



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Patrones de circulación atmosférica en el valle geográfico del Río Cauca y su impacto en la calidad del aire regional.**

**Andrés Venancio Ardila Ardila**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería Química y Ambiental  
Bogotá, Colombia  
2023



# **Patrones de circulación atmosférica en el valle geográfico del Río Cauca y su impacto en la calidad del aire regional**

**Andrés Venancio Ardila Ardila**

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería Ambiental**

Director:

Ph.D., Rodrigo Jiménez Pizarro

Codirector (a):

Ph.D., Carlos Mario González Duque

Línea de Investigación:

Calidad del aire

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Calidad del Aire (GICA)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental

Bogotá, Colombia

2023







## Declaración de obra original

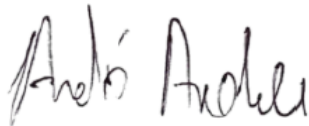
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



---

Andrés Venancio Ardila Ardila

Fecha 01/08/2023

## **Agradecimientos**

A mi familia, amigas y amigos por el apoyo y compañía a lo largo de mi vida.

A los profesores Rodrigo Jiménez Pizarro y Carlos Mario González Duque, quienes en su papel de director y codirector me orientaron y motivaron académica y profesionalmente durante todo este proceso.

Al profesor Daniel Hernández Deckers del departamento de geociencias de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá por sus asesorías frente a la comprensión de los diferentes fenómenos meteorológicos. A Felipe Cifuentes Castaño estudiante de Doctorado de la Universidad de Wageningen en Países Bajos por su asesoría y guía en las simulaciones con el modelo WRF.

Al Profesor Germán Rueda Saa de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira y demás profesionales que participaron en los proyectos de investigación por el apoyo y el aprendizaje de diferentes aspectos relevantes para el desarrollo de este documento.

Al Grupo de Investigación de Calidad del Aire (GICA) de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, a los diferentes profesores con los que tuve la oportunidad de compartir durante la maestría, compañeras y compañeros de clases por compartir sus experiencias durante este proceso.

A la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira y a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), por el apoyo financiero brindado mediante la vinculación en el proyecto de investigación 036 de 2021.



## Resumen

La calidad del aire regional se relaciona directamente con el flujo de emisiones de contaminantes atmosféricos y fenómenos como la dispersión atmosférica, sin embargo, la variabilidad anual, interanual y diaria de los fenómenos meteorológicos y su interacción con la topografía hacen que la dispersión atmosférica sea un fenómeno complejo, más aún en regiones consideradas con topografías complejas como el noroeste de Suramérica. El Valle Geográfico del Río Cauca (VGRC) se ubica al noroeste de Suramérica, entre las ramas Central y Occidental de la Cordillera de los Andes a una distancia aproximada de 80 km del Océano Pacífico, en el cual en los últimos años han presentado un deterioro en la calidad del aire relacionado principalmente con el material particulado. A través del análisis de información de las estaciones y simulaciones meteorológicas y de trazadores atmosféricos realizados con el modelo WRF en dos periodos del 2018 (febrero-abril y julio-septiembre), se han identificado los principales patrones de circulación atmosféricos al interior del VGRC. El fenómeno conocido localmente como la “marea” ventila al VGRC de Oeste a Este entre las 14 y 21 HL con intensidades entre los  $6-8 \text{ m s}^{-1}$ , no obstante, esta intensidad está condicionada por los pasos de menor altitud de la Cordillera Occidental y el periodo analizado; el resto del día predominan los vientos de baja intensidad. La interacción entre la Cordillera Central y los vientos alisios del Este genera un efecto cizalla limitando el transporte vertical hasta los  $\sim 2 \text{ km}$  al interior del VGRC. Esta diferencia entre los patrones de circulación durante el día genera regiones donde predominan condiciones de ventilación (centro del VGRC) y estancamiento (sur del VGRC) impactando directamente la dispersión y el transporte de contaminantes atmosféricos.

**Palabras clave:** Modelación meteorológica; Valle Interandino Tropical; Transporte regional de contaminantes; Topografía compleja; Vientos catabáticos.

## Abstract

### **Atmospheric circulation patterns in the geographic valley of the Cauca River and its impact on regional air quality.**

Regional air quality is directly related to the flux of air pollutant emissions and phenomena such as atmospheric dispersion; however, the annual, interannual, and daily variability of meteorological phenomena and their interaction with topography make atmospheric dispersion a complex phenomenon, even more so in regions considered to have complex topographies such as northwestern South America. The geographic valley of the Cauca River (VGRC in Spanish) is in the northwest of South America, between the Central and Western branches of the Andes Mountains at an approximate distance of 80 km from the Pacific Ocean, in which in recent years there has been a deterioration in air quality related mainly to particulate matter. Through the analysis of information from the stations and meteorological and atmospheric tracer simulations carried out with the WRF model in two periods of 2018 (February-April and July-September), the main atmospheric circulation patterns within the VGRC have been identified. The phenomenon known locally as the "tide" ventilates the VGRC from West to East between 14 and 21 LT with intensities between 6-8 m s<sup>-1</sup>; however, this intensity is conditioned by the lower altitude passes of the Cordillera Western and the period analyzed, the rest of the day low-intensity winds predominate, in addition, the interaction between the Central Cordillera and the trade winds from the East generates a shear effect limiting vertical transport up to ~2 km inside the VGRC. This difference between circulation patterns during the day generates regions where ventilation conditions (VGRC center) and stagnation (VGRC south) predominate, directly impacting the dispersion and transport of atmospheric pollutants.

**Keywords:** Meteorological modeling; Tropical Inter-Andean Valley; Regional transport of pollutants; Complex topography; katabatic winds.

# Contenido

	Pág.
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XVI</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaturas</b> .....	<b>XVII</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Marco Teórico</b> .....	<b>9</b>
1.1 Área de estudio: El Valle Geográfico del Río Cauca (VGRC) .....	9
1.1.1 Circulación de vientos al interior del VGRC .....	11
1.1.2 Precipitaciones .....	12
1.2 Principales fenómenos meteorológicos del norte de Suramérica.....	13
1.2.1 El Niño – Oscilación del sur (ENSO).....	13
1.2.2 Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y las celdas de circulación de Walker y Hadley .....	14
1.2.3 Corrientes de bajo nivel .....	16
1.2.3.1 El Chorro del Chocó .....	16
1.3 Simulación Meteorológica .....	17
1.4 Simulación de Trazadores Atmosféricos .....	22
<b>2. Metodología</b> .....	<b>25</b>
2.1 Análisis de información meteorológica en superficie y altitud .....	26
2.1.1 Procesamiento y depuración de datos .....	29
2.1.2 Delimitación temporal de la Marea.....	32
2.2 Simulación meteorológica .....	33
2.2.1 Validación de modelo y análisis de sensibilidad.....	35
2.2.2 Análisis de información .....	42
2.3 Simulación con trazadores atmosféricos .....	43
<b>3. Resultados</b> .....	<b>47</b>
3.1 Depuración de datos meteorológicos y configuración final del modelo de simulación.....	47
3.1.1 Depuración de datos meteorológicos.....	47

3.1.2	Configuración final del modelo de simulación.....	48
3.2	Delimitación temporal de la Marea.....	54
3.3	Análisis espacial y temporal de las diferentes variables meteorológicas.....	56
3.3.1	Humedad relativa y temperatura.....	56
3.3.2	Precipitación y radiación solar.....	58
3.3.3	Capa límite planetaria - PBL.....	62
3.3.4	Circulación de vientos.....	65
3.4	Patrones de circulación atmosféricos.....	78
3.5	Transporte y dispersión de trazadores atmosféricos sobre el VGRC.....	82
<b>4.</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>87</b>
4.1	Conclusiones.....	87
4.2	Recomendaciones.....	90
	<b>Publicaciones, eventos y proyectos de investigación.....</b>	<b>93</b>
<b>A.</b>	<b>Anexo: Estadísticos de desempeño de la simulación durante el análisis de sensibilidad y periodos FMA y JAS.....</b>	<b>97</b>
<b>B.</b>	<b>Anexo: Precipitación acumulada en el dominio D2.....</b>	<b>103</b>
<b>C.</b>	<b>Anexo: Velocidad y dirección del viento promedio horario entre las 8 y 22 HL de septiembre.....</b>	<b>105</b>
<b>D.</b>	<b>Anexo: Concentraciones normalizadas de CO después de 2 y 6 horas de la emisión.....</b>	<b>107</b>
	<b>Bibliografía.....</b>	<b>109</b>

## Lista de Figuras

Pág.

<b>Figura I-1.</b> Diagramas de <i>Box Plot</i> para el material particulado en la ciudad de Cali (la línea roja representa el promedio y la línea azul representa el límite normativo R. 2254 de 2017). a). Concentraciones promedio anuales de $PM_{10}$ . b). Concentraciones promedio horarias para el 2018 de $PM_{10}$ . c). Concentraciones promedio anuales de $PM_{2.5}$ . d). Concentraciones promedio horarias para el 2018 de $PM_{2.5}$ . ....	6
<b>Figura I-2.</b> Concentraciones de material particulado en el municipio de Yumbo (La línea punteada roja representa el límite normativo nacional R. 2254 de 2017). a). Concentraciones promedio diarias $PM_{10}$ . b). Concentraciones promedio horarias para el 2018 de $PM_{10}$ . c). Concentraciones promedio diarias $PM_{2.5}$ . d). Concentraciones promedio horarias para el 2018 de $PM_{2.5}$ . ....	7
<b>Figura 1-1.</b> Ubicación del valle geográfico del Río Cauca (VGRC) y principales centros urbanos al interior de este. ....	10
<b>Figura 1-2.</b> Representación Topográfica del VGRC (escala 5:1. 5 unidades horizontales representan 1 unidad vertical) y principales accidentes geográficos sobre la Cordillera Occidental. ....	11
<b>Figura 1-3.</b> Representación global del ENSO en sus fases de El Niño y La Niña. ....	14
<b>Figura 2-1.</b> Esquema general de los procedimientos aplicados en la presente investigación. ....	25
<b>Figura 2-2.</b> Ubicación de estaciones meteorológicas sobre el VGRC. ....	29
<b>Figura 2-3.</b> Esquemización de los criterios estadísticos aplicados para las diferentes variables y estaciones sobre el VGRC. a) Rangos alrededor de la mediana horario para la temperatura. b). Correlación lineal entre temperatura y humedad relativa. c). Identificación de datos inusualmente repetidos para la humedad relativa. d). Histogramas de frecuencia para la velocidad del viento. ....	32
<b>Figura 2-4.</b> Configuración de dominios anidados en el área de estudio. ....	35
<b>Figura 2-5.</b> Puntos de inyección hipotética de CO en el área de estudio. ....	44
<b>Figura 3-1.</b> Diagramas de Taylor para el desempeño de las diferentes configuraciones del análisis de sensibilidad para las variables de humedad relativa (HR), radiación solar global (RG), temperatura (T), velocidad zonal (u-Zonal), velocidad meridional (v-Meridional) y velocidad del viento (VV). ....	49
<b>Figura 3-2.</b> Diagramas de Taylor para el desempeño de las diferentes configuraciones del análisis de sensibilidad para la variable de precipitación para las diferentes estaciones. ....	50
<b>Figura 3-3.</b> Análisis de sensibilidad. Altura promedio de la PBL [m] sobre la estación Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón. ....	52

**Figura 3-4.** *Clustering* realizado bajo el método de *k-means* para definir temporalmente el periodo de la marea. ....55

**Figura 3-5.** Promedio anual horario del 2018 de la velocidad y dirección del viento para las estaciones ubicadas sobre el VGRC entre FC y CC. ....55

**Figura 3-6.** representación espacial y temporal de la temperatura (T) y humedad relativa (HR). a) Temperatura y humedad relativa promedio diaria en los periodos simulados. b) Comparación entre promedios horarios simulados (Mod) y observados (Obs) en los periodos simulados. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central. ....57

**Figura 3-7.** a) Representación espacial de precipitación acumulada en los periodos de simulación. b) Comparación de radiación solar promedio horaria y la precipitación acumulada entre observaciones (Obs) y los periodos simulados (Mod). FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central. ....59

**Figura 3-8.** Perfil vertical promedio de la razón de mezcla del vapor de agua ( $w$ ) a las 16 HL en el mes de abril de 2018, en el dominio D3. T1: corte latitudinal sobre FC (Lat: 3.314), T2: corte latitudinal sobre AABA (Lat: 3.531), T3: corte latitudinal sobre CC (Lat: 4.055). T4: corte longitudinal sobre el piedemonte de la vertiente occidental de la Cordillera Central (Lon: -76.181). T5: corte longitudinal sobre el piedemonte de la vertiente oriental de la Cordillera Occidental (Lon: -76.520). FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central. ....61

**Figura 3-9.** Representación espacial y temporal de la PBL. a) PBL promedio diario sobre el VGRC. b) Perfil temporal de la PBL sobre 3 estaciones al interior del VGRC. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central. ....63

**Figura 3-10.** Comparación entre los perfiles horario de la PBL modelados (Mod) y medidos con el LiDAR en UV. ....64

**Figura 3-11.** Comparación de velocidad y dirección del viento promedio horario mensual entre los valores modelados (Mod) y observados (Obs) en superficie. ....65

**Figura 3-12.** Perfil vertical promedio de temperatura, razón de mezcla del vapor de agua, velocidades zonales y meridionales del viento sobre el Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón (3.5367, -76.3866), durante los periodos de simulación (Mod) y observados (Obs). ....67

**Figura 3-13.** Velocidad y dirección del viento superficial para los meses de abril (Abr) y septiembre (Sep) a las 10 HL, en los dominios D2 y D3. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima, CCA: Cordillera Central, CT: Cerro Tatamá y FCi: Farallones del Citará. ....68

**Figura 3-14.** Velocidad y dirección del viento superficial para los meses de abril (Abr) y septiembre (Sep) a las 16 HL, en los dominios D2 y D3. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima, CCA: Cordillera Central, CT: Cerro Tatamá y FCi: Farallones del Citará. ....70

**Figura 3-15.** Diferencia de la velocidad del viento superficial entre los meses de abril (Abr) y septiembre (Sep) a las 10 y 16 HL, en los dominios D2 y D3. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima, CCA: Cordillera Central, CT: Cerro Tatamá y FCi: Farallones del Citará. ....72

**Figura 3-16.** Perfil altitudinal de la velocidad zonal ( $u$ ) a la latitud del AABA (Lat: 3.5367), durante los periodos de Marea y No Marea en los meses de abril y septiembre en los dominios D2 y D3. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central. ....74

<b>Figura 3-17.</b> Diferencia de velocidades zonales (u) promedio (abril-septiembre) en altitud sobre la latitud del AABA (Lat: 3.5367), durante los periodos de Marea y No Marea. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central. ....	75
<b>Figura 3-18.</b> Perfil altitudinal de la velocidad meridional (v) en tres diferentes cortes longitudinales. Sobre la base de la Cordillera Occidental (Lon: -76.515), la base de la Cordillera Central (Lon: -76.185) y un punto central al interior del VGRC (Lon: -76.387). Durante los periodos de Marea y No Marea en los meses de abril y septiembre en el dominio D3. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central.....	77
<b>Figura 3-19.</b> Modelo conceptual de los patrones de circulación atmosféricos al interior del VGRC. a) Patrones de circulación en superficie durante la marea. b) Patrones de circulación en superficie durante la no marea. c) Patrones de circulación en altitud sobre el corte latitudinal del AABA durante la marea. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima, CCA: Cordillera Central y CT: Cerro Tatamá. ....	80
<b>Figura 3-20.</b> Recorrido del CO emitido durante la marea (8 HL) y no marea (16 HL). El punto amarillo representa el punto de emisión. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central. ....	83
<b>Figura 3-21.</b> Perfil vertical de emisiones hipotéticas de CO para los puntos P5 y P9 durante la marea. ....	85
<b>Figura 4-1.</b> Distribución espacial de la precipitación acumulada simulada en dominio D2. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima, CCA: Cordillera Central, JAS: julio-agosto-septiembre y FMA: febrero-marzo-abril. ....	103
<b>Figura 4-2.</b> Distribución espacial de la velocidad promedio horaria del viento entre las 8 y 22 HL durante septiembre para los dominios D3 y D2. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central. ....	105
<b>Figura 4-3.</b> Perfil vertical de la velocidad zonal (u) del viento promedio horario durante septiembre entre las 8 y 22 HL con corte sobre la estación AER, en dominio D2. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central. ....	106
<b>Figura 4-4.</b> Concentraciones normalizadas de CO dos horas después de la emisión. No Marea: 10:00 HL y Marea: 18 HL. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central. ....	107
<b>Figura 4-5.</b> Concentraciones normalizadas de CO seis horas después de la emisión. No Marea: 14:00 HL y Marea: 22 HL. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central. ....	108

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 2-1.</b> Fuentes de información meteorológica sobre el VGRC.....	26
<b>Tabla 2-2.</b> Coordenadas, entidad responsable y variables meteorológicas monitoreadas de estaciones ubicadas en el VGRC.....	27
<b>Tabla 2-3.</b> Criterios de depuración basados en la inspección visual y límites del IDEAM para las diferentes variables meteorológicas ubicadas en el VGRC.....	30
<b>Tabla 2-4.</b> Valores de referencia para los estadísticos de desempeño según su topografía.....	37
<b>Tabla 2-5.</b> Configuración base usada en el análisis de sensibilidad.....	37
<b>Tabla 2-6.</b> Reclasificación de categorías de usos del suelo entre <i>MODIS</i> y <i>CORINE Land Cover</i> .....	39
<b>Tabla 2-7.</b> Esquema aplicado en el análisis de sensibilidad.....	42
<b>Tabla 2-8.</b> Puntos de inyección de emisiones hipotéticas de CO y objetivo de simulación. ....	44
<b>Tabla 3-1.</b> Número y porcentaje de datos válidos obtenidos en el proceso de depuración. ....	47
<b>Tabla 3-2.</b> Comparación de los estadísticos de desempeño entre varias regiones y configuración óptima para el VGRC. ....	51
<b>Tabla 3-3.</b> Configuración óptima usada en la simulación meteorológica en el VGRC. ....	53
<b>Tabla 4-1.</b> Estadísticos de desempeño por variable y configuración del análisis de sensibilidad. ....	97
<b>Tabla 4-2.</b> Estadísticos de desempeños de las simulaciones con la configuración óptima para las diferentes estaciones, variables y periodos analizados. ....	99



# Lista de Símbolos y abreviaturas

## Abreviaturas

Abreviatura	Termino
AABA	Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón
CC	Cerro Calima
CCA	Cordillera Central Andina
<i>Cenicaña</i>	Centro de investigación de la caña de azúcar de Colombia
CIAT	Centro internacional de agricultura tropical
<i>Chocó</i>	Chorro del oeste colombiano
CO	Monóxido de Carbono [ $\mu\text{g m}^{-3}$ ]
CT	Cerro Tatamá
COP	Pesos colombianos
CVC	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
DAGMA	Departamento de administración y gestión medio ambiental
DV	Dirección del viento en superficie [ $^{\circ}$ ]
EDGAR	Emissions dataset for global atmospheric research
ENSO	El Niño-Oscilación del Sur
FC	Farallones de Cali
FCi	Farallones del Citará
FMA	Periodo analizado de febrero a abril
GFS	<i>Global forecast system</i>
JAS	Periodo analizado de julio a septiembre
HGTH	Altura del radiosondeo [m]
HL	Hora Local (- 5 UTC) o LT en inglés
HR	Humedad relativa en superficie [%]
IDEAM	Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales
LCL	<i>Lifting Condensation Level</i>
LLJ	Low Level Jet (Chorro de bajo nivel)
MADS	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible
MB	<i>Mean bias</i> (Sesgo medio)
MEGAN	<i>Model of emissions of gasses and aerosol from nature</i>
<i>Mhab</i>	Millones de habitantes
MGE	<i>Mean gross error</i> (Error absolute medio)
<i>msnm</i>	Metros sobre el nivel del mar
NCAR	<i>National center for atmospheric research</i>
NCEP	<i>National center for environment protection</i>
O <sub>3</sub>	Ozono troposférico [ppb] [ $\mu\text{g m}^{-3}$ ]
OMS	Organización mundial de la salud
PB	Presión barométrica en superficie [hPa]
PBL	<i>Planetary boundary layer</i> (Capa límite planetaria)

<i>PM<sub>10</sub></i>	Material particulado menor a 10 micrómetros de diámetro [ $\mu\text{g m}^{-3}$ ]
<i>PM<sub>2.5</sub></i>	Material particulado menor a 2.5 micrómetros de diámetro [ $\mu\text{g m}^{-3}$ ]
<i>PNN</i>	Parque nacional natural
<i>PP</i>	Precipitación [mm]
<i>PRES</i>	Presión barométrica en altitud [hPa]
<i>R</i>	Coefficiente de correlación de Pearson
<i>RG</i>	Radiación solar global [ $\text{W m}^{-2}$ ]
<i>RMSE</i>	<i>Root mean square error</i> (Raíz del error cuadrático medio)
<i>RS</i>	Radiosondeo
<i>SO<sub>2</sub></i>	Dióxido de azufre [ $\mu\text{g m}^{-3}$ ]
<i>T</i>	Temperatura en superficie [ $^{\circ}\text{C}$ ]
<i>TEMP</i>	Temperatura en altitud [ $^{\circ}\text{C}$ ]
<i>TSM</i>	Temperatura Superficial del Mar o SST en inglés [ $^{\circ}\text{C}$ ]
<i>UCAR</i>	<i>University Corporation for Atmospheric Research</i>
<i>UTC</i>	<i>Universal time coordinated</i>
<i>VGRC</i>	Valle Geográfico del Río Cauca
<i>w</i>	Razón de mezcla del vapor de agua [g agua $\text{kg}^{-1}$ aire seco]
<i>VV</i>	Velocidad del viento en superficie [ $\text{m s}^{-1}$ ]
<i>WPS</i>	WRF sistema de preprocesamiento
<i>WRF</i>	<i>Weather Research and Forecasting</i>
<i>WRF-Chem</i>	<i>Weather Research and Forecasting coupled with Chemistry</i>
<i>ZCIT</i>	Zona de convergencia intertropical

# Introducción

La interacción entre la Cordillera de los Andes y su complejidad geográfica misma, los fenómenos meteorológicos originados en los océanos Pacífico y Atlántico y las grandes cuencas de los ríos del Orinoco y Amazonas, hacen de Suramérica una región con patrones de circulación muy complejos, que condicionan la calidad del aire de los principales centros urbanos. Sin embargo, aún no hay una clara comprensión de la relación entre la contaminación atmosférica y fenómenos como la dispersión atmosférica en los Andes (Cazorla et al., 2022; Gómez Peláez et al., 2020). En 2015 alrededor de 172 millones de habitantes de América Latina y el Caribe vivían en regiones cuyas concentraciones promedio anuales de  $PM_{2.5}$  excedían los  $10 \mu g m^{-3}$  (Gouveia et al., 2021), asociado principalmente a fuentes urbanas (sector industrial y transporte) y a la quema de biomasa (Ballesteros-González et al., 2020; Bell et al., 2006; Molina et al., 2015). Estas emisiones no necesariamente están circunscritas a la región donde son emitidas, ya que pueden ser transportados grandes distancias dependiendo de las características meteorológicas, topográficas y el tipo de contaminante, como ocurre frecuentemente con los incendios y quemas estacionales en las cuencas de los ríos Orinoco y Amazonas, las que eventualmente impactan la calidad del aire de importantes centros poblados en la región (Ballesteros-González et al., 2020, 2022; Gómez Peláez et al., 2020; Hernandez et al., 2019; Jimenez et al., 2022). Dentro de los mayores obstáculos encontrados por diferentes estudios para comprender los problemas de calidad del aire en la región, recae en la falta de redes eficientes de monitoreo meteorológico y de calidad del aire, y el desarrollo de modelos de pronóstico que permitan realizar un seguimiento oportuno de los diferentes contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas, además de una comunicación deficiente entre las diferentes entidades ambientales locales, regionales y nacionales (Cazorla et al., 2022; Gómez Peláez et al., 2020; Gouveia et al., 2021; Molina et al., 2015).

El Valle Geográfico del Río Cauca (VGRC) se ubica al noroeste de Suramérica entre las ramas central y occidental de la Cordillera de los Andes, a una distancia entre 60 y 100 km

del océano Pacífico. Según el inventario de emisiones atmosféricas desarrollado para el 2021 de las 10,945 toneladas de  $PM_{10}$  emitidas al sur del VGRC, el sector industrial contribuye con el 34%, seguido de las quemas abiertas en precosecha e incendios con un 17%, la resuspensión en vías con un 13%, la combustión de fuentes móviles con un 12%, el sector pecuario con un 10% y en una menor proporción las ladrilleras, canteras y resuspensión por actividades agrícolas. Mientras tanto, de las 4,450 toneladas emitidas de  $PM_{2.5}$ , el sector industrial contribuye con un 36%, seguido de las quemas abiertas en precosecha e incendios con un 28% y la combustión por fuentes móviles con 23% (CVC & UNAL, 2022; Franco & Montejo, 2023). A partir de una reconstrucción másica del material particulado en un punto central al interior del VGRC (municipio de Palmira) se pudo determinar que el 52.7% del  $PM_{2.5}$  correspondía a compuestos orgánicos primarios y secundarios, siendo estos compuestos atribuibles principalmente a las quemas de biomasa del sector agroindustrial (Mateus-Fontecha et al., 2022).

No obstante, la interacción entre las ramificaciones de la Cordillera de los Andes y los fenómenos meteorológicos de escala sinóptica como el desplazamiento latitudinal de la ZCIT (Zona de Convergencia Intertropical) durante el año y la presencia cuasi-periódica del ENSO (El Niño – Oscilación del Suroeste), además, de fenómenos regionales como las corrientes de bajo nivel provenientes de los océanos Pacífico y Atlántico; y la presencia de las grandes cuencas de los ríos Amazonas y Orinoco (Poveda. et al., 2011), hacen de Colombia y el VGRC una región con unas condiciones topográficas y meteorológicas bastante complejas.

La concentración de contaminantes atmosféricos en la baja troposfera, conocida como la capa límite planetaria o atmosférica (PBL) no depende solamente de las características de las emisiones (tipo de fuente, contaminante y cantidad), sino también del transporte y la dispersión atmosférica. En terrenos llanos la dispersión está condicionada por la velocidad horizontal del viento y la profundidad relativamente homogénea de la PBL. Sin embargo, en terrenos complejos la influencia mecánica y térmica de la topografía modifican los flujos estacionales de mesoescala y producen movimientos a menor escala que no se observan en terrenos llanos (Giovannini et al., 2020; Pérez et al., 2020; Steenburgh et al., 2013). La profundidad de la PBL en terrenos complejos está sujeta a la influencia de los flujos de mesoescala y la heterogeneidad en la penetración de la radiación solar, haciendo que presente una variabilidad significativa tanto espacial como temporal. No obstante, la interacción entre la topografía y los flujos de mesoescala limitan la profundidad de la PBL,

haciendo que la PBL refleje el perfil topográfico pero con una ligera menor altitud (Giovannini et al., 2020; Steenburgh et al., 2013). La altura de la PBL presenta una variabilidad significativa relacionada con la estacionalidad climática, la presencia de centros urbanos y fenómenos como el resalto hidráulico. Las mayores alturas de la PBL se observan en la temporada seca obedeciendo principalmente a la mayor radiación solar recibida durante este periodo, mostrando una diferencia de hasta 1 km entre la temporada seca y húmeda. Al noroeste de India (región de Ranchi) se estudiaron los cambios de la PBL durante los periodos monzónicos, evidenciando que esta varía entre 1 y 1.7 km durante los monzones y entre 2 y 2.7 en periodos pre-monzónicos (Madala et al., 2015).

La relación entre la topografía y los flujos provenientes de fenómenos regionales o sinópticos hacen que las corrientes de aire se canalicen, se separen, se generen zonas de alta turbulencia o efectos de barrera, supeditando así la dispersión atmosférica. Esta interacción da origen a regiones donde predominan condiciones de ventilación, estancamiento o recirculación (Allwine & Whiteman, 1994; Whiteman, 2001). Estas condiciones de ventilación hacen que se presenten episodios de contaminación más severos de lo que se esperaría de las mismas emisiones en lugares llanos, en especial en los fondos de los valles, a lo largo de las laderas de las montañas y en las cuencas de las montañas (Madala et al., 2015; Steenburgh et al., 2013). En Taiwán a través de una simulación de calidad del aire con el modelo euleriano WRF-Chem se estableció que la interacción entre la Cordillera Central de Taiwán y los flujos del este producidos en el océano Pacífico, generan condiciones de baja velocidad y alta vorticidad a sotavento (oeste de Taiwán). Estas condiciones junto con la brisa marina favorecen el transporte de contaminantes de la zona costera industrial hacia el interior de la isla (Lin et al., 2021). En otro caso, la región montañosa ubicada al noroeste de China impide la entrada de vientos a Beijing favoreciendo el estancamiento de contaminantes y la formación frecuente de neblina (X. C. Wang et al., 2019; Zhou et al., 2019). Estos patrones de circulación pueden transportar contaminantes primarios o precursores (antropogénicos o biogénicos) a los niveles superiores de la atmósfera. Allí, la exposición a una radiación solar más fuerte y otras condiciones ambientales pueden afectar las reacciones químicas, produciendo contaminantes secundarios, como el ozono troposférico ( $O_3$ ), que eventualmente son transportados a niveles más bajos por los flujos nocturnos descendentes (Giovannini et al., 2020; Steenburgh et al., 2013). En la costa oeste de Estados Unidos, en la ciudad de Los Ángeles, la brisa marina se divide en dos fracciones, una parte hacia el este (Riverside y San Bernardino) y otra hacia el norte (Valle de Santa Clarita). Esta entrada de la brisa

marina hacia el norte intensificada por los vientos ascendentes desde el valle hacen que se presenten mayores concentraciones de  $O_3$  y  $PM_{2.5}$  al fondo del valle (Lee et al., 2009).

Otro de los factores que condicionan la dispersión de contaminantes atmosféricos es la exposición superficial diferencial de la radiación solar. En terrenos complejos como los valles se genera un gradiente térmico entre el fondo del valle y sus laderas, llamado circulación valle-montaña. Generalmente, durante el día se presenta un flujo ascendente a lo largo de las laderas (vientos anabáticos). En la noche este flujo se reversa y desciende hacia el valle (vientos catabáticos). Principalmente debido a los flujos de retorno, esta circulación contribuye en el transporte vertical de contaminantes. Sin embargo, en valles profundos y en temporadas de invierno esta circulación se puede ver afectada por la presencia de un fenómeno conocido como inversión térmica, donde la poca radiación solar recibida durante las primeras horas día impide que se rompa esta capa y hace que los contaminantes se mantengan atrapados bajo esta capa de inversión (Giovannini et al., 2020; Madala et al., 2015; Steenburgh et al., 2013; X. C. Wang et al., 2019; Zhan et al., 2023).

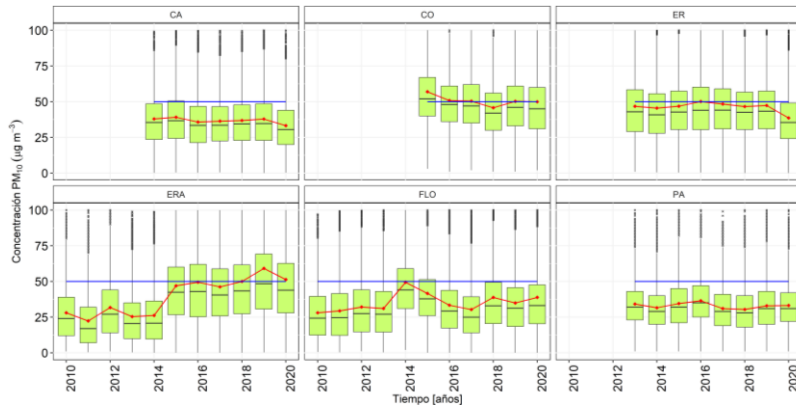
Además de la circulación valle-montaña, otro de los factores que condicionan los patrones de circulación en terrenos complejos, son los cambios inherentes en la altitud de las propiedades de la superficie terrestre tales como la vegetación, la rugosidad, el albedo, la emisividad y las propiedades del suelo, lo que a su vez conduce a una fuerte variación espacial de los flujos superficiales de calor y humedad en la PBL (Zhao & Li, 2015). La presencia de centros urbanos también cambia las propiedades de la superficie, las ciudades suelen presentar temperaturas superficiales más elevadas que las regiones rurales, especialmente durante la noche, dicho efecto se conoce como isla de calor urbano. Los efectos de isla de calor urbano pueden afectar directamente el confort, el consumo energético y la calidad del aire (Peng et al., 2012). Estas mayores temperaturas pueden provocar el desarrollo de una “brisa urbana”, con corrientes que convergentes hacia el centroide térmico de la ciudad, lo que en algunas ocasiones favorece la acumulación de contaminantes atmosféricos en estas áreas (Giovannini et al., 2020) o por el contrario la convergencia de aire en el centroide podría favorecer una mejor ventilación y una mejor calidad del aire (Li & Chao, 2018). A través de una simulación de calidad del aire con el modelo euleriano WRF-Chem en algunas ciudades de China, se ha establecido que los cambios en el uso del suelo urbano generan un aumento del 3.7 % de la temperatura

superficial, un 6.3 % en la altura de la PBL y entre 4.2 % y el 9.5 % en la concentración de ozono troposférico ( $O_3$ ) (X. Wang et al., 2009; Zhan et al., 2023).

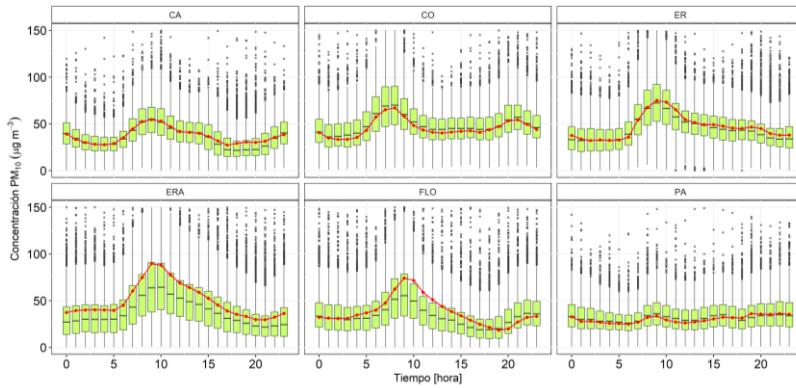
La OMS (Organización Mundial de la Salud) reconoce a la contaminación atmosférica como el principal factor de riesgo ambiental para enfermedades no transmisibles como cardiopatías isquémicas, accidentes cerebrovasculares, enfermedades obstructivas pulmonares crónicas, el asma y el cáncer; además de una creciente evidencia de su relación con la diabetes, impactos en la mortalidad neonatal por bajo peso, el Alzheimer y entre otras enfermedades neurológicas. Se estima que cerca de 7 millones de personas al año mueren por la contaminación del aire, de las cuales alrededor de 4 millones son atribuibles al material particulado fino ( $PM_{2.5}$ ), afectando principalmente a los países con más bajos ingresos (Nansai et al., 2021; WHO, 2021). En Colombia para el 2018 los efectos de una mala calidad del aire ocasionaron 7,754 muertes con unos costos anuales de 11.75 billones de COP (Pesos Colombianos) (IDEAM, 2022). En Santiago de Cali, la tercera ciudad con mayor número de habitantes de Colombia y el principal centro urbano del VGRC, para el 2015 registró 1,317 muertes atribuibles a la contaminación del aire urbano, representando el 9.5% del total de las muertes de la ciudad con un costo anual de 1.7 billones de COP, los cuales corresponden al 5.6% del PIB (Producto Interno Bruto) de la ciudad (DNP, 2017).

Los problemas de calidad del aire en el VGRC se relacionan principalmente con las altas concentraciones de material particulado. Al norte de Santiago de Cali (estaciones ERA y FLO), las concentraciones promedio de  $PM_{10}$  pasaron de  $30 \mu\text{g m}^{-3}$  en 2013 a  $50 \mu\text{g m}^{-3}$  en 2019, mientras tanto, las concentraciones de  $PM_{2.5}$  al sur de la ciudad (estación UV) pasaron de  $13 \mu\text{g m}^{-3}$  en 2013 a  $27 \mu\text{g m}^{-3}$  para el 2019 (**Figura I-1**). El perfil horario muestra dos periodos de altas concentraciones, el primero alrededor de las 8 HL (Hora Local, -5 UTC) con concentraciones en torno a los  $70 \mu\text{g m}^{-3}$  y  $20 \mu\text{g m}^{-3}$  para el  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , respectivamente. El segundo periodo de menor intensidad al primero se encuentra alrededor de las 20 HL con concentraciones entre 40 y  $60 \mu\text{g m}^{-3}$  para el  $PM_{10}$  y entre 20 y  $10 \mu\text{g m}^{-3}$  para el  $PM_{2.5}$  (**Figura I-1**) (DAGMA & UNAL, 2022).

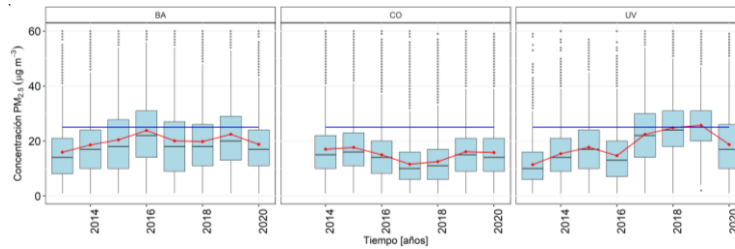
a



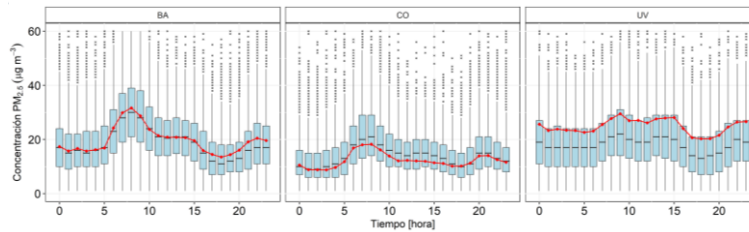
b



c



d



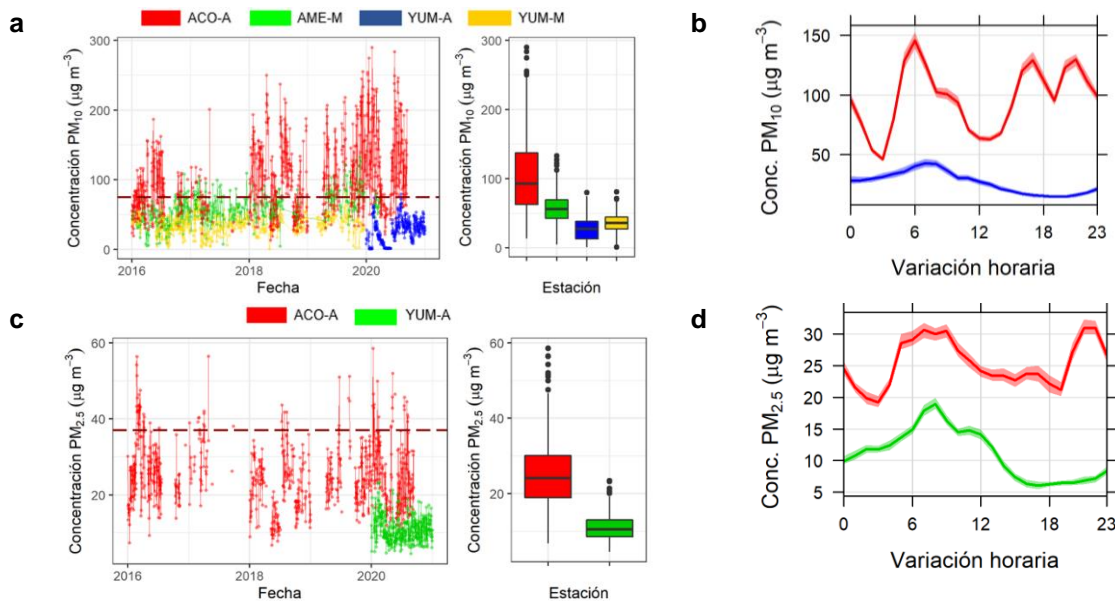
**Figura I-1.** Diagramas de *Box Plot* para el material particulado en la ciudad de Cali (la línea roja representa el promedio y la línea azul representa el límite normativo R. 2254 de 2017). a). Concentraciones promedio anuales de  $PM_{10}$ . b). Concentraciones promedio horarias para el 2018 de  $PM_{10}$ . c). Concentraciones promedio anuales de  $PM_{2.5}$ . d).

Concentraciones promedio horarias para el 2018 de  $PM_{2.5}$ .

Fuente: (DAGMA & UNAL, 2022).



En el municipio de Yumbo, al norte de Cali, uno de los centros urbanos más industrializados y con mayores problemas de calidad del aire de la región, para el 2019 presentaba concentraciones promedio anuales en las estaciones de ACO y AME-M de 108 y 76  $\mu\text{g m}^{-3}$  de  $\text{PM}_{10}$ , respectivamente y 25  $\mu\text{g m}^{-3}$  para el  $\text{PM}_{2.5}$  en ACO (**Figura I-2**), sin embargo, estas elevadas concentraciones, en especial el  $\text{PM}_{10}$  están condicionadas por particularidades locales como la resuspensión de material particulado, frecuentemente asociado a una deficiente malla vial y el continuo tráfico de vehículos pesados. El perfil horario muestra dos periodos de altas concentraciones, el primero entre las 6 y 8 HL con concentraciones alrededor de 150  $\mu\text{g m}^{-3}$  y 30  $\mu\text{g m}^{-3}$  para el  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ , respectivamente; el segundo periodo se encuentra alrededor de las 20 HL con concentraciones cercanas a los 130  $\mu\text{g m}^{-3}$  para el  $\text{PM}_{10}$  y 30  $\mu\text{g m}^{-3}$  para el  $\text{PM}_{2.5}$  (**Figura I-2**) (CVC & UNAL, 2022).



**Figura I-2.** Concentraciones de material particulado en el municipio de Yumbo (La línea punteada roja representa el límite normativo nacional R. 2254 de 2017). a).

Concentraciones promedio diarias  $\text{PM}_{10}$ . b). Concentraciones promedio horarias para el 2018 de  $\text{PM}_{10}$ . c). Concentraciones promedio diarias  $\text{PM}_{2.5}$ . d). Concentraciones promedio horarias para el 2018 de  $\text{PM}_{2.5}$ .

Fuente: (CVC & UNAL, 2022).

