



**DESEMPEÑO DEL MODELO WRF EN LA SIMULACIÓN DE PRECIPITACIÓN EN
LOS MUNICIPIOS DE SONSÓN Y RIONEGRO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO.**

Luisa Fernanda Buriticá Ruíz

Trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniera Ambiental

Asesores (a):

John Alejandro Martínez Agudelo, PhD.

Paola Andrea Arias Gómez, PhD.

Línea de Investigación:

Modelación Ambiental

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2022

Cita	(Buriticá Ruíz, 2023)
Referencia	Buriticá Ruíz (2023). <i>Desempeño del modelo WRF en la simulación de precipitación en los municipios de Sonsón y Rionegro del oriente antioqueño. Trabajo de grado profesional</i> . Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: Jhon Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Bonilla..

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Agradezco sinceramente a mis asesores John Alejandro Martínez Agudelo y Paola Andrea Arias Gómez por su constante apoyo en el desarrollo de este trabajo y por su paciencia con mis interminables dudas. Al profesor Esteban Silva por sembrar la semilla de la curiosidad y procurar que germinara. Sus consejos serán una guía en el resto del camino. A la Universidad de Antioquia por abrir las puertas a un mundo de autodescubrimiento. A mi familia por su paciencia y perpetuo apoyo en cada uno de mis proyectos. A Luis Felipe Posada por su confianza y continuo aliento a continuar con este laborioso proceso.

Este Trabajo de Grado fue desarrollado dentro del Sistema de Alarma y Monitoreo de Antioquia (SAMA), convenio entre la Gobernación de Antioquia y la Universidad de Antioquia. Las simulaciones usadas para extraer los pronósticos fueron facilitadas por el programa "Colombia Científica" dentro del marco del proyecto "Ecosistema Científico" (Contrato No. FP44842-218-2018). Agradezco al Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA) por facilitar la información de los pluviómetros usados en este estudio.

Tabla de contenido

Resumen	10
Abstract	12
1.Introducción	14
2. Objetivos	15
2.1 Objetivo general.....	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
3. Marco teórico	15
4. Metodología	18
4.1 Área de Estudio.....	18
4.2 Conjuntos de datos.....	20
4.2.1 Simulaciones de WRF.....	20
4.2.2 Observaciones.....	22
4.3 Resolución temporal de las series de tiempo.....	23
4.4 Evaluación de los pronósticos.....	24
4.4.1 Métricas de Error.....	24
4.4.1.1 Error Cuadrático Medio.....	24
4.4.1.2 Error Medio.....	25
4.4.1.3 Correlación de Pearson.....	25
4.4.1.4 Correlación de Spearman.....	26
4.4.2 Tablas de contingencia.....	27
4.4.3 Escalares de la tabla de contingencia.....	28
4.4.3.1 Porción Correcta.....	28
4.4.3.2 Probabilidad de Detección.....	28
4.4.3.3 Sesgo.....	29
4.4.3.4 Tasa de Falsas Alarmas.....	29
5. Resultados y análisis	29
5.1 Series de tiempo.....	29
5.2 Ciclos diurnos.....	33
5.3 Error cuadrático medio y Error medio.....	34
5.4 Correlaciones.....	41
5.5 Tablas de contingencia en diferentes escalas temporales.....	45
5.6 Tablas de contingencia comparativa de eventos fuertes de precipitación según las observaciones.....	49
5.7 Tablas de contingencia comparativa de eventos fuertes de precipitación según los pronósticos.....	51

6. Discusión y conclusiones 53
Referencias 56

Lista de tablas

Tabla 1. Parametrizaciones empleadas en las simulaciones con WRF.....	20
Tabla 2. Nomenclatura empleada.....	43
Tabla 3. Parámetros y escalares de la tabla de contingencia en las diferentes resoluciones temporales del municipio de Sonsón y resultados del modelo de persistencia en la F1 y F2 en el D1 de pronóstico.....	47
Tabla 4. Parámetros y escalares de la tabla de contingencia en las diferentes resoluciones temporales del municipio de Rionegro y resultados del modelo de persistencia en la F1 y F2 en el D1 de pronóstico.....	47
Tabla 5. Parámetros y escalares de la tabla de contingencia en las diferentes resoluciones temporales del municipio de Sonsón en el D2 de pronóstico.....	48
Tabla 6. Parámetros y escalares de la tabla de contingencia en las diferentes resoluciones temporales del municipio de Rionegro en el D2 de pronóstico.....	48
Tabla 7. Tabla de contingencia de eventos fuertes de precipitación según las observaciones Sonsón. Las columnas representan los escalares y parámetros, y las filas muestran el píxel individual y el promedio espacial en el D1 y D2 evaluados en los diferentes percentiles de los pronósticos.....	50
Tabla 8. Tabla de contingencia de eventos fuertes de precipitación según las observaciones de Rionegro. Las columnas representan los escalares y parámetros y las filas muestran el píxel individual y el promedio espacial en el D1 y D2 evaluados en los diferentes percentiles de los pronósticos.....	50
Tabla 9. Tabla de contingencia de eventos fuertes de precipitación según los pronósticos de Sonsón. Las columnas representan los escalares y parámetros y las filas muestran el píxel individual y el promedio espacial en el D1 y D2 evaluados en los diferentes percentiles de las observaciones.....	52

Tabla 10. Tabla de contingencia de eventos fuertes de precipitación según los pronósticos de Rionegro. Las columnas representan los escalares y parámetros y las filas muestran el píxel individual y el promedio espacial en el D1 y D2 evaluados en los diferentes percentiles de las observaciones.....52

Lista de figuras

Figura 1. Dominio espacial para las simulaciones de WRF, a) Topografía del municipio de Sonsón y Rionegro, b) Topografía del departamento de Antioquia, c) Dominio externo del pronóstico de precipitación con WRF (Celda 12.0 km), d) Dominio interno del pronóstico de precipitación de WRF (Celda 4.0 km).....	19
Figura 2. Porcentaje de simulaciones disponibles por cada mes analizado. a) Conjunto de pronósticos para el día 1 (D1) y b) Conjunto de pronósticos para el día 2 (D2).....	21
Figura 3. Porcentaje de datos perdidos. a) Observaciones de Sonsón para acumulados diarios con F1, b) Observaciones de Rionegro para acumulados diarios con F1, c) Observaciones de Sonsón para acumulados diarios con F2 y d) Observaciones de Rionegro para acumulados diarios con F2.....	22
Figura 4. Tabla de contingencia 2X2.....	27
Figura 5. Serie de tiempo comparativa entre los pronósticos del píxel individual, el promedio espacial y las observaciones del municipio de Sonsón, en el D1 de pronósticos y usando el método F1 para generar los acumulados diarios. El eje vertical derecho representa la unidades de las observaciones, el eje izquierdo representa las unidades de los pronósticos. a) 2020, b) 2021, c) 2022.....	31
Figura 6. Serie de tiempo comparativa entre los pronósticos del píxel individual, el promedio espacial y las observaciones del municipio de Rionegro , en el D1 de pronósticos y usando el método F1 para generar los acumulados diarios. El eje vertical derecho representa la unidades de las observaciones, el eje izquierdo representa las unidades de los pronósticos. a) 2020, b) 2021, c) 2022.....	32
Figura 7. Ciclos medios diurnos de precipitación en ambos municipios de estudio según las observaciones de SIATA. El eje horizontal muestra las horas del día desde las 0:00 hr hasta las 23:00 en hora local y el eje vertical muestra los meses del año. a) Sonsón y b) Rionegro.....	33

Figura 8. Ciclos medios diurnos simulados por WRF (paneles a) a d)) y observados por SIATA (paneles e) y f)). El eje horizontal muestra las horas del día desde las 0:00 hr hasta las 23:00 en hora local y el eje vertical muestra los meses del año. a) Pixel individual en Sonsón para el D1, b) Píxel individual en Rionegro para el D1, c) Promedio espacial de Sonsón para el D1, d) Promedio espacial de Rionegro para el D1, e) Observaciones en Sonsón en la escala de valores del modelo, f) Observaciones en Rionegro en la escala de valores del modelo..... 34

Figura 9. Ciclos medios diurnos de ME. El eje horizontal muestra las horas del día comenzando desde las 7:00 a.m. Los meses se ubican en el eje vertical. Los cuatro primeros paneles representan al D1 y D2 en el píxel individual y promedio espacial en el municipio de Sonsón. Los siguientes cuatro paneles corresponden al municipio de Rionegro.....36

Figura 10. Ciclos medios diurnos de RMSE. El eje horizontal muestra las horas del día comenzando desde las 7:00 a.m. Los meses se ubican en el eje vertical. Los cuatro primeros paneles representan al D1 y D2 en el píxel individual y promedio espacial en el municipio de Sonsón. Los siguientes cuatro paneles corresponden al municipio de Rionegro.....38

Figura 11. Ciclos medios diurnos de nME. El eje horizontal muestra las horas del día comenzando desde las 7:00 a.m. Los meses se ubican en el eje vertical. Los cuatro primeros paneles representan al D1 y D2 en el píxel individual y promedio espacial en el municipio de Sonsón. Los siguientes cuatro paneles corresponden al municipio de Rionegro.....39

Figura 12. Ciclos medios diurnos de nRMSE . El eje horizontal muestra las horas del día comenzando desde las 7:00 a.m. Los meses se ubican en el eje vertical. Los cuatro primeros paneles representan al D1 y D2 en el píxel individual y promedio espacial en el municipio de Sonsón. Los siguientes cuatro paneles corresponden al municipio de Rionegro.....40

Figura 13. Correlación promedio mensual de Pearson y Spearman para el D1. El eje vertical indica si el valor corresponde al píxel individual o al promedio en las diferentes resoluciones temporales, en las dos formas de acumulados diarios y los modelos de persistencia (ver Tabla 2). El eje horizontal corresponde a los meses y el promedio de la correlación en estos meses. Los paneles a) y b) muestran la correlación de Pearson en ambos municipios y los paneles c) y d) la correlación de Spearman.....42

Figura 14. Correlación promedio mensual de Pearson y Spearman para el D2. El eje vertical indica si el valor corresponde al píxel individual o al promedio en las diferentes resoluciones temporales, en las dos formas de acumulados diarios y los modelos de persistencia (ver Tabla 2). El eje horizontal corresponde a los meses y el promedio de la correlación en estos meses. Los paneles a) y b) muestran la correlación de Pearson en ambos municipios y los paneles c) y d) la correlación de Spearman.....44

Resumen

Los pronósticos meteorológicos de modelos numéricos han emergido en los últimos años como fuentes de información para previsiones futuras de variables como temperatura y precipitación en ventanas de tiempo de 24 a 48 horas. Las variables atmosféricas como la precipitación son altamente afectadas por procesos meteorológicos de mesoescala a nivel regional, lo cual ha generado presión para validar estas fuentes de información y así producir datos con menor incertidumbre, que contribuyan a predecir oportunamente eventos meteorológicos en estas ventanas de tiempo. El objetivo de este Trabajo de Grado es validar el Modelo Weather Research and Forecasting (WRF) en los municipios de Sonsón y Rionegro, ubicados en la subregión del oriente de Antioquia, a partir de datos observados por estaciones meteorológicas del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA). Ambos municipios generan un contraste importante en el modelo: Sonsón porque se ubica en una región con topografía compleja, lo que representa un reto importante para los modelos meteorológicos; por su parte, Rionegro se ubica en la zona de valles de la subregión, donde se espera una mayor eficiencia en las simulaciones del modelo. La validación del modelo WRF consistió en comparar los conjuntos de datos pronosticados y observados mediante métricas de error como la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE por sus siglas en inglés) y el Error Medio o Sesgo (ME por sus siglas en inglés), y estadísticos de dispersión como la correlación de Pearson y de Spearman. Además, se usaron las tablas de contingencia con los escalares de Sesgo (B), Porción Correcta (PC), Probabilidad de Detección (POD) y Probabilidad de Falsas Alarmas (FAR). Se encontró que, en la mayoría de los casos, WRF genera sobreestimación en la precipitación pues, mientras que las observaciones variaron entre magnitudes de 0,0 mm/hr a 0,7 mm/hr en Rionegro y 1 mm/hr en Sonsón, el modelo superó los 2,5 mm/hr. La sobreestimación fue mayor en el municipio de Sonsón porque presentó más horas en los ciclos medios diurnos de las métricas de error con valores superiores a 1,5 mm/hr de ME y superiores a 4 mm/hr en la métrica de RMSE; además, los mayores errores porcentuales del Error Medio normalizado (nME) y la Raíz del Error Cuadrático Medio normalizado (nRMSE por sus siglas en inglés) también se presentaron por más horas en el municipio de Sonsón, obteniendo porcentajes iguales o superiores a 1000% y 5000% en nME y nRMSE, respectivamente. También se encontró que, según las tablas de contingencia, el modelo puede representar mejor la precipitación cuando se usan acumulados diarios y cada 12

horas. La relación FAR/POD, en promedio, pasaba de 0,838 a 0,376 de los acumulados horarios a los acumulados cada 12 horas y de 0,376 a 0,14 de los acumulados cada 12 horas a los acumulados diarios, para los que se observa una disminución del valor de la relación cuando aumenta la escala temporal del acumulado.

Palabras clave: Validación, WRF, precipitación, mesoescala, Sonsón, Antioquia.

Abstract

Numerical weather forecasting models have emerged in recent years as sources of information for future forecasts of variables such as temperature and precipitation in time windows of 24 to 48 hours. Atmospheric variables such as precipitation are highly affected by mesoscale meteorological processes at regional level, which has generated pressure to validate these sources of information and thus produce data with less uncertainty, which contribute to timely prediction of meteorological events in these time windows. The objective of this graduate work is to validate the Weather Research and Forecasting (WRF) model in the municipalities of Sonsón and Rionegro, located in the eastern subregion of Antioquia, based on data observed by weather stations of the Early Warning System of the Aburrá Valley (SIATA). Both municipalities generate an important contrast in the model: Sonsón because it is located in a region with complex topography, which represents an important challenge for the meteorological models; on the other hand, Rionegro is located in the valley area of the subregion, where greater efficiency is expected in the model simulations. The validation of the WRF model consisted of comparing the predicted and observed data sets using error metrics such as Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Error or Bias (ME), and dispersion statistics such as Pearson's and Spearman's correlation. In addition, contingency tables with Bias (B), Correct Portion (CP), Probability of Detection (POD) and False Alarm Probability (FAR) scalars were used. It was found that, in most cases, WRF generates overestimation in precipitation because, while the observations varied between magnitudes of 0.0 mm/hr to 0.7 mm/hr in Rionegro and 1 mm/hr in Sonsón, the model exceeded 2.5 mm/hr. The overestimation was greater in the municipality of Sonsón because it presented more hours in the diurnal mean cycles of the error metrics with values higher than 1.5 mm/hr for ME and higher than 4 mm/hr in the RMSE metric; In addition, the highest percentage errors of the normalized Mean Error (nME) and the Root Mean Normalized Mean Squared Error (nRMSE) also occurred for more hours in the municipality of Sonsón, obtaining percentages equal to or higher than 1000% and 5000% in nME and nRMSE, respectively. It was also found that, according to the contingency tables, the model can better represent precipitation when daily and 12-hourly accumulations are used. The FAR/POD ratio, on average, went from 0.838 to 0.376 from hourly to 12-hourly accumulations and from 0.376 to 0.14 from 12-hourly to daily

accumulations, for which a decrease in the value of the ratio is observed when the time scale of the accumulation increases.

Key words: Validation, WRF, precipitation, mesoscale, Sonsón, Rionegro, Antioquia.

1. Introducción

La región Andina colombiana está expuesta a fenómenos y desastres asociados a la ocurrencia de precipitación, por lo que existe una gran necesidad por entender cómo los modelos de pronóstico representan esta región. En particular, la región Andina es un escenario de frecuentes inundaciones, movimientos en masa y avenidas torrenciales, generados por las interacciones entre los diferentes regímenes de precipitación y la compleja topografía de la región (UNGRD, 2021; Estupiñan, 2016). Desde este punto de vista, la generación de pronósticos meteorológicos se convierte en una prioridad en la gestión del riesgo de la región con mayor densidad poblacional en Antioquia. En consecuencia, la validación de modelos de pronóstico como el Weather Research and Forecasting (WRF) podría representar una herramienta importante de predicción para la región, si se reduce el sesgo en el pronóstico (Kalnay, 2002; Warner, 2011).

