

PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA MEDIA, BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA AMAZONÍA COLOMBIANA, CON ÉNFASIS EN LAS SUBZONAS HIDROGRÁFICAS QUE CUBREN LOS QUINCE MUNICIPIOS DE MAYOR DEFORESTACIÓN PRIORIZADOS POR LA SENTENCIA STC 4360 DE 2018

Leonardo Peraza H leonardo.9007@gmail.com, Iván González Garzón gonzalezgarzonivan@gmail.com,
Luz Andrea Silva andrea.srandrea@gmail.com, Cesar Rey careyangel@gmail.com, Franklin Ruiz
jruiz@ideam.gov.co

RESUMEN

Con el fin de brindar una información detallada a los tomadores de decisiones de la Amazonía Colombiana, enfatizando en los quince municipios de mayor deforestación priorizados por la Sentencia – 4360 de 2018, se proyectaron las variables de precipitación y temperatura media bajo distintos escenarios de cambio climático para el periodo futuro 2011-2040. Con este fin, se estableció como área de estudio las subzonas hidrográficas que cubren dichos municipios. Inicialmente se determinaron las condiciones climáticas de referencia de esta área a partir de las bases de datos CHIRPS v.2 para la variable de precipitación y las estaciones del IDEAM para la temperatura media, en series multianuales de los periodos climatológicos históricos de referencia 1981-2005 y 1981-2010. Posteriormente, estas series de datos del clima referencia fueron usadas para evaluar su similaridad con el comportamiento de los datos de 15 modelos globales de circulación en el periodo de referencia 1981-2005, para así determinar los modelos globales que mejor se comportan en el área de estudio definida.

Finalmente, los modelos seleccionados se ensamblaron para generar proyecciones climáticas de las variables de precipitación en milímetros (mm) y temperatura media en grados Celsius (°C) para series multianuales en el periodo futuro 2011-2040 en los cuatro escenarios de emisión definidos en el quinto informe del IPCC, denominados Trayectorias de Concentración Representativas (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5).

Palabras Clave: Precipitación, Temperatura Media, Escenarios de Cambio Climático y Amazonía Colombiana.

ABSTRACT

In order to provide detailed information to Colombian Amazon decision makers, especially on the 15 municipalities of higher deforestation prioritized by the court Sentence 4360 of 2018, climate change scenarios based in precipitation and mean temperature were projected for the 2011-2040 future period. For this purpose, the study area was defined as the hydrographic subzones over these municipalities. The climate reference conditions were determined by CHIRPS v.2 databases for precipitation and IDEAM stations for mean temperature, in multiannual reference series for historic climatic reference periods 1981-2005 and 1981-2010. Those historic series were used to assess the similarity between them and 15 global climatic models in the 1981-2005 periods, in order to determine the most suitable models that fit to the data from the study area.

Finally, selected models were ensemble to generate climatic projections for rainfall in millimeters (mm) and mean temperature in Celsius (C) in future multiannual series 2011-2040 for each Representative Concentration Path (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5) defined in the fifth IPCC report.

Keywords: Precipitation, mean temperatures, climate change scenarios, Colombian Amazon.

1 INTRODUCCION

Las poblaciones humanas se encuentran afectadas por cambios recientes en las dinámicas y frecuencias de procesos ligados a aspectos climatológicos. La liberación continua de dióxido de carbono a la atmósfera ha venido ocasionando un desbalance en los ciclos regulares de la tierra, alterando la frecuencia, intensidad y extensión de fenómenos como lluvias, sequías, tornados, entre otros.

Una de las causas más importantes para la liberación de este componente a la atmosfera es la deforestación. América latina cuenta con las tasas netas más altas de pérdida de bosques naturales, encontrándose Colombia dentro de los países que lideran esta estadística, a causa del frente de deforestación que se viene expandiendo de manera progresiva en este territorio.

Debido a estas altas tasas de deforestación de la Amazonía colombiana, un grupo de 25 niños, niñas, adolescentes y jóvenes adultos solicitan mediante una tutela la protección de sus derechos al ambiente sano, a la vida y a la salud, ya que exponen que esta acelerada deforestación está haciendo más críticos los escenarios de cambio climático a los que serán expuestos en relación con la alteración negativa del ciclo del agua, la alteración de los suelos y el calentamiento global.

Frente a esta tutela, en abril de 2018 la Corte Suprema de Justicia dicta la Sentencia STC 4360 de 2018, por la cual “se reconoce a la Amazonía colombiana como entidad sujeto de derechos, titular de protección, conservación, mantenimiento y restauración a cargo del Estado y las entidades territoriales que la integran”. Esta Sentencia obliga al Estado a través de cuatro órdenes a tomar acciones prontas y efectivas para prevenir una mayor afectación derivada del cambio climático, para lo cual la protección de los bosques de la Amazonía constituye un imperativo con la naturaleza y las generaciones futuras, que no da espera y al cual deben concurrir varias Instituciones y la sociedad en general.

El cumplimiento de las cuatro órdenes de la sentencia debe guardar relación y coherencia, de tal manera que se interpreten como partes de una acción integral que exige la reducción a cero de la deforestación y, por ende, una menor afectación por las consecuencias derivadas del cambio climático a los accionantes y a la sociedad en general. Por este motivo, las directrices que se derivan para las autoridades locales deben apuntar a detener el proceso de deforestación y aportar a la adaptación del cambio climático.

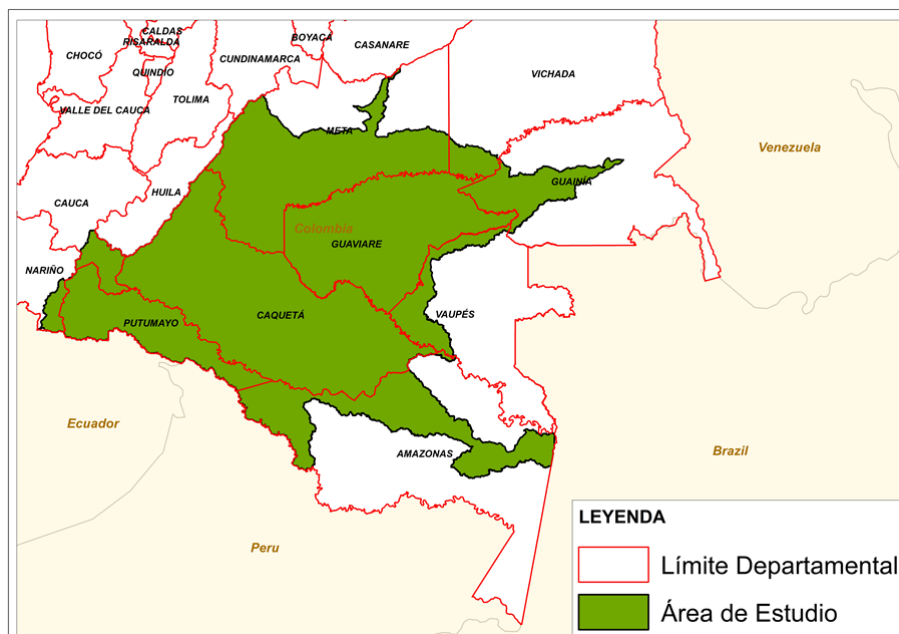
Varios avances científicos han permitido analizar los posibles escenarios que podemos enfrentar como sociedad, a través de la disposición de conjuntos de datos que describen las condiciones futuras en términos de algunos aspectos climáticos. Parte de esos desarrollos han sido utilizados en contextos políticos

internacionales, como el IPCC para sectores académicos y para nuestro caso, con el fin de orientar decisiones locales. Es por este motivo, que el presente documento genera unos análisis de información disponible en la región para identificar condiciones actuales y futuras de la climatología, que puedan ser tenidas en cuenta por las autoridades locales en función de dar cumplimiento a la Sentencia STC 4360 de 2018.

2 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se estableció como las subzonas hidrográficas definidas por el Instituto de Hidrología, meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM en el año 2013¹ que cubren los quince municipios con mayor deforestación en la región de la Amazonía Colombiana según el décimo Boletín de Alertas Tempranas de Deforestación (AT-D) para el primer trimestre del 2017.

En este sentido, el área de estudio para la proyección de escenarios de cambio climático de las variables de precipitación y temperatura media comprende un área aproximada de 29'685 hectáreas que representan 45 subzonas hidrográficas de Colombia. Esta área de estudio cubre la totalidad de los departamentos del Caquetá, Guaviare y Putumayo; incluye la totalidad de los municipios de La Macarena, Uribe, Vistahermosa, Puerto Rico y Mapiripán en el departamento del Meta; y cubre de manera parcial algunos municipios de los departamentos de Amazonas, Cauca, Guainía, Nariño, Vaupés y Vichada (**Mapa 1**).



Mapa 1 Área de Estudio

¹ IDEAM, zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia, Bogotá, D. C., Colombia. Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM, noviembre de 2013, Bogotá, D. C., Colombia.

3 METODOLOGÍA

La proyección de escenarios de cambio climático en el área de estudio se realizó aplicando una metodología diferenciada para cada una de las variables de precipitación y temperatura media.

3.1 Obtención de climatología de referencia para los periodos 1981-2005 y 1981-2010

3.1.1 Obtención de Precipitación de Referencia para los Periodos 1981-2005 y 1981-2010:

Según el catálogo oficial de estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, en área de estudio, se encuentran 317 estaciones de diferentes tipos como: agrometeorológicas, climatológicas, meteorológicas, limnigráficas, limnimétricas, pluviométricas, pluviográficas y sinópticas. Es de tener en cuenta que algunas de estas estaciones se encuentran suspendidas hace años y que no todas toman datos de la variable de precipitación; además, la mayoría de las estaciones que toman datos de precipitación y se encuentran activas no tienen datos completos para las series multianuales de los periodos climatológicos históricos de referencia 1981-2005 y 1981-2010.

Con base en lo anterior, se procedió a realizar la descarga de la información de la variable de precipitación de las estaciones que tuvieran algún dato para las series multianuales de los periodos climatológicos históricos de referencia 1981-2005 y 1981-2010; lo anterior, se realizó por medio del Sistema de Información para la Gestión de Datos de Hidrología y Meteorología – DHIME² del IDEAM.

Posteriormente, a las series descargadas, se les aplicó el método de control y calidad de la información³, teniendo en cuenta las sugerencias de la Organización Meteorológica Mundial - OMM (2007). Las comprobaciones efectuadas, se realizaron para determinar la calidad de la observación, esta consistió en:

- El valor de la precipitación fuese mayor a 0 mm.
- Comprobaciones de la franja de valores climáticos (coherencia del dato con la climatología).
- Identificación de los datos extremos de la serie, a través de 3 desviaciones estándar (3σ), para identificar los datos atípicos. Con estos datos, se procedió a identificar si los valores correspondían a datos extremos, a un evento de variabilidad climática (El Niño/La Niña), un error digital o un error de la estación. Al no identificarse el origen del dato, se procedió a desprestigiar el dato.
- Finalmente, se procedió a trabajar solo con estaciones que tuvieran más del 60% de los datos correctos.

Una vez identificadas las series a trabajar, se agruparon mediante componentes principales, para identificar las estaciones correlacionadas y que permitieran apoyarse unas con otras para el procesamiento de relleno de series. En este caso se aplicó el método de la Razón de Valores Normal, el cual establece que cuando se

² Portal que permite el acceso a las herramientas de gestión de series temporales, datos de laboratorio, acceso bajo demanda a datos oficiales, apoyado en mapas inteligentes, herramientas analíticas y geoinformación del IDEAM.