Si bien López & Howell (1967) desarrollaron el primer modelo conceptual de circulación para el VGRC, donde describen el impacto de las corrientes que ingresan desde la costa Pacífica sobre el VGRC y algunas entidades como Cenicaña (Centro de Investigación de

la Caña de Azúcar en Colombia) han descrito estadísticamente lo que ocurre con las diferentes variables meteorológicas en función de establecer las condiciones óptimas para el cultivo de la caña de azúcar (Cortés et al., 2019; Preciado et al., 2020); la relación entre la calidad del aire, la compleja topografía del VGRC y fenómenos como la dispersión atmosférica no se han investigado a profundidad. Por lo tanto, a partir del análisis de las diferentes variables meteorológicas monitoreadas en el VGRC y a través de la simulación meteorológica y de trazadores atmosféricos con un modelo euleriano (WRF -*Weather Research and Forecasting*- y WRF-Chem - *Weather Research and Forecasting coupled with Chemistry*-) se propone identificar y caracterizar los patrones de circulación atmosférica en el Valle Geográfico del Río Cauca (VGRC) y su impacto en el transporte regional de contaminantes, por lo cual esta investigación se plantea:

- Proponer patrones de circulación atmosférica a partir del análisis e interpretación de la variabilidad espaciotemporal de las mediciones meteorológicas en el VGRC.
- Proponer y evaluar un modelo conceptual de la circulación atmosférica regional sobre el VGRC.
- Validar el modelo conceptual mediante simulación e identificar la contribución de diferentes fenómenos sinópticos y regionales sobre el VGRC.
- Caracterizar y discutir el impacto en la calidad del aire regional de emisiones transportadas por los mecanismos de circulación atmosférica identificados.

Esta investigación se desarrolló en el marco del proyecto 4001 “Caracterización de la calidad del aire y residuos, y formulación de alternativas de promoción para su gestión ambiental”, dentro del convenio interadministrativo No. 036 de 2021 entre la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y la Facultad de Ingeniería y Administración de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Uno de los objetivos de este proyecto se centró en la “modelación del material particulado identificando la contribución de las diferentes fuentes de emisión sobre los municipios de Yumbo y Palmira (Valle del Cauca)”. Como parte de esta actividad, el proyecto se enfocó en el análisis de información meteorológica y de calidad del aire, además, de la simulación meteorológica y de calidad del aire sobre esta región, siendo estos análisis y simulaciones parte fundamental del desarrollo del presente documento.

# 1. Marco Teórico

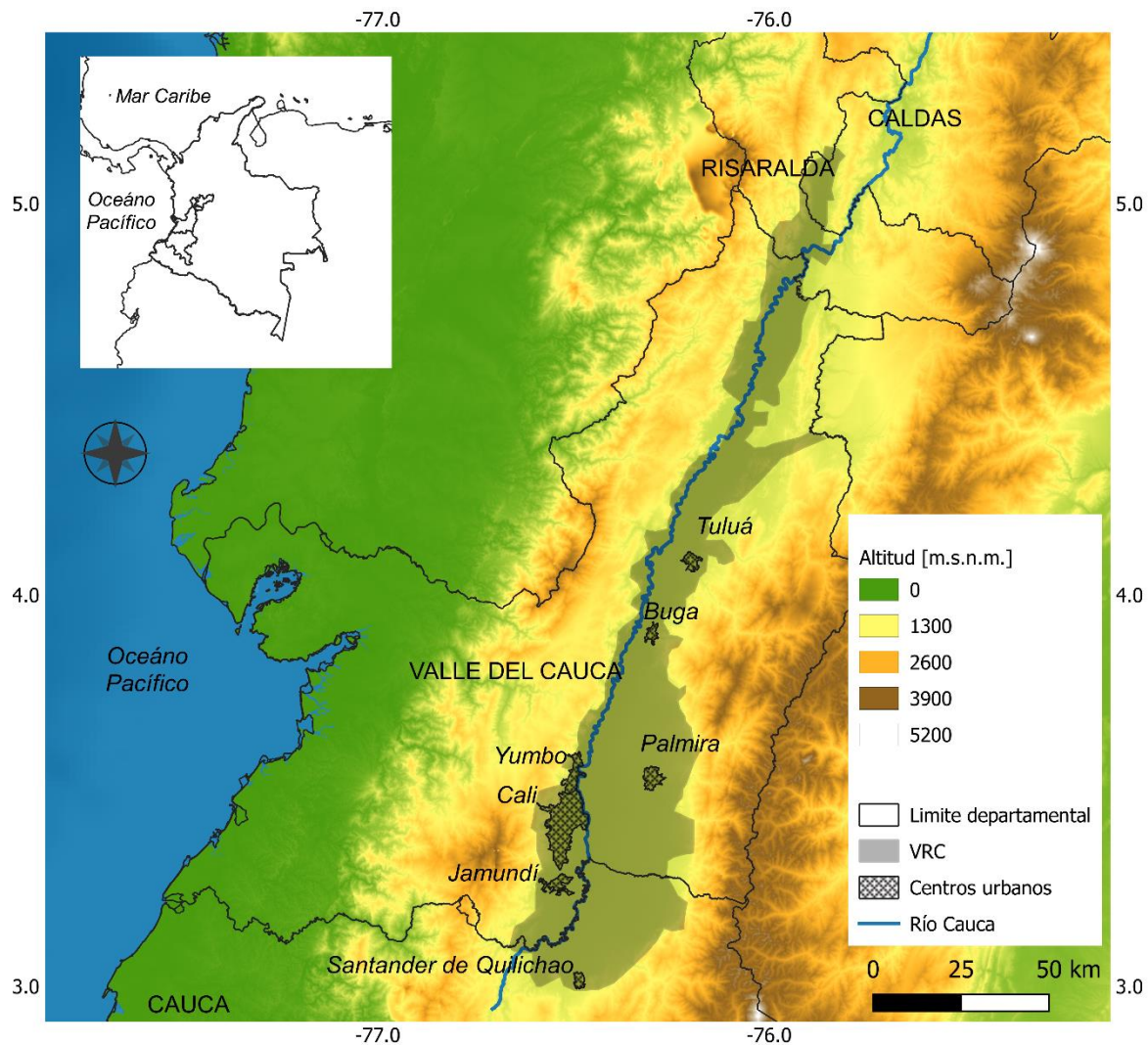
## 1.1 Área de estudio: El Valle Geográfico del Río Cauca (VGRC)

La interacción entre las tres ramificaciones de los Andes y la alta variabilidad en las precipitaciones al norte de Suramérica, permiten una amplia diversidad de ecosistemas como selvas tropicales, bosques de niebla, páramos, glaciares, bosques secos, desiertos y grandes valles inter-andinos con una disposición predominantemente sur-norte (Poveda. et al., 2011), entre ellos se encuentra el Valle geográfico del Río Cauca (VGRC).

El VGRC se ubica al suroccidente de Colombia entre las Cordilleras Occidental y Central Andinas, entre los 3°N y 5°N, a lo largo de los departamentos del Cauca, Valle del Cauca, Risaralda y Caldas (**Figura 1-1**). El VGRC se encuentra a una altitud media de 1,000 msnm, con un área aproximada de 5,300 km<sup>2</sup>, una longitud de ~240 km, un ancho de ~35 km al sur y ~20 km al norte (CVC & UNAL, 2022). En el VGRC habitan cerca de 5 millones de habitantes (Mhab), de los cuales el 70% se encuentran en el centro-sur, donde se destacan centros poblados como Santiago de Cali (2.28 Mhab), Palmira (0.36 Mhab), Jamundí (0.17 Mhab), Buga (0.13 Mhab), Tuluá (0.22 Mhab), Yumbo (0.11 Mhab) y Santander de Quilichao (0.09 Mhab) (DANE, 2022).

Este valle inter-andino recibe una gran cantidad de sedimentos desde las laderas de ambas Cordilleras, originando así un valle tropical con unas condiciones óptimas para una gran diversidad de ecosistemas, entre ellos humedales y bosques tropicales. No obstante, estas condiciones naturales han sido transformadas desde el siglo XVI, siendo más intensiva entre finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX, debido a la transición de un modelo de haciendas hacia un modelo agroindustrial (Uribe, 2017). Para el 2018, cerca del 50% del VGRC (2,400 km<sup>2</sup>) estaba sembrado con caña de azúcar (Rau & Gómez, 2018), donde, como parte de sus prácticas agrícolas frecuentes se realiza la quema precosecha en el 32% del área cosechada anualmente (CVC, 2020). La agroindustria de la caña de

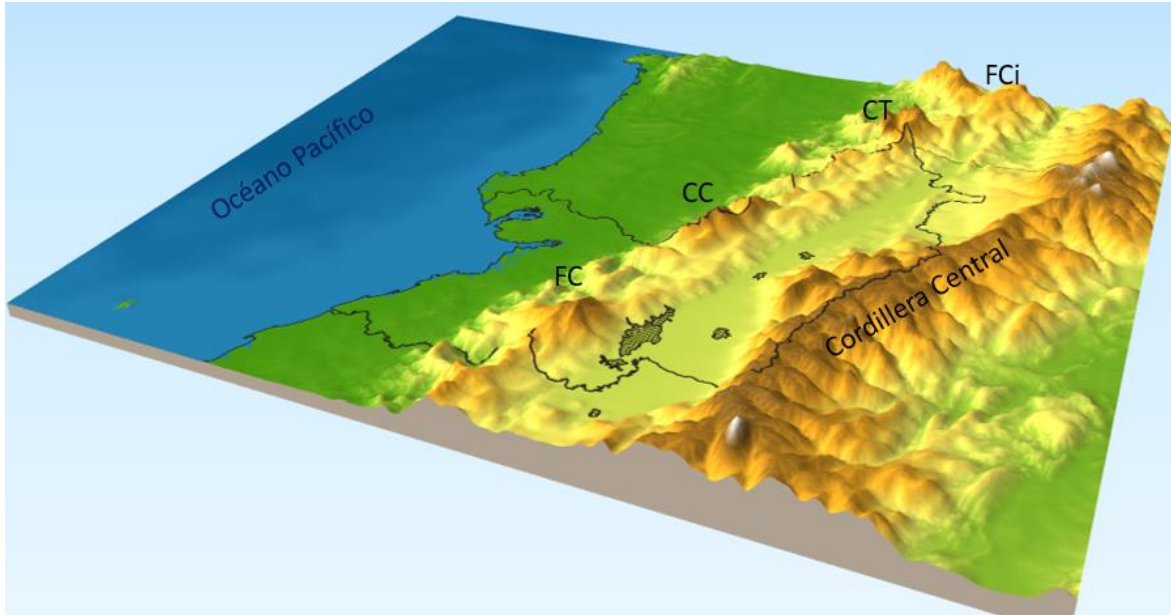
azúcar representa el 2.8% del PIB agrícola del país y contribuye con el 11.6% y 20.2% del PIB industrial de los departamentos de Valle del Cauca y Cauca, respectivamente (Asocaña, 2022). Además, sobre el VGRC también se encuentran importantes sectores productivos como el agropecuario (granjas avícolas, bovinas y porcícolas), procesamiento de alimentos y papel, productos químicos y farmacéuticos, y producción de cemento y acero (CVC & UNAL, 2022).



**Figura 1-1.** Ubicación del valle geográfico del Río Cauca (VGRC) y principales centros urbanos al interior de este.

En el VGRC, la Cordillera Central Andina presenta una elevación media de 3,500 msnm y picos que superan los 5,000 msnm, mientras tanto, la Cordillera Occidental es más baja con una elevación promedio de unos 2,300 msnm y picos que superan los 4,000 msnm

(López & Howell, 1967), entre los que cabe destacar el PNN (Parque Nacional Natural) Farallones de Cali (FC) con 4,100 msnm, el Cerro Calima (CC) con 3,800 msnm, el Cerro PNN Tatamá (CT) con 4,200 msnm y los Farallones del Citará (FCi) con 4,020 msnm. Entre estos picos se observan pasos con una altitud aproximada de 2,000 msnm (**Figura 1-2**).



**Figura 1-2.** Representación Topográfica del VGRC (escala 5:1. 5 unidades horizontales representan 1 unidad vertical) y principales accidentes geográficos sobre la Cordillera Occidental.

### 1.1.1 Circulación de vientos al interior del VGRC

La mayor altitud promedio de la Cordillera Central frente a la Cordillera Occidental, hace que la Cordillera Central actúe como barrera topográfica frente a los vientos provenientes del oriente del país, dejando al VGRC expuesto a la corriente de bajo nivel proveniente del Océano Pacífico, conocida como el Chorro del Chocó. Estos vientos provenientes del Océano Pacífico cargados con un alto contenido de humedad ingresan a la costa Pacífica y se enfrían a medida que avanza sobre el continente, debido a la evaporación de la abundante precipitación inducida por la topografía (López & Howell, 1967). Estos vientos llegan sobre la Cordillera Occidental alrededor del mediodía (Warner et al., 2003), donde una parte de este aire es retenido por la Cordillera generando así la abundante precipitación en la región Pacífica. Sin embargo, una parte de estos vientos se desborda por los pasos de menor altitud, descendiendo sobre el costado oriental de la Cordillera

Occidental ventilando al VGRC de oeste a este, donde interactúa con los fenómenos locales de circulación. La fuerza de estos vientos catabáticos, conocidos localmente como “la marea”, varía de un día a otro y entre las temporadas de mayores y menores precipitaciones (López & Howell, 1967). Por lo regular, entre las 22 y 10 HL al interior del VGRC los vientos se caracterizan por ser de baja intensidad ( $< 1.5 \text{ m s}^{-1}$ ) y provenir del norte; no obstante, sobre el centro-sur del VGRC los vientos cambian ligeramente de dirección e intensidad al atardecer, con vientos provenientes del oeste y velocidades máximas de hasta  $5 \text{ m s}^{-1}$  (Preciado et al., 2020).

### 1.1.2 Precipitaciones

En el Océano Pacífico las precipitaciones se presentan usualmente entre las 0 y 3 HL, mientras tanto, en el continente estos fenómenos influenciados por la brisa marina y el calentamiento diurno de la superficie continental se presentan generalmente entre las 15 y 18 HL (Sakamoto et al., 2011). Los sistemas convectivos son más frecuentes durante el segundo semestre del año, siendo generalmente sistemas de larga duración y mayor extensión en comparación con el primer semestre. El origen de estos sistemas difiere a lo largo del año, durante el primer semestre del año las principales fuentes de humedad provienen del Mar Caribe y del Atlántico tropical, mientras tanto, durante el segundo semestre esta humedad proviene principalmente de la región Pacífica chilena y peruana (Hernandez-Deckers, 2022; Sakamoto et al., 2011).

Las altas precipitaciones en la región Pacífica son debidas a la interacción entre el Chorro del Chocó, los vientos alisios del este y la Cordillera de los Andes, generando así uno de los lugares con mayores precipitaciones del planeta, promediando entre 8,000 y 13,000 mm anuales (Poveda. & Mesa., 1999; Poveda & Mesa, 2000). Los vientos fríos cargados de humedad traídos desde el Océano Pacífico por el Chorro del Chocó, ingresan al continente y chocan con los vientos cálidos del este, causando una alta inestabilidad atmosférica, fenómenos convectivos profundos y altas precipitaciones sobre la costa Pacífica colombiana (Poveda. & Mesa., 1999; Poveda & Mesa, 2000). No obstante, al interior del VGRC se promedia solo una quinta parte de las precipitaciones presentadas en la costa Pacífica con una distribución bastante irregular, a pesar de estar entre 60 y 100 km de la costa Pacífica. El norte del VGRC promedia unos 3,000 mm anuales, mientras tanto al centro-sur las precipitaciones están entre los 1,000 y 2,000 mm anuales (CIAT,

2018; Cortés et al., 2019). Esta alta variabilidad en las precipitaciones, en especial al sur del VGRC se relaciona con la presencia de los pasos de menor altitud de la Cordillera Occidental, donde las regiones adyacentes a estos pasos experimentan menores precipitaciones debido a que los vientos catabáticos disminuyen la probabilidad de formar fenómenos convectivos locales (López & Howell, 1967).

## 1.2 Principales fenómenos meteorológicos del norte de Suramérica

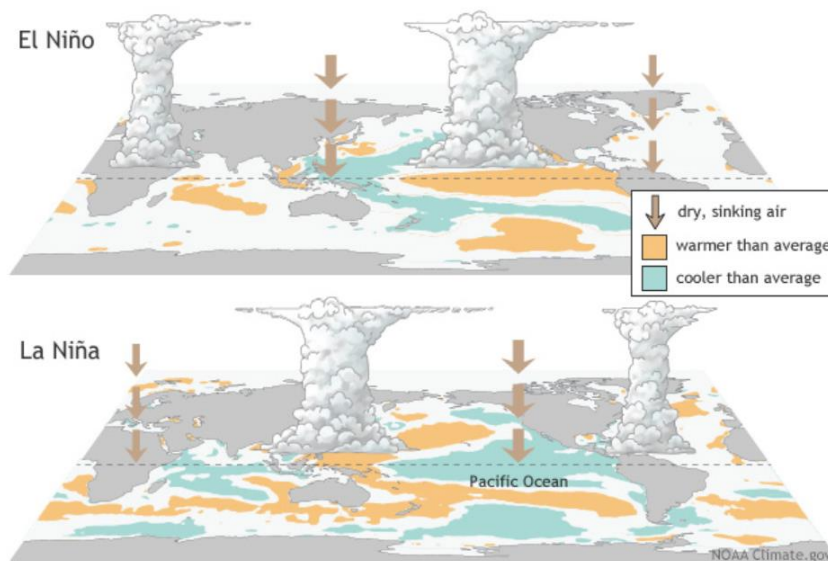
Al norte de Suramérica convergen una serie de fenómenos meteorológicos de escala sinóptica y regional, los cuales impactan las condiciones meteorológicas del VGRC. Entre los principales fenómenos se encuentran El Niño – Oscilación del sur (ENSO), la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y las celdas de circulación de Hadley y Walker; y las corrientes de bajo nivel, siendo el chorro del Chocó la corriente de mayor relevancia para el VGRC.

### 1.2.1 El Niño – Oscilación del sur (ENSO)

La variabilidad climática interanual en las regiones tropicales de Suramérica es causada principalmente por El ENSO, el cual comprende dos fases conocidas como El Niño y La Niña (**Figura 1-3**). El Niño (fase cálida) se refiere a un incremento inusual de la temperatura superficial del Océano (TSM) Pacífico Central superior a 0.5 °C con respecto al Océano Pacífico Oriental por al menos 5 periodos consecutivos de 3 meses. Este incremento en la TSM se acompaña con un debilitamiento de los vientos alisios del este y una disminución en la nubosidad sobre el norte de Suramérica. Por el contrario, La Niña (fase fría) se refiere a una disminución de la TSM del Pacífico Central de al menos de 0.5°C frente a la TSM Pacífico Oriental durante un periodo semejante al anteriormente descrito. Esta disminución de la TSM se acompaña de un fortalecimiento de los vientos alisios del este y un aumento de la nubosidad sobre el norte de Suramérica (NOAA, 2023; Poveda. et al., 2006, 2011).

La intensidad y magnitud de los impactos del ENSO se puede clasificar según el valor máximo de las medias móviles de 3 meses por 5 periodos consecutivos. Un evento con una variación mayor a 0.5°C y menor a 0.9°C se clasifica como un ENSO débil, una variación entre 1.0 y 1.4°C se considera un evento medio o moderado y variaciones superiores indican un evento fuerte o muy fuerte (CPC, 2023; Ren et al., 2018). Este

fenómeno suele presentarse con una periodicidad de 2 o 10 años, con un promedio de 4 años, sin embargo, estos eventos se están presentando de manera más frecuentes en las últimas décadas (Poveda. et al., 2006).



**Figura 1-3.** Representación global del ENSO en sus fases de El Niño y La Niña.

Fuente: (NOAA, 2023)

En términos generales sobre Colombia, la fase de El Niño se presenta como periodos secos más intensos y prolongados. Por otro lado, La Niña se presenta como periodos de lluvias más intensos y extensos. Estos efectos se observan de manera más fuerte y temprana sobre los Andes occidentales y la región Pacífica frente al resto del país (Poveda. et al., 2006, 2011).

### 1.2.2 Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y las celdas de circulación de Walker y Hadley

La ZCIT es la región tropical donde convergen los vientos alisios del noreste provenientes del hemisferio norte y los vientos del sureste del hemisferio sur, haciendo que alrededor del Ecuador se presente un ascenso de masas de aire y se generen fenómenos convectivos profundos asociados a fuertes precipitaciones (NOAA, 2023). En los meses de diciembre-febrero la ZCIT se ubica entre los 6°S y 8°S sobre la cuenca del Río Amazonas y alrededor de los 0° en la costa Pacífica (Jury, 2019). Durante los meses de



junio-agosto la ZCIT se encuentra sobre los 8°N y 10°N, estando ligeramente más hacia el norte en la región Pacífica y Centroamérica (Jury, 2019). En Colombia las precipitaciones están condicionadas por el ascenso y descenso latitudinal de la ZCIT alrededor del Ecuador durante el año. Sobre las Cordilleras Central y Occidental las precipitaciones presentan un ciclo anual bimodal con mayores niveles durante abril-mayo y octubre-noviembre, y menores precipitaciones en diciembre-febrero y junio-agosto. En las regiones Caribe y norte de la región Pacífica se observa un ciclo unimodal (mayo-octubre), lo que refleja la posición más septentrional de la ZCIT sobre el noroeste de Suramérica y Centroamérica (Poveda. et al., 2006).

La celda de circulación de Walker (circulación zonal) es generada por el ascenso de masas de aire húmedas en el Pacífico australiano, las cuales son transportadas por los vientos del oeste de la alta troposfera y descienden sobre el Pacífico oriental (Ambrizzi et al., 2004). Parte de este aire se dirige superficialmente hasta la costa Pacífica del norte Suramérica, llegando al continente cargados de humedad e inducen la abundante precipitación orográfica en la región Pacífica colombiana (NOAA, 2014). Esta celda también es responsable de otros flujos zonales ecuatoriales a través de los océanos Atlántico e Índico. Entre el norte de Suramérica y Atlántico tropical se presenta una celda de circulación que transporta masas de aire desde el Océano Atlántico hasta la costa Pacífica Colombia, donde se produce un fuerte fenómeno convectivo (Hernández & Mesa, 2020). Esta convergencia de corrientes provenientes del este y oeste hacen de la costa Pacífica colombiana sea una de la regiones con mayores precipitaciones del mundo (Poveda & Mesa, 2000). Por otro lado, el calentamiento diferencial entre la región tropical y subtropical genera un ascenso de masas de aire húmedas sobre el Ecuador (ZCIT) y descenso subsecuente alrededor de los 30° en ambos hemisferios, esta circulación meridional se conoce como celda de Hadley (Ambrizzi et al., 2004). Los cambios en la TSM del Océano Pacífico durante el ENSO generan cambios en los patrones de circulación zonales y meridionales tropicales. La reducción del ascenso de humedad y las precipitaciones durante El Niño sobre la costa Pacífica, conlleva a una celda de Hadley anómala, desplazando los centros de convección dentro de la ZCIT desde la posición ecuatorial hacia el suroeste. Esta reducción de los fenómenos convectivos en la costa Pacífica Colombiana favorece un aumento en la radiación solar y temperatura, reforzando así las condiciones secas en la región. Durante La Niña se presenta un aumento en el transporte de humedad desde el océano Pacífico hacia el continente, generando un aumento de

fenómenos convectivos en la región Pacífica (Galanti et al., 2021; Mesa & Rojo, 2020; Poveda. et al., 2006, 2011).

### 1.2.3 Corrientes de bajo nivel

Las corrientes o chorros de bajo nivel (LLJ, por sus siglas en inglés) son un fenómeno de mesoescala que se caracteriza por un máximo en la velocidad del viento a unos pocos kilómetros sobre la superficie, pero su extensión horizontal puede superar los cientos de kilómetros (Ranjha et al., 2013). El norte de Suramérica se encuentra bajo la influencia de 3 LLJ, conocidos como el LLJ del Orinoco, el LLJ del Caribe y el LLJ del Chocó, los cuales interactúan con la ZCIT, fenómenos propios de los Océanos Pacífico y Atlántico (por ejemplo, el ENSO), la topografía y entre otros fenómenos meteorológicos (Sierra et al., 2021).

El LLJ del Orinoco presenta su máxima intensidad de noviembre a marzo, extendiéndose entre el noreste del Atlántico tropical hasta la Orinoquia colombiana con velocidades que superan los  $8 \text{ m s}^{-1}$  (Jiménez-Sánchez et al., 2019), sin embargo, la presencia de la Cordillera Central impide que esta corriente llegue a la región Pacífica. El LLJ del Caribe transporta gran cantidad de humedad desde el Mar Caribe hasta el Océano Pacífico Oriental, norte de Suramérica y Centroamérica, siendo más fuerte en los meses de julio ( $14 \text{ m s}^{-1}$ ) y enero-febrero ( $10 \text{ m s}^{-1}$ ); y menos intenso de septiembre a noviembre. Parte del LLJ del Caribe se recurva hacia suroeste en el Océano Pacífico, fusionándose con el LLJ del Chocó, llegando a la costa Pacífica colombiana (Mesa-Sánchez & Rojo-Hernández, 2020; Sierra et al., 2021; Yepes et al., 2019).

#### 1.2.3.1 El Chorro del Chocó

El Chorro del Chocó (**Chorro superficial del Oeste de Colombia**) o LLJ del Chocó es una corriente de vientos superficiales alrededor de los  $5^{\circ}\text{N}$  y los 925 hPa, el cual es producto de la unión de la curvatura de los vientos producidos en el Océano Pacífico de Ecuador, Perú y Chile; y los vientos impulsados por LLJ del Caribe (Poveda. & Mesa., 1999; Poveda & Mesa, 2000). Durante los meses de febrero-abril el Chorro del Chocó se ubica entre los  $4^{\circ}\text{S}$  y  $4^{\circ}\text{N}$ , siendo este el periodo de menor intensidad con vientos cercanos a  $2 \text{ m s}^{-1}$ . En los meses de mayo a diciembre el Chorro se ubica entre los  $4^{\circ}\text{S}$  y  $8^{\circ}\text{N}$ , estando en su posición más septentrional en el periodo de septiembre a noviembre con vientos entre 6 y

8 m s<sup>-1</sup> (Poveda. & Mesa., 1999; Poveda & Mesa, 2000; Sierra et al., 2021; Yepes et al., 2019). Esta corriente es responsable de la abundante precipitación en el Pacífico colombiano, como se ha descrito anteriormente, y condicionan los patrones de circulación atmosféricos al interior del VGRC.

La ubicación más meridional del Chorro del Chocó durante los meses de febrero y abril se relaciona con la mayor fortaleza de las corrientes del LLJ del Caribe, haciendo que parte de la humedad que llega a la región Pacífica provenga del Mar Caribe. La posición más septentrional durante el segundo semestre del año se relaciona con el debilitamiento del LLJ del Caribe y el fortalecimiento de las corrientes provenientes del Pacífico Chileno-Peruano (Poveda. & Mesa., 1999; Poveda & Mesa, 2000; Sakamoto et al., 2011; Sierra et al., 2021; Yepes et al., 2019). Se ha establecido que sobre el Océano Pacífico (5°N y -80°W) el Chorro del Chocó presenta una altura promedio entre los 1,000 hPa (~0 msnm) y 900-850 hPa (~1,000 - ~1,500 msnm), siendo más fuerte entre los 1,000 hPa y 950 hPa (~500 msnm). Por lo general, el Chorro del Chocó presenta una mayor altitud promedio en el primer semestre del año (entre 1,000 y 850 hPa), frente al segundo semestre (entre 1,000 y 900 hPa) (Poveda. & Mesa., 1999; Poveda & Mesa, 2000; Yepes et al., 2019).

Durante la fase de El Niño el Chorro del Chocó se ve debilitado, reduciendo el transporte de humedad desde el Océano hasta el continente, reduciendo así la intensidad y número de fenómenos convectivos en el Pacífico colombiano. Caso contrario ocurre durante la fase de La Niña, donde la intensificación de los vientos Pacífico generan un mayor número e intensidad de fenómenos convectivos (Poveda. et al., 2006, 2011).

### 1.3 Simulación Meteorológica

Si bien el desarrollo de herramientas de teledetección satelital en las últimas décadas ha permitido estudiar la calidad del aire y diferentes condiciones meteorológicas, aún hay una serie de implicaciones a considerar antes de usar estas herramientas (Dubovik et al., 2021; Lamare et al., 2020). Por ejemplo, en regiones con una topografía irregular (desviación estándar de la elevación de la superficie dentro de un radio de 5 km mayor a 80 m), una alta carga de aerosoles y una alta cobertura nubosa no son representadas adecuadamente (Hu et al., 2018), como lo es el noroeste de Suramérica. Por lo tanto, el uso de herramientas como la modelación climática y de calidad del aire cobran mayor relevancia para estas regiones.

Una modelación es una representación de un objeto o sistema que tiene como objetivo mejorar el conocimiento y la comprensión de un fenómeno o proceso. Los modelos también deben permitir la evaluación de escenarios que representen diversas condiciones específicas de un fenómeno o proceso (Aldana et al., 2019). El desarrollo de los modelos de modelación climática a escala regional en las últimas décadas han permitido comprender y representar la relación entre las diferentes variables meteorológicas, la topografía y las sustancias emitidas a la atmósfera (naturales o antropogénicas) (Hernández et al., 2015; Tapiador et al., 2020). Comprender estos procesos atmosféricos permiten planificar las respuestas ante posibles contingencias relacionadas con el recurso aire y planificar el territorio (Banta et al., 2004; Darby et al., 2006), además, brindan información valiosa para el estudio de escenarios hipotéticos, el impacto de medidas de mitigación y frente a procesos que carecen de mediciones en campo (Žabkar et al., 2013).

Los diferentes modelos de simulación climática se clasifican en la mayoría de los casos según su escala espacial, según su escala temporal y según el método de simulación (probabilísticos o determinísticos). Dentro de los métodos de simulación, los modelos probabilísticos usan datos históricos para determinar por diferentes métodos estadísticos cuál es el comportamiento de las diferentes variables. Los métodos determinísticos o de difusión atmosférica buscan el mismo objetivo mediante la ejecución de diferentes ecuaciones que rigen las diferentes dinámicas atmosféricas. Entre estos últimos métodos se encuentran los modelos eulerianos (desde el punto de vista regional - estático), lagrangianos (desde el punto de vista de la parcela de aire - dinámico), entre otros modelos (Hernández et al., 2015).

Dentro de los modelos eulerianos más usados se encuentra el modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*). Este modelo desarrollado para realizar simulaciones a escala regional contaba para el 2021 con más 57,800 usuarios registrados en 160 países. WRF fue desarrollado en colaboración con diferentes organizaciones a finales de la década de 1990, entre ellas se encuentran el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR, por sus siglas en inglés), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (representada por los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés) y el Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre), la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, el Laboratorio de Investigación Naval, la Universidad de Oklahoma y la Administración Federal de Aviación (FAA, por sus siglas en inglés) (UCAR, 2023). El

modelo está conformado por un componente meteorológico (WRF) y un componente químico (WRF-Chem -*Weather Research and Forecasting Coupled with Chemistry*-). El componente químico tiene la capacidad de considerar procesos físicos y químicos como la emisión, mezcla turbulenta, transporte, transformaciones químicas e interacciones de especies gaseosas y aerosoles, fotólisis, radiación y deposición de contaminantes (González, 2017).

Espacialmente WRF se configura por medio de diferentes escalas de resolución espacial, en lo que se conoce como dominios de simulación. Los dominios se configuran desde una escala regional o sinóptica (primer dominio), hasta el nivel de mesoescala con dominios de menor tamaño sobre el área de interés con altas resoluciones (González, 2017).

WRF usa diferentes módulos para simular las diferentes dinámicas que rigen la atmósfera. Las definiciones presentadas a continuación son usadas por C.M. González., (2017) dentro de la modelación meteorológica y de calidad del aire en la ciudad de Manizales (Colombia):

- Parámetros meteorológicos, topográficos y usos del suelo: dentro del módulo de preprocesamiento WPS se definen los dominios de la simulación y se realiza la interpolación de los datos estáticos en los dominios. La función *Geogrid* es la fuente de los datos relacionados con la topografía, como la altura del terreno, categorías y usos de suelo, temperatura media del suelo, cobertura de vegetación, albedo y tipos de pendientes. La función *Ungrib* extrae información meteorológica por defecto con el modelo GFS (*Global Forecast System*). Mientras tanto, La función *Metgrid* interpola la información meteorológica (*Ungrib*) sobre la topografía (*Geogrid*).
- Parametrizaciones físicas: Este componente permite representar la interacción de las diferentes variables atmosféricas con los diferentes elementos presentes en la atmósfera, como, los océanos, montañas, vegetación, etc. Entre los principales parámetros que se deben configurar se encuentran:
  - Microfísica: En este componente se resuelven los procesos de condensación, evaporación y la fase en que se encuentra el agua en la atmósfera, tales como el vapor de agua, agua en la nube, lluvia, hielo en la nube, nieve y granizo pequeño.

- Cúmulos: Con este módulo se determinan los efectos a subescala de las nubes convectivas o someras, intentando representar el movimiento vertical de las nubes y compensatorios fuera de ellas.
- Capa limite planetaria (PBL): Este módulo es responsable de los flujos verticales distribuyendo la temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento horizontales sobre la columna de aire.
- Radiación: Dentro de este módulo se proveen los perfiles de calentamiento atmosférico debido al flujo radiativo de onda corta y larga que mantienen el balance energético del planeta.
- Procesos en superficie: Este módulo hace referencia a la frontera inferior o a la capa superficial, tipo de suelo y la superficie urbana, la cual condiciona el transporte vertical.
- Emisiones: La inclusión de emisiones antropogénicas o naturales se realiza con la activación del componente químico del modelo (WRF-Chem). El inventario de emisiones globales de origen antropogénico más usado es el EDGAR-HTAP y para las emisiones de origen biogénico o naturales es el módulo MEGAN (Li Ramírez et al., 2020). Sin embargo, el uso de inventario emisiones locales y regionales representan mejor las concentraciones de los diferentes contaminantes (Fernandez et al., 2010; González, 2017; Kumar et al., 2016).

Dentro de las mayores dificultades que presentan los modelos climáticos regionales recae en la representación de los procesos físicos relacionados con la precipitación como la microfísica de las nubes, la turbulencia de la PBL y el forzamiento radiativo. Estas limitaciones se hacen más evidente en las temporadas de verano cuando los procesos convectivos dominan, en especial en regiones con topografías complejas, donde la interacción entre el forzamiento radiativo inducido por la topografía y los usos del suelo suelen no ser representados adecuadamente (Gao et al., 2022; Gilliland & Rowe, 2007; Huang & Gao, 2017; Zhang et al., 2023). Otra de las dificultades recae en que la mayoría de los esquemas de cúmulos se han diseñado para resoluciones espaciales gruesas, haciendo que muchos procesos a altas resoluciones no se resuelvan correctamente (Gilliland & Rowe, 2007). Comúnmente se conoce como “zona gris” a las resoluciones espaciales donde típicamente los esquemas de cúmulos presentan los mayores sesgos, este rango comprende a las cuadrículas entre 10 y 1 km (R. Wang et al., 2021). Diversos

estudios han evaluado diferentes esquemas para representar adecuadamente esta zona gris mostrando algunas ventajas y desventajas. En algunas regiones de China y Estados Unidos el esquema de Grell-Freitas representa adecuadamente la variabilidad espacial y temporal, pero con una marcada subestimación de hasta un 50% en eventos extremos y en la llovizna durante el verano (Duzenli et al., 2021).

A pesar de ello el modelo euleriano WRF se ha usado en diversas regiones con topografías complejas a nivel mundial y en el país, mostrando que tiene la capacidad de representar adecuadamente la meteorología y su relación con la calidad del aire en estas regiones. En 2018 sobre el valle interandino del bajo Río Cauca (Departamento de Antioquia) se realizó la comparación entre los datos de reanálisis ERA-Interim y el modelo WRF para determinar la influencia del ENSO en las precipitaciones sobre los embalses que abastecen agua potable a cerca de 5 Mhab. Se demostró que los datos ERA-Interim sobreestiman las precipitaciones en la estación seca, mientras tanto, las simulaciones con WRF y el esquema de cúmulos KF mejoran sustancialmente la representación de las precipitaciones (R: 0.54), asociado a una mejor representación topográfica del área de estudio (Posada-Marín et al., 2019). En Chile con el esquema de microfísica WSM6, WRF pronostica adecuadamente la temperatura y las horas más lluviosas, aunque se obtiene una mayor precisión cuando la lluvia es causada por un sistema frontal meteorológico (Yáñez et al., 2018).

Además de la precipitación, los vientos también presentan un desafío al momento de la modelación. Una mala representación de los patrones de vientos puede provocar errores en la predicción de las concentraciones de los contaminantes (González, 2017; Souza et al., 2021). En la región costera de Bahía en Brasil se observa que WRF sobreestima la velocidad del viento, a pesar de mostrar similitudes entre las direcciones del viento simuladas y observadas. Asimismo, se pudo evidenciar que la precisión de la simulación en regiones costeras es menor en comparación con las regiones más alejadas de la costa (Souza et al., 2021).

Generalmente las simulaciones con WRF muestran una buena representación de la PBL en regiones con terrenos montañosos, sin embargo, el modelo presenta los mayores sesgos en el desarrollo de la PBL en los niveles bajos de la troposfera (<300 m) (Muñoz et al., 2023). Este mayor sesgo en los niveles bajos de la troposfera podría condicionar el transporte y la dispersión atmosférica de contaminantes, no obstante, este sesgo depende

del esquema y la resolución usada en el dominio de interés. En la ciudad costera de Santa Marta (Colombia) se usó WRF para representar el desarrollo diario de la PBL, evaluando diferentes esquemas, dentro de los cuales YSU y MYNN tuvieron el mejor desempeño (Arregocés et al., 2021).

Igualmente, las simulaciones con el componente químico activado (WRF-Chem) se ha usado en varias ciudades del país con el fin de comprender los problemas de calidad del aire, obteniendo resultados satisfactorios. Para la ciudad de Bogotá se ha usado para caracterizar las concentraciones de  $PM_{10}$  sobre la ciudad (Kumar et al., 2016) o determinar el impacto de las quemas de biomasa en regiones como la Amazonia en la calidad del aire de la ciudad (Ballesteros-González et al., 2020), entre otras aplicaciones. En Medellín se ha usado para describir los patrones de dispersión de  $PM_{2.5}$  (Eguis Cuentas & Jiménez, 2023; Lopez-noreña, 2016) y para determinar el impacto de los flujos de aire en las emisiones asociadas a las fuentes vehiculares (Heno et al., 2020), entre otras aplicaciones. En la ciudad de Manizales, una ciudad condicionada por la presencia del volcán nevado del Ruíz, se aplicó el modelo WRF-Chem con el fin de simular las concentraciones de  $PM_{10}$ ,  $SO_2$  y  $O_3$ , mostrando correlaciones superiores a 0.64 entre las simulaciones y mediciones locales (González, 2017).

## 1.4 Simulación de Trazadores Atmosféricos

La simulación con trazadores atmosféricos permite evaluar como los flujos de aire locales o regionales condicionan el transporte y la dispersión de diferentes contaminantes atmosféricos (Darby et al., 2006; Heno et al., 2020). Para representar y caracterizar el transporte y dispersión de los contaminantes atmosféricos en una región comúnmente se usan los denominados trazadores atmosféricos. Un trazador es cualquier sustancia emitida a la atmosfera que pueda usarse para rastrear la trayectoria de masas de aire. Dentro de los requisitos que debe tener un trazador es que su tiempo de vida sea mayor al del fenómeno de transporte que se está estudiando (AMS, 2023).

El monóxido de carbono (CO) es uno de los trazadores más usados, siendo este un indicador del transporte de masas de aire a escala regional y global, ya que su tiempo de vida de aproximadamente 2 meses le permite ser transportado largas distancias en la troposfera, pero no lo suficiente para mezclarse uniformemente (Pfister et al., 2004).

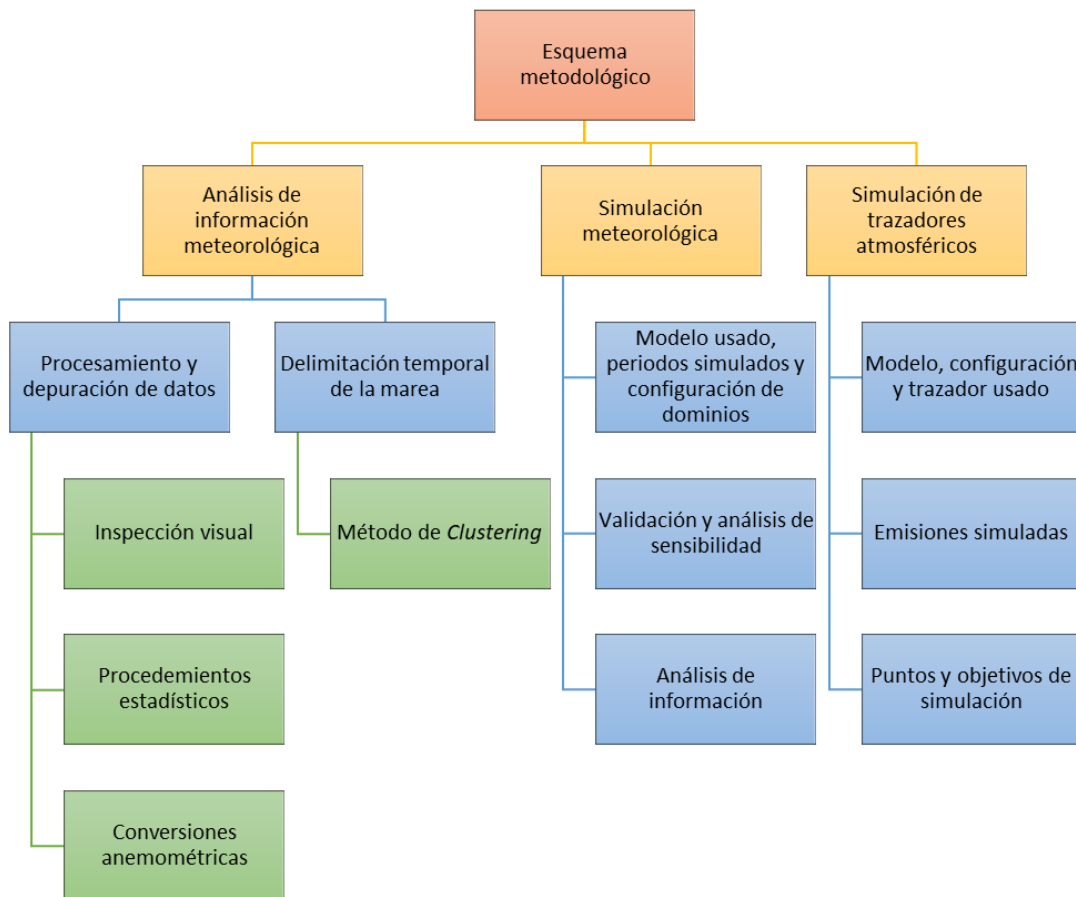


Como parte de las simulaciones con trazadores es importante resaltar que no es recomendable que se activen las reacciones químicas, ni se incluyan fuentes de emisión fuera del área de interés, ya que el objetivo principal de esta simulación es el transporte y la dispersión de los contaminantes y no como el trazador se relaciona con las demás contaminantes (Henao et al., 2020).



