

EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS CLIMATICOS GLOBALES  
DEL PROYECTO CMIP5 Y CMPI6 PARA LA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA PARA  
COLOMBIA



ANDREA VIVIANA MORA DIAZ



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
VILLAVICENCIO

2024

EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS CLIMATICOS GLOBALES  
DEL PROYECTO CMIP5 Y CMPI6 PARA LA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA PARA  
COLOMBIA

ANDREA VIVIANA MORA DIAZ

Solución problemática ambiental presentada como requisito para optar al título de Ingeniera  
Ambiental

Director:

Ing. JAIR ESTEBAN BURGOS CONTENTO

Ingeniero Ambiental

Maestrante en Hidrosistemas

Codirector:

Mg. CARLOS DAVID GÓMEZ ORTIZ

Ingeniero Químico

Magíster en Ingeniería Química

Doctor en Geografía Física y Ciencias del Ecosistema

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD INGENIERÍA AMBIENTAL  
VILLAVICENCIO

2024

**Autoridades Académicas**

**P. Álvaro José ARANGO RESTREPO O.P.**

Rector General

**P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGO, O.P**

Vicerrector Académico General

**P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.**

Rector Seccional Villavicencio

**P. Adrián Mauricio GARCÍA PEÑARANDA, O.P.**

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

**Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBON**

Secretaria General Seccional Villavicencio

**Mg. William PEÑARANDA ZÁRATE**

Decano Facultad de Ingeniería Ambiental

## **Dedicatoria**

A ti, que fuiste guía, apoyo y faro en cada paso de este camino.

Tu paciencia me enseñó, tu ejemplo me inspiró, y tu fe en mí me sostuvo cuando más lo necesité.

Esta tesis es el reflejo de todo lo que me ayudaste a construir, aun sin buscarlo.

Gracias por ser mi mayor impulso.

## Agradecimientos

A Dios, por ser mi guía constante, por darme fuerza en los momentos de duda y por abrirme caminos incluso cuando todo parecía incierto. Gracias por nunca soltar mi mano.

A mis papás, Eglys y Hamilton, por su amor incondicional, por enseñarme el valor del esfuerzo y por creer en mí incluso cuando yo no lo hacía. Este logro también es de ustedes, porque su apoyo ha sido mi cimiento.

A mi director de grado, Esteban Burgos, por su dedicación, orientación y compromiso a lo largo de este proceso. Su exigencia, enseñanzas y confianza fueron fundamentales para impulsar mi crecimiento académico y personal, permitiéndome culminar exitosamente este proyecto

A mi codirector, Carlos Gómez, por su tiempo y por compartir su conocimiento con generosidad.

A Juan José, mi mejor amigo, por estar ahí en cada paso. Gracias por tus palabras, por tu apoyo inquebrantable y por saber siempre qué decir cuando más lo necesitaba.

A Coco, mi compañero de cuatro patas, por sus silencios llenos de amor, por sus ojitos que me reconfortaban y por recordarme que el cariño más puro a veces viene con patas y una cola que nunca deja de moverse.

Y finalmente, a mí, por no rendirme, por levantarme en cada caída, por confiar, por dudar, por llorar y por seguir. Me abrazo con orgullo, porque lo logré.

## Contenido

	Pág.
Resumen.....	9
Abstract .....	10
Introducción .....	11
Formulación del problema .....	13
Objetivos.....	14
Objetivo General.....	14
Objetivos Específicos.....	14
Antecedentes .....	15
Marco Teórico.....	18
Marco Conceptual.....	18
Marco Legal .....	19
Metodología .....	21
Fase 1: Conjunto de datos observacionales y de reanálisis.....	21
Fase 2: Procesamiento y adaptación de datos de modelos climáticos .....	24
Fase 3: Comparación y análisis de desempeño de los modelos.....	26
Resultados y discusión.....	28
Discusión de resultados.....	57
Impacto social y humanístico.....	64
Conclusiones.....	65
Recomendaciones .....	66
Referencias Bibliográficas .....	67

## Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Marco legal que rige el enfoque de la investigación. ....	19
Tabla 2. Modelos climatológicos usados para precipitación y temperatura de los proyectos CMIP5 y CMIP6.....	22
Tabla 3. Resultados de los modelos goblales para Colombia según diferentes modelos y períodos climáticos para precipitación.....	29
Tabla 4. Resultados de los modelos globales para Colombia según diferentes modelos y periodos climáticos para temperatura .....	31
Tabla 5. Resultados temperaturas promedio mensuales IDEAM interpoladas con IDW .....	34
Tabla 6. Resultados precipitación promedio mensual.....	37
Tabla 7. Resultados anuales de la comparación del modelo vs estaciones de Aeropuertos principales del país de temperatura.....	40
Tabla 8. Resultados mensuales de la comparación del modelo vs estaciones de aeropuestos principales del país de temperatura.....	46
Tabla 9. Resultados anuales de la comparación del modelo vs estaciones de aeropuestos principales del país de precipitación .....	51
Tabla 10. Comparación de modelos de precipitación para el territorio colombiano en escalas temporales y espaciales.....	57

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Promedio del RMSE de precipitación para todos los aeropuertos del país de cada modelo vs estaciones del IDEAM.....	60
Figura 2. RMSE de los modelos de precipitación anual versus precipitación anual en los aeropuertos de Colombia .....	61
Figura 3. Promedio del RMSE de temperatura para todos los aeropuertos del país de cada modelo vs estaciones del IDEAM de forma mensual (izq) y de forma mensual (derecha).....	62
Figura 4. RMSE de temperatura para todos los aeropuertos del país de cada modelo vs estaciones del IDEAM de forma mensual (izq) y de forma mensual (derecha).....	63

## Resumen

El cambio climático ha generado alteraciones significativas en los patrones de temperatura y precipitación a nivel global, impactando especialmente a regiones vulnerables como Colombia. Ante este escenario, los Modelos Climáticos Globales (MCG) del proyecto CMIP5 y CMIP6 ofrecen una herramienta valiosa para proyectar y entender las tendencias climáticas futuras. Esta investigación tuvo como objetivo general evaluar el desempeño de estos modelos en la representación del ciclo anual de precipitación y temperatura del aire en Colombia, empleando datos observacionales del IDEAM y simulaciones de modelos seleccionados. La metodología se desarrolló en tres fases: (1) recolección y procesamiento de datos observacionales y de reanálisis, (2) interpolación espacial mediante el método IDW para construir mapas climatológicos multianuales de temperatura y precipitación, y (3) validación estadística de los modelos mediante indicadores como RMSE y correlación de Pearson frente a estaciones ubicadas en los principales aeropuertos del país. Los resultados evidencian un aumento sostenido de la temperatura promedio mensual en la mayoría del territorio nacional entre los periodos 1971–2000 y 1991–2020, con mayor intensidad en las regiones Caribe y Orinoquía. En cuanto a la precipitación, se identificó una redistribución espacial y una reducción de los valores máximos en ciertas zonas húmedas como el litoral Pacífico. Los modelos evaluados muestran capacidades dispares según la variable y región, destacándose FGOALS-g1 (CMIP5) como el de mejor desempeño general. Se concluye que, aunque los modelos globales presentan limitaciones en la simulación detallada del clima colombiano, su integración con datos locales ofrece valiosa información para la gestión ambiental y la planificación territorial. Se recomienda el uso de reducción de escala y validación local continua para mejorar su aplicabilidad, así como la incorporación de estos resultados en políticas de adaptación y mitigación al cambio climático.

**Palabras Claves:** Cambio Climático, Colombia, CMIP5, CMIP6, Precipitación y temperatura.

## Abstract

Climate change has significantly altered global temperature and precipitation patterns, with particularly severe impacts on vulnerable regions such as Colombia. In this context, Global Climate Models (GCMs) from the CMIP5 and CMIP6 projects serve as valuable tools for projecting and understanding future climate trends. This study aimed to evaluate the performance of these models in representing the annual cycle of air temperature and precipitation in Colombia, using observational data from IDEAM and simulations from selected global models. The methodology was structured in three phases: (1) collection and processing of observational and reanalysis data; (2) spatial interpolation using the Inverse Distance Weighting (IDW) method to construct multi-annual climatological maps of temperature and precipitation; and (3) statistical validation of model outputs using metrics such as RMSE and Pearson correlation, compared against data from meteorological stations located at the country's main airports. The results revealed a sustained increase in average monthly temperatures across most of the national territory between the periods 1971–2000 and 1991–2020, with a more pronounced rise in the Caribbean and Orinoco regions. In terms of precipitation, spatial redistribution and a reduction in peak values were identified, particularly in highly humid areas such as the Pacific coast. The evaluated models displayed varying levels of accuracy depending on the region and variable, with FGOALS-g1 (CMIP5) emerging as the best-performing model overall. It is concluded that, while global models have limitations in accurately simulating Colombia's complex climate, their integration with local observational data provides valuable insights for environmental management and territorial planning. The use of downscaling techniques and continuous local validation is recommended to enhance applicability, as well as incorporating these findings into climate change adaptation and mitigation policies.

**Key Words:** Climate Change, Colombia, CMIP5, CMIP6, Climate Change, Precipitation and Temperature.

## Introducción

El desarrollo de las actividades humanas a nivel global ha generado un aumento de las temperaturas globales de aproximadamente 1 °C por encima de los niveles preindustriales. Este aumento ha provocado cambios drásticos en el sistema climático como la reducción de la nieve y la mayor frecuencia de fenómenos extremos, sequía, precipitaciones intensas y déficit de precipitaciones en la mayoría de las regiones del planeta, estos cambios con el tiempo han afectado a los sistemas humanos en todos los continentes y océanos, generando riesgos elevados para los ecosistemas y las poblaciones humanas (Arias, Ortega, Villegas, & Martínez, 2021). Por otro lado, estos riesgos están desigualmente distribuidos y son generalmente mayores para las poblaciones vulnerables, en este sentido, Colombia se encuentra con mayor vulnerabilidad a los impactos del cambio climático, los ecosistemas y las comunidades humanas de la región enfrentan riesgos amplificados e incluso nuevos riesgos si la problemática sigue aumentando (Caicedo, 2012).

Una de las razones por las cuales se acentúan las variaciones en los regímenes climáticos son los efectos de los gases de efecto invernadero los cuales contribuyen no solo al cambio climático sino también a las variaciones en los regímenes climáticos. Debido a lo anterior es importante contar con herramientas que permitan evaluar las variaciones del régimen climatológico para el país bajo diferentes escenarios de cambio climático, es por esto que los modelos climatológicos globales surgen como el instrumento para esta evaluación. Dentro de los modelos climáticos globales se destacan los que están incluidos dentro del proyecto CMIP5 y CMIP6 para variables como la precipitación y temperatura, e incluyen la simulación de diferentes escenarios de emisiones de GEI y su impacto en los cambios de la precipitación y la temperatura en Colombia, así como la evaluación de la incertidumbre asociada a los diferentes escenarios de emisiones de GEI versus las mediciones de estas variables por los instrumentos in situ ubicados a lo largo del país por redes meteorológicas robustas como las del IDEAM (Hidalgo Sanchez, Tapia Aguilar, Lujano Laura, & Lujano Laura, 2016).

Colombia exhibe una amplia gama de ciclos diarios y anuales de precipitación. En particular, el ciclo anual de precipitación en Colombia está fuertemente modulado por la ubicación meridional de la Zona de Convergencia Intertropical, sin embargo, la amplia gama de patrones de precipitación en Colombia también está influenciada por la compleja existencia de corrientes de viento fuertes y la compleja topografía, perturbaciones sinópticas como las ondas de levante

tropicales y la ocurrencia de sistemas convectivos de meso escala, entre otras, que configuran diferentes patrones de transporte de humedad atmosférica en la región. Estos patrones climáticos están fuertemente modulados por el fenómeno ENSO (El Niño-Oscilación del Sur), es un tema de gran importancia en la evaluación de los modelos climáticos globales del proyecto CMIP5 Y CMIP6 para la precipitación y temperatura de Colombia. Ya que este fenómeno se caracteriza por la variabilidad periódica de las temperaturas del mar en el Pacífico tropical, y su impacto se extiende a nivel mundial, se caracteriza por dos fases principales El Niño y La Niña (Lemus, Machado, & Parra, 2015). Durante El Niño las temperaturas superficiales del mar aumentan, mientras que, en La Niña, disminuyen por lo cual el fenómeno ENSO puede causar sequías e inundaciones extremas en Colombia, lo que afecta la precipitación y temperatura en el país.

Los Modelos de Circulación General (MCG) son una de las herramientas más utilizadas para evaluar las posibles concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles antropogénicos, a pesar de los sesgos sistemáticos e incertidumbres que presentan. El Proyecto de Inter comparación de Modelos Acoplados (CMIP) es una iniciativa que ha permitido una mejor comprensión del sistema climático y sus respuestas a las actividades humanas, por lo tanto, la quinta y sexta fases del CMIP (CMIP5 y CMIP6, respectivamente) incluyen los desarrollos más recientes en la modelización del clima global (Amador & Rivera, 2008). Aunque los modelos CMIP5 y CMIP6 mejoraron sus simulaciones del clima global con respecto a las generaciones anteriores, siguen presentando sesgos e incertidumbres sistemáticos en particular, estos modelos muestran mayores sesgos en las precipitaciones que en las simulaciones superficiales del aire no sólo a escala global sino también a escala regional (Amador & Rivera, 2008).

La gran cantidad de datos que se generan a partir de los modelos que usan los proyectos CMIP5 y CMIP6 son un reto importante en la gestión de datos y en el uso de los modelos globales para generar herramientas y acciones completas para la mitigación y prevención. Es por esto que este trabajo se enfoca inicialmente en analizar los datos producto de modelos globales que usan los proyectos CMIP5 y CMIP6 para la precipitación y temperatura a nivel nacional, estableciendo métricas de desempeño de estos modelos versus los datos tomados por estaciones meteorológicas validada.

**Formulación del problema**

¿Qué tan precisos son los modelos CMIP5 y CMIP6 para simular la precipitación y la temperatura en Colombia, y cuáles son las implicaciones para las estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático en el país?

## Objetivos

### Objetivo General

Evaluar el desempeño de los modelos CMIP5 y CMIP6 en la representación del ciclo anual de precipitación y temperatura en Colombia.

### Objetivos Específicos

- ✓ Aplicar diversos conjuntos de datos observacionales y de reanálisis para comparar las simulaciones de los modelos CMIP5 y CMIP6 con referencias de datos observacionales y de reanálisis.
- ✓ Construir mapas de temperatura del aire y de precipitación promedio a partir de los datos del IDEAM para los periodos 1971-2000, 1981-2010 y 1991-2020.
- ✓ Aplicar criterios estadísticos para determinar la precisión y/o sesgos de los modelos globales analizados versus los datos medidas por las estaciones del IDEAM.

## Antecedentes

El uso y evaluación de los modelos globales a lo largo del mundo ha sido un factor determinante para el posterior uso y toma de decisiones en las diferentes actividades industriales, agrícolas, domésticas, recreacionales y de desarrollo en relación con los recursos naturales. Un primer acercamiento a este tipo de enfoques con los modelos climáticos globales se puede observar en el artículo de (Bonilla Ovallos & Mesa, 2017) el cual analiza la precisión de los modelos climáticos globales (MCG) para predecir la precipitación en Colombia, un país con complejidades geográficas debido a su topografía montañosa y tropical. Aunque los MCG han mejorado en la simulación del clima global, presentan dificultades importantes en la estimación de la precipitación a nivel regional, lo que afecta su uso en la toma de decisiones críticas como la gestión de recursos hídricos, la agricultura y la prevención de desastres. El estudio evaluó diversos modelos del CMIP5 mediante la comparación de sus predicciones con datos históricos de precipitación del Modelo Hidrológico Nacional (MHN) de Colombia, utilizando métricas de error como MAE, RMSE y BIAS. Los resultados indican que, aunque algunos modelos como el CMCC-CMS muestran un desempeño aceptable en zonas como el Caribe y la Orinoquía, en general los modelos tienen un bajo rendimiento en regiones clave como la Amazonía y el Pacífico, resaltando la necesidad de mejorar las predicciones climáticas y promover investigaciones más profundas para mitigar la alta incertidumbre actual.

De acuerdo con la investigación realizada por (Fernandez, 2021), existe una alta vulnerabilidad del norte de Suramérica, especialmente la cuenca amazónica, ante el cambio climático y la alteración de los ecosistemas, este trabajo se basa en la necesidad de comprender las interacciones entre el suelo y la atmosfera, que son cruciales para el ciclo hidrológico y el clima regional. Se utilizaron ocho modelos de la sexta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP6), y se compararon las simulaciones de evapotranspiración y precipitación con datos de reanálisis (ERA5-land y TRMM), teniendo como resultado que, aunque los modelos logran capturar la estacionalidad de estas variables, presentan sesgos significativos en su magnitud y ubicación, especialmente en áreas como las Guayanas y el norte de Colombia, el modelo NorESM2-MM se destaca como el que mejor representa estas variables, mientras que otros, como CanESM5, muestran un rendimiento deficiente.

Por otro lado, en el artículo de (Arias, Ortega, Villegas, & Martínez, 2021) se evaluó el desempeño de los Modelos de Circulación General (GCMs) de las fases quinta y sexta del Proyecto de Inter comparación de Modelos Acoplados (CMIP5) en la representación del ciclo anual de precipitación y temperatura superficial del aire en Colombia. Se comparan diferentes conjuntos de datos observacionales y de reanálisis, incluyendo estaciones in situ del Instituto Meteorológico Colombiano, para analizar las proyecciones climáticas hacia finales del siglo XXI bajo los escenarios de mayores emisiones de gases de efecto invernadero. Los resultados principales del estudio indican que, si bien los modelos más recientes de CMIP6 muestran mejoras con respecto a la generación anterior CMIP5, aún presentan sesgos sistemáticos en la representación de la Zona de Convergencia Intertropical y procesos dependientes de la elevación, que son cruciales para la variabilidad intra-anual de la precipitación y la temperatura en Colombia. Además, se destaca que los modelos de CMIP6 tienen mayores sesgos en la temperatura sobre los Andes colombianos en comparación con los modelos de CMIP5. Las proyecciones climáticas sugieren un aumento de las temperaturas superficiales del aire y cambios mixtos en la precipitación, con reducciones en ciertas regiones y aumentos en otras durante diferentes períodos del año.

Para el año 2021 (Wang, Tu, Singh, Chen, & Lin) analizaron las características de sequías en el contexto del cambio climático utilizando datos del CMIP6. Se compararon datos observacionales de precipitación, evapotranspiración y humedad del suelo con modelos climáticos globales para evaluar la precisión de los modelos en la simulación de sequías. Se utilizan índices de sequía como SPI, SRI y SPEI para analizar la frecuencia, duración y gravedad de las sequías en diferentes regiones del mundo. Los resultados muestran un aumento en la extensión espacial de sequías en ciertas regiones, con diferencias en la respuesta de los modelos al calentamiento global. Se destaca la importancia de seleccionar los datos más precisos de los modelos para calcular los índices de sequía y se discute el impacto del cambio climático en la frecuencia y duración de las sequías.

