



**Análisis de la variabilidad espaciotemporal de la precipitación en Colombia usando el  
modelo WRF**

Daniela Gómez Correa

Ingeniera Ambiental

Asesora

Angela María Rendón Pérez, Doctora (PhD) en Ingeniería Ambiental

Asesor interno

Juan Fernando Salazar, Doctor (PhD) en Recursos Hidráulicos

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Escuela Ambiental

Ingeniería Ambiental

Medellín

2024

<b>Cita</b>	(Gómez-Correa, 2024)
<b>Referencia</b>	(Gómez-Correa, 2024). <i>Análisis espaciotemporal de la precipitación asociada a Sistemas Convectivos de Mesoescala sobre Colombia. [Trabajo de grado]. Universidad de Antioquia, Medellín.</i>
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	



Grupo de Investigación Geolimna.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

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.

*Dedicado a mi querida abuela que me apoyó siempre  
y partió en medio de la realización de este trabajo.*

*¡Gracias eternas!*

## **Agradecimientos**

Primero que todo, quiero agradecer a mi familia y a mis amigos Andrés, Daniela y Karen por todo el apoyo que me brindaron en los momentos más difíciles, no solo durante la realización de este trabajo sino también durante todo mi proceso académico.

Quiero agradecer especialmente a la profesora Ángela Rendón por permitirme participar en este proyecto y enseñarme acerca de estos temas. Los consejos y orientación que me brindó reflejaron tanto su profesionalismo como la calidad humana. También al profesor Juan Fernando Salazar, quien creyó en mí en un primer momento y, a Santiago Hernández por compartir conmigo su investigación.

Extiendo mi gratitud a todos los profesores de la Escuela Ambiental que han marcado significativamente mi proceso académico y a Guillermo por su ayuda y orientación en todo lo relacionado a los temas administrativos.

Por supuesto, también quiero agradecer a Adriana quien, desde el programa de bienestar de la facultad, me brindo un bonito espacio de ayuda y reflexión.

## Tabla de contenido

Tabla de contenido.....	5
Lista de figuras .....	6
Lista de tablas .....	6
Resumen .....	7
Abstract.....	8
1. Introducción.....	9
2. Objetivos.....	12
2.1. Objetivo general .....	12
2.2. Objetivos específicos .....	12
3. Marco teórico.....	13
4. Metodología.....	18
4.1. Área de estudio .....	18
4.1.1. Pacífico .....	19
4.1.2. Llanos .....	19
4.1.3. Amazonas .....	19
4.1.4. Ándes .....	19
4.1.5. Caribe .....	20
4.2. Datos y métodos .....	20
5. Resultados.....	22
5.1. Variabilidad espacial .....	22
5.2. Ciclo anual.....	23
5.3. Ciclo diurno .....	25
Discusión y conclusiones .....	30
Referencias .....	32

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Área de estudio con las regiones de interés. Pacífico (rojo), Llanos (verde), Amazonas (amarillo), Andes (morado) y Caribe (azul). Las líneas punteadas son la delimitación de los dominios 1 y 2 usados en la configuración del modelo WRF por Hernandez-Uribe (2023).....	18
<b>Figura 2.</b> Mapa de la precipitación total acumulada en mm en cada temporada de estudio (EF, MA, JA y SO).....	22
<b>Figura 3.</b> Ciclo anual para cada una de las regiones de interés: A) Pacífico (rojo), B) Llanos (verde), C) Amazonas (amarillo), D) Andes (morado) y E) Caribe (azul).....	23
<b>Figura 4.</b> Ciclo diurno representado en una serie de tiempo diurna en hora local para cada una de las regiones por periodo (colores): EF línea azul, MA línea amarilla, JA línea verde y SO línea roja. ....	26
<b>Figura 5.</b> Mapa del ciclo diurno de cada periodo de estudio (EF, MA, JA y SO) en 4 ventanas horarias: madrugada [00-05], mañana [06-11], tarde [12-17] y noche [18-23] todas en hora local. ....	28

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Resumen de la configuración del modelo WRF del experimento de simulación realizado por Hernandez Uribe (2023) .....	21
---	----

## Resumen

Los Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) en el trópico, con frecuencia asociados a precipitaciones severas y tormentas eléctricas, representan amenazas significativas para la vida, la infraestructura, las actividades productivas y la aviación. Múltiples investigaciones han proporcionado información fundamental para comprender los SCM y sus patrones de ocurrencia. El modelo de Investigación y Pronóstico del Tiempo (WRF por sus siglas en inglés) se ha utilizado extensamente para estudiar las dinámicas hidroclimatológicas en el norte de Suramérica, aunque se han identificado limitaciones en sus resoluciones para capturar la convección, lo cual sería crucial para investigar los entornos y mecanismos de la convección profunda y la precipitación en la región. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar los patrones espaciotemporales de la precipitación mediante un experimento de modelación llevado a cabo por Hernandez Uribe (2023), el cual ha demostrado ser eficaz para captar la ocurrencia de SCM, y comparar estos patrones con los hallazgos de investigaciones previas. Se observa que la distribución de la precipitación proporcionada por el modelo coincide con la variabilidad espacial y los ciclos estacionales y diurnos descritos en estudios anteriores. Este estudio representa un avance significativo hacia la simulación de los SCM, lo cual podría tener aplicaciones importantes en sistemas de alerta temprana para la prevención de desastres.

*Palabras clave:* Sistemas Convectivos de Mesoescala, Zona de Convergencia Intertropical, Corriente de Chorro de Bajo, modelo WRF, patrones de precipitación.

## **Abstract**

Mesoscale Convective Systems (MCSs) in the tropics are often associated with severe precipitation events and thunderstorms, posing significant threats to life, infrastructure, productive activities, and aviation. Several studies have provided valuable insights into understanding MCSs and their occurrence patterns. The Weather Research and Forecasting (WRF) model has been widely used to study hydroclimatological dynamics in northern South America, although limitations have been identified in its resolutions to capture convection, which would be crucial for investigating the environments and mechanisms of deep convection and precipitation in the region. In this context, the present study aims to analyze the spatiotemporal patterns of precipitation through a modeling experiment conducted by Hernandez Uribe (2023), which has proven effective in capturing the occurrence of MCSs and compare these patterns with findings from previous research. It is observed that the distribution of precipitation provided by the model aligns with the spatial variability and seasonal and diurnal cycles described in previous studies. This study represents a significant advancement in simulating MCSs, which could have important applications in early warning systems for disaster prevention.

*Keywords:* Mesoscale Convective Systems, Intertropical Convergence Zone, Low-level jet, The Weather Research and Forecasting.



## 1. Introducción

La precipitación en Colombia se da como resultado de múltiples procesos hidroclimáticos actuando en diferentes escalas espaciales y temporales. Entre estos procesos pueden citarse como más relevantes, la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), las Corrientes de Chorro de Bajo Nivel (CCBNs), las ondas del este, los Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) y El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés).

Estos fenómenos modulan en gran medida el viaje de humedad por la atmósfera tropical al norte de Suramérica y, por lo tanto, intervienen en la frecuencia, magnitud e intensidad de los eventos de precipitación que ocurren en el país. En particular, la ZCIT es una franja tropical hacia la que convergen vientos desde medias y altas latitudes hacia el trópico, transportando grandes cantidades de humedad y dando lugar a la formación de nubes de alto desarrollo vertical y, por consiguiente, a tasas de precipitación significativamente altas en comparación con otras regiones. Su migración estacional se da con el hemisferio que se encuentra en verano, dando lugar a la ocurrencia de dos temporadas más lluviosas (marzo-mayo y septiembre-noviembre) y dos más secas (diciembre-febrero y junio-agosto) en el territorio colombiano (Poveda et al., 2006). Así mismo, fenómenos como las CCBN son importantes moduladores regionales de la hidroclimatología del país. Entre estas corrientes están, el CCBN del Chocó, que inyecta grandes cantidades de humedad desde el océano Pacífico colombiano hacia el continente y que se relaciona con la ocurrencia de eventos de precipitación principalmente en el centro y occidente del país, el CCBN de los Llanos que tiene lugar principalmente en la región de los llanos colombo-venezolanos y que modula en gran medida el viaje de humedad atmosférica en esa región y la región amazónica influyendo significativamente en las tasas de precipitación. Las ondas del este son corrientes atmosféricas que impactan la hidroclimatología del norte de América de Sur y el mar Caribe especialmente durante el verano boreal (Giraldo-Cardenas et al., 2022).