## 2. Metodología

En esta sección se presentan los diferentes procedimientos llevados a cabo para la identificación y caracterización de los patrones de circulación atmosférica en el VGRC y su impacto en el transporte regional de contaminantes. De manera general el esquema metodológico (**Figura 2-1**) presenta 3 enfoques que se desarrollan en las siguientes subsecciones; estas corresponden al análisis de información meteorológica, simulación meteorológica y simulación de trazadores atmosféricos.



**Figura 2-1.** Esquema general de los procedimientos aplicados en la presente investigación.

## 2.1 Análisis de información meteorológica en superficie y altitud

La información de las estaciones meteorológicas en el área de estudio se obtuvo a partir de diferentes entidades, tales como la CVC, el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia), el DAGMA (Departamento Administrativo de Gestión Ambiental de Santiago de Cali), la Universidad del Estado de Iowa en su portal ASOS-Network y la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira -UNP-; y la Universidad de Wyoming para los datos del radiosondeo sobre el aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón (AABA). Si bien la red meteorológica de Cenicaña sobre el VGRC es bastante extensa (<https://www.cenicana.org/tag/red-meteorologica-automatizada-rma/>), a pesar de varias solicitudes formales e informales no fue posible tener acceso a los datos horario de esta red. Igualmente se realizó la solicitud a la DIMAR (Dirección General Marítima, Autoridad Marítima de Colombia) sobre los datos históricos de algunas estaciones en la costa Pacífica colombiana (<https://dimar.maps.arcgis.com/apps/dashboards/48d2c76148af428789abae6b3a8789de>), sin embargo, los altos costos impidieron el acceso a esta información. Las fuentes de información y enlaces de descarga se encuentran en la **Tabla 2-1**.

**Tabla 2-1.** Fuentes de información meteorológica sobre el VGRC

Fuente	Forma de acceso a la información
CVC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Portal hidrometeorológico: <a href="https://ecopedia.cvc.gov.co/modulo-consulta">https://ecopedia.cvc.gov.co/modulo-consulta</a></li> <li>• Solicitud vía correo electrónico: <a href="mailto:atencionalusuario@cvc.gov.co">atencionalusuario@cvc.gov.co</a></li> </ul>
IDEAM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Portal de atención al ciudadano: <a href="http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/">http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/</a></li> <li>• Visor de datos instantáneos: <a href="http://visormapas.ideam.gov.co/datainmotion-geox/productos/generales/estaciones/automaticas/crudos/instantaneos/">http://visormapas.ideam.gov.co/datainmotion-geox/productos/generales/estaciones/automaticas/crudos/instantaneos/</a></li> </ul>
DAGMA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solicitud vía correo electrónico: <a href="mailto:calidadairedagma@cali.gov.co">calidadairedagma@cali.gov.co</a> y <a href="mailto:analistadatos@cali.gov.co">analistadatos@cali.gov.co</a></li> </ul>
UNP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suministrada por el profesor Germán Rueda Saa de la Facultad de Ingeniería y Administración de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira.</li> </ul>

Fuente	Forma de acceso a la información
Universidad del Estado Iowa	<ul style="list-style-type: none"> <li>Información meteorológica en superficie del AABA: <a href="https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml">https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml</a></li> </ul>
Universidad de Wyoming (radiosondeos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Información de los radiosondeos en el AABA con el código SKCL 80259: <a href="http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html">http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html</a></li> </ul>

Las variables en superficie analizadas corresponden a temperatura ambiente (T, °C), humedad relativa (HR, %), radiación solar global (RG, W m<sup>-2</sup>), precipitación (PP, mm), velocidad del viento (VV, m s<sup>-1</sup>) y dirección del viento (DV, (°) grados), para el 2018 con una resolución horaria. Para los radiosondeos se analizó información para el 2018 a las 7 HL (-5 UTC) de las variables T, HR, VV, DV, razón de mezcla de vapor de agua (w) y demás variables monitoreadas en los radiosondeos en función de la altitud (HGHT, m.s.n.m.) y la presión barométrica (PRES, hPa). De este proceso se obtuvo información de 25 estaciones (24 en superficie y 1 radiosondeo); la ubicación y variables monitoreadas en las diferentes estaciones se presentan en la **Tabla 2-2** y **Figura 2-2**.

**Tabla 2-2.** Coordenadas, entidad responsable y variables meteorológicas monitoreadas de estaciones ubicadas en el VGRC.

Abreviación	Nombre de la estación	Entidad	Latitud	Longitud	Altitud [m.s.n.m.]	Variables Meteorológicas	Uso del suelo
ACO	ACOPI	CVC	3.4963	-76.5070	950	T, HR, VV y DV	Industrial
AER (superficie)	Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón	AABA	3.5367	-76.3866	964	T, HR, RG, VV y DV	Suburbano
BA	Base Aérea	DAGMA	3.4545	-76.4997	969	T y HR	Urbano
BAS	Base Aérea	IDEAM	3.4545	-76.4997	969	RG	Urbano
CA	Cañaveralejo	DAGMA	3.4058	-76.5388	967	T, HR, PP, RG, VV y DV	Urbano
COR	Corinto	IDEAM	3.1791	-76.2477	1,107	T, HR, PP, VV y DV	Rural
PLA	El Placer	IDEAM	3.8789	-76.1006	2,132	T, HR, PP, VV y DV	Rural
VIN	El Vinculo	IDEAM	3.8348	-76.3000	980	T, HR, PP, VV y DV	Rural
ERA	Escuela Republica de Argentina	DAGMA	3.4504	-76.5223	978	T, HR, PP, RG, VV y DV	Urbano

Abreviación	Nombre de la estación	Entidad	Latitud	Longitud	Altitud [m.s.n.m.]	Variables Meteorológicas	Uso del suelo
ET	Estación Transitoria	DAGMA	3.4172	-76.4947	954	T y HR	Urbano
FAR	Los Farallones	IDEAM	3.4161	-76.6515	2,270	T, HR, PP, VV y DV	Rural
CUM	La Cumbre	IDEAM	3.6479	-76.5664	1,628	T, HR, PP, VV y DV	Rural
DIA	La Diana	IDEAM	3.3140	-76.1858	1,626	T, HR, RG, PP, VV y DV	Rural
ER	La Ermita	DAGMA	3.4554	-76.5309	994	T y HR	Urbano
FLO	La Flora	DAGMA	3.4905	-76.5212	965	T, HR, PP, RG, VV y DV	Urbano
IND	La Independencia	IDEAM	3.1854	-76.5693	985	T, HR, RG, PP, VV y DV	Rural
BRI	Las Brisas	IDEAM	4.7756	-76.1443	1,971	T, HR, VV y DV	Rural
PA	Pance	DAGMA	3.3053	-76.5325	960	T, HR, PP, RG, VV y DV	Suburbano
SAN	Santa Lucia	IDEAM	3.9291	-75.9406	2,903	T, HR, VV y DV	Rural
SIL	Siloé	IDEAM	3.4255	-76.5606	1,238	T, HR, VV y DV	Suburbano
UNP	Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira	UNP	3.5126	-76.3069	999	T, HR, RG, PP, VV y DV	Suburbano
UV	Universidad del Valle	IDEAM	3.3780	-76.5339	978	T, HR, PP, RG, VV y DV	Urbano
UVA	Universidad del Valle	IDEAM	3.3780	-76.5339	978	T, HR, PP, VV y DV	Urbano
ZAR	Zaragoza	IDEAM	4.6898	-75.9252	943	T, HR, VV y DV	Rural
AER (radiosondeo)	Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón	AABA	3.5367	-76.3866	964	HGHT, PRES, T, RH, VV, DV, w y etc.	Suburbano

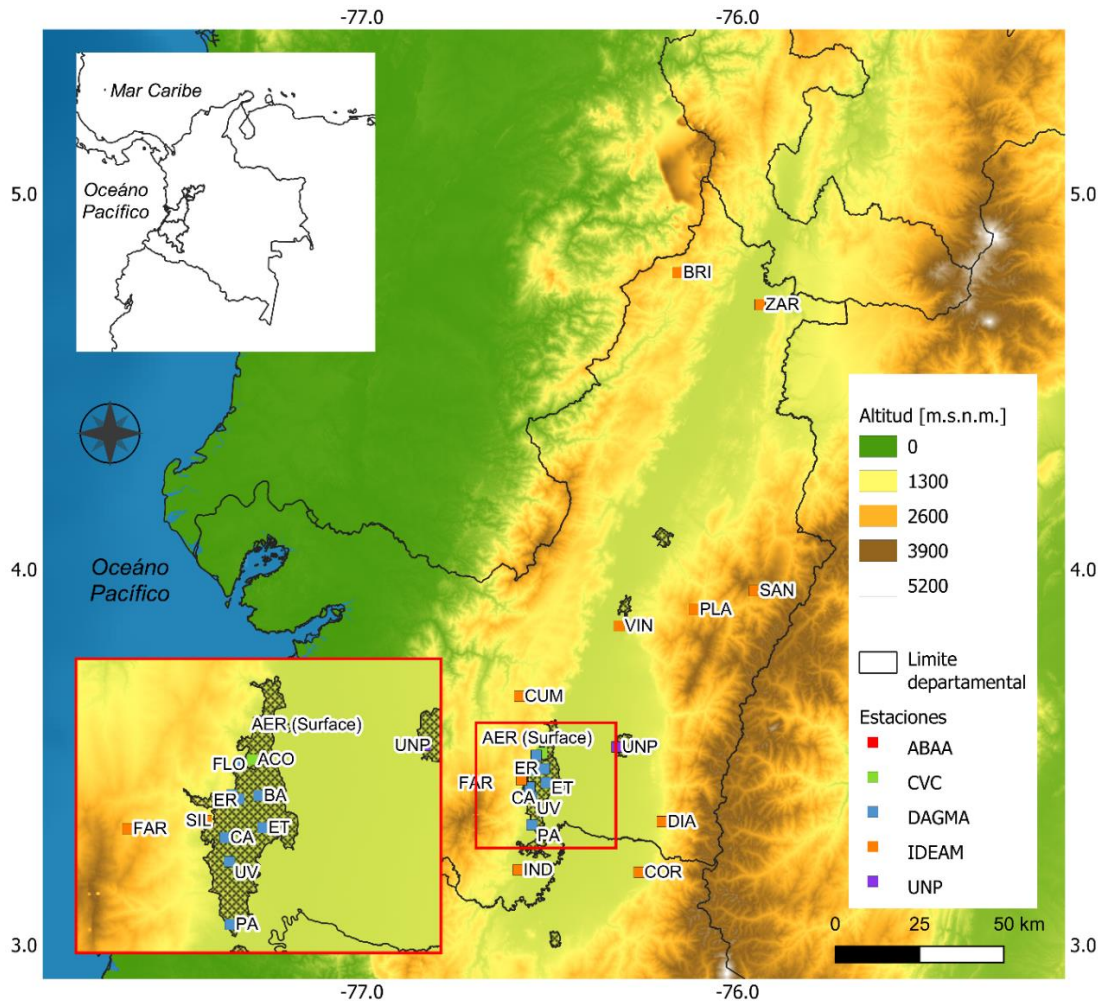


Figura 2-2. Ubicación de estaciones meteorológicas sobre el VGRC.

### 2.1.1 Procesamiento y depuración de datos

El procesamiento y depuración de las bases de datos, y las diferentes gráficas se realizaron a través del software estadístico R en su interfaz *R studio* (R Core Team, 2022). Como parte del proceso de depuración llevado a cabo en esta investigación se ha desarrollado un manuscrito sometido a publicación titulado “*Meteorological measurement and simulation dataset to understand the complex circulation over a tropical inter-Andean valley*” donde se describe a detalle este procedimiento y además, se encuentra disponible una base de datos con información meteorológica horaria entre 2010 y 2020 (Ardila et al., 2024). Este proceso de depuración de los datos se realizó a partir de la inspección visual de las series temporales, la implementación de diferentes criterios estadísticos y transformaciones anemométricas según la resolución temporal y espacial deseada.

La inspección visual permitió identificar anomalías excesivamente grandes (valor - media estacionaria), ya sean positivas o negativas, que estaban fuera de la variabilidad normal esperada o no covariantes en el tiempo, es decir, no correlacionadas con valores temporalmente cercanos de la misma variable física. A partir de esta inspección y la revisión de los límites para la validación de los datos meteorológicos en superficie del IDEAM (IDEAM, 2018) se establecieron los siguientes criterios para cada una de las variables:

**Tabla 2-3.** Criterios de depuración basados en la inspección visual y límites del IDEAM para las diferentes variables meteorológicas ubicadas en el VGRC.

Variable	Rango de depuración
HR	$0\% \leq HR < 100\%$
PP	$0 \text{ mm} < PP$
RG	$0 \text{ W/m}^2 < RG < 1300 \text{ W m}^{-2}$
T	$0^\circ\text{C} < T < 50^\circ\text{C}$
VV	$0 \text{ m s}^{-1} \leq VV$
DV	$0^\circ < DV < 360^\circ$

Fuente: (Ardila et al., 2023; Franco & Montejo, 2023)

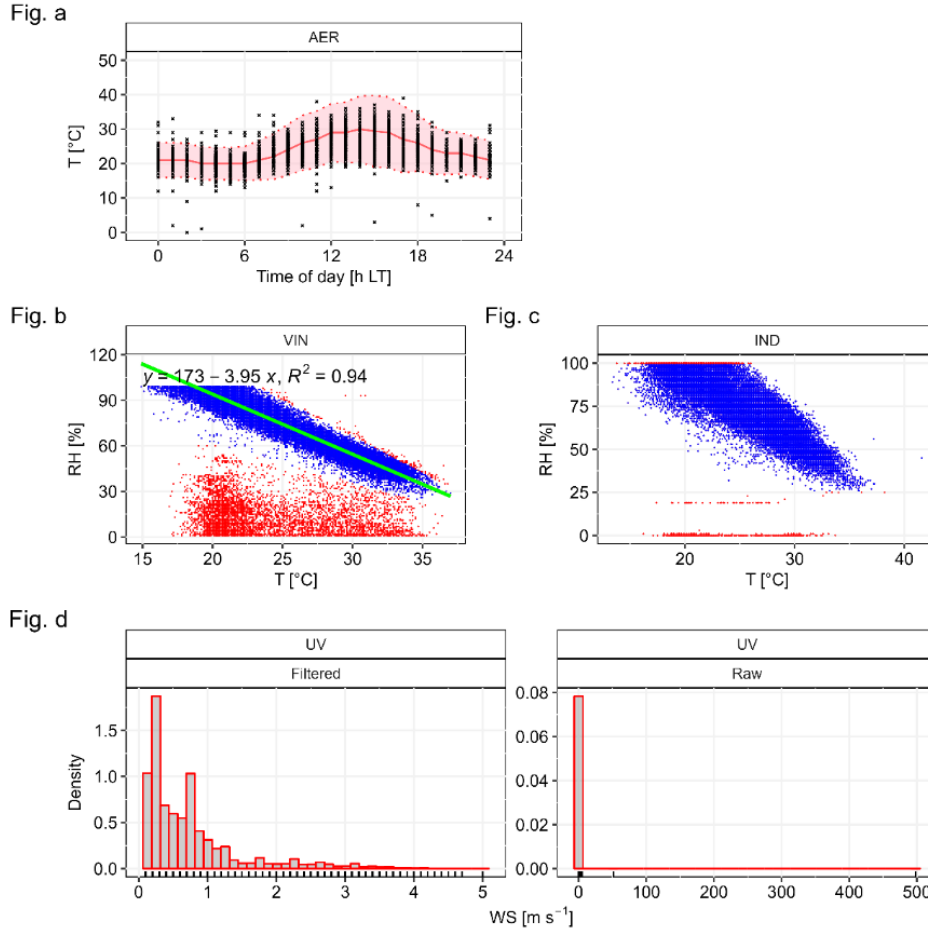
Posterior a la inspección visual se realizó una análisis estadístico y filtración de datos, el cual permitió identificar datos que se encontraban dentro de los límites establecidos anteriormente (**Tabla 2-3**), pero se consideran anómalos para determinado sitio o presentan un comportamiento temporal incoherente (Ardila et al., 2024). El análisis estadístico y filtrado de datos se realizó a partir de 3 procedimientos explicados a continuación (**Figura 2-3**):

- Anomalías referidas a los perfiles diarios de la mediana: Este criterio se aplicó para la temperatura y radiación solar global. A partir de la mediana horaria (línea roja) se establece un rango de 4 desviaciones estándar alrededor de esta (franja rosa entre las líneas punteadas rojas), lo cual permite identificar valores que dentro del conjunto general de los datos se consideraría como válido, pero temporalmente no lo sería, por ejemplo, temperaturas cercanas a los 30°C a las primeras horas del día (**Figura 2-3a**).



- Desviación de las curvas esperadas de temperatura y humedad relativa: En regiones tropicales la temperatura y la humedad relativa están estrechamente correlacionadas negativamente (Lawrence, 2005; Sun & Oort, 1995). Una vez realizada la depuración de la temperatura ambiente, se realiza la correlación lineal con la humedad relativa bajo el método de mínimos cuadrados, la cual permite identificar datos anómalos (puntos rojos) alrededor de las curvas de regresión lineal (línea verde) específicas para cada sitio (**Figura 2-3b**). Este método también permitió identificar valores constantes de humedad relativa inusuales (puntos rojos) a una temperatura variable (**Figura 2-3c**), los cuales también se han categorizado como atípicos.
- Anomalías en las densidades de frecuencias: Este criterio se aplicó para las variables de velocidad del viento y precipitación. A través de diagramas de dispersión como los histogramas de frecuencias se identifican los rangos óptimos donde se concentran la mayor cantidad de datos (primer panel) y valores extremos no explicados por distribuciones de densidades de frecuencias continuas y razonables (segundo panel) (**Figura 2-3d**).

Finalmente, se llevó a cabo la transformación y filtrado de datos anemométricos. Algunas estaciones en superficie reportan datos de vientos con resolución temporal de 10 minutos, por lo tanto, se realizó un promedio vectorial horario a partir de las componentes zonal (u) y meridional (v) del viento. Este procedimiento también se realizó de la misma manera para los vientos en altitud provenientes de los radiosondeos. Con el objetivo de homogenizar la representación de los datos en altitud se estableció una malla de referencia de 100 m, donde para cada celda de esta malla se realizó el promedio basado en las componentes vectoriales del viento.



**Figura 2-3.** Esquematización de los criterios estadísticos aplicados para las diferentes variables y estaciones sobre el VGRC. a) Rangos alrededor de la mediana horario para la temperatura. b). Correlación lineal entre temperatura y humedad relativa. c). Identificación de datos inusualmente repetidos para la humedad relativa. d). Histogramas de frecuencia para la velocidad del viento.

Fuente: (Ardila et al., 2023)

### 2.1.2 Delimitación temporal de la Marea

Los vientos que ventilan al VGRC desde la Cordillera Occidental en horas de la tarde se conocen localmente como la “Marea”, reportado por primera vez por López & Howell en 1967, sin embargo, no hay una especificación clara acerca de la temporalidad de este fenómeno. Por lo tanto, la definición temporal de este fenómeno es una parte fundamental de los análisis de resultados que se presentan en este documento.

La definición de la Marea se basó en un análisis de *clustering*, el cual permite generar agrupaciones dentro de un conjunto de datos en función de la similitud que pueda existir entre ellos. Dentro de los métodos de *clustering* que se pueden usar para definir temporalmente la Marea está el *k-means*, el cual de manera iterativa asigna un número de grupos ( $k$ ) en función de la mínima distancia posible de cada dato hasta el centroide de los grupos bajo el método de la distancia euclidiana al cuadrado (Nedbor-Gross et al., 2017; Russo et al., 2016).

Para la definición temporal de la Marea, se seleccionaron las estaciones ubicadas al interior del VGRC dentro del intervalo de la latitud del paso de menor altitud entre los Farallones de Cali (FC) y el Cerro Calima (CC); y entre ellas, las estaciones con el mayor porcentaje de datos anemométricos válidos durante el 2018. Una vez seleccionadas las estaciones se realizó la descomposición vectorial de los vientos en sus componentes zonal ( $u$ ) y meridional ( $v$ ), para luego ser llevados a un promedio horario. Posteriormente, estos promedios horarios de las componentes zonal y meridional del viento se les aplicó el método de *clustering k-means* con el paquete de análisis multivariado de R *studio* “Factoextra” versión 1.0.7. Este paquete clasifica los objetos de un conjunto de datos en múltiples grupos, de modo que los objetos dentro un mismo conjunto son lo más similares posible, mientras que los objetos externos a este grupo son lo más diferentes posible. Este agrupamiento está representado por un centroide que corresponde a la media de los datos del grupo (DATA NOVIA, 2020).

## 2.2 Simulación meteorológica

La simulación meteorológica se realizó con el modelo euleriano de simulación WRF (*Weather Research and Forecasting*) versión 4.2.2, en dos periodos del 2018 de 91 días cada uno. El primer periodo entre el 1 de julio y el 30 de septiembre, donde según los niveles de precipitaciones reportados por las estaciones meteorológicas, este periodo se caracterizó por presentar las más bajas precipitaciones del 2018. El segundo periodo se extiende desde el 28 de enero hasta 28 de abril, siendo un periodo de transición entre un periodo considerado como seco a la temporada de mayores precipitaciones. Este segundo periodo se caracterizó por presentar las mayores precipitaciones del 2018, en especial abril, y presentar la mayor cantidad de datos validos meteorológicos y de calidad del aire (parte fundamental del proyecto en el cual se desarrolló la presente investigación), además, de ser el periodo en el cual el Chorro del Chocó presenta la menor intensidad

promedio durante el año. En el año simulado (2018) se presentó una variación superior a los  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , pero inferior a los  $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$  en la temperatura superficial del océano Pacífico (CPC, 2023), indicando un ENSO débil con leves efectos en el área de estudio.

El modelo se configuro con 3 dominios anidados con una relación geométrica 1:5. Esta relación reduce el esfuerzo computacional hasta un 20% en comparación con una relación 1:3 y 4 dominios anidados, sin embargo, la relación 1:3 mejora hasta un 6% los valores simulados (Cifuentes et al., 2021). Esta mejora en el desempeño se observa principalmente en regiones de alta montaña, como ocurre por ejemplo en la ciudad de Manizales donde por encima de los 2,300 msnm la relación 1:5 muestra entre 1 y 3  $\text{m s}^{-1}$  de mayor intensidad en la magnitud de los vientos en comparación con la relación 1:3 (Cifuentes et al., 2021). No obstante, la leve mejora en el desempeño de las simulaciones, en especial regiones de alta montaña, no compensa el mayor tiempo computacional (Cifuentes et al., 2021).

El primer dominio de simulación (D1) se configuro con una resolución de 25 km, cubriendo a Colombia, norte de Ecuador, Perú y Brasil, este de Venezuela, a Panamá y parte del océano Pacífico y Mar Caribe ( $-83.9969^{\circ}\text{ W } -61.9371^{\circ}\text{ W}$ ;  $-8.3875^{\circ}\text{ N } 13.5150^{\circ}\text{ N}$ ). El segundo dominio (D2) presenta una resolución de 5 km, cubre el suroeste de Colombia y una fracción del Océano Pacífico ( $-78.6845^{\circ}\text{ W } -74.2276^{\circ}\text{ W}$ ;  $1.3965^{\circ}\text{ N } 5.8435^{\circ}\text{ N}$ ). El tercer y último dominio (D3) cubre el sur del VGRC, donde se concentra el 70% de la población y gran parte de los sectores industriales del VGRC, con una resolución de 1 km (extensión geográfica:  $-76.7262, -75.7359, 3.0385, 4.2068$ ) y un área de 14,300  $\text{km}^2$  (110 celdas en el eje longitudinal y 130 celdas en el eje latitudinal) (**Figura 2-4**). Una resolución de 1 km en un dominio anidado ha permitido representar satisfactoriamente las variables meteorológicas en regiones de topografía compleja, como la ciudad de Manizales (Cifuentes et al., 2021; González et al., 2018).

Al igual que la depuración y el análisis de información meteorológica, la metodología y los diferentes productos generados con las diferentes simulaciones se encuentran disponibles a detalle en el manuscrito sometido a publicación titulado “*Meteorological measurement and simulation dataset to understand the complex circulation over a tropical inter-Andean valley*”.

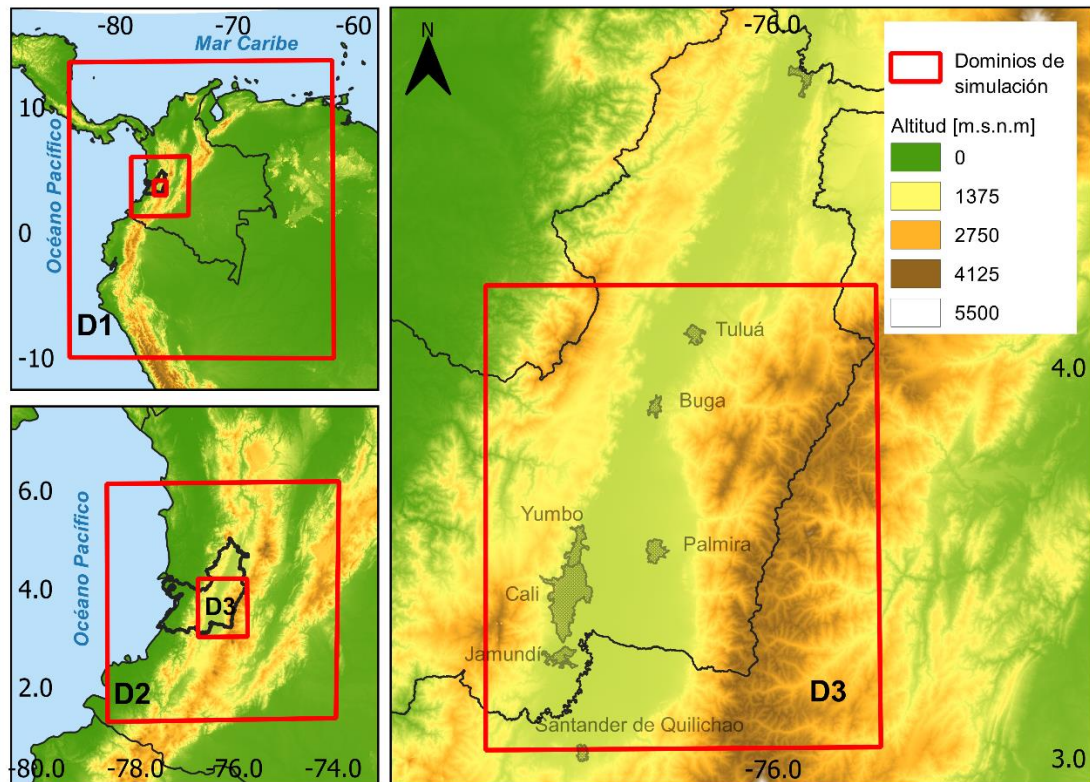


Figura 2-4. Configuración de dominios anidados en el área de estudio.

### 2.2.1 Validación de modelo y análisis de sensibilidad

Un análisis secuencial de cada uno de los esquemas de configuración del modelo permite identificar la configuración óptima que mejora la capacidad predictiva del modelo, dicho análisis se conoce como análisis de sensibilidad.

El desempeño de los análisis de sensibilidad y la validación de las simulaciones en los periodos de estudio se realizaron a través de diferentes métricas desempeño, las cuales indican que tan cerca o alejado está el modelo de los datos observados en superficie. Las métricas de desempeño usadas son:

- Sesgo medio (*Mean Bias*, MB): Este parámetro cuantifica la desviación del modelo o errores sistémicos con respecto a las mediciones en las estaciones, indicando si se sobreestima ( $MB > 0$ ) o subestima ( $MB < 0$ ).

- Error absoluto medio (*Mean Gross Error*, MGE): Este parámetro cuantifica si los errores del modelo son sistémicos o aleatorios, a través de la diferencia entre el valor observado y simulado.
- Raíz del error cuadrático medio (*Root Mean Square Error*, RMSE): Este parámetro permite determinar qué tan distanciados están los valores modelados con respecto a los valores reales.
- Coeficiente de Correlación de Pearson (R): Este parámetro indica si existe una relación lineal entre los valores simulados y los valores reales; un valor de 1 indica una relación totalmente directa y un valor de -1 indica una relación totalmente indirecta.

Las siguientes ecuaciones definen las métricas de desempeño anteriormente descritas. Donde  $P_i$  hace referencia a los valores simulados,  $O_i$  corresponde a los valores observados por las estaciones de monitoreo y  $N$  se refiere al número total de observaciones.

$$MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i - O_i$$

$$MGE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i|$$

$$RMSE = \sqrt{\left( \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \right)}$$

$$R = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left( \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma_P} \right) \left( \frac{O_i - \bar{O}}{\sigma_O} \right)$$

Con el fin de establecer si estos valores son aceptables para regiones con topografías categorizadas como simples o complejas, autores como Emery et al (2001), McNally (2009) y Talgo et al (2015) han propuesto algunos valores de referencia para algunas variables meteorológicas según estas métricas desempeño (**Tabla 2-4**).

**Tabla 2-4.** Valores de referencia para los estadísticos de desempeño según su topografía.

Topografía	Parámetro Estadístico	T [°C]	HR [%]	VV [m s <sup>-1</sup> ]	DV [°]	RG [W m <sup>-2</sup> ]
Simple	MB	$\leq \pm 0.5$	$\leq \pm 7$	$\leq \pm 0.5$	$\leq \pm 10$	$\leq \pm 75$
	MGE	$\leq 2$	---	---	$\leq 30$	---
	RMSE	---	$\leq 8.5$	$\leq 2$	---	$\leq 125$
	R	$\geq 0.9$	$\geq 0.7$	$\geq 0.7$	---	$\geq 0.9$
Complejo	MB	$\leq \pm 2$	---	$\leq \pm 1.5$	$\leq \pm 10$	---
	MGE	$\leq 3.5$	---	---	$\leq 55$	---
	RSME	---	---	$\leq 2.5$	---	---

Fuente: (Emery et al., 2001; McNally, 2009; Talgo et al., 2015)

Los análisis de sensibilidad llevados a cabo en la presente investigación permitieron evaluar algunas de las diferentes opciones que cada esquema del modelo de simulación ofrece y determinar cuál de estos se ajusta mejor a las condiciones del área de estudio. Como parte del análisis de sensibilidad se tomó como configuración base o inicial los esquemas y opciones presentadas en la **Tabla 2-5**.

**Tabla 2-5.** Configuración base usada en el análisis de sensibilidad.

Parámetro	Opción usada
<i>Spin-up time</i>	24 horas
Periodos de simulación	28 días (desde 2018-07-01 00:00:00 UTC hasta 2018-07-29 00:00:00 UTC)
Niveles verticales	35 niveles desde la superficie hasta los 50 hPa
Configuración de dominios	3 dominios anidados en una relación 1:5. D1: 25 km de resolución D2: 5 km de resolución D3: 1 km de resolución
Condiciones iniciales y bordes	NCEP GDAS FNL <i>analysis</i> (0.25° de resolución espacial y 6 h de resolución temporal)
Datos estáticos	Topografía: USGS Usos del suelo: MODIS
Técnica de anidamiento	One-way

Parámetro	Opción usada
<b>Parametrizaciones físicas</b>	
Microfísica	WSM6
Cúmulos	Grell-Freitas
PBL	ACM2
Radiación (SW/LW)	Dudhia
Capa superficial	Noah-LSM
Interacción tierra-superficie	Monin-Obukhov

Estas corridas previas y los análisis de sensibilidad resultantes cubrieron 28 días entre el 1 y 29 de julio de 2018, donde se evaluaron diferentes opciones para la información meteorológica de entrada (91 días, entre el 1 julio y 30 de septiembre), así como representaciones de usos del suelo y la topografía, y parametrizaciones de microfísica, radiación solar (onda corta -SW- y onda larga -LW-) y PBL. En cada uno de los 3 dominios se configuraron las mismas opciones en cada esquema, a excepción del esquema de cúmulos para el D3, donde se ha inhabilitado, como se suele recomendar para los dominios dentro de llamada “zona gris”. Cada una de las simulaciones se realizaron con un periodo de estabilización o *spin-up time* de 24 horas.

- Información meteorológica de entrada: Esta información se obtuvo de modelos climáticos regionales. En esta investigación se probó el impacto que tiene sobre el modelo utilizar los resultados de dos bases de datos diferentes, de un lado, los datos de análisis operacional NCEP GDAS/FNL con una resolución espacial de 0.25° (~28 km), 26 niveles de presión atmosférica (entre 1000 hPa y 10 hPa), una resolución temporal de 6h (00:00, 06:00, 12:00 y 18:00) y datos desde el 2015 hasta el presente. La segunda opción evaluada corresponde a los datos de reanálisis de NCEP CFSv2, con una resolución espacial que varía entre 0.2° a 0.5° (entre ~22 km a ~55 km), una resolución temporal de 6h (00:00, 06:00, 12:00 y 18:00), 37 niveles de presión atmosférica (entre 1000 hPa y 1 hPa) y datos desde el 2011 hasta el presente (Diaz et al., 2020, 2021; Saha et al., 2014).

Teniendo en cuenta que esta información presenta una baja resolución (6 horas, ~28 km), es necesario llevar esta información a una resolución más fina (1 hora, 1 km) sobre el dominio de interés. Este proceso se denomina “*Dynamic*



*Downscaling*", el cual consiste en utilizar la información de baja resolución, tomada de los modelos climáticos, para suministrar las condiciones iniciales y de contorno o frontera del dominio inicial (D1), luego de correr el modelo WRF para este dominio, sus resultados son usados como condiciones iniciales y de borde de un segundo dominio (D2) de una menor resolución y así sucesivamente hasta llegar a la resolución deseada (Tapiador et al., 2020). Las condiciones de contorno o frontera se actualizan cada 6 horas, según la resolución temporal de los modelos climáticos regionales.

- Usos del suelo: En el presente estudio se compararon dos bases de datos de usos de suelo y cobertura. En primer lugar, se empleó la asignación de usos del suelo predeterminada por el modelo WRF denominada *IGBP-Modified MODIS 20-category*, la cual presenta una resolución espacial de aproximadamente 1 km y fue actualizada con datos tomados entre los años 2001 a 2005. Como segunda opción se usó un archivo tipo *Shapefile* de usos del suelo y cobertura desarrollado por el Sistema de Información Ambiental de Colombia -SIAC- (Disponible en: <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>), el cual se desarrolló con la metodología *CORINE Land Cover* adaptada para Colombia, con una escala de 1:100.000, 33 categorías y datos recopilados entre el 2010 y el 2012.

No obstante, antes de incluir el archivo del SIAC al modelo fue necesario realizar un preprocesamiento cartográfico y una reclasificación de las categorías. El preprocesamiento consistió en realizar un recorte del archivo al área de interés y un cambio de formato, pasando de un formato *Shapefile* a *Raster*. La reclasificación de las categorías del SIAC consistió en llevar los 33 usos de usos del suelo de la metodología *CORINE Land Cover* al equivalente de la metodología *IGBP-Modified MODIS 20-category* (**Tabla 2-6**).

**Tabla 2-6.** Reclasificación de categorías de usos del suelo entre *MODIS* y *CORINE Land Cover*.

ID	<i>MODIS</i>	<i>CORINE Land Cover</i> adaptado para Colombia
01	<i>Evergreen Broadleaf Forest</i>	Bosque denso, Bosque abierto, Bosque fragmentado, Bosque de galería y ripario, Vegetación secundaria o en transición.

<b>ID</b>	<b>MODIS</b>	<b>CORINE Land Cover adaptado para Colombia</b>
02	<i>Grasslands</i>	Pastos limpios, Pastos enmalezados, Herbazal.
04	<i>Savannas</i>	Pastos arbolados, Mosaico de pastos con espacios naturales.
05	<i>Croplands</i>	Mosaico de cultivos, Otros cultivos transitorios, Cultivos permanentes arbustivos, Cultivos permanentes herbáceos.
06	<i>Open Shrublands</i>	NA
07	<i>Mixed Forests</i>	NA
08	<i>Cropland/Natural Vegetation Mosaic</i>	Mosaico de pastos y cultivos, Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, Mosaico de cultivos con espacios naturales.
09	<i>Evergreen Needleleaf Forest</i>	Plantación forestal.
10	<i>Woody Savannas</i>	NA
11	<i>Urban and Built-Up</i>	Zonas industriales o comerciales, Tejido urbano continuo, Tejido urbano discontinuo, Aeropuertos, Instalaciones recreativas.
12	<i>Deciduous Broadleaf Forest</i>	NA
13	<i>Closed Shrublands</i>	NA
14	<i>Water</i>	Ríos, Cuerpos de agua artificiales.
16	<i>Permanent Wetlands</i>	Lagunas, lagos y ciénagas naturales, Zonas pantanosas, Vegetación acuática sobre cuerpos de agua.
17	<i>Barren or Sparsely Vegetated</i>	Afloramientos rocosos, Tierras desnudas y degradadas, Zonas quemadas, Zonas de extracción minera.

NA: No Aplica

- Topografía: El modelo WRF utiliza como opción predeterminada la información topográfica extraída del producto *USGS GTOPO30*, el cual presenta una resolución cercana a 1 km. Como segunda opción, en este estudio se testeó el impacto de incluir información topográfica derivada del producto *Shuttle Radar Topography Mission 4 (SRTM4)* (disponible en: <https://srtm.csi.cgiar.org/download>), la cual tiene

una resolución espacial de 90 m. La información del SRTM4 debió ser escalada a una resolución de 1 km para ser incluida en el modelo.

- **Microfísica:** En este análisis de sensibilidad se testeó un esquema de microfísica de un solo momento, *WRF single-moment 6-class* (WSM6), y dos esquemas de dos momentos, *WRF double-moment 6-class* (WDM6) y *National Severe Storms Laboratory scheme* (NSSL). Los esquemas de un momento se caracterizan por solo predecir la masa de los hidrometeoros (partícula de agua suspendida en la atmósfera), mientras que los esquemas de dos momentos predicen la masa y el número de hidrometeoros de cada clase. Siendo estas clases, agua en fase líquida (pequeñas gotas de nubes o gotas de lluvia más grandes) y hielo (cristales pequeños, partículas de nieve, granizo y granizo suave) (Lim & Hong, 2010).
- **Radiación solar:** Los esquemas de radiación proporcionan el calentamiento atmosférico debido a la diferencia del flujo radiativo y la radiación de onda larga (LW) y corta (SW) para el balance del calor del suelo, teniendo cuenta la interacción con las nubes, diferentes gases atmosféricos y el vapor de agua. Dentro de este análisis de sensibilidad se probaron diferentes parametrizaciones de onda corta y onda larga, siendo estos *Dudhia/Rapid Radiative Transfer Model* (RRTM), *Rapid Radiative Transfer Model Global* (RRTMG), *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL) y *Goddard*.
- **PBL:** Como parte de este análisis se evaluaron dos esquemas no locales y dos locales. Los esquemas de cierre no local determinan la altura de la PBL utilizando el número de Richardson, es decir, a partir del diferencial entre la velocidad de ascenso de la parcela de aire (flotabilidad) y la temperatura potencial virtual. Por otro lado, los esquemas de cierre local estiman la altura del PBL a partir de la disminución en altitud de la energía cinética turbulenta (TKE) (Arregocés et al., 2021). Los esquemas no locales corresponden a *Yonsei University* (YSU) y *Asymmetric Convective Model version 2* (ACM2), mientras tanto, los esquemas locales corresponden a *Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 3* (MYNN3) y *Bougeault-Lacarrère* (BouLac).

El diseño experimental del análisis de sensibilidad permitió realizar 12 corridas que se presentan en la **Error! Not a valid bookmark self-reference.**

**Tabla 2-7.** Esquema aplicado en el análisis de sensibilidad

ID	Información meteorológica global	Usos del suelo	Microfísica	Radiación solar (SW/LW)	PBL	Topografía	Días de simulación
1	NCEP GDAS FNL	MODIS	WSM6	Dudhia / RRTM	ACM2	GTOPO30	91
2	NCEP CFSv2	MODIS	WSM6	Dudhia / RRTM	ACM2	GTOPO30	91
3	NCEP CFSv2	CORINE Land Cover	WSM6	Dudhia / RRTM	ACM2	GTOPO30	28
4	NCEP CFSv2	MODIS	WDM6	Dudhia / RRTM	ACM2	GTOPO30	28
5	NCEP CFSv2	MODIS	NSSL	Dudhia / RRTM	ACM2	GTOPO30	28
6	NCEP CFSv2	MODIS	WSM6	Goddard / Goddard	ACM2	GTOPO30	28
7	NCEP CFSv2	MODIS	WSM6	RRTMG / RRTMG	ACM2	GTOPO30	28
8	NCEP CFSv2	MODIS	WSM6	GFDL / GFDL	ACM2	GTOPO30	28
9	NCEP CFSv2	MODIS	WSM6	Dudhia / RRTM	BouLac	GTOPO30	28
10	NCEP CFSv2	MODIS	WSM6	Dudhia / RRTM	MYNN3	GTOPO30	28
11	NCEP CFSv2	MODIS	WSM6	Dudhia / RRTM	YSU	GTOPO30	28
12	NCEP CFSv2	MODIS	WSM6	Dudhia / RRTM	MYNN3	STRM4	28

### 2.2.2 Análisis de información

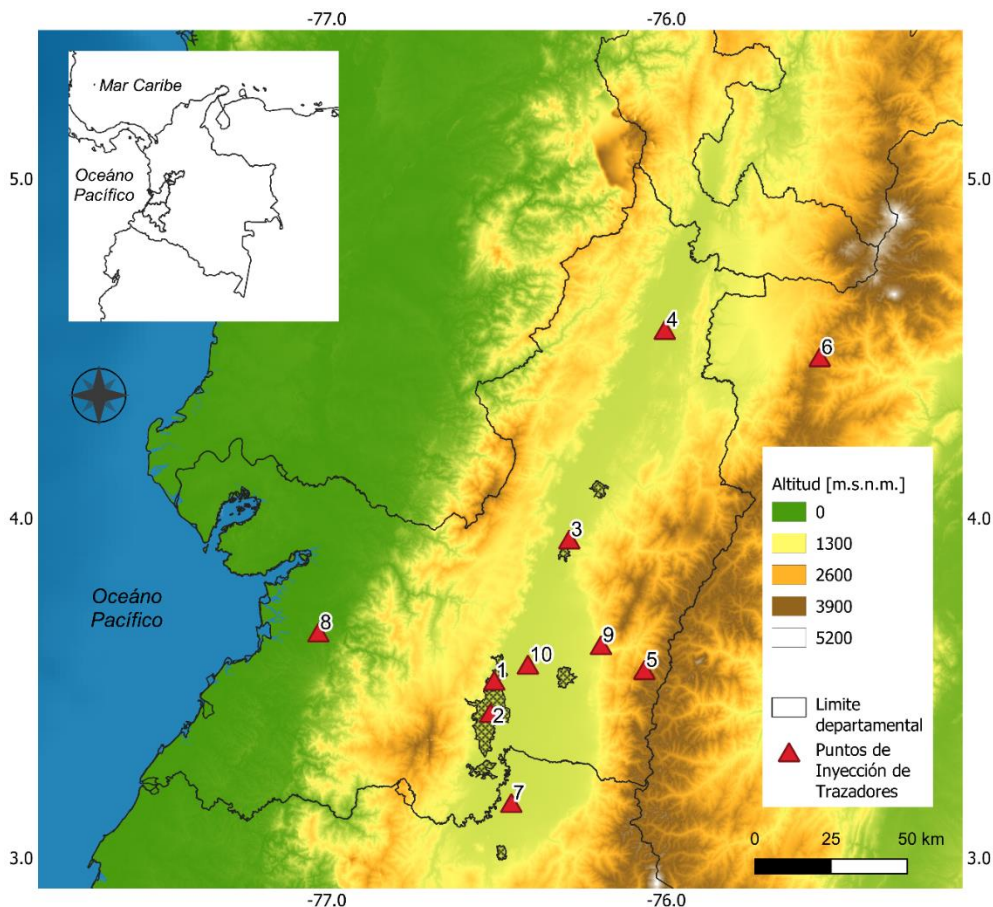
El procesamiento estadístico espacial y temporal de los diferentes archivos NetCDF (.nc) producidos en las simulaciones se realizó a través de comandos NCO (*NetCDF Operators*). El análisis estadístico para cada estación y variable se realizó a través del software estadístico R en su interfaz *R studio* (*R core Team, 2022*). Mientras tanto, la representación, análisis cartográfico, cambio de categorías (usos del suelo) y cambio de resolución espacial de la topografía (STRM4) se realizó en lenguaje Python a través de su interfaz *Spyder* (*Python Software Foundation, disponible en: <https://www.python.org/>*) y el software de sistemas de información geográfico QGIS (*QGIS Development Team, 2022*).