Los modelos de pronóstico meteorológico en Colombia son una parte de la gestión del riesgo y del sistema de alarma tempranas. Algunas instituciones como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Sistema de Alertas Tempranas del Valle de Aburrá (SIATA) ejecutan el modelo WRF para la predicción de variables meteorológicas como temperatura y precipitación a escala nacional y regional, respectivamente. La verificación de las diferentes corridas del pronóstico de precipitación del IDEAM ha mostrado buenos resultados en ciudades como Quibdó, Providencia, San Andrés y Rionegro, y mayores errores en ciudades como Riohacha, Cali, Valledupar, e Ibagué (Ruiz et. al, s.f). Los pronósticos meteorológicos presentan grandes sesgos porque parte de los retos que tienen los modelos numéricos en la Región Andina se asocian a la topografía compleja de las tres cordilleras que pertenecen a la región: la cordillera oriental, la cordillera central y la cordillera occidental. La sobreestimación de la precipitación se presenta principalmente en las regiones ubicadas en la alta montaña; mientras que la subestimación se presenta en regiones de valle (Jiménez, 2014). Por ejemplo, el municipio de Sonsón representa un reto para los modelos de mesoescala al ubicarse en una región topográficamente compleja. Parte de la incertidumbre se asocia a la forma en que se configura el modelo para la predicción, ya que esto influencia la disponibilidad de energía y el ascenso convectivo en las ecuaciones del modelo, generando pronósticos de lluvia en cantidades que superan lo observado (Jiménez, 2014). En la Escuela Ambiental de la Universidad de Antioquia

se ha generado un pronóstico de precipitación mediante el modelo WRF en dos dominios anidados con tamaños de celda de 12 km y 4 km. En este Trabajo de Grado se realizó un análisis comparativo entre conjuntos de datos de precipitación observados de estaciones in situ y pronosticados por WRF en los municipios de Sonsón y Rionegro en la región del oriente antioqueño.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar el desempeño del modelo atmosférico WRF en el pronóstico de precipitación horaria y diaria en los municipios de Sonsón y Rionegro en Antioquia, a partir de observaciones de estaciones meteorológicas del SIATA.

2.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar los ciclos diurno y anual de precipitación en la región de estudio a partir de estaciones meteorológicas del SIATA.
- Diagnosticar los ciclos diurno y anual de precipitación en la región de estudio a partir de simulaciones con el modelo WRF.
- Evaluar el desempeño del modelo WRF en la simulación de precipitación en la región de estudio a partir de diferentes métricas estadísticas.

3. Marco teórico

La modelación atmosférica es una representación computacional de los eventos meteorológicos que ocurren a diferentes escalas temporales y espaciales en la atmósfera. Los modelos empleados para este fin son conocidos como Modelos de Predicción Numérica del Tiempo Atmosférico y del Clima (Numerical Weather and Climate Prediction, NWCP) (Warner, 2011). Uno de los principales usos de estos modelos son las proyecciones climáticas que simulan el clima regional o global a escala temporal de años o décadas, buscando comprender cambios

futuros en diferentes escenarios de cambio climático (Kalnay, 2002). Por ejemplo, el sexto informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus iniciales en inglés) analiza el comportamiento del clima bajo diferentes escenarios basados en diferentes rutas de emisiones futuras de Gases de Efecto Invernadero (GEI), analizando la respuesta de diferentes variables meteorológicas (Nicholls et al., 2022). Estas proyecciones climáticas usan Modelos de Circulación General (General Circulation Models, GCMs) o Modelos de Circulación Regional (Regional Circulation Models, RCMs) (Kalnay, 2002). Los NWCP también se usan para predecir el tiempo atmosférico a partir de pronósticos en escalas de horas y días (Kalnay, 2002). Las predicciones suelen realizarse con ecuaciones de fluidos dinámicos que describen el comportamiento de la atmósfera (Warner, 2011), aunque también existen modelos estadísticos de predicción que, con base en probabilidades, predicen variables meteorológicas, como es el caso de los Modelos de Ensamble de Salidas Estadísticas (Ensemble Models Output Statistics, EMOS) (Vogel et al., 2021). Estos pronósticos son usados en la reducción del riesgo asociado a desastres porque se pueden generar alertas tempranas ante eventos meteorológicos. Un ejemplo es el Centro Nacional de Huracanes en Estados Unidos (National Hurricane Center, NHC), que genera alertas tempranas si se espera tormenta tropical o huracanes en las próximas 36 horas. Los pronósticos se pueden generar con GCMs o RCMs que se diferencian por la escala espacial y temporal para la que generan simulaciones (Kalnay, 2002).

Para modelar la atmósfera se usan las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen el movimiento de un fluido viscoso (Acheson, 1990). Sin embargo, para hacerlo adecuadamente se requiere solucionar las ecuaciones en pequeñas escalas temporales y espaciales, y el costo computacional de este proceso aún es una limitación para la modelación (Gal-Chen & Somerville, 1975), por lo que la modelización es una simulación de la realidad y no una representación fiel de lo que se modela. Una solución de esta limitación fue discretizar las ecuaciones gobernantes del modelo en áreas en las cuales no se perdieran tantos detalles de los procesos a pequeña escala y no fuera demasiado caro computacionalmente (Warner, 2011). Para representar estos procesos, en los modelos se usan las parametrizaciones a través de relaciones algorítmicas o estadísticas (Warner, 2011). Los modelos de Simulación Numérica Directa (Direct Numerical Simulation, DNS) tienen resueltas todas las escalas relevantes de procesos de pequeña escala como la turbulencia y no requieren parametrizaciones; aun así, tienen limitaciones

representando procesos complejos en resoluciones mayores de espacio y tiempo, a diferencia de los RCMs que tienen parametrizaciones para procesos como la microfísica, la turbulencia en la capa límite o la radiación (Kalnay, 2002; Warner, 2011).

Por otra parte, asumiendo un modelo perfecto, los pronósticos también tienen sesgos debido a la sensibilidad a las condiciones iniciales y los valores de frontera. Modelos como los GCMs son modelos globales que no tienen límites laterales y pueden solucionar las ecuaciones en todo el globo; en cambio, modelos de área limitada como los RCMs requieren datos de entrada para los valores de frontera donde la discontinuidad del dominio no permite la solución de las ecuaciones (Warner, 2011). La sensibilidad a las condiciones iniciales se explica muy bien en el modelo simplificado del Atractor de Lorenz, donde pequeños cambios en las condiciones iniciales generan cambios en la evolución del sistema (Lorenz, 1963). Debido a la discontinuidad espacial de las observaciones, los procesos de pequeña escala como flujos o gradientes de las variables observadas no pueden ver estos procesos; por lo tanto, se requiere un periodo inicial de integración entre el modelo y las observaciones, periodo en el cual, no hay una adecuada simulación del modelo y generalmente son descartadas del producto final (Kalnay, 2002; Warner, 2011).

En este Trabajo de Grado se evaluará un NWP a partir del Modelo WRF. El modelo WRF es uno de los RCMs más usados en pronóstico meteorológico porque posee una vasta documentación pública que ha facilitado su uso y permitido introducir mejoras en las diferentes versiones del mismo (Skamarock, 2021). Se ha encontrado que este modelo proporciona buenas predicciones meteorológicas y, comparado con otros modelos de predicción, ha sido más acertado pronosticando la cantidad de tormentas intensas observadas en el tiempo simulado, o de reproducir las principales características de la precipitación en áreas montañosas (Gálvez & Douglas, 2006; Wang et al., 2006; Gomez-Rios, 2022); por el contrario, en regiones con topografía compleja suele sobreestimar la precipitación (Colle et al., 1999; Jiménez, 2014), principalmente cuando la topografía se relaciona con fuertes procesos convectivos (Jiménez, 2014; Gomez-Rios, 2022). También se ha encontrado subestimación de precipitación debido a que durante la noche no hay condiciones termodinámicas favorables que permitan la formación

de nubes, pues las nubes formadas durante la tarde continúan generando lluvia en horas de la noche y la madrugada (Álvarez & León, 2015).

4. Metodología

4.1 Área de Estudio

Los Andes tropicales colombianos están conformados por tres cadenas montañosas: las cordilleras occidental, central y oriental. Cada cordillera tiene sus regímenes de precipitación diferenciados que dependen de diversos procesos de mesoescala, generando complejos climas locales y regionales (Poveda, 2004). La cordillera central, a la altura del departamento de Antioquia, 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 ha contribuido a climas característicos entre ambas laderas de la cordillera, por lo cual se produce una amplia variabilidad espacial a escala diurna (Poveda et al., 2005; Ramírez & Jaramillo, 2012; Sebastian 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, donde se presentaron 1.393 eventos de 11.900 registrados entre 1921 a 2019 (UNGRD, 2021). Además, también se presenta como uno de los departamentos con mayor pérdida anual esperada por inundación a nivel departamental en 2019.

La subregión del oriente antioqueño se ubica entre los ríos Cauca y Magdalena; atravesada por la cordillera central (Henao et al., s.f). Es la tercera subregión con mayor densidad poblacional en Antioquia (DANE, 2022) y la segunda con mayor índice de calidad de vida. Tiene una importante conexión fluvial y vial, y posee 241.837,00 Ha protegidas (Henao, et al., s.f). El municipio de Sonsón se ubica cerca a la cima de la ladera oriental, en la cordillera central, a 2.475 m s.n.m (ver Figuras 1.a y 1.b). Su régimen de precipitación varía entre los 1.000 a 4.000 mm/año, con un ciclo bimodal de precipitación anual; las temporadas secas se presentan de enero a marzo y de julio a septiembre, y las temporadas húmedas de abril a mayo y de octubre a noviembre. La temperatura promedio varía entre los 16 °C y los 20 °C; sin embargo, puede alcanzar hasta los 27 °C y descender hasta los 9 °C (CORNARE, 2012a). Por su parte, el

municipio de Rionegro está ubicado en los valles del oriente antioqueño, a una altitud de 2.215 m s.n.m en la cabecera principal (ver Figuras 1.a y 1.b). Tiene un clima frío y húmedo. La temperatura promedio varía entre las magnitudes 16,2 °C y 17,2 °C, con un régimen de precipitación bimodal. La temporada seca se presenta en los meses de diciembre a marzo y entre junio a julio. La precipitación promedio anual es de 2.138,7 mm y la humedad relativa varía entre el 59% y el 90% (CORNARE, 2012b).

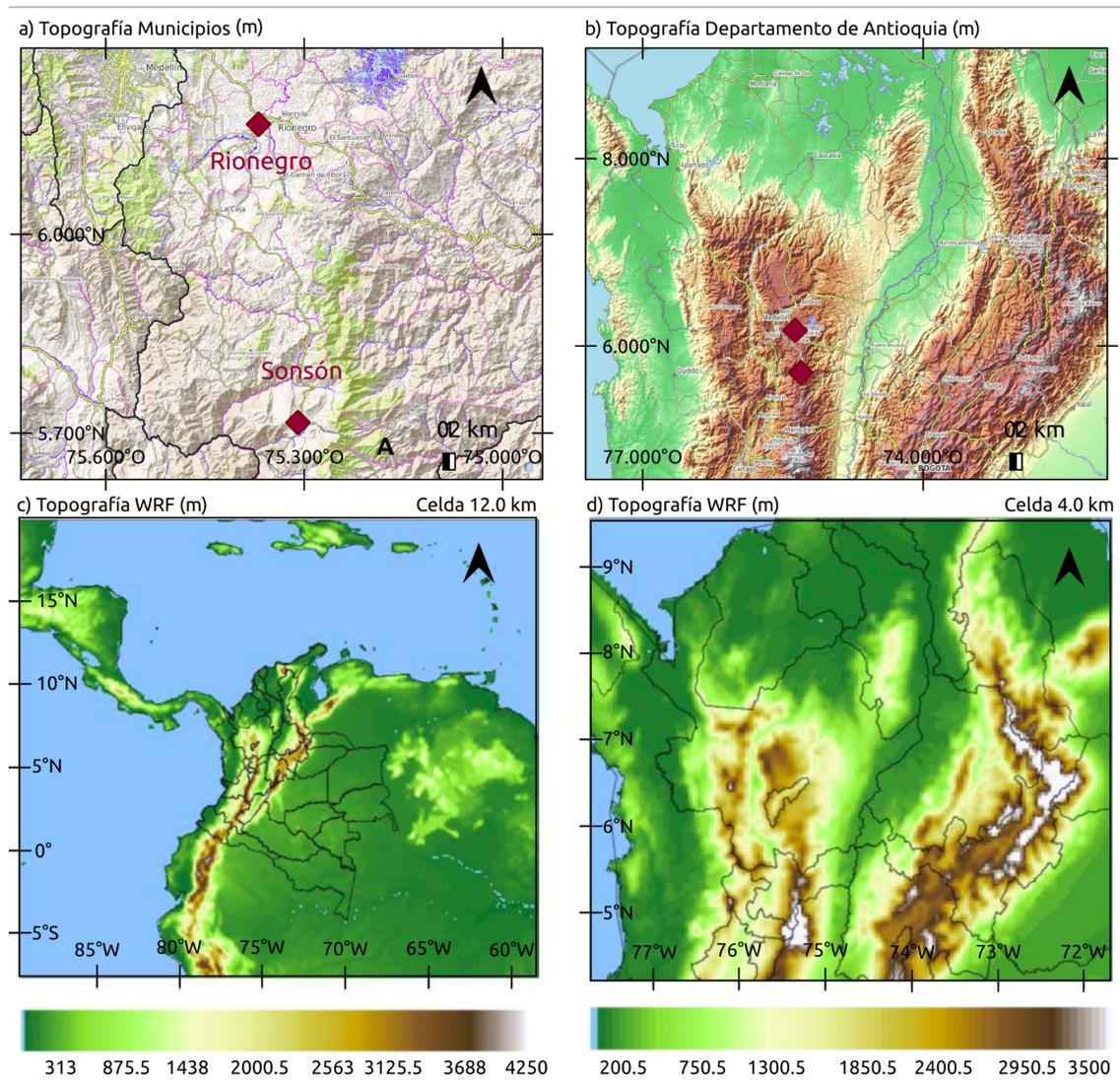


Figura 1. Dominio espacial para las simulaciones de WRF: a) Topografía del municipio de Sonsón y Rionegro, b) Topografía del departamento de Antioquia, c) Dominio externo del pronóstico de precipitación con WRF (Celda 12.0 km), d) Dominio interno del pronóstico de precipitación de WRF (Celda 4.0 km).

Según informes meteorológicos del Centro de Predicción Climática (CPC), durante el periodo 2020-2022 hubo presencia del fenómeno de variabilidad climática El Niño - Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés) en su fase La Niña. En el transcurso de los tres últimos años, el fenómeno de La Niña ha generado aumentos de movimiento en masa (UNGRD, 2021) debido al incremento de la precipitación que se presenta en la región Andina durante esta fase del ENSO (Poveda, 2004). De este modo, el comportamiento de la precipitación en ambas temporadas fue anómalo durante el periodo de estudio para los dos municipios.

4.2 Conjuntos de datos

4.2.1 Simulaciones de WRF

Este Trabajo de Grado considera pronósticos meteorológicos de precipitación para ventanas de 54 horas, usando el modelo WRF en los dominios anidados que se muestran en las Figuras 1.c y 1.d. La Figura 1.c representa el dominio exterior que incluye a Colombia, con un tamaño de celda de 12,0 km. La Figura 1.d muestra el dominio interno que incluye al departamento de Antioquia con un tamaño de celda de 4,0 km. En la Tabla 1 se muestran algunas de las parametrizaciones usadas. La parametrización de cúmulus se usó para dominio externo mientras que en el dominio interno no se usó esta parametrización.

Tabla 1. Parametrizaciones empleadas en las simulaciones con WRF.

Cúmulus (D1 solamente)	New Tiedtke
Radiación	RRTMG
PBL	YSU
LSM	Noah

Las simulaciones disponibles comprenden el periodo desde el 2 de marzo de 2020 a las 7:00 a.m hasta el 13 de junio de 2022 a las 7:00 a.m, con datos disponibles para el dominio interno de 4 km a una resolución temporal de 15 minutos. Para cada día, el pronóstico de precipitación corre durante 54 horas, iniciando desde las 7:00 p.m del día anterior. Por ejemplo,

una simulación tiene hora de inicio 7:00 p.m del 1 de enero, y abarca todo el 2 de enero hasta el 4 de enero a la 1:00 a.m, cubriendo un total de 54 horas, las cuales dividimos en subperiodos de la siguiente manera:

- Se descartan las 12 primeras horas desde el 1 de enero a las 7:00 p.m hasta las 6:59 a.m del 2 de enero.
- D1: 2 de enero desde las 7:00 a.m hasta el 3 de enero a las 7:00 a.m. 24 horas en total.
- D2: 3 de enero desde las 7:00 a.m hasta el 4 de enero a la 1:00 a.m. 18 horas en total

De las simulaciones disponibles se identifica que el conjunto de datos tiene un 81,58% de las fechas en el periodo comprendido entre marzo de 2020 y julio de 2022 (ver Figura 2). Además, se utilizaron las series de tiempo del píxel individual seleccionando el píxel más cercano de ambos municipios: para Sonsón en la coordenada 5,72403°N y 75,30309°W y para Rionegro en la coordenada 6,156067°N y 75,37549°W. Los promedios espaciales se generaron con los 8 pixeles alrededor del píxel individual; por tanto, en el municipio de Sonsón se tuvo un área entre las coordenadas 5,688011°N-5,760048°N y 75,33929°W-75.2669°W. En el municipio de Rionegro el promedio espacial se obtuvo del área entre las coordenadas 6,120071°N - 6,192055°N y 75,41168°W-75,33929°W. En total, para cada municipio se contó con 4 series de tiempo pronosticadas para el píxel individual y el promedio espacial en el día 1 (D1) y día 2 (D2) de pronósticos.