Los SCM son estructuras atmosféricas complejas que como su nombre lo indica se forman por procesos convectivos que pueden acabar varios kilómetros, generando tasas de precipitación severa que podrían persistir varias horas. Se han identificado importantes impulsores de su formación, por ejemplo, la ZCIT, las CCBNs, el ascenso orográfico, las brisas océano-continente, entre otras (Mejía et al., 2021; Poveda et al., 2006; Poveda & Mesa,

2000; Sakamoto et al., 2011). Por un lado, estos sistemas hacen parte importante del ciclo hidrológico del país, ya que constituyen un gran porcentaje de la precipitación total sobre el continente. Sin embargo, estos están asociados con eventos de precipitación severa y tormentas eléctricas que amenazan las vidas humanas, el desarrollo de la agricultura, la infraestructura e incluso la seguridad aérea (Schumacher & Rasmussen, 2020). Por ejemplo, eventos extremos de precipitación asociados a la ocurrencia de SCM han causado tragedias como las de Salgar en el 2015 (Hoyos et al., 2019) y Mocoa en el 2017 (Martinez et al., 2021), debido al desbordamiento de cuerpos fluviales aledaños al lugar de la emergencia.

Por su parte, el ENSO afecta a las dinámicas de los procesos mencionados por lo que constituye un importante modificador de las tasas de precipitación y es claro que durante su fase negativa o fría (La Niña) las tasas de precipitación sobre el país aumentan (Poveda et al., 2006; Arias et al., 2021), ya que su influencia puede aumentar la actividad de los procesos convectivos (Poveda et al., 2011; Robledo Delgado, 2023). Además, sus impactos adversos representan no solo peligro para la humanidad sino también para la economía del país, por ejemplo, en La Niña 2010-2011 las pérdidas por atención a emergencias, afectaciones a estructuras, daño de cultivos, entre otros, superaron los 6 mil millones de dólares estadounidenses o el 2% del PIB del 2011 (Poveda et al., 2020).

Así, los estudios orientados a entender el comportamiento, formación, movimiento y variabilidad, estacional y diurna de los SCM, son relevantes para desarrollar e implementar herramientas que permitan evaluar su predictibilidad. Modelar y lograr anticiparse a estos eventos es importante para diseñar estrategias de protección y mitigación a posibles futuras emergencias. Distintas metodologías se han empleado en el camino de la modelación, es el caso de Hernandez-Uribe (2023) que, entre otras, evaluó la capacidad del modelo de Investigación y Pronóstico del Tiempo (WRF por sus siglas en inglés) para simular los eventos de precipitación asociados a los SCM sobre Colombia en una escala adecuada para la compleja topografía y dinámicas atmosféricas que tiene lugar sobre el país.

Este trabajo pretende brindar un análisis espaciotemporal de los patrones de precipitación asociados a la ocurrencia de SCM sobre regiones de interés del territorio colombiano, como resultado de un experimento de simulación del modelo WRF usando la configuración propuesta por Hernandez-Uribe (2023). En las secciones siguientes se anuncian los objetivos y el marco teórico para considerar, así como una descripción del área de estudio y la investigación de modelación mencionada. Luego se presentan los resultados

de la lectura de los datos y sus concordancias con estudios previos. Por último, se encuentran las discusiones y conclusiones que el trabajo suscita.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo general**

Estudiar la distribución espaciotemporal de la precipitación asociada a la ocurrencia de sistemas convectivos de mesoescala sobre Colombia

### **2.2. Objetivos específicos**

- Examinar la distribución espacial de la precipitación asociada a la ocurrencia de sistemas convectivos de mesoescala en Colombia
- Examinar el ciclo anual de la precipitación asociada a la ocurrencia de sistemas convectivos de mesoescala en Colombia
- Examinar la distribución de la precipitación en el ciclo diurno asociada a la ocurrencia de sistemas convectivos de mesoescala en Colombia
- Discutir acerca de la variabilidad espaciotemporal de la precipitación asociada con la ocurrencia de sistemas convectivos de mesoescala en Colombia.

### 3. Marco teórico

En el trópico los SCM son responsables de la ocurrencia de la mayoría de los eventos extremos de precipitación, por lo que estos fenómenos atmosféricos tienen una significativa importancia para el ciclo hidrológico en estas regiones (Schumacher & Rasmussen, 2020). Varios estudios muestran que en Colombia los SCM están estrechamente vinculados con la ZCIT y las CCBN, y que además exhiben un claro ciclo estacional y diurno en determinadas regiones (Poveda & Mesa, 2000; Zuluaga & Poveda, 2004; Poveda et al., 2006; Mejía et al., 2021; Sakamoto et al., 2011; Schumacher & Rasmussen, 2020). En Colombia la actividad de los Sistemas Convectivos de Mesoescala representa solo el 1% de la convección organizada (Jaramillo et al., 2017). Sin embargo, en regiones como el Pacífico, el 57 % de la precipitación está asociada con la ocurrencia de estos sistemas (Jaramillo et al., 2017), e incluso, contribuyen aproximadamente en un 70 % de la precipitación en el país (Poveda et al., 2006).

Existen diversos estudios alrededor de los SCM para entender su formación, características e importancia en la hidroclimatología del país. Por ejemplo, Zuluaga & Poveda (2004) clasificaron cuantitativamente, a partir de análisis de datos, el porcentaje de precipitación que representa los SCM sobre el total de los sistemas de tormenta, encontrando un valor del 70%. También identificaron su ciclo estacional y la fuerte influencia de fenómenos de gran escala como el ENSO. Poveda et al. (2006), menciona que la región con mayor actividad de SCM es el Pacífico, pero también se evidencia actividad en el Valle del Magdalena, en la región del Amazonas y el Orinoco. El estudio de Sakamoto et al. (2011) sobre el ciclo de vida y las fuentes de humedad de los SCM ofrece información valiosa sobre la variabilidad espacial, estacional y diurna de estos sistemas, resaltando que espacialmente, estos eventos son más frecuentes en el continente que en el océano, y estacionalmente los eventos son más frecuentes en los periodos del verano y otoño boreal; este último coincide con las máximas velocidades del CCBN del Chocó (Poveda & Mesa, 2000). En estudios más recientes, Gomez-Rios et al. (2023) con simulaciones tanto meteorológicas como de orografía modifica logra establecer una fuerte dependencia de la precipitación con la topografía del valle interandino, dado que este impone control sobre la actividad convectiva de la región.

Por otro lado, Hernandez-Deckers (2022) enfoca su estudio en las diferencias espacio temporales de la convección profunda que ocurre en diferentes regiones del país, tales como, la cuenca del Orinoco, Amazonía, Pacífico y los Andes. Con una metodología de análisis de datos satelitales identifican los eventos convectivos y concluyen que los SCM ocurren más frecuentemente sobre el continente que sobre el océano; resultado que concuerda con otros estudios en la región (Poveda et al., 2006; Jaramillo et al., 2017; Schumacher & Rasmussen, 2020; Mejía et al., 2021). Además, este estudio encuentra que los eventos se distribuyen homogéneamente sobre las llanuras del Orinoco y Amazonas, en contraste con las demás regiones, donde las tasas más altas de eventos ocurren en lugares particulares (“puntos calientes”); esto último, generalmente asociados con ascensos orográficos. Sin embargo, en el flanco este de la cordillera oriental la convección es más uniforme, ya que sugiere que los vientos del este no actúan tan predominantemente como impulsores de la convección profunda. Otros resultados importantes son que sobre el océano Pacífico y los valles medio y medio-bajo del río Magdalena los eventos suelen ser más grandes y de más larga duración y que, sobre las llanuras del Orinoco y Amazonas, aunque los eventos de convección son grandes, suelen durar menos en comparación con los anteriores. En cuanto a la variabilidad estacional resalta que, el periodo de menor actividad de eventos de convección profunda es en el invierno boreal, lo que es consistente con Urrea et al., 2019, y confirma que la migración de la ZCIT juega un papel importante en la activación de los eventos convectivos. En el verano boreal se presenta un segundo mínimo de eventos ya que la convección profunda se registra en determinados lugares, como en el Pacífico. Mientras que, en los periodos de la primavera y otoño boreal la convección está activa en la mayor parte del territorio. Finalmente, el estudio concluye que se presenta un marcado ciclo diurno, con picos en la convección nocturna sobre los océanos, mientras que los picos de convección sobre tierra se presentan en las horas de la tarde, resultado consistente con otros estudios de SCM (Poveda & Mesa, 2000; Poveda et al., 2006; Zuluaga & Poveda, 2004; Sakamoto et al., 2011; Jaramillo et al., 2017; Mejía et al., 2021).