## 2.3 Simulación con trazadores atmosféricos

De manera complementaria a la simulación meteorológica se realizó una simulación con trazadores atmosféricos, con el fin de identificar como los patrones de circulación condicionan la calidad del aire sobre el VGRC, y a través de estos, identificar la extensión espacial típica de la contaminación asociada a las principales fuentes de emisión en el VGRC. Para determinar el transporte y dispersión de los diferentes contaminantes atmosféricos al interior del VGRC se inyectaron emisiones hipotéticas de monóxido de carbono (CO) en sitios relevantes, ya sea en términos de población, de emisiones o para propósitos de delimitación espacial. El CO es considerado un buen trazador del transporte y dispersión de masas de aire, ya que su tiempo de vida (~2 meses) es mucho más largo que el tiempo de residencia de los contaminantes en la capa límite planetaria, por lo que para propósitos prácticos puede considerarse cuasi-inerte. Por otro lado, su tiempo de vida no es lo suficientemente largo como para que se mezcle homogéneamente en la baja troposfera (Pfister et al., 2004), y que por tanto su concentración de fondo sea elevada.

Usando como base la configuración meteorológica resultante del análisis de sensibilidad, estas simulaciones se llevaron a cabo usando WRF con su componente químico activado, es decir, con WRF Chem (*Weather Research and Forecasting coupled with Chemistry*) versión 4.2.2, con el mecanismo químico CBMZ (*Carbon Bond Mechanism Z version*). La simulación se realizó por 3 días con 24 horas de *spin up time*, durante el periodo de menor influencia de las precipitaciones en la región, desde las 00:00 UTC del 1 de julio hasta las 00:00 UTC del 4 de julio de 2018. Las emisiones hipotéticas inyectadas corresponden a 13,000 toneladas anuales emitidas por el municipio de Palmira según el inventario global de emisiones EDGAR-HTAP (disponible en <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>), lo que equivale a emisiones de 2000 moles de CO inyectados en una hora en una celda de 1 x 1 km para el dominio D3 o 5 x 5 km en el dominio D2 (CVC & UNAL, 2022). Estas emisiones por pulsos se inyectaron en sitios relevantes sobre el VGRC (**Figura 2-5** y **Tabla 2-8**) a las 8 HL y 16 HL del segundo día, con el fin de observar el impacto de la marea y no marea en la dispersión y transporte de masas de aire en cada punto. En estas simulaciones no se consideró la inclusión de condiciones iniciales y de contorno químicas, ni tampoco emisiones biogénicas o antropogénicas diferentes a las del CO inyectado, garantizando que las concentraciones simuladas sean influenciadas únicamente por la emisión

inyectada y no por formación secundaria o concentraciones de fondo. Los resultados gráficos de la inyección de estas emisiones hipotéticas son presentados como concentraciones normalizadas en cada hora durante cada periodo (marea y no marea) con el objetivo de visualizar las trayectorias del CO en el área de estudio.



**Figura 2-5.** Puntos de inyección hipotética de CO en el área de estudio.

**Tabla 2-8.** Puntos de inyección de emisiones hipotéticas de CO y objetivo de simulación.

ID	Latitud	Longitud	Altitud [msnm]	Dominio	Objetivo de simulación
1	3.5124	-76.5064	950	D3	Visualizar el transporte y dispersión sobre el paso de menor altitud entre los FC y CC
2	3.4177	-76.5180	954	D3	Representar la dispersión y transporte sobre el principal centro poblado del área de estudio
3	3.8740	-76.2724	975	D3	Observar la influencia de la menor amplitud del valle al centro del VGRC

ID	Latitud	Longitud	Altitud [msnm]	Dominio	Objetivo de simulación
4	4.5455	-76.0043	920	D2	Observar los patrones de transporte y dispersión al norte del VGRC
5	3.5439	-76.0645	3,380	D3	Esquematizar la influencia de los vientos alisios del este al sur del VGRC
6	4.4652	-75.5480	3,083	D2	Esquematizar la influencia de los vientos alisios del este al norte del VGRC
7	3.0360	-76.4462	987	D2	Representar la dispersión y el transporte al extremo sur del VGRC
8	3,6544	-77.0245	100	D2	Visualizar el efecto de los vientos producidos en el Pacífico sobre el VGRC
9	3.6171	-76.1922	1,180	D3	Reflejar las condiciones de dispersión sobre el piedemonte de la Cordillera Central, en la región adyacente al paso de menor altitud entre FC y CC.
10	3.5367	-76.3866	1,000	D3	Esquematizar el comportamiento de los patrones de circulación en un punto central del VGRC.





## 3. Resultados

### 3.1 Depuración de datos meteorológicos y configuración final del modelo de simulación

#### 3.1.1 Depuración de datos meteorológicos

En términos generales, de los 4.71 millones de datos crudos obtenidos inicialmente y consolidados en la base de datos, el 83.25% son considerados como válidos (**Tabla 3-1**). La radiación solar (RG) fue la variable con menor porcentaje de datos válidos con un 62.37%. Esto se debió en gran parte a la identificación de un fenómeno conocido como el “*clipping*” en las series temporales de algunas estaciones. El *clipping* se presenta debido a que los convertidores de analógico a digital recortan las señales analógicas por debajo o por encima de sus límites de intervalo de digitalización a sus límites de digitalización inferior o superior (Brock & Richardson, 2001; Windrow et al., 1996). En vista de la rápida variabilidad de la RG en las regiones tropicales con una alta presencia de nubosidades, incluso al mediodía, las mediciones con *clipping* generan una falsa apariencia de variación en la serie temporal. Debido a que estos datos no se pudieron recuperar o estimar correctamente, las series temporales RG en estos sitios se tuvieron que recortar entre 9 y 15 horas HL.

**Tabla 3-1.** Número y porcentaje de datos válidos obtenidos en el proceso de depuración.

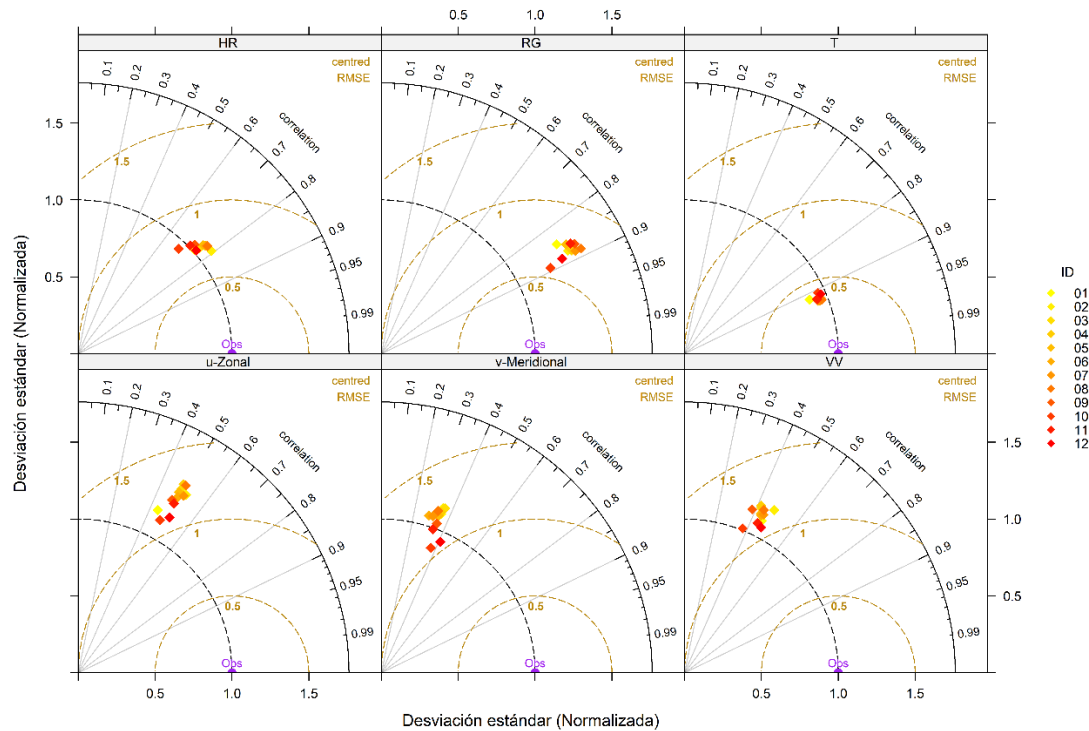
Variable	Datos obtenidos	Datos válidos	Datos válidos [%]
T	1'044,042	959,602	91.91
HR	1'149,446	898,388	78.16
PB	478,601	399,126	83.39
RG	198,966	124,094	62.37
PP	609,853	609,766	99.99
VV y DV	1'166,460	867,315	74.35

Variable	Datos obtenidos	Datos válidos	Datos válidos [%]
Radiosondeo	64,304	64,127	99.72
Total	4'711,672	3'922,418	83.25

Fuente: (Ardila et al., 2023; Franco & Montejo, 2023)

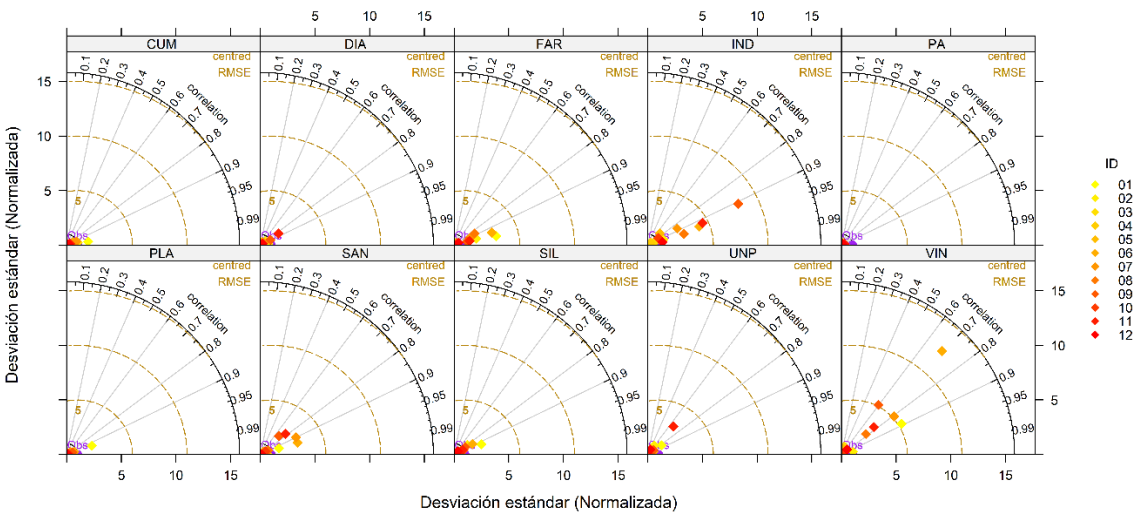
### 3.1.2 Configuración final del modelo de simulación

Los estadísticos de desempeño de cada una de las 12 simulaciones realizadas dentro del análisis de sensibilidad se resumen en la **Figura 3-1**, **Figura 3-2** y se presentan a detalle en el apartado Anexo A (**Tabla 4-1**). Las configuraciones implementadas subestiman la temperatura (T), presentando un MB entre -2.84 y -1.00 °C, un MGE entre 1.85 a 3.24 °C y con correlaciones (R) entre 0.91 y 0.93. Sin embargo, estos valores son inferiores al máximo aceptable para terreno complejo de MGE 3.5°C (**Tabla 2-4**). Con respecto a la humedad relativa (HR) las configuraciones testeadas muestran una subestimación generalizada, con MB oscilando entre -6.64 y 0.01 %, los cuales están dentro de los valores recomendados para terreno simple de ±7% (**Tabla 2-4**). Adicionalmente, las predicciones muestran correlaciones significativamente superiores al valor sugerido (>0.70), con un R entre 0.69 y 0.79. En relación con las componentes zonal (u) y meridional (v) del viento, la componente zonal es ligeramente subestimada por el modelo (MB: -0.29 a 0.14 m s<sup>-1</sup>) con correlaciones entre 0.44 y 0.52, la componente meridional está levemente sobreestimada (MB: 0.09 a 0.42 m s<sup>-1</sup>) con correlaciones de 0.29 a 0.41. En cuanto a la magnitud del viento (VV), los valores de MB obtenidos están entre 0.15 y 0.76 m s<sup>-1</sup>, mostrando una sobreestimación generalizada. Sin embargo, estos valores son mejores a que los valores propuestos para terreno complejo de 1.5 m s<sup>-1</sup>; con correlaciones que oscilan entre 0.37 y 0.48. En cuanto a la radiación solar (RG) las simulaciones muestran una sobreestimación (MB: 52.50 a 96.76 W m<sup>-2</sup>), que en algunos casos supera el límite de rendimiento recomendado de 75 W m<sup>-2</sup> (**Tabla 2-4**). Si bien, el modelo sobreestima la radiación solar, posiblemente como resultado de la subestimación de la cobertura nubosa, la temporalidad de la radiación solar en bien reproducida, con correlaciones de entre 0.85 y 0.89 (**Figura 3-2**).



**Figura 3-1.** Diagramas de Taylor para el desempeño de las diferentes configuraciones del análisis de sensibilidad para las variables de humedad relativa (HR), radiación solar global (RG), temperatura (T), velocidad zonal (u-Zonal), velocidad meridional (v-Meridional) y velocidad del viento (VV).

Con respecto a la precipitación (PP), las diferentes configuraciones testeadas muestran correlaciones entre 0.51 y 0.93 para las diferentes estaciones (**Figura 3-2**). Sin embargo, las configuraciones con las mejores correlaciones son las que presentan las mayores sobreestimaciones, en contraste con las configuraciones con menores correlaciones que presentan en promedio subestimaciones, por ejemplo, la configuración ID01 con una correlación de 0.93 presenta un MB de 52.09 mm y la configuración ID12 con una correlación de 0.78 presenta un sesgo (MB) de -73.3 mm.



**Figura 3-2.** Diagramas de Taylor para el desempeño de las diferentes configuraciones del análisis de sensibilidad para la variable de precipitación para las diferentes estaciones.

La discrepancia de los valores simulados a los observados es comparable a los obtenidos en diferentes investigaciones realizadas en regiones con topografías complejas dentro del país (Tabla 3-2). Arregocés., et al (2021) en simulaciones realizadas en la ciudad de Santa Marta, con el fin de encontrar la mejor configuración que represente la PBL y su impacto en la calidad del aire, se obtuvieron correlaciones entre 0.64-0.92, 0.43-0.81 y 0.71-0.90 con un MB entre  $-0.01^{\circ}\text{C}$  y  $-1.89^{\circ}\text{C}$ ,  $-0.38\text{ m s}^{-1}$  y  $192\text{ m s}^{-1}$ , 0.99% y 10.44% para la temperatura, velocidad del viento y humedad relativa, respectivamente. Para la ciudad de Manizales, con la finalidad de determinar el impacto de la inclusión de inventarios de emisiones locales en las simulaciones de calidad del aire se obtuvieron correlaciones entre 0.90-0.93, 0.60-0.65 y 0.17-0.25 con MB  $-2.22^{\circ}\text{C}$  y  $-2.01^{\circ}\text{C}$ , 2.58% y 6.62%,  $0.21\text{ m s}^{-1}$  y  $0.34\text{ m s}^{-1}$  para las variables de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, respectivamente (González et al., 2018). En el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, con el propósito de estudiar la dispersión de CO asociado a las fuentes móviles, se obtuvieron MB entre  $-1.60^{\circ}\text{C}$  y  $-0.93^{\circ}\text{C}$  para la temperatura y RMSE entre 2.06 y 2.61 para la velocidad del viento (Henao et al., 2020). En relación a las precipitaciones, estos valores son comparables a los presentados en regiones con topografías complejas como el sureste de China, donde a partir de la evaluación de varios esquemas de cúmulos en temporada considerada como seca, las diferentes simulaciones muestran correlaciones entre 0.6 y

0.9 con sesgos entre -60 mm y 90 mm (Gao et al., 2022; Zhang et al., 2023). Mientras tanto, en el departamento de Antioquia, en la región de los embalses alrededor del Río Cauca, con el propósito de modelar la precipitación durante El Niño entre 2009 y 2010, las simulaciones muestran una correlación de 0.54 (Posada-Marín et al., 2019).

**Tabla 3-2.** Comparación de los estadísticos de desempeño entre varias regiones y configuración óptima para el VGRC.

Variable (Estadístico)		VGRC (presente investigación)	Santa Marta (Arregocés et al., 2021)	Manizales (González et al., 2018)	Antioquia (*Henao et al., 2020; **Posada-Marín et al., 2019)	China (Gao et al., 2022; Zhang et al., 2023)
T	R	0.92	0.64, 0.92	0.90, 0.93	-	-
	MB (°C)	-2,20	-1.89, -0.01	-2.22, -2.01	-1.60, -0.93*	-
HR	R	0.75	0.71, 0.90	0.60, 0.65	-	-
	MB (%)	2.39	0.99, 10.44	2.58, 6.62	-	-
VV	R	0.47	0.43, 0.81	0.17, 0.25	-	-
	MB (m s <sup>-1</sup> )	1.49	-0.38, 1.92	0.21, 0.34	-	-
PP	R	0.78	-	-	0.54**	0.6, 0.9
	MB (mm)	-73.3	-	-	-	-60, 90

El uso de modelos climáticos regionales (ID1-ID2) no muestra diferencias significativas en los estadísticos de desempeño. No obstante, NCEP CFSv2 (ID2) muestra una leve mejoría en cuanto a la magnitud del viento y precipitación con un R de 0.48 y 0.75, respectivamente, frente a la simulación realizada con NCEP GDAS FNL con R 0.45 y 0.70, respectivamente. Por lo tanto, el análisis de sensibilidad continua con los datos de NCEP CFSv2.

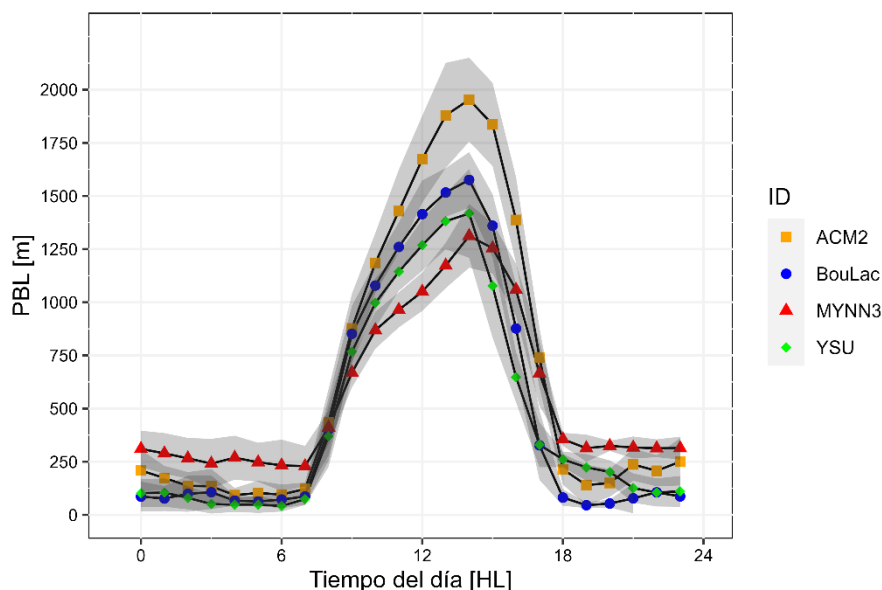
En el análisis basado en usos del suelo (ID3-ID4), no se evidencian diferencias considerables a pesar de que la opción de *CORINE Land Cover* (ID4) mejora la representación de los cultivos en la región. Por consiguiente, por facilidad práctica y de reproducibilidad del ejercicio se opta por usar la opción predeterminada del modelo, *MODIS* (ID3).

En general los esquemas de microfísica evaluados (ID5-ID6-ID7) muestran una subestimación en la precipitación acumulada. Al final de los 28 días, se observa que en la mayoría de las estaciones el modelo subestimó la precipitación acumulada. Ahora bien, la mejor correspondencia entre observaciones y datos modelados fue obtenida al emplear el esquema de microfísica WSM6 (ID6), con una correlación 0.72 y el menor sesgo con un MB -2.63 mm. La evaluación de estas opciones de microfísica no afectó considerablemente

las demás variables. Por ende, el análisis de sensibilidad continua con WSM6 como esquema de microfísica.

Las parametrizaciones testeadas para la radiación de onda corta y larga (ID5-ID6-ID7-ID8) no mostraron cambios significativos en los valores simulados de radiación, ni en las demás variables. De manera general, las opciones testeadas muestran una sobrestimación generalizada, sin embargo, los valores simulados de radiación son ligeramente más precisos (MB: 67.24 W m<sup>-2</sup>) con la opción Dudhia/RRTM (ID5).

Los esquemas de PBL (ID5-ID9-ID10-ID11) tuvieron un impacto notable en la simulación de la altura de capa de mezcla (**Figura 3-3**). ACM2 simuló capas de mezcla más altas durante el día, superando los 2,000 m. Mientras tanto, MYNN3 predijo la altura más baja durante el día, estando por debajo de los 1,500 m; no obstante, este esquema durante el periodo nocturno presento alturas de PBL mayores a los demás esquemas, de alrededor de 300 m. Al no contar con un completo perfil de PBL la selección del esquema se realizó teniendo en cuenta las demás variables. El esquema MYNN3 (ID10) redujo los errores y aumento la correlación para las variables de radiación solar (R: 0.87 y MB: 74.32 W m<sup>-2</sup>), humedad relativa (R: 0.73 y MB: -1.05%) y velocidad del viento (R: 0.44 MB: 0.39 m s<sup>-1</sup>).



**Figura 3-3.** Análisis de sensibilidad. Altura promedio de la PBL [m] sobre la estación Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón.

La evaluación de los cambios topográficos muestra una gran similitud en los valores simulados. Esta poca variabilidad se debe a que la mayoría de las estaciones usadas para la validación se encuentran en el fondo del valle, donde ambas opciones (GTOPO30 y SRTM4) son semejantes. No obstante, se decide continuar con SRTM4, ya que esta opción presenta un mayor nivel de detalle sobre las Cordilleras y se presume que mejora la representación a nivel general.

A partir del resultado de este análisis de sensibilidad se obtuvo que la configuración con mejor rendimiento es la ID12. La configuración ID12 presentó el mejor desempeño para las variables de velocidad del viento, componentes zonal y meridional del viento, radiación solar global y temperatura (R: 0.47, 0.51, 0.41, 0.89, 0.92; MB: 0.15 m s<sup>-1</sup>, 0.14 m s<sup>-1</sup>, 0.19 m s<sup>-1</sup>, 60 W m<sup>-2</sup>, -2,20°C; MGE: 1.49, 1.30, 1.30, 91.93, 2.59; respectivamente) y un comportamiento aceptable para la humedad relativa y precipitación (R: 0.75 y 0.78; MB: -2.39 % y -73.3 mm; MGE: 8.46 y 78.8; respectivamente). A partir de los esquemas testeados en la configuración ID12 y demás configuraciones del modelo se realizaron las simulaciones en los periodos de interés (**Tabla 3-3**).

**Tabla 3-3.** Configuración óptima usada en la simulación meteorológica en el VGRC.

Parámetro	Opción usada
<i>Spin-up time</i>	24 horas
Niveles verticales	35 niveles desde la superficie hasta los 50 hPa
Configuración de dominios	3 dominios anidados en una relación 1:5. D1: 25 km de resolución D2: 5 km de resolución D3: 1 km de resolución
Condiciones iniciales y bordes*	NCEP CFSv2 (0.25°, 6 h)
Datos estáticos*	Topografía: STRM4 Usos del suelo: MODIS
Técnica de anidamiento	One-way
<b>Parametrizaciones físicas</b>	
Microfísica *	WSM6
Cúmulos	Grell-Freitas
PBL*	MYNN3

Parámetro	Opción usada
Radiación (SW/LW) *	Dudhia/RRTMG
Capa superficial	Noah-LSM
Interacción tierra-superficie	Monin-Obukhov

\*Esquemas testeados dentro del análisis de sensibilidad

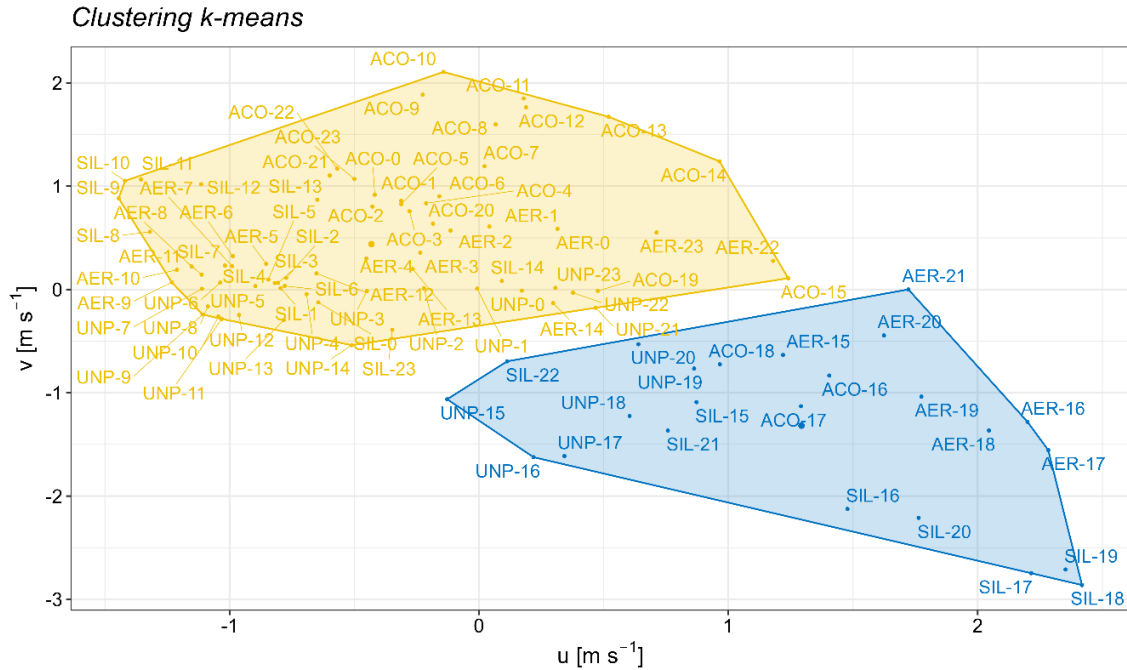
Partiendo de la evaluación de las diferentes parametrizaciones testeadas y el rendimiento de la simulación, en su configuración optimizada, se permite concluir que el modelo simula apropiadamente la meteorología en el VGRC, por lo tanto, es apropiado para investigar los patrones de circulación atmosféricos en el VGRC.

### 3.2 Delimitación temporal de la Marea

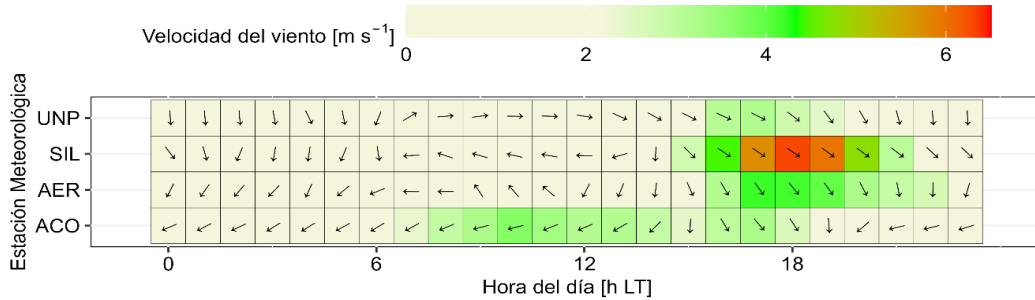
Las estaciones seleccionadas para definir temporalmente la Marea fueron SIL con el 98.5% de datos anemométricos válidos para el 2018, UNP con el 90.5%, ACO con el 88.8% y AER con el 74.4%. Al implementar el *clustering* bajo el método de *k-means* con los promedios horarios de los componentes vectoriales del viento para estas estaciones, se sugiere que los datos se pueden agrupar en dos categorías (**Figura 3-4**). La primera categoría (polígono azul) con los promedios horarios desde las 15 (SIL, UNP y AER) y 16 HL (ACO) hasta 18-22 HL (18: ACO, 20: UNP, 21: AER y 22: SIL), con vientos zonales positivos ( $1.3 \text{ m s}^{-1}$ , coordenada u del centroide) y meridionales negativos ( $-1.4 \text{ m s}^{-1}$ , coordenada v del centroide), indicando vientos de moderada intensidad provenientes del noroeste. La segunda categoría (polígono amarillo) contiene los promedios horarios del resto del día, con vientos zonales y meridionales positivos-negativos (u:  $-0.4 \text{ m s}^{-1}$  y v:  $-0.4 \text{ m s}^{-1}$ ), indicando vientos de baja intensidad sin una dirección del todo clara.

De manera complementaria, al analizar el promedio horario de la velocidad y dirección del viento de 2018 para estas estaciones (**Figura 3-5**), se observa que a partir de las 14-15 y hasta las 20-21 HL hay cambio en la dirección de los vientos asociado a un incremento en la magnitud. Estos vientos de la tarde e inicio de la noche provienen del noroeste, con magnitudes máximas alrededor de las 17-18 HL de hasta de  $6.3 \text{ m s}^{-1}$  en SIL,  $4.2 \text{ m s}^{-1}$  en AER y  $3.2 \text{ m s}^{-1}$  en ACO y UNP. El resto del día predominan los vientos de baja intensidad provenientes del norte, noreste y este, a excepción de ACO donde las mayores velocidades se observan a las 10 HL desde el este con magnitudes de  $3.7 \text{ m s}^{-1}$ .





**Figura 3-4.** Clustering realizado bajo el método de  $k$ -means para definir temporalmente el periodo de la marea.



**Figura 3-5.** Promedio anual horario del 2018 de la velocidad y dirección del viento para las estaciones ubicadas sobre el VGRC entre FC y CC.

De acuerdo con estos resultados se define a la Marea como aquel fenómeno que ventila al centro-sur del VGRC desde el noroeste a partir de las 14-15 HL hasta las 20-21 HL, siendo más intensa alrededor de las 17-18 HL. Este fenómeno se percibe con una mayor intensidad en las regiones cercanas a la vertiente oriental de la Cordillera Occidental sobre el paso de menor altitud entre FC y CC llegando a magnitudes cercanas a los 6 m s<sup>-1</sup>. La intensidad de estos vientos disminuye a medida que la Marea avanza al interior del VGRC. Por lo tanto, los resultados relacionados con la variable de vientos se presentan según esta definición de los periodos de Marea y no Marea (el resto del día).

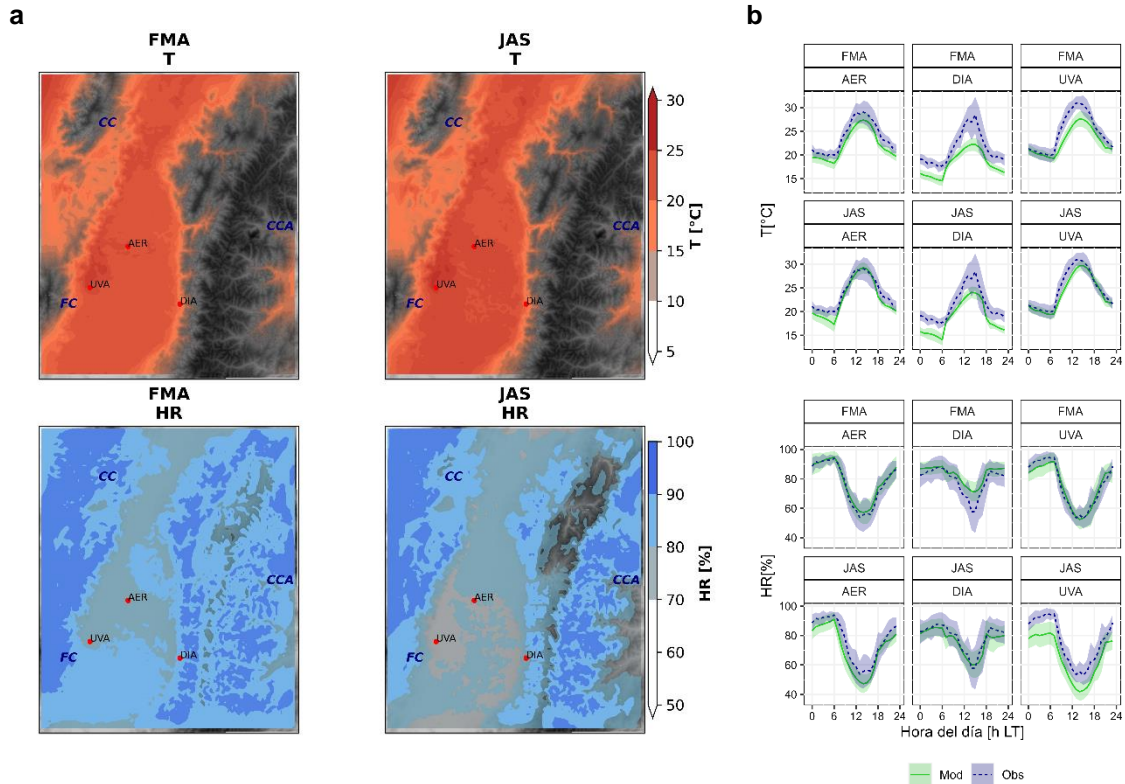
### 3.3 Análisis espacial y temporal de las diferentes variables meteorológicas

Los resultados y análisis presentados a continuación son producto de las simulaciones con WRF, centrándose en las variables de humedad relativa, temperatura, precipitación, radiación solar, razón de mezcla y vientos, tanto en superficie como en algunos casos en altitud. La representación y análisis de la dirección y velocidad del viento son presentadas según los periodos de Marea y No Marea, definidos anteriormente. Los valores de los estadísticos de desempeño por variable, estación y periodos completos analizados se encuentran en el Anexo A (**Tabla 4-1**).

#### 3.3.1 Humedad relativa y temperatura

La **Figura 3-6** muestra la distribución espacial y temporal de la temperatura y la humedad relativa en el área de estudio. En las estaciones de AER, DIA y UVA la simulación muestra una ligera subestimación en la temperatura en especial en primeras horas del día y en el periodo de julio a septiembre (JAS), con un MB de -1.40, -3.13 y -1.24°C respectivamente. Para humedad relativa la simulación presenta un perfil semejante al observado, sin embargo, en la estación UVA durante el periodo JAS se observa una subestimación con un MB de -7.14% y en la estación DIA en el periodo de febrero a abril (FMA) se observa sobrestimación con un MB de 4.07%.

Sobre el VGRC se observa una temperatura media diaria de 22-23°C, disminuyendo a medida que se asciende por las Cordilleras Central y Occidental llegando hasta los 2°C. Las máximas temperaturas se presentan en el periodo JAS entre las 13 y 15 HL llegando a 31°C en UVA, 28 °C en DIA y 29 °C en AER, mientras tanto, las temperaturas más bajas se presentan a las 5 - 6 HL con 17 °C en DIA y 20 °C para UVA y AER. En ambos periodos se observa una región cercana al flanco oriental de FC con una temperatura promedio de 25°C, esta zona se relaciona con los centros poblados de Cali y Yumbo, mostrando un efecto de isla de calor urbano de ~2°C.



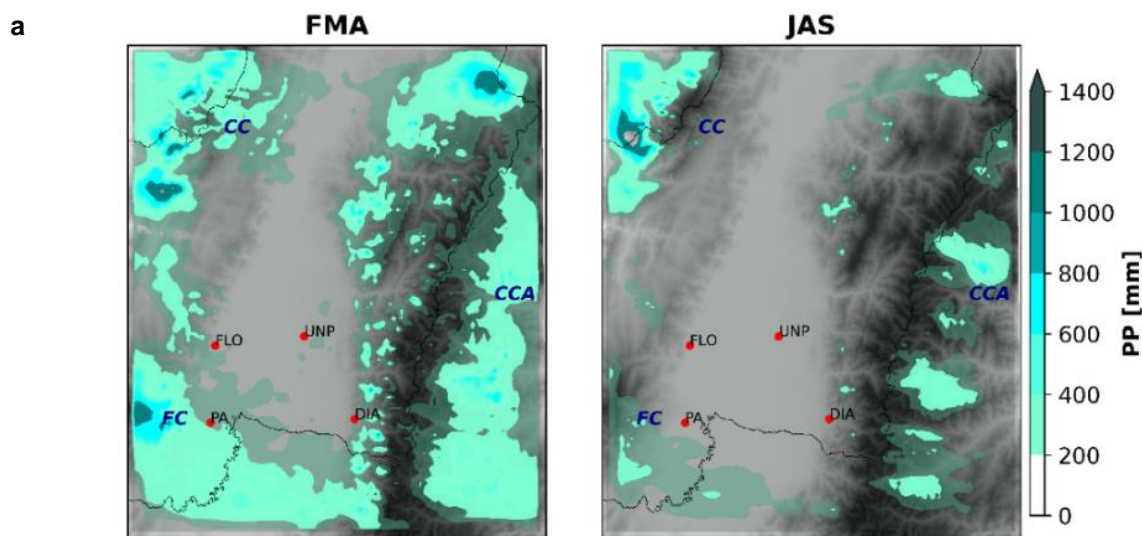
**Figura 3-6.** representación espacial y temporal de la temperatura (T) y humedad relativa (HR). a) Temperatura y humedad relativa promedio diaria en los periodos simulados. b) Comparación entre promedios horarios simulados (Mod) y observados (Obs) en los periodos simulados. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central.

López & Howell (1967), describieron que sobre la región adyacente al paso de menor altitud entre FC y CC, la entrada de los vientos del Pacífico arrastra la humedad hacia el costado occidental de la Cordillera Central, haciendo que sobre esta región adyacente se presenten las condiciones más secas del VGRC. Contrario a lo que ocurre en las regiones sobre la misma latitud de FC y CC, donde la barrera que ejercen estas montañas frente a los vientos del Pacífico hace que se genere un efecto de sombra y se presenten mayores contenidos de humedad. Este comportamiento se puede observar en ambos periodos simulados, en el periodo FMA, en algunas regiones sobre el costado oriental de la Cordillera Occidental y sobre los centros poblados de Cali y Yumbo se observan los menores contenidos de humedad asociados al efecto de arrastre de la marea, mientras tanto, el efecto de sombra que ejercen FC y CC hace que se presenten los mayores contenidos de humedad del VGRC, en especial sobre FC. Durante el periodo JAS los valores de la humedad relativa son en promedio un 6% más bajos que el periodo FMA,

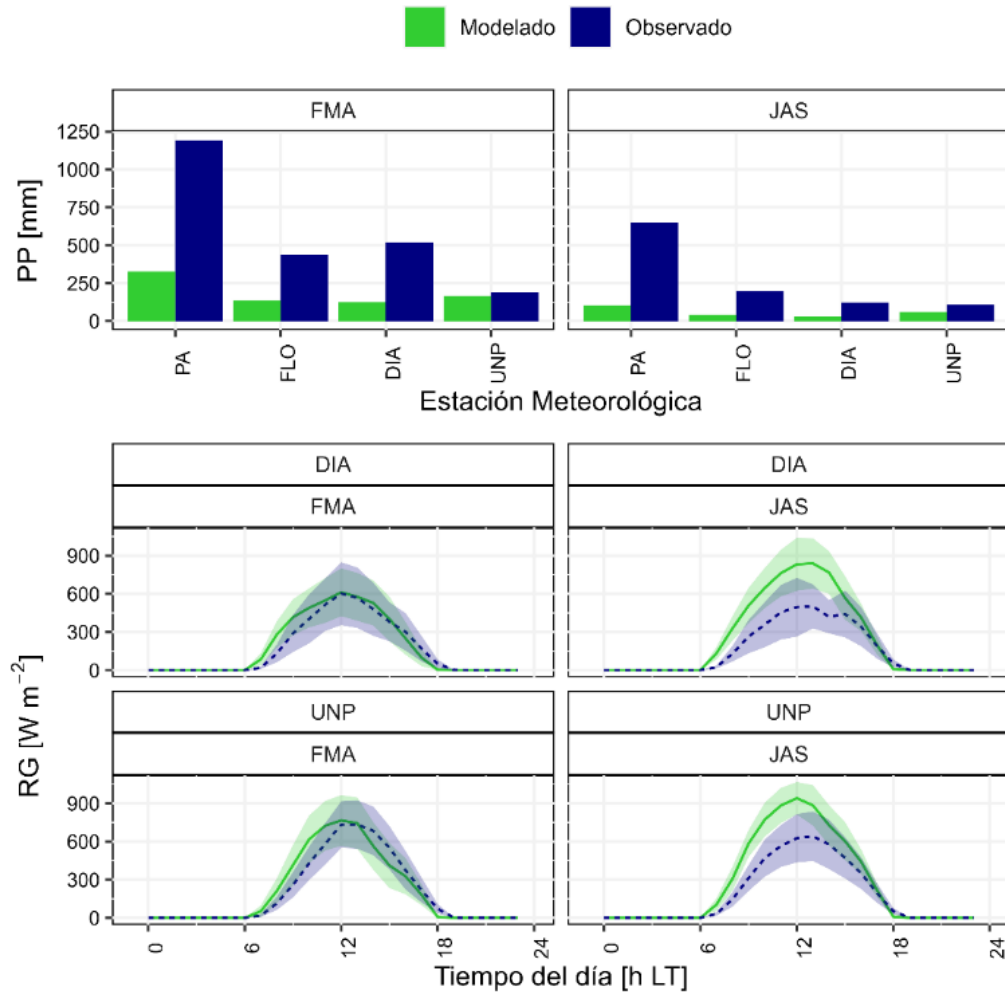
siendo más marcada esta diferencia al sur del VGRC y sobre las Cordilleras Central y Occidental, donde esta diferencia llega al 21%.

