronósticos estuvo entre 78 y 90 % en el WRF, y entre 89 y 94 % en el GFS, dependiendo de la estación virtual. Además, el Bias tendió a estar entre 1,1 y 1,2 en el caso del WRF, mientras que los valores del GFS fueron más cercanos a 1,0, lo que sugiere que el WRF tendió a sobreestimar en un 10 a 20 % el número de días con lluvia comparado con la GPM. Además, el FAR se situó entre 0,1 y 0,2 en el WRF, con tendencia a situarse por debajo de 0,1 en el GFS.

**Tabla 4.** Coeficientes de correlación de Spearman de los valores diarios de precipitación de **a)** WRF vs. GPM (en cuadrícula GPM de 0,10°), y **b)** GFS vs. GPM (en cuadrícula GFS de 0,25°). Los nombres de municipios representan las locaciones de las estaciones virtuales (**Figura 1c**). Las estaciones están ordenadas de menor a mayor altura sobre el nivel del mar. Los valores en negrilla son estadísticamente significativos según una prueba *t* de dos colas, con un nivel  $\alpha = 0,05$ ; los grados de libertad se evaluaron para cada mes por separado según la **Tabla 2**.

**a) WRF Vs. GPM**

Municipio	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Apartadó	<b>0,42</b>	<b>0,29</b>	<b>0,61</b>	<b>0,26</b>	0,17	<b>-0,13</b>	0,20	0,15	<b>0,46</b>	0,21	0,28	0,23
Cáceres	0,23	0,07	<b>0,46</b>	0,06	0,16	-0,01	0,08	0,19	0,21	<b>0,43</b>	0,08	<b>0,32</b>
Puerto Triunfo	0,16	<b>0,33</b>	0,19	<b>0,29</b>	<b>0,33</b>	0,09	0,14	<b>0,44</b>	<b>0,27</b>	<b>0,31</b>	0,01	0,22
Anzá	<b>0,33</b>	<b>0,32</b>	<b>0,46</b>	<b>0,26</b>	<b>0,31</b>	0,30	<b>0,51</b>	<b>0,55</b>	0,05	0,20	<b>0,36</b>	<b>0,41</b>
Cisneros	0,09	<b>0,33</b>	<b>0,36</b>	0,07	<b>0,28</b>	<b>0,46</b>	0,09	<b>0,40</b>	<b>0,34</b>	0,22	0,11	0,06
Salgar	<b>0,47</b>	0,18	<b>0,36</b>	<b>0,42</b>	<b>0,29</b>	0,23	<b>0,43</b>	<b>0,55</b>	0,25	<b>0,35</b>	<b>0,38</b>	<b>0,57</b>
Jericó	<b>0,44</b>	<b>0,41</b>	0,17	<b>0,43</b>	<b>0,47</b>	<b>0,34</b>	<b>0,55</b>	<b>0,62</b>	<b>0,34</b>	<b>0,35</b>	0,26	<b>0,49</b>
San Pedro	0,28	0,25	<b>0,34</b>	<b>0,28</b>	<b>0,55</b>	<b>0,52</b>	<b>0,51</b>	<b>0,58</b>	<b>0,37</b>	<b>0,45</b>	<b>0,49</b>	<b>0,36</b>
Sonsón	<b>0,39</b>	0,27	<b>0,32</b>	0,22	<b>0,47</b>	<b>0,32</b>	<b>0,55</b>	<b>0,49</b>	<b>0,30</b>	<b>0,41</b>	0,32	0,22

**b) GFS Vs. GPM**

Municipio	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Apartadó	0,23	0,19	<b>0,75</b>	<b>0,31</b>	<b>0,25</b>	<b>0,35</b>	<b>0,56</b>	<b>0,38</b>	<b>0,30</b>	0,16	<b>0,36</b>	0,22
Cáceres	<b>0,32</b>	<b>0,44</b>	<b>0,61</b>	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,48</b>	0,19	<b>0,41</b>	<b>0,44</b>	<b>0,40</b>	0,08	<b>0,36</b>
Puerto Triunfo	<b>0,57</b>	<b>0,28</b>	<b>0,37</b>	<b>0,27</b>	<b>0,37</b>	<b>0,38</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,48</b>	<b>0,31</b>	<b>0,27</b>	0,17	<b>0,43</b>
Anzá	<b>0,54</b>	0,24	<b>0,25</b>	<b>0,38</b>	<b>0,50</b>	<b>0,42</b>	<b>0,50</b>	<b>0,63</b>	<b>0,60</b>	<b>0,41</b>	<b>0,45</b>	0,23
Cisneros	<b>0,67</b>	0,27	<b>0,46</b>	0,14	<b>0,39</b>	<b>0,55</b>	0,22	<b>0,70</b>	<b>0,39</b>	<b>0,35</b>	0,25	<b>0,44</b>
Salgar	<b>0,50</b>	<b>0,49</b>	0,19	<b>0,49</b>	<b>0,32</b>	0,13	<b>0,43</b>	<b>0,48</b>	<b>0,32</b>	<b>0,32</b>	<b>0,56</b>	<b>0,54</b>
Jericó	<b>0,49</b>	<b>0,34</b>	0,24	<b>0,42</b>	0,23	0,12	<b>0,43</b>	<b>0,51</b>	<b>0,36</b>	0,24	0,40	0,28
San Pedro	<b>0,61</b>	<b>0,28</b>	<b>0,47</b>	0,20	<b>0,43</b>	<b>0,45</b>	0,33	<b>0,68</b>	<b>0,33</b>	<b>0,38</b>	0,40	0,42
Sonsón	<b>0,67</b>	0,26	0,23	<b>0,29</b>	<b>0,43</b>	<b>0,35</b>	0,32	<b>0,53</b>	<b>0,40</b>	<b>0,49</b>	0,42	0,26

Por otra parte, la POD fue superior al 95 %, con valores similares en ambos modelos. Por último, debe señalarse que la fracción FAR/POD estuvo entre 0,073 y 0,219 en el WRF, en tanto que en el GFS estuvo en el rango de 0,038 a 0,115, lo que demuestra que ambos modelos tienen más pronósticos acertados de días con lluvia comparados con los desaciertos en días con lluvia pronosticados, siendo el desempeño del GFS ligeramente mejor. En el caso del WRF, Salgar se destacó como el municipio con el mejor desempeño del modelo, mientras que Cáceres presentó el peor. El modelo GFS tuvo un mejor desempeño en Sonsón y Anzá, pero mayores dificultades en Cáceres. Además, se destaca que ambos modelos presentaron un desempeño superior en municipios ubicados a mayor altitud (primeras seis filas en la **Tabla 5**).