En el estudio de SCM se han empleado diferentes técnicas y metodologías orientadas a explicar sus diferentes características. Por ejemplo, Robledo Delgado (2023) emplea un Algoritmo para el Seguimiento de Sistemas Convectivos (ATRACKCS) desarrollado para estudiar el movimiento y evolución de los SCM. Este algoritmo es

alimentado con datos de temperatura de brillo y precipitación de dos conjuntos de datos de satélite de alta resolución, MERGIR con una resolución espacial de 4km y IMERG con resolución espacial de 0.1° y temporal de 30 minutos (ambas son base de datos producidos por la NASA a partir de datos de satélites), respectivamente. Luego de un análisis exhaustivo y de la evaluación de desempeño del ATRACKCS determinó la ocurrencia, ciclo de vida y movimiento de los SCM y logró establecer que la ocurrencia de La Niña influye en la intensificación de los SCM y que los efectos de El Niño no son concluyentes. Sobre la variabilidad estacional resalta que, en los periodos de diciembre-febrero (DEF) la actividad de los SCM es menor, aunque se encuentran activos en el Pacífico y la región amazónica, en los periodos de junio-julio en el norte de Colombia, Venezuela y la costa pacífica. En los periodos de marzo-mayo (MAM) y septiembre-noviembre (SON) los sistemas están activos en la mayor parte de Colombia.

Por otro lado, con el mismo propósito de entender y proporcionar información valiosa sobre los SCM se han hecho estudios de modelación, tal como, Hernandez-Uribe (2023) quién evaluó la capacidad del modelo WFR para simular la precipitación asociada a estos sistemas. Parte de su investigación consistió hacer un análisis de sensibilidad del modelo con respecto a diferentes esquemas de parametrización de los comportamientos verticales involucrados en la convección como la microfísica (3 esquemas) y la capa límite planetaria (2 esquemas). Para validar la representación de estos esquemas realizó un análisis con datos observados de estaciones meteorológicas del IDEAM (siglas del Instituto de Hidrología y Estudios Ambientales colombiano) y Piragua (sigla de Programa Integral Red Agua, programa social orientado al monitoreo del recurso hídrico operado por Corantioquia y la UdeA), además de datos provenientes de los sondeos OTREC (siglas en inglés de Organización de la Convección en el Pacífico Oriental Tropical para el experimento de radio sondeo realizado en Nuquí, Chocó) (Fuchs-Stone et al., 2020). Además, el autor realiza la validación del modelo para representar los SCM usando un algoritmo de identificación y rastreo de estos sistemas comparando características de los eventos simulados con las características derivadas de satélites, y encontrando una adecuada representación en la ocurrencia estacional y a lo largo del ciclo diario. Aunque en el estudio WRF subestimó el área y sobreestimó la intensidad, las simulaciones captaron la evolución desde su iniciación hasta la disipación de los SCM. En general, el autor encuentra que el modelo subestimo la

ocurrencia de los eventos, pero captura de manera general la estacionalidad y los patrones a lo largo del ciclo diurno.

Varios estudios se han realizado en las últimas décadas en donde se analiza los campos de precipitación sobre la región (Poveda et al., 2006; Durán-Quesada et al., 2012; Espinoza et al., 2020; Urrea et al., 2019; Builes-Jaramillo et al., 2022). En particular, Poveda et al. (2006) describen los patrones de precipitación para diferentes regiones del país y encuentra que la migración de la ZCIT ejerce un fuerte control sobre el ciclo anual de precipitaciones, así pues, los Andes experimentan un ciclo bimodal de la precipitación con picos en abril-mayo y octubre-noviembre, lo que concuerda con los resultados presentados por Urrea et al., 2019, para la región andina central, mientras que el Caribe experimenta un ciclo unimodal de lluvias en mayo-octubre y, un máximo de lluvias en los Llanos en julio-agosto. Este trabajo, también describe las implicaciones sobre el clima de la interacción de la ZCIT con la CCBN del Chocó, encontrando que esta interacción explica parcialmente el pico de lluvias en el Pacífico en octubre-noviembre cuando esta CCBN está fortalecida. Por último, menciona que el Amazona exhibe un ciclo unimodal con una temporada húmeda en diciembre-abril y una temporada seca en junio-octubre.

Builes-Jaramillo et al. (2022) sustenta que el CCBN de los Llanos constituye un mecanismo de transporte de humedad desde el océano Atlántico hacia la cuenca del río Amazonas durante DEF, mientras que la ZCIT lo es para los Llanos colombo-venezolanos en JJA, así, durante el periodo de fortalecimiento de este chorro la precipitación sobre el Amazonas aumenta, mientras que durante el periodo de debilitamiento la precipitación aumenta sobre los Llanos colombo-venezolanos (concuerda con Jiménez-Sánchez et al., 2019).

Estudios como los de Dominguez et al. (2020) sustentan que las ondas del este son producen hasta el 50% de precipitación en el norte de América del Sur especialmente entre mayo-noviembre. Sin embargo, hay factores que afectan a la contribución de esta precipitación, entre las que se destaca, una alta actividad de ciclones tropicales en el océano Atlántico durante una fase neutral del ENSO y una fase positiva de la Oscilación Decadal de Atlántico. El ENSO por su parte, afecta la actividad de las ondas del este.

Los estudios orientados a estudiar los SCM que coincide sobre el claro ciclo diurno que presenta la precipitación asociada a estos eventos con diferencia espacial entre los ocurridos



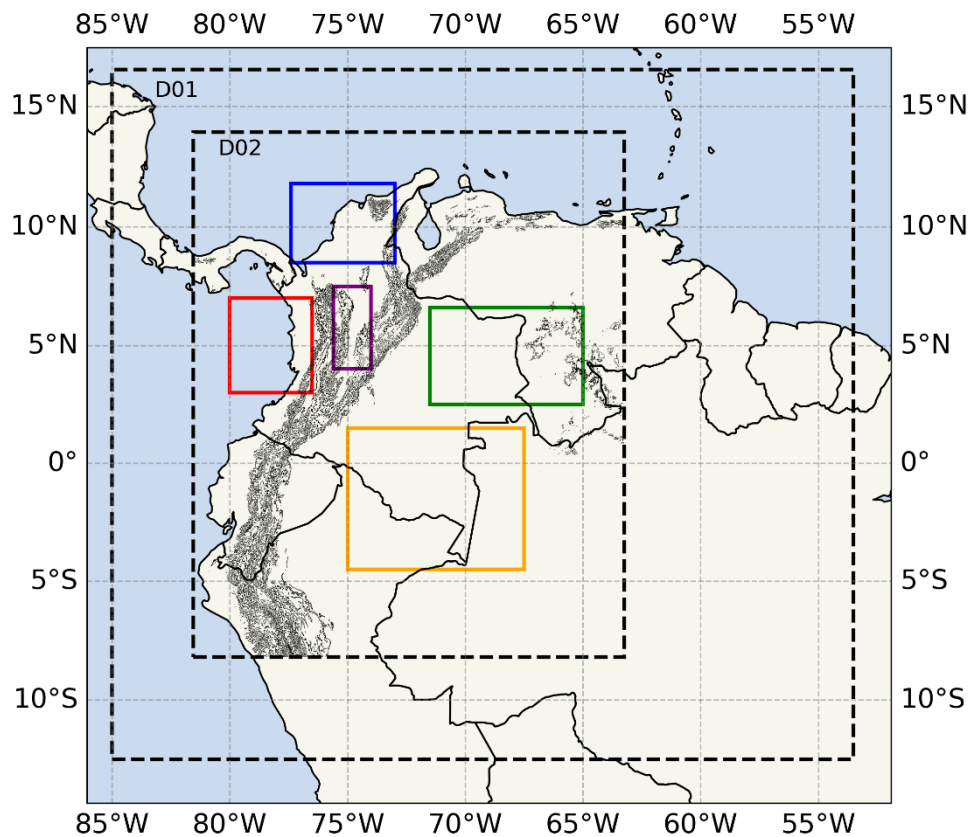
en tierra y los ocurridos en el océano (Poveda & Mesa, 2000; Zuluaga & Poveda, 2004; Jaramillo et al., 2017; Mejía et al., 2021; Schumacher & Rasmussen, 2020; Hernandez-Deckers, 2022). En particular, Jaramillo et al. (2017) indican que sobre el océano Pacífico los eventos ocurren principalmente en la madrugada, mientras que sobre el continente ocurren principalmente en las horas de la tarde. Sin embargo, una particularidad sucede en el valle central del río Magdalena donde su punto máximo de actividad de SCM ocurre en la madrugada.