### 3.3.2 Precipitación y radiación solar

La **Figura 3-7** muestra la distribución espacial modelada de la precipitación acumulada y el perfil horario promedio de la radiación solar global en los periodos de simulación. La representación de la precipitación en el área de estudio presenta una subestimación generalizada con un MB promedio de -73.5 mm en el periodo JAS y -56 mm en FMA, siendo más evidente en algunas regiones. En la región donde se ubica la estación de PA, a sombra de FC, presenta un MB de - 417.65 mm en el periodo JAS y -381.23 mm en el periodo FMA, a pesar de tener correlaciones de 0.53 y 0.98, respectivamente, mientras tanto, en la estación UNP en el periodo FMA presenta un MB de -12 mm con una correlación de 0.96, en comparación, con un MB de -52.32 mm y una correlación de 0.46 en el periodo JAS. Esta mayor subestimación en el periodo JAS, se relaciona con la sobreestimación generalizada en la radiación solar durante este periodo con un MB de 85 y 97  $W\ m^{-2}$  para UNP y DIA, respectivamente, evidenciando que el modelo no representa adecuadamente las nubosidades durante este periodo, lo que lleva a una menor precipitación y mayor radiación solar.



b



**Figura 3-7.** a) Representación espacial de precipitación acumulada en los periodos de simulación. b) Comparación de radiación solar promedio horaria y la precipitación acumulada entre observaciones (Obs) y los periodos simulados (Mod). FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central.

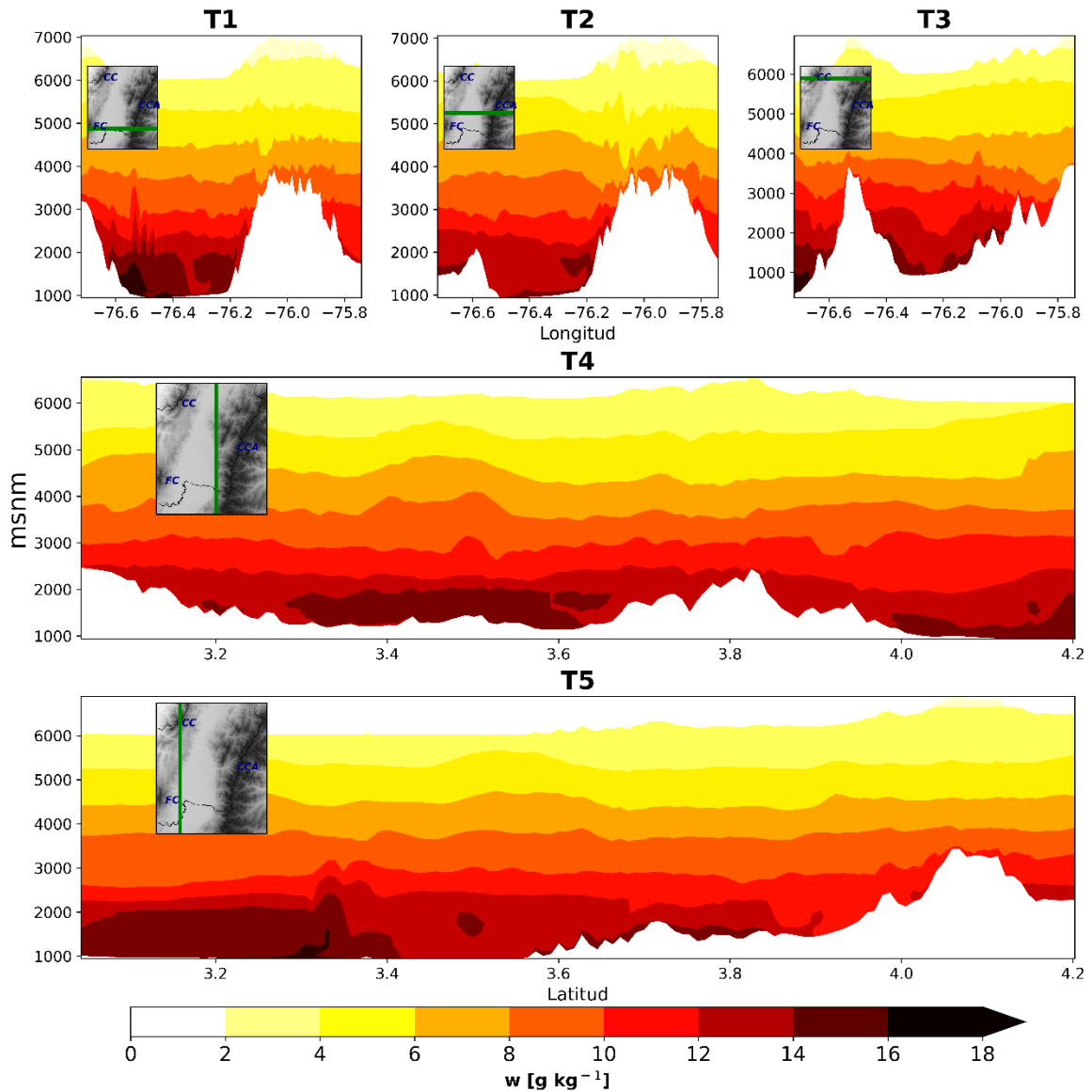
Al interior del VGRC las precipitaciones son bastante irregulares como la ha descrito López & Howell (1967). Semejante a lo que ocurre con la humedad relativa, esta variabilidad se relaciona con la presencia de FC, CC y el paso de menor altitud entre ambas montañas. Los efectos del arrastre de humedad disminuyen la probabilidad de que se formen fenómenos convectivos de pequeña escala y se presenten efectos de sombra al interior del VGRC haciendo que las regiones cubiertas por estas montañas presenten mayores niveles de precipitaciones en especial sobre los FC. Según las simulaciones realizadas las mayores precipitaciones se presentan al norte del VGRC con 1,000-1,200 mm acumulados

en el periodo FMA y 600 - 500 mm en JAS (Anexo B, distribución espacial de las precipitaciones el dominio D2, **Figura 4-1**), mientras tanto, al sur del VGRC a sombra de FC las precipitaciones están entre 1,000 y 800 mm en FMA y entre 200 y 300 mm en JAS. A la misma latitud de FC, pero sobre el piedemonte de la Cordillera Central las precipitaciones están entre 400 y 500 mm en FMA y 100 – 200 mm en JAS. En la región adyacente al paso entre FC y CC las precipitaciones disminuyen considerablemente estando entre 100 y 200 mm en FMA y entre 30 y 80 mm en JAS. En la región central, a sombra de CC, estas precipitaciones están entre 150 y 250 mm en FMA y entre 50 y 100 mm en JAS, no obstante, en la parte alta de la vertiente occidental de la Cordillera Central se presentan precipitaciones de hasta 800 mm en FMA y 600 mm en JAS (**Figura 3-7a**).

Este comportamiento produce regiones con diferencias considerables en los niveles de precipitación a pesar de estar a una corta distancia y a una altitud semejante. Al comparar las precipitaciones acumuladas en las estaciones de monitoreo (**Figura 3-7b**), la estación PA ubicada a la misma latitud de FC y la estación FLO, ubicada el norte de la ciudad de Cali sobre el paso de menor altitud, las precipitaciones en FLO (438 mm) representan el 37% de las precipitaciones en PA (1,191 mm), a pesar de estar a ~20 km de distancia y a la misma altitud. Este comportamiento también se observa a una latitud semejante sobre el costado occidental de la Cordillera Central, por ejemplo, la estación UNP (190 mm), ubicada en un punto central del VGRC y sobre la misma latitud del paso de menor altitud, las precipitaciones representan el 37 % de lo presentado en la estación de DIA (518 mm), ubicada en el piedemonte de la Cordillera Central y sobre la misma latitud de FC, a pesar de estar distanciadas ~38 km y estar a la misma altitud. Esta diferencia aumenta en el periodo JAS, donde FLO (197 mm) representa el 31% de las precipitaciones de PA (648 mm) y disminuye para las estaciones de UNP y DIA, donde UNP (107 mm) representa el 88% de las precipitaciones de DIA (122 mm).

Este arrastre de humedad producido por los vientos de la marea sobre la región adyacente al paso de menor de altitud transporta la humedad hacia la vertiente occidental de la Cordillera Central generando un efecto de resalto hidráulico. La altura de este resalto varía entre 1,400 y 2,000 m, siendo mayor en la temporada con mayores precipitaciones (López & Howell, 1967). La **Figura 3-8** muestra el perfil en altitud de la razón de mezcla del vapor

de agua ( $w$ ) a las 16 HL a diferentes cortes a nivel latitudinal y longitudinal sobre el VGRC durante el mes de abril.



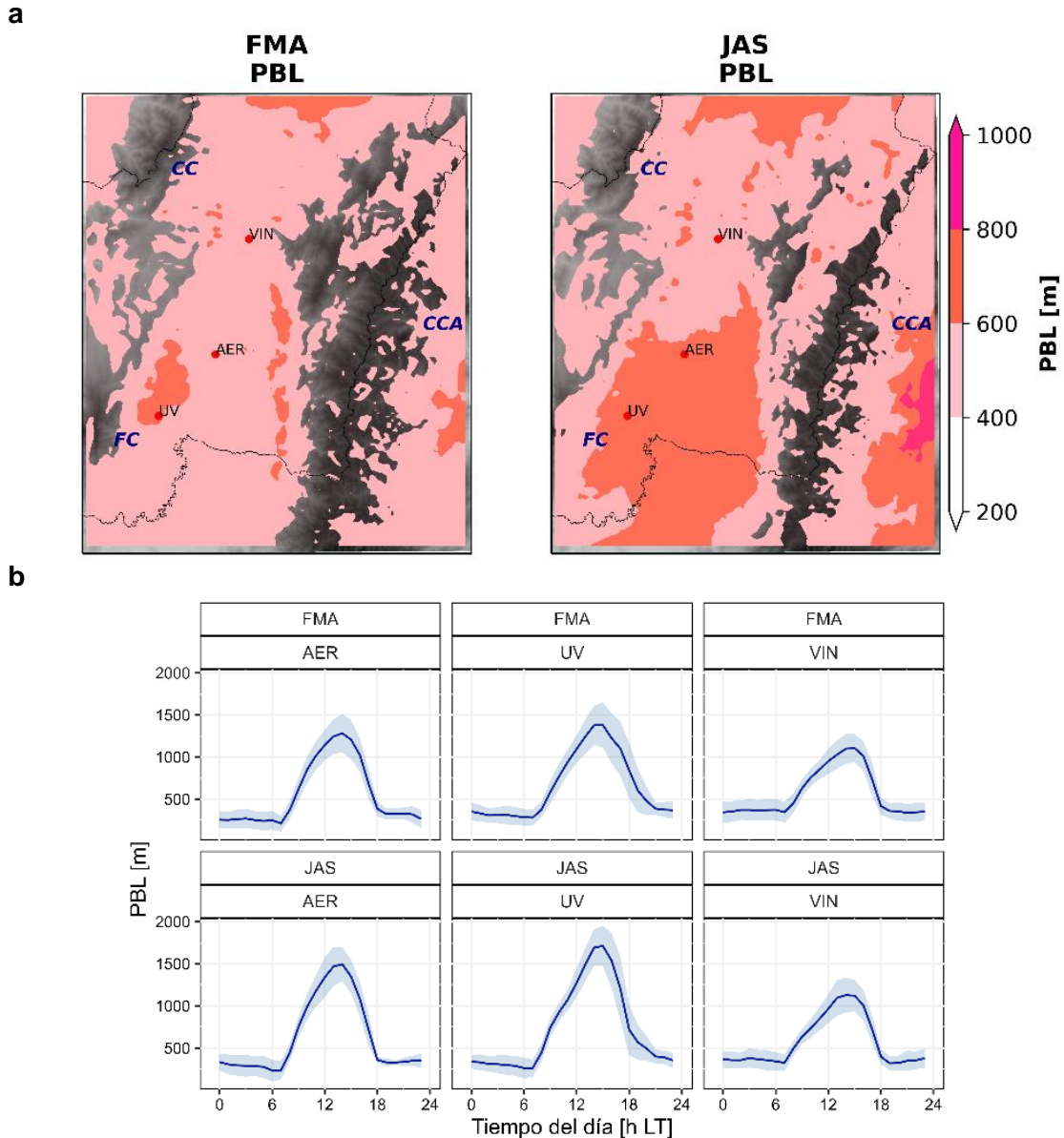
**Figura 3-8.** Perfil vertical promedio de la razón de mezcla del vapor de agua ( $w$ ) a las 16 HL en el mes de abril de 2018, en el dominio D3. T1: corte latitudinal sobre FC (Lat: 3.314), T2: corte latitudinal sobre AABA (Lat: 3.531), T3: corte latitudinal sobre CC (Lat: 4.055). T4: corte longitudinal sobre el piedemonte de la vertiente occidental de la Cordillera Central (Lon: -76.181). T5: corte longitudinal sobre el piedemonte de la vertiente oriental de la Cordillera Occidental (Lon: -76.520). FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central.

Sobre T1, a la latitud de FC, se evidencia una mayor concentración de humedad en el flanco oriental de la Cordillera Occidental (-76.6°W), relacionándose con las mayores precipitaciones reportadas en la estación PA. En T2, a la latitud del paso de menor altitud en la Cordillera Occidental, se observa un mayor contenido de humedad a nivel superficial y un ascenso de humedad sobre la vertiente occidental de la Cordillera Central con una altura promedio de ~1,200 m y una extensión de ~40 km (entre 3.2°N y 3.6°N) como se observa en T4, distancia comparable a los ~50 km que hay entre FC y CC sobre la Cordillera Occidental. A la latitud de CC (T3), se observa un menor contenido de humedad en comparación con los demás perfiles, asociado al efecto de arrastre de humedad producido por la marea, la cual se concentra alrededor de los 4.1° N sobre la Cordillera Central, relacionándose con las altas precipitaciones presentadas en este punto. En el corte T5, sobre el flanco oriental de la Cordillera Occidental, en las latitudes más bajas se observa la mayor concentración de humedad relacionada con la presencia de FC, a medida que asciende latitudinalmente se observa un menor contenido de humedad relacionado con el paso de menor altitud.

### 3.3.3 Capa límite plantearía - PBL

La altura promedio de 3,500 msnm de la Cordillera Central y los vientos alisios del este ejercen un efecto de cizalla, la cual hace que la altura máxima que podría alcanzar la PBL al interior del VGRC sea de ~2 km (1,000 y 3,000 msnm), no obstante, esta presenta una alta variabilidad espacial y temporal. A lo largo del día las mayores alturas se presentan entre las 14 y 15 HL con una altura promedio de 1,712 m en el periodo JAS y 1,380 m en FMA para estación UV; 1,495 m y 1,282 m para la estación AER; 1,127 m y 1106 m para la estación VIN, respectivamente. Las menores alturas se presentan entre las 6 y 7 HL con alturas entre 230 m y 323 m en el periodo JAS; y entre 212 m y 345 m en FMA (**Figura 3-9b**). A partir de allí y la distribución espacial promedio diaria de la PBL (**Figura 3-9a**) se identifica que las mayores alturas se presentan durante el periodo JAS, en especial al sur del VGRC (700-800 m) y un poco más bajas (600-750 m) en la temporada de mayores precipitaciones (FMA), donde las mayores alturas de la PBL se observan sobre la región correspondiente a los centros poblados de Cali y Yumbo; y sobre el piedemonte de la Cordillera Central relacionado con los efectos de isla de calor urbano y de resalto hidráulico descrito anteriormente (Sección 3.3.2. Precipitación y radiación solar).

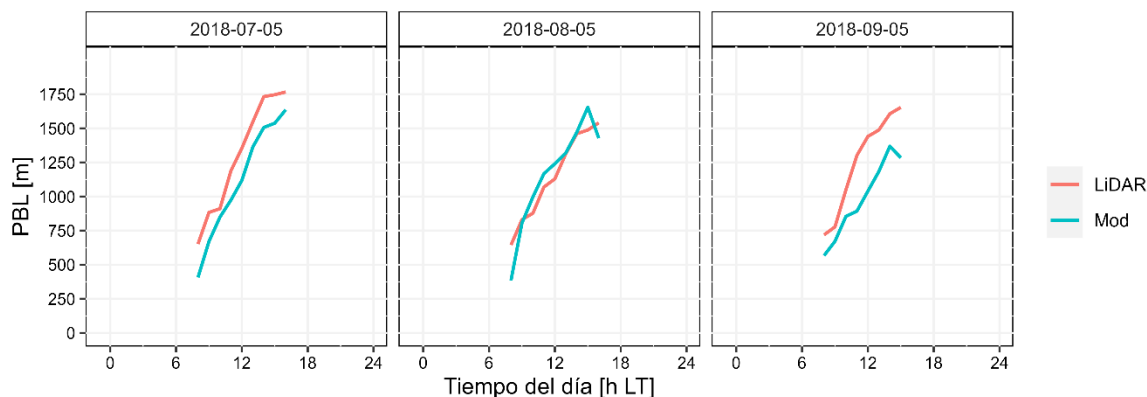




**Figura 3-9.** Representación espacial y temporal de la PBL. a) PBL promedio diario sobre el VGRC. b) Perfil temporal de la PBL sobre 3 estaciones al interior del VGRC. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central.

A partir de mediciones con sensores remotos como el LiDAR (*Light Detection and Ranging*) realizadas cerca a la estación UV por 23 días (julio-octubre de 2018) y entre las 8 y 18 HL, se pudo establecer que la altura de la CLA (capa límite atmosférica) o PBL presentaba una altura promedio alrededor de los 1,700 m entre las 14 y 16 HL; y menores alturas a las 8 HL con aproximadamente 700 m (Céspedes, 2019). Al comparar estas mediciones con las alturas modeladas, la modelación presenta una subestimación (MB) de -145.35 m con un

R de 0.9; si bien la metodología del LiDAR se basa en el “backscattering” de aerosoles y WRF estima la PBL (MYNN3) a partir de la varianza de la velocidad vertical del viento, ambas metodologías presentan resultados semejantes (**Figura 3-10**).

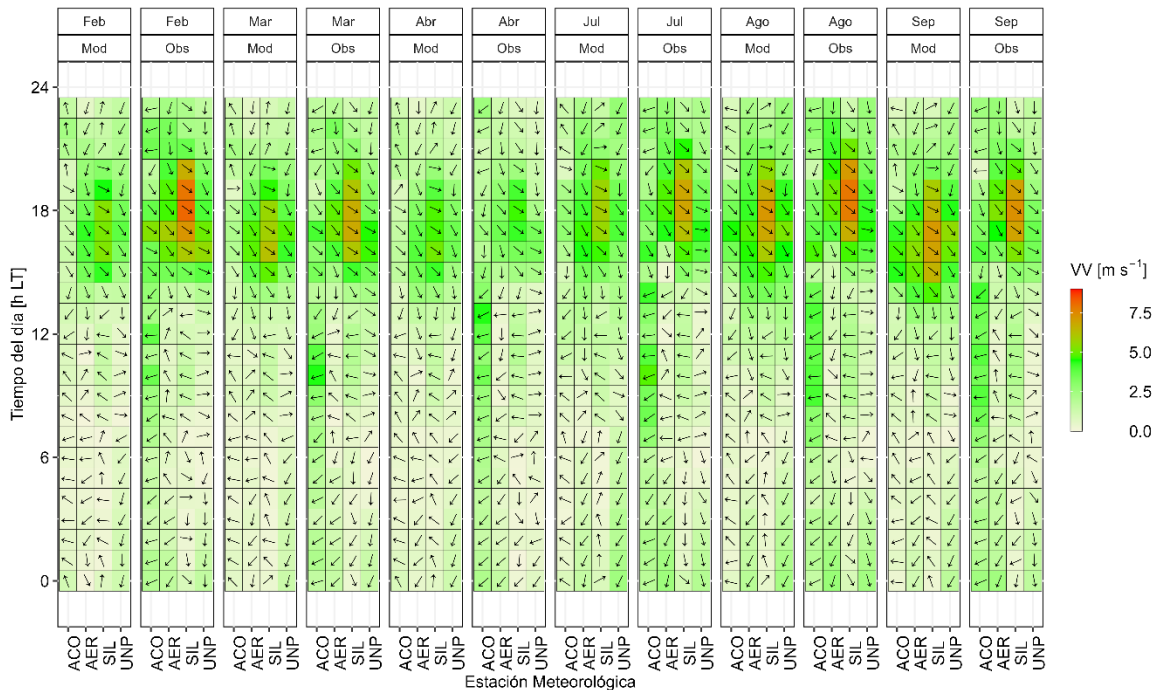


**Figura 3-10.** Comparación entre los perfiles horario de la PBL modelados (Mod) y medidos con el LiDAR en UV.

A través del método de la parcela simplificada se puede establecer la altura de la PBL a las 7 HL (-5 UTC), usando el perfil altitudinal de la temperatura ambiente de los radiosondeos. El concepto de la parcela simplificada consiste en seguir el ascenso de un volumen hipotético de aire a través del perfil adiabático seco atmosférico ( $9.8 \text{ K km}^{-1}$ ) desde una temperatura superficial, una vez se cruce este perfil con el perfil de la temperatura ambiente se considera que el volumen hipotético de aire se encuentra en equilibrio o ha alcanzado la neutralidad, es decir, esta altura es considerada como la PBL (Holzworth, 1964). Para esta estimación se usó la temperatura superficial de la estación AER y un efecto de isla de calor de  $+2^\circ\text{C}$ . Durante el periodo FMA las modelaciones muestran una altura promedio de 212.24 m ( $\pm 91.4$  m) en comparación con los 192.07 m ( $\pm 14.00$  m) obtenidos con el método de la parcela simplificada. Mientras tanto, en el periodo JAS las modelaciones muestran una altura promedio de 236.52 m ( $\pm 110.4$  m) frente a los 185.11 m ( $\pm 12.82$  m) del método de la parcela, indicando una ligera sobreestimación (FMA: 20.17, JAS: 51.41 m), siendo más pronunciada en el periodo JAS. Este mayor desarrollo de la PBL simulada a las 7 HL en el periodo JAS se relaciona con la sobreestimación generalizada que mostro el esquema usado (MYNN3), no obstante, la alta variabilidad de las modelaciones ( $\sim 100$  m) hacen que la PBL observada se encuentre dentro de los rangos de la modelación.

### 3.3.4 Circulación de vientos

En términos generales las simulaciones representan adecuadamente la dirección del viento, aunque con un sesgo inferior a los  $\pm 2 \text{ m s}^{-1}$  en las velocidades del viento. La **Figura 3-11** muestra la dirección y velocidad del viento promedio horaria para las estaciones ubicadas al interior del VGRC sobre la región adyacente al paso de menor altitud entre FC y CC durante los meses simulados. En las primeras horas del día los vientos se caracterizan por ser de baja intensidad, estando por debajo de los  $2.5 \text{ m s}^{-1}$  y con vientos provenientes predominantemente desde el norte, noreste y este. Como se ha descrito en el apartado de la definición de la marea (3.2 Delimitación temporal de la Marea) entre las 14-15 y las 20-21 HL los vientos son más intensos llegando en algunas regiones a los  $6 \text{ m s}^{-1}$ , con una dirección predominante del noroeste. En promedio durante el periodo FMA ( $3.46 \text{ m s}^{-1}$ ) los vientos son ligeramente menos intensos en comparación con el periodo JAS ( $3.95 \text{ m s}^{-1}$ ).



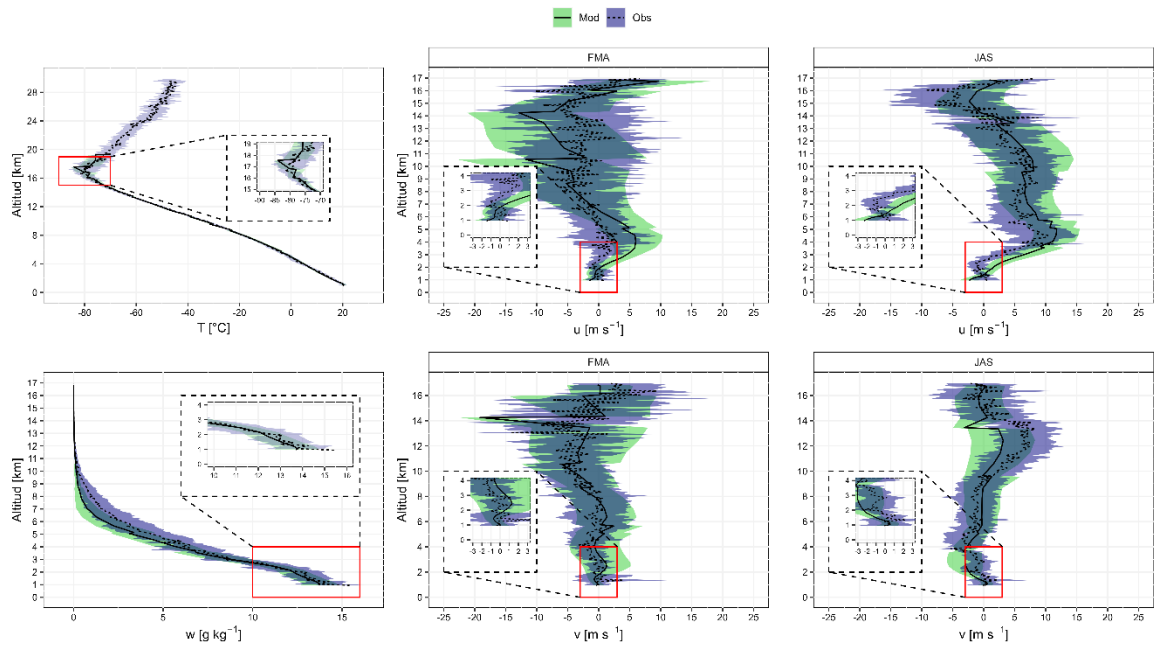
**Figura 3-11.** Comparación de velocidad y dirección del viento promedio horario mensual entre los valores modelados (Mod) y observados (Obs) en superficie.

En la estación SIL, ubicada sobre la vertiente oriental de la Cordillera Occidental, se observan las mayores velocidades del área estudio con vientos entre  $6$  y  $8 \text{ m s}^{-1}$  entre las 16 y 20 HL, con algunos días superando los  $10 \text{ m s}^{-1}$ . Para la estación ACO ubicada en el

pie demonte de la Cordillera Occidental, alrededor de las 10 HL se presentan las mayores velocidades con vientos provenientes del este, indicando un marcado ascenso de los vientos desde el valle hacia la montaña con velocidades promedio de  $3.83 \text{ m s}^{-1}$  durante el periodo FMA y  $4.3 \text{ m s}^{-1}$  en JAS. Una vez que la marea se hace presente los vientos provienen del noroeste.

En altura la barrera topográfica que ejerce la Cordillera Central condiciona el comportamiento de las diferentes variables al interior del VGRC (**Figura 3-12**). El perfil de las velocidades zonales ( $u$ ) a las 7 HL (- 5 UTC) de los radiosondeos entre los  $\sim 1,000$  y  $\sim 2,000$  msnm, muestran velocidades de baja intensidad entre los  $-1$  y  $1 \text{ m s}^{-1}$ , no obstante, las simulaciones tienden a mostrar una mayor influencia de vientos provenientes del este, con  $2.2 \text{ m s}^{-1}$  durante JAS y  $1.5 \text{ m s}^{-1}$  en FMA a nivel de superficie. Entre los 2,000 y 4,000 msnm las observaciones muestran vientos ligeramente del oeste con intensidades entre 0 y  $2 \text{ m s}^{-1}$ , mientras tanto, las simulaciones muestran intensidades de hasta  $5 \text{ m s}^{-1}$  en FMA y  $10 \text{ m s}^{-1}$  en JAS. Los perfiles de la velocidad meridional ( $v$ ) entre los  $\sim 1,000$  y  $\sim 2,000$  msnm, muestran velocidades que oscilan entre los  $-3$  y  $1 \text{ m s}^{-1}$ , evidenciando una ligera influencia de vientos provenientes del norte en especial durante el periodo JAS, una vez superada la Cordillera Central se observa una alta variabilidad entorno a los  $0 \text{ m s}^{-1}$ , pero con una mayor contribución de vientos provenientes del norte ( $-5 \text{ m s}^{-1}$ ) en el periodo FMA y vientos provenientes del sur ( $5 \text{ m s}^{-1}$ ) en el periodo JAS. La mayor influencia de los vientos provenientes del norte durante el periodo FMA se relaciona con la mayor contribución del LLJ del Caribe sobre el Chorro del Chocó durante el primer semestre del año, mientras tanto, los vientos provenientes del sur se relacionan con el debilitamiento del LLJ del Caribe y la mayor contribución de vientos provenientes del Pacífico sur durante el segundo semestre.

Los perfiles en altitud de la temperatura ambiente modelada y observada muestran un cambio en la tendencia a una altitud de 17 km ( $\pm 0.5$  km) y a una temperatura de  $-82.5 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\pm 2.5^\circ$ ), indicando que este punto corresponde a la altura de la troposfera (**Figura 3-12**). Estos valores coinciden con lo observado generalmente en las regiones tropicales, con un altura promedio de 16 km ( $\pm 1$  km) y una temperatura de  $-80^\circ\text{C}$  ( $\pm 4^\circ\text{C}$ ), siendo ligeramente más elevada en el primer semestre del año (Seidel et al., 2001).

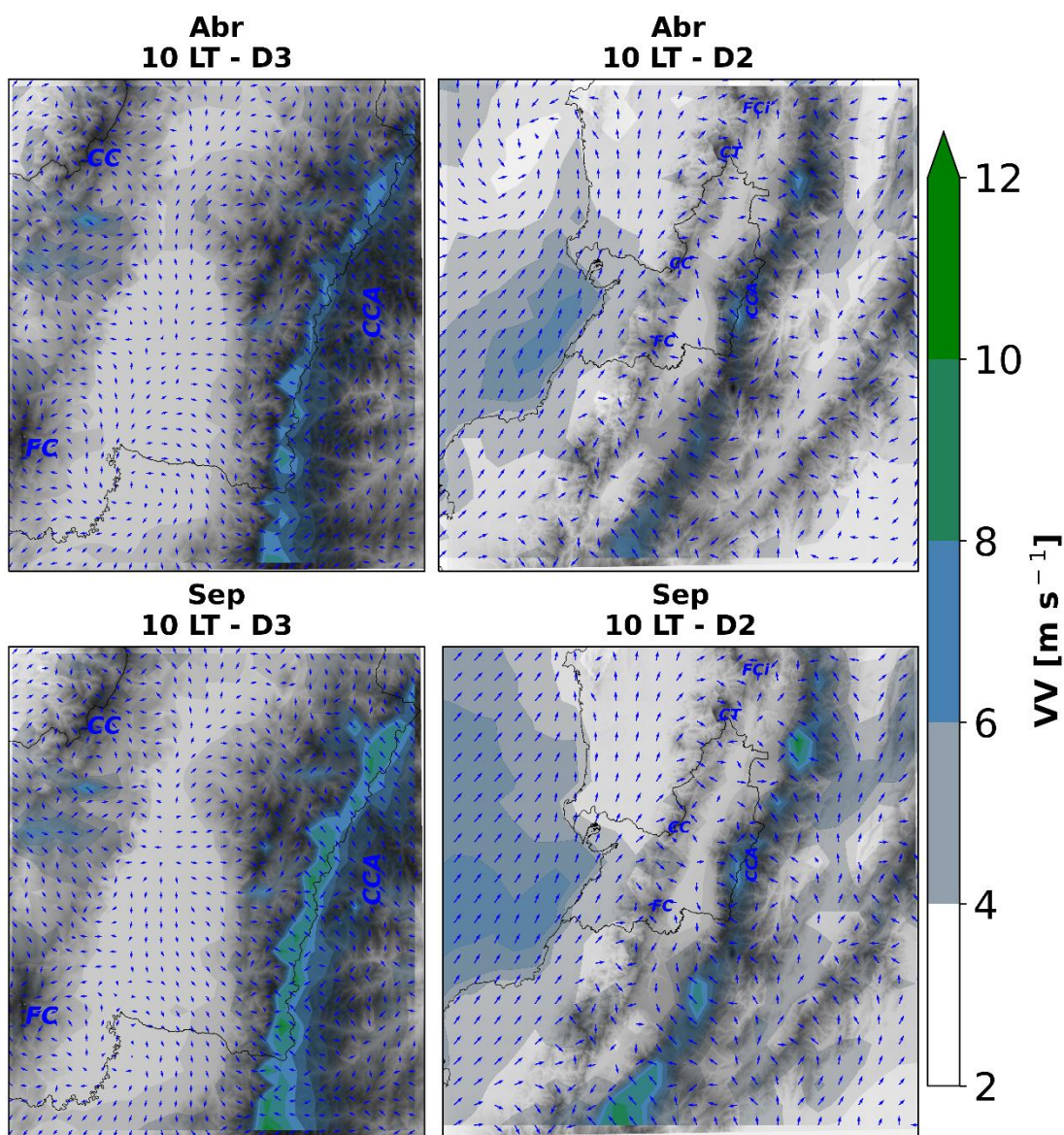


**Figura 3-12.** Perfil vertical promedio de temperatura, razón de mezcla del vapor de agua, velocidades zonales y meridionales del viento sobre el Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón (3.5367, -76.3866), durante los periodos de simulación (Mod) y observados (Obs).

López & Howell en 1967 reportaron que la altura promedio de condensación de nubosidades (*Lifting Condensation Level* - LCL) al interior del VGRC durante la marea correspondía a los ~1.5 km sobre el nivel del valle (2,500 msnm), coincidiendo con lo observado por el perfil de la razón de mezcla del vapor de agua ( $w$ ). Entre los 1,000 y 2,500 msnm a las 7 HL el contenido de humedad se encuentra alrededor de los  $12 \text{ g kg}^{-1}$  ( $\pm 1.5 \text{ g kg}^{-1}$ ), mostrando un leve incremento a los 2 km, indicando la formación de nubosidades a esta altitud. Una vez es superada la Cordillera Central el contenido de humedad comienza a descender progresivamente hasta llegar a los  $0 \text{ g kg}^{-1}$  cerca a los 10 km (**Figura 3-12**).

La representación espacial y temporal de la circulación de los vientos se presenta en función de los periodos de marea y no marea, tomando como referencia a las 10 HL para el periodo de no marea y a las 16 HL para el periodo de marea. Durante la no marea (**Figura 3-13**), tanto en abril como en septiembre en el dominio D3, al interior del VGRC las velocidades en promedio se encuentran por debajo de los  $2.5 \text{ m s}^{-1}$ , mostrando direcciones de vientos asociadas a la circulación valle-montaña en las regiones contiguas a ambas cordilleras. Al sur del VGRC se observan vientos provenientes del norte, mientras tanto, en el centro se observan vientos provenientes del sur. Sobre la vertiente oriental de

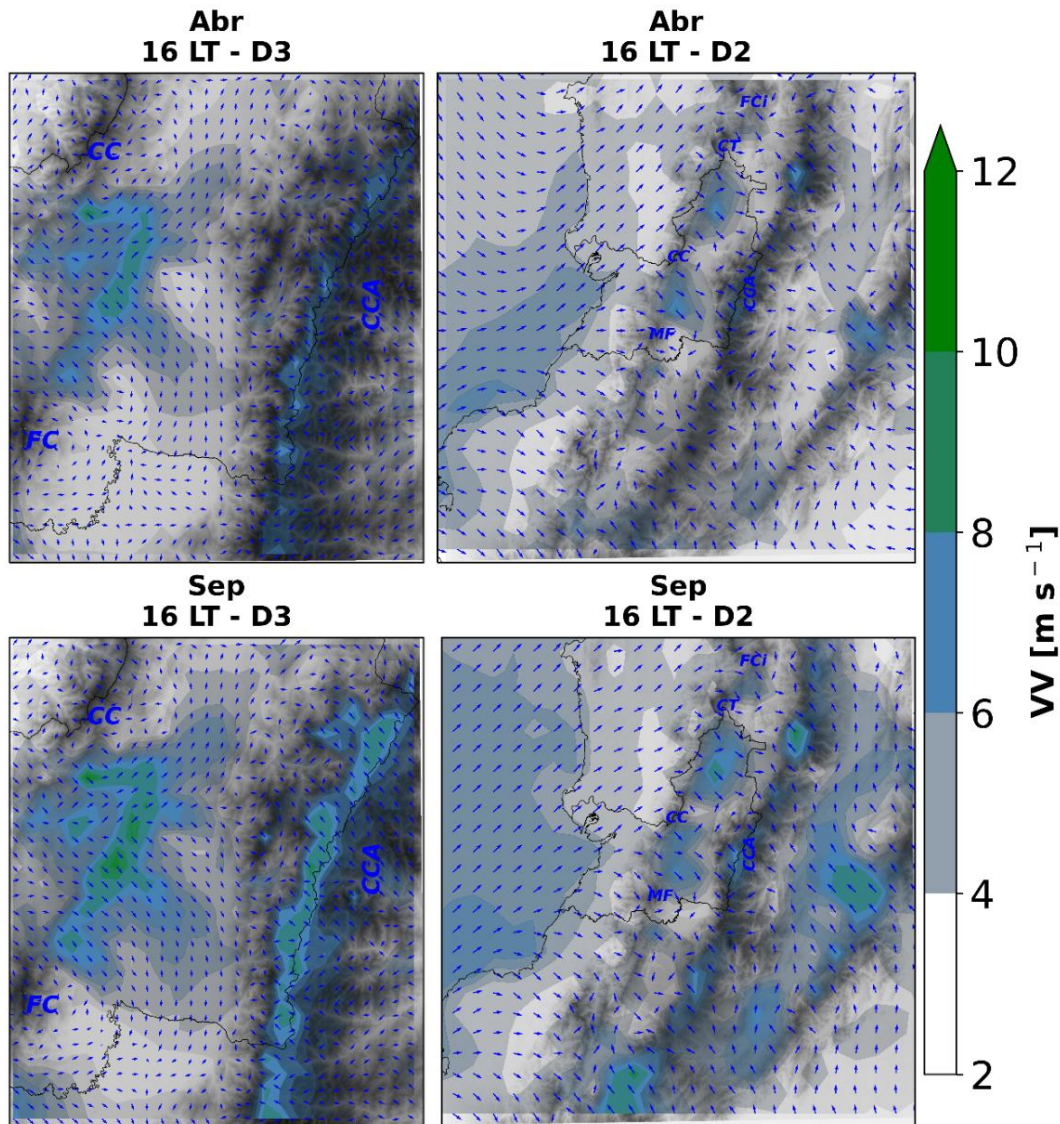
FC, donde se ubican los centros poblados de Cali y Jamundí, parte de los vientos que provienen del norte se curvan hacia el este y el norte, haciendo que sobre estos centros poblados durante la mañana y parte de la noche se presenten vientos de baja intensidad provenientes del sur. Las mayores velocidades se observan en la cima de la Cordillera Central ( $>8 \text{ m s}^{-1}$ ) mostrando la influencia de los vientos alisios de este.



**Figura 3-13.** Velocidad y dirección del viento superficial para los meses de abril (Abr) y septiembre (Sep) a las 10 HL, en los dominios D2 y D3. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima, CCA: Cordillera Central, CT: Cerro Tatamá y FCi: Farallones del Citará.

Como se ha descrito anteriormente las corrientes de vientos provenientes desde el Océano Pacífico son impulsadas por el Chorro del Chocó, el cual oscila latitudinalmente alrededor de los 5°N durante el año, estando en posiciones más al sur entre febrero y abril y más al norte entre septiembre y noviembre, siendo este último periodo donde se presentan las mayores velocidades (Poveda. & Mesa., 1999; Sierra et al., 2021). En el dominio D2 se observan como durante el mes de abril se presenta una mayor influencia de los vientos provenientes de las latitudes más septentrionales, impulsados por el LLJ del Caribe, los cuales convergen con las corrientes del hemisferio sur sobre las costas del departamento del Chocó (al noroeste del VGRC). Mientras tanto, para el mes de septiembre se observa que los vientos provienen netamente del hemisferio sur, asociado principalmente al debilitamiento de los vientos impulsado por el LLJ del Caribe. Alrededor de las 8 HL los vientos provenientes del Océano Pacífico ingresan al territorio continental y han comenzado su ascenso sobre la Cordillera Occidental. A las 10 HL una parte de los vientos debilitados por el ascenso comienzan a llegar sobre el paso de menor altitud, entre las 12-14 HL estas corrientes llegan con una intensidad entre 2 y 4 m s<sup>-1</sup> en septiembre (abril: 2 y 3 m s<sup>-1</sup>) sobre el paso de menor altitud, para luego comenzar a descender hacia el VGRC en horas de la tarde (Anexo C, Velocidad y dirección superficial del viento entre las 8 y 22 HL durante septiembre, **Figura 4-2**).

A las 16 HL (**Figura 3-14**) los vientos catabáticos provenientes de la Cordillera Occidental han ingresado al VGRC ventilándolo de oeste a este, sin embargo, a la latitud del CC (municipio de Buga) estos vientos se dividen por la menor amplitud del VGRC presentada a esta latitud, donde una parte ventila al sur del VGRC desde el norte y otra parte ventila el norte del VGRC desde el sur. Al sur del VGRC estos vientos del noroeste se curvan hacia el sureste por la presencia de la Cordillera Central generando una región de vorticidad. Parte de estos vientos al sur convergen con los vientos que ingresan por el costado sur de FC, llevando las corrientes sobre el flanco oriental de FC hasta el norte de la ciudad de Cali. En la región adyacente al paso de menor altitud las velocidades se encuentran entre 6 y 10 m s<sup>-1</sup>, presentando como máximas velocidades 12.32 m s<sup>-1</sup> para el periodo JAS y 10.96 m s<sup>-1</sup> para FMA. Sobre el tope de la Cordillera Central, los vientos alisios en promedio son más intensos en septiembre con vientos de 10 m s<sup>-1</sup>, frente a los 7 m s<sup>-1</sup> del mes de abril. A sombra de FC los vientos catabáticos (sin la influencia de la marea) presentan intensidades entre 1 y 1.5 m s<sup>-1</sup>, lo cual podría ser un indicativo de la contribución de la circulación valle-montaña sobre la marea.



**Figura 3-14.** Velocidad y dirección del viento superficial para los meses de abril (Abr) y septiembre (Sep) a las 16 HL, en los dominios D2 y D3. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima, CCA: Cordillera Central, CT: Cerro Tatamá y FCi: Farallones del Citará.