³ Cambio Climático más Probable para Colombia a lo Largo del Siglo XXI Respecto al Clima Presente. Arango, C.; Dorado, J; Guzmán D.; Ruiz, J. F. Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático Subdirección de Meteorología – IDEAM Diciembre - 2012

desconoce el valor de la precipitación de un determinado mes para una estación meteorológica dada pero que, se conocen los valores registrados para ese mismo mes sobre algunas otras estaciones que por sus características fisiográficas y climatológicas se consideraban como representativas de la primera, se puede aplicar la ecuación No. 1 para establecer un valor de precipitación en la estación que no tiene dicho dato para el mes determinado (Montealegre, 1990 & Monsalve, 1995).

$$P_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{N_x}{N_i} P_i \quad (\text{Ecuación No. 1})$$

n: Número de estaciones pluviométricas con datos de registros continuos cercanos a la estación x, la cual va a ser completada en su registro.

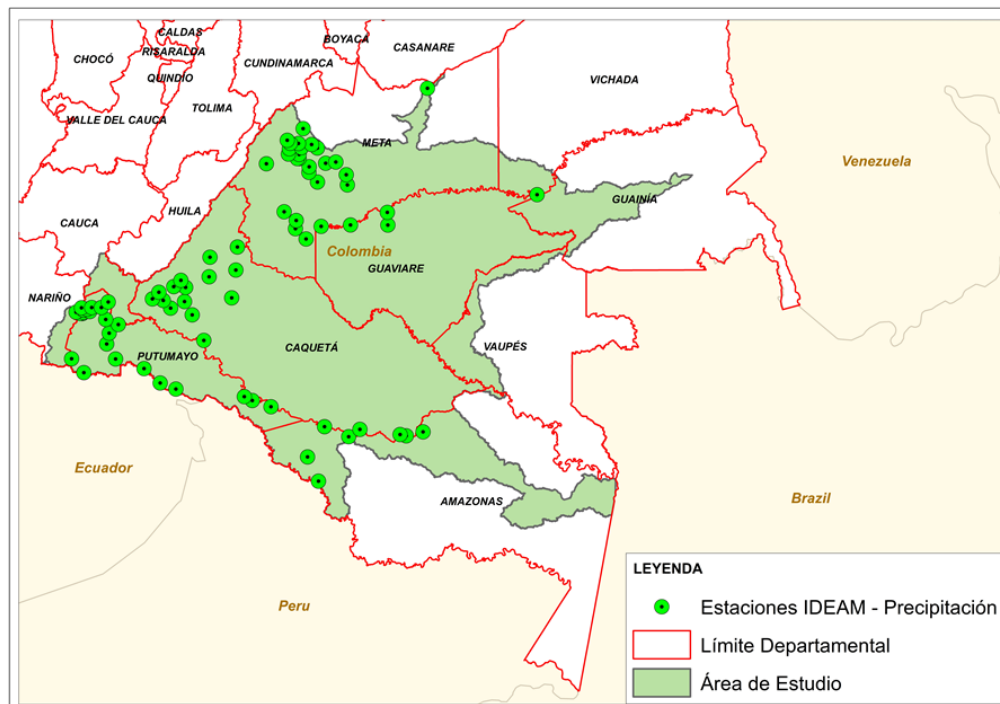
P_x: Precipitación de la estación x durante el mes por completar.

P_i: Precipitación de las estaciones 1 a n durante el mes a completar.

N_x: Precipitación media mensual a nivel multianual de la estación x.

N_i: Precipitación media mensual a nivel multianual de las estaciones de 1 a n.

Una vez identificados y ajustados los datos de precipitación de las estaciones que se encontraban dentro del área de estudio, se obtuvo para esta zona 78 estaciones con información de calidad (**Mapa 2**).



Mapa 2 Estaciones del IDEAM que presentan datos de precipitación.

De acuerdo con el número y la distribución de las estaciones, se puede determinar la existencia de una deficiencia aparente en la densidad de estaciones con datos históricos de precipitación, principalmente al sur del departamento del Guaviare, al sureste del departamento del Caquetá, al este del departamento del Guainía y al este del departamento del Meta. Además de no existir uniformidad en la cobertura geográfica, tampoco la hay en la temporalidad, ya que como se mencionaba anteriormente en algunos casos los registros no son continuos para las series históricas 1981-2005 y 1981-2010. Debido a esto, se procedió a buscar una fuente de información que brindara una mayor cobertura del área y unos datos más continuos, encontrando la base de datos de precipitación CHIRPS v.2.

3.1.1.1 Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS v.2 para los periodos 1981-2005 y 1981-2010:

Durante mucho tiempo la información de precipitación a través de las estaciones meteorológicas eran la única fuente de datos para la realización de estudios y pronósticos; sin embargo, en la actualidad se cuenta con una serie de modelos de datos estimados de lluvia generados a partir de imágenes satelitales. Cabe resaltar que ninguno de los sensores de satélite detecta la precipitación como tal, ya que la relación entre las observaciones y la precipitación estimada es indirecta, debido a que entra en juego una serie de variables. En este sentido, las estimaciones de precipitaciones derivadas de datos satélites no superan la necesidad de contar con observaciones mediante pluviómetros, pero son una fuente valiosa para las zonas donde se carece de información de lluvia (Catie & Rojas, 2018).

Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data (CHIRPS v.2) es una de las bases de datos climáticas de precipitación que existen a nivel global. Esta base de datos procesa imágenes satelitales con una resolución de 5.5 km, ajustadas con datos de estaciones *in situ* y contiene información desde el año 1981 hasta el presente. El proceso para la generación de los datos de CHIRPS se basa en tres principales componentes: Climate Hazards Precipitation Climatology (CHPClim); Climate Hazard Group Infrared Precipitation (CHIRP) y observaciones *in situ* de precipitación obtenidas a partir de varias fuentes, los cuales en conjunto permiten generar las series históricas de cuadrículas pluviométricas (Funk, y otros, 2015)

Estudios recientes como los de (Funk, y otros, 2015), (Paredes, Álvarez, Peñaloza, Moreno, & Farias, 2016) y (Urrea & Ochoa, 2016) concluyen que en algunos países de Norte y Sur América, las estimaciones de precipitación provenientes de CHIRPS v.2 constituyen una alternativa aceptable de información para áreas donde no se disponga de una adecuada distribución espacial de estaciones meteorológicas, o bien para desarrollar productos que permitan mejorar los procesos de mitigación de desastres y adaptación al cambio climático. Una de las fortalezas destacadas de CHIRPS v.2 es que provee datos que se generan con una resolución espacial más alta que los productos actualmente disponibles para la región, por otro lado, la resolución temporal es relativamente alta, y en términos generales se tiene conocimiento que representa bien la estacionalidad y la precipitación acumulada total, con un mejor desempeño en las zonas con menor relieve como es el caso de la región de la Amazonía Colombiana (Catie & Rojas, 2018).

A pesar de todas estas características, se consideró necesario realizar la validación de estos datos de precipitación CHIRPS v.2, comparándolos con las series multianuales de los periodos climatológicos históricos de referencia 1981-2005 y 1981-2010 de las estaciones del IDEAM (series observadas). Con este fin, se

aplicaron pruebas de métricas de concordancia propuestas por CATIE⁴ para analizar la similaridad entre ambas fuentes de datos:

- **Coefficiente de correlación lineal de Pearson (COR):** Con valores entre -1 y 1, donde 0 significa no relación y -1 y 1 relaciones fuertes negativa y positiva, respectivamente. En este estudio se espera que las series IDEAM y las series CHIRPS tengan un valor para esta métrica entre 0.5 y 1.
- **Raíz del error cuadrático medio (RMSE):** Con valores entre 0 e infinito indica la magnitud promedio de diferencia entre ambas series. Cuanto más cercano a 0 sea este resultado, más similares son las dos series de tiempo.
- **Error sistemático o de sesgo (BIAS):** Con valores entre 0 e infinito, indica la proporción de la sumatoria total de los datos CHIRPS, que se explica en la sumatoria total de los datos IDEAM. Se espera que los valores sean cercanos a 0, ya que esto significa una mayor similaridad de ambas series.
- **Pendiente de la regresión lineal (LM):** Con valores entre menos infinito y mas infinito, señala la relación promedio entre ambas series. Un valor ideal de 1 significa que la proporción entre ambas series es perfecta. Puede que no sean iguales en magnitud, pero son proporcionales.

Además del cálculo de los coeficientes de estas métricas, se generaron gráficas de dispersión y series de tiempo para cada estación en tierra del IDEAM. A partir de esto, considerando el desempeño de las métricas COR, RMSE, BIAS y LM, se concluyó que los datos CHIRPS v.2 representan bien en magnitud, sentido y concordancia las series de datos de las estaciones del IDEAM. Esto se infiere por cuanto la métrica COR estuvo alrededor de 0.7, RMSE cerca a 100, y BIAS cerca a 1. Adicionalmente, la métrica LM es cercana a 1, indicando que cada valor de CHIRPS v.2 es proporcional a los valores de los datos de las estaciones del IDEAM (**Figura 1**).

Adicionalmente, la **figura 2** presenta gráficas descriptivas donde se observa la concordancia entre ambas fuentes. Cabe anotar que cuanto mayor sean los valores de precipitación, mayor es su diferencia, lo cual responde a que los datos CHIRPS v.2 son medidas de precipitación sobre una superficie bidimensional y las de IDEAM son medidas de precipitación en una ubicación puntual, haciendo que en magnitudes mayores el error de CHIRPS v.2 sea una función cuadrática o potencia 2. Visto de otra forma, entre más lluvia cae en la superficie cuadrada del píxel CHIRPS v.2, mayor es la diferencia con la lluvia medida en un punto IDEAM.