## 4. Metodología

Para el análisis y caracterización de la precipitación asociada a la ocurrencia de sistemas convectivos de mesoescala se ha seguido el siguiente acercamiento metodológico.

### 4.1. Área de estudio

El área de estudio es el noroeste de Suramérica, particularmente el territorio colombiano. En la Figura 1 se muestra los dominios utilizados en este análisis, seleccionando el dominio 2 para representar los datos obtenidos de precipitación. Adicionalmente, se seleccionaron 5 regiones de interés por considerarse importantes en la hidroclimatología del país y por contar con unos regímenes de precipitación diferentes entre ellas. Estas regiones son:



**Figura 1.** Área de estudio con las regiones de interés. Pacífico (rojo), Llanos (verde), Amazonas (amarillo), Andes (morado) y Caribe (azul). Las líneas punteadas son la delimitación de los dominios 1 y 2 usados en la configuración del modelo WRF por Hernandez-Uribe (2023).

#### **4.1.1. Pacífico**

El Pacífico colombiano es una región de gran interés para el estudio de SCM, ya que allí se encuentra uno de los lugares más lluvioso de la tierra llamado Lloró, Chocó (Poveda & Mesa, 2000). Además de contar con múltiples mecanismos que favorecen la convección, entre los que están las dinámicas de las CCBN del Chocó y del Caribe, la influencia de la brisa terrestre, la advección de humedad océano-continente, la topografía, entre otros (Gomez-Rios et al., 2023; Mejía et al., 2021); hacen que esta región presente una alta actividad de SCM.

La región está conformada por parte de la costa Pacífico colombiana y mayoritariamente por su océano adyacente (el este del océano Pacífico sur). Además, su límite este hace parte del flanco oeste de la cordillera occidental de los Andes.

#### **4.1.2. Llanos**

Los Llanos colombo-venezolanos se encuentra ubicado en la frontera política entre Venezuela y Colombia, al este de esta última. Esta región comprende extensas llanuras de la cuenca del Río Orinoco y al este se encuentra parte de las tierras altas de Guayanas.

#### **4.1.3. Amazonas**

El Amazonas es una región boscosa ubicada al sur del país que comparte frontera política con parte de la cuenca alta del río Amazonas de Perú y Brasil. Los patrones de lluvia de esta región se encuentran modulados especialmente por la ZCIT, los procesos de reciclaje de precipitación en el bosque amazónico y el chorro de los Llanos (Builes-Jaramillo et al., 2022). Grandes cantidades de humedad producto de la evapotranspiración de la selva amazónica son transportadas por la ZCIT hacia el centro del país teniendo gran impacto sobre la hidroclimatología (Poveda et al., 2006; Espinoza et al., 2020).

#### **4.1.4. Andes**

La topografía del país presenta una notable complejidad, en gran parte debido a la presencia de la cordillera de los Andes, la cual atraviesa el territorio nacional dividiéndose en tres ramales. Su importancia socio económica radica en que allí se encuentra concentrada la mayor parte de la población y las principales hidroeléctricas del país. Nuestra región de

estudio se centra en el valle medio del río Magdalena, ubicado entre las cordilleras central y oriental.

#### **4.1.5. Caribe**

El Caribe colombiano es una región de llanuras de baja altitud, territorios costeros e insulares con la particularidad de la existencia de la Sierra Nevada de Santa Marta que constituye un sistema aislado de la cordillera de los Andes. Es una región que depende en gran medida de los ciclos de lluvias para el desarrollo de las actividades socioeconómicas, pero también, es susceptible a eventos hidrometeorológicos extremos, tales como, las inundaciones y las sequías que ponen en riesgo la región (Taylor et al., 2012).

### **4.2. Datos y métodos**

Los análisis se han realizado usando los datos de precipitación proveniente de un experimento de modelación usando la 4ta versión del modelo WRF (Skamarock et al., 2019). WRF es un modelo de circulación regional de última generación desarrollado por el Centro Nacional de Investigación Atmosférica de Estados Unidos (NCAR por sus siglas en inglés). El experimento de modelación se llevó a cabo usando esquemas de parametrización y condiciones iniciales implementadas y evaluadas previamente por Hernandez-Uribe, (2023). Los dominios usados en el experimento se mostraron con anterioridad en la Figura 1 y el resumen de configuración del modelo se muestra en la Tabla 1.

El experimento considera 4 periodos de interés del año 2019 que se resumen así: JF que comprende desde el 5 de enero 00:00 hora local (HL) hasta el 1 de febrero 00:00 HL, MA comprende desde el 26 de marzo 00:00 HL hasta el 21 abril 00:00 HL, JA que comprende desde el 16 de julio 00:00 HL hasta el 11 de agosto 00:00 HL y SO que comprende desde 22 de septiembre 00:00 HL hasta el 17 de octubre 00:00 HL. La selección de los periodos se hizo teniendo en cuenta el ahorro computacional que se tiene con pocos días de simulación, además que estos días es de mayor actividad estacional de los SCM de acuerdo con estudios previos (Hernandez Uribe, 2023).

**Tabla 1.** Resumen de la configuración del modelo WRF del experimento de simulación realizado por Hernandez Uribe (2023)

<b>Parámetro del modelo</b>	<b>Dominio 1</b>	<b>Dominio 2</b>
Tamaño del dominio	292 x 275	511 x 622
Tamaño de la malla	12 km	4 km
Niveles verticales	65	65
Condiciones iniciales	ERA5	ERA5
Condiciones de frontera	ERA5	Dominio 1
<b>Parametrizaciones físicas</b>		
Microfísicas	WSM6	WSM6
Capa Límite Planetaria	YSU	YSU
Cumulus	New Tiedtke	Apagado
Capa superficial	MM5 revisado	MM5 revisado
Superficie terrestre	Noah-MP	Noah-MP
Radiación de onda corta	Dudhia	Dudhia
Radiación de onda larga	RRTM	RRTM