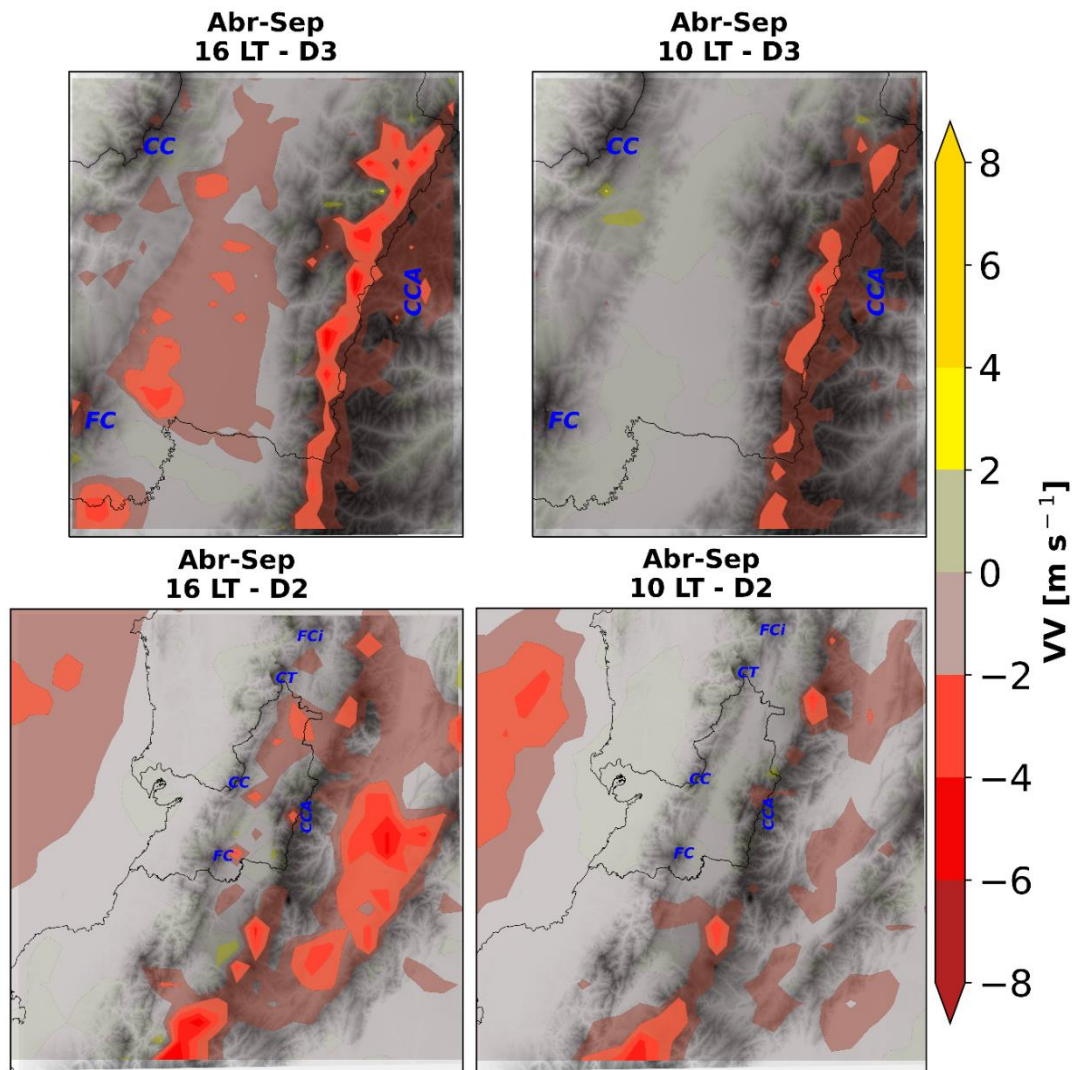
En el dominio D2 se observa como los múltiples pasos de menor altitud de la Cordillera Occidental condicionan los patrones de circulación al interior de VGRC. El primero de ellos entre FC y CC, donde una parte de los vientos que ingresan del Pacífico se dirige hacia el sur y la otra hacia el norte. El segundo paso ubicado entre CC y CT ventila el centro-norte del VGRC con velocidades entre 6 y 8  $\text{m s}^{-1}$  en el periodo JAS (FMA: 5-7  $\text{m s}^{-1}$ ), allí ocurre un fenómeno semejante a lo evidenciado al centro-sur del VGRC, una parte de las



corrientes se dirige hacia el norte y otra hacia el sur. Estos vientos que se dirigen hacia el sur convergen con los vientos que ascienden latitudinalmente desde el sur del VGRC, generando posiblemente una región turbulenta. El tercer paso de menor altitud se ubica al norte del VGRC entre CT y FCi, ventilando al extremo norte desde el noroeste con intensidades entre 4 y 6 m s<sup>-1</sup> en el periodo JAS y entre 2 y 3 m s<sup>-1</sup> en FMA, esta mayor diferencia entre ambos periodos se relaciona a la mayor intensidad y la posición más septentrional del Chorro del Chocó durante JAS.

La **Figura 3-15** muestra la diferencia espacial de la magnitud de los vientos entre abril y septiembre (abril - septiembre) a las 10 y 16 HL para los dominios D3 y D2; los colores rojos y valores negativos indican mayor intensidad en septiembre y los colores amarillos y valores positivos indican mayor intensidad en abril. En el dominio D3, durante la no marea (10 HL) las diferencias espaciales al interior del VGRC indican que presentan intensidades semejantes, tan solo una diferencia cercana a los 2 m s<sup>-1</sup> en una pequeña región al sur de CC. Sobre la Cordillera Central los vientos alisios del este son de mayor intensidad en septiembre con velocidades entre 2 y 4 m s<sup>-1</sup> mayores con respecto a abril. En el dominio D2 la mayor diferencia se observa sobre el Océano Pacífico, con una diferencia entre -2 y -4 m s<sup>-1</sup>, evidenciando la mayor intensidad del Chorro del Chocó en septiembre.

Las mayores diferencias se observan durante la marea (16 HL). En el dominio D3, al interior del VGRC se observan diferencias entre 0 y -2 m s<sup>-1</sup>, evidenciando una mayor intensidad en septiembre, con regiones entre -2 y -4 m s<sup>-1</sup> al oriente de la ciudad de Cali y al sur de FC; y entre -4 y -6 m s<sup>-1</sup> sobre la Cordillera Central. En el dominio D2 las diferencias están entre -2 y -4 m s<sup>-1</sup> sobre el Océano Pacífico, evidenciando la mayor intensidad del Chorro del Chocó en septiembre. Al norte del VGRC se observa el mayor impacto de las corrientes generadas en septiembre, sobre los pasos de menor altitud se observan diferencias alrededor de -3 m s<sup>-1</sup> entre CC y CT; y -1.5 m s<sup>-1</sup> entre CT y FCi. Esta mayor magnitud de los vientos de septiembre en comparación con abril durante la marea, también se observa en los promedios horarios mensuales de las estaciones ubicadas en la región adyacente al paso de menor altitud entre FC y CC, donde en promedio las observaciones para la estación SIL muestran una diferencia de 1.89 m s<sup>-1</sup> y en la estación ACO con una diferencia de 2.95 m s<sup>-1</sup> (**Figura 3-5**).



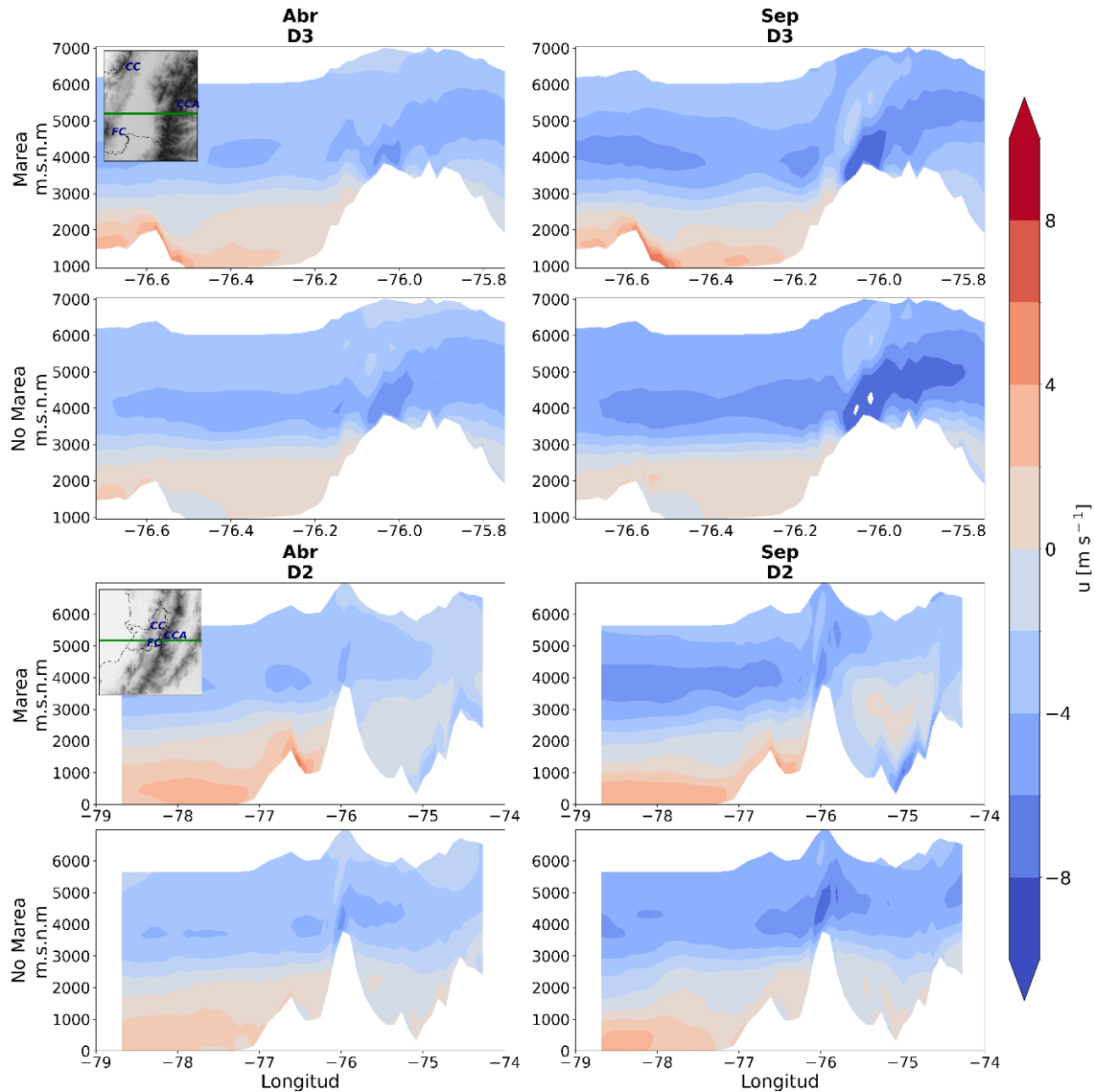
**Figura 3-15.** Diferencia de la velocidad del viento superficial entre los meses de abril (Abr) y septiembre (Sep) a las 10 y 16 HL, en los dominios D2 y D3. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima, CCA: Cordillera Central, CT: Cerro Tatamá y FCi: Farallones del Citará.

La **Figura 3-16** muestra los perfiles en altitud de la velocidad zonal del viento ( $u$ ) a la latitud del aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón (AABA), durante los periodos de marea y no marea; los colores azules indican velocidades zonales negativas, es decir vientos provenientes del este, mientras tanto, los colores rojos y velocidades zonales positivas indican vientos del oeste. En el dominio D3 durante la no marea, la barrera topográfica que ejerce la Cordillera Central frente a los vientos alisios del este induce a un efecto de cizalla sobre el VGRC a una altitud de  $\sim 3,500$  msnm, haciendo que entre 1,000 y 3,500 msnm predominen los

vientos provenientes del Pacífico y fenómenos propios del valle. Una vez se superada la Cordillera Central se observa que los vientos alisios son de mayor magnitud en septiembre con vientos entre  $5.6$  y  $12.2 \text{ m s}^{-1}$ , frente a los  $5.3$ - $8.2 \text{ m s}^{-1}$  de abril. Estos valores coinciden con lo observado con los datos de reanálisis NCEP-NCAR, donde en promedio para el mes septiembre los vientos alisios alrededor de los  $5^{\circ}\text{N}$  y  $-75^{\circ}\text{W}$ , presentan velocidades entre  $6$  y  $8 \text{ m s}^{-1}$  a una altitud entre  $700$  y  $600 \text{ hPa}$  ( $\sim 3,000$  y  $4,200 \text{ msnm}$ ) (Amador, 1998; Mapes et al., 2003). Para el mes de mayo, según lo reporta Amador, (1998), estos son ligeramente inferiores estando alrededor de los  $6 \text{ m s}^{-1}$ . A nivel de superficie no se observan diferencias sustanciales entre abril y septiembre, donde los vientos provenientes desde el Pacífico llegan con velocidades cercanas a los  $3 \text{ m s}^{-1}$ . Una vez ingresan al VGRC se presentan vientos de baja intensidad ( $< 2 \text{ m s}^{-1}$ ) con direcciones asociadas al fenómeno de valle-montaña, sobre el costado occidental de la Cordillera Central los vientos se dirigen hacia el este, mientras tanto, en el flanco oriental de la Cordillera Occidental los vientos se dirigen hacia el oeste.

Durante el periodo de marea las mayores diferencias se observan sobre la Cordillera Occidental y al interior del VGRC. Sobre la vertiente occidental de la Cordillera Occidental se puede notar como una corriente proveniente del Pacífico con una altura de aproximadamente  $1 \text{ km}$  (entre  $1,500$  y  $2,500 \text{ msnm}$ ), llega a la cima de la Cordillera Occidental donde se reduce a menos de  $0.5 \text{ km}$  y desciende al VGRC donde va incrementando su altura a medida que se acerca a la Cordillera Central llegando hasta los  $1.5 \text{ km}$  (entre  $1,000$  y  $2,500 \text{ msnm}$ ). Las principales diferencias entre abril y septiembre se pueden notar en la magnitud de los vientos, en especial, en la vertiente oriental de la Cordillera Occidental y la parte plana del VGRC. En ambos casos los vientos provenientes del Pacífico llegan a la Cordillera Occidental con una velocidad cercana a los  $4 \text{ m s}^{-1}$ , a pesar de ello, tanto en abril como en septiembre los vientos catabáticos presentan diferentes magnitudes. En el mes septiembre los vientos que descienden con una intensidad entre  $7.2$  y  $10 \text{ m s}^{-1}$ , frente a los  $6.4$  y  $7.6 \text{ m s}^{-1}$  de abril. Al avanzar por el VGRC estos vientos van disminuyendo de intensidad, sin embargo, sobre el centro del VGRC ( $\sim 76.4^{\circ}\text{W}$ ) se aprecia un leve incremento en la velocidad con  $6.9 \text{ m s}^{-1}$  y  $4.9 \text{ m s}^{-1}$  para septiembre y abril, respectivamente, desde allí continúan disminuyendo su intensidad hasta llegar a los  $3$  y  $4 \text{ m s}^{-1}$  sobre el piedemonte de la Cordillera Central. En la parte alta de la Cordillera Central, como se mencionó anteriormente, las mayores velocidades de los vientos alisios se observan en septiembre con velocidades entre  $6.7$  y  $12.1 \text{ m s}^{-1}$  frente a

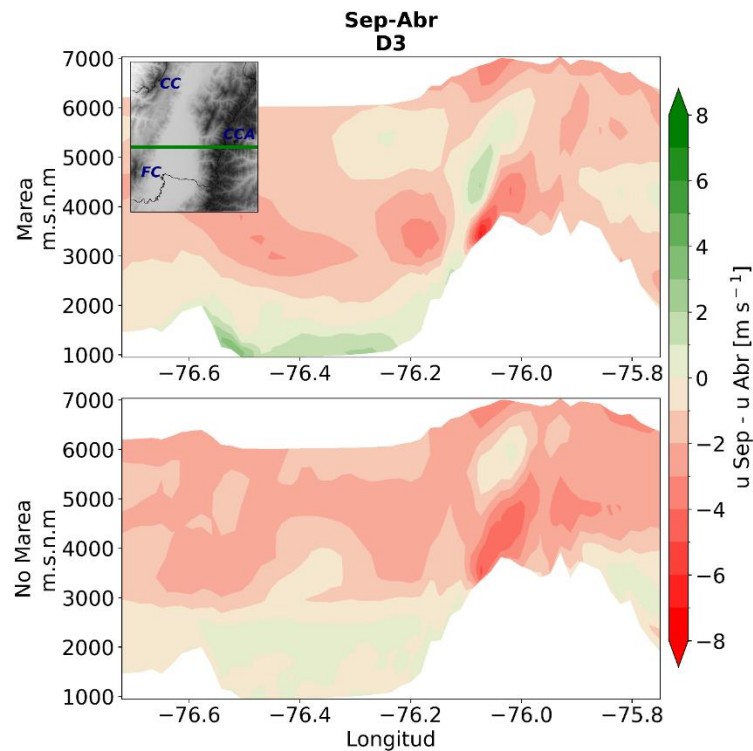
los 4.1 y 8 m s<sup>-1</sup> de abril. (Anexo C, Perfil altitudinal de la componente zonal del viento entre las 8 y 22 HL durante septiembre, **Figura 4-2**)



**Figura 3-16.** Perfil altitudinal de la velocidad zonal ( $u$ ) a la latitud del AABA (Lat: 3.5367), durante los periodos de Marea y No Marea en los meses de abril y septiembre en los dominios D2 y D3. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central.

A partir de la variabilidad en la altitud e intensidad del Chorro del Chocó a lo largo del año se puede comprender lo que se observa sobre el Océano y la costa Pacífica colombiana en el dominio D2 (**Figura 3-16**). Sobre el Océano Pacífico se observa una corriente

superficial en el sentido oeste-este entre los 0 y 1,000 msnm, ligeramente más alta en abril (~1,500 msnm) pero con vientos superficiales de mayor magnitud durante la no marea de septiembre, con intensidades entre 4 y 5  $\text{m s}^{-1}$  frente a los 3 y 4  $\text{m s}^{-1}$  presentados en abril. Una vez ingresa al continente y asciende sobre la Cordillera Occidental, el Chorro del Chocó disminuye su intensidad y altura llegando a velocidades entre los 2 y 3  $\text{m s}^{-1}$  (2.7  $\text{m s}^{-1}$  en abril y 3.1  $\text{m s}^{-1}$  en septiembre) y una altura de ~1,200 m en abril y ~750 m en septiembre. Al tope de la Cordillera Occidental se observa un incremento en la velocidad llegando a los 4.5  $\text{m s}^{-1}$  en septiembre y 3.8  $\text{m s}^{-1}$  en abril, luego estos vientos se convierten en vientos catabáticos con velocidades máximas de 8.8 y 7.3  $\text{m s}^{-1}$  para septiembre y abril, respectivamente, llegando al fondo del valle con velocidades entre 2 y 3  $\text{m s}^{-1}$ , no obstante, al centro del VGRC se presentan velocidades de 4  $\text{m s}^{-1}$  en septiembre.



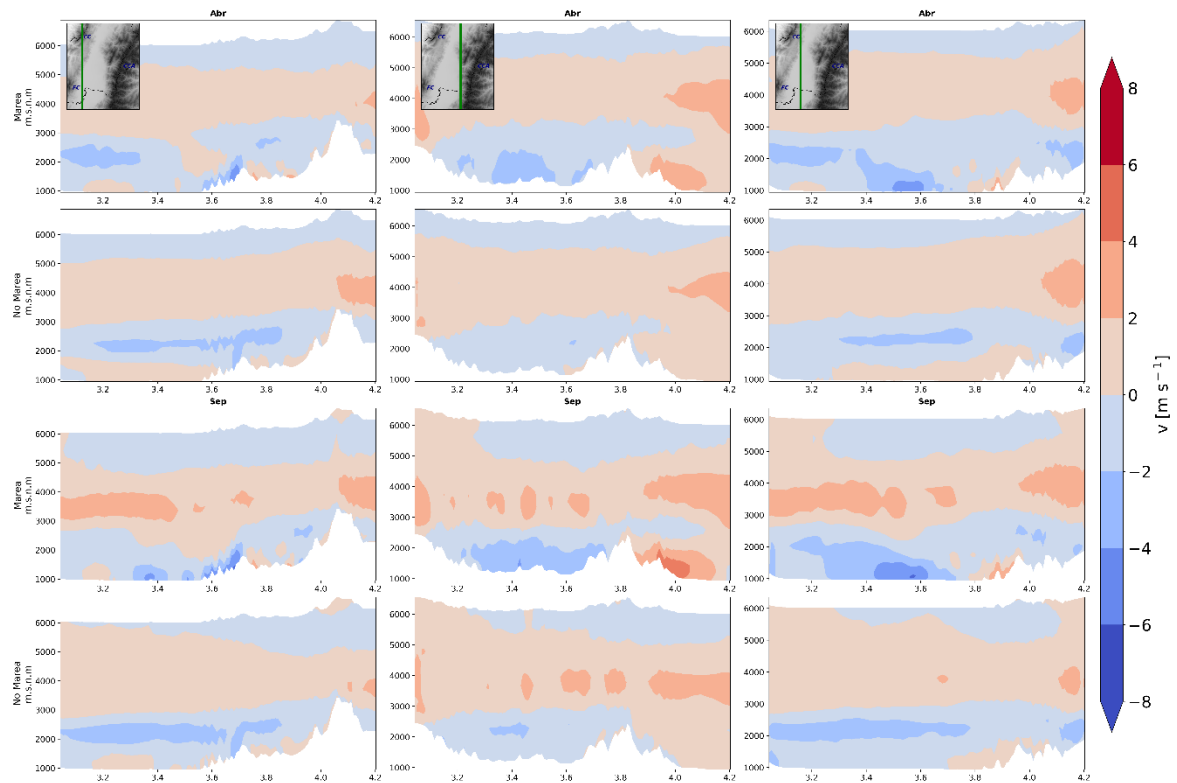
**Figura 3-17.** Diferencia de velocidades zonales ( $u$ ) promedio (abril-septiembre) en altitud sobre la latitud del AABA (Lat: 3.5367), durante los periodos de Marea y No Marea. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central.

La **Figura 3-17** muestra las diferencias de las velocidades zonales ( $u$ ) entre los meses de septiembre y abril, los colores rojos indican una mayor intensidad de los vientos en abril y los colores verdes para septiembre. Si bien realizar una diferencia entre dos campos

vectoriales que presentan componentes tanto positivos como negativos puede llevar a conclusiones erradas, las semejanzas observadas en ambos periodos, donde las diferencias se asocian principalmente con la magnitud mas no con la dirección (signo), permiten realizar esta diferencia de manera muy particular para los periodos analizados. Al interior del VGRC en el periodo de la no marea no se observan diferencias considerables en ambos dominios, no obstante, durante el periodo de la marea en el dominio D3 se destaca una mayor magnitud para el periodo de septiembre con velocidades entre 1 y 2 m s<sup>-1</sup> en la parte plana y hasta 3 m s<sup>-1</sup> en la vertiente oriental de la Cordillera Occidental. La mayor altura promedio del Chorro del Chocó durante abril hace que se observe un mayor impacto en este periodo con respecto a septiembre a una altitud de ~1,000 msnm con velocidades entre 0 y 2 m s<sup>-1</sup> sobre la costa Pacífica. Los vientos alisios muestran una mayor intensidad durante septiembre con vientos entre 0 y 2 m s<sup>-1</sup> más intensos con respecto abril.

A partir de 3 cortes longitudinales sobre el VGRC se presenta el análisis de vientos meridionales (v) en el dominio D3 (**Figura 3-18**); los colores azules indican velocidades meridionales negativas, es decir vientos provenientes del norte, mientras tanto, los colores rojos y velocidades meridionales positivas indican vientos del sur. Por lo general entre los 3,000 y 5,000 msnm, los vientos alisios del este muestran una leve contribución de vientos desde el sur, con velocidades entre 0 y 2 m s<sup>-1</sup>, llegando a los 4 m s<sup>-1</sup> sobre los 4°N. Igualmente, entre la capa superficial del VGRC y los 3,000 predominan vientos del norte con intensidades entre 0 y 2 m s<sup>-1</sup> y en algunos sectores llegan hasta los 4 m s<sup>-1</sup>. El primer corte longitudinal se realizó sobre el piedemonte oriental de la Cordillera Occidental, el segundo sobre el piedemonte occidental de la Cordillera Central y el tercer corte en un punto central del VGRC (a la longitud de AABA). En el primer corte durante la marea y a nivel de superficie (entre los 1,000 y ~1,500 msnm), se observa que a la latitud de FC (3.2°N) predominan vientos de baja intensidad (< 2 m s<sup>-1</sup>) que ascienden desde el sur del VGRC, encontrándose alrededor de los 3.3°N con los vientos de mayor intensidad de la marea provenientes del norte. Entre los 3.4°N y 3.8°N los vientos provienen del norte, con una mayor magnitud en septiembre con vientos entre 4 y 6 m s<sup>-1</sup> frente a los 3 y 4 m s<sup>-1</sup> de abril; sobre el costado sur de CC (3.8°N) la marea cambia de dirección con vientos provenientes del sur con una magnitud entre 2 y 4 m s<sup>-1</sup>. Durante la no marea la mayor diferencia a nivel de superficie se observa al sur del VGRC, donde los vientos de baja

intensidad (entre 0 y  $2 \text{ m s}^{-1}$ ) que ascienden latitudinalmente sobre el costado oriental de la Cordillera Occidental llegan hasta los  $3.6^\circ\text{N}$  (norte de la ciudad de Cali).



**Figura 3-18.** Perfil altitudinal de la velocidad meridional ( $v$ ) en los tres diferentes cortes longitudinales. Sobre la base de la Cordillera Occidental (Lon:  $-76.515$ ), la base de la Cordillera Central (Lon:  $-76.185$ ) y un punto central al interior del VGRC (Lon:  $-76.387$ ). Durante los periodos de Marea y No Marea en los meses de abril y septiembre en el dominio D3. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central.

El segundo corte muestra lo que ocurre en el piedemonte de la Cordillera Central (**Figura 3-18**). Tanto en la marea como en la no marea a nivel de superficie entre los  $3.1^\circ\text{N}$  y  $3.8^\circ\text{N}$  los vientos provienen del norte, con intensidades alrededor de los  $3.5 \text{ m s}^{-1}$  (septiembre:  $4.2 \text{ m s}^{-1}$  y abril:  $3.05 \text{ m s}^{-1}$ ) durante la marea y entre  $0$  y  $2 \text{ m s}^{-1}$  durante la no marea. A partir de los  $3.8^\circ\text{N}$  se observa un cambio en la dirección del viento, con vientos provenientes del sur e intensidades máximas durante la marea de  $5 \text{ m s}^{-1}$  en septiembre y  $4 \text{ m s}^{-1}$  en abril, durante la no marea estas magnitudes se encuentran alrededor entre los  $0$  y  $2 \text{ m s}^{-1}$ . En el corte realizado en un punto central del VGRC, a nivel de superficie y durante la marea entre los  $3.2^\circ\text{N}$  y  $3.8^\circ\text{N}$  los vientos provienen del norte con intensidades alrededor de los  $6$

$\text{m s}^{-1}$  y  $4 \text{ m s}^{-1}$  en septiembre y abril, respectivamente. En latitudes superiores a los  $3.8^{\circ}\text{N}$  los vientos cambian de dirección, con vientos provenientes del sur e intensidades alrededor de los  $5 \text{ m s}^{-1}$  en septiembre y  $4 \text{ m s}^{-1}$  en abril, mientras tanto, al sur del VGRC entre los  $3^{\circ}\text{N}$  y  $3.2^{\circ}\text{N}$  se observan vientos de baja intensidad predominantemente del norte.

### 3.4 Patrones de circulación atmosféricos

A partir de la descripción realizada anteriormente de las diferentes variables meteorológicas, se desarrolló un modelo conceptual de los patrones de circulación atmosféricos predominantes sobre el VGRC, que comprende los periodos de marea y no marea a nivel de superficie y marea en altitud (**Figura 3-19**).

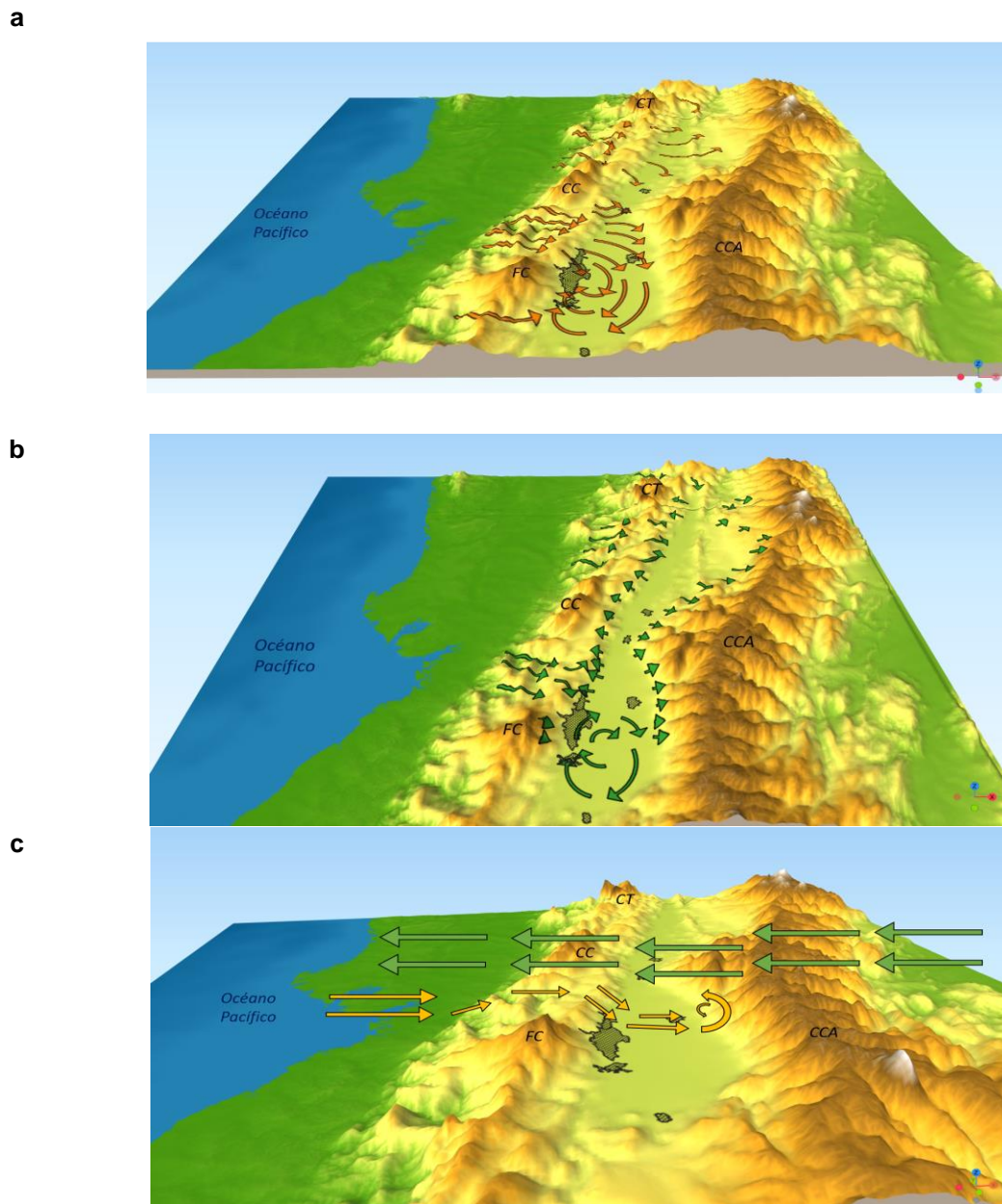
A nivel de superficie durante la marea (**Figura 3-19a**), los pasos de menor altitud de la Cordillera Occidental permiten el ingreso de corrientes provenientes del Pacífico, ventilando al VGRC desde el occidente, sin embargo, la magnitud de estos vientos varía según los periodos analizados. Para el mes de septiembre, donde se ha establecido que los vientos del Chorro del Chocó son más intensos, en el flanco oriental de la Cordillera Occidental los vientos catabáticos llegan al VGRC con intensidades promedio entre  $7.2$  y  $10 \text{ m s}^{-1}$ , siendo entre  $2$  y  $3 \text{ m s}^{-1}$  más intensos con respecto a abril. Una vez comienzan el recorrido al interior del VGRC, van disminuyendo su intensidad llegando entre los  $2$  y  $4 \text{ m s}^{-1}$  ( $3.5 \text{ m s}^{-1}$  en septiembre y  $2.6 \text{ m s}^{-1}$  en abril) sobre la vertiente occidental de la Cordillera Central. Al centro del VGRC, el paso entre FC y CC y la menor amplitud a la latitud de CC, hace que parte de los vientos catabáticos se distribuya hacia el sur y otra hacia el norte. En la parte sur del VGRC los vientos que ingresan desde el Pacífico se curvan hacia el sur debido a la concavidad que presenta la Cordillera Central a esta latitud, estos vientos vuelven a cambiar dirección una vez se encuentran con la concavidad generada por la convergencia de ambas cordilleras y hace que estos vientos se curven al este y el norte. Esta corriente que asciende latitudinalmente sobre la vertiente oriental de la Cordillera Occidental converge con una corriente de entre  $2$  y  $3 \text{ m s}^{-1}$  que ingresa al VGRC por el costado sur de FC. Estos vientos que ascienden latitudinalmente generan una zona donde convergen vientos de múltiples direcciones, en especial sobre el flanco oriental de FC (ciudad de Cali) donde se encuentran con las corrientes que han ingresado por el paso de menor altitud.



Al norte del VGRC, en la región adyacente al paso entre CC y CT, las magnitudes de los vientos son aproximadamente  $2 \text{ m s}^{-1}$  menos intensos frente a los vientos presentados entre FC y CC; en cuanto a la dirección, una parte de los vientos se dirige hacia el sur, donde converge con los vientos procedentes desde el sur del VGRC, generando una región de convergencia de vientos, la otra parte de los vientos son guiados hacia el extremo norte del VGRC por la concavidad topográfica de la Cordillera Central a esta latitud. Estos vientos que se dirigen hacia el norte convergen de nuevo una corriente que ingresa por el paso de menor altitud entre CT y FCi, generando otra región de convergencia con vientos procedentes tanto del sur como del norte, sin embargo, la intensidad de estos vientos es ligeramente inferior a los presentados entre CC y CT, con vientos entre  $4$  y  $6 \text{ m s}^{-1}$  en septiembre y  $2$  y  $3 \text{ m s}^{-1}$  en abril.

La presencia de los cerros de la Cordillera Occidental genera unos efectos de sombra al interior del VGRC que no solo afecta a los vientos sino a las demás variables. Sobre las regiones adyacentes a los pasos de menor altitud se presentan las mayores magnitudes de los vientos y los menores contenidos de humedad relativa, precipitaciones y desarrollo de la PBL. Este efecto se relaciona con el arrastre de humedad que tienen los vientos sobre estas regiones, caso contrario a las regiones adyacentes a cada uno de los cerros, en especial en FC, donde se presentan las más bajas velocidades, pero los mayores contenidos de humedad, precipitaciones y desarrollo de la PBL.

Durante el periodo de la no marea, los patrones de circulación a nivel de superficie al interior del VGRC obedecen principalmente a los fenómenos de valle-montaña (**Figura 3-19b**). Entre las 6-7 HL y 12 HL se produce un ascenso de vientos de baja intensidad por las laderas de ambas cordilleras, no obstante, en un parte la vertiente oriental de la Cordillera Occidental (entre  $3.3^{\circ}\text{N}$  y  $3.8^{\circ}\text{N}$ ) convergen los vientos anabáticos del valle con los vientos de baja intensidad procedentes desde la región Pacífica. Mientras tanto, entre las 22 HL y 5 HL se observan vientos de baja intensidad que descienden hacia el valle. Sobre la región central del VGRC las bajas intensidades ( $\sim 1 \text{ m s}^{-1}$ ) no permiten tener claridad frente a una dirección predominante, sin embargo, las estaciones en superficie indican una predominancia de vientos de baja intensidad ( $< 1 \text{ m s}^{-1}$ ) procedentes del norte. Al sur del VGRC, debido a la concavidad generada por la convergencia de la Cordillera Central y Occidental se presentan vientos con múltiples direcciones, pero de baja intensidad ( $< 2 \text{ m s}^{-1}$ ), generando una zona donde predominan las condiciones de estancamiento.



**Figura 3-19.** Modelo conceptual de los patrones de circulación atmosféricos al interior del VGRC. a) Patrones de circulación en superficie durante la marea. b) Patrones de circulación en superficie durante la no marea. c) Patrones de circulación en altitud sobre el corte latitudinal del AABA durante la marea. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima, CCA: Cordillera Central y CT: Cerro Tatamá.

A nivel altitudinal la interacción entre las Cordilleras Central y Occidental, los vientos alisios del este y el Chorro del Chocó determinan el transporte vertical de masas de aire al interior del VGRC, en la **Figura 3-19c** se esquematiza de manera general lo que ocurre a la latitud

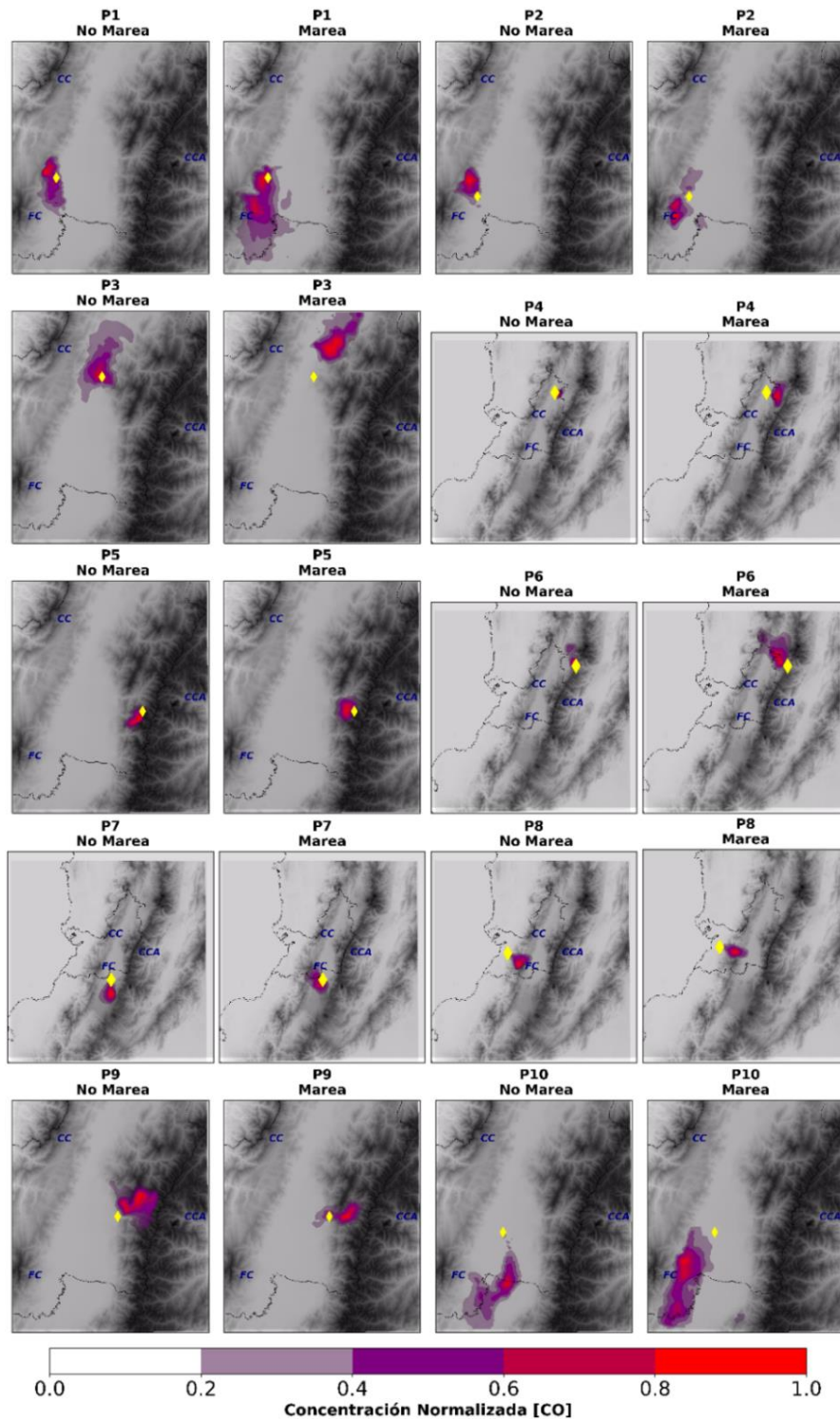
del AABA. Hasta el mediodía los vientos al interior del VGRC obedecen a patrones de circulación de tipo valle-montaña, con vientos categorizados como calmas o brisas de baja intensidad ( $< 2 \text{ m s}^{-1}$ ). Sin embargo, en la región Pacífica el Chorro del Chocó ingresa al territorio continental alrededor de las 8 HL con velocidades alrededor de los  $5 \text{ m s}^{-1}$  ( $3\text{-}4 \text{ m s}^{-1}$  en abril) y una altura de  $\sim 1 \text{ km}$  ( $1.5 \text{ km}$  en abril), a partir de allí comienza un ascenso sobre la Cordillera Occidental, donde las primeras corrientes del Pacífico llegan sobre el paso de menor altitud alrededor de las 10 HL, no obstante, las mayores magnitudes en este paso de la Cordillera se perciben entre las 12 y 14 HL con intensidades entre  $3$  y  $4 \text{ m s}^{-1}$  ( $2$  y  $3 \text{ m s}^{-1}$  en abril) y una altura de aproximadamente  $750 \text{ m}$  ( $1.2 \text{ km}$  en abril). Estos vientos descienden sobre la vertiente oriental de la Cordillera Occidental con intensidades entre  $8$  y  $10 \text{ m s}^{-1}$  ( $6\text{-}8 \text{ m s}^{-1}$  en abril) y una altura de aproximadamente  $500 \text{ m}$ , estos vientos van reduciendo su intensidad a medida que recorren al VGRC en el sentido oeste-este y aumentan progresivamente su altitud hasta llegar a una altura aproximada de  $1 \text{ km}$  ( $\sim 2,000 \text{ msnm}$ ). Al llegar al piedemonte de la Cordillera Central se produce un efecto de resalto hidráulico, donde las mayores intensidades se perciben alrededor de las 18 HL con intensidades entre los  $6$  y  $7 \text{ m s}^{-1}$  ( $4\text{-}5 \text{ m s}^{-1}$  en abril), generando un ascenso de corrientes entre  $1$  y  $1.5 \text{ km}$  sobre el nivel medio del valle ( $2,000$  y  $2,500 \text{ msnm}$ ).