Finalmente, es importante mencionar la investigación realizada por (Arjdal, y otros, 2022), en la cual se analizan los cambios proyectados en la disponibilidad de agua en la superficie terrestre sobre la cuenca del Mediterráneo y el Norte de África, destacando una disminución en la precipitación sobre el Mediterráneo y un equilibrio en el flujo de agua dulce en el sureste del Sáhara debido a la evapotranspiración. Se observa un secado del suelo de sur a norte en general, con la excepción de un modelo que proyecta un secado extenso en toda el área de estudio. Estos

resultados resaltan la importancia de comprender y anticipar los impactos del cambio climático en la disponibilidad de agua para la gestión sostenible de recursos hídricos y ecosistemas en estas regiones vulnerables y dan mayor importancia a la validación de los modelos globales para que posteriormente puedan ser utilizados para la toma de decisiones con mucha mayor certeza a nivel regional y nacional.

## **Marco Teórico**

El cambio climático es un fenómeno global que afecta a nuestro planeta. Se manifiesta en aumentos de temperatura, cambios en los patrones de precipitación, deshielo de glaciares y alteraciones en los ecosistemas. Este proceso está impulsado principalmente por actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la liberación de gases de efecto invernadero. El cambio climático tiene consecuencias significativas para la sociedad, la economía y el medio ambiente (Noriega, 2015)

Los modelos climáticos globales son herramientas esenciales para estimar y predecir el clima futuro. Estos modelos, también conocidos como Atmosphere-Ocean Global Circulation Models (AOGCM), simulan los distintos componentes del sistema climático, como la atmósfera, los océanos, la criosfera y la biosfera. A través de ecuaciones matemáticas complejas, estos modelos describen las interacciones entre estos componentes y su evolución en el tiempo (Arias, Ortega, Villegas, & Martínez, 2021).

En los últimos años, los modelos climáticos han evolucionado, incorporando nuevos componentes (como el hielo marino, la química atmosférica y la biogeoquímica oceánica) y aumentando su resolución espacial. Actualmente, se les conoce como “Modelos del Sistema Tierra” o “Earth System Models” (ESM). Estos modelos no solo predicen el clima, sino también su impacto en la agricultura, la energía, la gestión del agua, la salud y otros sectores (Wang, Tu, Singh, Chen, & Lin).

## **Marco Conceptual**

El cambio climático se refiere a las variaciones a largo plazo en los patrones climáticos, atribuibles directa o indirectamente a la actividad humana, lo que altera la composición de la atmósfera global. Estas variaciones pueden manifestarse en cambios en la temperatura, la precipitación, la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, entre otros (Caicedo, 2012). Uno de los procesos fundamentales en este contexto es el aumento de la temperatura donde influye significativamente en los sistemas naturales y humanos, afectando desde el derretimiento de los glaciares hasta la productividad agrícola y la disponibilidad de recursos hídricos (Gómez Díaz & Monterroso Rivas, 2012). Para comprender mejor estos cambios, se utilizan modelos climáticos globales, que son

representaciones matemáticas del sistema climático e incluyen componentes como la atmósfera, los océanos y la superficie terrestre (Garay, 2022). Dentro de estos modelos, la precipitación es un factor clave, ya que se refiere a la caída de agua en forma líquida o sólida desde la atmósfera hacia la superficie terrestre, influenciada por la temperatura, la humedad, la presión atmosférica y los patrones de circulación (Palacios Chacón & Serrano Vincenti, 2011). En este sentido, el Proyecto de Inter comparación de Modelos Acoplados (CMIP, por sus siglas en inglés) es una iniciativa internacional que reúne a diversos centros de modelización climática para coordinar experimentos de simulación del clima pasado, presente y futuro. Dentro de este proyecto, el CMIP5 y el CMIP6 son fases específicas que utilizan modelos climáticos globales avanzados para generar proyecciones climáticas a largo plazo (Fernandez, 2021).

## Marco Legal

*Tabla 1. Marco legal que rige el enfoque de la investigación.*

<b>Título</b>	<b>Ámbito de aplicación</b>	<b>Importancia</b>
<b>Constitución Política de Colombia (Artículo 79)</b>	Establece un marco constitucional para la protección y conservación del medio ambiente, la participación ciudadana en la toma de decisiones ambientales, y el deber del Estado de gestionar de manera sostenible los recursos naturales del país.	Es crucial porque reconoce y protege el derecho de las personas a un ambiente sano, promueve la participación ciudadana en la toma de decisiones ambientales y establece el compromiso del Estado en la protección y conservación del medio ambiente, sentando las bases legales para la gestión ambiental sostenible en el país.
<b>Ley 99 de 1993</b>	Abarca a todas las entidades públicas relacionadas con la gestión ambiental en Colombia, y estableciendo el marco normativo e institucional para la protección, conservación y uso sostenible de los recursos naturales y el medio ambiente en el país.	Esta ley establece el marco legal e institucional para la gestión ambiental del país, también delinea los lineamientos para la protección, conservación y uso sostenible de los recursos naturales y el medio ambiente. Esta ley promovió activamente la sostenibilidad y la preservación de la riqueza ambiental colombiana al establecer normativas claras y mecanismos para su implementación efectiva.

**Tabla 1. Continuación**

<b>Ley 164 de 1994</b>	Se centra en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, incluyendo la aprobación de anexos y protocolos, y establece el marco legal para la gestión del cambio climático en Colombia.	Esta ley demuestra el compromiso del país con la protección del sistema climático en beneficio de las generaciones presentes y futuras, así como con la adopción de medidas para mitigar los impactos del cambio climático a nivel nacional e internacional
<b>Ley 1931 de 2018</b>	Abarca a todas las entidades, organismos y entes corporativos públicos del orden nacional, así como a las entidades territoriales.	Brinda el marco legal e institucional necesario para que Colombia pueda abordar de manera integral los desafíos del cambio climático, a través de la planificación, la adaptación, la mitigación y la articulación de esfuerzos a nivel nacional, departamental y municipal.
<b>Política Nacional de Cambio Climático</b>	Gestionar la variabilidad climática atribuida, directa o indirectamente, a la actividad humana y sus efectos sobre la población y el territorio nacional a través de estrategias adecuadas, programación, planes y proyectos a nivel nacional	La importancia de la Política Nacional de Cambio Climático radica en su capacidad para guiar y coordinar las acciones del gobierno y la sociedad en la mitigación de los efectos del cambio climático.
<b>Ley 1715 de 2014</b>	Esta ley establece lineamientos y disposiciones para promover el desarrollo y la utilización de fuentes no convencionales de energía, principalmente renovables, así como para impulsar el uso eficiente de la energía.	La Ley 1715 de 2014 es de gran importancia para avanzar hacia un modelo energético más limpio, eficiente y sostenible en Colombia.
<b>Decreto 1076 de 2015</b>	Este decreto reglamenta aspectos como la gestión ambiental, el uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables, la protección de ecosistemas, la prevención y control de la contaminación, entre otros, con el fin de promover un desarrollo sostenible y la conservación del medio ambiente en el país	Unifica, regula y fortalece el marco normativo ambiental en Colombia, contribuyendo a la protección del medio ambiente y el desarrollo sostenible del país.

## **Metodología**

En el presente estudio, se empleó una metodología con un enfoque cuantitativo y de carácter exploratorio, este enfoque permitió evaluar detalladamente los ciclos anuales de precipitación y temperatura superficial del aire en Colombia mediante el análisis de datos observacionales, reanálisis y simulaciones climáticas de los modelos CMIP5 y CMIP6 (Del Canto & Silva Silva, 2013). Los datos fueron recopilados y analizados de manera secuencial, asegurando que cada etapa de la investigación se construyera sobre los hallazgos de las etapas anteriores, lo cual contribuyó a la coherencia y solidez del estudio. Por consiguiente, en el diagrama visual de la figura 1, se presenta gráficamente el proceso metodológico empleado, el cual abarca desde la recopilación de datos hasta la evaluación y análisis de los modelos.

### **Fase 1: Conjunto de datos observacionales y de reanálisis.**

Se recopilaron y organizaron las bases de datos históricos de las estaciones climatológicas del IDEAM, que corresponden a tres periodos climatológicos de referencia (1971-2000, 1981-2010 y 1991-2020), para variables de precipitación y temperatura superficial del aire. Adicionalmente se incorporaron archivos climáticos de los principales aeropuertos de 1972 hasta 2023. Los datos fueron procesados para obtener promedios mensuales y anuales de temperatura, y acumulados para precipitación generando así archivos .csv y mapas climatológicos.

Los modelos climáticos globales de los proyectos CMIP5 y CMIP6 usados se pueden ver en la siguiente tabla:

**Tabla 2.** Modelos climatológicos usados para precipitación y temperatura de los proyectos CMIP5 y CMIP6

Proyecto	Variable	Modelo	Descripción
CMIP5	Precipitación	CFSV2	CFSv2 es el Sistema de Pronóstico Climático de la NCEP (versión 2), un modelo global acoplado que integra la atmósfera, el océano, la tierra y el hielo marino para generar pronósticos estacionales y reanálisis. Su robustez en la simulación de variables hidrológicas, como la precipitación, lo hace ampliamente utilizado en estudios climáticos (Saha, y otros, 2014)
		CanCM4	CanCM4 es un modelo global desarrollado por Environment Canada. Emplea componentes atmosféricos y oceánicos de cuarta generación para representar la variabilidad climática y las tendencias de cambio, siendo muy útil en la simulación de la precipitación y otros campos climáticos (Environment Canada, 2019).
		FGOALS-gl	FGOALS-gl forma parte de la familia del Flexible Global Ocean–Atmosphere–Land System Model, desarrollado por LASG/IAP (CAS). Este modelo acoplado integra de manera coherente los procesos atmosféricos, oceánicos y terrestres para simular tanto la variabilidad interanual como las proyecciones a largo plazo, incluyendo los campos de precipitación (Zhou, Yu, Liu, & Wang, 2014).
	Temperatura	CFSV2	Además de su aplicación en la simulación de la precipitación, CFSv2 se destaca en la reproducción de la distribución de la temperatura a nivel de la superficie, aprovechando la interacción entre sus componentes para reproducir la variabilidad climática (Saha, y otros, 2014).

**Tabla 2. Continuación**

		MRI-CGCM3	MRI-CGCM3 es un modelo global desarrollado por el Instituto de Investigación Meteorológica de Japón. Evolucionado desde versiones anteriores (como MRI-CGCM2), integra de manera interactiva procesos atmosféricos, oceánicos y terrestres, permitiendo simular de forma precisa la distribución y variabilidad de la temperatura (Yukimoto, y otros, 2012).
		FGOALS-gl	En el ámbito térmico, FGOALS-gl ofrece una integración acoplada de los procesos de atmósfera, océano y superficie terrestre, lo que le permite reproducir la distribución de temperaturas tanto a nivel global como regional en distintos escenarios (Zhou, Yu, Liu, & Wang, 2014).
CMIP6	Precipitación	GFDL-CM4	GFDL-CM4 es un modelo climático acoplado desarrollado por el Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. Combina componentes atmosféricos (AM4) y oceánicos (OM4) de alta resolución, lo que le permite simular con precisión la climatología actual y la variabilidad, mostrando un buen desempeño en la simulación de la distribución de la precipitación (Held, y otros, 2019).
		GISS-E2-1-G-CC	GISS-E2-1-G-CC es una configuración del modelo ModelE desarrollado por el Goddard Institute for Space Studies. Incorpora un ciclo interactivo de carbono (de ahí el “CC”) y está optimizado para reproducir procesos atmosféricos complejos y la distribución de la precipitación en experimentos históricos y de proyección (NASA GISS, 2025).

**Tabla 2. Continuación**

		MIROC6	MIROC6 es la versión más reciente del modelo global MIROC, desarrollado en conjunto por una comunidad japonesa. Incorpora mejoras en la representación de procesos de nubes, radiación y dinámica atmosférica, lo que le permite capturar de forma robusta la variabilidad de la precipitación en diversos escenarios climáticos (Tatebe, y otros, 2019).
Temperatura		GFDL-CM4	Utilizado también para la simulación de la temperatura, GFDL-CM4 aprovecha su alta resolución y las mejoras en la modelación de procesos oceánicos y atmosféricos para ofrecer proyecciones precisas de la distribución térmica a nivel global y regional (Held, y otros, 2019)
		GISS-E2-1-G-CC	En el ámbito térmico, GISS-E2-1-G-CC utiliza sus avanzadas mejoras en la dinámica atmosférica y la incorporación del ciclo del carbono de forma interactiva para captar variaciones de temperatura en escalas tanto regionales como globales (NASA GISS, 2025).
		MIROC6	MIROC6 ha sido optimizado para la simulación térmica global, integrando procesos de nubes, radiación y circulación atmosférica que le permiten reproducir tanto la media de la temperatura como su variabilidad en diferentes contextos climáticos (Tatebe, y otros, 2019).

**Fase 2: Procesamiento y adaptación de datos de modelos climáticos**

- **Fuentes de Datos:**

- *Datos Observacionales:* Promedios climatológicos mensuales (1971-2000) de precipitación de estaciones meteorológicas del IDEAM, almacenados en formato Excel con coordenadas en grados-minutos-segundos (DMS).

- *Modelos Climáticos*: Datos de precipitación de los modelos CMIP5 (CFSv2, CanCM4, FGOALS-gl) y CMIP6 (GDFL-CM4, GISS-E2-1-G-CC, MIROC6) y de temperatura media del aire de los modelos CMIP5 (CFSv2, MRI-CGCM3, FGOALS-gl) y CMIP6 (GDFL-CM4, GISS-E2-1-G-CC, MIROC6) en formato NetCDF.
- **Conversión de coordenadas:**  
Implementación de una función personalizada (`dms_a_decimal`) para transformar coordenadas DMS a decimales, asegurando compatibilidad con herramientas geoespaciales.
- **Limpieza de Datos:**  
Eliminación de valores faltantes (NaN) y corrección de inconsistencias (e.g., normalización de nombres de municipios como "Pto. Carreño" a "Puerto Carreño").

## 2. Interpolación Espacial (IDW)

- **Algoritmo de Ponderación por Distancia Inversa:**  
Aplicación de IDW con potencia 2 para generar rejillas continuas (1°x1°) de precipitación a partir de datos puntuales de las estaciones. Fórmula utilizada:

$$z_{interp} = \frac{\sum \left( \frac{z_i}{d_i^p} \right)}{\sum \left( \frac{1}{d_i^p} \right)}$$

Donde  $d_i$  es la distancia euclidiana y  $p = 2$

- **Manejo de Valores Extremos:**  
Asignación de un peso mínimo ( $1 \times 10^{-10}$ ) a puntos con distancia cero para evitar divisiones por cero.

## 3. Visualización de Resultados:

- **Mapas Mensuales Estáticos:**  
Creación de mapas de contorno (12 subplots) utilizando matplotlib y cartopy, integrando capas de relieve (líneas costeras, fronteras políticas) y puntos observados.
- **Animaciones Dinámicas:**  
Generación de GIFs y videos MP4 (imageio) que sintetizan la variabilidad mensual, asegurando escalas de color uniformes (0-600 mm) para comparabilidad.

- **Estandarización Gráfica:**

Uso de proyección PlateCarree, paleta "YlGnBu" para precipitación, y paleta "coolwarm" para temperatura y exportación en alta resolución (600 dpi).

### Fase 3: Comparación y análisis de desempeño de los modelos

#### 1. Comparación con Modelos Climáticos

- **Procesamiento de Datos Modelados:**

- Conversión de unidades de precipitación (de kg/m<sup>2</sup>/s a mm/mes) considerando días por mes y factores de conversión temporal.
- Remuestreo temporal (anual/mensual) usando `xarray.resample`.

- **Extracción de Series Temporales:**

Selección del punto de grilla más cercano a cada estación mediante `sel(method='nearest')`, preservando la georreferenciación.

- **Métricas de Validación:**

- **Correlación de Pearson:** Para evaluar patrones temporales entre observaciones y modelos.
- **RMSE (Raíz del Error Cuadrático Medio):**

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (O_i - M_i)^2}$$

Donde  $O_i$  y  $M_i$  son valores observados y modelados, respectivamente.

#### 2. Validación Multiescala

- **Escala Anual:** Comparación de promedios anuales para la temperatura y acumulados para la precipitación (IDEAM vs. modelos) con análisis de tendencias.
- **Escala Mensual:** Transformación de datos a series temporales largas (`reshape_to_timeseries`) para evaluar variabilidad intraanual.

#### 3. Herramientas Utilizadas

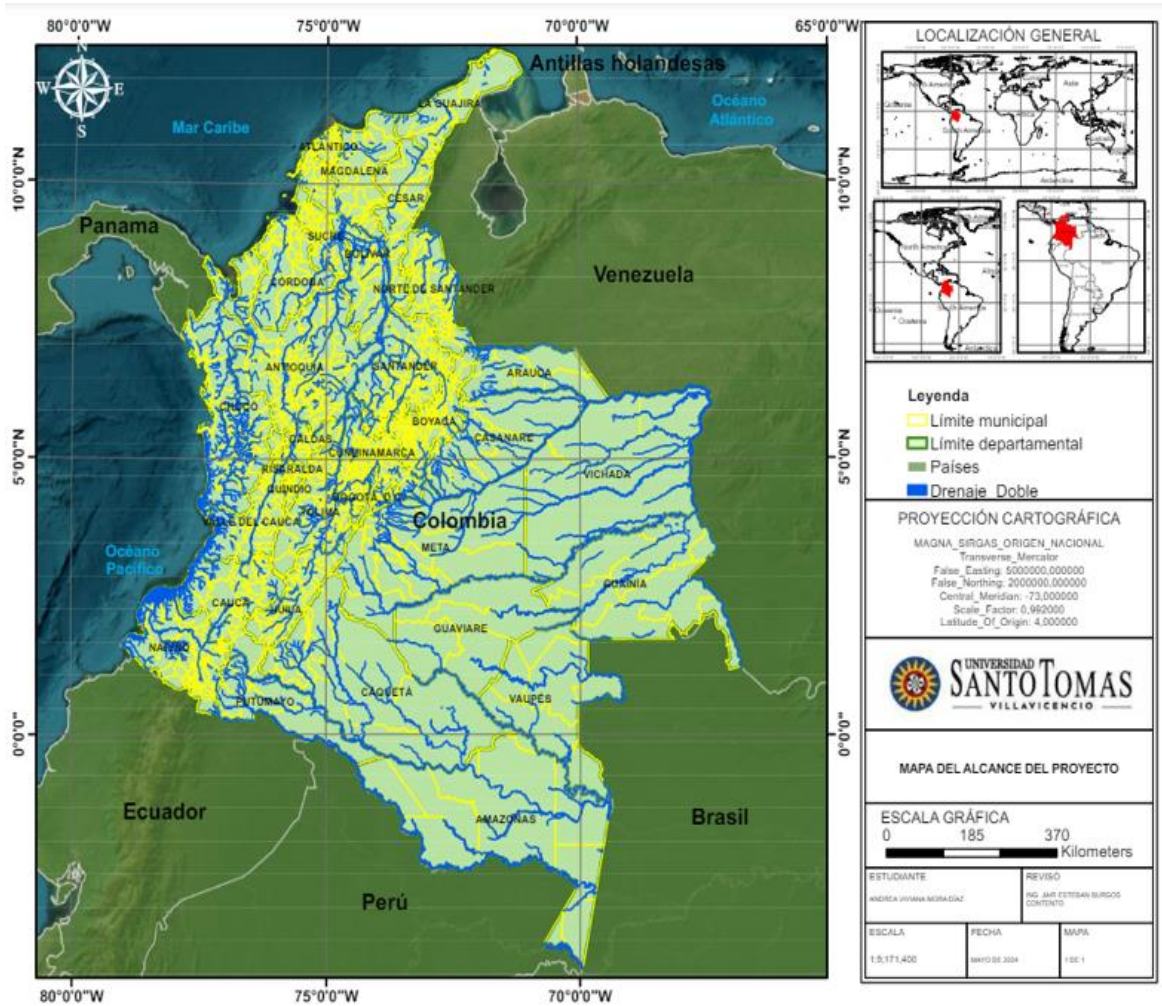
- **Lenguaje:** Python 3.10. mediante intepretador Spyder 5.5.3.
- **Librerías:** Pandas 2.2.2. (manejo de tablas) (McKinney, 2010), Xarray 2023.6.0 (datos NetCDF) (Hoyer & Hamman, 2017) , Geopandas 1.0.1 (geodatos) (Jordahl, 2014), Cartopy 0.24.1/Matplotlib 3.8.4 (visualización) (Met Office, 2010-2015) (Hunter, 2007), Scipy 1.13.1 (distancias) (Virtanen, 2020).
- **Reproducibilidad:** Scripts modularizados con funciones reutilizables y rutas relativas para portabilidad.