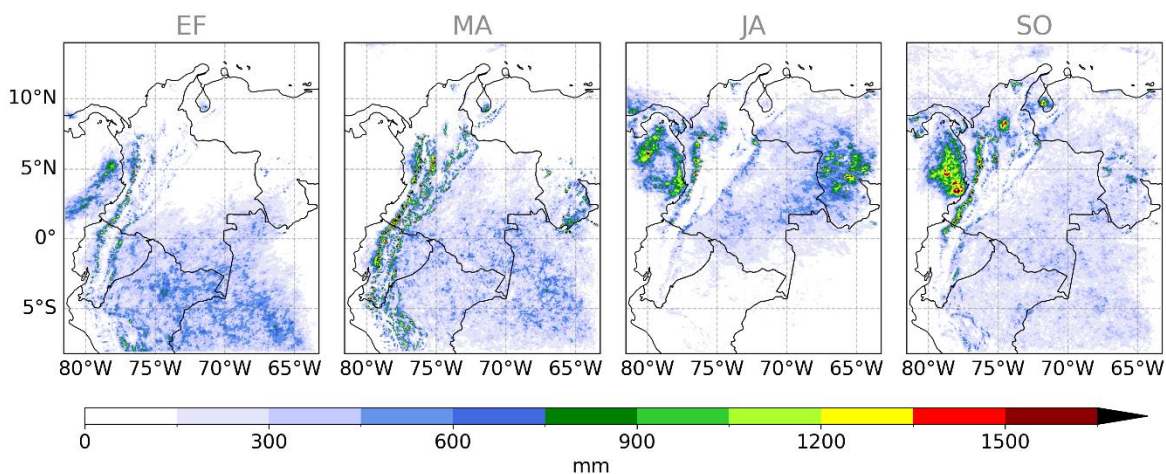
Para analizar la distribución espacial se representaron los datos de precipitación acumulada en mapas del área de estudio (dominio 2) en cada periodo de interés. De manera similar se presentan los datos del promedio de la intensidad horaria en cada uno de los periodos, agrupados en 4 momentos diurnos: la madrugada [00-05] HL, la mañana [06-11] HL, la tarde [12-17] HL y la noche [18-23] HL. Para analizar la variabilidad estacional se representaron en diagramas de cajas las distribuciones de frecuencia de la intensidad horaria de la precipitación para cada uno de los periodos y, en cada una de las regiones se hace un promedio espacial. Luego, para el análisis del ciclo diurno se obtiene gráficas de la serie de tiempo del promedio horario y el promedio espacial en cada una de las regiones. Los mapas y gráficas son comparados con los estudios previos tenidos en cuenta en el marco teórico para confirmar que la simulación capta adecuadamente la espacialidad y temporalidad de la precipitación asociada a los SCM.

## 5. Resultados

### 5.1. Variabilidad espacial

La Figura 2 muestra la precipitación acumulada para cada periodo analizado. El resultado es consistente con el efecto predominante de la ZCIT sobre los patrones espaciotemporales de la precipitación sobre la región de estudio. Su migración latitudinal a lo largo del año exhibe su posición más meridional durante el periodo EF y su momento más septentrional en JA, lo que se ve reflejado en mayores precipitaciones en el Amazonas durante EF y en el Caribe a partir del periodo JA. En las temporadas MA y SO su posición intermedia, concuerda con las mayores precipitaciones sobre la región de los Andes y todo el centro del país.

Por otro lado, la precipitación modelada con WRF coincide con la distribución espacial de la actividad de los SCM, resaltando los “puntos calientes” (en inglés hotspots) del océano y costa del Pacífico, el valle medio del Magdalena (parte de nuestra región de estudio Andes) y las tierras altas de Guayanas (parte de nuestra región de estudio de los Llanos), donde una alta frecuencia de la actividad de estos eventos se concentra (Jaramillo et al., 2017; Robledo Delgado, 2023). Además, observamos concordancia con que en el Amazonas y parte de los Llanos la distribución es más uniforme espacialmente, mientras que su ocurrencia a lo largo de Los Andes muestra la ocurrencia de mayores intensidades en

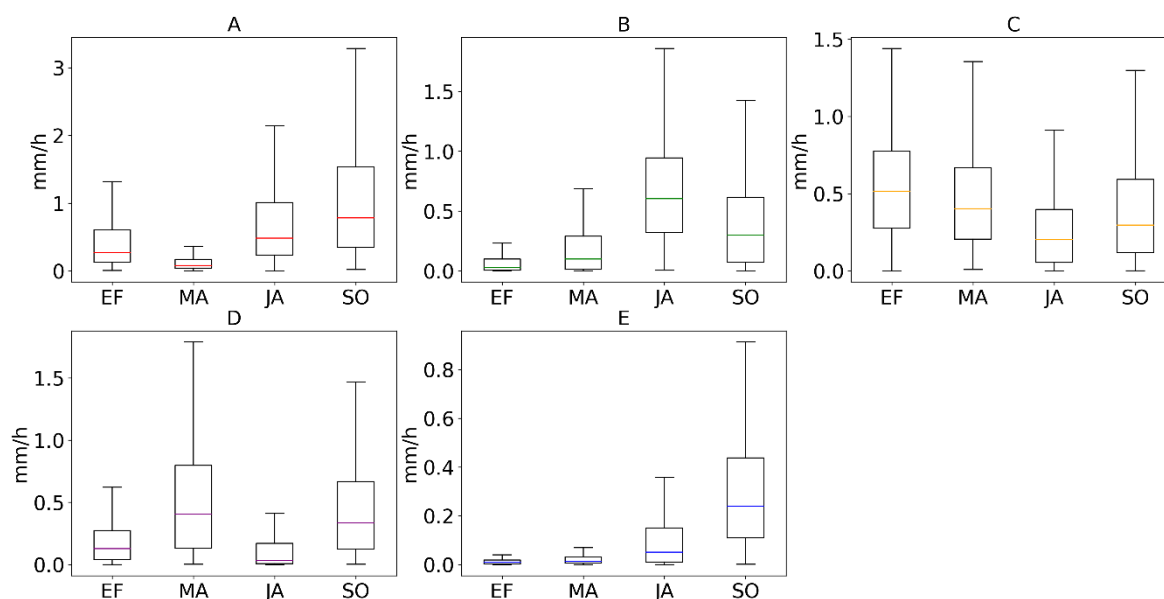


*Figura 2. Mapa de la precipitación total acumulada en mm en cada temporada de estudio (EF, MA, JA y SO).*

ubicaciones o regiones específicas al interior de esta región de análisis (colores de rojo a marrón). La distribución espacial de la precipitación también exhibe menor variabilidad en la región Caribe, exceptuando la zona donde se sitúa la Sierra Nevada de Santa Marta. Estos resultados resaltan, además del papel de la ZCIT en la ocurrencia de la precipitación en diferentes regiones del país a lo largo del año, el rol de la topografía en la ocurrencia de eventos de precipitación más focalizados y de mayor intensidad en las zonas de topografía compleja.

## 5.2. Ciclo anual

En la Figura 3 se muestra la distribución de frecuencia de la precipitación horaria para cada uno de los periodos de estudio, representada en diagramas de cajas, en cada una de las regiones. En particular, en el panel A se puede observar que la región del Pacífico presenta un patrón unimodal del ciclo anual con un pico de máximas en el periodo de SO que concuerda con el fortalecimiento de la CCBN del Chocó y una mínima en el periodo MA correspondiente al debilitamiento de esta CCNB. En los otros periodos intermedios la intensidad de lluvias es también sustancialmente alta en comparación con otras regiones, especialmente en el periodo de JA que es cuando se presenta mayor actividad de los SCM en



**Figura 3.** Ciclo anual para cada una de las regiones de interés: A) Pacífico (rojo), B) Llanos (verde), C) Amazonas (amarillo), D) Andes (morado) y E) Caribe (azul).

la región (Jaramillo et al., 2017). Las tasas de precipitación en esta región exhiben valores de extraordinariamente altos en comparación con las otras regiones de estudio (Poveda & Mesa, 2000).

En los Llanos se observa también un patrón unimodal de la precipitación (panel B), con el pico máximo en el periodo JA. Este pico coincide con lo reportado en el estudio de Builes-Jaramillo et al. (2022). Además, exhibe una precipitación mínima en el periodo de EF; temporada cuando la CCBN de los Llanos es más fuerte y transporta la humedad más hacia el sur del país. En los periodos de MA y SO también se presentan tasas de precipitación considerables, siendo más altas las de SO, lo que concuerda con el paso de la ZCIT por el centro del país, en comparación con las lluvias en MA, que se encuentran distribuidas más uniformemente sobre la región.