Por último, teniendo en cuenta que la GPM puede tener sesgos importantes en la región de estudio, se presenta un análisis basado en tablas de contingencia y observaciones *in situ* del SIATA (**Tabla 6**). Una evaluación de los pronósticos basada en un conjunto amplio de estaciones meteorológicas está más allá del objetivo principal del presente estudio, por lo que el desempeño de los modelos WRF y GFS y de la GPM se evaluó con respecto a dos estaciones meteorológicas ubicadas en el sur-oriente de Antioquia (sub-región Oriente) (**Figura 1d**). Dichas estaciones están expuestas a regímenes de

**Tabla 5.** Tablas de contingencia para los modelos WRF y GFS y estimaciones satelitales de la GPM

**a) WRF Vs. GPM**

Municipio	PC	Bias	FAR	POD	FAR/POD
San Pedro	0,858	1,115	0,126	0,974	0,129
Sonsón	0,856	1,105	0,124	0,968	0,128
Jericó	0,864	1,106	0,120	0,974	0,123
Salgar	0,902	1,040	0,071	0,967	0,073
Cisneros	0,798	1,184	0,184	0,966	0,190
Anzá	0,853	1,070	0,111	0,951	0,117
Puerto Triunfo	0,824	1,114	0,145	0,952	0,152
Cáceres	0,778	1,236	0,213	0,973	0,219
Apartadó	0,795	1,209	0,195	0,973	0,200

**b) GFS Vs. GPM**

Municipio	PC	Bias	FAR	POD	FAR/POD
San Pedro	0,915	1,002	0,046	0,956	0,048
Sonsón	0,939	1,010	0,037	0,973	0,038
Jericó	0,923	1,008	0,044	0,963	0,046
Salgar	0,917	1,000	0,044	0,956	0,046
Cisneros	0,906	1,026	0,063	0,962	0,065
Anzá	0,931	1,002	0,037	0,964	0,038
Puerto Triunfo	0,878	1,042	0,085	0,954	0,089
Cáceres	0,872	1,092	0,112	0,974	0,115
Apartadó	0,896	1,016	0,063	0,952	0,066

**Tabla 6.** Tabla de contingencia para las simulaciones del modelo WRF y los pronósticos de la GFS con respecto a las observaciones del GPM y las observaciones de estaciones meteorológicas del SIATA: **a) Sonsón;** **b) Rionegro**

**a) Sonsón**

Comparación	PC	Bias	FAR	POD	FAR/POD
SIATA Vs. GPM	0,877	1,11	0,115	0,983	0,117
SIATA Vs. GFS	0,841	0,996	0,09	0,904	0,102
SIATA Vs. WRF	0,882	1,098	0,11	0,977	0,113
GPM Vs. GFS	0,945	1,01	0,037	0,973	0,038
GPM Vs. WRF	0,856	1,105	0,124	0,968	0,128

**b) Rionegro**

Comparación	PC	Bias	FAR	POD	FAR/POD
SIATA Vs. GPM	0,845	1,063	0,117	0,939	0,125
SIATA Vs. GFS	0,857	1,119	0,129	0,975	0,132
SIATA Vs. WRF	0,836	1,129	0,143	0,967	0,148
GPM Vs. GFS	0,934	1,024	0,053	0,97	0,055
GPM Vs. WRF	0,869	1,1	0,115	0,974	0,118

precipitación con máximos en las temporadas MAM y SON, y se caracterizan por máximos nocturnos de precipitación sustanciales (**Buriticá, 2023**). La estación Rionegro está localizada en territorio relativamente plano sobre la cordillera central de los Andes (valle de San Nicolás) y la estación Sonsón se encuentra más cerca al valle del Magdalena y está expuesta a los sistemas de precipitación propios de dicho valle (**Figuras 3-5**).

En la **tabla 6** se muestra un buen desempeño del modelo WRF en las estaciones de análisis, con un índice de PC del 84 % en Rionegro y del 88 % en Sonsón. Los valores de Bias del WRF indicaron un pronóstico algo excesivo de eventos de precipitación. En cuanto al índice FAR, el valor fue del 14 % en Rionegro y del 11 % en Sonsón, en tanto que el POD fue cercano al 97 %. Además, se observó un mejor desempeño del modelo WRF en el municipio de Sonsón que en Rionegro.

Tanto el GFS como la GPM fueron capaces de representar las observaciones de las estaciones meteorológicas (**Tabla 6**), con un mejor desempeño en el municipio de Sonsón que en Rionegro. Esta diferencia se refleja en la relación FAR/POD, la cual fue más baja en Sonsón en todos los casos analizados. Además, el modelo GFS tuvo un comportamiento más similar a las estimaciones de la GPM que a las observaciones provenientes de las estaciones meteorológicas. Por ejemplo, en Sonsón la relación FAR/POD entre la GPM y el GFS fue de 0,038, en tanto que aumentó hasta tres veces entre el SIATA y el GFS. En cuanto a las observaciones en tierra, se observó un buen desempeño del modelo GFS, con un índice PC superior al 86 % en ambos municipios. El Bias fue del 12 %, lo que indica un pronóstico levemente excesivo de los eventos de lluvia. Además, se obtuvo un FAR del 12 % y un POD del 98 %.