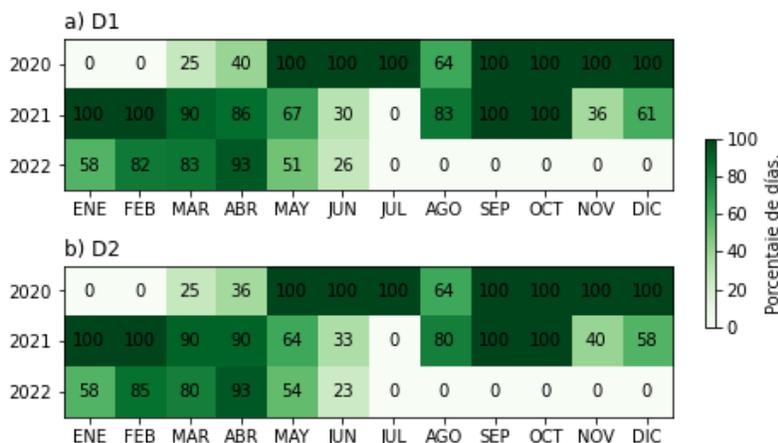


Figura 2. Porcentaje de simulaciones disponibles por cada mes analizado. a) Conjunto de pronósticos para el día 1 (D1) y b) Conjunto de pronósticos para el día 2 (D2).

4.2.2 Observaciones

Para este estudio se emplearon las estaciones del SIATA con código 227 y 228, ubicadas en el centro del municipio de Sonsón. Estas estaciones cuentan con dos pluviómetros instalados de los cuales el pluviómetro 2 (P2) no tenía información disponible. Las series de tiempo de ambas estaciones cuentan con una resolución temporal de 1 minuto. Para el conjunto de observaciones de Sonsón se calculó un promedio del pluviómetro 1 (P1) de ambas estaciones en las diferentes resoluciones temporales.

Para los acumulados diarios, se usaron dos metodologías que posteriormente serán explicadas con más detalle (sección 4.3): la forma 1 (F1), correspondiente a la acumulación de los datos entre las 0:00 m hasta las 11:59 p.m, y la forma 2 (F2), correspondiente a la acumulación de los datos entre las 7:00 a.m hasta las 6:59 a.m del siguiente día, ambas metodologías en hora local. En la Figura 3.a y 3.c se encuentra el porcentaje de datos perdidos luego de promediar las series originales para el periodo de estudio en el municipio de Sonsón. A resolución diaria, el porcentaje de datos perdidos es de 8,6% para F1 y 12,1% para F2, que incluye el periodo del 2 de marzo de 2020 al 13 de junio de 2022.

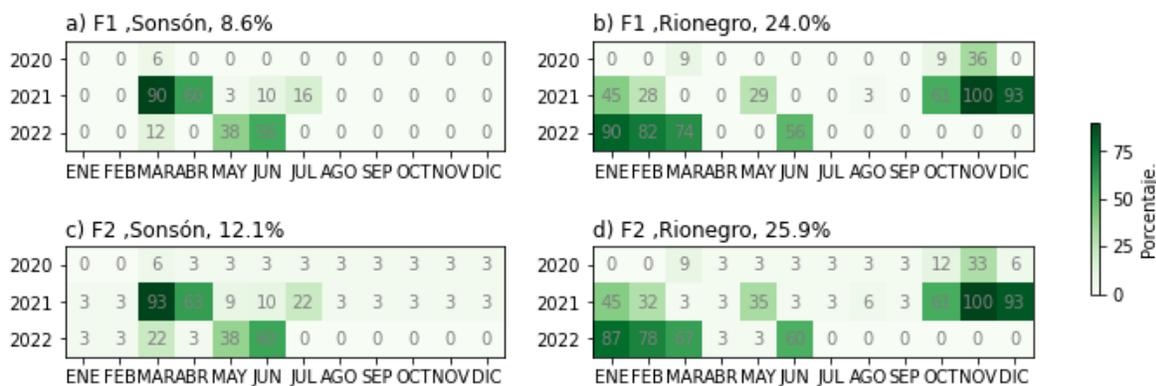


Figura 3. Porcentaje de datos perdidos. a) Observaciones de Sonsón para acumulados diarios con F1, b) Observaciones de Rionegro para acumulados diarios con F1, c) Observaciones de Sonsón para acumulados diarios con F2 y d) Observaciones de Rionegro para acumulados diarios con F2.

La estación 199 del SIATA, ubicada en el municipio de Rionegro, en la vereda La Laja, cuenta con dos pluviómetros con información disponible para el periodo de estudio. Para esta estación también se tomó la información del pluviómetro 1 (P1). Este conjunto de datos tiene una resolución temporal de 1 minuto. A escala de acumulados diarios se tiene el porcentaje de datos perdidos de 24,0% en F1 y 25,9% con la metodología F2 (ver Figuras 3.b y 3.d).

4.3 Resolución temporal de las series de tiempo

Para este trabajo se usaron 5 resoluciones temporales: acumulados horarios, cada 3 horas, cada 6 horas, cada 12 horas y diarios. El criterio base para acumular en las diferentes resoluciones fue establecer una disponibilidad de datos de al menos 90% en cada intervalo. Por ejemplo, para generar el acumulado horario de las observaciones se tenía en cuenta el intervalo del conjunto de datos (1 minuto); por lo tanto, una hora completa tenía 60 datos. Para este caso el umbral es la multiplicación de 60 datos por 0,9 (el 90% de los datos), dando como resultado un umbral de 54 datos disponibles, por lo tanto se declaró como valor perdido aquellas horas que contaran menos de 54 datos. En la resolución de acumulados cada 3 horas, se ubicó la suma en las horas 0:00, 3:00, 6:00, 9:00, 12:00, 15:00, 18:00 y 21:00 hora local, usando el límite inferior del intervalo, por lo cual, el acumulado entre las 0:00 y las 2:59 se fijó a las 0:00 del mismo día. Esta misma metodología se usó en las diferentes resoluciones temporales. Los acumulados cada 6 horas, se ubicaron en las horas 0:00, 6:00, 12:00 y 18:00 hora local. Los acumulados cada 12 horas se establecieron entre la hora inicial pronosticada y la hora final, de manera que los intervalos son entre las 7:00 y las 18:59, y entre las 19:00 y las 7:00 del siguiente día.

Para los acumulados diarios se tuvo en cuenta un problema en los modelos de predicción numérica con área limitada como lo es WRF. El modelo es iniciado cada día indicando las condiciones de los parámetros para ese día particular (se inicializa el modelo). Esta inicialización del modelo crea diferentes procesos numéricos que no tienen análogos en la atmósfera real para esos pasos de tiempo (*spin-up*) y, por lo tanto, en este caso no se utilizan las primeras 12 horas del simuladas tras inicializar el pronóstico a las 7:00 p.m, esperando la estabilización de los procesos numéricos (Wilks, 2011; Lorenz, 1963). Por este motivo se utilizaron 2 metodologías para generar acumulados que representen un día de pronóstico. La primera metodología se llamó forma 1 (F1), en la que se sumaron los datos entre las 00:00 y las 23:59 del mismo día, y en la

segunda metodología, llamada forma 2 (F2), se tuvo en cuenta la inicialización del modelo, y por tanto los acumulados se generaron desde las 7:00 a.m hasta las 6:59 a.m del siguiente día.

Como un punto de referencia para evaluar los pronósticos de WRF se consideró el modelo de persistencia, que es uno de los modelos más simples para evaluar el error de un pronóstico. Este modelo asume que la precipitación del día de mañana es idéntica a la actual; por lo tanto, se evaluó si WRF representa mejor la precipitación que el modelo de persistencia en los acumulados diarios en ambas metodologías de acumulación (F1 y F2), y en consecuencia, puede representar los cambios meteorológicos con las ecuaciones diferenciales siguiendo las leyes físicas (Wilks, 2011).

4.4 Evaluación de los pronósticos

4.4.1 Métricas de Error

4.4.1.1 Error Cuadrático Medio

El Error Cuadrático Medio (MSE por sus iniciales en inglés) se cuantifica como las diferencias cuadráticas entre los valores estimados por el modelo WRF y las observaciones del SIATA. Esta medida es sensible a valores atípicos, ya que sus estimados aumentan proporcionalmente al cuadrado de las diferencias. Para mejorar la resistencia del estadístico se utiliza la raíz cuadrada del MSE, también conocida como RMSE. Este valor siempre es positivo; cuando el resultado es 0 los datos simulados se ajustan perfectamente a los datos observados (Wilks, 2011; Warner, 2010). El RMSE se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (P_{WRF,i} - P_{OBS,i})^2\right)} \quad (1)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{P}_{OBS}} \quad (2)$$

Donde el parámetro n representa el tamaño del conjunto de datos, la variable $P_{WRF,i}$ es el valor de precipitación pronosticada por WRF para el paso de tiempo i , $P_{OBS,i}$ es el valor de las observaciones en el paso de tiempo i y \bar{P}_{OBS} es el promedio de las observaciones, este último utilizado en la estimación de la Raíz del Error Cuadrático Medio Normalizado (nRMSE por sus siglas en inglés).

4.4.1.2 Error Medio

El Error Medio (ME por sus iniciales en inglés) es la diferencia entre los valores estimados por WRF y los valores observados del SIATA. Cuando el resultado de la métrica es mayor que cero, el modelo está sobreestimando la precipitación, mientras que cuando es menor que cero hay subestimación (Warner, 2010). La estimación del ME está dada por:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (P_{WRF,i} - P_{OBS,i}) \quad (3)$$

$$nME = \frac{ME}{\bar{P}_{OBS}} \quad (4)$$

Donde el parámetro n representa el tamaño del conjunto de datos, la variable $P_{WRF,i}$ es el valor de precipitación pronosticada por WRF para el paso de tiempo i , $P_{OBS,i}$ es el valor de las observaciones en el paso de tiempo i y \bar{P}_{OBS} es el promedio de las observaciones, este último utilizado en la estimación del Error Medio Normalizado (nME por sus siglas en inglés).

4.4.1.3 Correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson mide el grado de relación lineal entre dos variables, dividiendo la covarianza de ambos conjuntos de datos por el producto de sus respectivas desviaciones estándar. No es un estadístico robusto ya que no encuentra relaciones diferentes a las lineales y no es resistente debido a que es sensible a los datos atípicos. Cuando el

coeficiente es mayor que cero, indica una asociación positiva donde los valores estimados crecen (o decrecen) según los valores observados, mientras que cuando es menor a cero, los valores estimados decrecen (crecen) según crecen (decrecen) los valores observados. Cuando el coeficiente es cero, no existe una relación lineal entre ambos conjuntos de datos. El coeficiente de correlación de Pearson se estima de la siguiente manera:

$$r_{xy} = \frac{Cov(x,y)}{S_x S_y} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n [(P_{WRF,i} - \bar{P}_{WRF,i})(P_{OBS,i} - \bar{P}_{OBS,i})]}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n (P_{WRF,i} - \bar{P}_{WRF,i})^2} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n (P_{OBS,i} - \bar{P}_{OBS,i})^2}} \quad (5)$$

El parámetro n representa el tamaño del conjunto de datos, la variable $P_{WRF,i}$ es el valor de precipitación pronosticada por WRF para el paso de tiempo i , $P_{OBS,i}$ es el valor de las observaciones en el paso de tiempo i , $\bar{P}_{WRF,i}$ es el promedio de la precipitación pronosticada por WRF para el paso de tiempo i , y $\bar{P}_{OBS,i}$ es el promedio de las observaciones en el paso de tiempo i (Wilks, 2011).

4.4.1.4 Correlación de Spearman

El coeficiente de correlación de Spearman mide la relación entre dos conjuntos de datos. Este estadístico es usado como una alternativa más robusta a la correlación de Pearson porque no es sensible a los datos atípicos y encuentra relaciones además de las lineales. Para calcular la correlación de Spearman se encuentra la ubicación de los datos cuando se jerarquizan de mayor a menor magnitud y, posteriormente, se calcula la correlación con los rangos de la siguiente manera:

$$r_k = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (R_{WRF,i} - R_{OBS,i})^2}{n(n^2 - 1)} \quad (6)$$

El parámetro n representa el tamaño del conjunto de datos, la variable $R_{WRF,i}$ es el componente i del rango para los datos pronosticados del modelo WRF, y $R_{OBS,i}$ es el componente i del rango para los datos observados (Wilks, 2011).

4.4.2 Tablas de contingencia

Las tablas de contingencia se utilizan para asociar dos variables con datos categóricos, verificando si existe una correspondencia uno a uno entre los valores observados y simulados. Los datos categóricos se establecen como la cantidad de veces en que ocurre el evento (o no ocurre) en los datos observados y simulados. Por ejemplo, en la Figura 4 se puede ver una tabla de contingencia, donde A (o “Acierto”) es la cantidad de veces en las que tanto el pronóstico como las observaciones registraron un evento de precipitación; B (o “Falsas Alarmas”) es la cantidad de veces en las que el modelo pronosticó un evento de precipitación y los datos observados no lo hicieron; C (o “Fallos”) es la cantidad de veces en las que no se pronosticó el evento de precipitación, pero en realidad sí ocurrió en las observaciones; y D (o “Negativo correcto”) es la cantidad de veces en las que tanto el pronóstico como las observaciones coinciden en que el evento de precipitación, no ocurrió. De esta manera, A+B es la cantidad de veces en la que se pronosticó precipitación; C+D es la cantidad de veces en las que no se pronosticaron eventos de lluvia; A+C es la cantidad de veces en las que se observaron eventos de lluvia; y B+D es la cantidad de veces en las que no se observaron eventos de precipitación (Wilks, 2011).

		Observado	
		Si	No
Pronosticado	Si	A	B
	No	C	D

Figura 4. Tabla de contingencia 2X2 .

4.4.3 Escalares de la tabla de contingencia

4.4.3.1 Porción Correcta

El escalar de Porción Correcta (PC) indica la correspondencia entre pares de eventos pronosticados y observados. PC se estima como:

$$PC = \frac{A+D}{n} \quad (7)$$

Con este atributo se busca encontrar la fracción de eventos en el que WRF representa adecuadamente a las observaciones, incluyendo los eventos en que se pronostica correctamente el episodio de precipitación como eventos donde no hubo lluvia. Esta relación varía entre las magnitudes de 0 a 1. Un PC=0 indica que no hubo correspondencia entre los datos del pronóstico y las observaciones, mientras que un PC=1 indicaría que existe correspondencia entre ambos conjuntos. Otra forma de analizar este atributo es multiplicando por 100, lo que resulta como una “Tasa de acierto” (Wilks, 2011).

4.4.3.2 Probabilidad de Detección

La Probabilidad de Detección (POD por sus iniciales en inglés) es la relación entre los “Aciertos” y el número de veces en que se presentó el evento de precipitación en las observaciones (A+C). Este escalar se estima como:

$$POD = \frac{A}{A+C} \quad (8)$$

La relación POD determina la fracción de eventos observados de precipitación que se pronosticaron correctamente por WRF. La magnitud de POD varía entre 0 y 1. Un POD=0 indica que el pronóstico no identificó ningún evento observado de precipitación; mientras que un POD=1 indica que el pronóstico fue capaz de identificar todos los eventos de precipitación que se observaron (Wilks, 2011).

4.4.3.3 Sesgo

El Sesgo (Bias en inglés) es la relación entre el número de veces en que se pronosticó un evento de precipitación (A+B) dividido el número de veces en que se observó (A+C). Este escalar se estima como:

$$Bias = \frac{A+B}{A+C} \quad (9)$$

Cuando Bias=1 indica que el evento se pronosticó la misma cantidad de veces que las observaciones. Cuando Bias > 1, el evento de precipitación se pronosticó más veces que lo observado y se le denomina “Sobre-pronóstico”, en caso contrario Bias < 1 y se le denomina “Sub-pronóstico” (Wilks, 2011).