#### 4. Consideraciones técnicas:

- **Transparencia en Preprocesamiento:** Documentación de ajustes aplicados (e.g., corrección de coordenadas).
- **Limitaciones:**
  - Resolución espacial gruesa de modelos ( $\sim 1^\circ$ ) vs. datos puntuales.
  - Supuestos de IDW (homogeneidad espacial de la correlación distancia-precipitación).

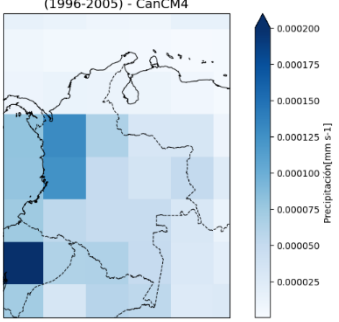
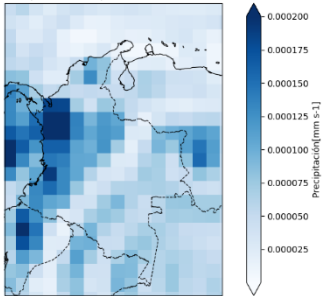
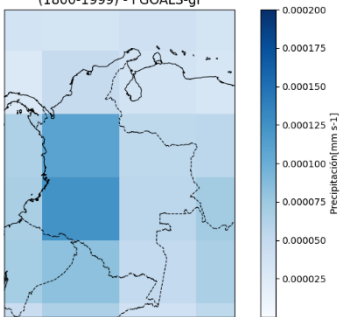
## Resultados y discusión

### Fase 1:



### 1. Precipitación

**Tabla 3.** Resultados de los modelos globales para Colombia según diferentes modelos y períodos climáticos para precipitación

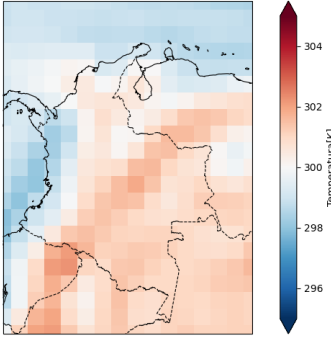
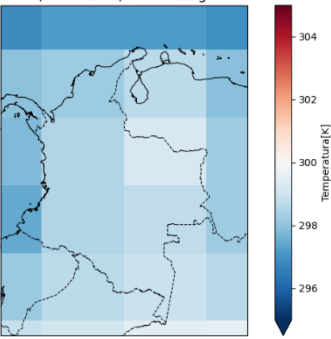
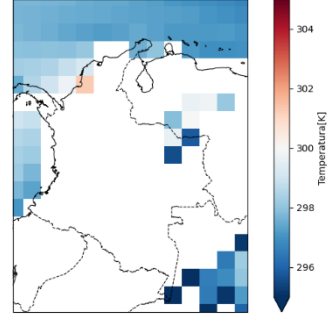
Proyecto	Modelos	Imagen	Descripción
CMIP5	CanCM4		Distribución espacial de la precipitación media (mm/s) para el período 1996–2005, simulada por el modelo CanCM4 del proyecto CMIP5. Se observa mayor precipitación en el litoral pacífico colombiano y zonas del suroccidente de la región.
	CFSv22-2011		Distribución espacial de la precipitación media (mm/s) durante el período 2010–2020, simulada por el modelo CFSv22-2011. Se identifican altos valores de precipitación en la región andina y el litoral pacífico colombiano.
	FGOALS-gl		Distribución espacial de la precipitación media (mm/s) durante el período 1800–1999, simulada por el modelo FGOALS-gl. Se observan mayores valores de precipitación en el litoral pacífico colombiano y áreas centrales de la región.

**Tabla 3. Continuación**

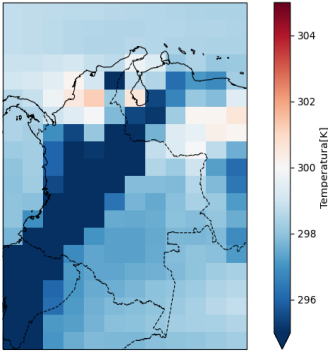
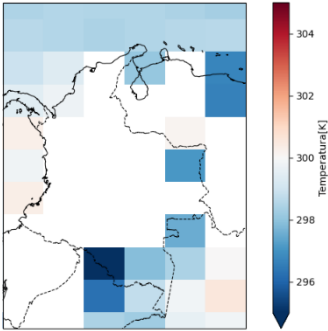
CMIP6	GFDL-CM4	<p>(1950-2019) - GFDL-CM4</p>	<p>Distribución espacial de la precipitación media (mm/s) durante el período 1950–2019, simulada por el modelo GFDL-CM4 del proyecto CMIP6. Se registran mayores valores de precipitación en el litoral pacífico colombiano.</p>
	GISS-E2-1-G-CC	<p>(1850-2014) - GISS-E2-1-G-CC</p>	<p>Distribución espacial de la precipitación media (mm/s) durante el período 1850–2014, simulada por el modelo GISS-E2-1-G-CC del proyecto CMIP6. Se destacan altos valores de precipitación en el litoral pacífico y algunas zonas del interior.</p>
	MIROC6	<p>(1850-2014) - MIROC6</p>	<p>Promedio espacial de precipitación (mm/s) para el periodo 1850–2014, simulado por el modelo MIROC6 (CMIP6). Se observa una mayor concentración de lluvias sobre el oeste y centro de Colombia.</p>

## 2. Temperatura

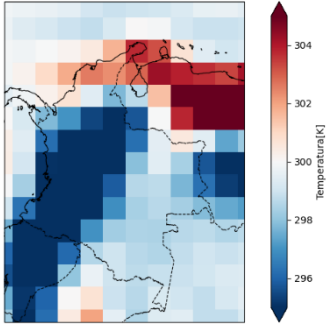
**Tabla 4.** Resultados de los modelos globales para Colombia según diferentes modelos y periodos climáticos para temperatura

Proyecto	Modelos	Imagen	Descripción
CMIP5	CFSv22-2011	<p>(2010-2020) - CFSv22-2011</p> 	<p>Promedio espacial de temperatura (K) para el periodo 2010–2020, simulado por el modelo CFSv22-2011. Se evidencia un patrón cálido en el sur y oriente de Colombia, mientras que el noroeste muestra temperaturas más moderadas.</p>
	FGOALS-gl	<p>(1800-1999) - FGOALS-gl</p> 	<p>Promedio espacial de temperatura (K) para el periodo 1800–1999, simulado por el modelo FGOALS-gl. El mapa muestra valores predominantemente bajos de temperatura en comparación con periodos más recientes, reflejando un patrón relativamente homogéneo y frío en la región andina y amazónica de Colombia.</p>
	MRI-CGCM3	<p>(1971-1980) - MRI-CGCM3</p> 	<p>El mapa presenta una distribución heterogénea, con predominancia de valores fríos en gran parte del territorio colombiano.</p>

**Tabla 4. Continuación**

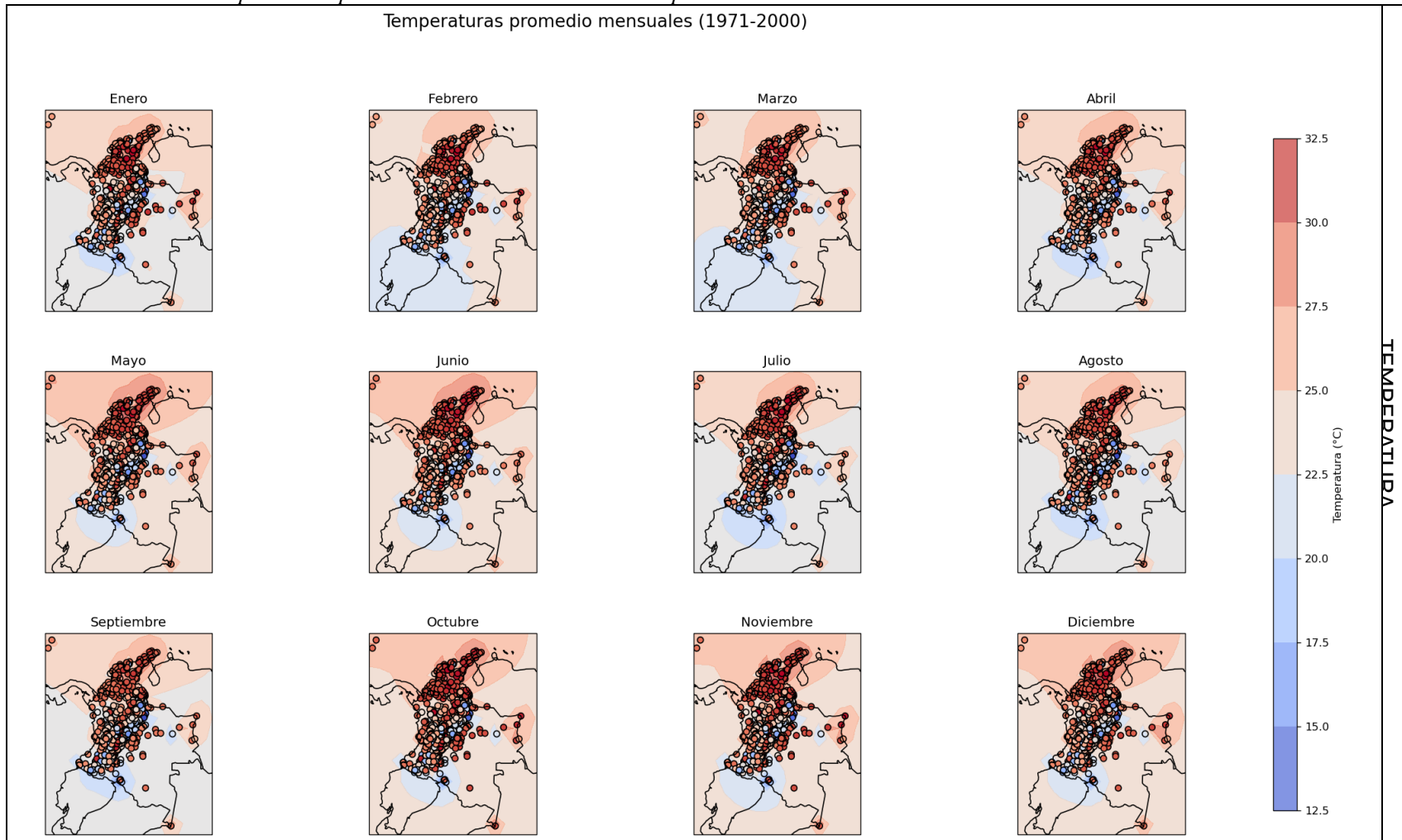
CMIP6	GDFL-CM4	 <p>(1950-2019) - GDFL-CM4</p>	<p>El mapa revela una marcada predominancia de temperaturas relativamente bajas (aproximadamente entre 295 K y 298 K) en gran parte de Colombia, especialmente en el occidente y suroccidente del país. No obstante, se evidencian núcleos cálidos localizados en el norte (zona Caribe), lo que sugiere una mayor influencia climática regional o posibles sesgos de calentamiento costero por parte del modelo.</p>
	GISS-E2-1-G-CC	 <p>(1850-1900) - GISS-E2-1-G-CC</p>	<p>La distribución espacial muestra predominio de temperaturas bajas (entre 295 K y 298 K), especialmente en el sur y oriente de Colombia. Algunas celdas aisladas presentan ligeras anomalías cálidas y frías, pero sin un patrón claro de concentración regional.</p>

**Tabla 4. Continuación**

	MIROC6	 <p>(1950-2014) - MIROC6</p>	<p>Se observa una clara diferenciación térmica entre el norte y el sur del país. El norte, especialmente las regiones del Caribe y el noreste de Colombia, presenta temperaturas elevadas, superando los 302 K, lo que sugiere una tendencia cálida pronunciada en esa zona. En contraste, el sur y el suroccidente muestran valores inferiores a 296 K, evidenciando un gradiente térmico bien definido. Este contraste sugiere que el modelo MIROC6 representa un calentamiento regional heterogéneo, posiblemente influenciado por la topografía y la interacción océano-atmósfera.</p>
--	--------	--	--

**Fase 2:**

**Tabla 5.** Resultados temperaturas promedio mensuales IDEAM interpoladas con IDW



**Tabla 5. Continuación**

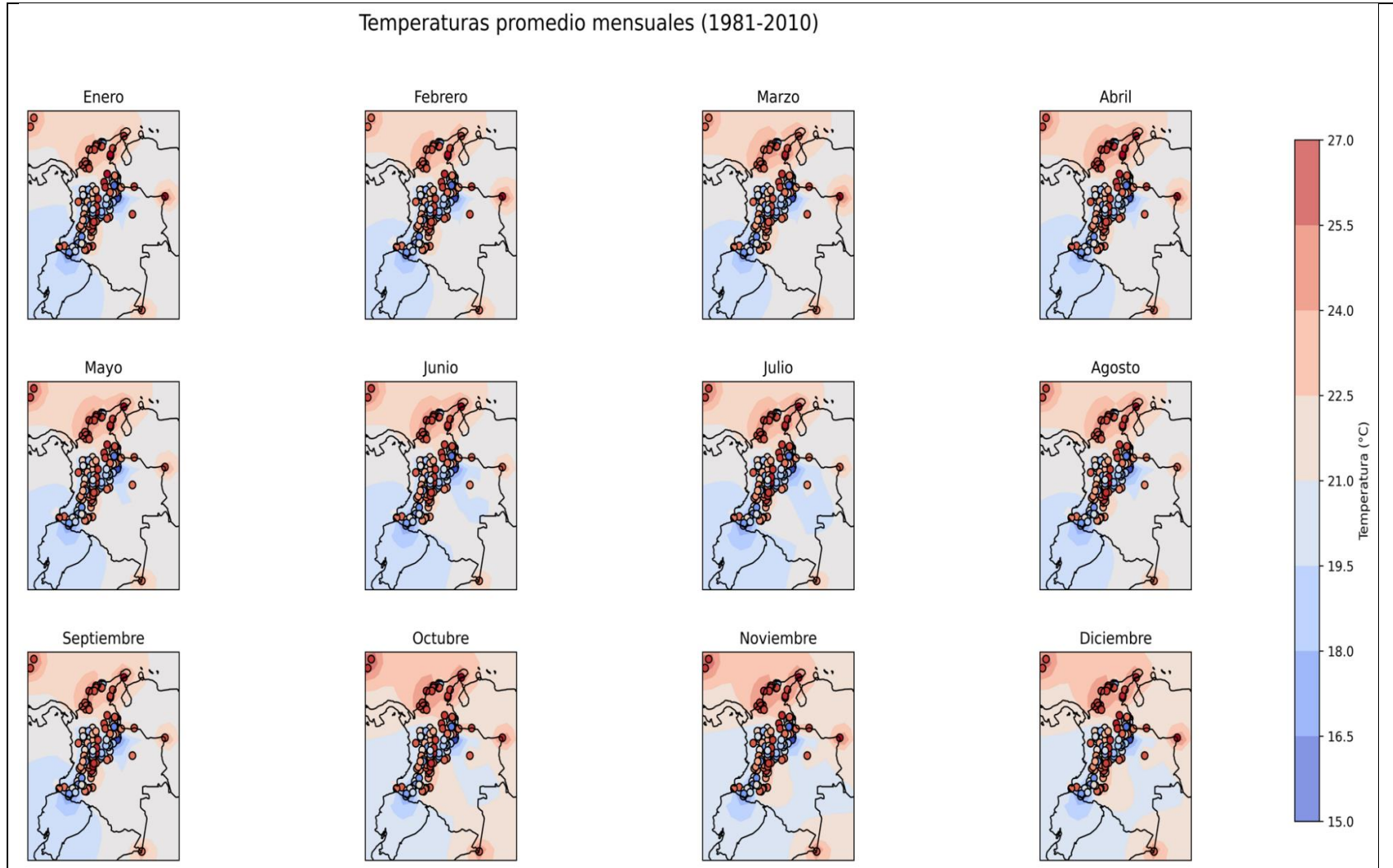
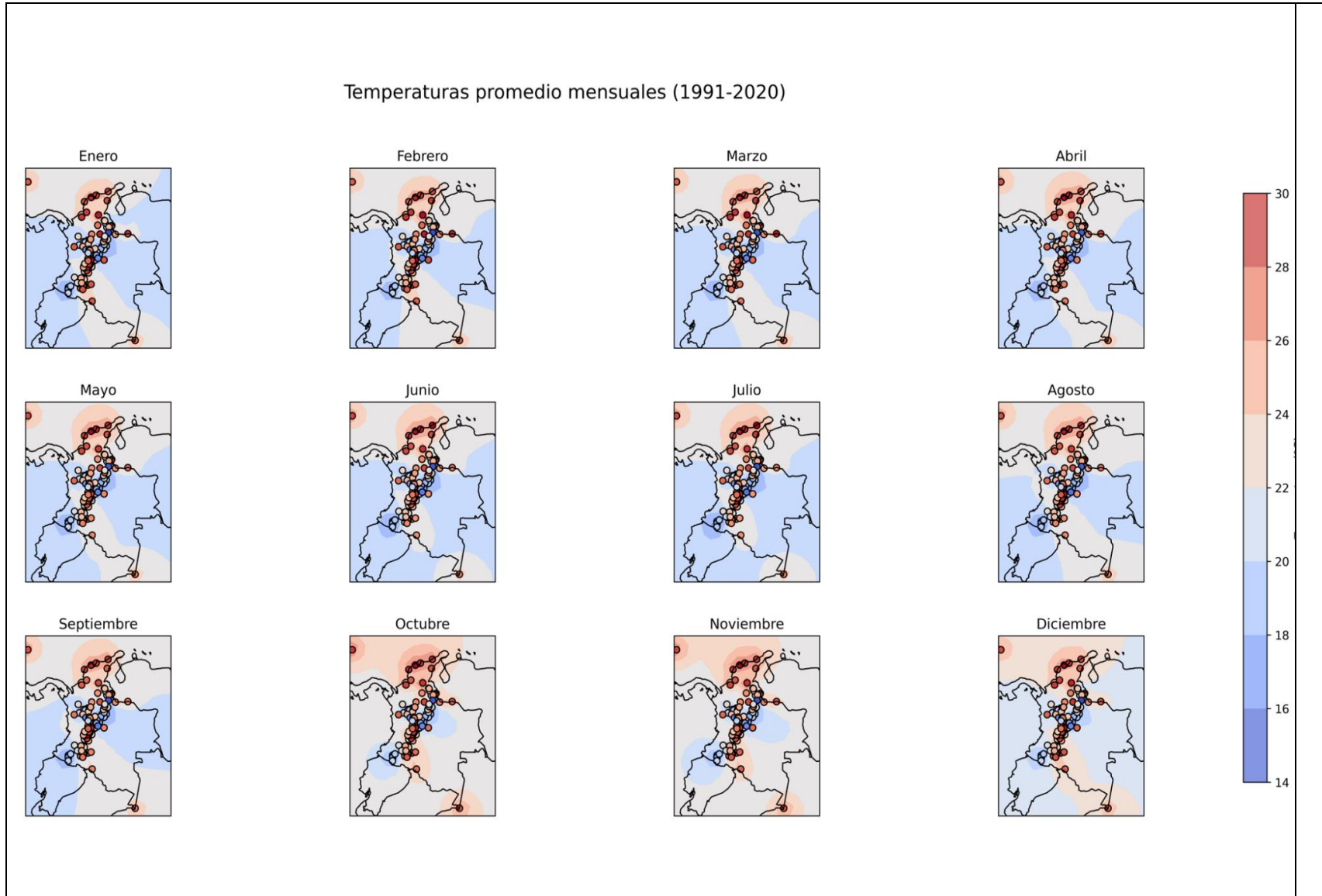