Uno de los resultados más relevantes fue la similitud del desempeño en la GPM y el SIATA con respecto a la GPM, o, incluso, ligeramente peor (en PC y POD). De hecho, al comparar el desempeño de la GPM con los datos de las estaciones de SIATA, este fue similar al de los modelos WRF y GFS. Esto tiene que ver tanto con los posibles sesgos en la GPM (**Jaramillo *et al.*, 2017; Vallejo-Bernal *et al.*, 2021**) como con su resolución efectiva, la cual puede ser varias veces mayor a  $0,1^\circ$  (**Guilloteau & Foufoula-Georgiou, 2020**). Estos resultados también sugieren que la representatividad de las diferentes bases de datos debe ser tenida en cuenta. Por una parte, los modelos tienen una resolución efectiva mayor que su tamaño equivalente de cuadrícula (**Warner, 2010; Pielke, 2013**) y, por otra parte, la precipitación es un fenómeno muy variable que las estaciones en superficie no representan cabalmente por cubrir áreas muy pequeñas (**Kidd *et al.*, 2017**). En efecto, se notó una mayor similitud entre la GPM y los modelos (probablemente porque representan áreas más parecidas entre sí), que entre esta y las observaciones del IDEAM. En este contexto, los resultados en la **tabla 5** para las estaciones virtuales sugieren que el desempeño del WRF y el GFS es, cuando menos, comparable con la representación de la GPM y, por lo tanto, puede ofrecer información útil.

### ***Ejemplos de pronóstico de dos eventos de altas precipitaciones en el departamento de Antioquia***

Para complementar el análisis estadístico presentado, se estudiaron en detalle dos eventos de precipitación ocurridos en enero del 2023 en el departamento de Antioquia, los cuales causaron daños y pérdidas importantes en cuestión de horas. El primer evento se registró el 10 de enero en el municipio de Betulia y el segundo tuvo lugar el día 14 de enero en el Valle de Aburrá.

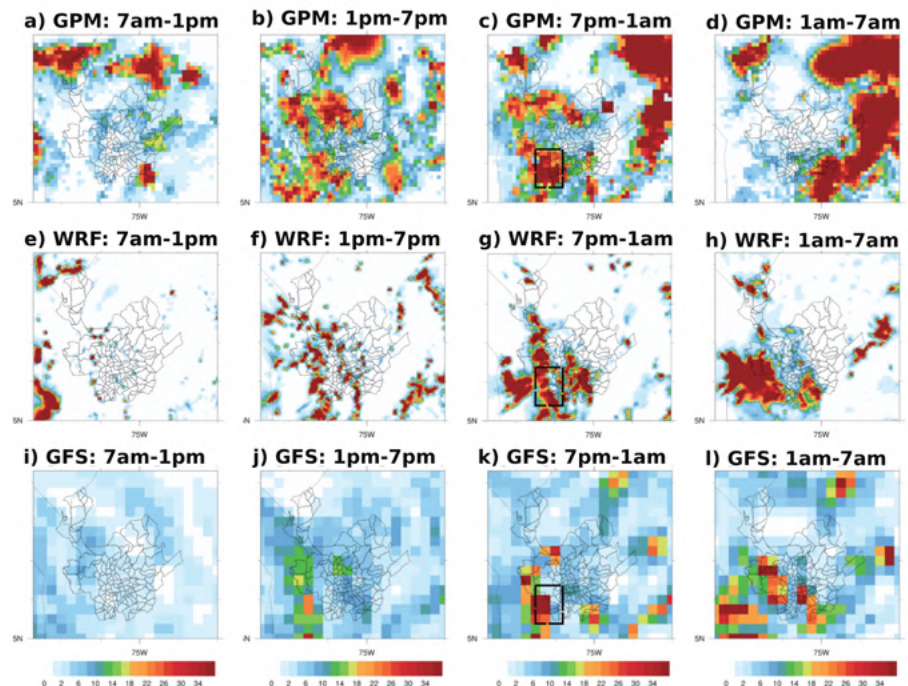
*Evento 9-10 de enero, Betulia.* El 10 de enero de 2023 se presentó un movimiento en masa que dejó incomunicados y sin acueducto a cerca de 3.500 campesinos de 11 veredas del municipio de Betulia, suroeste de Antioquia (**Blu Radio, 2023**). Es de interés analizar la precipitación en este tipo de eventos dado que su acumulación en la zona pudo tener implicaciones en la saturación del suelo, una de las posibles causas del movimiento en masa registrado.

Según las estimaciones satelitales de la GPM (**Figuras 7 a-d**), el evento de mayor magnitud tuvo lugar el 9 de enero, justo un día antes de la tragedia registrada en el municipio de Betulia, y se inició entre las 19:00h y las 20:00 LT. El máximo correspondiente