4.5.3.4 Tasa de Falsas Alarmas

La Tasa de Falsas Alarmas (FAR por sus iniciales en inglés) corresponde a la fracción de eventos de precipitación pronosticados que no fueron observados. FAR se estima como:

$$FAR = \frac{B}{A+B} \quad (10)$$

Este escalar determina la cantidad de falsas alarmas: cuando FAR=0 todos los eventos observados de precipitación fueron pronosticados correctamente por WRF mientras que un FAR=1 indica que ningún evento de precipitación pronosticado fue observado.

5. Resultados y análisis

5.1 Series de tiempo

Las Figuras 5 y 6 muestran las series de tiempo comparativas entre las observaciones y los pronósticos en el municipio de Sonsón y Rionegro, respectivamente, usando el método F1 para los pronósticos del D1. En ambas figuras, los máximos de precipitación observados y

pronosticados tienen diferencias sustanciales: mientras que las observaciones tienen un máximo de 60 mm en Sonsón y de 35 mm en Rionegro en el periodo de estudio, los pronósticos alcanzan magnitudes de 140 mm en Sonsón y 80 mm en Rionegro. El comportamiento de las series de tiempo también es diferenciado en ambos municipios. Cuando los pronósticos alcanzan valores máximos, generalmente no coinciden con los valores máximos de las observaciones; sin embargo, el comportamiento entre la serie de tiempo del píxel individual y el promedio espacial coincide en la mayoría de los casos. Al comparar la Figura 3 con las Figuras 5 y 6, se identifican claramente los espacios de los datos perdidos en las series de tiempo observadas y los días de pronóstico disponibles. En Sonsón, entre julio y agosto de 2020, y entre marzo y abril de 2021, se pueden observar días disponibles de pronóstico pero para los que no se tienen observaciones para validación (ver Figura 5). Asimismo, en el municipio de Rionegro, entre noviembre de 2021 y mediados de marzo de 2022, hay espacios de tiempo considerables de los que no se tienen observaciones para validar el modelo.

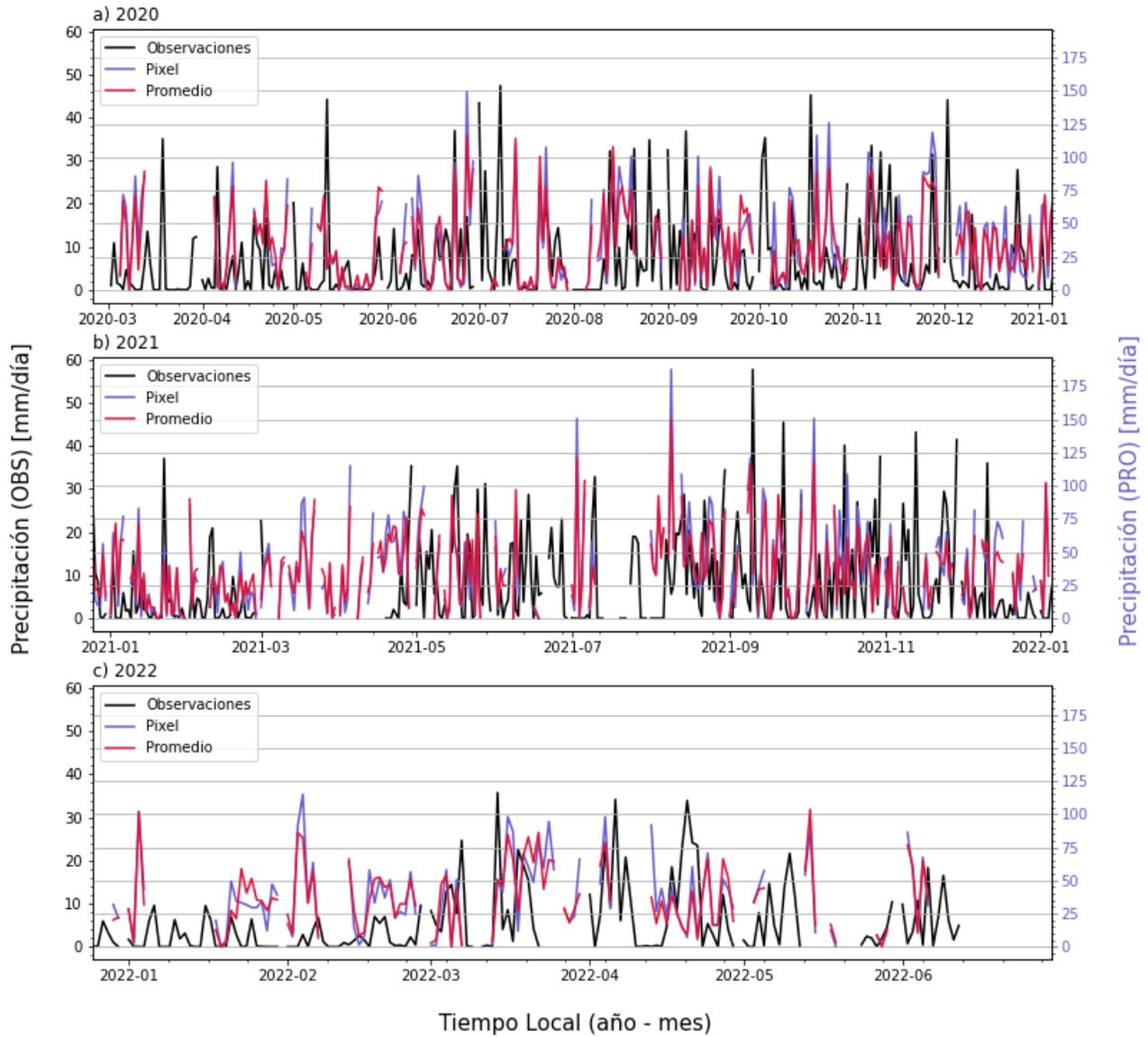


Figura 5. Serie de tiempo comparativa entre los pronósticos del píxel individual, el promedio espacial y las observaciones del municipio de Sonsón en el D1 de pronósticos, usando el método F1 para generar los acumulados diarios. El eje vertical derecho representa la unidades de las observaciones y el eje izquierdo representa las unidades de los pronósticos. a) 2020, b) 2021, c) 2022.

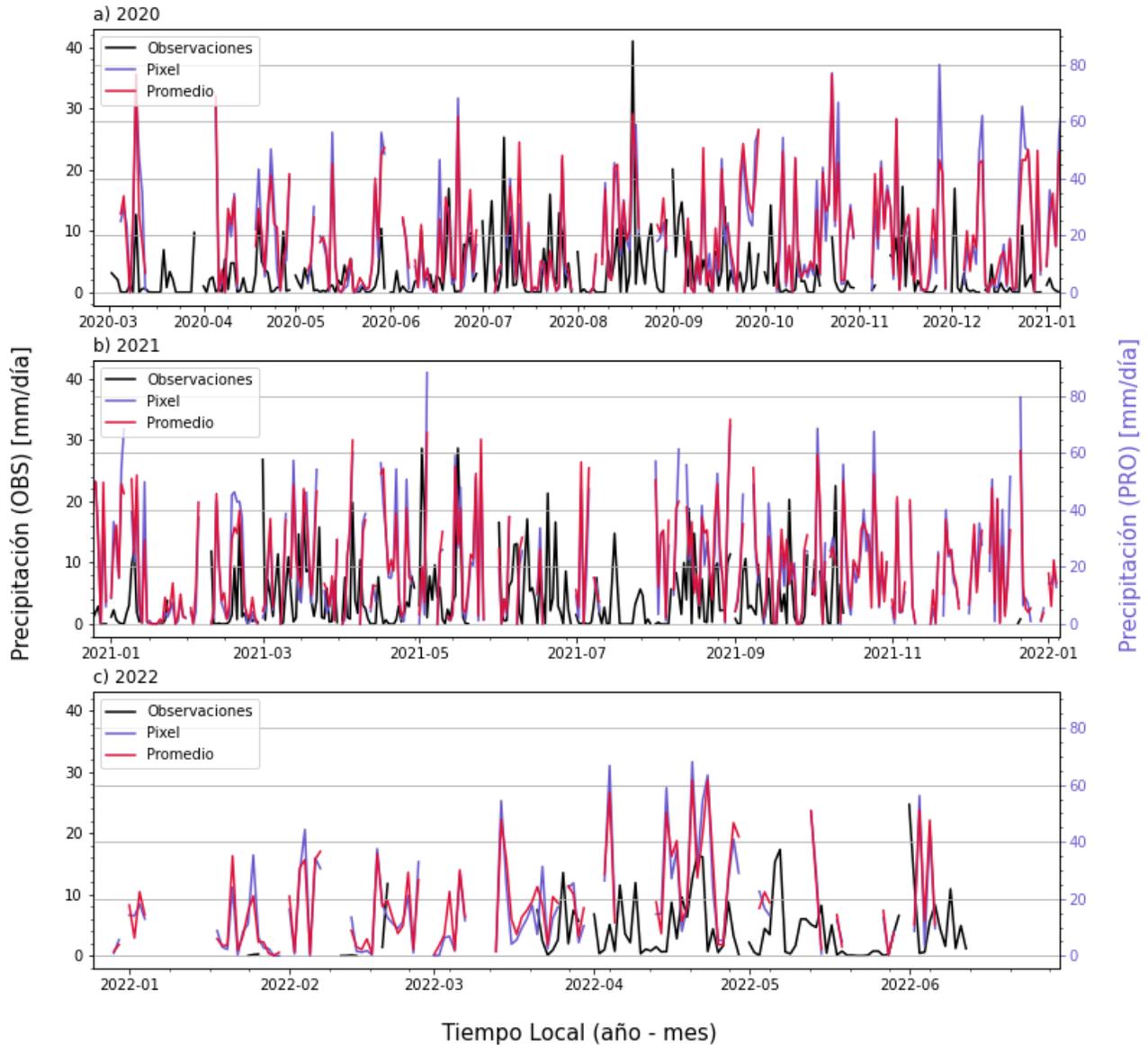


Figura 6. Serie de tiempo comparativa entre los pronósticos del píxel individual, el promedio espacial y las observaciones del municipio de Rionegro en el DI de pronósticos, usando el método F1 para generar los acumulados diarios. El eje vertical derecho representa la unidades de las observaciones y el eje izquierdo representa las unidades de los pronósticos. a) 2020, b) 2021, c) 2022.

5.2 Ciclos diurnos

En la Figura 7.a se presenta el ciclo medio diario de precipitación del municipio de Sonsón, con magnitudes entre 0,0 mm/hr y 1,0 mm/hr. Este municipio tiene los valores más altos entre las 17:00 a las 2:00 hr, mientras que entre las 7:00 a las 12:00 hr se encuentran las horas con menores magnitudes. En el municipio de Rionegro (Figura 7b), las magnitudes varían entre 0,0 mm/hr y 0,7 mm/hr. En comparación con el municipio de Sonsón, la precipitación en Rionegro es menor y se distribuye en más horas a lo largo del día. Ambas regiones muestran un pico de precipitación nocturna, un reto para el modelo porque durante la noche la energía disponible no es suficiente para que los modelos alcancen a generar lluvia (Álvarez & León, 2015).

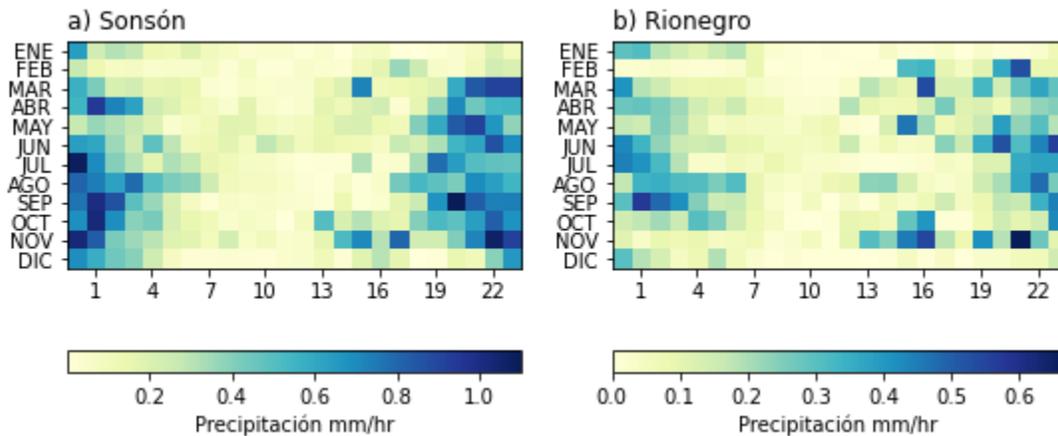


Figura 7. Ciclos medios diarios de precipitación en ambos municipios de estudio según las observaciones de SIATA. El eje horizontal muestra las horas del día desde las 0:00 hr hasta las 23:00 en hora local y el eje vertical muestra los meses del año. a) Sonsón y b) Rionegro.

Los paneles a, b, c y d de la Figura 8 presentan los ciclos medios diarios de precipitación de los pronósticos en el D1. De manera comparativa, se adicionan los ciclos medios diarios de las observaciones de ambos municipios. Se usó el mismo rango de valores para los 6 paneles, entre los 0,0 mm/hr y los 2,5 mm/hr. El modelo es capaz de representar el comportamiento promedio de la precipitación observada durante el día en ambos municipios pues simula precipitación en las horas del día en las que ambos conjuntos de observaciones indican que hay precipitación; sin embargo, en ambos municipios, entre las 2:00 y las 4:00 hr y entre las 13:00 y las 16:00, hay precipitación simulada por el modelo que no es observada en los pluviómetros.

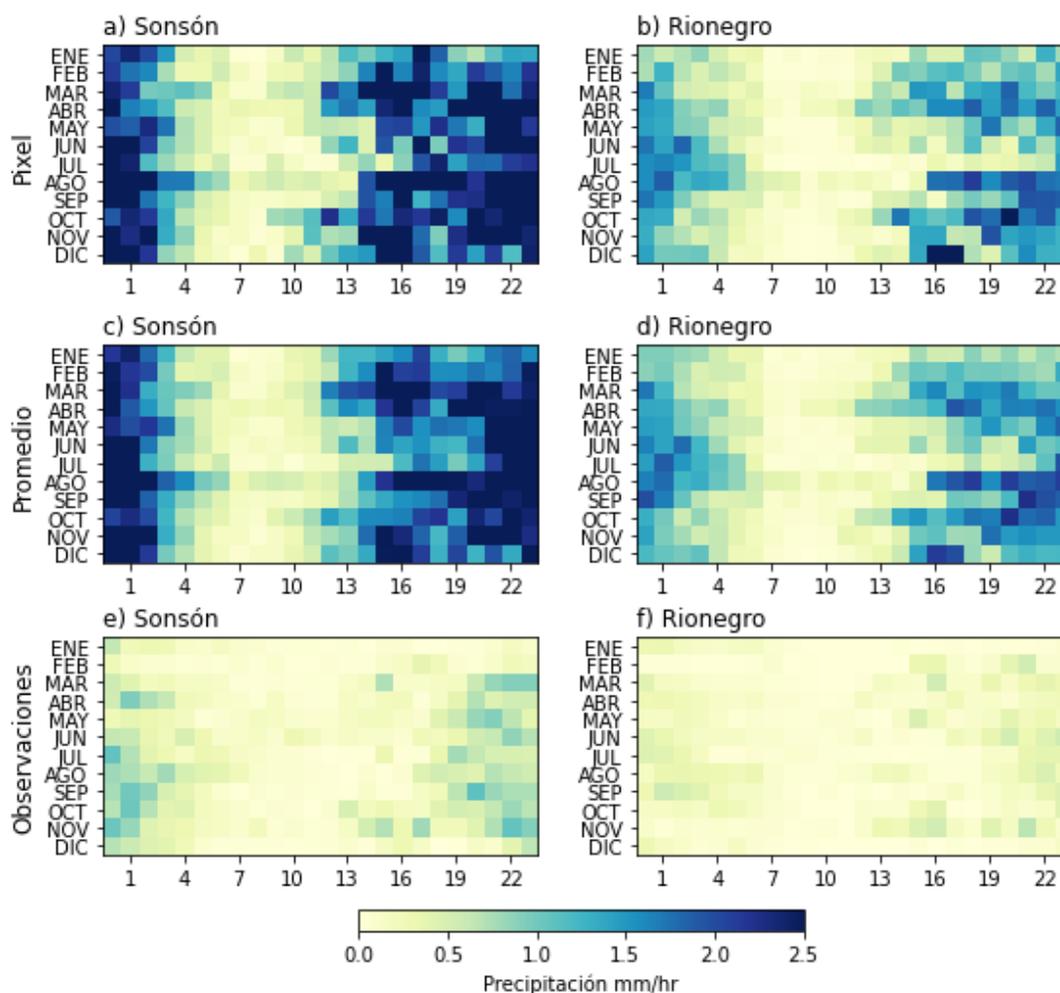


Figura 8. Ciclos medios diurnos simulados por WRF (paneles a) a d)) y observados por SIATA (paneles e) y f)). El eje horizontal muestra las horas del día desde las 0:00 hr hasta las 23:00 en hora local y el eje vertical muestra los meses del año. a) Pixel individual en Sonsón para el D1, b) Píxel individual en Rionegro para el D1, c) Promedio espacial de Sonsón para el D1, d) Promedio espacial de Rionegro para el D1, e) Observaciones en Sonsón en la escala de valores del modelo, f) Observaciones en Rionegro en la escala de valores del modelo.