Tabla 5. Continuación



**Tabla 6.** Resultados precipitación promedio mensual

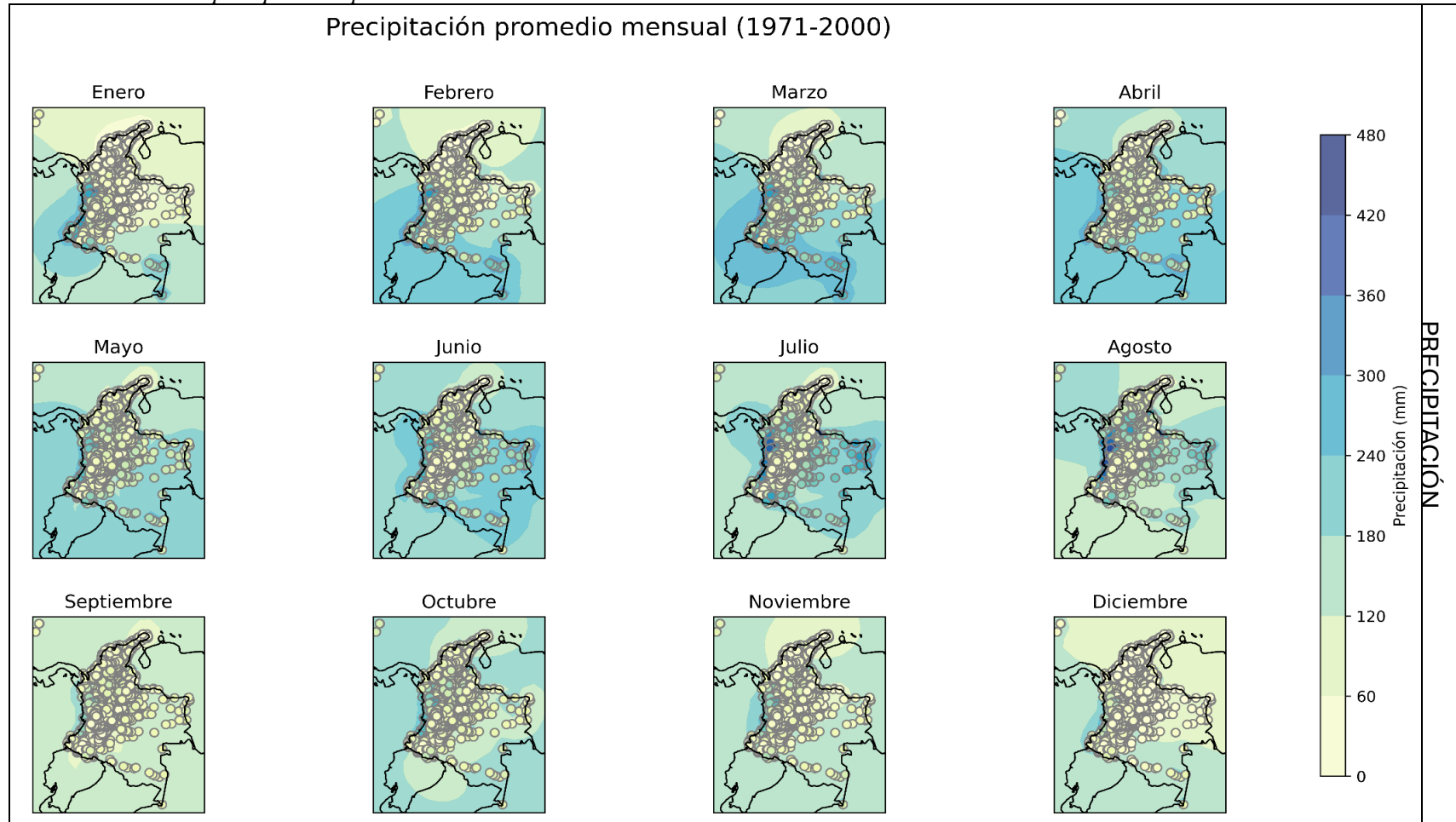


Tabla 6. Continuación

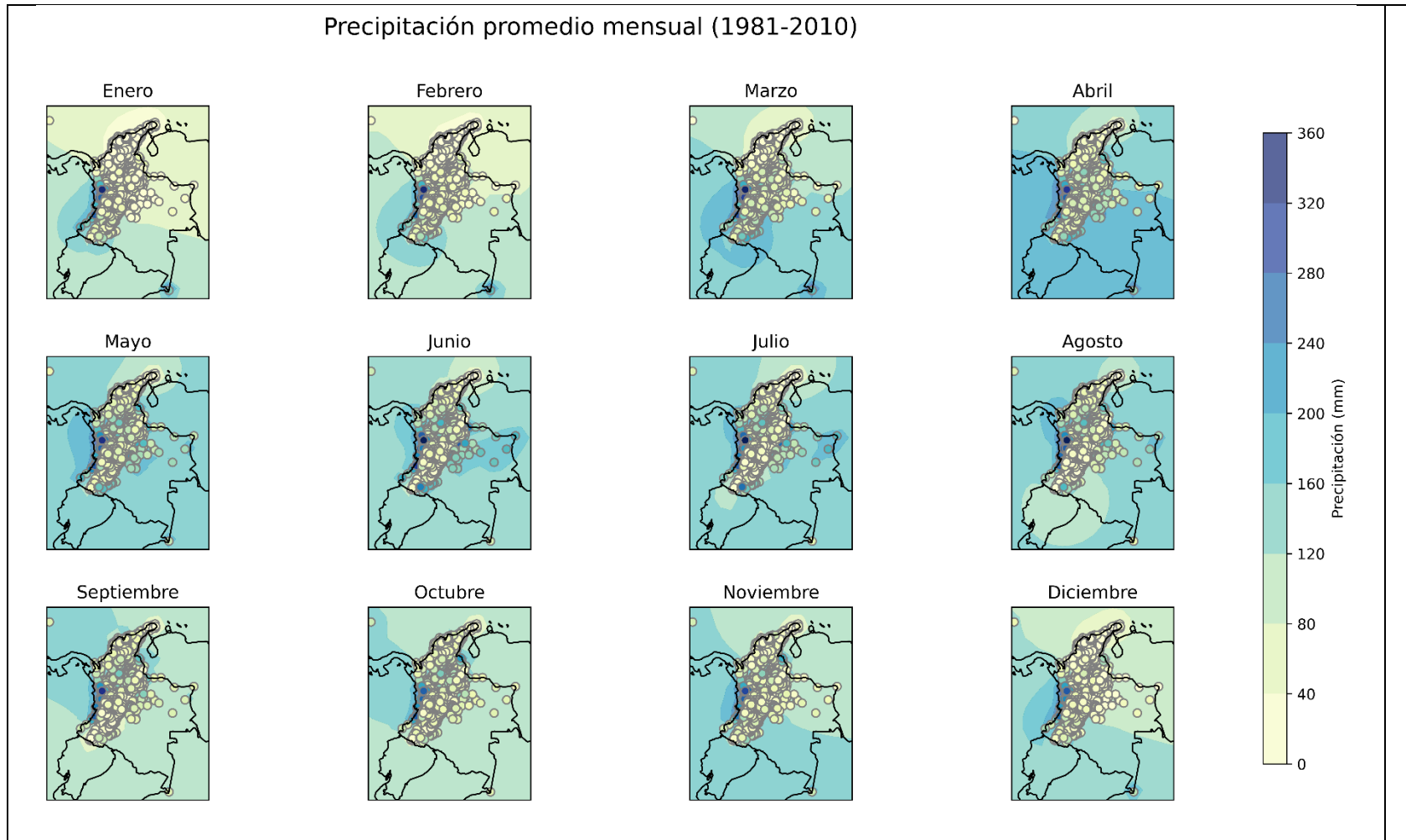
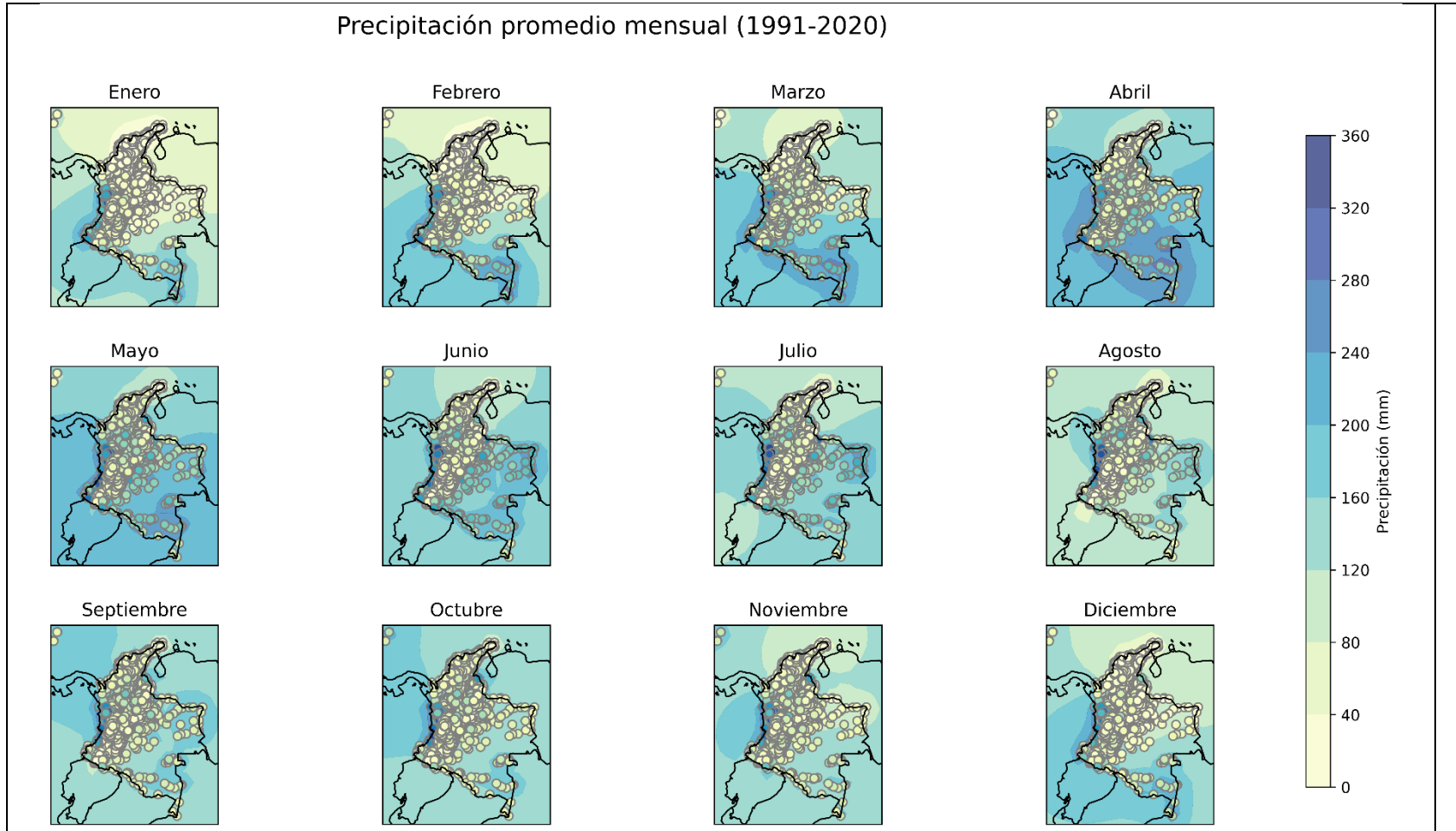


Tabla 6. Continuación



Fase 3:

Tabla 7. Resultados anuales de la comparación del modelo vs estaciones de Aeropuertos principales del país de temperatura