⁴ Rojas Morales, Nazareth. Artículo de Tesis. CATIE, Turrialba (Costa Rica). 2018. Capítulo II, artículo 1. Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS v.2 para Costa Rica a escala mensual en el periodo 1981-2013. <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/8799?show=full>

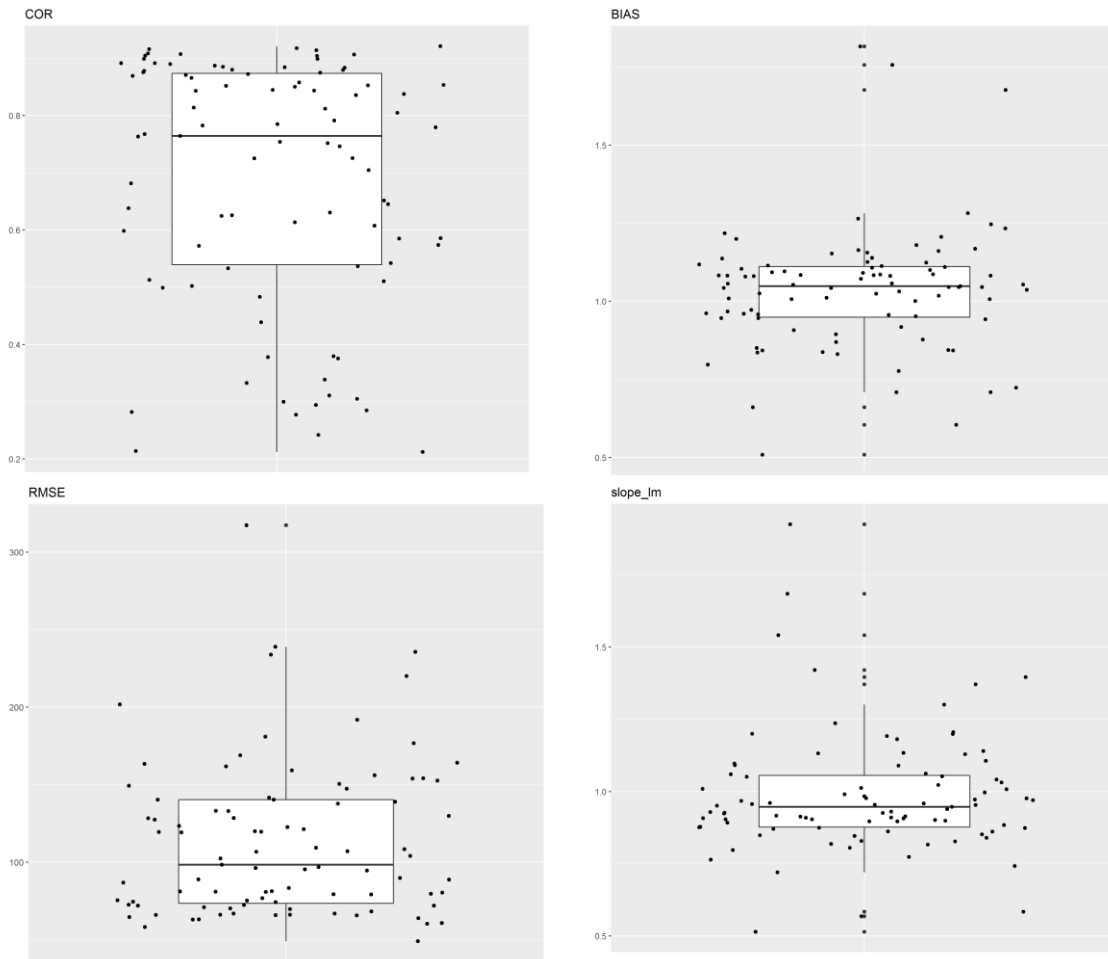


Figura 1 Distribución de las métricas de desempeño comparando las series IDEAM y CHIRPS v.2. Las métricas representadas son: correlación - COR (izq. Arriba), sesgo - BIAS (der. Arriba), error cuadrático medio - RMSE (izq. Abajo) y pendiente - LM (der. Abajo). Cada uno de los puntos representa a las estaciones, y las cajas blancas 'boxplot', representan el 25% y 75% de los datos. La línea oscura horizontal en la mitad de la caja blanca señala la mediana, es decir, el valor que se alcanza en el 50% de los datos. Las líneas oscuras verticales muestran el rango entre 100% y 75% (superior) y 25% y 0% (inferior).



El Gobierno del
Departamento de la
Amazonía

Visión
Amazonía

Patrimonio Natural



GRUPO BANCO MUNDIAL



IDEAM



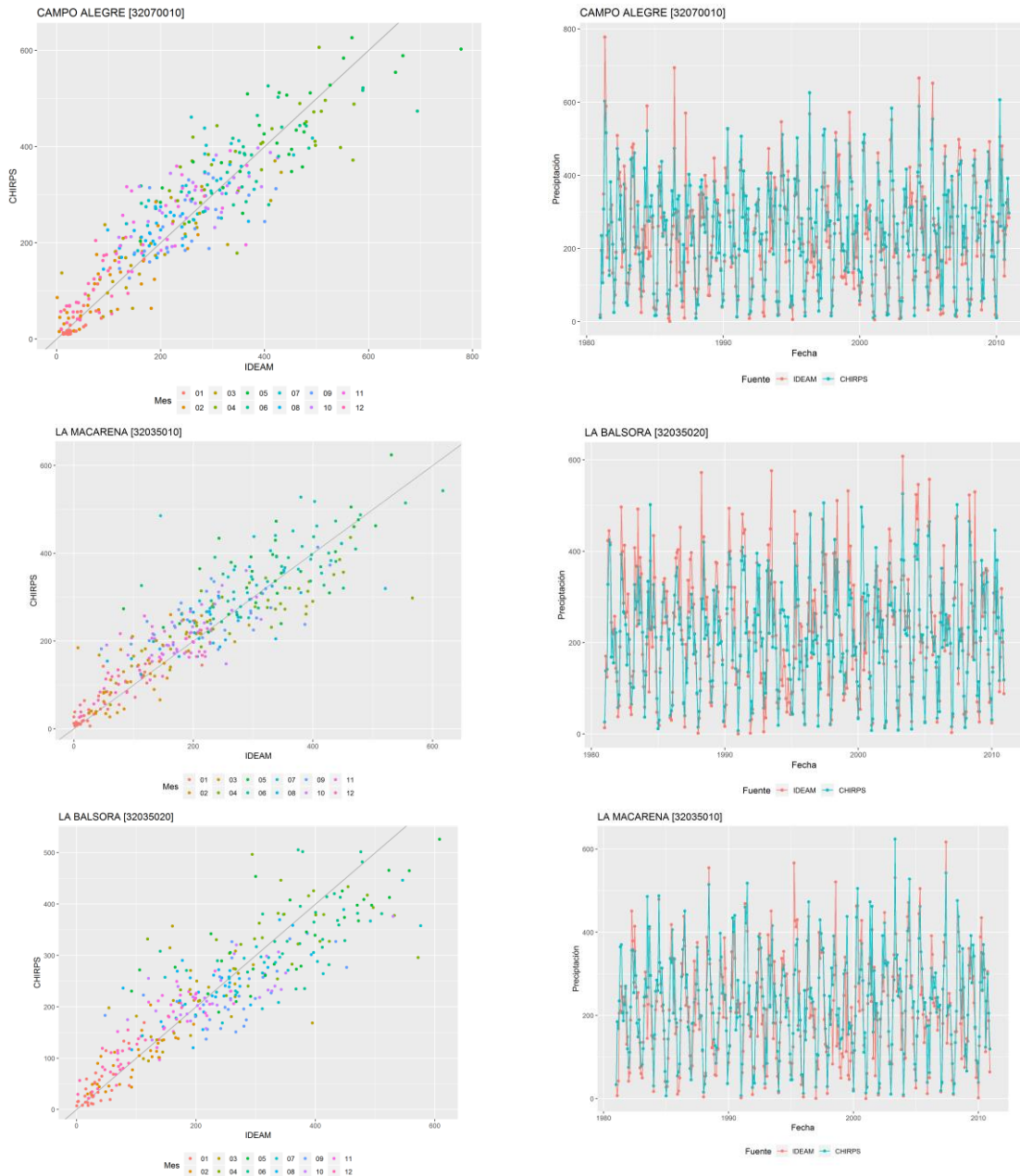


Figura 2 Ejemplo de gráficas de dispersión (izquierda) donde cada uno de los valores mensuales representa un punto, discriminado por el mes al que pertenece. La línea diagonal gris muestra el valor 1:1. Las series de tiempo (derecha) muestran los valores simultáneos de ambas fuentes.

A partir de estas pruebas se consideró viable usar la base de datos de precipitación CHIRPS v.2 para las series multianuales de los periodos climatológicos históricos de referencia 1981-2005 y 1981-2010, encontrando dentro del área de estudio 9636 puntos CHIRPS v.2 con información de precipitación. Estos datos fueron ajustándolas a los datos de precipitación de las 78 estaciones IDEAM que se encuentran dentro del área de estudio para las series multianuales de los periodos climatológicos históricos de referencia 1981-2005 y 1981-2010.

3.1.1.2 Ajuste de la base de datos de precipitación CHIRPS v.2 respecto a las 78 estaciones IDEAM para los periodos 1981-2005 y 1981-2010:

Comprobada la viabilidad de utilizar la base de datos de precipitación CHIRPS v.2 para las series multianuales de los periodos climatológicos históricos de referencia 1981-2005 y 1981-2010, se procedió a realizar el ajuste de la base de datos CHIRPS v.2 respecto a los datos de precipitación de las 78 estaciones IDEAM mediante el método de reducción de escala estadístico de “Corrección del Sesgo” (Pabón, 2011). Con esta metodología se buscó reducir la diferencia entre los valores observados mediante estaciones IDEAM y los valores simulados de CHIRPS mediante la aplicación de un factor de ajuste a los datos simulados. Ahora bien, teniendo en cuenta que la precipitación no toma valores negativos, sino que se mueve en el rango entre 0 e infinito, se aplica un **factor de ajuste multiplicativo** para cada serie mensual, la cual se plantea de la siguiente manera:

$$\alpha_j = \frac{\overline{X_j^{obs}}}{\overline{X_j^{mod}}} \quad (\text{Ecuación No. 2})$$

Siendo: α_j el factor de ajuste para el mes j-ésimo; $\overline{X_j^{obs}}$: Promedio multianual de la serie de datos observados de la precipitación estación IDEAM para el mes j-ésimo; y $\overline{X_j^{mod}}$: Promedio multianual de la serie de datos de precipitación CHIRPS para el mes j-ésimo.

El procedimiento de factor de ajuste multiplicativo se aplica a todos los meses y todos los píxeles. Si bien este factor es calculado para cada píxel particular donde se encuentra la estación, estos factores fueron interpolados con el método de distancia inversa - IDW (con parámetros $n = 4$ y $p = 4$), para la extensión espacial original de los datos CHIRPS v.2. Una vez generados los coeficientes de ajuste para cada capa CHIRPS v.2 en extensión espacial y temporal adecuada, se procedió a ajustar estas capas.