5.3 Error Cuadrático Medio y Error Medio

Las Figuras 9, 10, 11 y 12 muestran los ciclos medios diurnos comparativos de las métricas de error consideradas en este estudio: ME, RMSE, nME y nRMSE, respectivamente. Estos gráficos se generaron con los acumulados horarios para los pronósticos del D1 y del D2 en

el píxel individual y para el promedio espacial. Como anteriormente se había definido, ME indica un sesgo respecto a los valores observados, mostrando de esta manera si existe subestimación o sobreestimación de precipitación por parte de la predicción de WRF. Se observa que hay sobreestimación por parte del modelo en ambos municipios y en ambos días de pronóstico durante la mayor parte del año (ver Figura 9).

En Sonsón, la sobreestimación se presenta en magnitudes considerables entre la tarde y la noche, que coincide con las horas del día en las que se encuentran los valores más altos de precipitación en las observaciones y en los pronósticos (ver Figura 7 y 8). Mientras que en el D1 los valores más altos de ME se alcanzan entre las 11:00 a.m y 2:00 a.m (ver Figura 9.a y 9.b), en el D2 los errores se distribuyen entre las 1:00 p.m y 9 p.m, es decir en un menor rango de horas. En el municipio de Rionegro, también se presentan los patrones de sobreestimación entre la tarde y la noche, que igualmente coincide con la mayor precipitación del municipio (ver Figuras 7 y 8). Sin embargo, los mayores errores se concentran en un menor rango de horas, para el D1 entre las 3:00 p.m y 1:00 a.m, y para el D2 entre 1:00 p.m y las 8:00 p.m. Los pronósticos del D2 alcanzan menores magnitudes en comparación con el D1 principalmente en las temporadas de enero-febrero-marzo y mayo-junio-julio. Por otra parte, existe subestimación en ambos municipios en los meses de junio, julio, agosto y noviembre sin un patrón definido que no perdura a lo largo de varias horas.

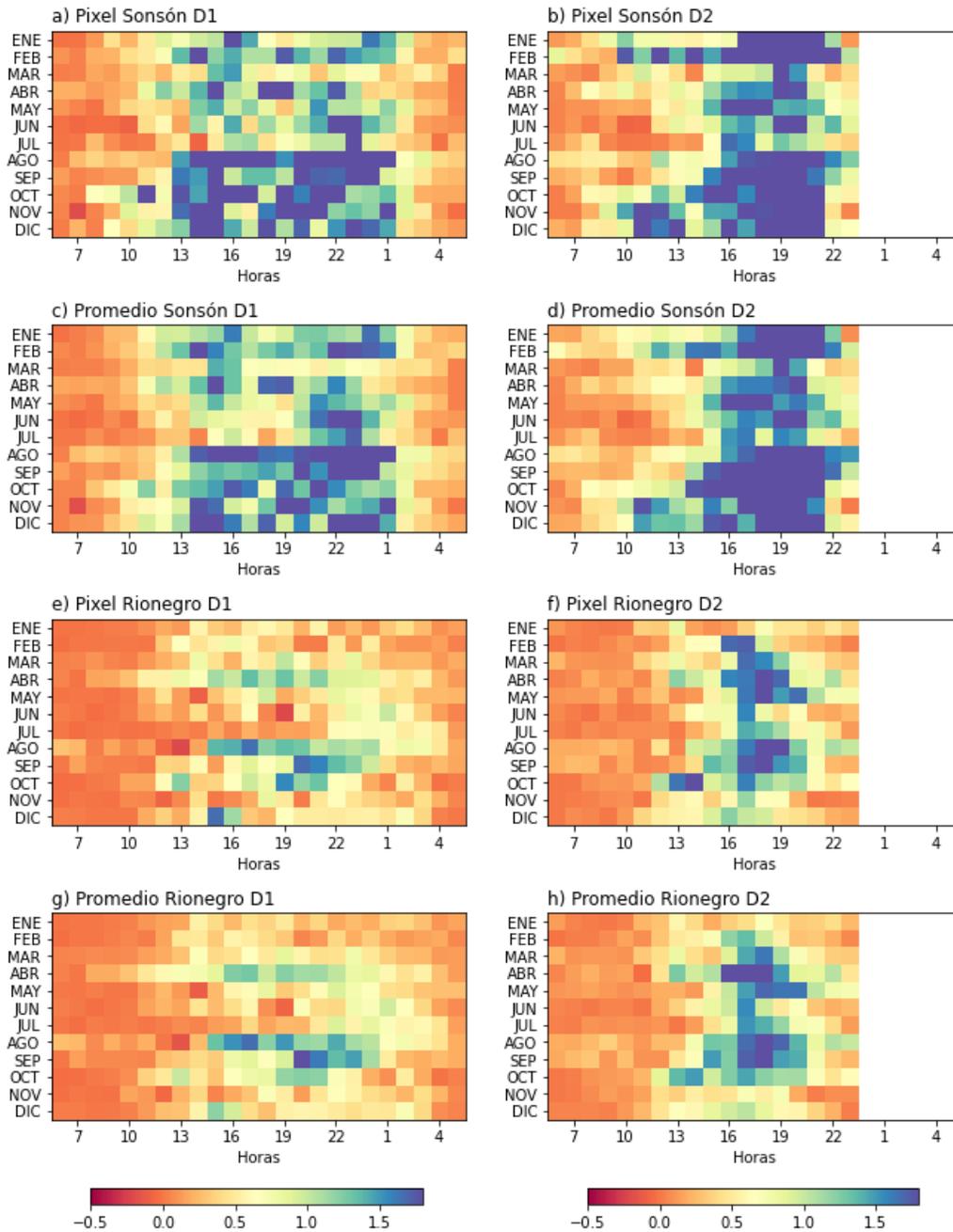


Figura 9. Ciclos medios diurnos de ME. El eje horizontal muestra las horas del día comenzando desde las 7:00 a.m. Los meses se ubican en el eje vertical. Los cuatro primeros paneles representan al D1 y D2 en el píxel individual y promedio espacial en el municipio de Sonsón. Los siguientes cuatro paneles corresponden al municipio de Rionegro.

El RMSE, a diferencia del ME, muestra el promedio de los errores individuales. En la Figura 10 se puede observar un comportamiento similar en la distribución de los valores más

altos del ME y el RMSE a lo largo del día y durante todo el año en ambos días de pronóstico (D1 y D2) en el píxel individual y el promedio espacial. Asimismo, se ve que el comportamiento de las menores magnitudes en ambas métricas también es semejante. De esta manera, se entiende que, en gran medida, los mayores errores se presentan en las horas del día en las que tanto los pronósticos como las observaciones suelen tener mayores magnitudes de precipitación y, por lo tanto, la diferencia en los eventos de las ecuaciones 1 y 3 también es mayor.

Las métricas nME y nRMSE se presentan como una medida normalizada en la que se compara el valor del error con respecto al promedio de los datos observados; por lo tanto, es posible comparar ambas métricas. En las Figuras 11 y 12 se puede ver claramente que comparando las magnitudes de ambos errores con el promedio de las observaciones en cada mes, los porcentajes más altos de los errores se ubican en los meses de diciembre, enero y febrero a lo largo del casi todo las horas del día, y en la mayoría de los meses entre las 10:00 a.m y las 4:00 p.m. Posiblemente, los altos porcentajes en ambas métricas se deban a la coincidencia con los ciclos medios diurnos de precipitación de los pronósticos, porque en esas horas WRF espera precipitación cuando las observaciones no lo están indicando.

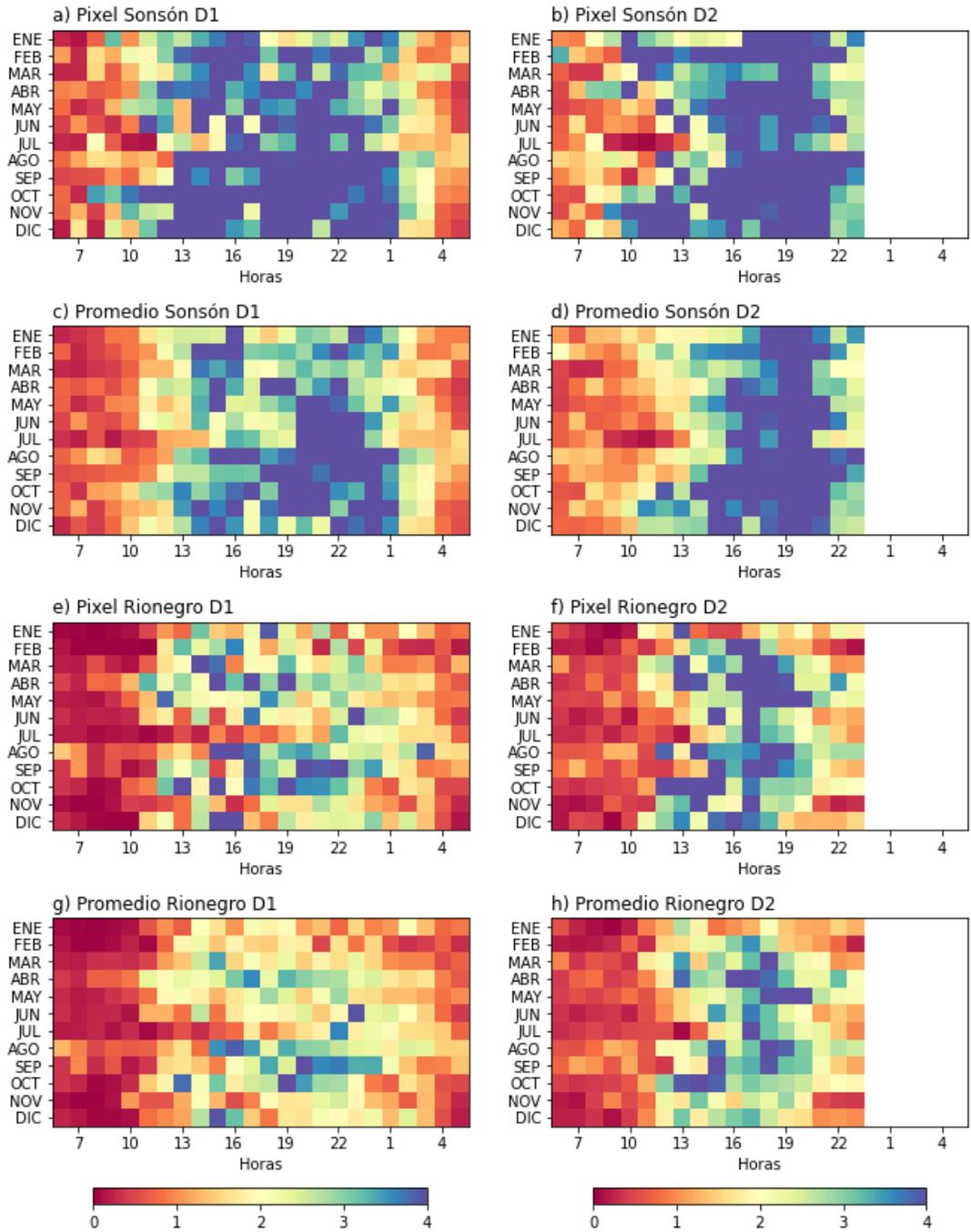


Figura 10. Ciclos medios diarios de RMSE. El eje horizontal muestra las horas del día comenzando desde las 7:00 a.m. Los meses se ubican en el eje vertical. Los cuatro primeros paneles representan al D1 y D2 en el píxel individual y promedio espacial en el municipio de Sonsón. Los siguientes cuatro paneles corresponden al municipio de Rionegro.

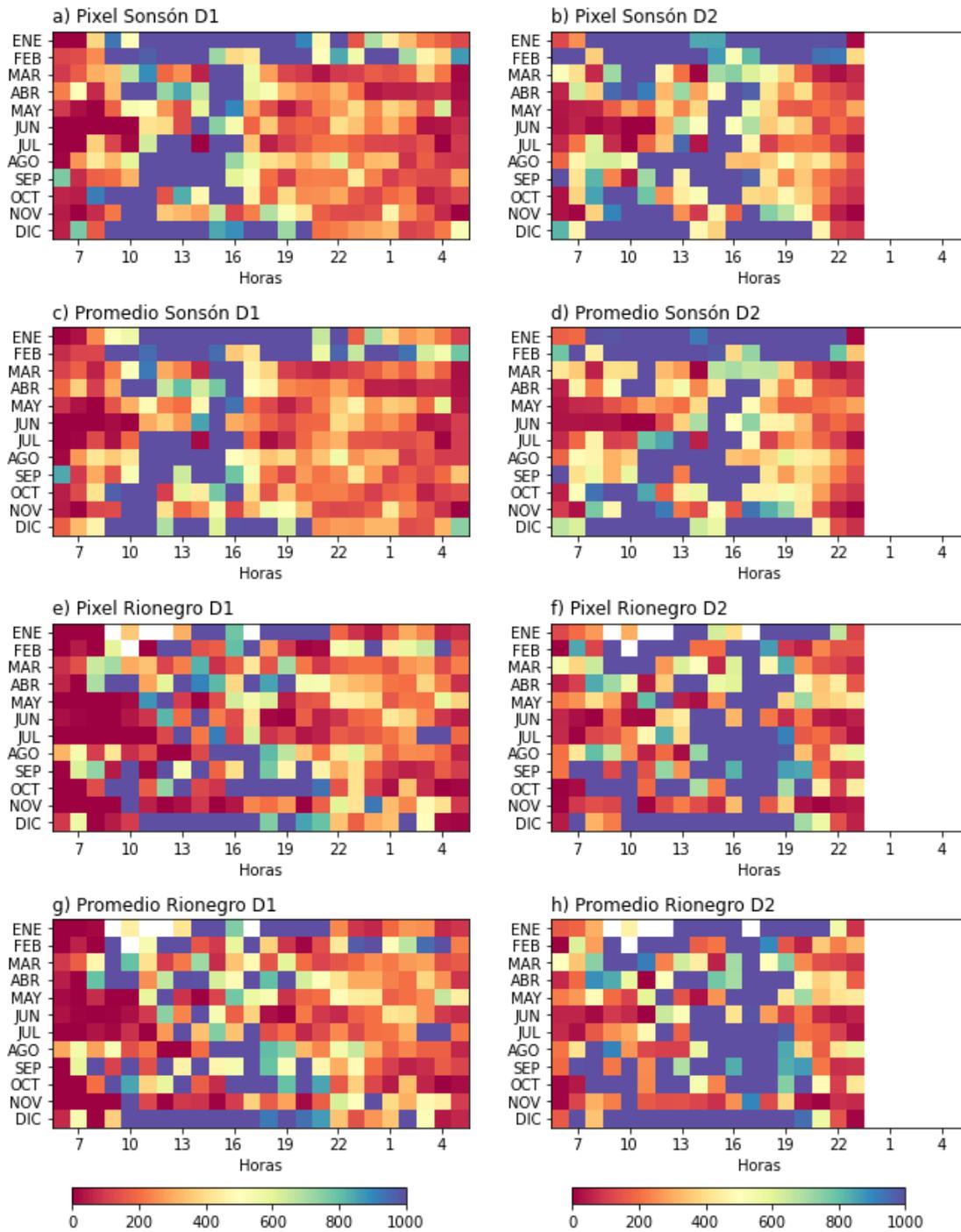


Figura 11. Ciclos medios diarios de nME . El eje horizontal muestra las horas del día comenzando desde las 7:00 a.m. Los meses se ubican en el eje vertical. Los cuatro primeros paneles representan al D1 y D2 en el píxel individual y promedio espacial en el municipio de Sonsón. Los siguientes cuatro paneles corresponden al municipio de Rionegro.