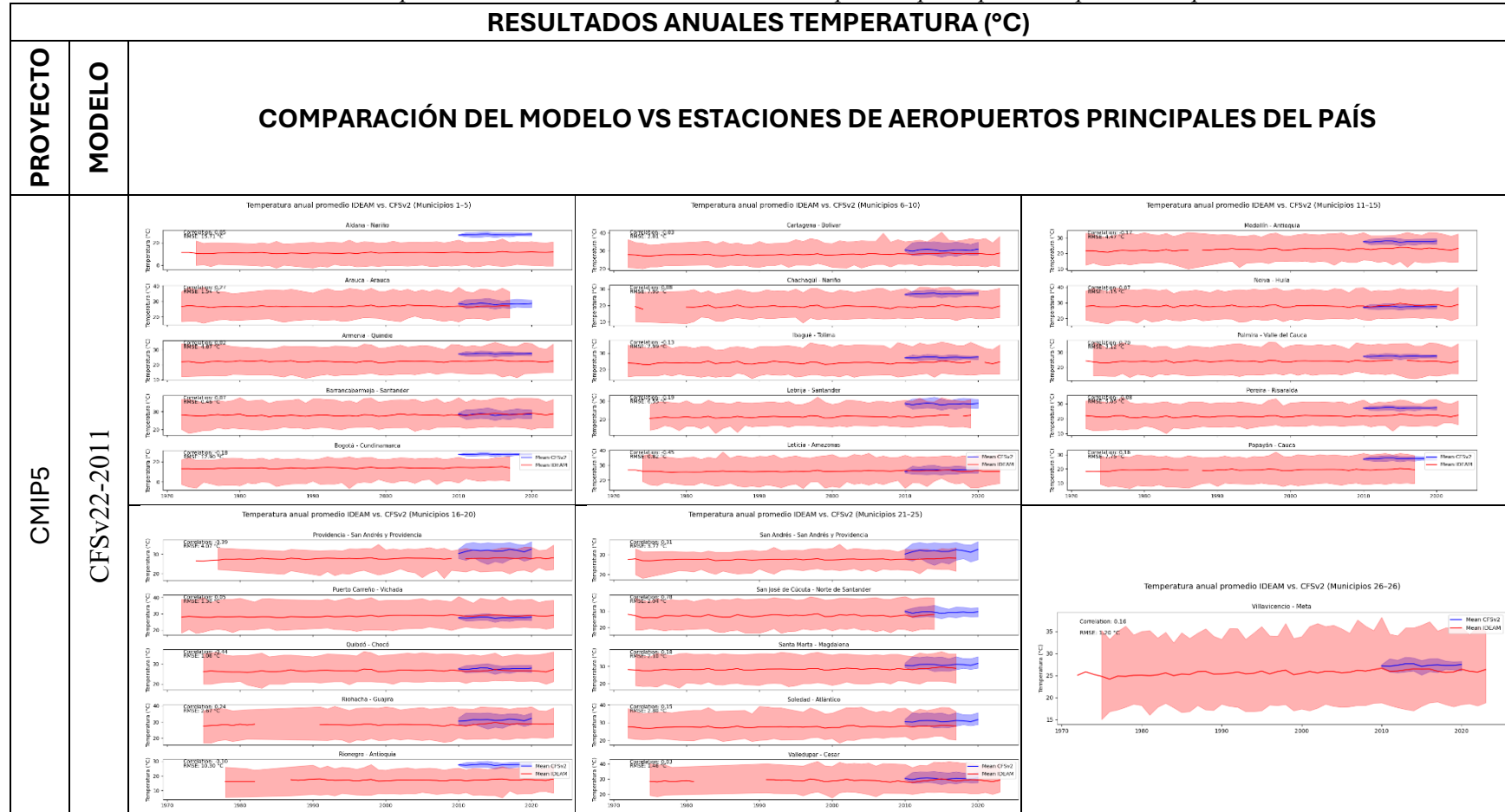


Tabla 7. Continuación



Tabla 7. Continuación

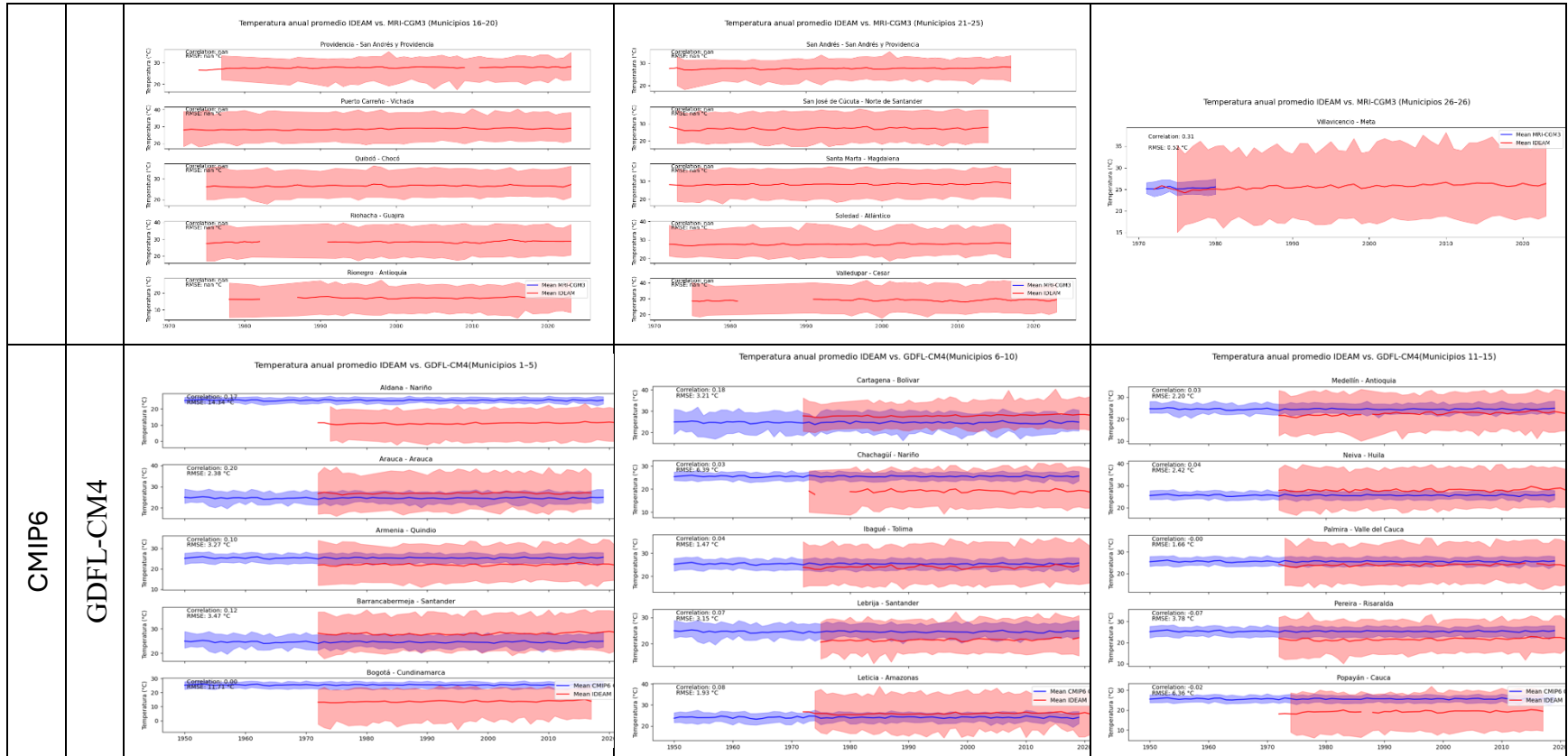


Tabla 7. Continuación

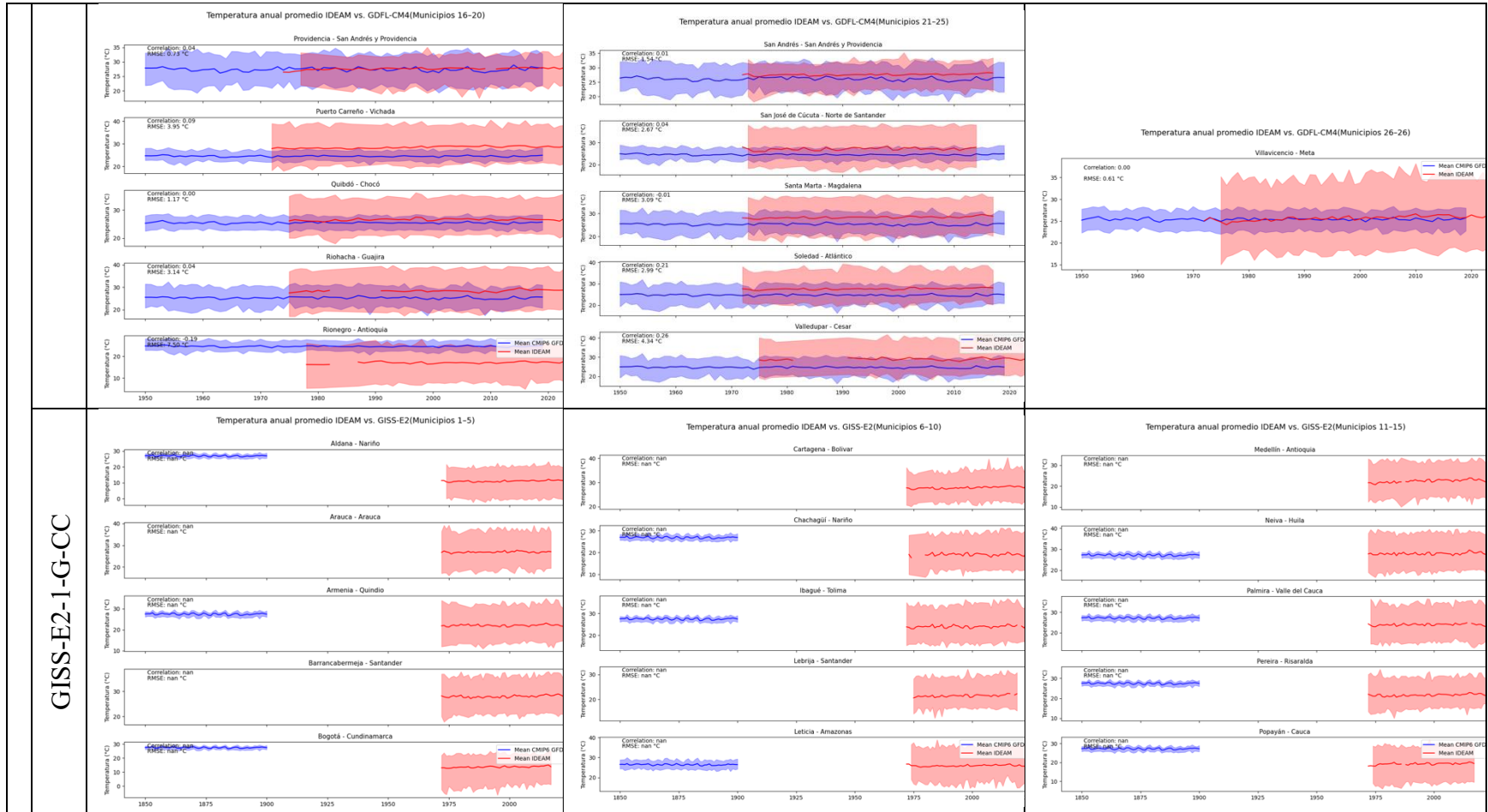


Tabla 7. Continuación

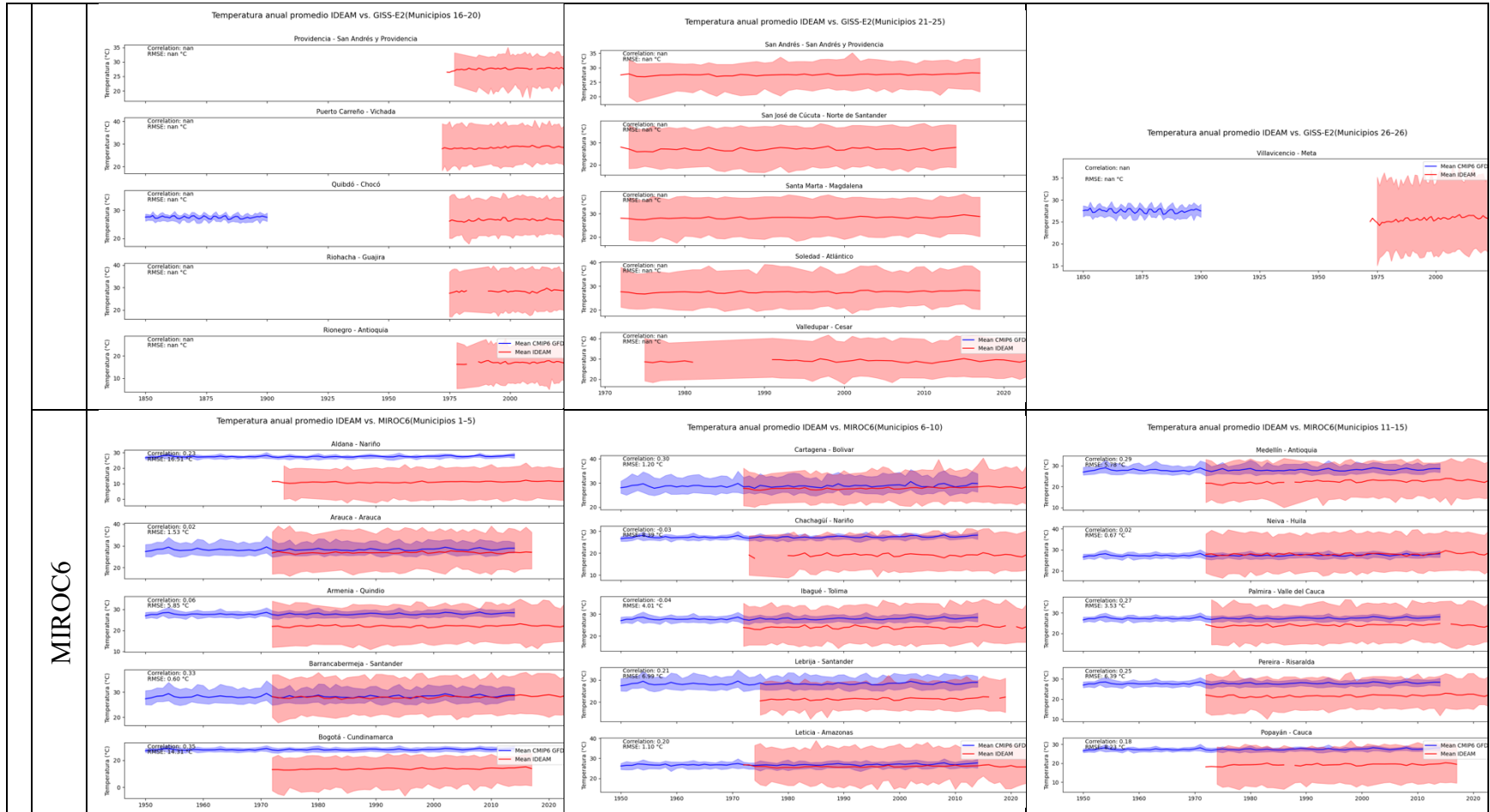


Tabla 7. Continuación

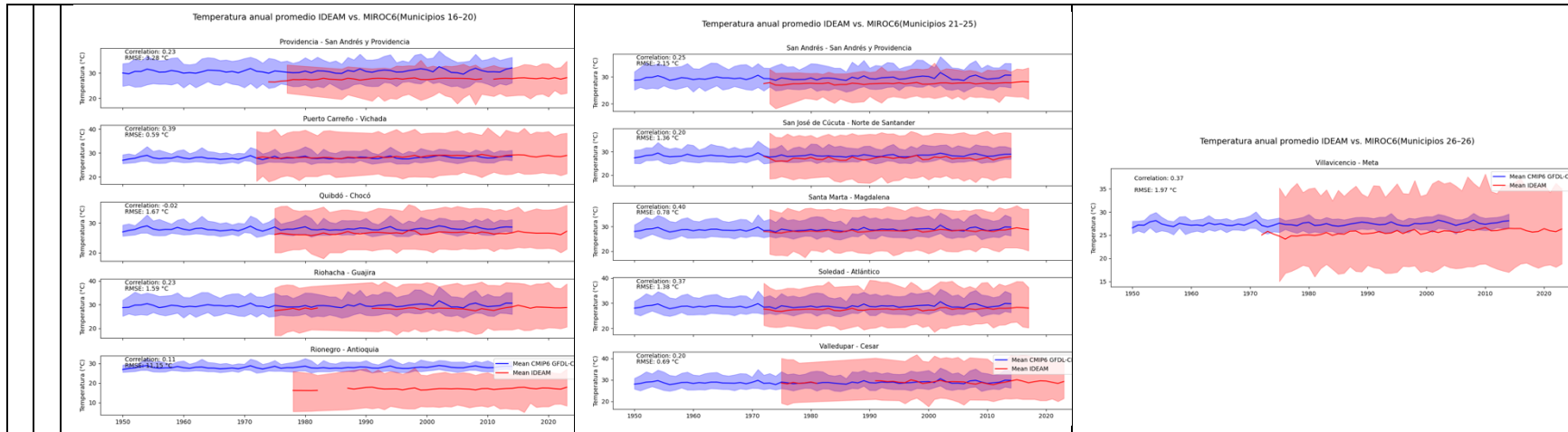


Tabla 8. Resultados mensuales de la comparación del modelo vs estaciones de aeropuertos principales del país de temperatura