Factores de ajuste CHIRPS

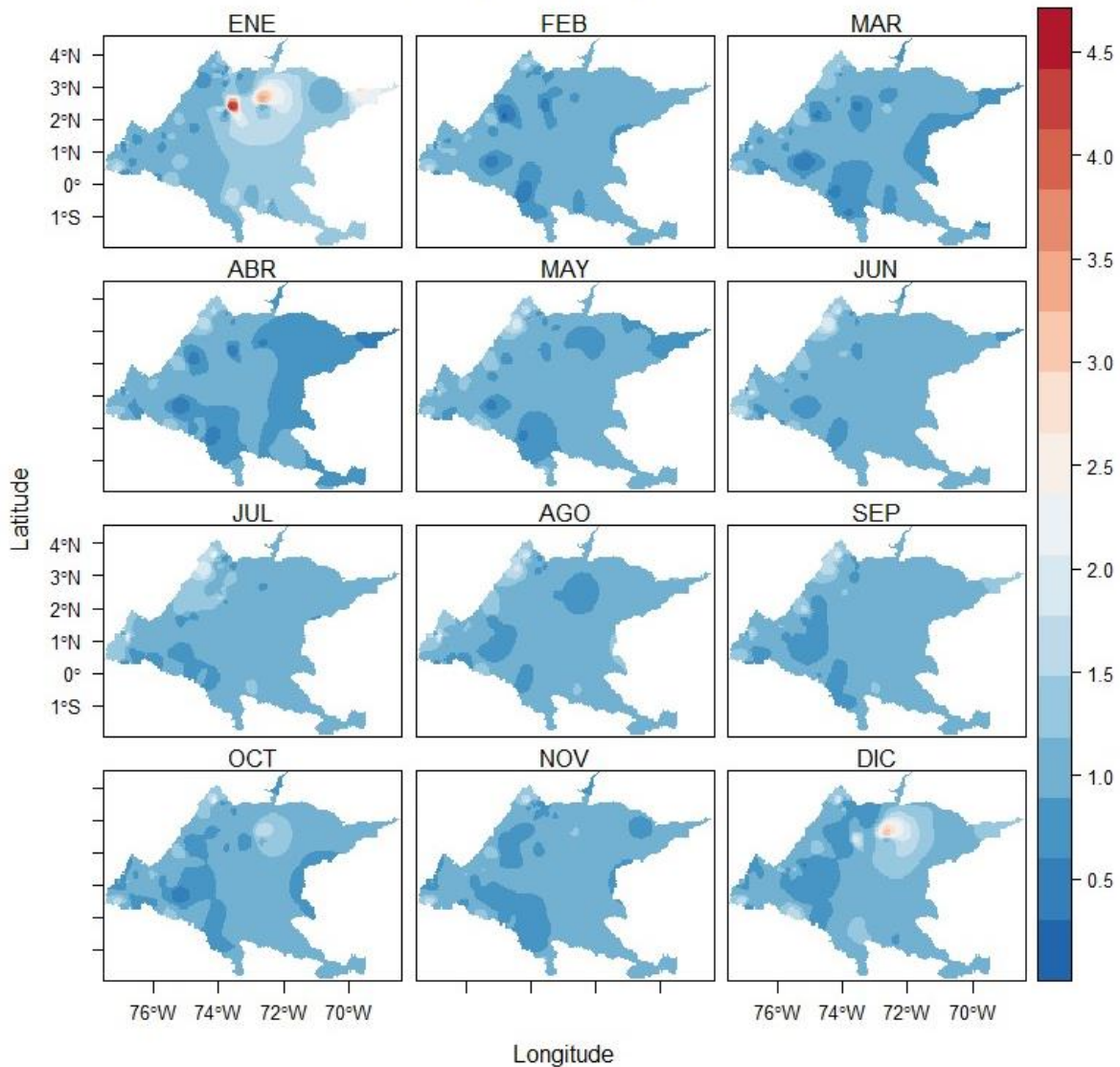


Figura 3 Promedio mensual multianual de los factores de ajuste implementados.

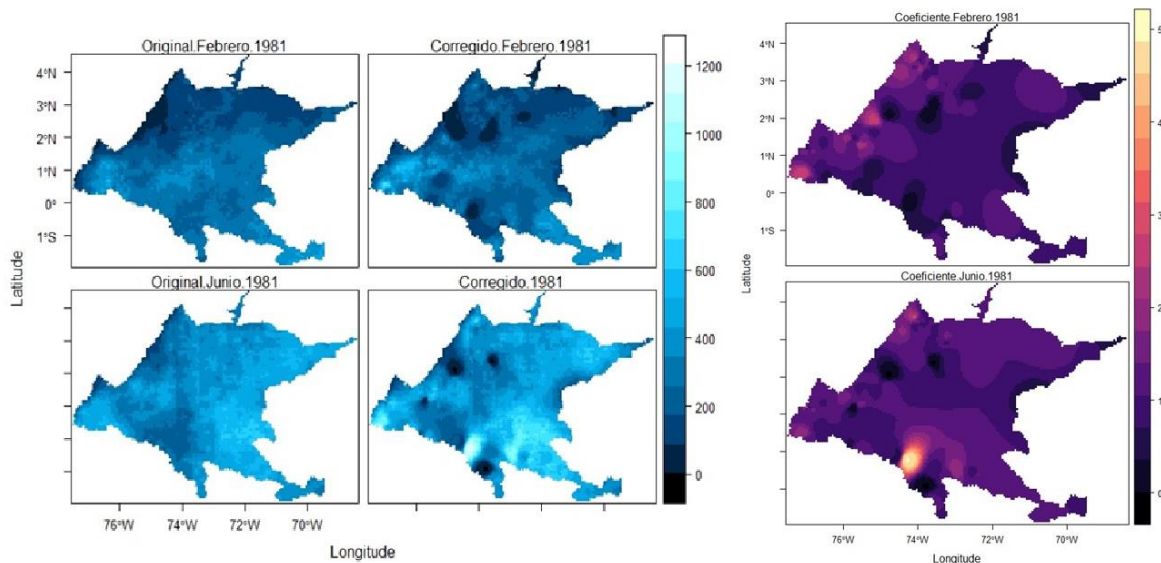


Figura 4 Coeficientes de ajuste para los meses 1981-02 (arriba) y 1981-06 (abajo). A la derecha se muestran los mapas CHIRPS originales (izquierda), CHIRPS finales (centro) y los ajustes implementados (derecha).

Los datos de precipitación CHIRPS v.2 que mayor factor de ajuste requirieron con respecto a los valores de las estaciones del IDEAM, fueron las series mensuales multianuales de los meses de enero, septiembre, octubre y diciembre, lo anterior respecto a temporalidad; por otra parte, espacialmente se observó que los mayores factores de ajuste se obtuvieron en las zonas del piedemonte andino (**Figura 3 y 4**).

Una vez establecidos los factores de ajuste para el área de estudio, se procede a ser aplicados a los datos de precipitación de la base de datos CHIRPS v.2 con la siguiente formula:

$$X_{i,j}^* = \alpha_j X_{i,j}^{\text{mod}} \quad (\text{Ecuación No. 3})$$

Donde: $X_{i,j}^*$: Valor ajustado de la precipitación respecto a las estaciones IDEAM del año i -ésimo y del mes j -ésimo; $X_{i,j}^{\text{mod}}$: Valor de la precipitación CHIRPS v.2 del año i -ésimo y del mes j -ésimo; y α_j : Factor de ajuste para el mes j -ésimo.

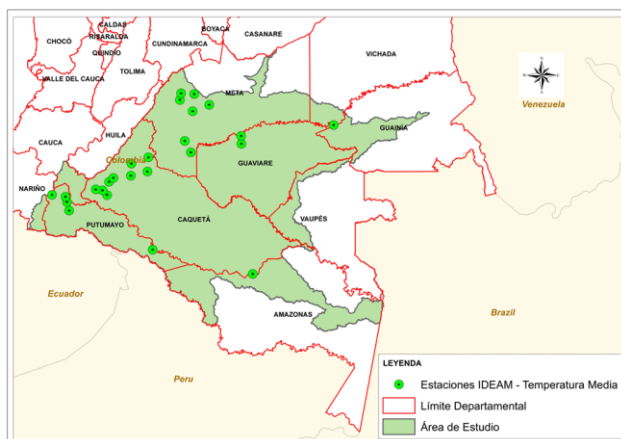
3.1.2 Obtención de Temperatura Media de Referencia para los Periodos 1981-2005 y 1981-2010:

Se procedió a realizar la descarga de la información de la variable de temperatura media mensual de las estaciones que tuvieran algún dato para las series multianuales de los periodos climatológicos históricos de referencia 1981-2005 y 1981-2010; lo anterior, se realizó por medio del DHIME del IDEAM.

Posteriormente, a las series descargadas, se les aplicó el método de control y calidad de la información, teniendo en cuenta las sugerencias de la OMM⁵ (2007). Las comprobaciones efectuadas, se realizaron para determinar la calidad de la observación, esta consistió en:

- Comprobaciones sintácticas (la temperatura del aire debe ser una cifra de no más de un decimal).
- Intervalos de valores (las temperaturas comprendidas entre -90 y +70).
- Comprobaciones de la franja de valores climáticos (coherencia del dato con la climatología).
- Coherencia interna de cada ficha (por ejemplo, la temperatura del aire no fuese inferior al punto de rocío).
- Coherencia de las series cronológicas (por ejemplo, la diferencia entre dos temperaturas sucesivas en un mismo sitio deberá ser "plausible").
- Coherencia de las series cronológicas (por ejemplo, la diferencia entre dos temperaturas sucesivas en un mismo sitio deberá ser "plausible").
- Coherencia espacial (por ejemplo, no se excedieran las diferencias plausibles entre los valores de temperatura de una estación y los de estaciones vecinas).

Una vez identificados y ajustados los datos de temperatura media mensual de las estaciones que se encontraban dentro del área de estudio, se obtuvieron para esta zona 25 estaciones con información de calidad; lo anterior, representa un déficit de información en el área de estudio para la variable de precipitación (Mapa 5).



Mapa 3 Estaciones del IDEAM para la variable de Temperatura Media

⁵ Organización Meteorológica Mundial (OMM). Organización internacional de la ONU.

3.1.2.1 Ajuste de la temperatura media observada mediante metodología del “Gradiente Térmico Vertical”:

Basados en la información obtenida del análisis de las observaciones climatológicas, es posible establecer la correlación negativa entre la temperatura y la elevación, a medida que la elevación aumenta la temperatura disminuye y viceversa; considerando esta relación, es posible calcular una corrección a los datos de temperatura mediante la generación de un modelo de regresión lineal (Armenta, Villa, & Jácome, 2016)

El análisis mediante la técnica de corrección que considera el gradiente térmico vertical se basa en la metodología descrita en Fries *et al.*, 2009 y Armenta *et al.*, 2016. Se utilizó la siguiente función de regresión lineal:

$$T = (\Gamma * z) + b \quad (\text{Ecuación No. 4})$$

Donde:

T = valor mensual de temperatura del aire [°C]

Γ = pendiente (gradiente altitudinal)

b = intercepto de la regresión

z = valor de altitud [m]

Posteriormente, se procedió al cálculo de las funciones de regresión lineal en base a los datos de temperatura media y a la elevación, de los valores observados para los periodos 1981-2005 y 1981-2010 (**Figura 5**).

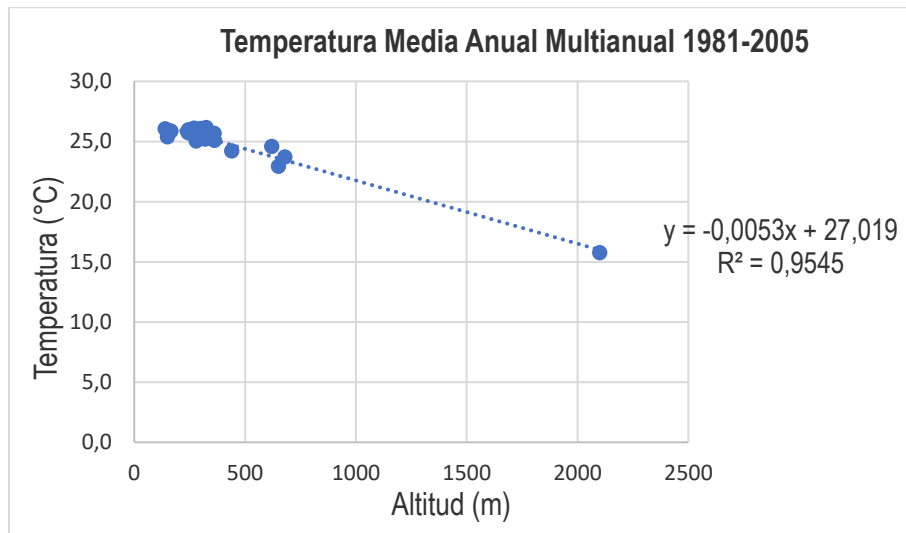


Figura 5 Relación entre la temperatura media anual multianual y la elevación

La fórmula para la transformación de los datos de temperatura al valor de altura de referencia es la siguiente:

$$T_r = T + (\Gamma * (Z_1 - Z_2)) \quad (\text{Ecuación No. 5})$$

Donde:

T_r = valor de temperatura considerando el valor de altura de referencia

Z_1 = valor de altura de referencia [0 m]

Z_2 = altitud de la estación meteorológica [m]

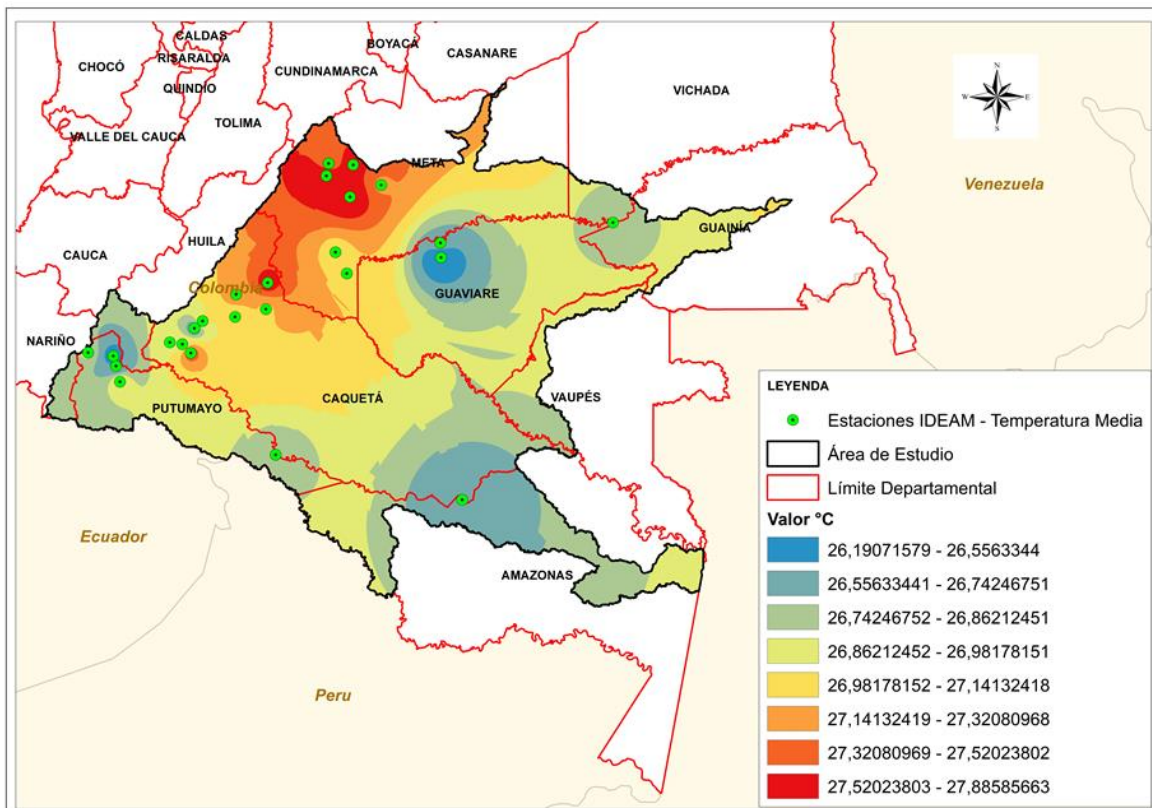
Se calcularon los valores de temperatura considerando un valor de altura de referencia de 0 m.s.n.m (**Tabla 1**)

Tabla 1 Valores de Temperatura Media Ajustados a una Altura de Referencia

TEMPERATURA MEDIA VALORES OBSERVADOS				
ESTACION	NOMBRE	Prom_81_05	Elevación	Prom_81_05_TR
44135010	ARARACUARA [44135010]	25,8	150	26,6
44115020	TAGUA LA [44115020]	25,9	153	26,7
47015070	PTO UMBRIA [47015070]	25,1	362	27,0
44015010	VILLAGARZON [44015010]	24,2	440	26,6
44015040	MOCOA ACUEDUCTO [44015040]	22,9	650	26,4
47015040	MICHOACAN [47015040]	15,8	2100	26,9
44045020	VALPARAISO [44045020]	26,1	270	27,5
44045030	MONO LA [44045030]	25,3	300	26,9
44045010	SAN JOSE DE FRAGUA [44045010]	25,2	320	26,9
44035030	MACAGUAL [44035030]	25,0	280	26,5
44035020	APTO G ARTUNDUAGA [44035020]	25,8	244	27,0
46035010	MAGUARE [46035010]	25,5	270	27,0
46015020	STA ROSA CAGUAN [46015020]	25,8	240	27,1
46035020	PTO RICO [46035020]	25,8	285	27,3
46015010	SAN VICENTE CAGUAN [46015010]	26,1	300	27,7
32035010	MACARENA LA [32035010]	25,8	248	27,1
31015010	TRUENO EL [31015010]	25,4	150	26,2
32035020	BALSORA LA [32035020]	25,6	270	27,0
32105070	SAN JOSE GUAVIARE [32105070]	25,9	165	26,8
32155010	MAPIRIPANA [32155010]	26,1	140	26,8

TEMPERATURA MEDIA VALORES OBSERVADOS				
ESTACION	NOMBRE	Prom_81_05	Elevación	Prom_81_05_TR
32075030	VISTA HERMOSA [32075030]	26,2	325	27,9
32075080	PUERTO LLERAS [32075080]	26,0	245	27,3
32075050	MESETAS [32075050]	24,6	620	27,9
32075040	HOLANDA LA [32075040]	25,7	360	27,6
32065010	LEJANIAS [32065010]	23,7	680	27,3

Con los datos obtenidos (T_r) se llevaron a cabo los cálculos de las superficies de interpolación a través de métodos determinísticos y geoestadísticos (**Mapa 4**)



Mapa 4 Superficie interpolada con valores de temperatura media a una altura de referencia.

A partir de las superficies generadas por la interpolación espacial, se llevó a cabo el restablecimiento de la distribución vertical de cada variable de temperatura, utilizando para ello un Modelo Digital de Elevación – DEM con una resolución de 30 metros.

La fórmula para el restablecimiento de la distribución vertical de la temperatura es la siguiente:

$$T_f = T_r + (\Gamma * (Z_{DEM} - Z_1)) \quad (\text{Ecuación No. 6})$$

Donde:

T_f = valor final de la variable

T_r = valor de temperatura considerando el valor de altura de referencia

Z_{DEM} = Modelo digital de elevación

Z_1 = altura de referencia

En ArcGIS el cálculo se aplicó con el uso de la herramienta “Raster Calculator”; para el cual es necesario considerar que el tamaño de la celda de la superficie interpolada debe ser igual a la resolución del modelo digital de elevación, para este caso a una resolución de 30 metros.

3.2 Obtención de las proyecciones climáticas de precipitación y temperatura media para el periodo 2011 – 2040 bajo distintos escenarios de cambio climático

Para este análisis se proyectaron los escenarios para cada uno de los cuatro Caminos Representativos de Concentración - RCP (por sus siglas en inglés) definidos en el quinto informe del IPCC, cada uno de los cuales corresponde a un camino de forzamiento radiativo específico (**Figura 6**). En estos escenarios la palabra "representativo" significa que cada RCP proporciona sólo uno de los muchos posibles escenarios que pueden conducir a las características de ese forzamiento radiativo, y el término "camino" hace hincapié en que no sólo los niveles de concentración en el largo plazo son de interés, sino también la vía que ha tomado en el tiempo para llegar a ese resultado (Armenta, Villa, & Jácome, 2016)

En este sentido, se debe tener claro que los RCP no son ni predicciones ni recomendaciones políticas, sino que fueron elegidos para asignar una amplia gama de resultados climáticos. Los RCP no pueden ser tratados como un conjunto coherente de lógica interna, por ejemplo, el RCP8.5 no puede ser usado como un escenario referente de «no-política» climática con respecto a los otros RCP, pues cada RCP contiene una serie de suposiciones socioeconómicas, tecnológicas y biofísicas diferentes (Armenta, Villa, & Jácome, 2016).

Nombre	Forzamiento radiativo ¹	Concentración ²	Forma del itinerario
VCR8.5	>8,5 W/m ² en 2100	> ~1370 CO ₂ -eq en 2100	En aumento
VCR6	Estabilización en ~6 W/m ² a partir de 2100	~850 CO ₂ -eq (estabilización, a partir de 2100)	Estabilización sin translimitaciones
VCR4.5	Estabilización en ~4.5 W/m ² a partir de 2100	~650 CO ₂ -eq (estabilización, a partir de 2100)	Estabilización sin translimitaciones
VCR3-CD ³	Máximo a ~3W/m ² antes de 2100; disminución posterior	Máximo a ~490 CO ₂ -eq antes de 2100; disminución posterior	Culminación seguida de disminución

Figura 6 Cuatro caminos de forzamiento radiativo – RCP

3.2.1 Selección de los modelos de circulación general a utilizar:

Para la proyección climática de las variables de precipitación y temperatura media bajo distintos escenarios de cambio climático, se realizó un inventario de los Modelos de Circulación General - GCM disponibles en la base de datos del proyecto CMIP5, y se tomaron los datos mensuales existentes para precipitación y temperatura media de aquellos modelos que contaran con datos para descarga de estas variables tanto para el periodo histórico de referencia 1981-2005 como para los RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 en el periodo futuro 2011-2040.

Posteriormente, de los 41 modelos con estas condiciones, se seleccionaron 15 modelos que fueron considerados apropiados para Colombia según la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA., 2015); estos modelos fueron: bcc-csm1-1-m, CCSM4, CSIRO-Mk3-6-0, FIO-ESM, GFDL-CM3, GISS-E2-H, GISS-E2-R, HadGEM2-AO, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC5, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MRI-CGCM y NorESM1-ME.

Una vez seleccionados los 15 Modelos de Circulación General – GCM que mejor comportamiento presentaban en Colombia, se procedió a realizar la descarga de estos datos para las variables de precipitación y temperatura media en el periodo 1981-2005. Posteriormente, se realizó una evaluación de los datos de cada modelo respecto a la climatología de referencia para el periodo 1981-2005, con el fin de seleccionar los modelos que mejor representan la estacionalidad y magnitud de las series ajustadas de precipitación y temperatura media.

En este sentido, se aplicaron métricas de desempeño para observar la coincidencia entre las series de tiempo para cada punto con datos de precipitación y temperatura media, y su equivalente en cada uno de los 15 modelos. Los parámetros evaluados fueron el coeficiente de correlación (COR) la raíz del error medio cuadrático (RMSE) y el error sistemático o sesgo (BIAS). Como cada uno de los puntos de datos se evaluó de manera independiente, se generaron tantos coeficientes como puntos para cada una de las métricas. Lo anterior, representó un reto en la interpretación de los datos, y requirió otras evaluaciones, como la inspección de las distribuciones estadísticas de tales coeficientes.

Con el fin de seleccionar los mejores modelos a la luz de evaluaciones para 3 métricas en 15 modelos para cada punto de datos de referencia, se usaron dos aproximaciones para refinar el listado final: 1. Análisis de componentes principales (PCA) y 2. Curvas de Cuantiles y Métricas. El PCA permite identificar similitud entre cada uno de los modelos y métricas, mientras que las curvas permiten evaluar el desempeño de cada modelo bajo diferentes umbrales en cada métrica por ejemplo el comportamiento bajo un gradiente de puntajes.