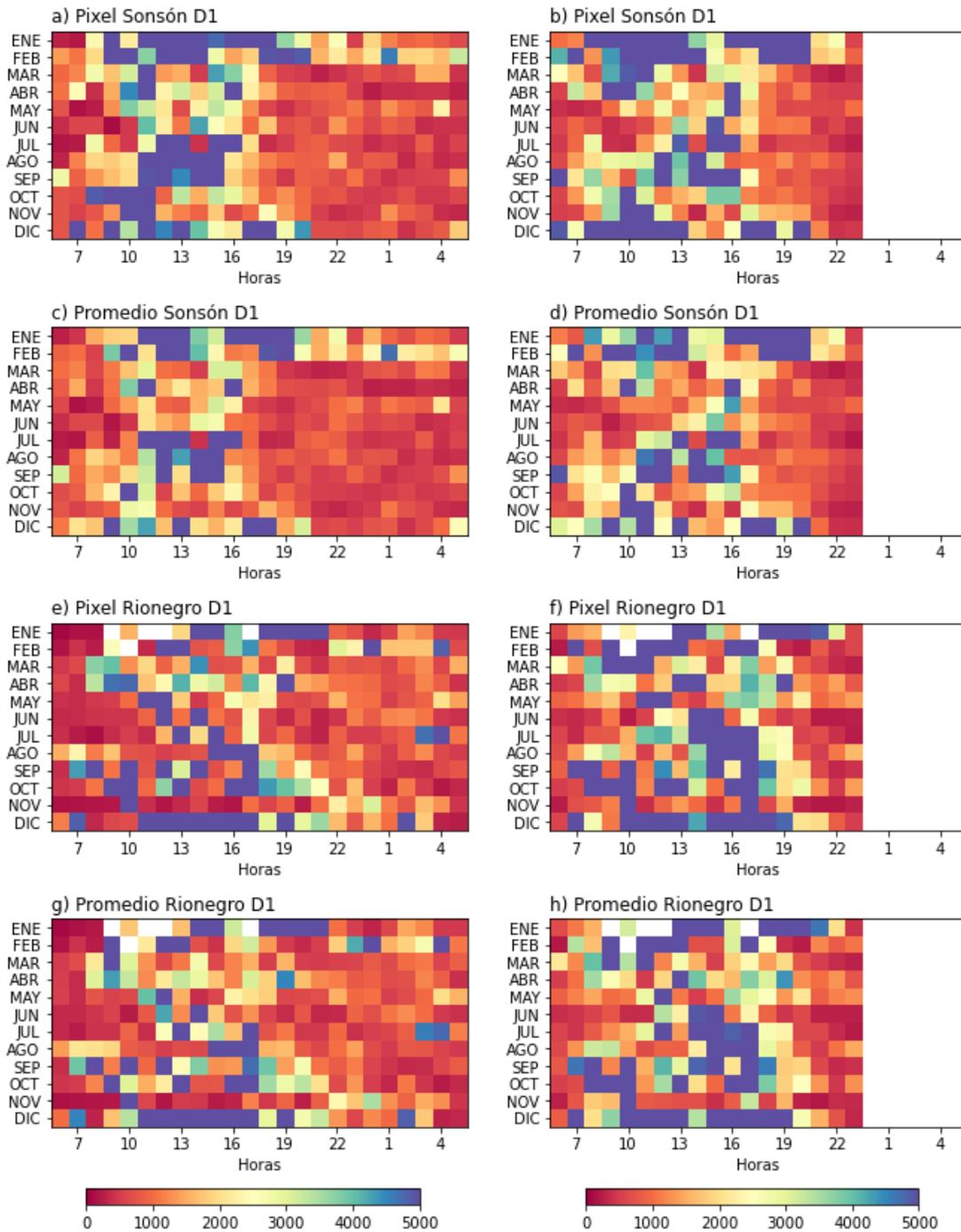


Figura 12. Ciclos medios diarios de $nRMSE$. El eje horizontal muestra las horas del día comenzando desde las 7:00 a.m. Los meses se ubican en el eje vertical. Los cuatro primeros paneles representan al D1 y D2 en el pixel individual y promedio espacial en el municipio de Sonsón. Los siguientes cuatro paneles corresponden al municipio de Rionegro.

5.4 Correlaciones

Como se discutió anteriormente, las correlaciones de Pearson y Spearman son estadísticos que indican el grado de correspondencia entre dos conjuntos de datos. Mientras que Pearson indica una relación lineal, la correlación de Spearman suele indicar otros tipos de relaciones, de manera que proporciona una comparativa entre el tipo de relación de los datos analizados. En la Figura 13 se observa que no existen relaciones fuertes entre los pronósticos y las observaciones. En Sonsón, el máximo valor alcanzado para los estadísticos de Pearson y Spearman son 0,37 y 0,53, respectivamente, mientras que en Rionegro son 0,56 y 0,68. Para el promedio espacial, se alcanzan magnitudes en Sonsón de 0,42 y 0,57, y en Rionegro de 0,57 y 0,6, respectivamente para ambos estadísticos en los dos municipios. En Sonsón se alcanzan mejores correlaciones de ambos estadísticos en los meses de enero, mayo, junio, julio, agosto y septiembre, y menores magnitudes en el mes de abril. En Rionegro se tienen mayores magnitudes en los meses de julio, agosto y noviembre, y menores en los meses de marzo y septiembre. En el municipio de Rionegro, cuando los acumulados son a una escala temporal mayor, las correlaciones también son mayores; en comparación, en el municipio de Sonsón, aumentan las correlaciones hasta los acumulados cada 12 horas y en ambas formas de los acumulados diarios disminuye.

Un contraste interesante se presenta en las dos formas de los acumulados diarios. En la mayoría de los casos, la correlación de F1 es mayor que la correlación de F2. El método F1 alcanzó las mejores magnitudes de las correlaciones en el píxel individual y promedio espacial de ambos municipios. Por otro lado, se da una reducción sustancial en la correlación de F2 en el municipio de Sonsón, donde el acumulado diario tiene menor magnitud que los acumulados horarios en ambos promedios mensuales de los estadísticos. El modelo de persistencia en el municipio de Sonsón presentó menores magnitudes promedio de ambas correlaciones mensuales. En la correlación de Pearson se obtuvieron valores de 0,02 en F1 y -0,01 en F2, y en la correlación de Spearman las magnitudes fueron de 0,03 en F1 y 0,01. Con la correlación de Pearson en el municipio de Rionegro los valores son: 0,3; 0,23; 0,16 y 0,11. Por último, los valores para la correlación de Spearman en el municipio de Rionegro son: 0,33; 0,24; 0,16 y 0,11. En todos los casos, las correlaciones promedio de los acumulados diarios superan por muy poco las magnitudes de los modelos de persistencia.

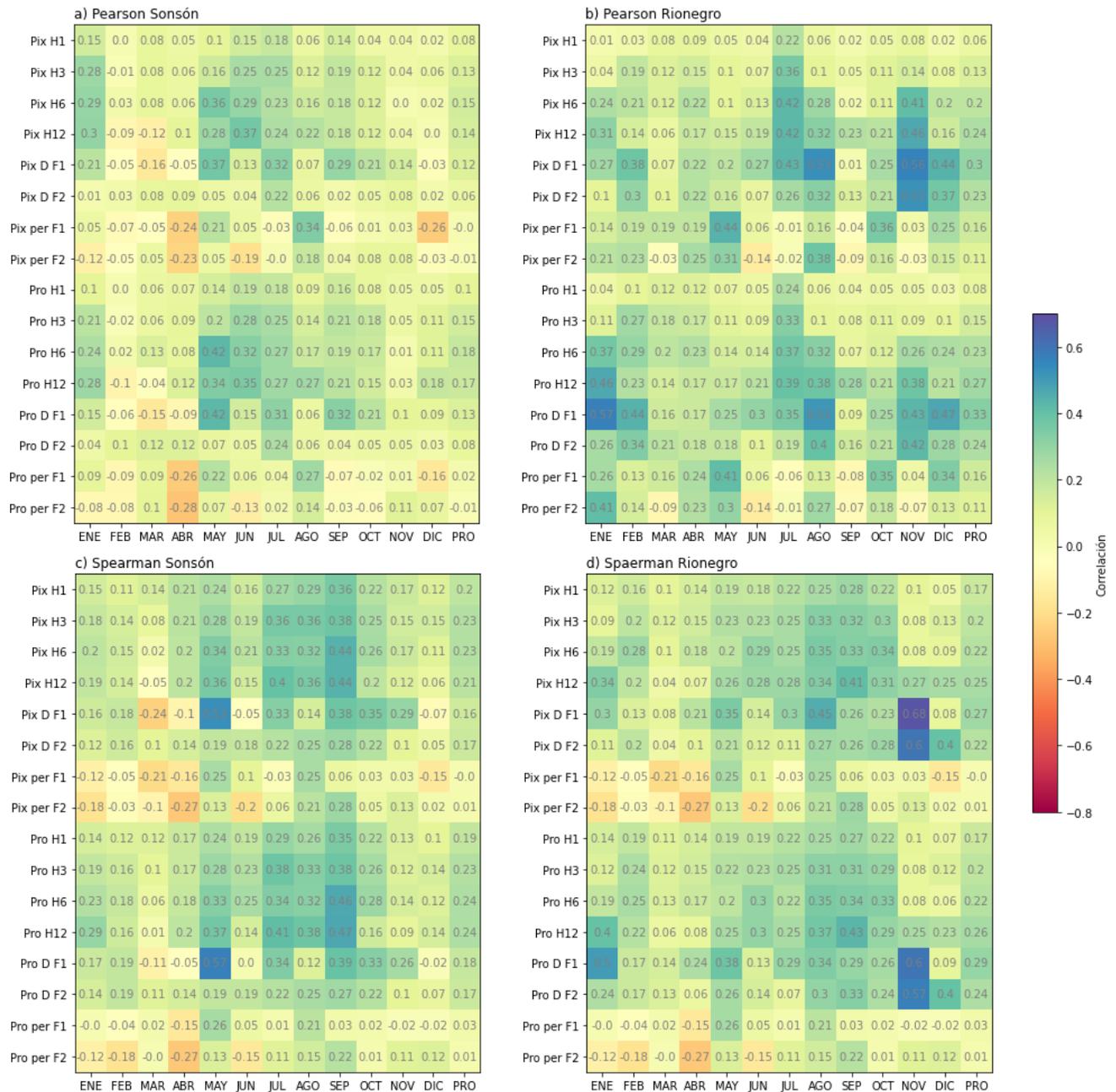


Figura 13. Correlación promedio mensual de Pearson y Spearman para el DI. El eje vertical indica si el valor corresponde al píxel individual o al promedio en las diferentes resoluciones temporales, en las dos formas de acumulados diarios y los modelos de persistencia (ver Tabla 2). El eje horizontal corresponde a los meses y el promedio de la correlación en estos meses. Los paneles a) y b) muestran la correlación de Pearson en ambos municipios y los paneles c) y d) la correlación de Spearman.

Tabla 2. Nomenclatura empleada.

Etiqueta	Descripción
<i>Pix H1</i>	Acumulado horario del píxel individual .
<i>Pix H3</i>	Acumulado cada 3 horas del píxel individual.
<i>Pix H6</i>	Acumulado cada 6 horas del píxel individual.
<i>Pix H12</i>	Acumulado cada 12 horas del píxel individual.
<i>Pix D F1</i>	Acumulado diario con la metodología F1 del píxel individual.
<i>Pix D F2</i>	Acumulado diario con la metodología F2 del píxel individual.
<i>Pix per F1</i>	Modelo de persistencia de los acumulados diarios con la metodología F1 del píxel individual.
<i>Pix per F2</i>	Modelo de persistencia de los acumulados diarios con la metodología F2 del píxel individual.
<i>Pro H1</i>	Acumulado horario del promedio espacial.
<i>Pro H3</i>	Acumulado cada 3 horas del promedio espacial.
<i>Pro H6</i>	Acumulado cada 6 horas del promedio espacial.
<i>Pro H12</i>	Acumulado cada 12 horas del promedio espacial.
<i>Pro D F1</i>	Acumulado diario con la metodología F1 del promedio espacial.
<i>Pro D F2</i>	Acumulado diario con la metodología F2 del promedio espacial.
<i>Pro per F1</i>	Modelo de persistencia de los acumulados diarios con la metodología F1 del promedio espacial.
<i>Pro per F2</i>	Modelo de persistencia de los acumulados diarios con la metodología F2 del promedio espacial.
<i>n</i>	Cantidad de datos analizados en la tabla de contingencia (ver sección 4.4.2).
<i>A</i>	Cantidad de veces que hay Aciertos entre los conjuntos de datos analizado (ver sección 4.4.2).
<i>B</i>	Cantidad de Falsas Alarmas entre los conjuntos de datos analizados (ver sección 4.4.2).
<i>C</i>	Cantidad de Fallos entre los conjuntos de datos analizados (ver sección 4.4.2).
<i>D</i>	Cantidad de Negativos correctos entre los conjuntos de datos analizados (ver sección 4.4.2).
<i>PC</i>	Escalar de Porción Correcta de la Tabla de contingencia.
<i>Bias</i>	Escalar "Bias" de la Tabla de contingencia.
<i>FAR</i>	Escalar de Tasa de Falsas Alarmas de la Tabla de contingencia.
<i>POD</i>	Escalar de Probabilidad de Detección de la Tabla de contingencia.
<i>FAR/POD</i>	Relación entre los escalares FAR y POD.
<i>POD/FAR</i>	Relación entre los escalares FAR y POD.

Al igual que el D1, las correlaciones en el D2 de pronóstico tampoco tienen relaciones fuertes entre las simulaciones de precipitación de WRF y las observaciones (ver Figura 14). En el municipio de Sonsón, se tienen magnitudes máxima de 0,58 y 0,61 en el píxel individual y promedio espacial de la correlación de Pearson, respectivamente, ambas en el mes de julio.

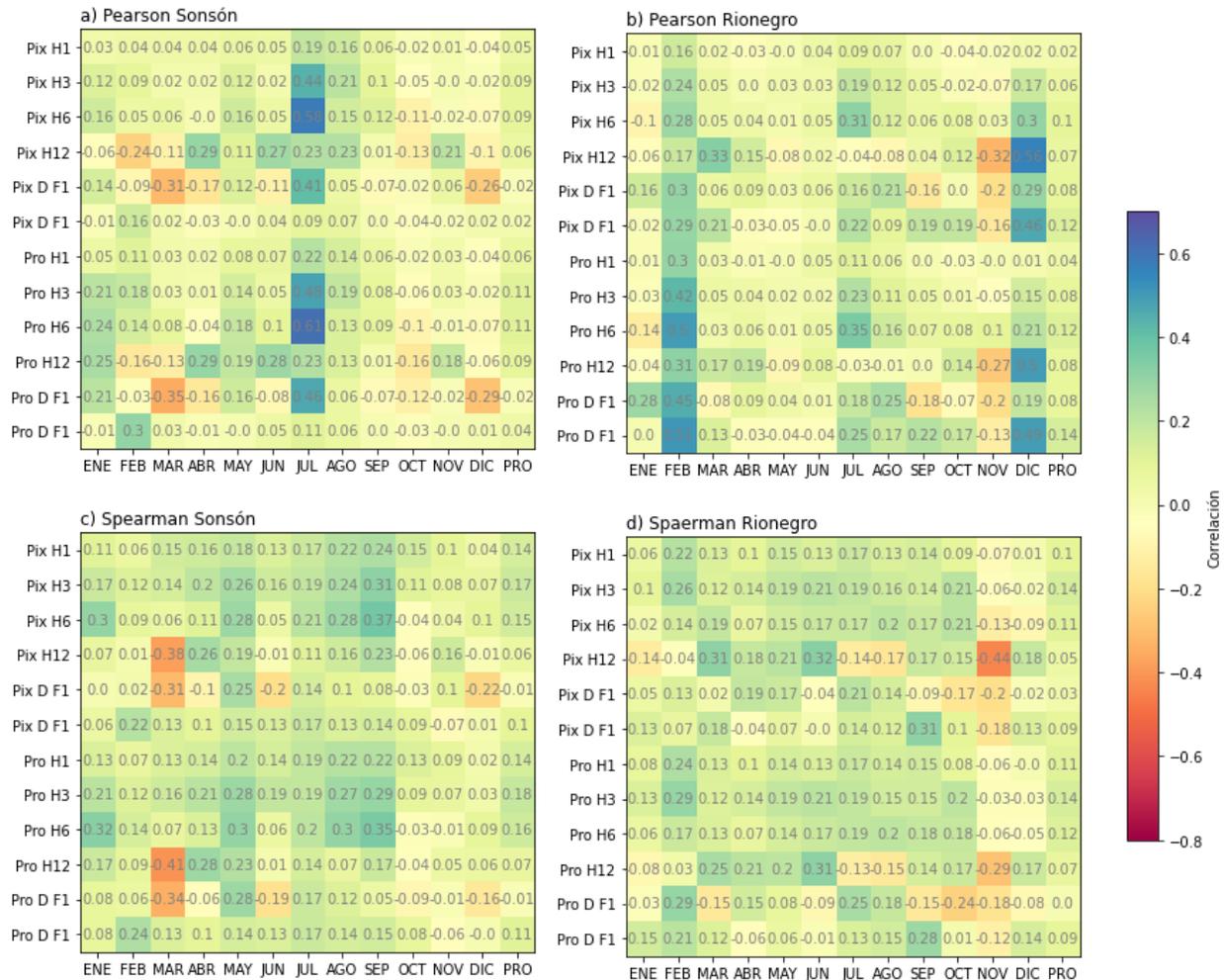


Figura 14. Correlación promedio mensual de Pearson y Spearman para el D2. El eje vertical indica si el valor corresponde al píxel individual o al promedio en las diferentes resoluciones temporales, en las dos formas de acumulados diarios y los modelos de persistencia (ver Tabla 2). El eje horizontal corresponde a los meses y el promedio de la correlación en estos meses. Los paneles a) y b) muestran la correlación de Pearson en ambos municipios y los paneles c) y d) la correlación de Spearman.