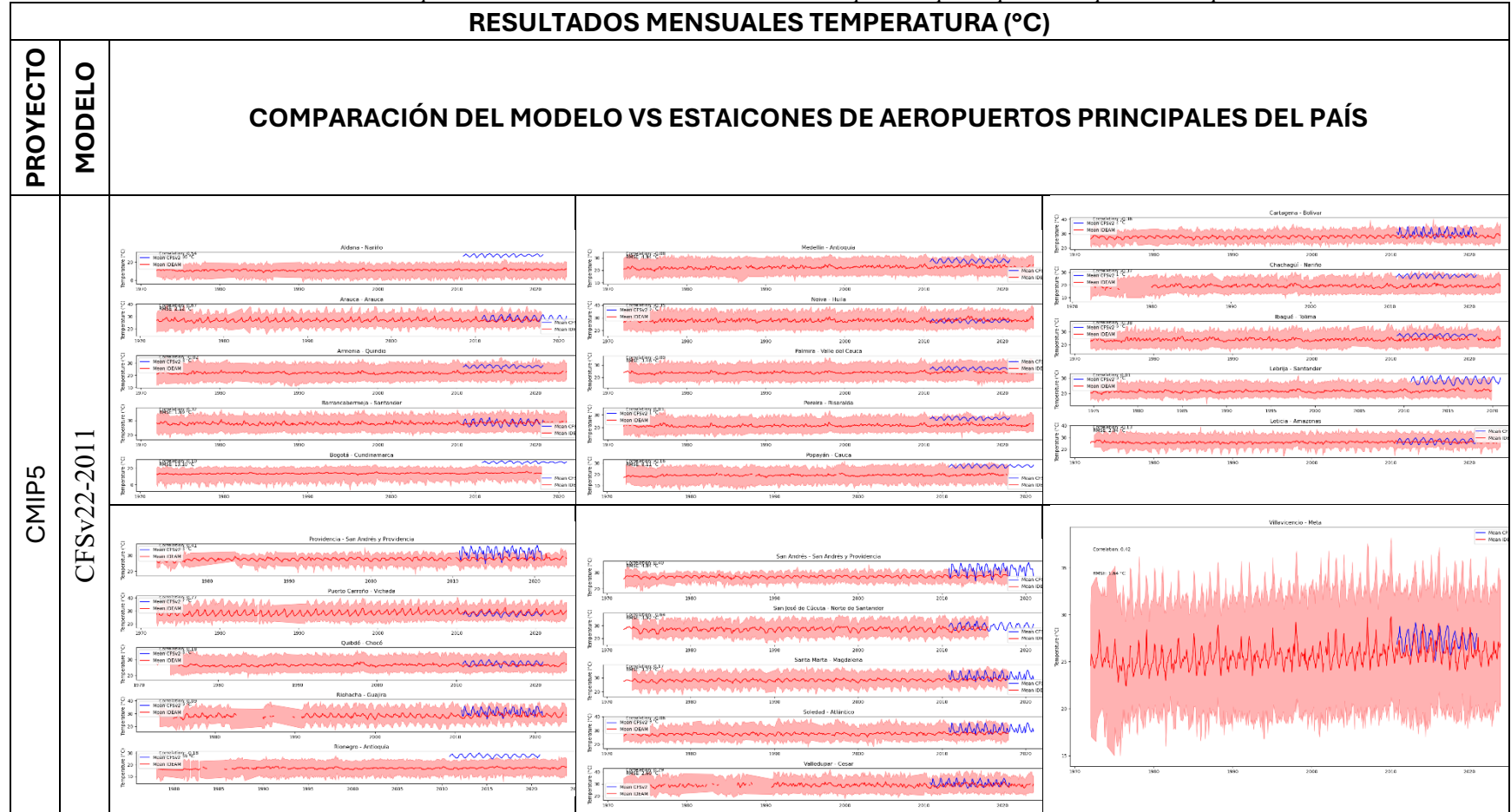


Tabla 8. Continuación

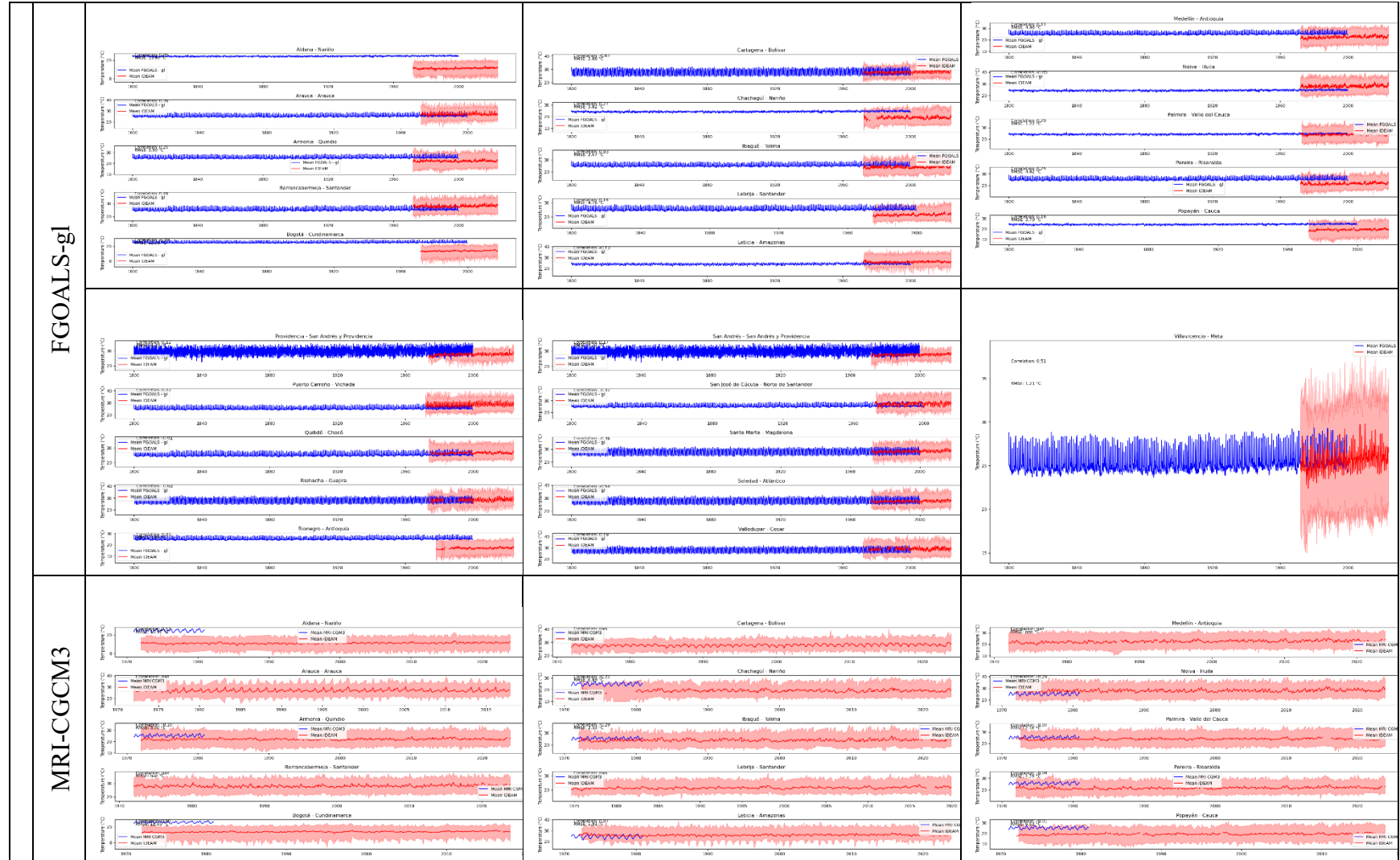
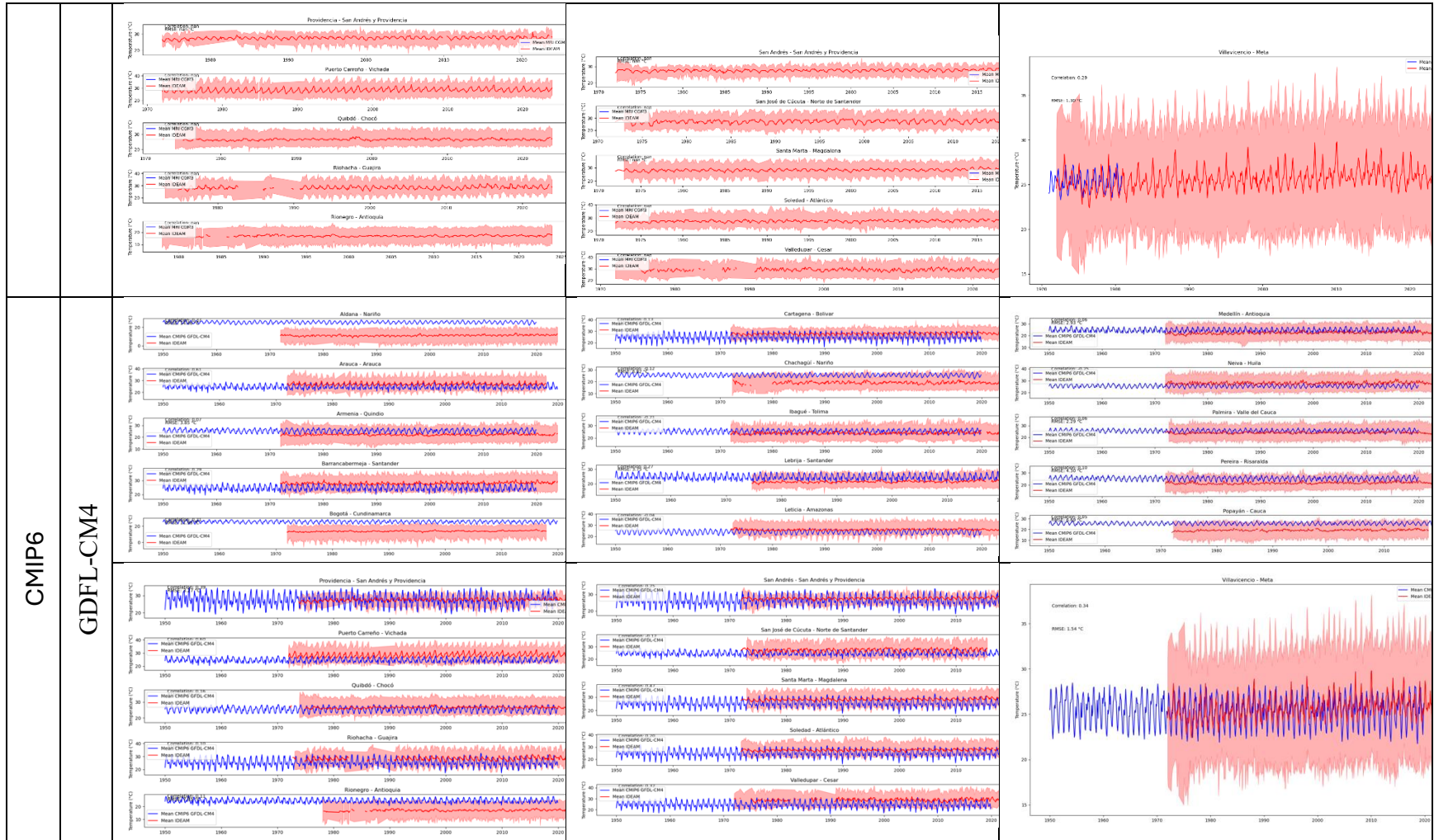


Tabla 8. Continuación







**Tabla 9. Resultados anuales de la comparación del modelo vs estaciones de aeropuertos principales del país de precipitación**