En primer lugar, los resultados de las métricas sufrieron una estandarización de escalas, ya que estas, al tener unidades y rangos diferentes necesitan ser comparables entre sí, por lo que fueron escaladas a un rango entre 1 y 0, siendo 1 el mejor valor de las métricas y 0 el peor. Esto permitió que en una misma escala las tres métricas fueran comparables. Con estos nuevos valores, se evaluaron las distribuciones de densidad de los coeficientes, se escogió el mejor estimador de tendencia central (por métrica por modelo) y se construyó el PCA. Considerando que el gráfico resultante de este análisis se presenta en dos dimensiones y que son tres métricas, se espera que algunas de las métricas estén relacionadas entre sí para poder identificar los mejores modelos en el gráfico.

La segunda de las gráficas es basada en cuantiles acumulados para los modelos por cada métrica. En el eje X se encuentran los cuantiles de la métrica (siendo 100 el mejor y 0 el peor) y en el eje Y la cantidad de puntos del modelo evaluados. Esta curva señala la cantidad acumulada de datos, en porcentaje, que tuvo un buen desempeño superior al valor del eje X. Todas las curvas se inician en el extremo inferior izquierdo ($X = 100, Y = 0$) y van hasta el extremo superior derecho ($X = 0, Y = 100$). Un desempeño muy bueno de un modelo puede describirse en esa gráfica como una curva que sube en el costado izquierdo de la gráfica hasta la parte más alta, y se mantiene allí en el eje Y hasta el extremo derecho del eje X (L invertida verticalmente, Γ). Esto significa que el 100% de las métricas de desempeño tuvieron el valor más alto posible. Por el contrario, un muy mal comportamiento sería opuesto al anterior (con una forma de L invertida horizontal, J). Esto significa que el 100% de las métricas de desempeño tuvieron el valor más bajo posible. Esta gráfica permite evaluar de forma simultánea varios umbrales e identificar cuáles modelos tuvieron correlación mayor a .9, .8, etc., y si esos modelos son consistentemente mejores que los demás. Para apoyar estas curvas se construyó un ranking que permitía identificar cuáles eran los mejores modelos bajo cada cuantil, por lo que se generaron estas matrices de posiciones entre 1 (peor) y 15 (mejor).

De la combinación de estas dos aproximaciones se generó definió un criterio numérico que pudiera recoger los mejores modelos evaluados de varias formas y que lograra ser replicable. Esto dio lugar a la selección de los modelos bajo criterios numéricos para las variables de precipitación y temperatura.

3.2.1.1 Obtención de los Modelos de Circulación General Óptimos para la Variable de Precipitación

Dado que las distribuciones de los coeficientes estimados para precipitación no fueron normales, como se observa en la **Figura 7**, se usaron las medianas como medida de centralidad para futuros análisis. Estas distribuciones permitieron evidenciar que, si bien algunos modelos tuvieron algunos puntos con valores deseables, también tuvieron algunos puntos evaluados de manera inapropiada. Esto es posible concluirlo al ver que algunas curvas de distribuciones tienen su masa distribuida a lo largo del eje (e.g. NorESM1-ME, CCSM4).

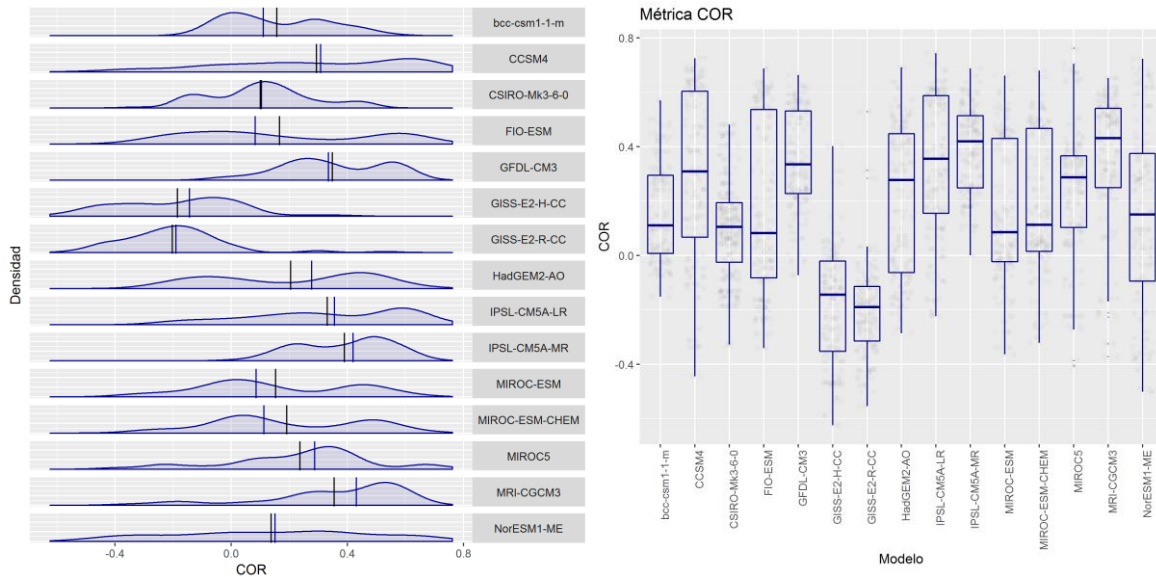


Figura 7 Distribuciones de la métrica COR en los 15 modelos para precipitación. La gráfica de la izquierda muestra las curvas de densidad de los datos, con líneas verticales azul y negra señalando la mediana y la media respectivamente. A la derecha, los boxplot indican los cuantiles 25 y 75 como extremos de las cajas, barras negras verticales para los cuantiles 0 y 100, y barra horizontal negra para la mediana. Cada una de las cajas está acompañada de los diferentes valores superpuestos.

El gráfico conjunto de las métricas estandarizadas permitió explorar el comportamiento de los modelos. Si bien se presentó una variedad de valores en los coeficientes, se evidenciaron algunos modelos con buenos desempeños en las 3 métricas, en contraste con otros que tuvieron desempeño favorable en algunas o incluso en ninguna.

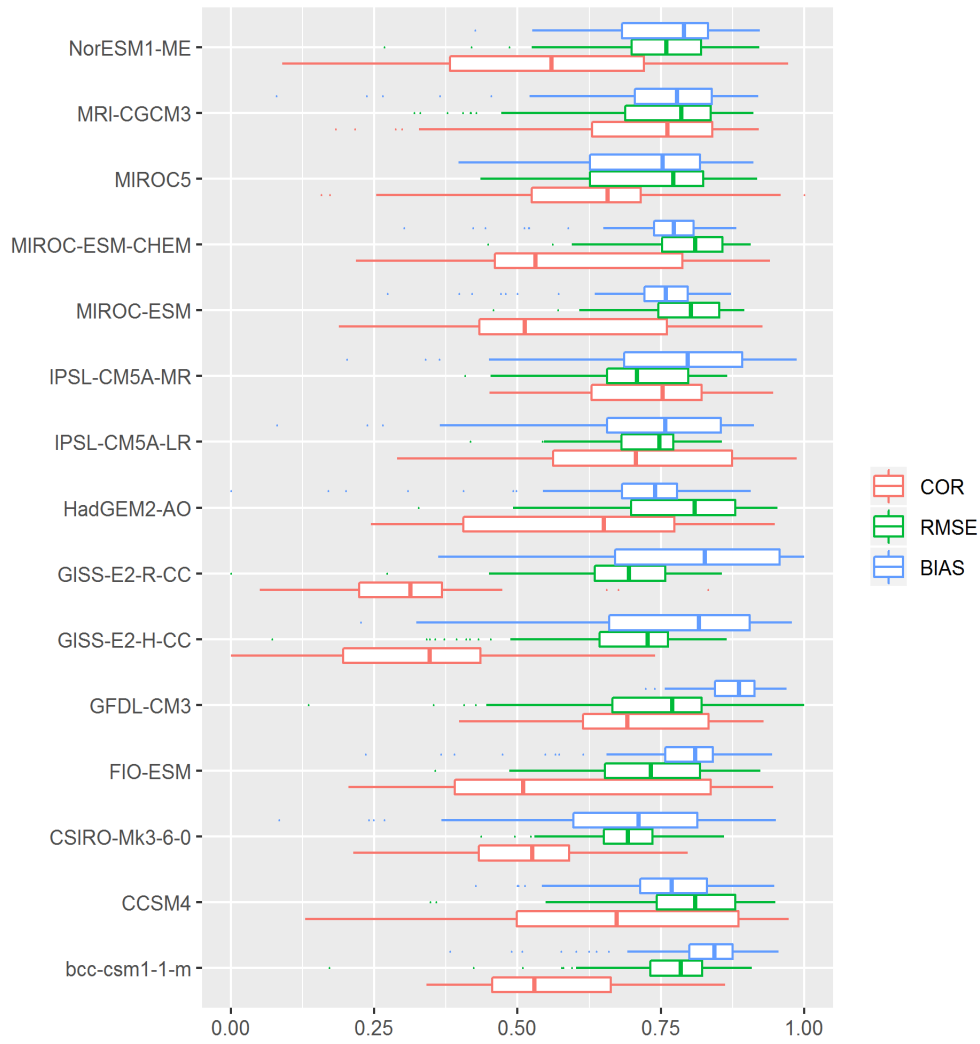


Figura 8 Gráfica de distribución de los coeficientes de las 3 métricas escaladas para los 15 modelos en precipitación

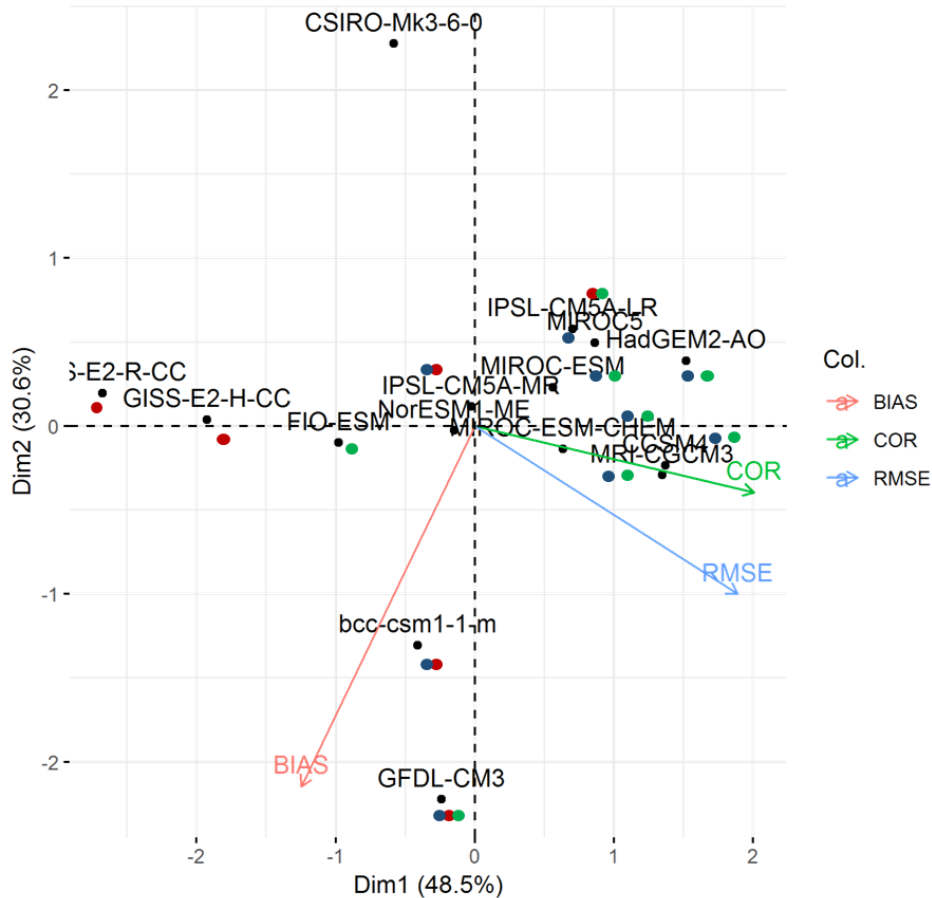


Figura 9 Análisis PCA de precipitación. Los ejes señalan las métricas, los puntos las medianas de los modelos.