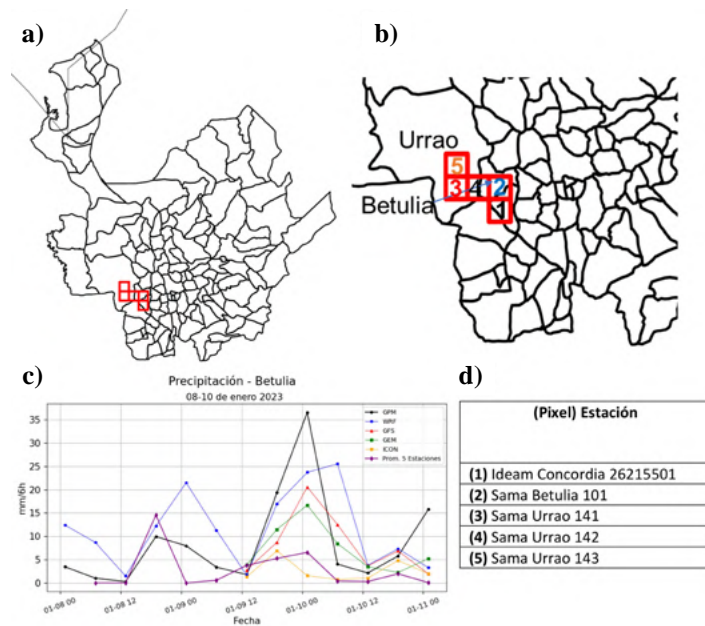


puede verse en la **Figura 7c**, en la cual el recuadro indica la zona aproximada de las mayores precipitaciones en alrededores del municipio de Betulia. Las estimaciones de la GPM muestran precipitaciones en la zona entre la 1 pm del 9 de enero y la 1 am del 10 de enero (**Figuras 7b, c**). Las **Figuras 7 e-h** muestran los pronósticos del WRF para el 9 de enero y la madrugada del 10 de enero. En la actividad simulada por el modelo se nota un máximo de precipitación sobre la región de Betulia durante la noche y primera hora de la madrugada (recuadro, **Figura 7g**), además de lluvias previas en la tarde (**Figura 7 f**). Por su parte, el pronóstico del GFS muestra lluvias en la zona entre la noche del 9 de enero y las primeras horas de la mañana del 10 de enero (**Figuras 7 k, l**). Tanto el WRF como el GFS sugerían una actividad durante las primeras horas del 10 de enero que no se nota en la GPM (**Figura 7 d**). Hay que anotar que la simulación del WRF fue inicializada con las condiciones de las 19:00 LT del 8 de enero, y la del GFS seis horas después (01:00 LT), y ambas estuvieron disponibles en las primeras horas de la mañana del 9 de enero. Esto sugiere que, en principio, dichos pronósticos podrían usarse para una advertencia en la zona con cerca de 12 de horas de anticipación.

Para comparar con los registros en superficie, se consideraron las estaciones de la red SAMA y del IDEAM disponibles en las fechas y la zona del evento (**Figura 8**). Para la comparación con las estimaciones satelitales y los pronósticos de varios modelos, en la **figura 8 c** se incluyó el promedio de los registros de las estaciones meteorológicas disponibles (**Figuras 8 a, b, d**). Se incluyeron, además, los valores correspondientes al día 1 de pronóstico para cada fecha según varios modelos meteorológicos promediados en el recuadro en la **Figura 7c**. Por ejemplo, los valores de precipitación del WRF entre las 07:00 LT del 9 de enero y las 07:00 LT del 10 de enero corresponden a la simulación inicializada el 8 de enero a las 19:00 LT. Asimismo, se obtuvieron los pronósticos de los modelos globales ICON y GEM. En el caso del modelo global GFS, la hora de inicialización corresponde a 01:00 LT del día correspondiente (e.g., 9 de enero). En el caso de los modelos globales, sólo hubo datos a partir del 9 de enero para el presente ejemplo.



**Figura 7.** Precipitación acumulada en intervalos de 6 horas (mm/6hr) durante el 9 (primeras tres columnas) y 10 (cuarta columna) de enero de 2023, según: (a-d) GPM, (e-h) WRF, e (i-l) GFS. Los recuadros en la tercera columna rodean la región de Betulia.



**Figura 8.** **a)** Ubicación de estaciones meteorológicas usadas para este evento. **b)** Zoom de la región de las estaciones y etiquetas para su identificación. **c)** Series de precipitación acumulada en 6 horas según promedios de las estaciones, estimaciones satelitales de la GPM y pronósticos de modelos (WRF, GFS, GEM e ICON); el eje horizontal tiene formato “mm-dd hh”. **d)** Identificación de las estaciones usadas según etiquetas en b)

La serie de tiempo del promedio de las estaciones muestra un evento entre las 13:00 LT del 9 y la 01:00 LT del 10 de enero, además de un evento de menor duración durante la tarde del 8 de enero. Las estimaciones de la GPM evidenciaron precipitaciones en los mismos pasos de tiempo, aunque la señal se sobreestimó mucho para el evento del 9-10 de enero. El WRF mostró acumulados notables entre el 8 y el 9 de enero, y valores mayores entre el 9 y 10 de enero, extendiéndose incluso hasta las primeras horas de la mañana. El GFS mostró valores menores que los del WRF y también detectó un evento entre el 9 y el 10 de enero mayor que en los pasos de tiempo siguientes. Por último, mientras que el GEM sugería un evento de una magnitud similar a la del WRF, los pronósticos de ICON presentaban valores mucho menores, y similares entre el 9 y el 10 y el 10 y el 11 de enero (es decir, no sugerían un evento especial el 9-10 de enero).

*Evento 14 de enero, Valle de Aburrá.* El 14 de enero del 2023 se presentó un evento de precipitación fuerte que generó pérdidas y daños en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Además de la precipitación, nuestra variable de mayor interés, el evento registró fuertes vientos superficiales que ocasionaron aun más daños.