Por otra parte, sobre el Amazonas se presenta un ciclo unimodal (Figura 3. C). En el panel C se evidencia un pico de mayores precipitaciones en el periodo de EF, que es cuando la ZCIT está en su momento más meridional y que la CCBN de los Llanos entra por el centro del país transportando humedad desde el océano Atlántico. El mínimo en los valores de precipitación se encuentra en el periodo de JA, que es justo cuando la CCBN en mención se debilita y la ZCIT se encuentra en su momento más septentrional. Sin embargo, el mínimo no es extraordinariamente bajo con respecto a los demás periodos y esto puede ser visto a la luz de la existencia de la selva Amazónica ya que, durante la temporada correspondiente a este periodo, el reciclaje de lluvia en la cuenca del Amazonas está alrededor del 50%. Este hecho puede explicar parcialmente la distribución espacial más uniforme y similar entre los periodos en esta región de estudio (F. Dominguez et al., 2022).

De manera diferente a las demás regiones, la región de Los Andes presenta un patrón anual bimodal de la precipitación (Figura 3. D). Este comportamiento puede explicarse debido a una mayor influencia del doble paso estacional de la ZCIT por la región. Los picos de mayor intensidad de la precipitación en esta región se encuentran en el periodo de MA y SO, siendo ligeramente mayor en MA, en concordancia con la literatura consultada. Esta diferencia puede ser en parte explicada porque el origen de la humedad es diferente en cada periodo. En particular, en el periodo MA la ZCIT se dirige hacia el norte trayendo humedad desde el Amazonas, mientras que en SO la ZCIT se dirige hacia el sur y



la CCBN de los Llanos transporta humedad desde el océano Atlántico (Espinoza et al., 2020).

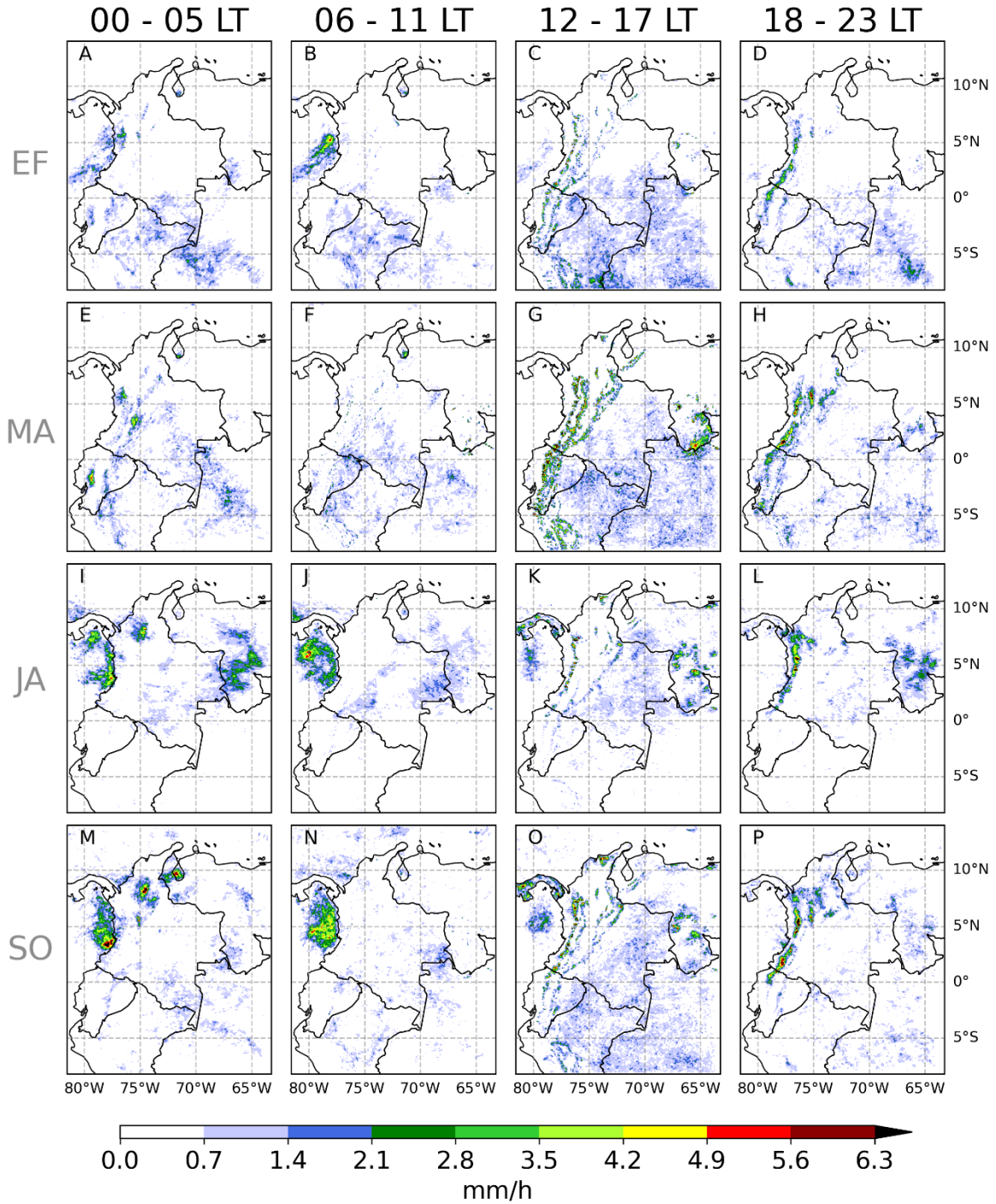
Por último, observamos que en la Figura 3. E, que el patrón estacional de la precipitación en la región Caribe es unimodal con mayores valores de precipitación en la temporada SO. La temporada JA también exhibe valores significativos de la precipitación lo que puede estar asociado con la CCBN del Caribe. Durante las otras dos temporadas la ZCIT se encuentra sobre Colombia, lo que puede inducir a que las circulaciones que vienen del Atlántico y el mar Caribe se recurven hacia Los Andes y el centro del país. Además, los periodos húmedos hacia la segunda mitad del semestre también pueden estar relacionados con el transporte de humedad entregado a la región por las ondas del este, ya que su mayor actividad coincide con estos periodos

### **5.3.Ciclo diurno**

La Figura 4 muestra la distribución espacial de la variabilidad diurna. De acuerdo con los resultados y de manera consistente con estudios previos, sobre el continente los SCM son más activos en horas de la tarde (paneles C, G, H, K, L y O), mientras que en el océano la actividad se presenta preferiblemente en la noche y las horas de la madrugada, como se evidencia en los paneles A, B, I, J, M y N de la figura.

Las mayores tasas de precipitación sobre el país son más evidentes a lo largo del día durante las temporadas MA y SO. En particular, durante el periodo de SO las precipitaciones son más generalizadas espacialmente y se evidencia una mayor ocurrencia de eventos a lo largo del día (más colores azules sobre Colombia). En los periodos de MA y JA las precipitaciones están más localizadas en regiones particulares, y en el periodo de EF, exceptuando la región del Amazonas, la precipitación es generalmente baja. Los resultados anteriores muestran consistencia con lo presentado en estudios previos en el área de estudio (Jaramillo et al., 2017).