El PCA de precipitación muestra que en este caso COR y RMSE están representando comportamientos similares por estar dirigidas hacia un ángulo similar y con longitud parecida, y que el eje X donde tienen su proyección (i.e. izquierda a derecha), explica el 48.5% de la varianza. El eje Y está alineado con BIAS, explicando el 30% de la varianza. Estos resultados muestran que los mejores modelos están hacia los extremos de las flechas. Dado que tenemos 3 flechas, representando cada métrica, se debe buscar los modelos que están hacia estos extremos. En este caso, el mejor modelo fue GFDL-CM3, al estar en el plano coordinado hacia la mayoría de las flechas.

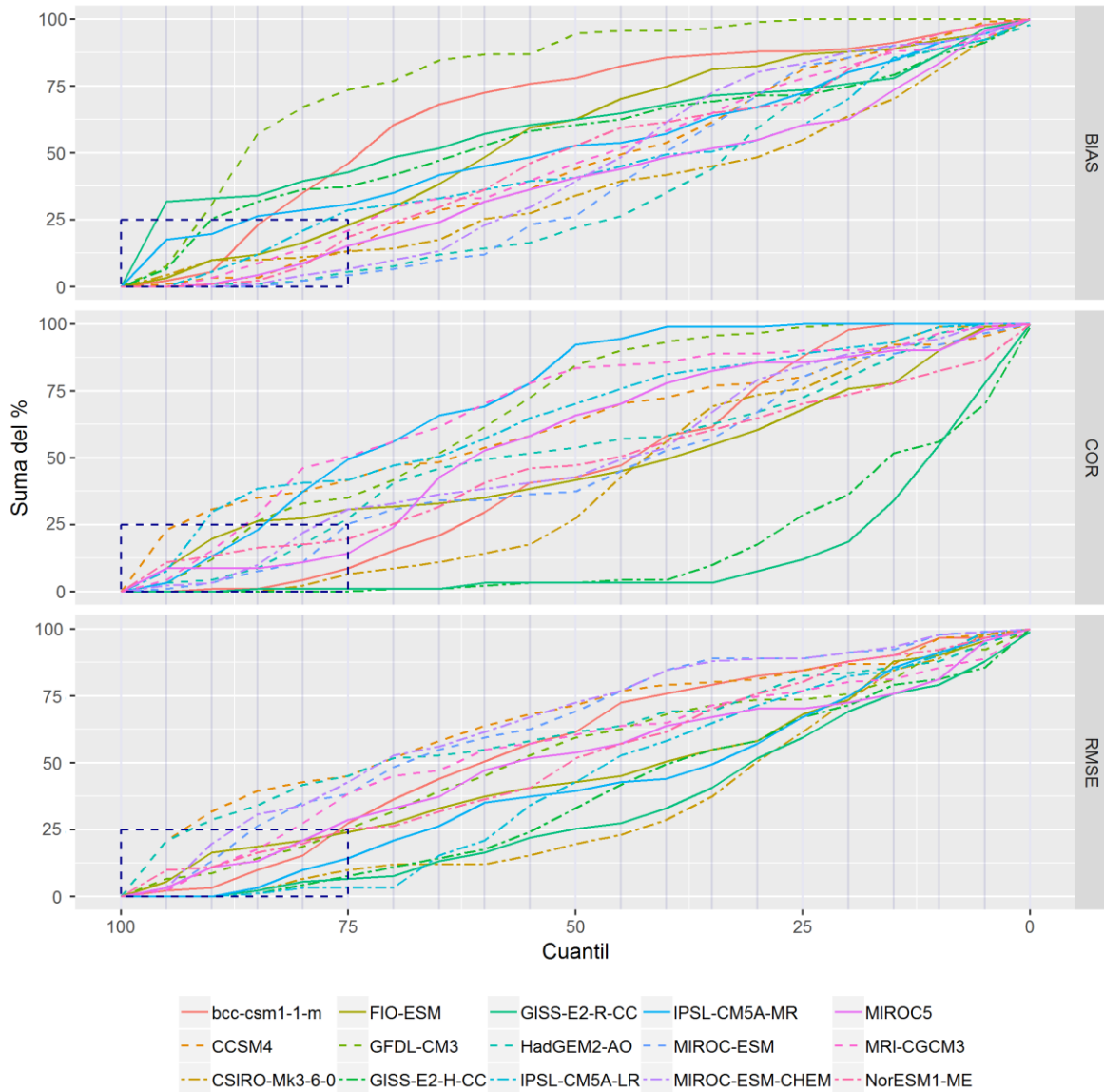


Figura 10 Porcentaje de datos bajo los cuantiles de las métricas para precipitación. Los recuadros azules señalan el umbral 25%-25%

Dentro de la figura 10 de curvas de cuantiles de precipitación, en la métrica BIAS, el modelo de mejor comportamiento (L invertida verticalmente, Γ) que es GFDL-CM3. Por el contrario, el peor modelo fue GISS-E2-R-CC en la métrica COR (con una forma de L invertida horizontal, J). Al ver que hay una continuidad en todas las curvas en las diferentes métricas, es inapropiado indicar un valor umbral de corte para seleccionar los mejores modelos. Sin embargo, con el propósito de hacer esta metodología replicable, definimos que el umbral

$x \geq 75$ y $Y \geq 25$ representó las conclusiones que las otras gráficas anteriores habían indicado, y nos permitió seleccionar los modelos que habíamos venido observando en los demás diagramas. Este umbral se interpreta como aquel que selecciona los modelos que al menos el 25% de sus puntos evaluados obtuvieron coeficientes en las métricas mayores o iguales al 25% de los valores más altos registrados para la métrica. En la figura 10 se pueden identificar los modelos seleccionados como aquellos que sus curvas toquen el lado superior de los recuadros ubicados en las esquinas inferiores izquierdas.

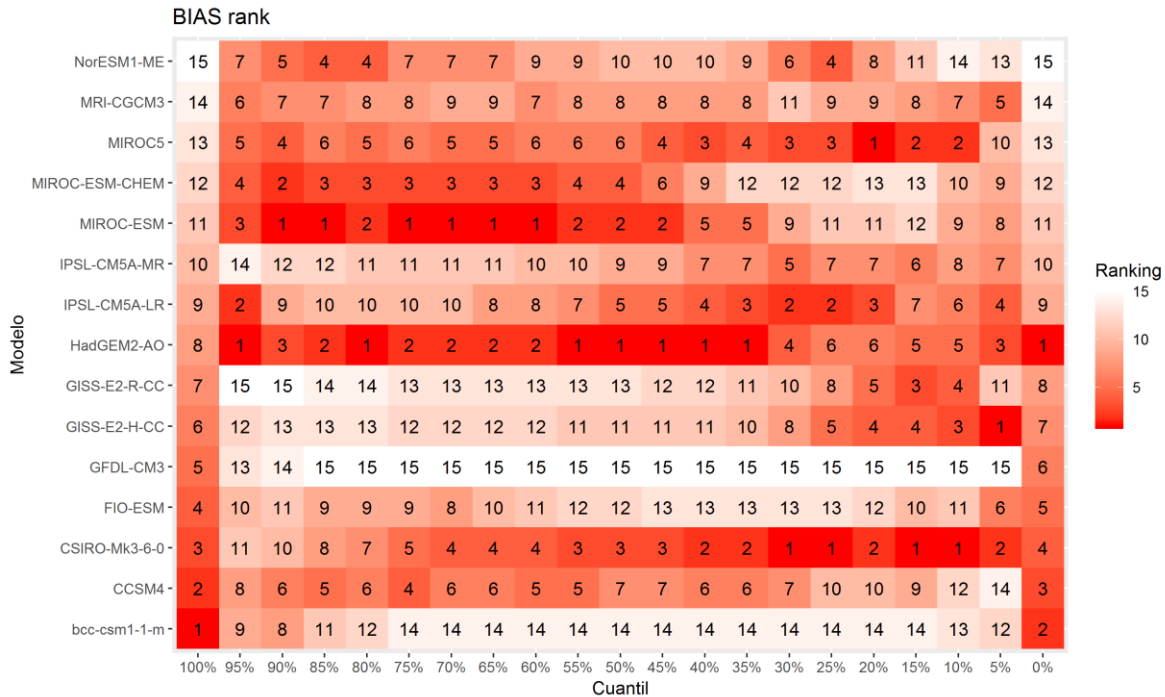


Figura 11 Ranking de los modelos de temperatura basados en la métrica RMSE en cada uno de los cuantiles. Entre más alto el valor, mejor posición en el ranking. El 1 significa el peor y 15 el mejor.

Como se puede observar, algunos modelos son consistentes en su posición respecto a los demás modelos en su valor de la métrica RMSE a lo largo de los diferentes cuantiles (Figura 11).

Los modelos seleccionados para precipitación bajo el criterio 25% - 25% fueron:

PRECIPITACIÓN
bcc-csm1-1-m
CCSM4
GFDL-CM3
HadGEM2-AO

PRECIPITACIÓN
IPSL-CM5A-LR
IPSL-CM5A-MR
MIROC-ESM
MRI-CGCM3

3.2.1.2 Obtención de los Modelos de Circulación General Óptimos para la Variable de Temperatura Media

Dado que las distribuciones de los coeficientes estimados no fueron normales, así como para precipitación, se usaron las medianas como medida de centralidad para futuros análisis. Estas distribuciones permitieron evidenciar que, si bien algunos modelos tuvieron algunos puntos con valores deseables, también tuvieron algunos puntos evaluados de manera inapropiada. Esto es posible concluirlo al ver que algunas curvas de distribuciones tienen su masa distribuida a lo largo del eje (e.g. NorESM1-ME, CCSM4).