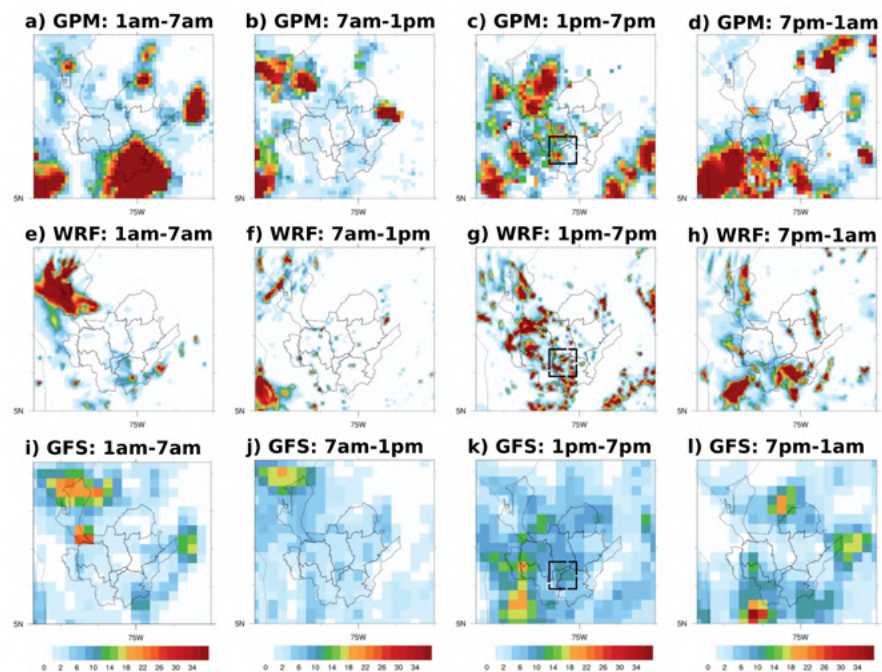
En la **figuras 9 a-d** se aprecian las estimaciones de la GPM acumuladas en períodos de 6 horas. El recuadro en la **figura 9 c** muestra el Valle de Aburrá y la zona de las precipitaciones del evento del 14 de enero. En particular, las lluvias asociadas con los daños en la parte central de Medellín tuvieron lugar en horas de la tarde. Una inspección de los datos de la GPM hora a hora (no se muestra) registró el inicio de las lluvias fuertes entre las 16:00 y las 17:00 LT, principalmente en el sur del valle. Además, se puede ver que las lluvias persistieron hasta aproximadamente las 20:00h de ese 14 de enero. El acumulado máximo aproximado para el final del día (24:00h) en el sur del valle fue de 60 mm y entre 30-40 mm en el centro del valle (Medellín). El pronóstico del WRF (**Figuras 9 e-h**), similar al de la GPM, incluía una actividad notable sobre el Valle de Aburrá en horas de la tarde, incluidas lluvias en el sur y el centro del valle (**Figuras 9 c, g**). El WRF también coincidió con el GPM en cuanto a las lluvias en la noche en el sur del valle y el suroriente

de Antioquia (**Figuras 9 d, h**). El GFS también evidenció un pico de actividad durante la tarde en el Valle de Aburrá y las regiones vecinas (**Figura 9 k**), aunque la resolución de los datos disponibles ( $0,25^\circ$ ) no permitió tanto detalle como la del GPM o el WRF.

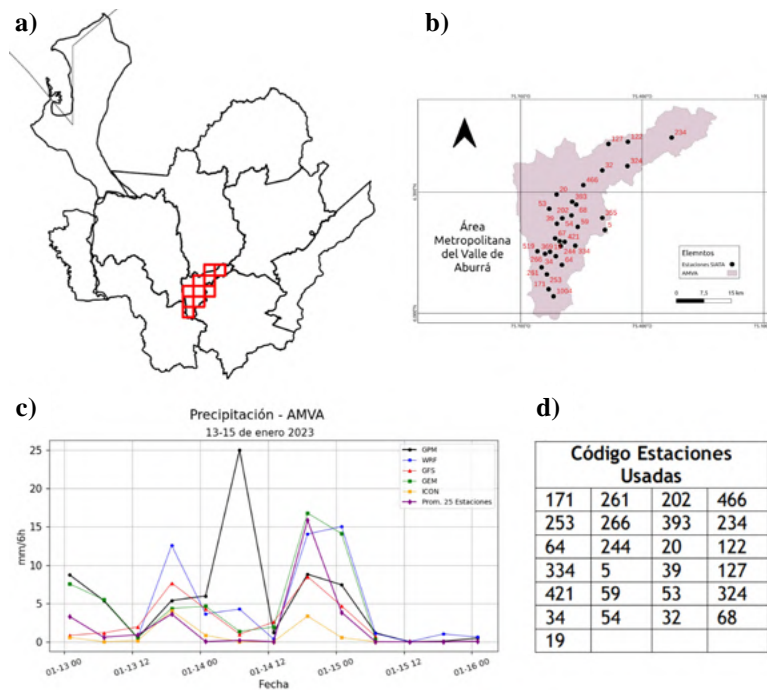
Para el evento del Valle de Aburrá fue posible usar datos de la red de estaciones en superficie del SIATA (**Figuras 10 a, b, d**). Para simplificar la presentación de este ejemplo, se usó un promedio de 25 estaciones (**Figura 10 d**) para describir la evolución temporal de la precipitación días antes y después del evento (curva morada en **figura 10 c**). Un comportamiento análogo se observó en la mayor parte de las estaciones individuales (no se muestra). La **figura 10 c** también incluye series de tiempo de acumulados de 6 horas de precipitación según los pronósticos disponibles de varios modelos globales y del WRF, que aparecen promediados en el recuadro de la **figura 9 c** (ver discusión de la **figura 7** para la descripción de los datos de los modelos).

En estas series de tiempo (**Figura 10 c**) resalta el pico de precipitación que se presentó en el acumulado de la madrugada del 14 de enero según la GPM, lo cual se debe exclusivamente a un pico de lluvias ubicado sobre la región del oriente antioqueño (**Figura 9 a**) y que no tuvo implicaciones directas en el Valle de Aburrá. Para la tarde del 14 de enero, el promedio de las estaciones muestra un máximo de precipitaciones. A pesar de que las estimaciones satelitales de la GPM no alcanzaron la magnitud alcanzada por el promedio de las estaciones, sí lograron registrar el evento ocurrido en horas de la tarde. Por otra parte, se observa que los modelos lograron pronosticar el máximo de precipitación ocurrido en la tarde, siendo las magnitudes pronosticadas por el WRF similares al promedio de las estaciones y mayores a las del GFS. El GEM también logró predecir un evento mayor que en los días anteriores, en tanto que el ICON mostró un comportamiento muy homogéneo entre el 13 y el 15 de enero.