En particular, sobre el Pacífico en los periodos de mayor actividad de SCM (JA y SO), la precipitación en las horas de la noche tiene lugar sobre el flanco occidental de la cordillera (panel L y P), que luego se extiende hacia la costa en la madrugada (I y L) y sigue



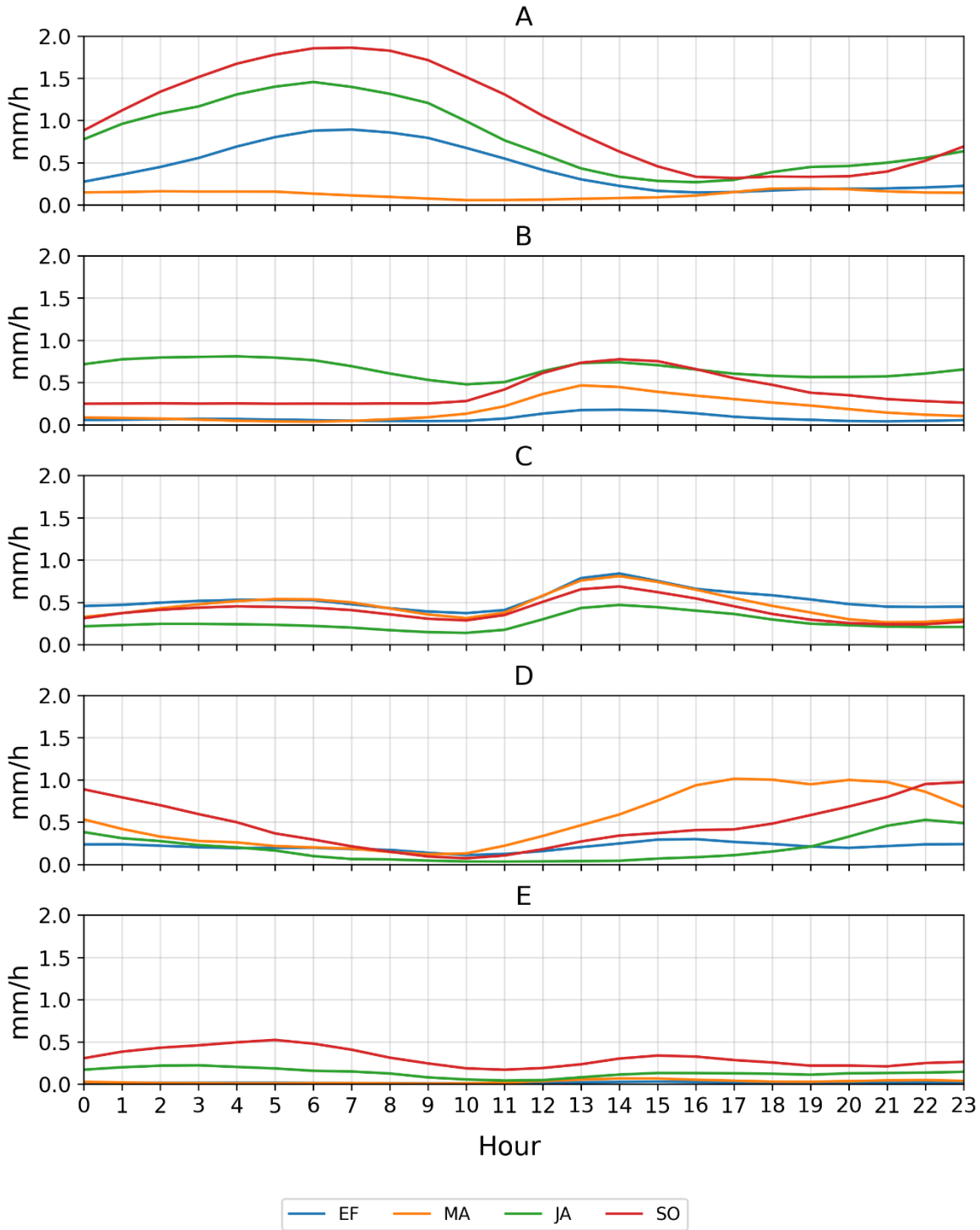
**Figura 4.** Ciclo diario representado en una serie de tiempo diaria en hora local para cada una de las regiones por periodo (colores): EF línea azul, MA línea amarilla, JA línea verde y SO línea roja.

hacia el océano en la mañana (J y N); este patrón espaciotemporal coincide con lo estudiado por Mejía et al. (2021).

La figura 5 también presenta información del ciclo diurno en series de tiempo para cada una de las regiones. En el Pacífico (panel A), el periodo de mayor intensidad es SO seguida de JA presentando intensidades muy altas que no se presentan en ninguna de las demás regiones. Inclusive en el periodo de EF, que también presenta el mismo patrón de lluvias, la intensidad es mucho más baja que los demás periodos, aun así, comparables con las precipitaciones de mayor intensidad de regiones como los Andes, los Llanos y Amazonia. Lo anterior coincide con que en la región se expresan diferentes fenómenos hidroclimáticos que hacen de esta región la más humedad y, a su vez que la actividad de SCM sea mayor (Poveda & Mesa, 2000; Jaramillo et al., 2017; Mejía et al., 2021).

Para los Llanos (panel B) tenemos que la temporada de JA es la de mayor intensidad y presenta lluvias durante las diferentes franjas horarias siendo más intensas en la madrugada y en la tarde en las que pueden verse intensidades de precipitación que alcanzan valores de aproximadamente 0.80 mm/h. En el mismo orden de intensidad se está la temporada SO, pero esta se concentra en las horas de la tarde, seguido en menor medida por MA donde se presenta el mismo patrón horario. En estudios previos, se logra establecer una relación inversa de la actividad de la CCBN de los Llanos, como un modulador importante, con la precipitación sobre la región (Builes-Jaramillo et al., 2022). Lo anterior, coincide con los patrones diurnos de precipitación asociados a los SCM sobre el continente, que en general, presentan mayores frecuencias en horas de la tarde y en menor media en horas de la madrugada (Poveda et al., 2006). Sin embargo, los estudios disponibles alrededor de la hidroclimatología de esta región no se enfocan en los ciclos diurnos de la precipitación sino de las dinámicas de la CCBN, lo que dificulta una explicación de la diferencia del patrón en el periodo JA y los demás periodos.

En la región de la Amazonia (panel C) podemos observar que la intensidad de la precipitación se concentra en las horas de la tarde que coincide con la distribución diurna de los SCM en tierra. El periodo que experimente un ligero aumento en la intensidad horaria es EF, cuando las lluvias son mayores en esta región y la intensidad decae más notablemente en JA, cuando la ZCIT es más septentrional. Sin embargo, se muestra uniformidad en la intensidad horaria en comparación con otras regiones, ya que la diferencia entre EF y JA es



**Figura 5.** Mapa del ciclo diario de cada periodo de estudio (EF, MA, JA y SO) en 4 ventanas horarias: madrugada [00-05], mañana [06-11], tarde [12-17] y noche [18-23] todas en hora local.

menor de 0.5 mm/h, esto se puede deberse a la disponibilidad de humedad de la selva amazónica.

La intensidad de lluvias sobre la región de los Ándes (panel D) en el periodo de MA

es mayor en las horas de la tarde y discurre con menor intensidad hacia la madrugada, mientras que en la temporada SO comienza su ascenso en las horas de la tarde hasta llegar a su máxima intensidad en las horas de la noche y discurre hacia la madrugada hasta bajar en la mañana. Lo anterior coincide con los patrones diurnos de frecuencia de los SCM sobre el continente (Poveda et al., 2006), no obstante, las diferencias en las horas de ocurrencia de los picos máximos, puede deberse a la cercanía de esta región con un complejo cenagoso que influye en los datos. Allí, la mayor actividad de SCM tiene lugar en la madrugada (Jaramillo et al., 2017) y el pico estacional de lluvias se encuentra en septiembre. En el mismo orden, los periodos anteriores son los de mayor intensidad horaria, coincidiendo con los máximos estacionales, además, los patrones, aunque en menor medida, de los periodos JF y JA se asemejan respectivamente.

El Caribe (panel E) es la región donde menor intensidad horaria se presenta. El patrón exhibe dos picos diurnos de mayor intensidad en la madrugada y en tarde, ya que esta región constituida en porciones aproximadamente iguales de océano y continente, lo que es consistente con los patrones diurnos y espaciales de la actividad de los SCM. Lo anterior es más notorio en los periodos correspondientes a la temporada húmeda de la región, mayor en SO y seguida de JA.

## Discusión y conclusiones

En general, los análisis muestran que la región con mayores tasas de precipitación es la del Pacífico, mientras las regiones de los Llanos, Amazonas y Ándes pueden alcanzar tasas similares entre ellas y, la región que presenta las menores tasas es Caribe. Los eventos de precipitación son más generalizados en el periodo de SO sobre todas las regiones del área de estudio, mientras que en los periodos de MA y JA estos son más sectorizados, además, en el periodo de EF los eventos de precipitación son generalmente escasos en todas las regiones, exceptuando el Amazonas.