Las magnitudes máximas de la correlación de Spearman en ese municipio alcanzaron valores de 0,37 y 0,35, respectivamente. En Rionegro los valores fueron: 0,56 y 0,51 en el píxel y promedio

espacial de la correlación de Pearson y en la correlación de Spearman 0,32 y 0,31, respectivamente. A diferencia del D1 de pronósticos, el D2 alcanza los mayores valores de las correlaciones en los acumulados cada 3 horas y tiende a disminuir la magnitud en mayores escalas temporales, a excepción de las correlaciones de Pearson en Rionegro usando el acumulado diario F2, que tuvo la mejor correlación en las diferentes resoluciones temporales.

5.5 Tablas de contingencia en diferentes escalas temporales

Las tablas de contingencia, al ser una comparación binaria, nos permiten identificar la cantidad de eventos en los que coinciden los pronósticos con las observaciones. Por lo tanto, entre mayor sea la coincidencia entre ambos conjuntos de datos para eventos de lluvia y eventos secos, el rendimiento del modelo será mejor. Usando los escalares que relacionan los parámetros de la tabla de contingencia (PC, Bias, FAR y POD) se puede evaluar el desempeño del modelo en términos de ocurrencia de eventos de precipitación. Para este estudio se definió el percentil 5 en cada conjunto de datos particular para determinar si un evento se considera como un evento de precipitación o un evento seco. De esta manera, las magnitudes de los eventos que fueran iguales o mayores al percentil 5 se consideran como eventos de precipitación, mientras que si la magnitud del evento es menor al percentil 5 se considera como un evento seco.

En las Tablas 3, 4, 5 y 6 se aprecian tres patrones a medida que se aumenta la escala temporal de los acumulados de precipitación. El escalar PC indica el porcentaje en el que el modelo coincide con las observaciones, tanto en eventos lluvia como en eventos secos. Con la metodología F1 se alcanzan valores para ambos municipios de 86% y 83% en el D1 y D2, respectivamente. Con la metodología F2, los valores en el D1 son 83% y 82% en Sonsón y Rionegro, respectivamente. El escalar Bias representa el sub-pronóstico o sobre-pronóstico de la cantidad de eventos de precipitación. En todos los casos, el modelo WRF indica que existen más eventos de lluvia de lo que ocurrieron en las observaciones. Cuando los acumulados son a una escala temporal mayor, el sobre-pronóstico es menor, alcanzando magnitudes de 11% en todos los casos de los acumulados diarios. El escalar FAR representa el porcentaje de casos en los que el modelo pronostica eventos de lluvia cuando las observaciones no lo indicaron (Falsas Alarmas).

Cuando se aumenta la escala temporal, el índice se reduce, obteniendo valores mínimos para los acumulados diarios que fluctúan entre 12% y 15%. El escalar POD indica la probabilidad de coincidencia del modelo con las observaciones en eventos de lluvia. En el D1 de pronósticos, la probabilidad de detectar eventos de lluvia de las observaciones aumenta cuando se aumenta la escala temporal, alcanzando porcentajes en los acumulados diarios de 97% en F1 y 96% en F2 en el píxel individual y el promedio espacial, respectivamente. En Rionegro, también se obtienen valores de 97% en F1 y 96% en F2 en los acumulados diarios del píxel, pero en el promedio espacial F2 se reduce al 95%.

La escala temporal diaria fue la que mejor se desempeñó según la tabla de contingencia, principalmente porque la relación FAR/POD obtuvo los valores menores, con una magnitud promedio de 0,14 para todos los casos de esta resolución temporal. Además, a esta escala temporal se obtuvieron los mejores resultados para los índices Bias y PC. Según el modelo de persistencia, analizado en acumulados diarios del D1, la diferencia entre las magnitudes de los escalares no es considerable; sin embargo, las relaciones de FAR/POD y POD/FAR muestran un aumento sustancial que implica que el modelo puede detectar los días con lluvia mejor que el modelo de persistencia. En este caso, nuevamente F1 superó a F2, a excepción de las tablas de contingencia del D2 en el municipio de Sonsón (Tabla 5).

Tabla 3. Parámetros y escalares de la tabla de contingencia en las diferentes resoluciones temporales del municipio de Sonsón y resultados del modelo de persistencia en la F1 y F2 en el D1 de pronóstico.

	n	A	B	C	D	PC	Bias	FAR	POD	FAR/POD	POD/FAR
Pix H1	13998	3566	7233	497	2710	0.448	2.658	0.67	0.878	0.763	1.31
Pix H3	4563	1777	2121	138	529	0.505	2.036	0.544	0.928	0.586	1.706
Pix H6	2246	1197	842	53	155	0.602	1.631	0.413	0.958	0.431	2.32
Pix H12	1138	755	302	28	53	0.71	1.35	0.286	0.964	0.297	3.371
Pix D F1	517	429	62	13	13	0.855	1.111	0.126	0.971	0.13	7.706
Pix per F1	518	422	70	19	7	0.828	1.116	0.142	0.957	0.148	6.739
Pix D F2	560	455	73	19	13	0.836	1.114	0.138	0.96	0.144	6.957
Pix per F2	546	439	74	25	8	0.819	1.106	0.144	0.946	0.152	6.569
Pro H1	13996	3831	8436	232	1507	0.381	3.019	0.688	0.943	0.73	1.371
Pro H3	4563	1846	2320	69	330	0.477	2.175	0.557	0.964	0.578	1.731
Pro H6	2247	1211	891	39	106	0.586	1.682	0.424	0.969	0.438	2.285
Pro H12	1138	758	317	25	38	0.699	1.373	0.295	0.968	0.305	3.281
Pro D F1	517	430	61	12	14	0.859	1.111	0.124	0.973	0.127	7.847
Pro per F1	518	422	70	19	7	0.828	1.116	0.142	0.957	0.148	6.739
Pro D F2	560	456	76	18	10	0.832	1.122	0.143	0.962	0.149	6.727
Pro per F2	546	442	75	22	7	0.822	1.114	0.145	0.953	0.152	6.572

Tabla 4. Parámetros y escalares de la tabla de contingencia en las diferentes resoluciones temporales del municipio de Rionegro y resultados del modelo de persistencia en la F1 y F2 en el D1 de pronóstico.

	n	A	B	C	D	PC	Bias	FAR	POD	FAR/POD	POD/FAR
Pix H1	11706	2235	6332	414	2725	0.424	3.234	0.739	0.844	0.876	1.142
Pix H3	3833	1280	1889	132	532	0.473	2.244	0.596	0.907	0.657	1.522
Pix H6	1881	929	754	60	138	0.567	1.702	0.448	0.939	0.477	2.096
Pix H12	950	593	286	36	35	0.661	1.397	0.325	0.943	0.345	2.902
Pix D F1	417	349	50	10	8	0.856	1.111	0.125	0.972	0.129	7.776
Pix per F1	419	350	52	14	3	0.842	1.104	0.129	0.962	0.134	7.457
Pix D F2	461	373	65	18	5	0.82	1.12	0.148	0.954	0.155	6.446
Pix per F2	454	365	69	16	4	0.813	1.139	0.159	0.958	0.166	6.025
Pro H1	11704	2444	7288	205	1769	0.36	3.674	0.749	0.923	0.811	1.232
Pro H3	3833	1340	2046	72	375	0.447	2.398	0.604	0.949	0.636	1.571
Pro H6	1138	758	317	25	38	0.699	1.373	0.295	0.968	0.305	3.281
Pro H12	950	599	289	30	32	0.664	1.412	0.325	0.952	0.341	2.929
Pro D F1	417	349	49	10	9	0.859	1.109	0.123	0.972	0.127	7.902
Pro per F1	419	349	52	15	3	0.84	1.102	0.13	0.959	0.136	7.377
Pro D F2	461	372	65	19	5	0.818	1.118	0.149	0.951	0.157	6.383
Pro per F2	454	364	69	17	4	0.811	1.136	0.159	0.955	0.166	6.006

Tabla 5. *Parámetros y escalares de la tabla de contingencia en las diferentes resoluciones temporales del municipio de Sonsón en el D2 de pronóstico.*

	n	A	B	C	D	PC	Bias	FAR	POD	FAR/POD	POD/FAR
Pix H1	10510	2191	5532	459	2328	0.43	2.914	0.716	0.827	0.866	1.155
Pix H3	2899	944	1423	110	422	0.471	2.246	0.601	0.896	0.671	1.491
Pix H6	1159	572	479	36	72	0.556	1.729	0.456	0.941	0.485	2.064
Pix H12	577	307	222	25	23	0.572	1.593	0.42	0.925	0.454	2.202
Pix D F1	517	421	66	21	9	0.832	1.102	0.136	0.952	0.143	7.0
Pix D F2	560	454	72	20	14	0.836	1.11	0.137	0.958	0.143	6.993
Pro H1	10510	2399	6347	251	1513	0.372	3.3	0.726	0.905	0.802	1.247
Pro H3	2899	984	1560	70	285	0.438	2.414	0.613	0.934	0.656	1.524
Pro H6	1159	586	502	22	49	0.548	1.789	0.461	0.964	0.478	2.091
Pro H12	577	313	228	19	17	0.572	1.63	0.421	0.943	0.446	2.24
Pro D F1	517	422	67	20	8	0.832	1.106	0.137	0.955	0.143	6.971
Pro D F2	560	456	73	18	13	0.838	1.116	0.138	0.962	0.143	6.971

Tabla 6. *Parámetros y escalares de la tabla de contingencia en las diferentes resoluciones temporales del municipio de Rionegro en el D2 de pronóstico.*

	n	A	B	C	D	PC	Bias	FAR	POD	FAR/POD	POD/FAR
Pix H1	8793	1378	4864	343	2208	0.408	3.627	0.779	0.801	0.973	1.028
Pix H3	2438	669	1280	93	396	0.437	2.558	0.657	0.878	0.748	1.336
Pix H6	976	444	419	47	66	0.523	1.758	0.486	0.904	0.538	1.86
Pix H12	483	272	174	18	19	0.602	1.538	0.39	0.938	0.416	2.405
Pix D F1	417	345	54	14	4	0.837	1.111	0.135	0.961	0.14	7.119
Pix D F2	461	375	63	16	7	0.829	1.12	0.144	0.959	0.15	6.66
Pro H1	8793	1517	5498	204	1574	0.352	4.076	0.784	0.881	0.89	1.124
Pro H3	2438	697	1384	65	292	0.406	2.731	0.665	0.915	0.727	1.376
Pro H6	976	457	438	34	47	0.516	1.823	0.489	0.931	0.525	1.904
Pro H12	483	275	176	15	17	0.605	1.555	0.39	0.948	0.411	2.431
Pro D F1	417	344	54	15	4	0.835	1.109	0.136	0.958	0.142	7.044
Pro D F2	461	374	64	17	6	0.824	1.12	0.146	0.957	0.153	6.555

5.6 Tabla de contingencia comparativa de eventos fuertes de precipitación según las observaciones

Este Trabajo de Grado tuvo el propósito de entender los errores generados por el pronóstico WRF de diferentes maneras. En particular, se buscó analizar cómo el modelo representa las tormentas intensas cuando estas se presentan en las observaciones, así como cuando estas son simuladas por WRF. Para estos dos últimos análisis se usaron los acumulados diarios con la metodología F1.

Las Tablas 7 y 8 muestran las tablas de contingencia para eventos de tormentas intensas según las observaciones. Para establecer que un evento es una tormenta intensa se definió un nivel a partir del percentil 90 de cada conjunto de datos observado. Cuando un evento supera el percentil 90 se categoriza como un evento fuerte de precipitación y se separan las fechas en las que esto ocurre, de las cuales se obtiene el conjunto de datos analizado. En este conjunto de fechas se analizan en los pronósticos 4 percentiles: 5; 33,4; 67,4 y 90. De esta manera, se pretendió comparar si el evento pronosticado pertenecía al igual que las observaciones al percentil 90. En este caso, los parámetros B y D son cero porque todos los eventos observados pertenecen a eventos de precipitación (ver sección 5.3), y por lo tanto el índice FAR no entrega mucha información debido a que B es cero (ver ecuación 10).

Analizando el índice Bias de las Tablas 7 y 8, se ve claramente que hay sub-pronóstico ya que este índice es menor a 1 en la mayoría de los casos, a excepción del percentil 90 del promedio espacial en el D2 en el municipio de Sonsón con sobre-pronóstico de 3%. Es decir que, la mayoría de las veces, WRF no pronostica la cantidad de tormentas intensas que se observan en ambos municipios. Tanto los índices PC como POD disminuyen cuando la categoría del percentil aumenta en magnitud, pasando en promedio de 0,59 en el percentil 5 a 0,07 en el percentil 90 en el municipio de Sonsón. En el municipio de Rionegro ambos índices pasan de 0,63 en el percentil 5 a 0,11 en el percentil 90.

Tabla 7. Tabla de contingencia de eventos fuertes de precipitación según las observaciones de Sonsón. Las columnas representan los escalares y parámetros, y las filas muestran el píxel individual y el promedio espacial en el D1 y D2 evaluados en los diferentes percentiles de los pronósticos.

		n	A	B	C	D	PC	Bias	FAR	POD	FAR/POD
Pix D1	5	68	46	0	22	0	0.676	0.676	0.0	0.676	0.0
	33,4	68	40	0	28	0	0.588	0.588	0.0	0.588	0.0
	67,4	68	22	0	46	0	0.324	0.324	0.0	0.324	0.0
	90	68	4	0	64	0	0.059	0.059	0.0	0.059	0.0
Pro D1	5	68	46	0	22	0	0.676	0.676	0.0	0.676	0.0
	33,4	68	41	0	27	0	0.603	0.603	0.0	0.603	0.0
	67,4	68	21	0	47	0	0.309	0.309	0.0	0.309	0.0
	90	68	4	0	64	0	0.059	0.059	0.0	0.059	0.0
Pix D2	5	68	45	0	23	0	0.662	0.662	0.0	0.662	0.0
	33,4	68	31	0	37	0	0.456	0.456	0.0	0.456	0.0
	67,4	68	16	0	52	0	0.235	0.235	0.0	0.235	0.0
	90	68	3	0	65	0	0.044	0.044	0.0	0.044	0.0
Pro D2	5	68	45	0	23	0	0.662	0.662	0.0	0.662	0.0
	33,4	68	29	0	39	0	0.426	0.426	0.0	0.426	0.0
	67,4	68	20	0	48	0	0.294	0.294	0.0	0.294	0.0
	90	68	7	0	61	0	0.103	0.103	0.0	0.103	0.0

Tabla 8. Tabla de contingencia de eventos fuertes de precipitación según las observaciones de Rionegro. Las columnas representan los escalares y parámetros y las filas muestran el píxel individual y el promedio espacial en el D1 y D2 evaluados en los diferentes percentiles de los pronósticos.

		n	A	B	C	D	PC	Bias	FAR	POD	FAR/POD
Pix D1	5	57	36	0	21	0	0.632	0.632	0.0	0.632	0.0
	33,4	57	32	0	25	0	0.561	0.561	0.0	0.561	0.0
	67,4	57	21	0	36	0	0.368	0.368	0.0	0.368	0.0
	90	57	9	0	48	0	0.158	0.158	0.0	0.158	0.0
Pro D1	5	57	37	0	20	0	0.649	0.649	0.0	0.649	0.0
	33,4	57	33	0	24	0	0.579	0.579	0.0	0.579	0.0
	67,4	57	22	0	35	0	0.386	0.386	0.0	0.386	0.0
	90	57	12	0	45	0	0.211	0.211	0.0	0.211	0.0
Pix D2	5	57	35	0	22	0	0.614	0.614	0.0	0.614	0.0
	33,4	57	32	0	25	0	0.561	0.561	0.0	0.561	0.0
	67,4	57	20	0	37	0	0.351	0.351	0.0	0.351	0.0
	90	57	1	0	56	0	0.018	0.018	0.0	0.018	0.0
Pro D2	5	57	35	0	22	0	0.614	0.614	0.0	0.614	0.0
	33,4	57	32	0	25	0	0.561	0.561	0.0	0.561	0.0
	67,4	57	18	0	39	0	0.316	0.316	0.0	0.316	0.0
	90	57	3	0	54	0	0.053	0.053	0.0	0.053	0.0

5.7 Tabla de contingencia comparativa de eventos fuertes de precipitación según los pronósticos

En las Tablas 9 y 10 se observan los valores de los parámetros y escalares de las tablas de contingencia para eventos de tormentas intensas según los pronósticos. En este último análisis se establece que un evento pronosticado es una tormenta intensa cuando la magnitud del evento de precipitación supera el percentil 90 de cada conjunto de datos individual. Para cada una de las series de tiempo se obtuvieron las fechas de los eventos que superan en magnitud el percentil 90. De cada conjunto de datos clasificado se categorizaron las observaciones en 4 percentiles: 5; 33,4; 67,4 y 90. Posteriormente, se analiza si los eventos de tormentas intensas de los pronósticos corresponden a eventos fuertes de las observaciones. En este caso, los parámetros C y D son cero porque todos los eventos pronosticados pertenecen a eventos de precipitación (ver sección 5.3) y, por lo tanto, el índice POD no suministra mucha información debido a que C es cero (ver ecuación 8).