Los dos ejemplos considerados reflejan el potencial de los modelos de pronóstico meteorológico como herramientas esenciales para la gestión del riesgo. Tanto el WRF como el GFS reprodujeron cualitativamente bien las mayores estructuras notables en la GPM a lo largo del día en el resto del dominio, con patrones más finos en el WRF debido a su mayor resolución en la representación de efectos topográficos y dinámicos.



**Figura 9.** Precipitación acumulada en intervalos de 6 horas (mm/6hr) durante el 14 de enero de 2023 según: (a-d) GPM, (e-h) WRF, e (i-l) GFS



**Figura 10.** a) Ubicación de estaciones meteorológicas usadas para este evento. b) Zoom de la región de las estaciones y etiquetas para su identificación. c) Series de promedios en las estaciones, estimaciones satelitales de la GPM y pronósticos de modelos (WRF, GFS, GEM e ICON); el eje horizontal tiene formato “mm-dd-hh”. d) Identificación de las estaciones usadas según etiquetas en b)

## Discusión y conclusiones

En este artículo se presentan algunos resultados de la evaluación del modelo WRF en simulaciones de tipo meteorológico para pronósticos de precipitación. El ejercicio incluyó una muestra relativamente grande de simulaciones de convección permitida, con la evaluación estadística de 625 de ellas, lo que corresponde a más de 120.000 horas centrales.

Las conclusiones más relevantes fueron las siguientes: el WRF tiende a sobreestimar la precipitación en las cordilleras y a subestimarla en las tierras bajas, pero describe un ciclo diurno y una distribución espacial de máximos de precipitación consistente con los campos de la GPM. Las correlaciones entre la precipitación diaria del WRF y el GFS con las estimaciones del GPM tienden a ser mayores en temporadas secas, alcanzando valores de 0,62 y 0,70, respectivamente, lo que podría relacionarse con una buena simulación de las estructuras de mayor escala y su mayor efecto en la variabilidad de la precipitación en estas temporadas. Tanto el WRF como el GFS tienden a sobreestimar los días con eventos de precipitación (Bias  $\sim$  1,1), con una fracción de falsas alarmas cercana al 10 % y una probabilidad de detección de cerca del 96 %. Por último, el análisis de dos eventos especiales de precipitación sugirió que, teniendo en cuenta la hora operacional de disponibilidad de los pronósticos, se puede tener información relevante en el WRF o los modelos globales hasta con 12 horas de anticipación.

Comparado con la GPM, el WRF sobreestimó la precipitación en el terreno montañoso y la subestimó en las tierras bajas. Si bien la comparación con unas pocas estaciones meteorológicas sugiere que el WRF en efecto tiene un sesgo positivo en el terreno montañoso (Buriticá, 2023), la diferencia con respecto a la GPM también podría estar asociada con sus propios sesgos (Jaramillo *et al.*, 2017; Vallejo-Bernal *et al.*, 2021). El sesgo negativo en las zonas más bajas de la región de estudio podría estar asociado con la dificultad para representar los efectos de las estructuras dinámicas de mesoescala (por ejemplo, por el reducido tamaño del dominio) y con potenciales sobreestimaciones de la GPM.

Desde un punto de vista estadístico, pese a que la inicialización es más temprana en el WRF que en el GFS, el primero mostró estadísticos de correlación y desempeño similares a los del segundo, con el posible valor adicional de mostrar estructuras más finas asociadas con los efectos del terreno complejo en la meteorología de montaña, la representación de circulaciones de mesoescala (vientos de valle, brisas marinas), y la parte explícita de la convección simulada. El potencial de este valor agregado se ilustró con un ejemplo de radar (**Figura 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1965/3943>) y con dos eventos de precipitación particulares (**Figuras 7 y 9**). Estos resultados son similares a los encontrados en estudios ya clásicos como los de **Mass et al.** (2002). En este sentido, una mejor cuantificación del potencial valor agregado de las simulaciones de alta resolución requiere el uso de un número mayor de estaciones en superficie (promediando estaciones vecinas por asuntos de representatividad) con registros de segmentos menores al día para comparar extremos de precipitación que no siempre registran adecuadamente los satélites (**Dinku et al.**, 2010) o campos de radares meteorológicos, por ejemplo en busca de precipitaciones de montaña o de sistemas más someros, no detectadas por el GPM.

Nuestros resultados también sugieren otros aspectos que deben tenerse en cuenta en futuras simulaciones. En los experimentos más recientes se ha evidenciado que el *spectral nudging* en el dominio interno puede evitar la formación de estructuras organizadas (como los SCM) en el WRF, aunque parece ayudar con los efectos de estructuras sinópticas como las ondas tropicales. Este es un aspecto que debe estudiarse más sistemáticamente. Otro es el efecto del tamaño del dominio interno, ya que parte de las estructuras en el Pacífico y el valle del Magdalena sugeridas por la GPM podrían estar ausentes en el WRF por estar muy cerca a los bordes del dominio usado (**Gómez-Ríos et al.**, 2023). A estos dos aspectos (*nudging* y dominio) hay que sumar la continua experimentación con otras parametrizaciones, por ejemplo, de la PBL o la microfísica (**Ruiz et al.**, 2020; **Urrego et al.**, 2019).