Otro de los fenómenos que condiciona el ascenso de masas aire al interior del VGRC es el efecto de barrera topográfica que ejerce la Cordillera Central frente los vientos alisios, el cual genera un efecto de cizalla entre los  $3,000$  y  $3,500 \text{ msnm}$ , estableciendo como límite máximo para el desarrollo de la PBL a los  $2,000 \text{ m}$ . Sin embargo, al interior del VGRC la presencia de grandes centros urbanos, de fenómenos como el resalto hidráulico anteriormente descrito y la exposición diferencial de la radiación solar en los periodos modelados, le dan una mayor variabilidad a la PBL como se observa en la **Figura 3-9**. En algunas regiones cercanas al piedemonte de la Cordillera Central y el piedemonte de FC (sobre los centros urbanos de Cali y Yumbo) se presentan las mayores alturas de la PBL asociadas a los efectos de resalto hidráulico e isla de calor urbano, respectivamente. Las diferencias espaciales se observan con la altura diaria promedio de la PBL modelada en diferentes regiones del VGRC, por ejemplo, entre las estaciones de UVA (sur de Cali) y AER (centro del VGRC), la PBL promedio en UVA es  $174 \text{ m}$  más elevada que en AER en el periodo FMA (AER:  $1,205 \text{ m}$ , UVA:  $1,379 \text{ m}$ ) y  $217 \text{ m}$  en el periodo JAS (AER:  $1,494 \text{ m}$ , UVA:  $1,711 \text{ m}$ ), mostrando un mayor desarrollo promedio de la PBL en la temporada considerada como seca.

### 3.5 Transporte y dispersión de trazadores atmosféricos sobre el VGRC

La inyección de emisiones hipotéticas de CO en diferentes puntos del VGRC muestran como los diferentes patrones de circulación descritos anteriormente dispersan y transportan los diferentes contaminantes que podrían ser emitidos en el VGRC y regiones vecinas como la costa Pacífica. La **Figura 3-20** muestra las concentraciones normalizadas durante cada periodo analizado con el fin de visualizar el transporte y la dispersión del CO. Durante la marea se muestran las concentraciones normalizadas en cada hora entre las 16 y 22 HL, mientras tanto, durante la no marea se presentan las concentraciones normalizadas entre las 8 y 14 HL. Dentro del Anexo D se encuentran las concentraciones normalizadas del CO dos horas después de la emisión (Marea: 18 HL y No Marea: 10 HL, **Figura 4-4**) y seis horas después de la emisión (Marea: 22 HL y No Marea: 14 HL, **Figura 4-4**).

En el Punto P1, ubicado sobre el piedemonte de la vertiente oriental de la Cordillera Occidental a la latitud del paso de menor altitud, se observa como durante la no marea el contaminante emitido presenta poca dispersión, desplazándose cerca de ~8 km al noroeste del punto de inyección, relacionado principalmente con los patrones de valle-montaña que llevan el contaminante hacia la Cordillera Occidental. El ascenso latitudinal de los vientos sobre este flanco durante la mañana hace que se presente un ascenso latitudinal de corrientes sobre el piedemonte de la Cordillera Occidental, haciendo que la mayor parte de las emisiones se dirijan hacia el norte. Mientras tanto, el mayor desplazamiento (~ 20 km) y dispersión hacia el sur del punto de inyección refleja el inicio de la marea y el leve ingreso de corrientes del Pacífico alrededor del mediodía (**Figura 4-4**). Durante la marea claramente se observa una mayor dispersión al interior del VGRC, llegando hasta los ~60 km al sur desde el punto de emisión, donde las mayores concentraciones se observan al sur del punto de emisión a una distancia de ~15 km.



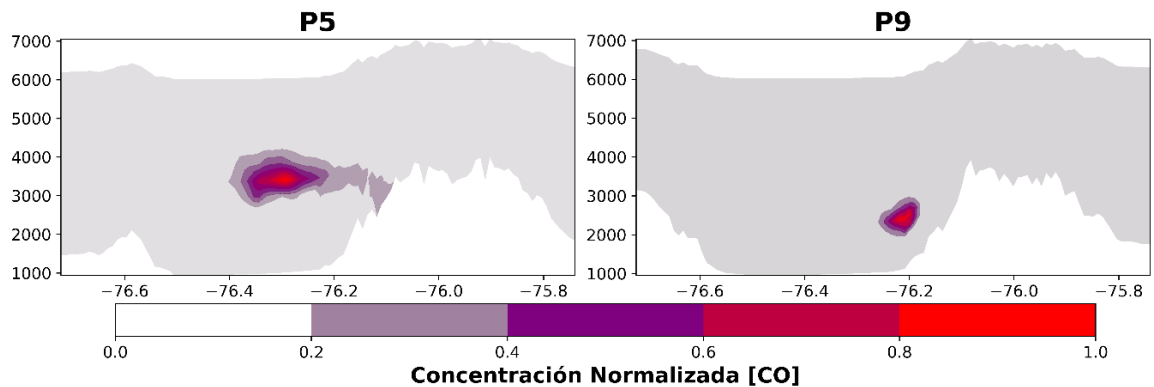
**Figura 3-20.** Recorrido del CO emitido durante la marea (8 HL) y no marea (16 HL). El punto amarillo representa el punto de emisión. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central.

En P2, ubicado en el centro geográfico del principal centro urbano del VGRC, la ciudad de Cali, durante la no marea las emisiones son llevadas al noroeste, aproximadamente a ~13 km desde el punto de inyección, relacionado con los efectos de los vientos anabáticos y las corrientes que ascienden latitudinalmente sobre la vertiente oriental de la Cordillera Occidental a esta latitud. En el periodo de la marea la mayor parte de las emisiones son llevadas al suroeste hacia la vertiente oriental de FC, desplazándose cerca de ~20 km. A diferencia de P1, en P2 se puede observar cómo los vientos alrededor de la media noche (**Figura 4-4**) desplazan ligeramente las concentraciones hacia el noreste del sur de la ciudad, llevando parte de las emisiones hacia el centro de la ciudad, debido a los vientos que ascienden latitudinalmente en esta vertiente durante parte de la noche.

En el punto P3, ubicado a la misma latitud de CC y donde se presenta la menor amplitud del VGRC (<10 km), muestra que durante la no marea la mayor parte de las emisiones se dispersa hacia el norte, concentrándose principalmente entre el punto de emisión y ~15 km. Durante la marea, las emisiones se desplazan hasta ~60 km al noreste, recorriendo la vertiente occidental de la Cordillera Central. Las mayores concentraciones se observan a los 20 km al noreste del punto de emisión. En esta región se identificaron las mayores intensidades de los vientos que asciende latitudinalmente desde el sur y donde se concentra parte de la humedad arrastrada por la marea.

En P4, ubicado en un punto medio al norte del VGRC, durante la no marea las corrientes de vientos desplazan las emisiones cerca de ~10 km al este del punto de la emisión, mientras tanto, durante la marea las emisiones son transportadas hacia el piedemonte de la Cordillera Central a una distancia de ~50 km, mostrando la influencia en el transporte y la dispersión de las corrientes que ingresan por los pasos de menor altitud entre CC – CT y CT – FCi.

Los puntos P5 y P6 se ubican en la cima de la Cordillera Central, P5 al centro-sur y P6 al norte. Tanto para el periodo de la marea y no marea, a nivel de superficie muestran poca dispersión, sin embargo, la importancia de estos puntos se encuentra al observar el perfil altitudinal. Altitudinalmente se observa que estas emisiones no ingresan al VGRC, por el contrario, son transportadas longitudinalmente impulsado por los vientos alisios, hasta encontrarse con algunos altos cerros de la Cordillera Occidental o continuar hasta la región Pacífica (**Figura 3-21**, P6 semejante a P5).



**Figura 3-21.** Perfil vertical de emisiones hipotéticas de CO para los puntos P5 y P9 durante la marea.

En el Punto 7, ubicado al extremo sur del VGRC, las emisiones durante la no marea se desplazan cerca ~20 km hacia el sur, evidenciando un leve ascenso y poca dispersión sobre la región de convergencia entre ambas cordilleras relacionado principalmente con el fenómeno valle-montaña y posibles condiciones de estancamiento. Mientras tanto, durante la marea los patrones de circulación desplazan las emisiones hacia el noroeste, llevando estas emisiones hasta la vertiente oriental de FC con desplazamiento de ~15 km, ubicándose sobre los centros poblados de Jamundí y sur de Cali.

El punto 8, ubicado en la costa Pacífica, se evidencia que durante la no marea las emisiones son desplazadas cerca ~45 km hacia el sureste, una parte se contiene sobre la vertiente occidental de FC y otra parte se contiene en el costado norte de FC ingresando ligeramente al VGRC. Este mayor desplazamiento durante la no marea, con respecto a los demás puntos se entiende a partir de que los vientos impulsados por el Chorro del Chocó ingresan al continente desde las 8 HL y llegan a la cima de la Cordillera Occidental cerca del mediodía, lo cual explica el leve ingreso de estas corrientes al VGRC al iniciar la tarde. Durante la marea estas emisiones ingresan totalmente hasta el centro del VGRC, desplazándose cerca de ~75 km desde su punto de inyección.

En P9, ubicado sobre el piedemonte de la Cordillera Central, durante la no marea refleja un ascenso sobre las laderas de la Cordillera, desplazándose cerca de ~20 km hacia noreste, asociado principalmente con los vientos anabáticos. Durante la marea se evidencia un ascenso de las emisiones, pero con una menor dispersión, no obstante, al analizar el perfil altitudinal de las emisiones (**Figura 3-21**), se evidencia un ascenso de las

emisiones relacionado con el fenómeno de resalto hidráulico. Este ascenso se produce a una altura alrededor de los 2,500 msnm (1.5 km), el cual genera una región de turbulencia.

El punto P10, ubicado en un punto central al centro-sur del VGRC (sobre AABA), durante la no marea estas emisiones son desplazadas inicialmente hacia el sur y después hacia oeste, desplazándose cerca de 50 km desde el punto de emisión. Durante la marea, estas emisiones se desplazan hacia el suroeste con una mayor dispersión llegando hasta 60 km, sin embargo, se observa que estas tienden a concentrarse al norte de la vertiente oriental de FC, cerca de la ciudad de Cali.



## 4. Conclusiones y Recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

El proceso de depuración y filtrado de datos desarrollado en este trabajo permitió desarrollar una metodología complementaria al proceso planteado por el IDEAM como parte de los límites para la validación de los datos meteorológicos en superficie. Esta metodología permitió identificar datos que dentro del conjunto general se podrían considerar como válidos, pero no serían coherentes temporalmente y según la ubicación de la estación.

Si bien las variables de radiación solar, precipitación y vientos son las que presentan los mayores sesgos dentro de las simulaciones, según las métricas de desempeño, estas se encuentran dentro rangos considerados como aceptables para regiones con topografías complejas y son semejantes a otros estudios realizados en el país (**Tabla 3-2**). A pesar de estos sesgos, las limitaciones propias del modelo (p.ej. dificultades en representar las precipitaciones en especial en periodos considerados como “secos”) y la configuración de este (p.ej. la relación geométrica de anidamiento 1:5 y opciones usadas en el análisis de sensibilidad), las simulaciones realizadas en el marco de esta investigación permitieron caracterizar al VGRC en función de las diferentes variables meteorológicas y crear un modelo de circulación que permite comprender los fenómenos de transporte y dispersión atmosférica.

El fenómeno conocido localmente como la “marea” se ha descrito comúnmente como aquellos vientos de mayor intensidad que ventilan al sur del VGRC de oeste a este en horas de la tarde-noche, no obstante, su origen es producto de la interacción entre las brisas marinas provenientes desde el Océano Pacífico, las diferencias térmicas superficiales y fenómenos como el resalto hidráulico. Los vientos generados por el Chorro del Chocó llegan al tope del paso de menor altitud de la Cordillera Occidental entre las 12

y 14 HL, con intensidades entre los 3 y 4 m s<sup>-1</sup> (2 y 3 m s<sup>-1</sup> en abril), sin embargo, cuando estos vientos descienden sobre la vertiente oriental de la Cordillera lo hacen con intensidades entre 8 y 10 m s<sup>-1</sup> en septiembre (6 y 8 m s<sup>-1</sup> en abril), es decir, que los vientos provenientes del Pacífico son impulsados cuesta abajo por la diferencia térmica entre ladera y el fondo del valle y el efecto de resalto hidráulico. Sin embargo, las grandes diferencias en cuanto a las precipitaciones, contenido de humedad, temperatura y la radiación solar global entre ambos periodos, hacen que la marea sea un fenómeno que se manifiesta localmente, pero es producto de la interacción entre múltiples fenómenos regionales y locales.

Las diferencias tanto espaciales como temporales de los efectos de la marea generan patrones de circulación diferenciales en regiones relativamente cercanas. Una vez comienzan a descender estos vientos al oriente de la Cordillera Occidental, una parte de ellos se dirige hacia el norte pasando por aquella región de menor amplitud del VGRC, a la latitud de CC, y otra parte se dirige hacia el sur, generando dos celdas de circulación durante la marea al interior del VGRC. Sobre la celda sur los vientos comienzan a recorrer el fondo del valle alrededor de las 14 HL con intensidades entre 6 y 8 m s<sup>-1</sup> (4 y 6 m s<sup>-1</sup> en abril) hasta las 20-22 HL, sin embargo, en la región a la misma latitud de FC se produce un efecto de sombra, con vientos de baja intensidad (< 2 m s<sup>-1</sup>). Estos vientos de baja intensidad, más evidentes durante la no marea, generan una región donde se favorecen las condiciones de estancamiento y que junto con el posible arrastre de precursores atmosféricos desde el norte del VGRC y las mayores condiciones de humedad y precipitación, hacen al sur del VGRC una región con una alta probabilidad de formación de contaminantes secundarios, en especial sobre la vertiente oriental de FC donde tienden a converger las corrientes al sur del VGRC.

El mayor desplazamiento y dispersión promedio de los trazadores inyectados durante la marea (50-60 km) frente al periodo de no marea (15-25 km), indican que la emisión de contaminantes atmosféricos entre las 12-14 HL y 20-21 HL permiten una mejor dispersión frente a las emisiones del resto del día, sin embargo, esta dispersión está condicionada a la región. Al sur de VGRC las condiciones de estancamiento y el transporte de contaminantes generalmente hacia el suroeste, podrían explicar en parte las altas concentraciones de algunos contaminantes primarios y secundarios al sur de VGRC. Las altas concentraciones de PM<sub>2.5</sub> alrededor de las 7-8 HL y O<sub>3</sub> alrededor del medio que

típicamente se presenta al sur de la ciudad de Cali, están condicionadas no solo por las condiciones de estancamiento, sino también por las menores temperaturas durante la mañana y mayores contenidos de humedad y que junto con el desarrollo de la PBL diaria, generan una región con una baja dispersión atmosférica. Los contaminantes primarios y precursores emitidos en regiones cercanas ( $< 50$  km) llegan sobre el flanco oriental de FC en el transcurso de 8 horas o menos, por lo tanto, si bien la marea favorece dispersión atmosférica, esta puede arrastrar estos contaminantes hacia el suroeste del VRC, contribuyendo con una calidad del aire desfavorable a las primeras horas del día. Estas condiciones de bajas velocidades y arrastre de precursores también se observa en la cuenca de aire de Los Ángeles (Estados Unidos), donde la brisa marina del Pacífico norte intensificada por fenómenos térmicos arrastran diferentes contaminantes generados en la ciudad como material particulado, óxidos de azufre y nitrógeno y monóxido de carbono hasta la vertiente occidental de la Cordillera del Pacífico y que junto con velocidades de baja intensidad ( $\sim 2$  m s<sup>-1</sup>), propician las altas concentraciones de PM<sub>2.5</sub> y en especial O<sub>3</sub> con concentraciones de hasta 173 ppb horarios (Jury, 2020; Lee et al., 2009).

Los patrones de circulación identificados en la celda norte están condicionados por la presencia de los pasos de menor altitud de la Cordillera Occidental, donde los flujos que ingresan entre CC y CT con intensidades entre 6 y 8 m s<sup>-1</sup> durante la marea (septiembre), interactúan con las corrientes que ingresan desde el sur del VGRC (6 y 8 m s<sup>-1</sup>) y desde el norte por el paso entre CT y FCi (6 y 4 m s<sup>-1</sup>). El extremo norte del VGRC es donde se presentan las menores intensidades, es especial en el periodo de abril donde los vientos son cerca de un 50% de menor magnitud con respecto a septiembre y junto a las mayores precipitaciones del área de estudio ( $\sim 3,000$  mm anuales). Estas condiciones podrían generar condiciones de estancamiento en los primeros meses del año, semejantes a las presentadas al sur del VGRC. No obstante, los resultados del dominio D2 (resolución de 5 km) no reflejan con suficiente detalle los patrones de circulación atmosféricos y su relación con algunas irregularidades topográficas adicionales.

El efecto de barrera topográfica que ejerce la Cordillera Central frente a los vientos del alisios del este juega un papel importante en el transporte vertical de contaminantes. Los vientos alisios del este cruzan de este a oeste sobre el VGRC entre los 3,000 y 5,000 msnm con velocidades superiores a los 6 m s<sup>-1</sup>, producen un efecto de cizalla sobre el VGRC. Este efecto de cizalla limita el desarrollo de la PBL hasta los  $\sim 3,000$  msnm, es decir, que la altura máxima que podría alcanzar la PBL al interior del VGRC se encuentra alrededor

---

de los 2 km. En temporada seca la PBL al interior del VGRC en promedio es ~150 m más elevada con respecto a la temporada húmeda, sin embargo, hay regiones donde es mayor esta diferencia, por ejemplo, al sur de la ciudad de Cali (estación UVA) asociado a un efecto de isla de calor urbano o en el piedemonte de la Cordillera Central sobre la región adyacente al paso de menor altitud relacionado con el efecto de resalto hidráulico producido por la marea.

## 4.2 Recomendaciones

Debido a la falta de información meteorológica en superficie en regiones como la costa Pacífica y radiosondeos en otras regiones del VGRC a diferentes horas y en simultáneo, surge la necesidad de realizar campañas de monitoreo y obtener información de otras entidades que permitan realizar una caracterización meteorológica y validación del modelo que complemente los patrones de circulación atmosféricos ya identificados. Además, en próximas investigaciones se podría realizar una caracterización semejante de los posibles efectos generados por fenómenos como el ENSO.

El mayor enfoque de la investigación al sur del VGRC es debido a la mayor concentración de población y sectores industriales en esta área, sin embargo, al norte del VGRC destacan algunos importantes centros poblados e industriales, además de condiciones topográficas particulares como una menor amplitud promedio. Por lo tanto, en posteriores investigaciones es necesario profundizar el norte del VGRC y su relación con otras regiones más industrializadas como el centro y noroccidente del país.

En regiones con condiciones topográficas y meteorológicas semejantes al VGRC, es decir, valles al interior de grandes cadenas montañosas y cercanos a océanos, se podrían presentar fenómenos como la marea, efectos de sombra, cizalla o resalto hidráulico. Por ende, los modelos presentados en esta investigación y por López & Howell en 1967, son una herramienta para la comprensión de fenómenos como la dispersión atmosférica y su relación con la calidad del aire en estas regiones.

Comprender la variabilidad diaria y anual de estos patrones de circulación atmosféricos son una herramienta fundamental para las diferentes entidades ambientales presentes en el área de estudio, ya que estos son un elemento fundamental para la comprensión de los problemas relacionados con la calidad del aire. A partir de allí y en coordinación entre las

diferentes entidades regionales, se pueden proponer posibles permisos de emisiones industriales y ser un instrumento para el ordenamiento y la planificación industrial, urbana y agroindustrial. Además, la identificación de estos patrones son un insumo para el rediseño de los sistemas de vigilancia y monitoreo de la calidad del aire y meteorológico. Así mismo, la identificación de estos patrones son un elemento clave para la elaboración de los planes de contingencias relacionadas con el recurso aire.

Las regiones identificadas con una alta probabilidad de que se generen turbulencias como la vertiente oriental de FC, la vertiente occidental de la Cordillera Central (fenómeno de resalto hidráulico), la región central (a la latitud de CC) y regiones con condiciones de estancamiento como el sur y posiblemente el norte del VGRC, requieren un mayor estudio enfocado en el papel que juega la turbulencia en la advección y convección húmeda en estas regiones. Identificar y caracterizar como estas condiciones de turbulencia afectan la dispersión atmosférica es una herramienta fundamental para comprender las reales implicaciones de estas condiciones en la salud pública (Ortiz et al., 2019).

Si bien las simulaciones se encuentran dentro de los límites de desempeño sugeridos para terrenos complejos, dentro de las posibles mejoras recaería en un análisis de sensibilidad enfocado en los esquemas que permitieran una mejor representación de las nubosidades en el área de estudio, reduciendo así los sesgos presentados principalmente en las precipitaciones y radiación solar.



# Publicaciones, eventos y proyectos de investigación

## Artículos científicos

- **Andres V. Ardila**, F. Cifuentes, C. M. González, Daniel Hernandez-Deckers, German Rueda-Saa, Rodrigo Jimenez. (2024). *Understanding atmospheric circulation in a near-costal inter-Andean tropical valley*. Atmospheric Research (En preparación).
- **Andres V. Ardila**, F. Cifuentes, C. M. González, German Rueda-Saa, Rodrigo Jimenez. (2024). *Meteorological measurement and simulation dataset to understand the complex circulation over a tropical inter-Andean valley*. Data in Brief (En preparación).

## Presentaciones en eventos científicos

- **Andres V. Ardila**, F. Cifuentes, C. M. González, German Rueda-Saa, Rodrigo Jimenez. (2023). *Desarrollo y análisis de una base de datos meteorológicos depurada del valle geográfico del Río Cauca* (Poster Franco J. F; Montejo A. (Comps). Calidad de aire, cambio climático y salud pública. Hill Consulting. Disponible en: <https://casap.science/memorias/>
- **Andres V. Ardila**, F. Cifuentes, C. M. González, Daniel Hernandez-Deckers, German Rueda-Saa, Rodrigo Jimenez. (2023). *Patrones de circulación atmosférica en el valle geográfico del Río Cauca y su influencia en el transporte de contaminantes atmosféricos* (Poster). Franco J. F; Montejo A. (Comps). Calidad de aire, cambio climático y salud pública. Hill Consulting. Disponible en: <https://casap.science/memorias/>
- **Andres V. Ardila**, F. Cifuentes, C. M. González, Daniel Hernandez-Deckers, German Rueda-Saa, Rodrigo Jimenez. (2023). *Patrones de circulación atmosférica en el valle geográfico del Río Cauca (VGRC) y su impacto en la calidad del aire*

*regional* (Poster). I Simposio de la red de investigadores de ciencias atmosféricas en Colombia, AtmosCol-2023.

- **Andres V. Ardila**, Rodrigo Jimenez, Angela C. Vargas-Burbano, Elizabeth Leon-Velasquez. (2023). *Estimación de factores de emisión de material particulado (PM<sub>10</sub>) por actividades agrícolas en la Orinoquia colombiana* (Presentación oral). Franco J. F; Montejo A. (Comps). Calidad de aire, cambio climático y salud pública. Hill Consulting. Disponible en: <https://casap.science/memorias/>
- F. Cifuentes, **Andres V. Ardila**, C. M. González, German Rueda-Saa, Rodrigo Jimenez. (2023). *Desagregación espaciotemporal de los inventarios de emisión estimados en el valle geográfico del Río Cauca con propósitos de simulación de calidad del aire* (Poster). Franco J. F; Montejo A. (Comps). Calidad de aire, cambio climático y salud pública. Hill Consulting. Disponible en: <https://casap.science/memorias/>
- F. Cifuentes, **Andres V. Ardila**, C. M. González, German Rueda-Saa, Rodrigo Jimenez. (2023). *Simulación de la emisión, producción secundaria, transporte y dispersión de material particulado en el valle geográfico del Río Cauca* (Presentación oral). Franco J. F; Montejo A. (Comps). Calidad de aire, cambio climático y salud pública. Hill Consulting. Disponible en: <https://casap.science/memorias/>
- Juan Camilo Cely, Rodrigo Jimenez, C. M. González, F. Cifuentes, **Andres V. Ardila**. (2023). *El concepto de cuenca atmosférica en el trópico* (Presentación oral). Franco J. F; Montejo A. (Comps). Calidad de aire, cambio climático y salud pública. Hill Consulting. Disponible en: <https://casap.science/memorias/>
- Angela C. Vargas-Burbano, **Andres V. Ardila**, Elizabeth Leon-Velasquez, Rodrigo Jimenez. (2021). *Estimating agricultural PM<sub>10</sub> emissions in the Colombian Llanos* (Poster). International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) 2021. Virtual.
- Rodrigo Jimenez, **Andres V. Ardila**, Angela C. Vargas-Burbano, Elizabeth Leon-Velasquez. (2023). *Particulate matter emissions factors and emissions from mechanized agriculture in the Orinoco River savannas* (Presentación oral). Global Emission Initiative (GEIA) 2023. Bruselas, Bélgica. Disponible en: <https://events.spacepole.be/event/163/page/368-posters-and-presentations>
- F. Cifuentes, **Andres V. Ardila**, C. M. González, Nestor Y. Rojas, German Rueda-Saa, Rodrigo Jimenez. (2023). *Space-time disaggregation of estimated agro-*



*industrial and urban atmospheric emissions in the Cauca River Valley (Colombia) for simulation purposes* (Poster). Global Emission Initiative (GEIA) 2023. Bruselas, Bélgica. Disponible en: <https://events.spacepole.be/event/163/page/368-posters-and-presentations>

### **Contribuciones en otras investigaciones**

- Rodrigo Jimenez, **Andres V. Ardila**, Angela C. Vargas-Burbano, Andrea J. Hernandez, Elizabeth Leon-Velazquez. (2022). *Biomass burning-agriculture coupling in the Orinoco Savannas-Particulate matter emissions scenarios*. Front. Environ. Sci. 10:689844. doi: 10.3389/fenvs.2022.689844

### **Proyectos de investigación**

- “Convenio CVC-UNAL para contribuir a la gestión y planificación del recurso aire en los municipios de Palmira y Yumbo en el Valle de Cauca, mediante la actualización de inventarios, la modelación de material particulado y la elaboración del plan de prevención, control y atención de episodios por contaminación del aire”. Desarrollado entre la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Productos desarrollados disponibles en <https://calidadaire.cvc.gov.co/>
- “Convenio DAGMA-UNAL para la gestión y planificación de la calidad del aire en Santiago de Cali”. Desarrollado entre el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA) y la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira.



## A. Anexo: Estadísticos de desempeño de la simulación durante el análisis de sensibilidad y periodos FMA y JAS.

**Tabla 4-1.** Estadísticos de desempeño por variable y configuración del análisis de sensibilidad.

ID	n	MB	MGE	RMSE	R
<b>RG</b>					
1	8393	52.50	103.02	192.42	0.85
2	8393	72.38	103.94	193.67	0.88
3	2658	72.96	100.16	184.99	0.88
4	2658	71.08	100.13	185.38	0.88
5	2658	67.24	102.69	188.69	0.86
6	2658	81.02	103.63	190.52	0.88
7	2658	82.87	103.94	190.36	0.88
8	2658	96.76	112.14	202.75	0.88
9	2658	37.75	73.94	140.31	0.89
10	2658	74.32	105.14	196.05	0.87
11	2658	68.67	103.39	192.09	0.86
12	8393	60.95	91.93	174.94	0.89
<b>T</b>					
1	23840	-2.09	2.40	3.14	0.92
2	23840	-1.39	2.00	2.59	0.93
3	7349	-1.68	2.11	2.75	0.93
4	7349	-1.62	2.09	2.68	0.93
5	7349	-1.47	2.03	2.60	0.93
6	7349	-1.17	1.85	2.41	0.93
7	7349	-1.22	1.86	2.42	0.93
8	7349	-1.00	1.81	2.33	0.93
9	7349	-1.73	2.16	2.77	0.93
10	7349	-2.84	3.05	3.72	0.91
11	7349	-1.98	2.32	2.94	0.92

ID	n	MB	MGE	RMSE	R
12	23840	-2.20	2.59	3.24	0.92
<b>ID</b>	<b>v</b>				
1	24757	0.32	1.73	2.25	0.35
2	24757	0.36	1.77	2.31	0.35
3	7235	0.31	1.74	2.23	0.36
4	7235	0.32	1.72	2.21	0.35
5	7235	0.28	1.69	2.19	0.34
6	7235	0.30	1.73	2.25	0.29
7	7235	0.35	1.72	2.23	0.31
8	7235	0.42	1.77	2.26	0.33
9	7235	0.09	1.63	2.10	0.35
10	7235	0.11	1.47	1.92	0.37
11	7235	0.15	1.60	2.08	0.34
12	24757	0.19	1.48	1.96	0.41
<b>ID</b>	<b>u</b>				
1	24757	-0.29	1.59	2.31	0.44
2	24757	-0.18	1.66	2.36	0.52
3	7235	-0.04	1.69	2.39	0.49
4	7235	-0.02	1.72	2.45	0.49
5	7235	0.01	1.67	2.37	0.49
6	7235	-0.04	1.63	2.31	0.49
7	7235	0.01	1.64	2.30	0.51
8	7235	-0.09	1.72	2.43	0.59
9	7235	0.13	1.58	2.30	0.48
10	7235	0.33	1.47	2.15	0.47
11	7235	0.11	1.57	2.25	0.49
12	24757	0.14	1.49	2.15	0.51
<b>ID</b>	<b>VV</b>				
1	24757	0.42	1.36	1.94	0.45
2	24757	0.67	1.49	2.06	0.48
3	7235	0.71	1.51	2.10	0.42
4	7235	0.72	1.50	2.12	0.42
5	7235	0.62	1.44	2.02	0.43
6	7235	0.55	1.42	1.98	0.44
7	7235	0.60	1.43	1.99	0.45
8	7235	0.76	1.51	2.09	0.44
9	7235	0.38	1.43	2.04	0.38
10	7235	0.39	1.36	1.89	0.44
11	7235	0.05	1.30	1.88	0.37
12	24757	0.15	1.30	1.84	0.47
<b>ID</b>	<b>HR</b>				
1	28810	-0.85	8.30	10.64	0.75

ID	n	MB	MGE	RMSE	R
2	28810	-4.98	8.96	11.21	0.79
3	8946	-5.78	9.16	11.56	0.75
4	8946	-6.09	9.33	11.79	0.76
5	8946	-6.64	9.66	12.18	0.75
6	8946	-4.18	8.51	10.91	0.76
7	8946	-4.23	8.52	10.85	0.77
8	8946	-6.16	9.38	11.78	0.77
9	8946	0.01	8.23	10.67	0.69
10	8946	-1.05	8.25	10.52	0.73
11	8946	-1.16	8.24	10.60	0.72
12	28810	-2.39	8.46	10.75	0.75
ID	PP				
1	2027	0.23	8.19	10.51	0.70
2	2027	-3.54	8.50	10.68	0.75
3	632	-4.06	8.37	10.61	0.69
4	632	-4.63	8.60	10.87	0.70
5	632	-5.19	8.93	11.27	0.69
6	632	-2.63	7.94	10.15	0.72
7	632	-2.76	7.93	10.13	0.72
8	632	-4.26	8.34	10.60	0.72
9	632	0.27	8.40	10.61	0.61
10	632	0.47	8.82	11.03	0.58
11	632	-0.14	8.46	10.70	0.57
12	2027	-1.45	8.71	10.86	0.71

**Tabla 4-2.** Estadísticos de desempeños de las simulaciones con la configuración óptima para las diferentes estaciones, variables y periodos analizados.

Periodo	Variable	Estación	n	MB	MGE	RMSE	R
FMA	HR	ACO	2155	-0.38	7.40	9.82	0.79
FMA	HR	AER	1857	1.89	8.07	10.55	0.79
FMA	HR	CUM	1431	2.22	6.52	8.73	0.54
FMA	HR	DIA	2099	4.07	8.38	10.72	0.58
FMA	HR	ER	2159	-2.08	7.91	10.23	0.74
FMA	HR	FAR	1812	6.94	9.16	11.71	0.28
FMA	HR	IND	2141	6.71	10.03	12.90	0.79
FMA	HR	PA	2147	6.14	8.64	11.19	0.78
FMA	HR	PLA	2035	-4.53	10.18	11.98	0.27
FMA	HR	SAN	1852	-7.06	11.62	14.48	0.43
FMA	HR	SIL	2140	0.48	7.77	10.04	0.71
FMA	HR	UNP	1708	4.08	7.92	9.84	0.72
FMA	HR	UVA	2108	-1.46	7.44	9.72	0.82
FMA	HR	VIN	1909	-0.28	10.76	12.85	0.71
FMA	PP	CUM	2060	16.92	21.46	27.25	0.95
FMA	PP	DIA	2060	-202.29	202.29	238.44	0.96

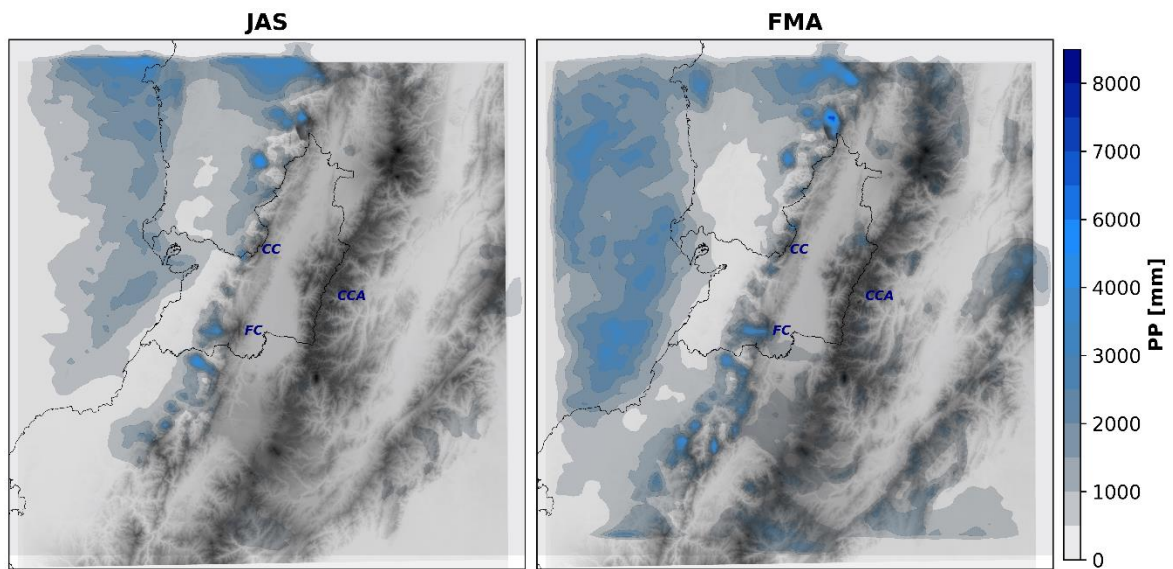
Periodo	Variable	Estación	n	MB	MGE	RMSE	R
FMA	PP	FAR	2060	51.68	53.92	64.96	0.95
FMA	PP	IND	2060	166.86	166.86	186.83	0.98
FMA	PP	PA	2060	-415.82	415.86	487.42	0.98
FMA	PP	PLA	2060	-131.14	131.15	152.95	0.98
FMA	PP	SAN	2060	71.07	71.16	75.16	0.97
FMA	PP	SIL	2060	-31.98	32.92	54.04	0.95
FMA	PP	UNP	2060	-11.56	19.89	22.51	0.96
FMA	PP	UVA	2060	-145.86	146.17	162.49	0.97
FMA	PP	VIN	2060	-85.22	85.22	97.74	0.93
FMA	RG	AER	1867	-9.97	79.64	150.70	0.88
FMA	RG	DIA	1845	15.94	88.69	159.30	0.80
FMA	RG	IND	1128	32.60	89.70	173.81	0.87
FMA	RG	UNP	1700	6.04	82.10	153.91	0.86
FMA	T	ACO	2155	-4.92	4.95	5.27	0.85
FMA	T	AER	2144	-1.72	2.14	2.60	0.86
FMA	T	CUM	2160	-1.24	1.53	1.94	0.79
FMA	T	DIA	2149	-3.04	3.20	3.83	0.80
FMA	T	FAR	2139	-2.08	2.44	3.05	0.72
FMA	T	IND	1670	-1.88	2.47	3.19	0.85
FMA	T	PLA	2148	-2.48	2.66	3.07	0.85
FMA	T	SAN	2158	-2.15	2.52	3.08	0.75
FMA	T	SIL	2140	-1.36	1.87	2.47	0.78
FMA	T	UNP	1708	-1.74	2.12	2.52	0.80
FMA	T	UVA	1570	-2.00	2.34	2.95	0.86
FMA	T	VIN	2148	-2.10	2.50	3.30	0.86
FMA	u	ACO	1953	-1.03	2.50	3.22	0.24
FMA	u	AER	1600	0.04	1.44	1.83	0.42
FMA	u	CUM	2161	-0.29	1.06	1.45	0.54
FMA	u	DIA	2157	0.52	1.03	1.38	0.33
FMA	u	FAR	2154	-0.60	1.25	1.70	0.14
FMA	u	IND	2161	-0.13	1.06	1.34	0.25
FMA	u	PLA	1277	0.70	0.35	0.48	0.29
FMA	u	SAN	2161	2.66	2.89	3.64	0.33
FMA	u	SIL	2155	0.18	1.57	2.09	0.68
FMA	u	UNP	1702	0.75	1.33	1.81	0.42
FMA	u	VIN	2161	0.28	0.96	1.26	0.56
FMA	v	ACO	1953	-1.33	2.13	2.76	0.15
FMA	v	AER	1600	-0.12	1.63	2.12	0.52
FMA	v	CUM	2161	2.72	2.86	3.34	0.24
FMA	v	DIA	2157	0.16	1.24	1.53	0.10
FMA	v	FAR	2154	0.48	0.95	1.19	0.63
FMA	v	IND	2161	-0.35	1.09	1.39	0.13
FMA	v	PLA	1277	0.49	0.80	1.06	0.60
FMA	v	SAN	2161	0.09	1.14	1.48	0.58
FMA	v	SIL	2155	-0.66	1.43	1.98	0.47
FMA	v	UNP	1702	0.29	1.22	1.57	0.47
FMA	v	VIN	2161	-1.43	1.68	1.99	0.08
FMA	VV	ACO	1953	-2.00	2.41	3.13	0.14
FMA	VV	AER	1600	-0.95	1.28	1.65	0.63
FMA	VV	CUM	2161	-1.01	1.50	1.86	0.41
FMA	VV	DIA	2157	-0.84	0.96	1.23	0.24

Periodo	Variable	Estación	n	MB	MGE	RMSE	R
FMA	VV	FAR	2154	0.03	0.76	1.00	0.40
FMA	VV	IND	2161	0.80	0.82	1.04	0.01
FMA	VV	PLA	1277	0.48	0.60	0.85	0.50
FMA	VV	SAN	2161	1.28	2.03	2.65	0.04
FMA	VV	SIL	2155	-0.56	1.29	1.88	0.68
FMA	VV	UNP	1702	-0.27	0.93	1.25	0.65
FMA	VV	VIN	2161	1.41	1.47	1.76	0.31
JAS	HR	ACO	2125	-3.92	7.71	9.64	0.87
JAS	HR	AER	2057	-1.62	7.16	9.37	0.85
JAS	HR	CUM	1396	-1.45	5.58	7.25	0.75
JAS	HR	DIA	2164	2.79	7.93	9.90	0.72
JAS	HR	ER	2185	-6.67	8.00	9.88	0.86
JAS	HR	FAR	2080	5.65	8.67	11.06	0.58
JAS	HR	IND	2134	0.86	8.09	10.30	0.84
JAS	HR	PA	1975	-1.00	9.30	11.59	0.79
JAS	HR	PLA	2154	-6.33	10.98	13.20	0.51
JAS	HR	SAN	1988	-8.25	12.83	15.95	0.47
JAS	HR	SIL	2185	-3.64	6.21	8.07	0.85
JAS	HR	UNP	2121	-2.26	7.34	9.27	0.77
JAS	HR	UVA	1703	-8.14	9.42	11.61	0.87
JAS	HR	VIN	2075	-0.82	10.12	11.98	0.81
JAS	PP	CUM	2180	-80.30	80.39	91.70	0.89
JAS	PP	DIA	2180	-46.35	46.84	57.36	0.79
JAS	PP	FAR	2180	-54.40	54.41	60.39	0.87
JAS	PP	IND	2180	23.38	26.13	38.16	0.97
JAS	PP	PA	2180	-380.62	380.62	439.25	0.53
JAS	PP	PLA	2180	-53.51	53.51	65.81	0.86
JAS	PP	SAN	2180	-36.52	36.54	47.69	0.95
JAS	PP	SIL	2180	-34.35	38.91	44.14	0.76
JAS	PP	UNP	2180	-52.03	52.20	64.14	0.46
JAS	PP	UVA	2180	-35.35	35.58	44.09	0.35
JAS	PP	VIN	2180	-18.20	18.36	24.48	0.72
JAS	RG	AER	546	69.83	89.69	162.31	0.92
JAS	RG	DIA	2151	97.35	118.92	214.52	0.84
JAS	RG	IND	2121	62.21	85.32	160.85	0.93
JAS	RG	UNP	2114	85.42	101.54	185.34	0.91
JAS	T	ACO	2125	-5.61	5.63	5.91	0.90
JAS	T	AER	2163	-1.40	1.92	2.35	0.89
JAS	T	CUM	2185	-0.77	1.25	1.59	0.86
JAS	T	DIA	2183	-3.13	3.29	3.79	0.84
JAS	T	FAR	2149	-2.21	2.51	2.97	0.82
JAS	T	IND	2175	-1.43	1.94	2.33	0.91
JAS	T	PLA	2184	-2.71	2.86	3.24	0.90
JAS	T	SAN	2185	-2.40	2.91	3.56	0.73
JAS	T	SIL	2184	-1.06	1.56	1.99	0.87
JAS	T	UNP	2120	-1.24	2.09	2.52	0.80
JAS	T	UVA	1608	-1.24	1.76	2.17	0.91
JAS	T	VIN	2185	-2.29	2.60	3.26	0.91
JAS	u	ACO	1898	-1.56	2.61	3.37	0.38
JAS	u	AER	1705	0.11	1.48	1.88	0.44
JAS	u	CUM	2185	-0.81	1.26	1.72	0.57
JAS	u	DIA	2184	0.40	0.96	1.24	0.43