En el ciclo diurno, se resalta que los patrones de precipitación tienen una marcada diferencia entre los eventos ocurridos sobre agua (océanos y lagos) y los ocurridos en continente. Sobre agua la precipitación es nocturna, mientras que sobre el continente la precipitación se presenta en la tarde.

Por lo tanto, la precipitación obtenida del experimento de simulación de SCM realizado por Hernandez-Uribe (2023), usando el modelo WRF, fue coherente con los patrones espaciotemporales identificados en estudios previos, captando adecuadamente la variabilidad espacial y los ciclos estacionales y diurnos.

Las magnitudes de la precipitación son proporcionales espacialmente hablando y coherente con la literatura al respecto. Sin embargo, una revisión de la información más detallada serviría para validar la eficiencia del modelo en materia de magnitudes de precipitación acumulada y su intensidad.

El estudio hecho por Hernandez Uribe (2023), es un avance hacia las investigaciones orientadas al entendimiento y predictibilidad de los SCM y promueve gran utilidad para la mejora de sistemas de alerta tempranas, que se garanticen la seguridad hídrica de las regiones.

Entender la variabilidad de eventos de SCM son útiles tanto para los tomadores de decisiones a nivel nacional como para las diferentes comunidades dentro de estas regiones para diseñar estrategias y acciones que protejan el desarrollo social y económico de sus habitantes. Además, la aplicabilidad de este tipo de modelos en la predicción a corto plazo de los eventos es una herramienta de gran utilidad para los sistemas de alertas tempranas, para anticiparse a emergencias en comunidades susceptibles de inundaciones y movimientos de tierra en masa.

Se espera que a medida que avancen los estudios de modelación de los SCM se pueda estudiar los efectos e impactos del cambio climático sobre estos.

## Referencias

- Arias, P. A., Garreaud, R., Poveda, G., Espinoza, J. C., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., Viale, M., Scaff, L., & van Oevelen, P. J. (2021). Hydroclimate of the Andes Part II: Hydroclimate Variability and Sub-Continental Patterns. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.505467>
- Builes-Jaramillo, A., Yepes, J., & Salas, H. D. (2022). The Orinoco Low-Level Jet and Its Association with the Hydroclimatology of Northern South America. *Journal of Hydrometeorology*, 23(2), 209 – 223. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0073.1>
- Dominguez, C., Done, J. M., & Bruyère, C. L. (2020). Easterly wave contributions to seasonal rainfall over the tropical Americas in observations and a regional climate model. *Climate Dynamics*, 54(1), 191–209. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04996-7>
- Dominguez, F., Eiras-Barca, J., Yang, Z., Bock, D., Nieto, R., & Gimeno, L. (2022). Amazonian Moisture Recycling Revisited Using WRF With Water Vapor Tracers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(4), e2021JD035259. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021JD035259>
- Durán-Quesada, A., Reboita, M., & Gimeno, L. (2012). Precipitation in tropical America and the associated sources of moisture: A short review. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques - HYDROLOG SCI J*, 57, 1–13. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.673723>
- Espinoza, J. C., Garreaud, R., Poveda, G., Arias, P. A., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., Viale, M., & Scaff, L. (2020). Hydroclimate of the Andes Part I: Main Climatic Features. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00064>
- Fuchs-Stone, Ž., Raymond, D. J., & Sentić, S. (2020). OTREC2019: Convection Over the East Pacific and Southwest Caribbean. *Geophysical Research Letters*, 47(11). <https://doi.org/10.1029/2020GL087564>
- Giraldo-Cardenas, S., Arias, P. A., Vieira, S. C., & Zuluaga, M. D. (2022). Easterly waves and precipitation over northern South America and the Caribbean. *International Journal of Climatology*, 42(3), 1483–1499. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.7315>
- Gomez-Rios, S., Zuluaga, M. D., & Hoyos, C. D. (2023). Orographic controls over convection in an Inter-Andean valley in northern South America. *Monthly Weather Review*, 151(1), 145–162.



- Hernandez-Uribe, K. S. (2023). *Simulating organized convection and precipitation in Northwestern South America at convection-permitting resolution [Tesis de maestría]*. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Hernandez-Deckers, D. (2022). Features of atmospheric deep convection in northwestern South America obtained from infrared satellite data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *148*(742), 338–350. <https://doi.org/10.1002/qj.4208>
- Hoyos, C. D., Ceballos, L. I., Pérez-Carrasquilla, J. S., Sepúlveda, J., López-Zapata, S. M., Zuluaga, M. D., Velásquez, N., Herrera-Mejía, L., Hernández, O., & Guzmán-Echavarría, G. (2019). Meteorological conditions leading to the 2015 Salgar flash flood: lessons for vulnerable regions in tropical complex terrain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *19*(11), 2635–2665.
- Jaramillo, L., Poveda, G., & Mejía, J. F. (2017). Mesoscale convective systems and other precipitation features over the tropical Americas and surrounding seas as seen by TRMM. *International Journal of Climatology*, *37*(S1), 380–397. <https://doi.org/10.1002/joc.5009>
- Jiménez-Sánchez, G., Markowski, P. M., Jewtoukoff, V., Young, G. S., & Stensrud, D. J. (2019). The Orinoco Low-Level Jet: An Investigation of Its Characteristics and Evolution Using the WRF Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *124*(20), 10696–10711. <https://doi.org/10.1029/2019JD030934>
- Martinez, J. A., Camacho, J. C., Vasquez, D., Espinosa, D., & Arias, P. A. (2021). *Simulation of Mesoscale Convective Systems near the Tropical Andes: Insights from Convection-Permitting Simulations of Two Events*. Copernicus Meetings.
- Mejía, J. F., Yepes, J., Henao, J. J., Poveda, G., Zuluaga, M. D., Raymond, D. J., & Fuchs-Stone, Ž. (2021). Towards a Mechanistic Understanding of Precipitation Over the Far Eastern Tropical Pacific and Western Colombia, One of the Rainiest Spots on Earth. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *126*(5), e2020JD033415. <https://doi.org/10.1029/2020JD033415>
- Poveda, G., Álvarez, D. M., & Rueda, Ó. A. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, *36*(11), 2233–2249. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y>

- Poveda, G., Espinoza, J. C., Zuluaga, M. D., Solman, S. A., Garreaud, R., & van Oevelen, P. J. (2020). High Impact Weather Events in the Andes. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00162>
- Poveda, G., & Mesa, O. J. (2000). On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet. *Geophysical Research Letters*, 27(11), 1675–1678. <https://doi.org/10.1029/1999GL006091>
- Poveda, G., Waylen, P. R., & Pulwarty, R. S. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1), 3–27. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.10.031>
- Robledo Delgado, V. (2023). *Spatio-temporal characteristics of mesoscale convective systems over northwestern South America using a new persistence tracking technique [Tesis de maestría]*. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Sakamoto, M. S., Ambrizzi, T., & Poveda, G. (2011). Moisture Sources and Life Cycle of Convective Systems over Western Colombia. *Advances in Meteorology*, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/890759>
- Schumacher, R. S., & Rasmussen, K. L. (2020). The formation, character and changing nature of mesoscale convective systems. In *Nature Reviews Earth and Environment* (Vol. 1, Issue 6). <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0057-7>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J. G., Duda, M. G., & Barker, D. M. (2019). A description of the advanced research WRF version 4. *NCAR Tech. Note Ncar/Tn-556+ Str*, 145.
- Taylor, M. A., Stephenson, T. S., Chen, A. A., & Stephenson, K. A. (2012). CLIMATE CHANGE AND THE CARIBBEAN: REVIEW AND RESPONSE. *Caribbean Studies*, 40(2), 169–200. <http://www.jstor.org/stable/41917607>
- Urrea, V., Ochoa, A., & Mesa, O. (2019). Seasonality of rainfall in Colombia. *Water Resources Research*, 55(5), 4149–4162.
- Zuluaga, M., & Poveda, G. (2004). Diagnóstico de sistemas convectivos de mesoescala sobre Colombia y el océano Pacífico oriental durante 1998-2002. *Avances En Recursos Hidráulicos*, 11, 145–160.