Para juzgar mejor los resultados del ejercicio con el WRF, es necesario tener en cuenta que estas simulaciones experimentales no incluyen un protocolo de asimilación de datos ni de estadística de salida de modelo (*Model Output Statistics*, MOS), procedimientos esenciales para mejorar los pronósticos en un contexto operacional que tienen gran sofisticación en modelos globales como el GFS, el ICON y el GEM). En este sentido, teniendo en cuenta una ventana de pronóstico de 24 horas (luego de un *spin-up* de 12 horas), tanto la evaluación estadística del WRF como su valoración cualitativa a partir de eventos particulares sugieren que las simulaciones del tipo presentado en este reporte pueden ser una guía útil en la delimitación de regiones con posible actividad de precipitaciones a escala de subregión y departamento (es decir, en la escala meso- $\beta$ , 20-200 km), y a escalas temporales (es decir, acumulados de precipitación) de 12 y 24 horas (asociadas con el ciclo diurno y con variaciones de día a día). Esta escala espacial se relaciona no sólo con la resolución efectiva de un modelo atmosférico (que para una cuadrícula de 4 km es de máximo 20 km), sino con las mayores estructuras atmosféricas afectadas por la morfología de la región de estudio (**Figura 1 b**).

Más allá de evaluaciones clásicas, el monitoreo cualitativo y continuo de las estructuras simuladas por el WRF en la región de estudio sugiere que las simulaciones de alta resolución pueden ofrecer más información que sus valores puntuales de precipitación (**Mass et al.**, 2022). Una mayor comprensión de las estructuras atmosféricas asociadas a nuestro complejo territorio (**Gómez-Ríos et al.**, 2023; **Camacho**, 2023) puede permitir un uso más efectivo de las simulaciones de alta resolución. Esto incluye la práctica clásica del ajuste de los pronósticos crudos de la precipitación basada en la interpretación física por parte de personal entrenado en meteorología y clima de montaña. Pero este conocimiento físico también puede emplearse para la construcción de procedimientos que integren técnicas MOS o de Inteligencia Artificial que ayuden a mejorar los pronósticos de modelos dinámicos como el WRF.

## Información suplementaria

Ver la información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1965/3943>

## Agradecimientos

El diseño e implementación experimental de las simulaciones con el WRF se hicieron en el marco del programa “Colombia Científica”, proyecto “Ecosistema Científico” (contrato No. FP44842-218-2018). Las simulaciones con el modelo WRF discutidas en este trabajo se realizaron en el servidor del Grupo GIMEL de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. La evaluación de los pronósticos de precipitación fue posible en el marco del proyecto Sistema de Alertas Tempranas de Antioquia (SAMA; <https://dagraan.antioquia.gov.co/sama>), desarrollado por la Gobernación de Antioquia y la Universidad de Antioquia. Este proyecto es ejecutado por el grupo G-LIMA de la Escuela Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Agradecemos al IDEAM, el SAMA y el SIATA por facilitar la información de las estaciones meteorológicas usadas en este estudio.

## Contribución de los autores

J.A.M. y P.A.: diseño y dirección de la investigación; J. A. M: diseño y realización de simulaciones WRF; M.L.R.: procesamiento y análisis de datos de precipitación de modelos (WRF, GFS, ICON, GEM), satélite (GPM) y estaciones; L.F. y BR: evaluación de pronósticos puntuales mediante tablas de contingencia con respecto a estaciones reales y virtuales; S. G.C.: preprocesamiento de datos de los modelos GFS, ICON y GEM en diferentes frecuencias temporales para comparación con las estimaciones satelitales. Todos los autores contribuyeron en la escritura y edición del artículo.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses con respecto al contenido de este artículo.

## Referencias

- Álvarez, A. M. & León, J. O.** (2015). Aplicación del modelo meteorológico WRF para el pronóstico de precipitaciones en período lluvioso de Cuba, 2014. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 5(1), 135-145. <https://doi.org/10.18259/acs.2015021>
- Blu Radio.** (10 de 01 de 2023). Blu Radio. <https://www.bluradio.com/blu360/antioquia/video-deslizamiento-en-betulia-antioquia-tiene-incomunicados-y-sin-acueducto-a-3-500-campesinos-rg10>
- Burítica Ruiz, L. F.** (2023). Desempeño del modelo WRF en la simulación de precipitación en los municipios de Sonsón y Rionegro del oriente antioqueño. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/34374>
- Camacho, J.C.** (2023). Sistemas convectivos de mesoescala sobre el norte de Colombia: una visión desde las simulaciones de convección permitida. Trabajo de Investigación de Maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.
- Cano, L. M., Carmona, M. A., Martínez, J. A., Arias, P. A.** (2022). Estimación y pronóstico de radiación solar en el valle de Aburrá-Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46 (179), 529-549. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1576>
- Carmona-Rivera, M. A.** (2021). Evaluación del modelo atmosférico WRF en el pronóstico meteorológico de irradiancia solar en el Valle de Aburrá, Colombia. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/20523>
- Colle, B. A., Westrick, K. J., Mass, C. F.** (1999). Evaluation of MM5 and Eta-10 Precipitation Forecasts over the Pacific Northwest during the Cool Season. *Weather and Forecasting*, 14 (2), 137-154.
- Dinku, T., Ruiz, F., Connor, S. J., Ceccato, P.** (2010). Validation and intercomparison of satellite rainfall estimates over Colombia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(5), 1004-1014.