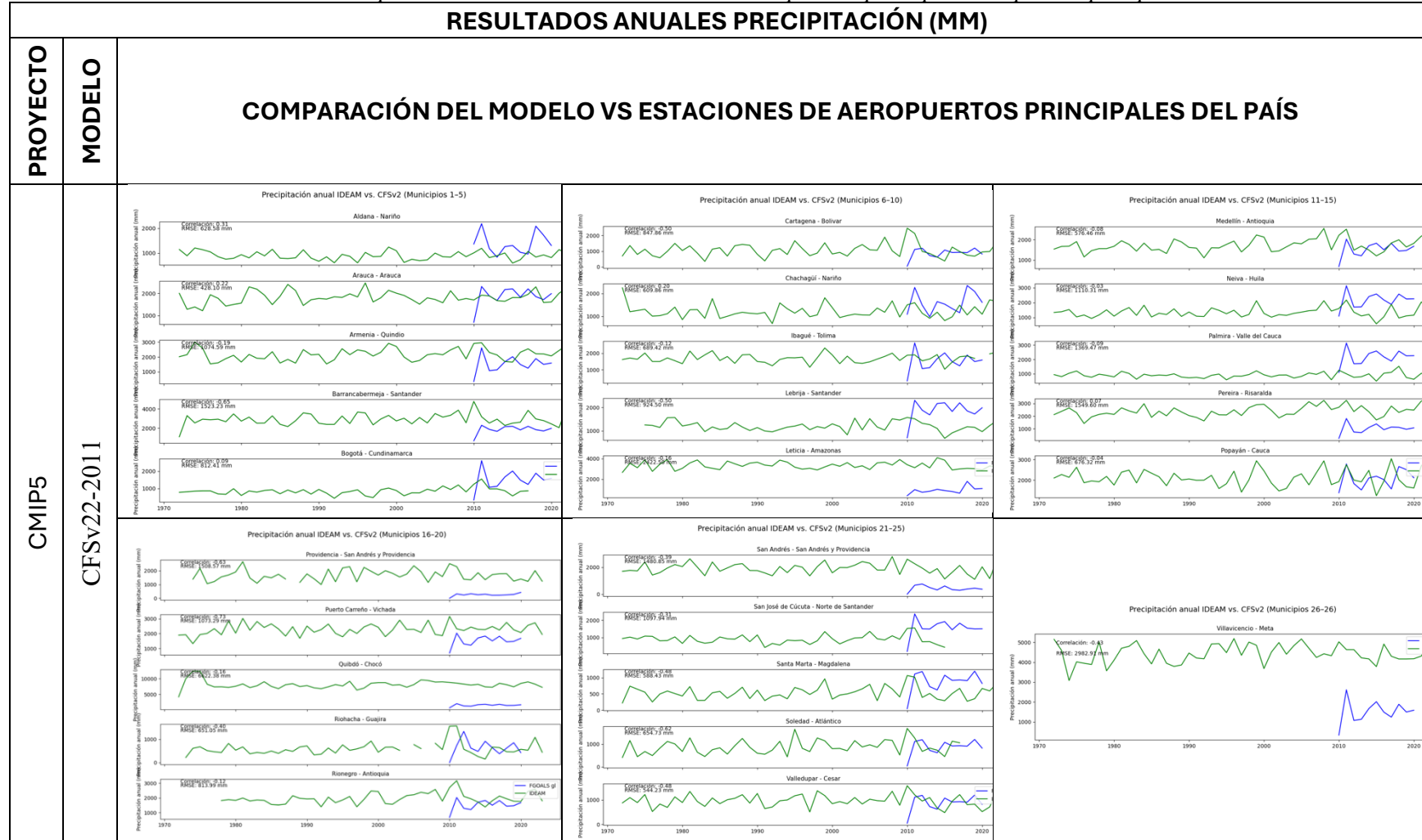


Tabla 9. Continuación

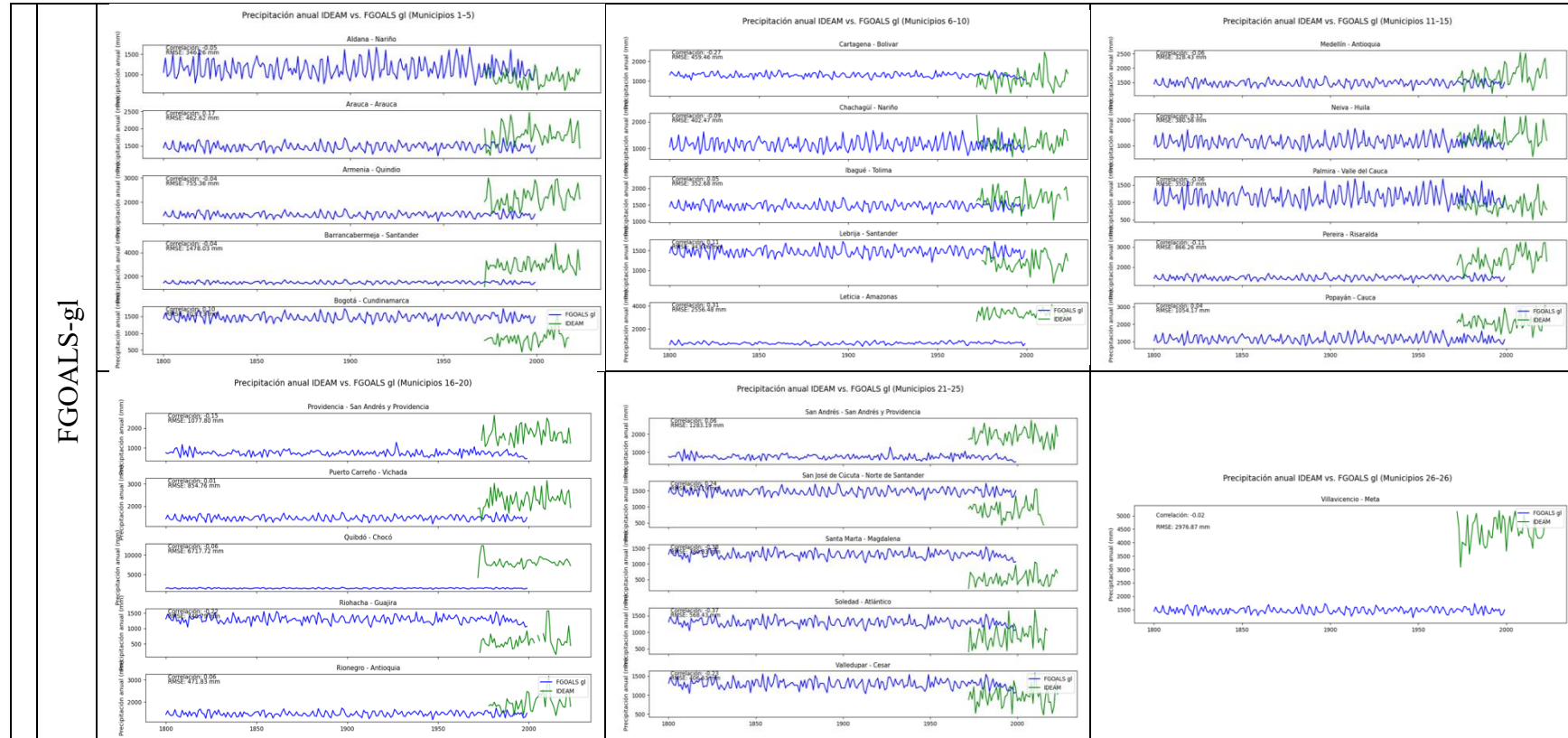


Tabla 9. Continuación

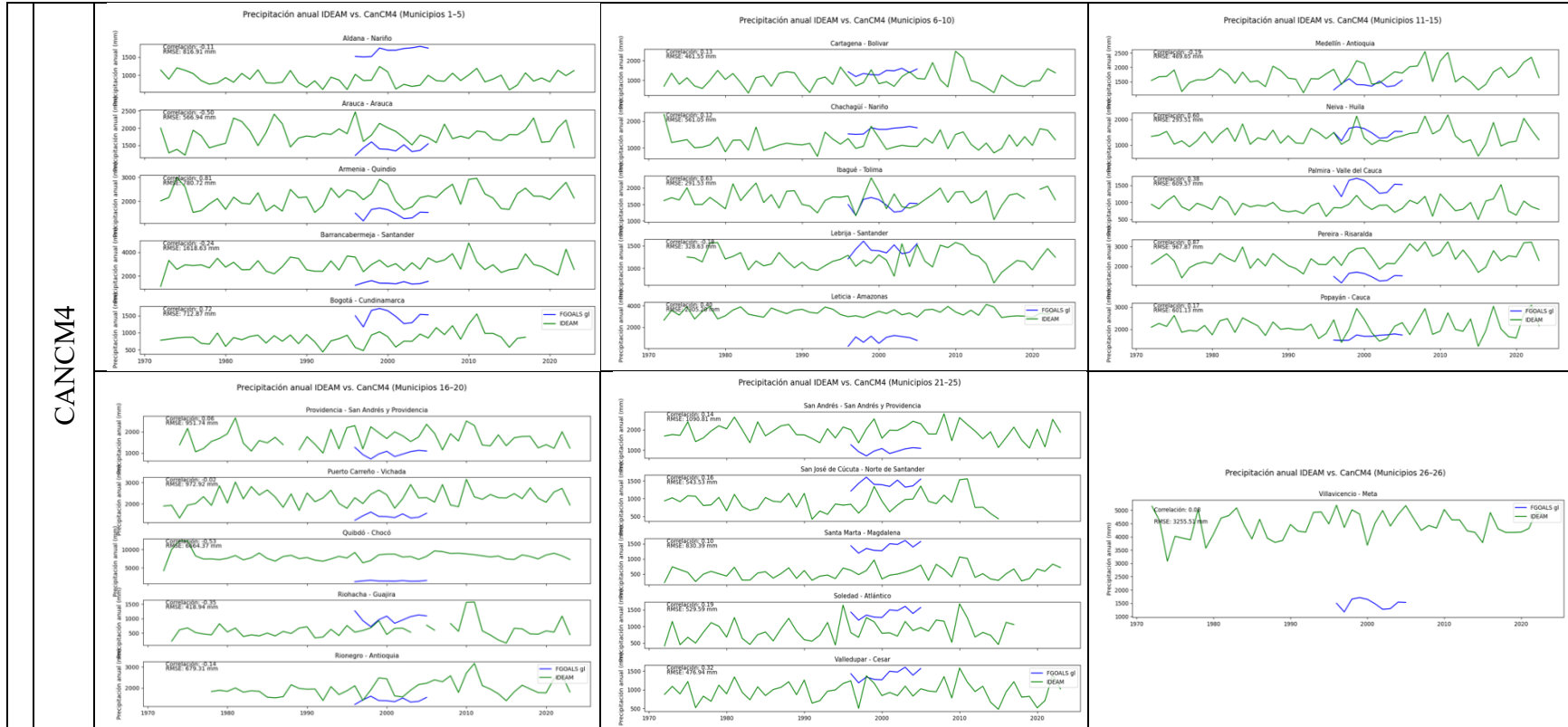


Tabla 9. Continuación

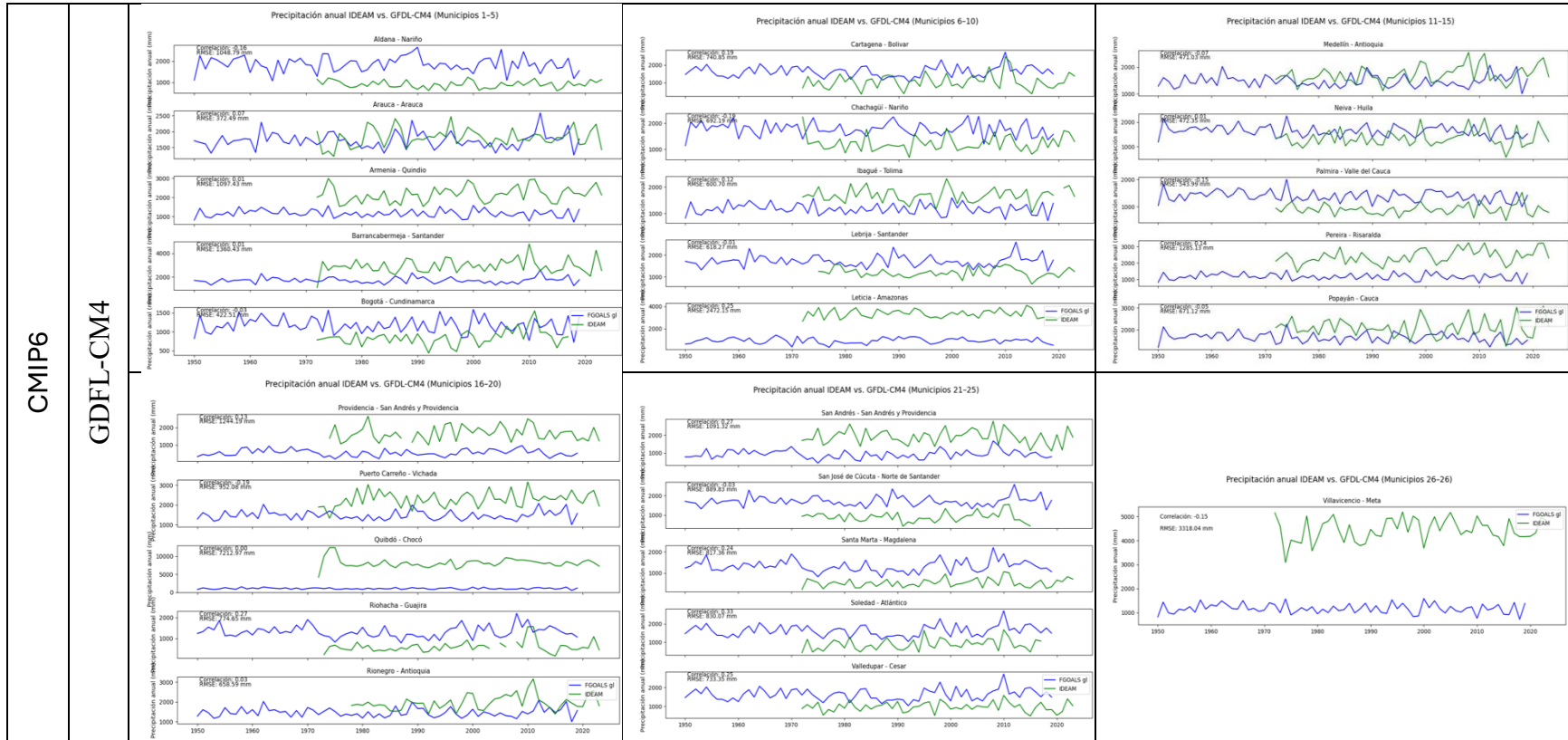


Tabla 9. Continuación

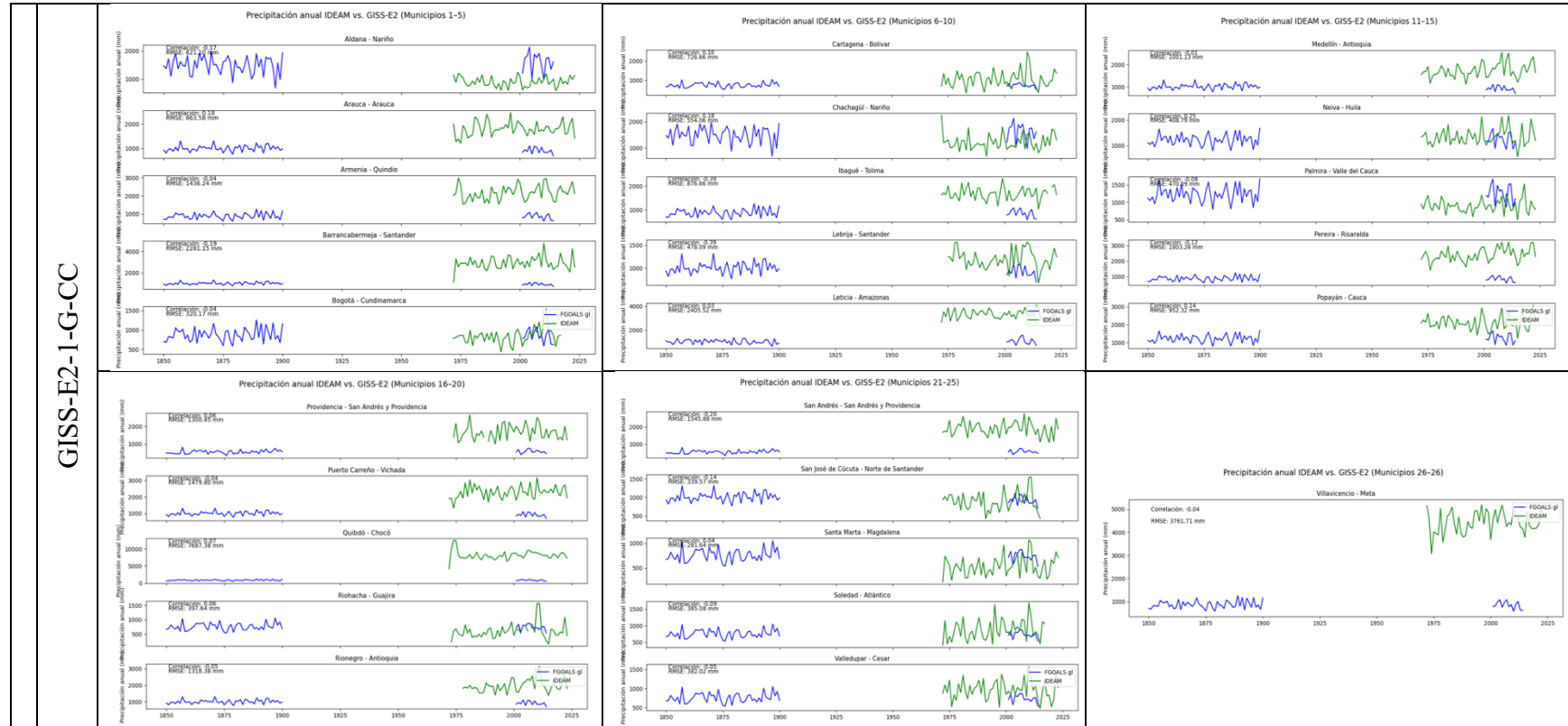
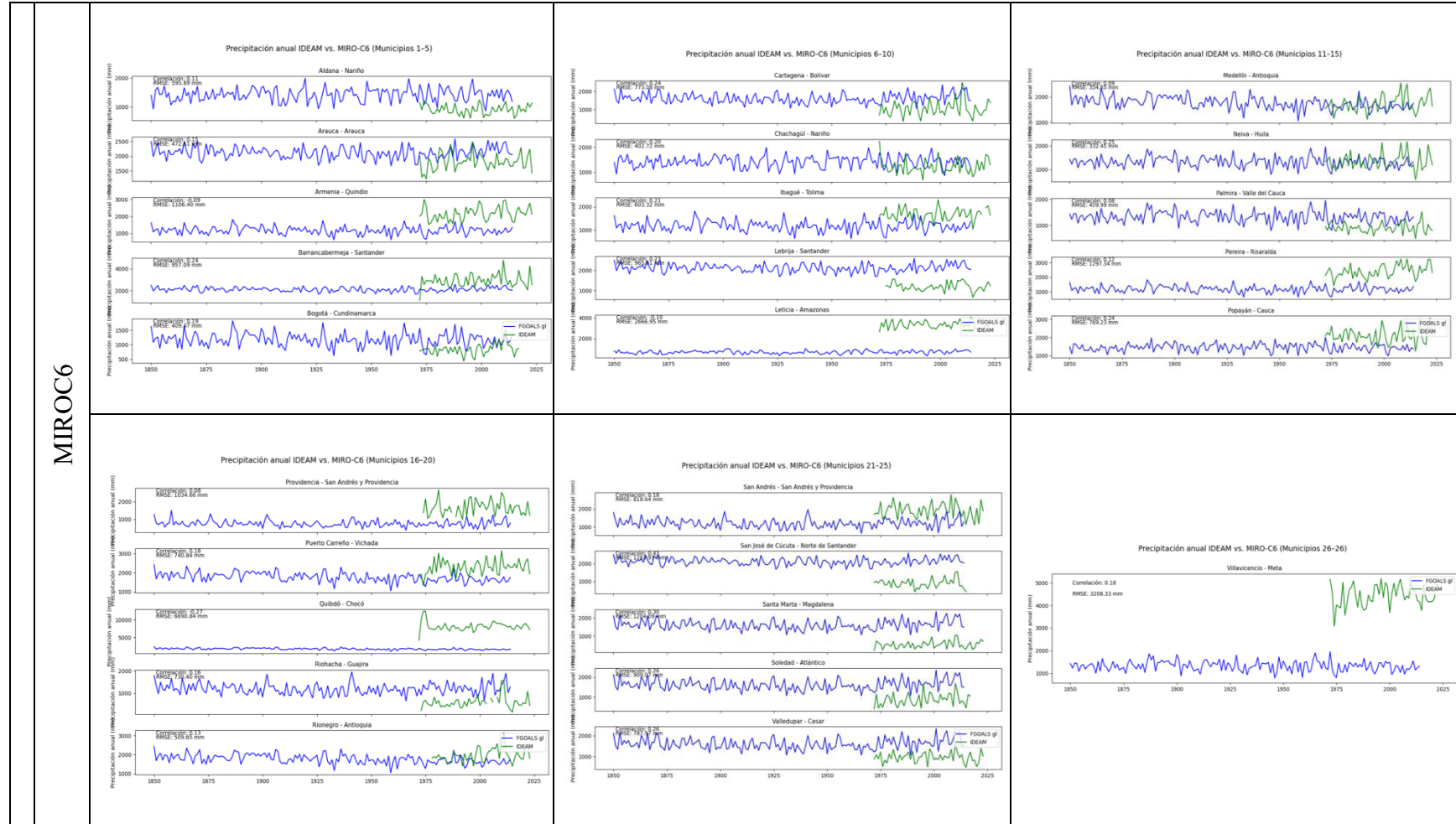


Tabla 9. Continuación



## Discusión de resultados

### Fase 1:

Los resultados de los modelos climatológicos globales son muy diferentes entre sí, y por tanto el uso de estos debe estar supeditado a los objetivos de los estudios, siempre y cuando se realice un contraste con los datos que se tienen medidos en campo por estaciones climatológicas, para de este modo lograr hacer predicciones climatológicas reales que ayuden al país a hacer una gestión y adaptación al cambio climatológico de la forma más adecuada posible teniendo en cuenta las necesidades de cada región y municipio.

En principio los resultados de los modelos para la precipitación nos muestran que existen modelos que tienen tamaños de píxeles mucho más grandes que otros, y eso repercute directamente en que tanto se homogeniza la información en términos del área, píxeles más grandes indican el mismo dato de precipitación para un área mucho más extensa, lo que es totalmente contrario a la vida real, donde la precipitación puede variar en escalas espaciales también pequeñas, por ende, tamaños de píxeles más pequeños indican un modelo más detallado sobre todo cuando se trabajan en escalas espaciales bajas. Si se evalúan entonces los modelos de acuerdo a este criterio, del modelo con menor tamaño de píxel al modelo con mayor tamaño de píxel tendríamos lo siguiente:

*Tabla 10. Comparación de modelos de precipitación para el territorio colombiano en escalas temporales y espaciales*

<b>MODELO</b>	<b>PERIODO MODELADO</b>	<b>CANTIDAD DE AÑOS</b>
CFS v2 CMIP5	2010-2020	10
GFDL-CM4 CMIP6	1950-2019	69
MIROC6 CMIP6	1850-2014	164
GISS E-2 CMIP6	1850-2014	164
CanCM4 CMIP5	1996-2005	9
FGOALS CMIP5	1800-1999	199

Sin embargo, otro parámetro importante para analizar es la escala temporal a la cual se encuentran los modelos, en este sentido se puede inferir que entre menor es el tamaño del píxel, menos cantidad de resolución temporal tiene el modelo, y esto es apenas lógico teniendo en cuenta la cantidad de datos y el costo computacional de los modelos. Así el modelo con el tamaño de píxel más grande (FGOALS del CMIP5), es a su vez el que mayor cantidad de años tiene en

lamodelación (199 años), de este modo se puede apreciar estos datos en la tabla anterior. Sin embargo, también es importante que tan actuales son los datos, y el modelo que presenta los datos más cercanos a la actualidad es el modelo CFSv2 del CMIP5 y el modelo GFDL-CM4 del CMIP6, que son los que tienen menor resolución temporal con solo 10 y 69 años de datos respectivamente.

Por otro lado, los resultados de los modelos para la temperatura muestran una particularidad diferente que los modelos de precipitación, que es especialmente llamativa y es que para los píxeles que están dentro de nuestro país, existe un faltante de información, de la cual no pudo ser determinada la causa, estos modelos con faltantes de información de temperatura son los modelos GISS-E2 del proyecto CMIP5 con píxeles de información solamente en el área hidrográfica del amazonas, y las zonas marítimas del océano Pacífico y Atlántico, y el modelo MRI-CGCM3 del proyecto CMIP6 con píxeles de información solamente en parte del Arauca y en Leticia, frontera sur de Colombia con Brasil, y también en las zonas marítimas.

## **Fase 2: Análisis de las temperaturas promedio mensuales (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) de Colombia de acuerdo con las estaciones del IDEAM**

A partir de la comparación visual de los mapas de temperaturas promedio mensuales en Colombia para los periodos 1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020, se observan tendencias consistentes de aumento térmico en diversas regiones del país, lo cual refleja señales claras del calentamiento progresivo en escalas multidecadales.

En general, se nota una intensificación de las tonalidades cálidas (amarillos, naranjas y rojos) en los mapas más recientes, en comparación con el primero. Este patrón es particularmente evidente en regiones bajas y cálidas como la región Caribe, los Llanos Orientales y la región del valle del Magdalena. En estas zonas, el color que representa temperaturas superiores a 26 °C se expande territorialmente con el paso del tiempo, siendo mucho más dominante en el mapa de 1991–2020 que en el de 1971–2000.

En contraste, las zonas tradicionalmente más frías, como la región Andina y algunas áreas de la Amazonía, si bien conservan su carácter térmico relativo, también presentan una ligera transición hacia colores que denotan un aumento de la temperatura promedio. Este cambio es más sutil pero coherente con el comportamiento general observado en el resto del territorio nacional.

Por otro lado, la forma del gradiente térmico mensual también parece haber cambiado. Aunque la distribución altitudinal sigue siendo un factor determinante en la temperatura, en el último periodo se percibe una elevación del límite térmico en las zonas de montaña, lo que sugiere un posible desplazamiento altitudinal de las isotermas. Esto puede estar relacionado con procesos de adaptación ecológica forzada y alteraciones en los ciclos hidrológicos y agrícolas. Los mapas permiten identificar visualmente un incremento sostenido de la temperatura promedio mensual en Colombia a lo largo de las últimas décadas. Este comportamiento está alineado con las tendencias globales de cambio climático, y pone de relieve la necesidad de adaptar las estrategias de planificación ambiental, agrícola y de gestión del recurso hídrico a una realidad climática progresivamente más cálida. Por ende, esto sustenta también, que el uso de los modelos climatológicos globales para la predicción de las tendencias climáticas en el país puede ser de gran ayuda debido a que los patrones del cambio en las temperaturas de las estaciones climatológicas del país marcan la tendencia de ese cambio y del calentamiento global en estas escalas espaciales y temporales y de acuerdo con lo establecido por el IPCC y sus modelos CMIP5 y CMIP6.

### **Análisis de las precipitaciones mensuales (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) de Colombia de acuerdo con las estaciones del IDEAM**

A partir de la comparación visual de los mapas de precipitación promedio mensual para los tres periodos (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020), se identifican patrones de variabilidad espacial y temporal que permiten evidenciar ciertos cambios en el comportamiento climático del país. En términos generales, se observa una disminución de los valores máximos de precipitación en algunas regiones y una leve redistribución de los focos de mayor pluviosidad.

Durante el periodo 1971–2000, los mapas muestran una mayor extensión de áreas con precipitaciones elevadas, especialmente en los meses de abril, mayo, octubre y noviembre, lo que coincide con los picos de las dos estaciones lluviosas clásicas del país. En contraste, los mapas del periodo 1981–2010 reflejan una reducción en los valores máximos de precipitación, como se evidencia en la escala de colores utilizada, que alcanza un tope de 360 mm frente a los 480 mm del primer periodo. Esta disminución es particularmente notoria en la región del Pacífico y algunas zonas del piedemonte amazónico.

Para el periodo más reciente (1991–2020), se mantiene la tendencia a una menor intensidad de precipitación máxima mensual en comparación con el primer periodo, pero con una distribución

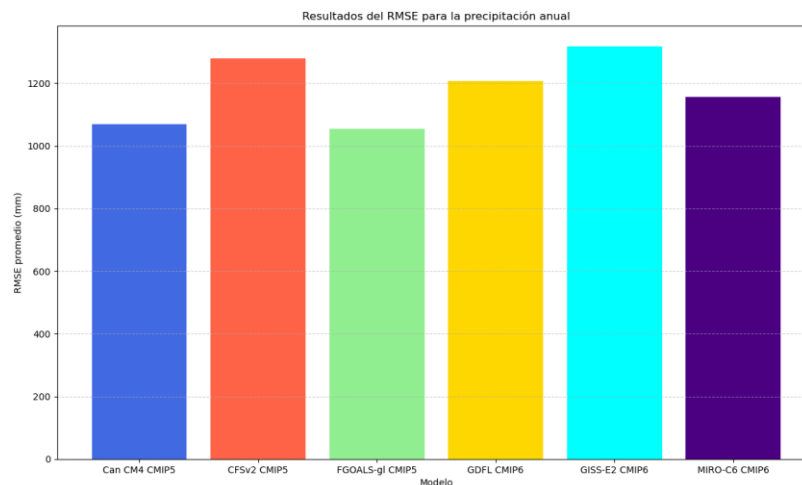
espacial algo más homogénea. En algunos meses —como junio, julio y agosto— se aprecia una expansión de áreas con valores intermedios de precipitación en la región central y oriental del país, lo cual puede estar asociado a una mayor persistencia de lluvias moderadas en zonas anteriormente más secas.

Finalmente, se destaca que, aunque se mantienen los patrones bimodales tradicionales del régimen de lluvias en Colombia, los mapas sugieren una leve atenuación de las diferencias entre estaciones secas y lluviosas, especialmente en los trimestres de transición (febrero-marzo y septiembre-octubre). Esto podría estar indicando una tendencia hacia una distribución más uniforme de las lluvias a lo largo del año, lo cual tendría implicaciones importantes para la planificación hídrica, agrícola y de gestión de riesgos climáticos.