A diferencia del análisis anterior, el índice Bias es mayor a 1 en todos los casos de estudio. Un índice Bias mayor a 1 indica sobre-pronóstico, es decir que solo una fracción de los eventos que WRF considera como tormentas intensas, en las observaciones también se registraron como un evento fuerte. En la mayoría de los casos de estudio, el sobre-pronóstico aumenta a medida que los eventos se categorizan en un percentil con magnitud mayor. Por ejemplo en el píxel individual del D1 en el municipio de Sonsón, el índice Bias pasa de 1,27 en el percentil 5, a 14,0 en el percentil 90. El mayor sobre-pronóstico se presenta en el percentil 90 del píxel individual en el D2 de pronóstico, con una magnitud de 18,67 en Sonsón y 56,0 en Rionegro. Al igual que en el análisis anterior, el índice PC disminuye cuando la categoría del percentil aumenta en magnitud, pasando en promedio de 80% a 8% en Sonsón mientras que en el municipio de Rionegro pasó del 71% al 11%. Esto es opuesto al índice FAR, que aumenta a medida que el percentil aumenta en magnitud, pasando de 18,7% a 91,9% en Sonsón y de 29% a 88% en Rionegro.

Tabla 9. Tabla de contingencia de eventos fuertes de precipitación según los pronósticos de Sonsón. Las columnas representan los escalares y parámetros y las filas muestran el píxel individual y el promedio espacial en el D1 y D2 evaluados en los diferentes percentiles de las observaciones.

		n	A	B	C	D	PC	Bias	FAR	POD	FAR/POD	POD/FAR
Pix D1	5	56	44	12	0	0	0.786	1.273	0.214	1.0	0.214	4.673
	33,4	56	35	21	0	0	0.625	1.6	0.375	1.0	0.375	2.667
	67,4	56	19	37	0	0	0.339	2.947	0.661	1.0	0.661	1.513
	90	56	4	52	0	0	0.071	14.0	0.929	1.0	0.929	1.076
Pro D1	5	56	45	11	0	0	0.804	1.244	0.196	1.0	0.196	5.102
	33,4	56	40	16	0	0	0.714	1.4	0.286	1.0	0.286	3.497
	67,4	56	19	37	0	0	0.339	2.947	0.661	1.0	0.661	1.513
	90	56	4	52	0	0	0.071	14.0	0.929	1.0	0.929	1.076
Pix D2	5	56	46	10	0	0	0.821	1.217	0.179	1.0	0.179	5.587
	33,4	56	32	24	0	0	0.571	1.75	0.429	1.0	0.429	2.331
	67,4	56	16	40	0	0	0.286	3.5	0.714	1.0	0.714	1.401
	90	56	3	53	0	0	0.054	18.667	0.946	1.0	0.946	1.057
Pro D2	5	56	47	9	0	0	0.839	1.191	0.161	1.0	0.161	6.211
	33,4	56	34	22	0	0	0.607	1.647	0.393	1.0	0.393	2.545
	67,4	56	18	38	0	0	0.321	3.111	0.679	1.0	0.679	1.473
	90	56	7	49	0	0	0.125	8.0	0.875	1.0	0.875	1.143

Tabla 10. Tabla de contingencia de eventos fuertes de precipitación según los pronósticos de Rionegro. Las columnas representan los escalares y parámetros y las filas muestran el píxel individual y el promedio espacial en el D1 y D2 evaluados en los diferentes percentiles de las observaciones.

		n	A	B	C	D	PC	Bias	FAR	POD	FAR/POD	POD/FAR
Pix D1	5	56	43	13	0	0	0.768	1.302	0.232	1.0	0.232	4.31
	33,4	56	34	22	0	0	0.607	1.647	0.393	1.0	0.393	2.545
	67,4	56	18	38	0	0	0.321	3.111	0.679	1.0	0.679	1.473
	90	56	9	47	0	0	0.161	6.222	0.839	1.0	0.839	1.192
Pro D1	5	56	45	11	0	0	0.804	1.244	0.196	1.0	0.196	5.102
	33,4	56	36	20	0	0	0.643	1.556	0.357	1.0	0.357	2.801
	67,4	56	23	33	0	0	0.411	2.435	0.589	1.0	0.589	1.698
	90	56	12	44	0	0	0.214	4.667	0.786	1.0	0.786	1.272
Pix D2	5	56	35	21	0	0	0.625	1.6	0.375	1.0	0.375	2.667
	33,4	56	21	35	0	0	0.375	2.667	0.625	1.0	0.625	1.6
	67,4	56	10	46	0	0	0.179	5.6	0.821	1.0	0.821	1.218
	90	56	1	55	0	0	0.018	56.0	0.982	1.0	0.982	1.018
Pro D2	5	56	36	20	0	0	0.643	1.556	0.357	1.0	0.357	2.801
	33,4	56	24	32	0	0	0.429	2.333	0.571	1.0	0.571	1.751
	67,4	56	12	44	0	0	0.214	4.667	0.786	1.0	0.786	1.272
	90	56	3	53	0	0	0.054	18.667	0.946	1.0	0.946	1.057

6. Discusión y conclusiones

Los pronósticos a partir de simulaciones de modelos numéricos como WRF traen consigo sesgos por la discretización, las parametrizaciones, los valores de frontera, la sensibilidad a las condiciones iniciales, entre otros aspectos que hacen que el modelo no represente perfectamente la precipitación en ambos municipios. Este Trabajo de Grado buscó comprender y cuantificar el desempeño del modelo WRF pronosticando la precipitación en los municipios de Sonsón y Rionegro, en el oriente del departamento de Antioquia, validando el modelo con observaciones *in situ* suministradas por SIATA. El modelo sobreestima la precipitación, lo que se ve claramente en las series de tiempo (ver Figuras 5 y 6), puesto que en muchos casos la cantidad de precipitación simulada era el doble de la observada. También se identifica una sobreestimación al comparar los ciclos medios diurnos simulados con los observados, pues, además de sobreestimar la precipitación horaria, las simulaciones indicaron precipitación durante más horas del día que las observaciones. A diferencia de las observaciones que situaban la precipitación entre las 5:00 p.m y las 2:00 a.m, los pronósticos indican presencia de lluvia desde las 11:00 a.m hasta las 4:00 a.m, principalmente en los meses de marzo, agosto y octubre en ambos municipios. Sonsón y Rionegro presentan ciclos medios diurnos con precipitación nocturna (ver Figura 8). Este tipo de comportamiento suele ser un reto para los modelos numéricos, aun así, WRF fue capaz de simular el comportamiento promedio de la lluvia durante todo año en ambos municipios.

En los diferentes casos de estudio se obtuvo sobreestimación de la precipitación pronosticada, según las métricas RMSE y ME. Para ambas se encontraron mayores magnitudes de error en la noche y la madrugada, para las que los pronósticos y las observaciones indicaron mayor precipitación, y menor error en las horas de la mañana, cuando tanto el modelo como los pronósticos coinciden con menor precipitación; por lo tanto, para ambos municipios podemos tener más certeza de la precipitación simulada en las horas de la mañana, cuando en general, las precipitaciones suelen ser menores.

WRF confirma en este estudio el hecho de que la topografía compleja es un reto para los pronósticos meteorológicos. Por ejemplo, los pronósticos para Sonsón, que se ubica en una ladera de la cordillera central, sobreestiman la precipitación en una mayor medida que para Rionegro,

alcanzando en muchas más ocasiones un RMSE de 4 mm/hr. Según las métricas normalizadas (nRMSE y nME), el mayor peso se ubica en las horas del día, cuando la distribución de los pronósticos de precipitación promedio en los ciclos medios diurnos difieren de la distribución de las observaciones (ver Figuras 7 y 8).

La relación entre los conjuntos de datos fue mayor con el estadístico de Spearman que con la correlación de Pearson, principalmente en los acumulados cada 6 horas, cada 12 horas y diarios. Aunque no se tuvo relaciones fuertes entre ninguno de los casos comparados, se observó un aumento de la correlación en estos estadísticos a medida que se consideraban escalas temporales mayores, por ejemplo el promedio mensual del promedio espacial del municipio de Rionegro en el D1 en la correlación de Spearman, pasó de 0,17 a 0,27 de los acumulados horarios a los acumulados diarios, teniendo un aumento en la correlación. Por otra parte, los meses donde hubo mejor desempeño del modelo según las correlaciones fueron julio y agosto, que corresponden a la temporada seca en ambos municipios, cuando se espera menor precipitación. Los valores típicos de estos meses se observaron entre los rangos de 0,20 a 0,40 en la mayoría de los casos. Este es un avance importante en la validación del modelo WRF porque para futuros estudios se puede comprobar otro tipo de relaciones que permitan ajustar el modelo.

Según las tablas de contingencia en las escalas temporales de los acumulados cada 6 horas, cada 12 horas y diarios también se encontró un mejor desempeño del modelo respecto a las escalas temporales horarias y cada 3 horas. La ocurrencia de tormentas intensas según las observaciones fueron un reto para el modelo. En el conjunto de fechas donde las observaciones del SIATA indican precipitación por encima del percentil 90, los pronósticos de WRF presentaban magnitudes de precipitación que principalmente se ubican en el percentil 5 y percentil 33,4. Análogamente, se encontró que las fechas donde las magnitudes de los pronósticos se ubican en el percentil 90, las magnitudes de las observaciones se ubican principalmente en los percentiles 5 y 33,4.

Ambas metodologías F1 y F2, usadas en los acumulados diarios obtuvieron muy buenos resultados en la mayoría de los casos; sin embargo, al comparar entre las metodologías de acumulación diaria F1 y F2, se identifica que los acumulados en F1 logran representar

sustancialmente mejor lo observado por SIATA para la región. En cuanto a la persistencia, los acumulados diarios en F1 y F2 por lo general superaron los estimados del modelo de persistencia la mayor parte del periodo de estudio, aunque en pequeña magnitud. Por ejemplo, el promedio mensual de la correlación de Pearson en el promedio espacial del municipio de Sonsón tuvo valores en F1 y F2 de 0,13 y 0,08, mientras que la persistencia en F1 y F2 obtuvo magnitudes de 0,02 y -0,01 respectivamente.

Por último, es importante aclarar que las observaciones no son una representación exacta de la realidad pero asumimos que pueden representar la ocurrencia de eventos de precipitación en su respectivo municipio; así, la incertidumbre en las observaciones es un factor adicional a tener en cuenta evaluando los modelos. Es necesario evaluar el modelo en diferentes regiones, y comprender de ese modo cómo es el comportamiento del sesgo de sus pronósticos; en principio, ese será el primer paso para ajustar el modelo a nuestra región tropical Andina.

Referencias

- Acheson, D. J. (1990). *Elementary Fluid Dynamics*. United States of America, New York, Oxford University Press. 383. pp 334-341
- 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*, 05(01). <https://doi.org/10.18259/acs.2015021>
- 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. Retrieved Nov 28, 2022, from https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/14/2/1520-0434_1999_014_0137_eomaep_2_0_co_2.xml
- CORNARE. (2012a). Evaluación y zonificación de riesgos por avenida torrencial, inundación y movimiento en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el municipio de Rionegro. <https://www.cornare.gov.co/GestionRiesgo/RIONEGRO/Informe-Rionegro.pdf>
- Dirección de Censos y Demografía (DANE). (2022). Retroproyecciones y proyecciones de población. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
- Estupiñan, A. (2016). Estudio de la variabilidad espacio temporal de la precipitación en Colombia -. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/54014/>
- Gal-Chen, T., & Somerville, R. C. (1975). On the use of a coordinate transformation for the solution of the Navier-Stokes equations. *Journal of Computational Physics*, 17(2), 209-228.
- Gálvez, J. M., & Douglas, M. W. (2006). Modulation of rainfall by lake titicaca using the WRF model. In *Proceedings of* (Vol. 8, pp. 24-28).
- Gomez-Rios, S., Zuluaga, M. D., & Hoyos, C. D. (2022). Orographic Controls over Convection in an Inter-Andean Valley in Northern South America., *Monthly Weather Review* (published online ahead of print 2022). Retrieved Dec 14, 2022, from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/aop/MWR-D-21-0231.1/MWR-D-21-0231.1.xml>
- Henao, J., Loaiza, M., Arroyave, R., Osorio, Y., & Álvarez, M. (s.f). Perfil de Desarrollo Subregional Subregión Oriente de Antioquia. <https://ctpantioquia.co/wp-content/uploads/2021/09/Perfil-de-desarrollo-Oriente.pdf>
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edited by V. MassonDelmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu & B. Zhou]. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf

- 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.
- Kalnay, E. (2002). Atmospheric modeling, data assimilation and predictability. United States of America, New York, Cambridge University Press. 368.pp 1-204
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic Nonperiodic Flow, *Journal of Atmospheric Sciences*, 20(2), 130-141. Retrieved Dec 4, 2022, from https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/20/2/1520-0469_1963_020_0130_dnf_2_0_co_2.xml
- Nicholls, Z., Meinshausen, M., Lewis, J., Smith, C. J., Forster, P. M., Fuglestedt, J. S., et al. (2022). Changes in IPCC scenario assessment emulators between SR1.5 and AR6 unraveled. *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL099788. <https://doi.org/10.1029/2022GL099788>
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 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. Recuperado el 15 de julio de 2022 de <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). Recuperado 21 de agosto de 2022, de <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/228>
- Ruiz, J., Arango, C., Kilpinen, J. IDEAM, Fondo Monetario Internacional (FMI).(s.f.). Verificación del modelo WFR que opera en el IDEAM. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21132/VerificacionWRF.pdf>
- Sebastian K., H., Martinez, R., Peter M., Holm, Jorgensen, Sao Jose dos, & Tiessen, C. (2012). Climate change and biodiversity in the tropical Andes. *Mountain Research and Development*, 32(2), 258+. <https://link.gale.com/apps/doc/A356908652/AONE?u=anon~2d801c83&sid=googleScholar&xid=065b4c30>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., ... Huang, X. -yu. (2021). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3 (No. NCAR/TN-556+STR). doi:10.5065/1dfh-6p97
- 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>
- Vogel, P., Knippertz, P., Gneiting, T., Fink, A. H., Klar, M., & Schlueter, A. (2021). Statistical forecasts for the occurrence of precipitation outperform global models over northern tropical Africa. *Geophysical Research Letters*, 48(3), e2020GL091022.

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. 10.1016/S1001-6058(06)60138-8.

Warner, T. T. (2011). *Numerical weather and climate prediction.* United States of America, New York, Cambridge University Press. 550.pp 1.