- Espinosa-Ospina, D.** (2022). Variaciones en el clima local asociadas a un cambio de cobertura: efectos de un embalse en el Trópico. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/28445>
- Espinosa-Ospina, D.** (2019). Estado de la atmósfera asociado al evento de precipitación extrema de mesoescala en Mocoa 2017: diagnóstico con análisis atmosféricos y experimentos con el modelo WRF. Trabajo Final Pregrado, Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.
- Fernández-Gaviria, L. F.** (2021). Validación de pronósticos de temperatura, viento y radiación solar empleando el modelo atmosférico WRF. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/18408>
- Gálvez, J. M. & Douglas, M. W.** (2006). Modulation of rainfall by Lake Titicaca using the WRF model. Proceedings of 8 ICSHMO, Foz do Iguazu, Brazil, April 24-28, 2006, INPE, p. 745-752.
- Guiloteau, C. & Foufoula-Georgiou, E.** (2020). Multiscale evaluation of satellite precipitation products: Effective resolution of IMERG. *Satellite Precipitation Measurement: Volume 2*, 533-558.
- Gomez-Ríos, S., Zuluaga, M. D., Hoyos, C. D.** (2023). Orographic Controls over Convection in an Inter-Andean Valley in Northern South America. *Monthly Weather Review*, 151 (1), 145-162.
- Hernández-Deckers, D.** (2022). Features of atmospheric deep convection in Northwestern South America obtained from infrared satellite data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(742), 338-350.
- Herzog, S. K. & Tiessen, H.** (2017). Climate change and biodiversity in the tropical Andes. [https://museoh.n.unmsm.edu.pe/docs/pub\\_ictio/Josse%202011.pdf](https://museoh.n.unmsm.edu.pe/docs/pub_ictio/Josse%202011.pdf)
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K.P., 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.
- Jaramillo, L., Poveda, G., Mejía, J. F.** (2017). Mesoscale convective systems and other precipitation features over the tropical Americas and surrounding seas as seen by TRMM. *International Journal of Climatology*, 37, 380-397.
- Jiménez-García, M.** (2014). Validación de la capacidad del modelo WRF “Weather Research and Forecasting” para pronosticar lluvia intensa, usando el método orientado a objetos y tablas de contingencia. Departamento de Geociencias. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.
- Kidd, C., Becker, A., Huffman, G. J., Muller, C. L., Joe, P., Skofronick-Jackson, G., Kirschbaum, D. B.** (2017). So, how much of the Earth’s surface is covered by rain gauges? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 69-78.
- Mapes, B. E., Warner, T. T., Xu, M., Negri, A. J.** (2003). Diurnal patterns of rainfall in northwestern South America. Part I: Observations and context. *Monthly Weather Review*, 131 (5), 799-812.
- Mass, C. F., Ovens, D., Westrick, K., Colle, B. A.** (2002). Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts? The Results of Two Years of real-Time Numerical Weather Prediction over the Pacific Northwest. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83 (3), 407-430.
- Mejía, J. F., Yepes, J., Henao, J. J., Poveda, G., Zuluaga, M. D., Raymond, D. J., Fuchs-Stone, Ž.** (2021). Towards a mechanistic understanding of precipitation over the far eastern tropical Pacific and western Colombia, one of the rainiest spots on Earth. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(5), e2020JD033415.
- Morales Salgado, J. S.** (2022). The Choco low-level jet under different sea surface temperature conditions: present and future climate. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/28276>
- Pielke Sr, R. A.** (2013). Mesoscale meteorological modeling. Academic press.
- Poveda, G.** (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 28(107), 201-222.
- Poveda, G., Mesa, O., Salazar, L., Arias, P., Moreno, H., Vieira, S., Agudelo, P., Toro, V., Álvarez, J.** (2005). El Ciclo Diurno de Precipitación en los Andes Tropicales de Colombia. *Monthly Weather Review*, 133(1), 228-240. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/133/1/mwr-2853.1.xml>
- Ramírez B., V. H. & Jaramillo R., A.** (2012). Digital repository of the National Coffee Research Centre - CENICAFE: Relación entre el índice oceánico de El Niño y la lluvia en la región andina central de Colombia. Repositorio digital del centro nacional de investigación de café - Biblioteca Alberto Machado Sierra, 60(2). <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/228>

- Ruiz, J., Arango, C., Kilpinen, J.** (s.f.) IDEAM, Fondo Monetario Internacional (FMI). Verificación del modelo WRF que opera en el IDEAM. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21132/VerificacionWRF.pdf>
- Ruiz, S. A. G., Barriga, J. E. C., Martínez, J. A.** (2022). Assessment and validation of wind power potential at convection-permitting resolution for the Caribbean region of Colombia. *Energy*, 244, 123127. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123127>
- Sakamoto, M. S., Ambrizzi, T., Poveda, G.** (2011). Moisture sources and life cycle of convective systems over western Colombia. *Advances in Meteorology*, Volume 2011 | Article ID 890759 | <https://doi.org/10.1155/2011/890759>
- Sierra, J. P., Arias, P. A., Vieira, S. C.** (2015). Precipitation over northern South America and its seasonal variability as simulated by the CMIP5 models. *Advances in Meteorology*, 2015, 1-22
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J.G., Duda, M.G., Barker, D.M., Huang, X. Y.** (2019). A description of the advanced research WRF version 4. NCAR tech. note ncar/tn-556+ str, 145.
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD).** (2021). Lo que usted debe saber sobre deslizamientos. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/32846>
- Urrego-Ortiz, J., Martínez, J. A., Arias, P. A., Jaramillo-Duque, Á.** (2019). Assessment and Day-Ahead Forecasting of Hourly Solar Radiation in Medellín, Colombia. *Energies*, 12(22), 4402. <https://doi.org/10.3390/en12224402>
- Vallejo-Bernal, S. M., Urrea, V., Bedoya-Soto, J. M., Posada, D., Olarte, A., Cárdenas-Posso, Y., Ruiz-Murcia, F., Martínez, M.T., Petersen, W.A., Huffman, G.J., Poveda, G.** (2021). Ground validation of TRMM 3B43 V7 precipitation estimates over Colombia. Part I: Monthly and seasonal timescales. *International Journal of Climatology*, 41(1), 601-624.
- Wang, Sc., Huang, Sx., Li, Yi.** (2006). Sensitive Numerical Simulation and Analysis of Rainstorm Using Nested WRF Model. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 18, 578-586. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(06\)60138-8](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(06)60138-8)
- Warner, T. T.** (2010). Numerical weather and climate prediction. Cambridge University Press.
- Wilks, D. S.** (2006). Statistical methods in the atmospheric sciences, vol. 100. International geophysics series.
- Zuluaga, M. D. & Houze, R. A.** (2015). Extreme convection of the near-equatorial Americas, Africa, and adjoining oceans as seen by TRMM. *Monthly Weather Review*, 143(1), 298-316.