### Fase 3:

Los resultados del coeficiente de correlación y del RMSE nos muestran el desempeño de los modelos que se resume en las siguientes gráficas

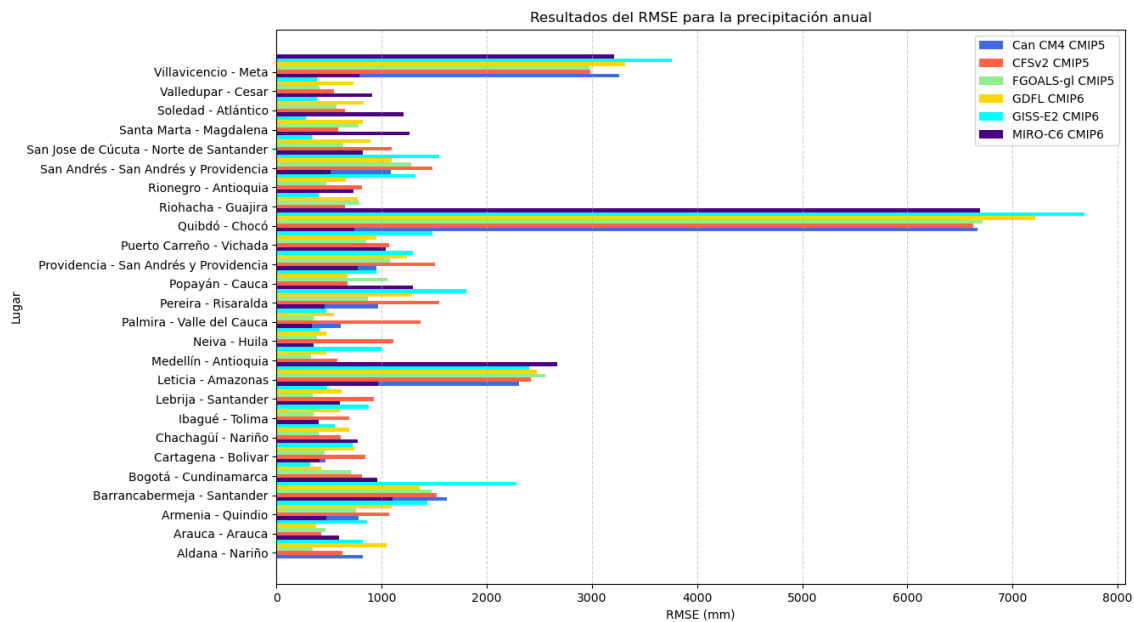
**Figura 1.** Promedio del RMSE de precipitación para todos los aeropuertos del país de cada modelo vs estaciones del IDEAM



Inicialmente es importante que se tomó como referencia de análisis el coeficiente del RMSE, ya que como se pueden ver en los resultados de la tabla 9, existen discrepancias importantes entre los periodos de los modelos y los periodos de los datos del IDEAM, esto puede

crear un sesgo en el cálculo del coeficiente de relación distorsionando así el ajuste real del modelo, induciendo a interpretaciones que pueden llegar a ser erróneas. Teniendo esto en cuenta, para cada uno de los puntos de los aeropuertos del país se compararon los datos de las estaciones que funcionan allí versus los resultados del modelo, arrojando cada uno de los RMSE como se puede ver en las ilustraciones de la tabla 9. Cuando se realiza un promedio de todos estos RMSE, se obtiene una visión general de que tan bien se comporta el modelo dentro del área del país, teniendo en cuenta que se hizo este análisis con los datos de precipitación acumulado de forma anual. El resultado inicial que el mejor modelo para predecir la precipitación en nuestro país es el modelo FGOALS-gi del proyecto CMIP5, pues es el que tiene un RMSE más bajo. Sin embargo, todos los modelos de forma general están dentro de un rango de entre los 1100 mm y 1300 mm de RMSE de forma anual, lo que representa una diferencia promedio diaria de entre 3 y 3,6 mm/día. Por otro lado, un análisis más detallado se puede realizar por medio del siguiente gráfico

**Figura 2.** RMSE de los modelos de precipitación anual versus precipitación anual en los aeropuertos de Colombia

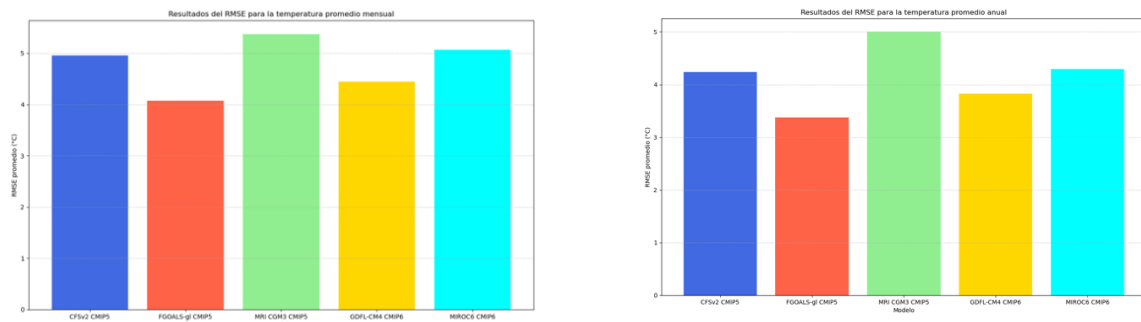


A partir de este se puede hacer una descripción más detallada del desempeño de los modelos en puntos específicos, se puede decir en términos generales que todos los modelos presentan un muy bajo desempeño en el Chocó, y un desempeño bajo en lugares como

Villavicencio y Leticia. Estos tres lugares se caracterizan por tener una alta pluviosidad durante la mayor parte del año, en especial el Chocó biogeográfico que es la región más lluviosa en todo el planeta, estos fenómenos de precipitación en estos lugares se pueden entender más por fenómenos locales como la humedad, vegetación y orografía y es precisamente allí donde se encuentra la desventaja de los modelos globales que no tienen en cuenta estos procesos locales debido a su resolución global. Sin embargo, los modelos parecen funcionar bien para lugares como Valledupar, Arauca, Soledad y Santa Marta. El modelo que mejor representa entonces la precipitación en Villavicencio es el modelo CFSv2 del CMIP5, en este sentido el mejor modelo que funciona a una escala nacional, no necesariamente es el mejor modelo para una escala regional.

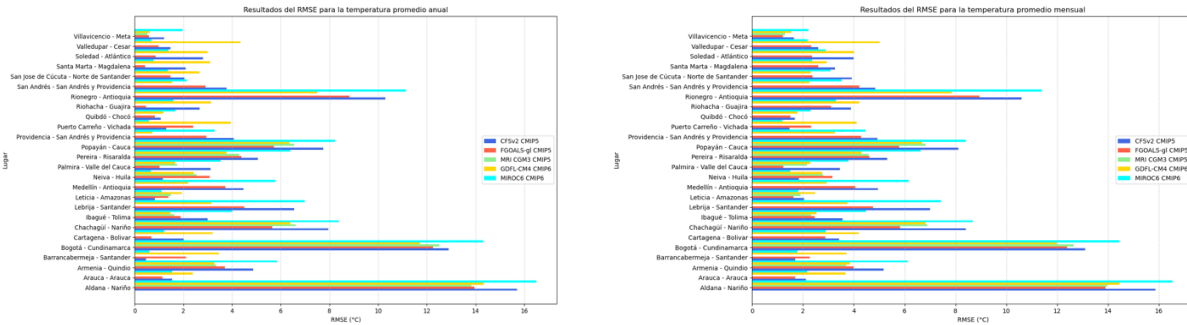
En el análisis general de los modelos de temperatura analizados tenemos lo siguiente

**Figura 3.** Promedio del RMSE de temperatura para todos los aeropuertos del país de cada modelo vs estaciones del IDEAM de forma mensual (izq) y de forma mensual (derecha)



Dentro de ambas escalas de tiempo analizadas, el mejor modelo de acuerdo con el coeficiente RMSE a nivel nacional es el modelo FGOALS-g1, con un RMSE mensual cercano a los 3.3 °C, y en escala anual cercano a 4°C. Una de las observaciones importantes que se debe hacer con estos resultados es que para todos los modelos se presenta una mejoría considerable, cuando se está trabajando con una escala mensual, que cuando se trabajan a escalas anuales. También es importante anotar, como se describió anteriormente que los modelos GISS2 del CMIP6 y MRICGCM3 del CMIP5 tienen datos faltantes, y eso puede hacer que su coeficiente RMSE tienda a ser menor, al hacerse el cálculo con una cantidad menor de datos en contraste con los modelos que si presentan datos para toda el área del territorio nacional, a continuación, se muestra un análisis más detallado por regiones para los resultados del RMSE.

**Figura 4.** RMSE de temperatura para todos los aeropuertos del país de cada modelo vs estaciones del IDEAM de forma mensual (izq) y de forma mensual (derecha)



En términos generales se puede decir que los modelos presentan un desempeño muy bajo en lugares como Aldana-Nariño, Bogotá-Cundinamarca, Rionegro-Antioquia. En estos tres lugares se puede encontrar una particularidad y es su ubicación sobre el nivel del mar, en general son lugares con grandes altitudes en las partes altas de las cordilleras, eso quiere decir que esta particularidad local, hace que los modelos globales no tengan un buen desempeño, en concordancia la mayoría de los lugares que no presenta accidentes topográficos fuertes cercanos presentan un buen desempeño para la mayoría de los modelos. También se puede inferir que, en lugares como Villavicencio se presenta un alto desempeño de todos los modelos que presentan datos allí, resaltando el modelo MRI CGM3 con un RMSE menor a 0.5°C y que podría ser una gran herramienta para la planificación territorial y de adaptación y mitigación al cambio climático en la ciudad y en lugares cercanos. Finalmente, es interesante como los modelos globales climatológicos en escalas mensuales alcanzan a percibir algunas variaciones que se pueden ver a lo largo del país como los periodos secos y húmedos, que se ven con mayor influencia por fenómenos globales como el ENSO, que determina en el país la exacerbación de los periodos de lluvias (niña) y de los periodos secos (niño), que son captados por los modelos globales como se confirma por las gráficas mensuales de la tabla 9

### **Impacto social y humanístico**

El presente estudio sobre la evaluación de los resultados de los modelos climáticos globales para el proyecto CMIP5 y CMIP6 para la precipitación y temperatura para Colombia conlleva un impacto social y humanístico al tener una comprensión detallada del comportamiento climático futuro permite fortalecer la capacidad de adaptación de las comunidades, especialmente de las más vulnerables a los efectos del cambio climático. Además, los resultados obtenidos proporcionan información clave para la planificación de políticas públicas, la gestión del riesgo de desastres y el desarrollo de estrategias de resiliencia en sectores clave como la agricultura, los recursos hídricos y la salud pública. Desde una perspectiva humanística, el acceso a información climática fiable promueve la equidad social al proporcionar herramientas para una mejor toma de decisiones basada en la evidencia, contribuyendo así a la protección del bienestar humano, la seguridad alimentaria y el respeto de los derechos fundamentales de las generaciones presentes y futuras.

## Conclusiones

- Ambos conjuntos de modelos presentan una capacidad diferenciada para simular las condiciones climáticas del país. Aunque hay mejoras en CMIP6 respecto a CMIP5 en algunos aspectos, persisten sesgos significativos, especialmente en regiones con alta complejidad topográfica como los Andes y el Chocó biogeográfico. El modelo FGOALS-gl del CMIP5 demostró el mejor desempeño general en términos de temperatura y precipitación, evidenciado por los valores más bajos de RMSE en la mayoría de las comparaciones.
- La integración de datos del IDEAM y aeropuertos permitió evidenciar con claridad las limitaciones y aciertos de los modelos globales. La validación multiescala (anual y mensual) fue fundamental para determinar que, aunque los modelos capturan patrones generales, presentan deficiencias en capturar variabilidad local y extrema.
- Hubo un incremento evidente en las temperaturas promedio mensuales en amplias zonas del país (especialmente Caribe y Llanos), así como una redistribución de las zonas de mayor precipitación, con indicios de reducción en los valores máximos en algunas regiones. Estas tendencias visuales se alinean con las proyecciones del cambio climático global.
- Las métricas como RMSE y correlación de Pearson evidencian que los modelos tienen un desempeño desigual según la región y la variable evaluada. El uso de escalas mensuales arrojó mejores resultados que las anuales, y se detectaron modelos que se ajustan mejor a ciertas regiones, lo cual refuerza la necesidad de seleccionar modelos específicos para estudios regionales.

## Recomendaciones

- Se recomienda utilizar los modelos CMIP6 con precaución para estudios regionales en Colombia, complementándolos siempre con validación local mediante datos observacionales. A pesar de sus mejoras, aún presentan limitaciones en regiones montañosas y húmedas.
- Para futuras investigaciones, es conveniente emplear esquemas de reducción de escala (downscaling) dinámica o estadística que permitan mejorar la resolución espacial de los modelos globales y captar fenómenos climáticos locales más precisamente.
- Se sugiere continuar con la actualización de bases de datos climatológicas locales, así como el fortalecimiento de redes meteorológicas (como la del IDEAM), para contar con información confiable que respalde la validación de modelos y la toma de decisiones.
- Es fundamental que los tomadores de decisiones, especialmente en áreas como gestión del recurso hídrico, agricultura y ordenamiento territorial, consideren las proyecciones de los modelos climáticos ajustadas localmente, para diseñar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático basadas en evidencia científica.
- Dada la variabilidad espacial en el desempeño de los modelos, se recomienda seleccionar el modelo más adecuado de manera contextualizada según el área de estudio, reconociendo que el mejor modelo a escala nacional no necesariamente lo es a escala regional o local.

### Referencias Bibliográficas

- Amador, J., & Rivera, E. (2008). Predicción estacional del clima en Centroamérica mediante la reducción de escala dinámica. Parte I: evaluación de los modelos de circulación general CCM3.6 y ECHAM 4.5. *Revista De Matemática: Teoría Y Aplicaciones*, 15(2), 131–173. <https://doi.org/10.15517/rmta.v15i2.39382>.
- Arias, P., Ortega, G., Villegas, L., & Martínez, A. (2021). Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: Persistent biases and improvements. *Revista Facultad de Ingeniería-Universidad de Antioquia*, (100), 1-75. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/344493/20805341>
- Arjdal, K., Driouech, F., Vignon, É., Chéruy, F., Manzanar, R., Drobinski, P., . . . Idelkadi, A. (2022). Future of land surface water availability over the mediterranean and North Africa: Analysis and synthesis from the CMIP6 exercise. *Rmets*, 24(11), 1-4. <https://doi.org/10.1002/asl.1180>
- Bonilla-Ovallos, C. A., & Mesa Sánchez, O. J. (2017). Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia. *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 41(158), 107-118. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.427>
- Caicedo, J. D. (2012). Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo xx y escenarios posibles para el siglo xxi. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas*. 36(139), 261-278. <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v36n139/v36n139a10.pdf>
- Del Canto, E., & Silva Silva, A. (2013). Metodología cuantitativa: abordaje desde la complementariedad en ciencias sociales. *Revista De Ciencias Sociales*, (141). <https://doi.org/10.15517/rsc.v0i141.12479>
- Environment Canada. (2019). Climate model: Fourth generation coupled global climate model. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/science-research-data/modeling-projections-analysis/centre-modelling-analysis/models/fourth-generation-coupled-global.html>
- Fernandez, S. V. (2021). Evaluación de la capacidad de los modelos cmip6 para simular la evapotranspiración y precipitación en el norte de suramérica. [Trabajo de grado, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/10495/20034>

- Gómez Díaz, J. D., & Monterroso Rivas, A. I. (2012). Caracterización del índice de aridez en México usando dos alternativas de estimación de la evapotranspiración potencial y escenarios de cambio climático. *Asociación Española de Climatología*, p. 105-114. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/8261>
- Held, I. M., Adcroft, A., Dunne, J. P., Horowitz, L. W., Krasting, J., Shevliakova, E., . . . Gauthier, P. P. (2019). Structure and Performance of GFDL's CM4.0 Climate Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(11), 3691-3727. <https://doi.org/10.1029/2019MS001829>
- Hidalgo Sanchez, L., Tapia Aguilar, B., Lujano Laura, A., & Lujano Laura, E. (2016). Cambios proyectados de los recursos hídricos bajo escenarios de emisiones RCP4.5 y 8.5 de modelos climáticos globales del CMIP5 en el Altiplano Peruano. *Revista Investigaciones Altoandinas*.18(2). 195-204. <http://dx.doi.org/10.18271/ria.2016.200>
- Hoyer, S., & Hamman, J. (2017). xarray: N-D labeled Arrays and Datasets in Python. *Journal of Open Research Software*, 5(1), 10. <https://doi.org/10.5334/jors.148>
- Hunter, J. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3). 90-95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- Jordahl, K. (2014). GeoPandas: Python tools for geographic data. URL: <https://github.com/geopandas/geopandas>.
- McKinney, W. (2010). Data Structures for Statistical Computing in Python. *Python in Science Conference*.56-61. <http://dx.doi.org/10.25080/Majora-92bf1922-00a>
- Met Office. (2010-2015). Cartopy: a cartographic python library with a Matplotlib interface.
- Nasa Giss. (3, abril de 2025). Data.GISS: ModelE Climate Simulations. Obtenido de [data.giss.nasa.gov/modelE/](http://data.giss.nasa.gov/modelE/)
- Palacios Chacón, E., & Serrano Vincenti, S. (2011). Validación de los Modelos de cambio climático hidrostáticos y no hidrostáticos sobre la climatología de Ecuador en las variables de precipitación y temperaturas extremas. *Revista La Granja* 13(1). 21-30. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/8776>
- Palomino-Lemus, R. P., Cordoba-Machado, S., & Esteban-Parra, M. (2015). Evaluación de modelos climáticos globales del CMIP5 sobre el noroeste de América del Sur. *Revista Biodiversidad Neotropical*. 5(1). 16-22. . [doi:https://doi.org/10.18636/bioneotropical.v5i1.205](https://doi.org/10.18636/bioneotropical.v5i1.205)

- Pinto Garay, D. A. (2022). Proyecciones de eventos extremos bajo nuevos escenarios de cambio climático en la zona central de Chile para el período 2025-2085. [Trabajo de grado, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/186897>
- Romo Noriega, M. V. (2015). “Levantamiento de línea base para la implementación de medidas de adaptación al cambio climático en la comunidad de minas chupa, parroquia san jose de minas - distrito metropolitano de Quito. [Tesis de Maestria, Universidad Internacional SEK]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/1469>
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Sudhir, N., Tripp, P., . . . Chen, M. (2014). The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of climate*, 2185–2208. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>
- Tatebe, H., Ogura, T., Nitta, T., Komuro, Y., Ogochi, K., Takemura, T., . . . Saito, F. (2019). Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geoscientific Model Development*, 7(2). 2727–2765. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019>
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, TE, Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, SJ, Brett, M., Wilson, J., Millman, KJ, Mayorov, N., Nelson, ARJ, Jones, E., Kern, R., Larson, E.,... Colaboradores de SciPy 1.0 (2020). {SciPy} 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*.(17). 261-272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Wang, T., Tu, X., Singh, V., Chen, X., & Lin, k. (s.f.). Global data assessment and analysis of drought characteristics based on CMIP6. 596. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126091>
- Yukimoto, S., Adachi, Y., Hosaka, M., Sakami, T., Yoshimura, H., Hirabara, M., . . . Kitoh, A. (2012). A New Global Climate Model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3 —Model Description and Basic Performance—. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 90A, 23-64. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2012-A02>
- Zhou, T., Yu, Y., Liu, Y., & Wang, B. (2014). Flexible global ocean–atmosphere–land system model: A modeling tool for the climate change research community. Springer. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-41801-3>