Periodo	Variable	Estación	n	MB	MGE	RMSE	R
JAS	u	FAR	2150	-0.72	1.32	1.76	0.06
JAS	u	IND	2180	-0.32	1.17	1.48	0.13
JAS	u	PLA	2176	0.15	0.42	0.59	0.47
JAS	u	SAN	2185	3.36	3.64	4.34	0.33
JAS	u	SIL	2185	-0.33	1.45	1.94	0.76
JAS	u	UNP	2119	1.00	1.55	1.94	0.45
JAS	u	VIN	2185	0.34	0.96	1.25	0.67
JAS	v	ACO	1898	-0.94	1.97	2.54	0.24
JAS	v	AER	1705	0.16	1.49	2.01	0.51
JAS	v	CUM	2185	2.61	2.81	3.25	0.31
JAS	v	DIA	2184	0.27	1.31	1.65	0.05
JAS	v	FAR	2150	0.48	0.92	1.15	0.72
JAS	v	IND	2180	-0.48	1.11	1.44	0.20
JAS	v	PLA	2176	0.69	1.00	1.33	0.73
JAS	v	SAN	2185	-0.80	1.40	1.79	0.46
JAS	v	SIL	2185	-0.57	1.47	2.01	0.51
JAS	v	UNP	2119	1.04	1.48	1.90	0.37
JAS	v	VIN	2185	-0.86	1.45	1.73	0.08
JAS	VV	ACO	1898	-2.06	2.48	3.19	0.23
JAS	VV	AER	1705	-0.57	1.12	1.45	0.64
JAS	VV	CUM	2185	-0.70	1.37	1.67	0.48
JAS	VV	DIA	2184	-0.51	0.79	1.00	0.27
JAS	VV	FAR	2150	0.17	0.75	1.02	0.45
JAS	VV	IND	2180	0.12	0.87	1.14	0.04
JAS	VV	PLA	2176	0.84	0.89	1.25	0.64
JAS	VV	SAN	2185	2.56	2.81	3.38	0.40
JAS	VV	SIL	2185	-0.32	1.22	1.69	0.76
JAS	VV	UNP	2119	0.24	0.89	1.20	0.64
JAS	VV	VIN	2185	1.16	1.29	1.58	0.25



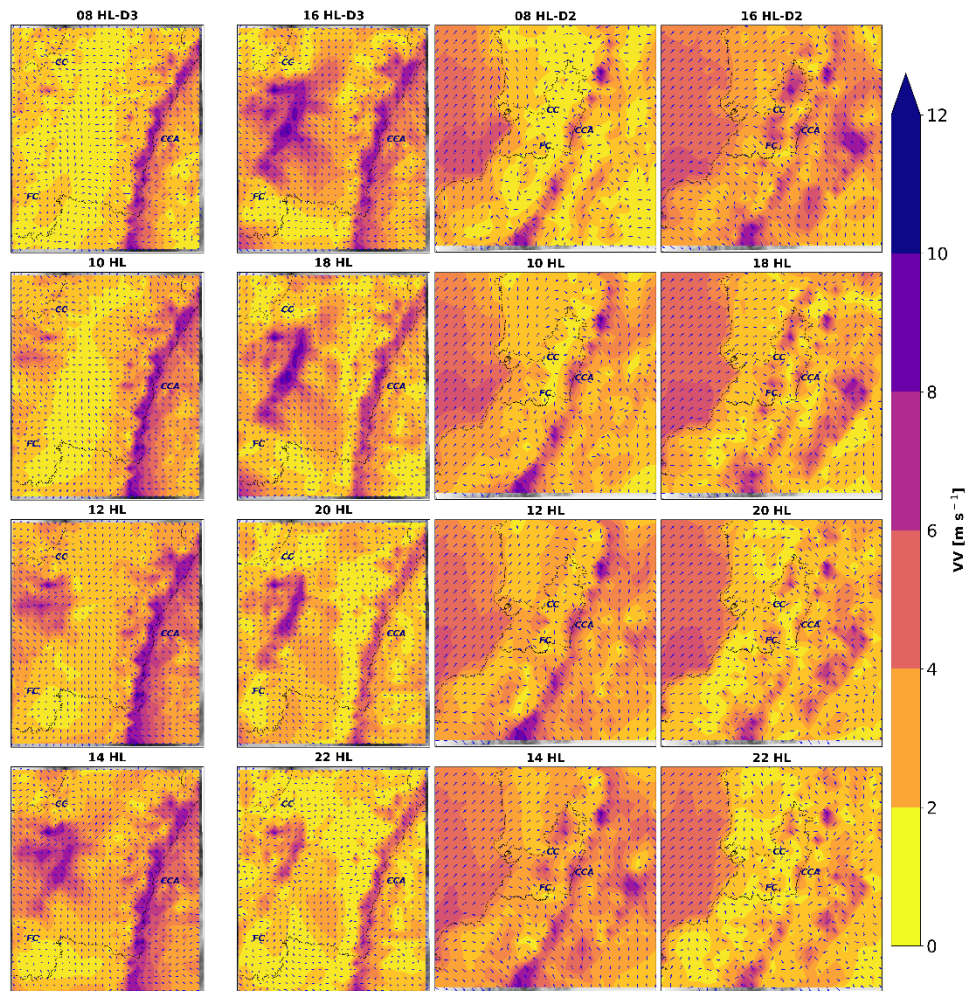
## B. Anexo: Precipitación acumulada en el dominio D2



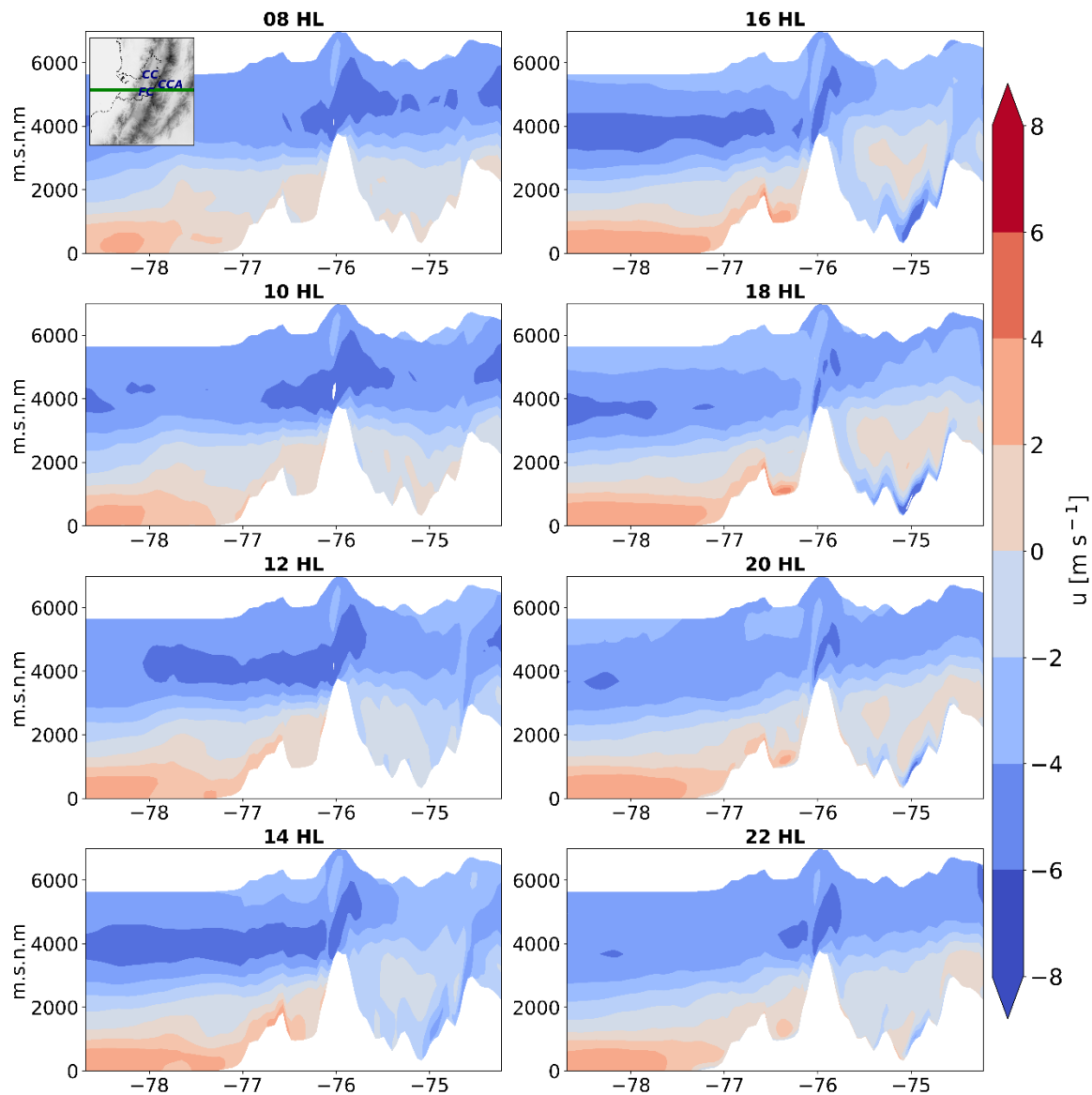
**Figura 4-1.** Distribución espacial de la precipitación acumulada simulada en dominio D2. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima, CCA: Cordillera Central, JAS: julio-agosto-septiembre y FMA: febrero-marzo-abril.



## C. Anexo: Velocidad y dirección del viento promedio horario entre las 8 y 22 HL de septiembre

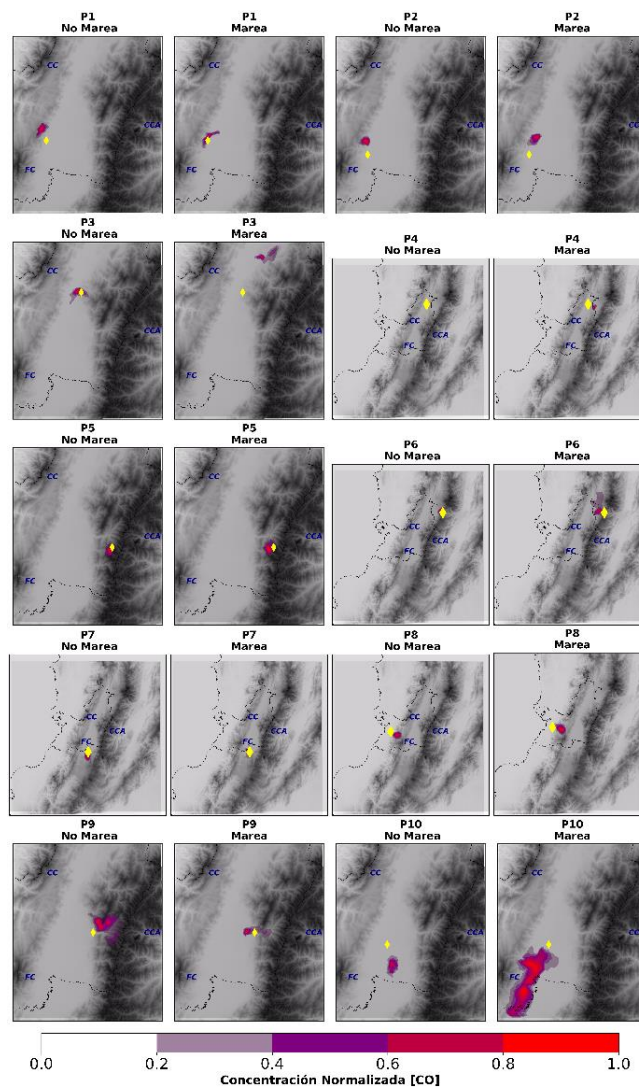


**Figura 4-2.** Distribución espacial de la velocidad promedio horaria del viento entre las 8 y 22 HL durante septiembre para los dominios D3 y D2. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central.

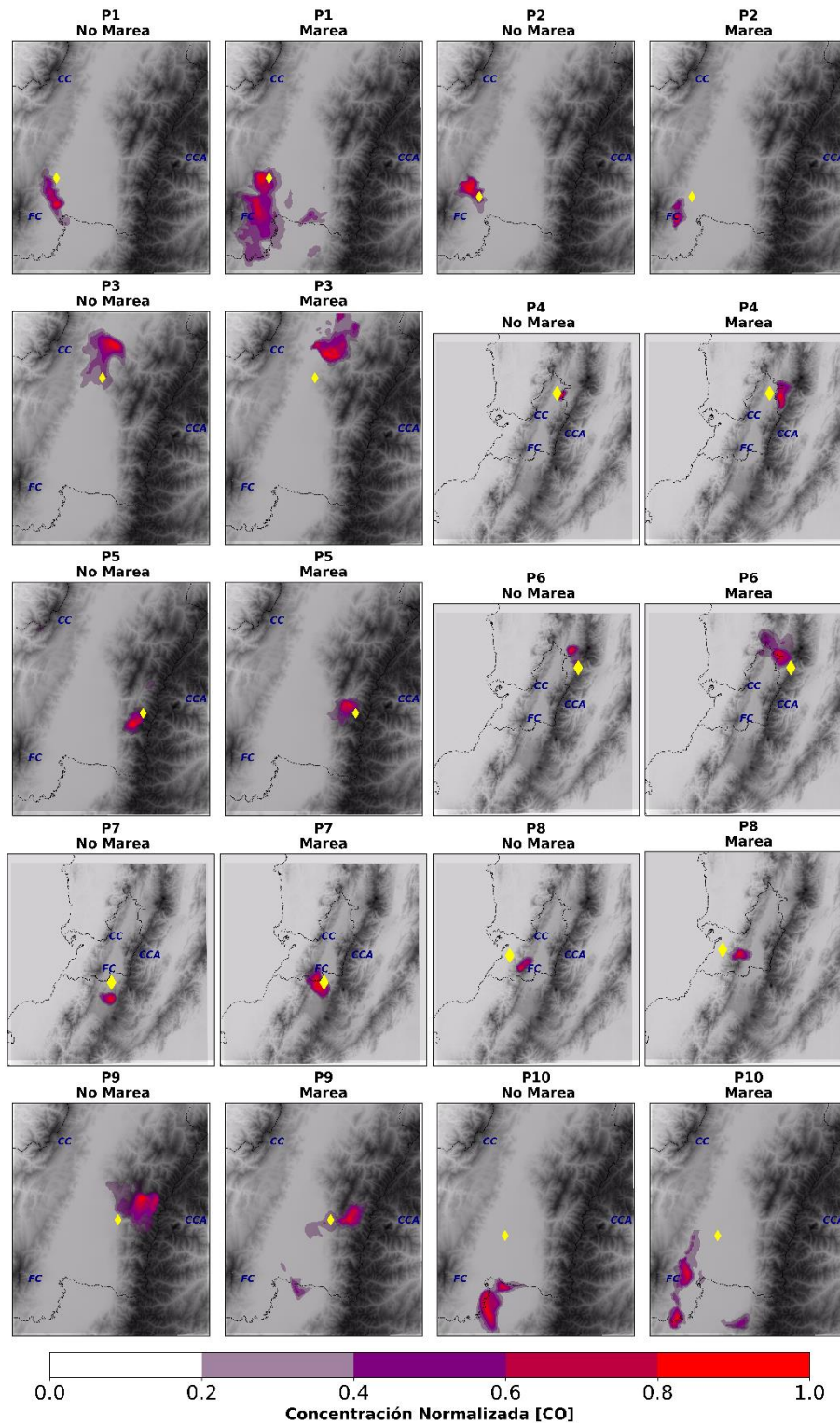


**Figura 4-3.** Perfil vertical de la velocidad zonal ( $u$ ) del viento promedio horario durante septiembre entre las 8 y 22 HL con corte sobre la estación AER, en dominio D2. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central.

## D. Anexo: Concentraciones normalizadas de CO después de 2 y 6 horas de la emisión.



**Figura 4-4.** Concentraciones normalizadas de CO dos horas después de la emisión. No Marea: 10:00 HL y Marea: 18 HL. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central.



**Figura 4-5.** Concentraciones normalizadas de CO seis horas después de la emisión. No Marea: 14:00 HL y Marea: 22 HL. FC: Farallones de Cali, CC: Cerro Calima y CCA: Cordillera Central.

## Bibliografía

- Aldana, C. R. B., Guevara, D. C. D., Vitery, F. C., de Paula Gutiérrez Bonilla, F., Camargo, G. V., Ochoa, J. R., Bedout, J. B., & Castañeda, R. G. (2019). Modelado y simulación de sistemas naturales. In *Modelado y simulación de sistemas naturales*. <https://doi.org/10.2307/j.ctvc2rnxf>
- Allwine, K. J., & Whiteman, C. D. (1994). Single-station integral measures of atmospheric stagnation, recirculation and ventilation. *Atmospheric Environment*, 28(4), 713–721. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)90048-5](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)90048-5)
- Amador, J. (1998). A climatic feature of the Tropical Americas: The Trade Wind Easterly Jet. *Temas Meteorológicos y Oceanográficos*, 5(2), 91–102. [https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/76623/1998\\_2.pdf?sequence=1](https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/76623/1998_2.pdf?sequence=1)
- Ambrizzi, T., de Souza, E. B., & Pulwarty, R. S. (2004). *The Hadley and Walker Regional Circulations and Associated ENSO Impacts on South American Seasonal Rainfall*. 203–235. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2944-8\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2944-8_8)
- AMS (American Meteorological Society). (2023). *Tracer - Glossary of Meteorology*. <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Tracer>
- Arregocés, H. A., Rojano, R., & Restrepo, G. (2021). Sensitivity analysis of planetary boundary layer schemes using the WRF model in Northern Colombia during 2016 dry season. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 96(August). <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2021.101261>
- Asocaña. (2022). Un dulce sabor que se transforma. Informe anual 2021 – 2022. *Sector Agroindustrial de La Caña*. <http://www.asocana.org/documentos/672022-B663EF18-00FF00,000A000,878787,C3C3C3,0F0F0F,B4B4B4,FF00FF,FFFFFF,2D2D2D,A3C4B5.pdf>

- Ballesteros-González, K., Espitia-Cano, S. O., Rincón-Caro, M. A., Rincón-Riveros, J. M., Perez-Peña, M. P., Sullivan, A., & Morales Betancourt, R. (2022). Understanding organic aerosols in Bogotá, Colombia: In-situ observations and regional-scale modeling. *Atmospheric Environment*, 284(June 2021). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119161>
- Ballesteros-González, K., Sullivan, A. P., & Morales-Betancourt, R. (2020). Estimating the air quality and health impacts of biomass burning in northern South America using a chemical transport model. *Science of the Total Environment*, 739, 139755. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139755>
- Banta, R. M., Darby, L. S., Fast, J. D., Pinto, J. O., Whiteman, C. D., Shaw, W. J., & Orr, B. W. (2004). Nocturnal low-level jet in a mountain basin complex. Part I: Evolution and effects on local flows. *Journal of Applied Meteorology*, 43(10), 1348–1365.
- Bell, M. L., Davis, D. L., Gouveia, N., Borja-Aburto, V. H., & Cifuentes, L. A. (2006). The avoidable health effects of air pollution in three Latin American cities: Santiago, São Paulo, and Mexico City. *Environmental Research*, 100(3), 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2005.08.002>
- Brock, F. V., & Richardson, S. J. (2001). Meteorological Measurement Systems. In *Oxford University Press*. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195134513.001.0001>
- Cazorla, M., Gallardo, L., & Jimenez, R. (2022). The complex Andes region needs improved efforts to face climate extremes. *Elementa*, 10(1), 1–9. <https://doi.org/10.1525/elementa.2022.00092>
- Céspedes, J. (2019). *Implementación de un sistema LiDAR elástico para la observación de la dinámica de aerosoles sobre el área urbana de Cali*.
- CIAT-International Center for Tropical Agriculture., & CVC-Valle del Cauca province regional environmental authority. (2018). *Valle del Cauca Province (In Spanish)*. [https://ecopedia.cvc.gov.co/sites/default/files/archivosAdjuntos/plan\\_integral\\_de\\_cambio\\_climatico\\_para\\_el\\_valle\\_del\\_cauca.pdf](https://ecopedia.cvc.gov.co/sites/default/files/archivosAdjuntos/plan_integral_de_cambio_climatico_para_el_valle_del_cauca.pdf)
- Cifuentes, F., González, C. M., & Aristizábal, B. H. (2021). Insights to WRF-Chem



- sensitivity in a zone of complex terrain in the tropical Andes: Effect of boundary conditions, chemical mechanisms, nesting, and domain configuration. *Atmospheric Pollution Research*, December 2020, 101093. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101093>
- Cortés, E., Chica, H., & Peña, A. (2019). Climatic zones of the Cauca River Valley (In Spanish). *Carta Informativa Cenicaña*, 7, 10–11. <https://www.cenicana.org/zonas-climaticas-del-valle-del-rio-cauca/>
- CPC-Climate Prediction Center. (2023). *ONI-Cold & Warm Episodes by Season*. [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)
- CVC-Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (2020, September 17). *A PARTIR DE HOY SE REDUCEN LAS QUEMAS DE CAÑA EN EL VALLE DEL CAUCA | Portal CVC*. <https://www.cvc.gov.co/2020255>
- CVC-Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, & Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. (2022). *Modelación de material particulado indentificando la contribución de las fuentes - Vigencia 2022 Convenio interadministrativo No . 036 DE 2021 CVC-UNAL*. <https://calidadaire.cvc.gov.co/>
- DAGMA-Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente de Santiago de Cali, & Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. (2022). *Simulación meteorológica y simulación preliminar de calidad del aire en Santiago de Cali- Convenio interadministrativo 4133.010.27.1.041-2022 DAGMA-UNAL*.
- DANE-National Administrative Department of Statistics. (2022). *Population projections at the municipal level. Period 2018-2035 (In Spanish)*. <https://cutt.ly/04q49Kn>
- Darby, L. S., Allwine, K. J., & Banta, R. M. (2006). Nocturnal low-level jet in a mountain basin complex. Part II: Transport and diffusion of tracer under stable conditions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45(5), 740–753. <https://doi.org/10.1175/JAM2367.1>
- DATA NOVI. (2020). *K-Means Clustering in R: Algorithm and Practical Examples*

- *Datanovia*. <https://www.datanovia.com/en/lessons/k-means-clustering-in-r-algorith-and-practical-examples/>

Departamento Nacional de Planeación -DNP-. (2017). *Los costos en la salud asociados a la degradación ambiental en Colombia ascienden a \$20,7 billones*. [https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradación-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-\\$20,7-billones-.aspx](https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradación-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-$20,7-billones-.aspx)

Diaz, L. R., Rolim, S. B. A., Santos, D. C., Käfer, P. S., Da Rocha, N. S., & Alves, R. D. C. M. (2020). Using the wrf model to refine ncep cfsv2 reanalysis atmospheric profile: A Southern Brazil test case. *Revista Brasileira de Geofísica*, 38(2), 5–31. <https://doi.org/10.22564/rbgf.v38i2.2043>

Diaz, L. R., Santos, D. C., Käfer, P. S., Iglesias, M. L., da Rocha, N. S., da Costa, S. T. L., Kaiser, E. A., & Rolim, S. B. A. (2021). Reanalysis profile downscaling with WRF model and sensitivity to PBL parameterization schemes over a subtropical station. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 222(July). <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105724>

Dubovik, O., Schuster, G. L., Xu, F., Hu, Y., Bösch, H., Landgraf, J., & Li, Z. (2021). Grand Challenges in Satellite Remote Sensing. *Frontiers in Remote Sensing*, 2(February), 1–10. <https://doi.org/10.3389/frsen.2021.619818>

Eguis Cuentas, M. C., & Jiménez, J. F. (2023). *Dispersión atmosférica de material particulado en ciudades de montaña y tropicales*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/83891>

Emery, C., Tai, E., & Yarwood, G. (2001). *Enhanced meteorological modeling and performance evaluation for two texas ozone episodes*.

Fernandez, R. P., Allende, D. G., Castro, F., Cremades, P., & Puliafito, E. (2010). Modelado regional de la calidad de aire utilizando el modelo WRF/Chem: Implementación de datos globales y locales para Mendoza. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14, 43–50.

Franco, J. ., & Montejo, A. (2023). *Calidad de aire, cambio climático y salud pública* (H. Consulting (ed.)).

Galanti, E., Raiter, D., Kaspi, Y., Tziperman, E., & Jgr-atmosphere, S. (2021). *Spatial patterns of the local Hadley circulation : drivers and consequences*. 2.

- Gao, S., Huang, D., Du, N., Ren, C., & Yu, H. (2022). WRF ensemble dynamical downscaling of precipitation over China using different cumulus convective schemes. *Atmospheric Research*, 271(December 2021), 106116. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106116>
- Giovannini, L., Ferrero, E., Karl, T., Rotach, M. W., Staquet, C., Castelli, S. T., & Zardi, D. (2020). Atmospheric pollutant dispersion over complex terrain: Challenges and needs for improving air quality measurements and modeling. *Atmosphere*, 11(6), 1–32. <https://doi.org/10.3390/atmos11060646>
- Gómez Peláez, L. M., Santos, J. M., de Almeida Albuquerque, T. T., Reis, N. C., Andreão, W. L., & de Fátima Andrade, M. (2020). Air quality status and trends over large cities in South America. *Environmental Science and Policy*, 114(September), 422–435. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.09.009>
- González, C. M. (2017). *Dinámica e impacto de emisiones antrópicas y naturales en una ciudad andina empleando un modelo euleriano de transporte química on-line. Caso de estudio: Manizales, Colombia*. 238.
- González, C. M., Ynoue, R. Y., Vara-Vela, A., Rojas, N. Y., & Aristizábal, B. H. (2018). High-resolution air quality modeling in a medium-sized city in the tropical Andes: Assessment of local and global emissions in understanding ozone and PM 10 dynamics. *Atmospheric Pollution Research*, 9(5), 934–948. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.03.003>
- Gouveia, N., Kephart, J. L., Dronova, I., McClure, L., Granados, J. T., Betancourt, R. M., O’Ryan, A. C., Texcalac-Sangrador, J. L., Martinez-Folgar, K., Rodriguez, D., & Diez-Roux, A. V. (2021). Ambient fine particulate matter in Latin American cities: Levels, population exposure, and associated urban factors. *Science of the Total Environment*, 772, 145035. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145035>
- Henao, J. J., Mejía, J. F., Rendón, A. M., & Salazar, J. F. (2020). Sub-kilometer dispersion simulation of a CO tracer for an inter-Andean urban valley. *Atmospheric Pollution Research*, 11(5), 928–945. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.02.005>

- 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>
- Hernandez, A. J., Morales-Rincon, L. A., Wu, D., Mallia, D., Lin, J. C., & Jimenez, R. (2019). Transboundary transport of biomass burning aerosols and photochemical pollution in the Orinoco River Basin. *Atmospheric Environment*, 205(45), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.01.051>
- Hernández, J. D. R., & Mesa, Ó. J. (2020). A simple conceptual model for the heat induced circulation over Northern South America and MESO-America. *Atmosphere*, 11(11), 1–14. <https://doi.org/10.3390/atmos11111235>
- Hernández, Jauregui, Souto, Casares, Saavedra, Guzmán, & Torres. (2015). Estado actual de los modelos de dispersión atmosférica y sus aplicaciones. *UCE Ciencia. Revista de Postgrado*, 3(2), 1–17. <file:///C:/Users/iphon/AppData/Local/Temp/49-184-1-PB.pdf>
- Holzworth, G. C. (1964). Estimates of Mean Maximum Mixing Depths in the Contiguous United States. *Monthly Weather Review*, 92(5), 235–242. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1964\)092<0235:eommmmd>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1964)092<0235:eommmmd>2.3.co;2)
- Hu, H., Landgraf, J., Detmers, R., Borsdorff, T., Aan de Brugh, J., Aben, I., Butz, A., & Hasekamp, O. (2018). Toward Global Mapping of Methane With TROPOMI: First Results and Intersatellite Comparison to GOSAT. *Geophysical Research Letters*, 45(8), 3682–3689. <https://doi.org/10.1002/2018GL077259>
- IDEAM. (2018). Metodología de la operación estadística variables meteorológicas. *Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales*, 113. <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72085840/Documento+metodologico+variables+meteorologicas.pdf/8a71a9b4-7dd7-4af4-b98e-9b1eda3b8744>
- IDEAM (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales). (2022). *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2021*.
- 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>
- Jimenez, R., Ardila, A. V., Vargas-burbano, A. C., Hernandez, A. J., & Leon-velasquez, E. (2022). *Biomass burning-agriculture coupling in the Orinoco savannas — Particulate matter emission scenarios*. November, 1–16. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.689844>
- Jury, M. R. (2019). Northward excursion of the ITCZ across the inter-Americas during boreal summer. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 131(5), 1357–1366. <https://doi.org/10.1007/s00703-018-0642-1>
- Jury, M. R. (2020). Meteorology of air pollution in Los Angeles. *Atmospheric Pollution Research*, 11(7), 1226–1237. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.04.016>
- Kumar, A., Jiménez, R., Belalcázar, L. C., & Rojas, N. Y. (2016). Application of WRF-Chem model to simulate PM10 concentration over Bogota. *Aerosol and Air Quality Research*, 16(5), 1206–1221. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.05.0318>
- Lamare, M., Dumont, M., Picard, G., Larue, F., Tuzet, F., Delcourt, C., & Arnaud, L. (2020). Simulating optical top-of-Atmosphere radiance satellite images over snow-covered rugged terrain. *Cryosphere*, 14(11), 3995–4020. <https://doi.org/10.5194/tc-14-3995-2020>
- Lawrence, M. G. (2005). The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(2), 225–233. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>
- Lee, S. M., Princevac, M., Mitsutomi, S., & Cassmassi, J. (2009). MM5 simulations for air quality modeling: An application to a coastal area with complex terrain. *Atmospheric Environment*, 43(2), 447–457. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.067>
- Li Ramírez, J. A., Zambrano Nájera, J. del C., & Aristizábal Zuluaga, B. H. (2020). BVOC Emissions Along the Eastern and Western Slopes of the Andes Central Range with Strong Altitudinal Gradient over a Wide Range of Andean

- Ecosystems: Model Estimation/Disaggregation with BIGA. *Environmental Modeling and Assessment*, 25(6), 761–773. <https://doi.org/10.1007/s10666-020-09698-7>
- Li, Y., & Chao, J. (2018). Theoretical urban heat island circulation in the temperature inversion profile. *Atmosphere*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/atmos9030098>
- Lim, K. S. S., & Hong, S. Y. (2010). Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Monthly Weather Review*, 138(5), 1587–1612. <https://doi.org/10.1175/2009MWR2968.1>
- Lin, C. Y., Sheng, Y. F., Chen, W. C., Chou, C. C. K., Chien, Y. Y., & Chen, W. M. (2021). Air quality deterioration episode associated with a typhoon over the complex topographic environment in central Taiwan. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(22), 16893–16910. <https://doi.org/10.5194/acp-21-16893-2021>
- Lopez-noreña, A. I. (2016). *Simulation of the dispersion of particulate matter PM2.5 in the Aburrá Valley, Colombia, using WRF-Chem (In Spanish)*. December 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34078.69441/2>
- López, M., & Howell, W. (1967). Katabatic Winds in the Equatorial Andes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68–70. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1967\)024%3C0029:KWITEA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1967)024%3C0029:KWITEA%3E2.0.CO;2)
- Madala, S., Satyanarayana, A. N. V., Srinivas, C. V., & Kumar, M. (2015). Mesoscale atmospheric flow-field simulations for air quality modeling over complex terrain region of Ranchi in eastern India using WRF. *Atmospheric Environment*, 107, 315–328. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.02.059>
- Mapes, B. E., Warner, T. T., & Negri, A. (2003). Diurnal patterns of rainfall in northwestern South America. Part I: Observations and context. *Monthly Weather Review*, 131(5), 813–829. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<0813:DPORIN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<0813:DPORIN>2.0.CO;2)
- Mateus-Fontecha, Lady, Vargas-Burbano, A., Jimenez, R., Rojas, N. Y., Rueda-Saa, G., Van Pinxteren, D., Van Pinxteren, M., Fomba, K. W., & Herrmann, H. (2022). Understanding aerosol composition in a tropical inter-Andean valley

- impacted by agro-industrial and urban emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(13), 8473–8495. <https://doi.org/10.5194/acp-22-8473-2022>
- McNally. (2009). *12kmMM5 performance goals prepared for: ad-hoc met. group.*
- Mesa-Sánchez, O. J., & Rojo-Hernández, J. D. (2020). On the general circulation of the atmosphere around Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(172), 857–875. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.899>
- Mesa, Ó. J., & Rojo, J. D. (2020). On the general circulation of the atmosphere around Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(172), 857–875. <https://doi.org/10.18257/RACCEFYN.899>
- Molina, L. T., Gallardo, L., Andrade, M., Baumgardner, D., Borbor-Córdova, M., Bórquez, R., Casassa, G., Cereceda-Balic, F., Dawidowski, L., Garreaud, R., Huneus, N., Lambert, F., McCarty, J. L., Mc Phee, J., Mena-Carrasco, M., Raga, G. B., Schmitt, C., & Schwarz, J. P. (2015). Pollution and its Impacts on the South American Cryosphere. *Earth's Future*, 3(12), 345–369. <https://doi.org/10.1002/2015EF000311>
- Muñoz, L. E., Campozano, L. V., Guevara, D. C., Parra, R., Tonato, D., Suntaxi, A., Maisincho, L., Páez, C., Villacís, M., Córdova, J., & Valencia, N. (2023). Comparison of Radiosonde Measurements of Meteorological Variables with Drone, Satellite Products, and WRF Simulations in the Tropical Andes: The Case of Quito, Ecuador. *Atmosphere*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/atmos14020264>
- Nansai, K., Tohno, S., Chatani, S., Kanemoto, K., Kagawa, S., Kondo, Y., Takayanagi, W., & Lenzen, M. (2021). Consumption in the G20 nations causes particulate air pollution resulting in two million premature deaths annually. *Nature Communications*, 12(1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26348-y>
- Nedbor-Gross, R., Henderson, B. H., Davis, J. R., Pachón, J. E., Rincón, A., Guerrero, O. J., & Grajales, F. (2017). Comparing standard to feature-based

- meteorological model evaluation techniques in Bogotá, Colombia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(2), 391–413. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0058.1>
- NOAA. (2014, August 1). *The Walker Circulation: ENSO's atmospheric buddy* | NOAA Climate.gov. <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/walker-circulation-ensos-atmospheric-buddy>
- NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration-. (2023). *El Niño & La Niña (El Niño-Southern Oscillation)* | NOAA Climate.gov. <https://www.climate.gov/enso>
- NOAA (National and Oceanic Atmospheric and Administration). (2023). *Inter-Tropical Convergence Zone* | National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.noaa.gov/jetstream/tropical/convergence-zone>
- Ortiz, E. Y., Jimenez, R., Fochesatto, G. J., & Morales-Rincon, L. A. (2019). Caracterización de la turbulencia atmosférica en una gran zona verde de una megaciudad andina tropical. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43(166), 133. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.697>
- Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Oettle, C., Bréon, F. M., Nan, H., Zhou, L., & Myneni, R. B. (2012). Response to comment on “Surface urban heat island across 419 global big cities.” *Environmental Science and Technology*, 46(12), 6889–6890. <https://doi.org/10.1021/es301811b>
- Pérez, I. A., García, M. Á., Sánchez, M. L., Pardo, N., & Fernández-Duque, B. (2020). Key points in air pollution meteorology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(22), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228349>
- Pfister, G., Pétron, G., Emmons, L. K., Gille, J. C., Edwards, D. P., Lamarque, J., Attie, J., Granier, C., Novelli, P. C., & Emmons, K. (2004). Evaluation of CO simulations and the analysis of the CO budget for Europe. *J. Geophys. Res*, 109, 19304. <https://doi.org/10.1029/2004JD004691>
- Posada-Marín, J. A., Rendón, A. M., Salazar, J. F., Mejía, J. F., & Villegas, J. C. (2019). WRF downscaling improves ERA-Interim representation of



- precipitation around a tropical Andean valley during El Niño: implications for GCM-scale simulation of precipitation over complex terrain. *Climate Dynamics*, 52(5–6), 3609–3629. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4403-0>
- Poveda., Álvarez., & Rueda. (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(11–12), 2233–2249. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y>
- Poveda., & Mesa. (1999). The westerly low-level Chocó jet and two other atmospheric jets over Colombia: Climatology and variability during ENSO phases (in Spanish). *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 23(January), 517–528.
- Poveda., Waylen., & Pulwarty. (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>
- 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>
- Preciado, M., Chica, H., Solarte, E., Carbonell, J., & Peña, A. (2020). Regional wind pattern, a basis for defining the appropriate lapse of time for sugarcane burning in the Cauca Valley (Colombia). *Environment, Development and Sustainability*, 23(6), 9477–9492. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00992-8>
- Ranjha, R., Svensson, G., Tjernström, M., & Semedo, A. (2013). Global distribution and seasonal variability of coastal low-level jets derived from ERA-interim reanalysis. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 65. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v65i0.20412>
- Rau, B., & Gómez, L. (2018). *Colombia Sugar Annual Colombian Sugar Production Bounces Back after Three Years of Difficult Weather Conditions*. <https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?fil>

ename=Sugar Annual\_Bogota\_Colombia\_4-13-2018.pdf

- Ren, H. L., Lu, B., Wan, J., Tian, B., & Zhang, P. (2018). Identification Standard for ENSO Events and Its Application to Climate Monitoring and Prediction in China. *Journal of Meteorological Research*, 32(6), 923–936. <https://doi.org/10.1007/s13351-018-8078-6>
- Russo, A., Gouveia, C., Levy, I., Dayan, U., Jerez, S., Mendes, M., & Trigo, R. (2016). Coastal recirculation potential affecting air pollutants in Portugal: The role of circulation weather types. *Atmospheric Environment*, 135, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.039>
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y. T., Chuang, H. Y., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., Van Den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., & Becker, E. (2014). The NCEP climate forecast system version 2. *Journal of Climate*, 27(6), 2185–2208. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>
- Sakamoto, M. S., Ambrizzi, T., & Poveda, G. (2011). Moisture Sources and Life Cycle of Convective Systems over Western Colombia. *Advances in Meteorology*, 2011, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2011/890759>
- Seidel, D. J., Ross, R. J., Angell, J. K., & Reid, G. C. (2001). Climatological characteristics of the tropical tropopause as revealed by radiosondes. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 106(D8), 7857–7878. <https://doi.org/10.1029/2000JD900837>
- Sierra, J. P., Arias, P. A., Durán-Quesada, A. M., Tapias, K. A., Vieira, S. C., & Martínez, J. A. (2021). The Choco low-level jet: past, present and future. *Climate Dynamics*, 56(7–8), 2667–2692. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05611-w>
- Souza, N., Nascimento, E., & Moreira, D. (2021). Performance evaluation of the WRF model in a tropical region: wind speed analysis at different sites. *Atmosfera*, August 2020, 0–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.20937/ATM.52968>
- Steenburgh, W. J., Schultz, D. M., Snyder, B. J., & Meyers, M. P. (2013). *Mountain Weather Research and Forecasting*. 693–716. <https://doi.org/10.1007/978-94->

- 007-4098-3
- Sun, D.-Z., & Oort, A. H. (1995). Humidity-Temperature relationship in the tropical troposphere. *Journal of Climate*, 8, 1974–1987. [https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/8/8/1520-0442\\_1995\\_008\\_1974\\_hrirtt\\_2\\_0\\_co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/8/8/1520-0442_1995_008_1974_hrirtt_2_0_co_2.xml)
- Talgo, K., Bowden, J., Adelman, Z., & Morris, R. (2015). *Western Air Quality Study ( WAQS ) Weather Research Forecast ( WRF ) Meteorological Model Final Modeling Protocol 2014 Modeling Year*.
- Tapiador, F. J., Navarro, A., Moreno, R., Sánchez, J. L., & García-Ortega, E. (2020). Regional climate models: 30 years of dynamical downscaling. *Atmospheric Research*, 235(October 2019), 104785. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104785>
- UCAR (University Corporation for Atmospheric Research). (2023). *Weather Research & Forecasting Model (WRF) | Mesoscale & Microscale Meteorology Laboratory*. <https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>
- Uribe, H. (2017). EL VALLE GEOGRÁFICO DEL RÍO CAUCA: UN ESPACIO TRANSFORMADO POR EL CAPITAL AGROINDUSTRIAL. *Libros Universidad Nacional Abierta y a Distancia*, 298–314. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/book/article/view/2435>
- Wang, X. C., Klemeš, J. J., Dong, X., Fan, W., Xu, Z., Wang, Y., & Varbanov, P. S. (2019). Air pollution terrain nexus: A review considering energy generation and consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105(January), 71–85. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.049>
- Wang, X., Chen, F., Wu, Z., Zhang, M., Tewari, M., Guenther, A., & Wiedinmyer, C. (2009). Impacts of weather conditions modified by urban expansion on surface ozone: Comparison between the Pearl River Delta and Yangtze River Delta regions. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26(5), 962–972. <https://doi.org/10.1007/s00376-009-8001-2>
- Warner, T. T., Mapes, B. E., & Xu, M. (2003). Diurnal patterns of rainfall in northwestern South America. Part II: Model simulations. *Monthly Weather*

- Review*, 131(5), 813–829. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<0813:DPORIN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<0813:DPORIN>2.0.CO;2)
- Whiteman, D. (2001). Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications. In *Mountain Research and Development* (Vol. 21, Issue 2). [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2001\)021\[0200:mmfaa\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2001)021[0200:mmfaa]2.0.co;2)
- WHO. (2021). WHO's global air-quality guidelines. Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. In *Lancet* (Vol. 368, Issue 9544).
- Windrow, B., Kollár, I., & Liu, M.-C. (1996). Statistical theory of quantization. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 45(2), 353–361. <https://people.isy.liu.se/rt/fredrik/spcourse/quant.pdf>
- Yáñez, G., Gironás, J., Caneo, M., Delgado, R., & Garreaud, R. (2018). Using the Weather Research and Forecasting (WRF) model for precipitation forecasting in an Andean region with complex topography. *Atmosphere*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/atmos9080304>
- Yepes, J., Poveda, G., Mejía, J. F., Moreno, L., & Rueda, C. (2019). Choco-jex: A research experiment focused on the Chocó low-level jet over the far eastern Pacific and western Colombia. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(5), 779–796. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0045.1>
- Žabkar, R., Koračin, D., & Rakovec, J. (2013). A WRF/Chem sensitivity study using ensemble modelling for a high ozone episode in Slovenia and the Northern Adriatic area. *Atmospheric Environment*, 77, 990–1004. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.065>
- Zhan, C., Xie, M., Lu, H., Liu, B., Wu, Z., Wang, T., Zhuang, B., Li, M., & Li, S. (2023). Impacts of urbanization on air quality and the related health risks in a city with complex terrain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(1), 771–788. <https://doi.org/10.5194/acp-23-771-2023>
- Zhang, S., Wang, M., Wang, L., Liang, X. Z., Sun, C., & Li, Q. (2023). Sensitivity of the simulation of extreme precipitation events in China to different cumulus parameterization schemes and the underlying mechanisms. *Atmospheric Research*, 285(September 2022), 106636.

- <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106636>
- Zhao, W., & Li, A. (2015). A Review on Land Surface Processes Modelling over Complex Terrain. *Advances in Meteorology*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/607181>
- Zhou, W., Gao, M., He, Y., Wang, Q., Xie, C., Xu, W., Zhao, J., Du, W., Qiu, Y., Lei, L., Fu, P., Wang, Z., Worsnop, D. R., Zhang, Q., & Sun, Y. (2019). Response of aerosol chemistry to clean air action in Beijing, China: Insights from two-year ACSM measurements and model simulations. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 255(Pt 2). <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2019.113345>