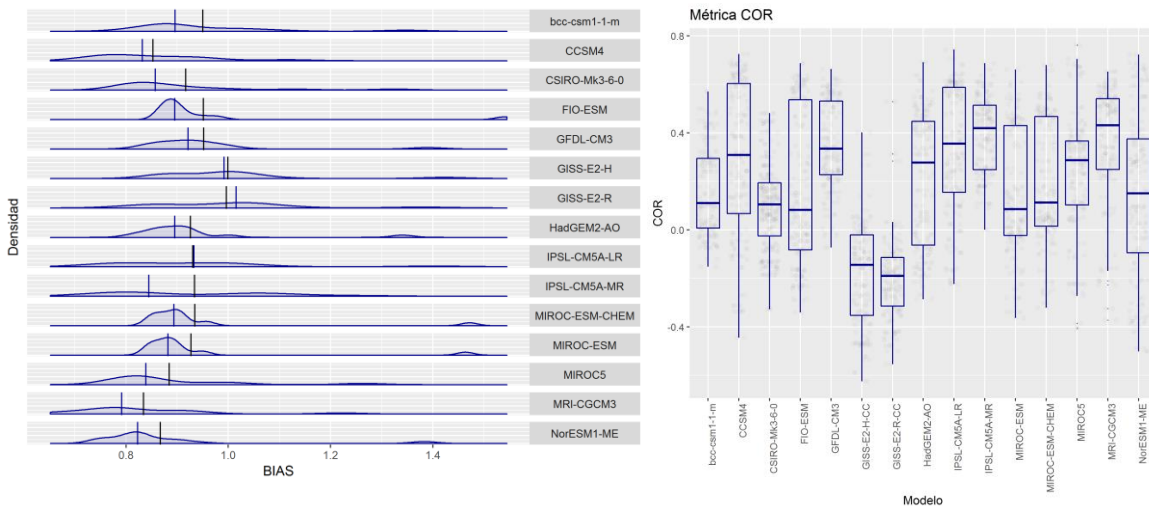


Figura 12 Distribuciones de la métrica COR en los 15 modelos para temperatura. La gráfica de la izquierda muestra las curvas de densidad de los datos, con líneas verticales azul y negra señalando la mediana y la media respectivamente. A la derecha, los boxplot indican los cuantiles 25 y 75 como extremos de las cajas, barras negras verticales para los cuantiles 0 y 100, y barra horizontal negra para la mediana. Cada una de las cajas está acompañada de los diferentes valores superpuestos.

El gráfico conjunto de las métricas estandarizadas permitió explorar el comportamiento de los modelos. Si bien se presentó una variedad de valores en los coeficientes, se evidenciaron algunos modelos con buenos desempeños en las 3 métricas, en contraste con otros que tuvieron desempeño favorable en algunas o incluso en ninguna.

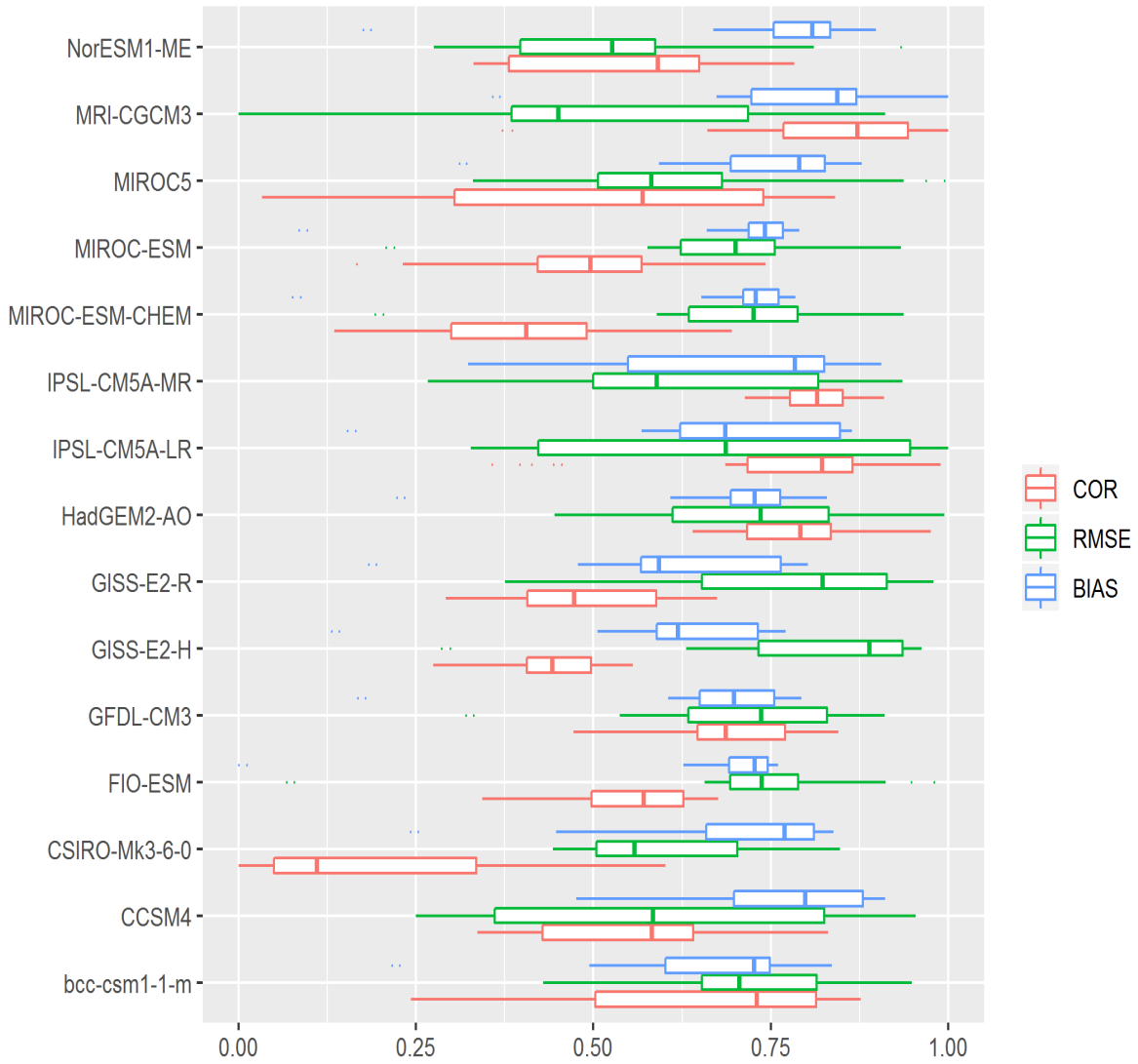


Figura 13 Gráfica de distribución de los coeficientes de las 3 métricas escaladas para los 15 modelos en temperatura

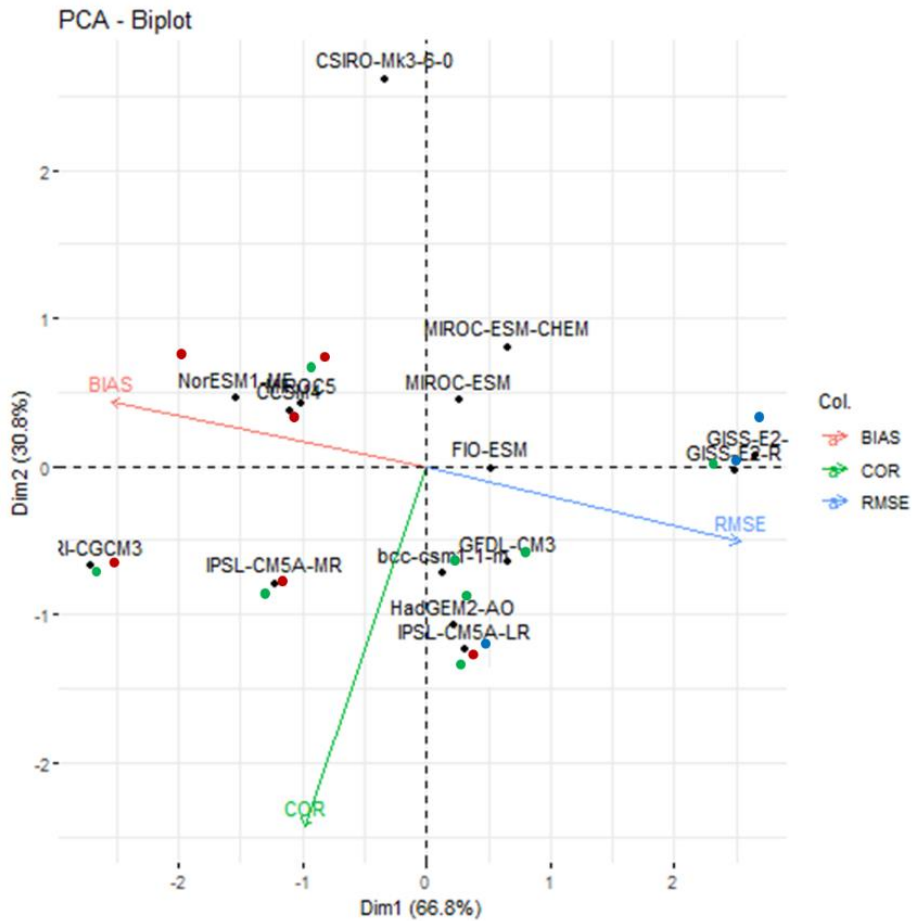


Figura 14 Análisis PCA de temperatura. Los ejes señalan las métricas, los puntos las medianas de los modelos.

En el caso del PCA de temperatura, a diferencia del de precipitación, el comportamiento fue diferente pues arrojó las flechas en sentidos opuestos. Ante este panorama, y apoyado en las gráficas anteriores, se consideran aceptables los modelos que se encuentran hacia los extremos de las flechas en las 3 direcciones., así en este caso BIAS y COR estuvieran negativamente correlacionados (Figura 14)

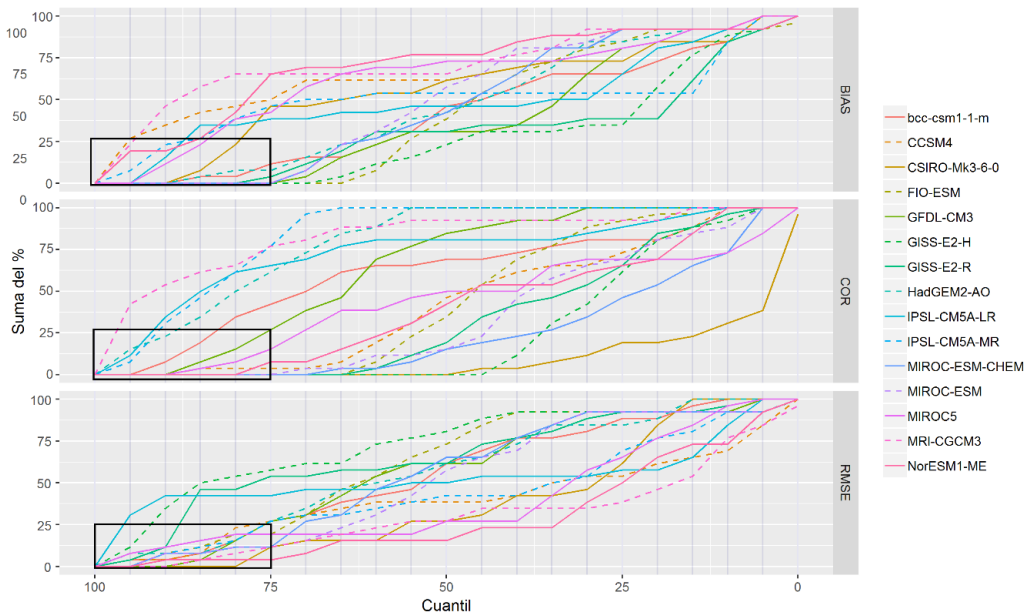


Figura 15 Porcentaje de datos bajo los cuantiles de las métricas para temperatura. Los recuadros azules señalan el umbral 25%-25%

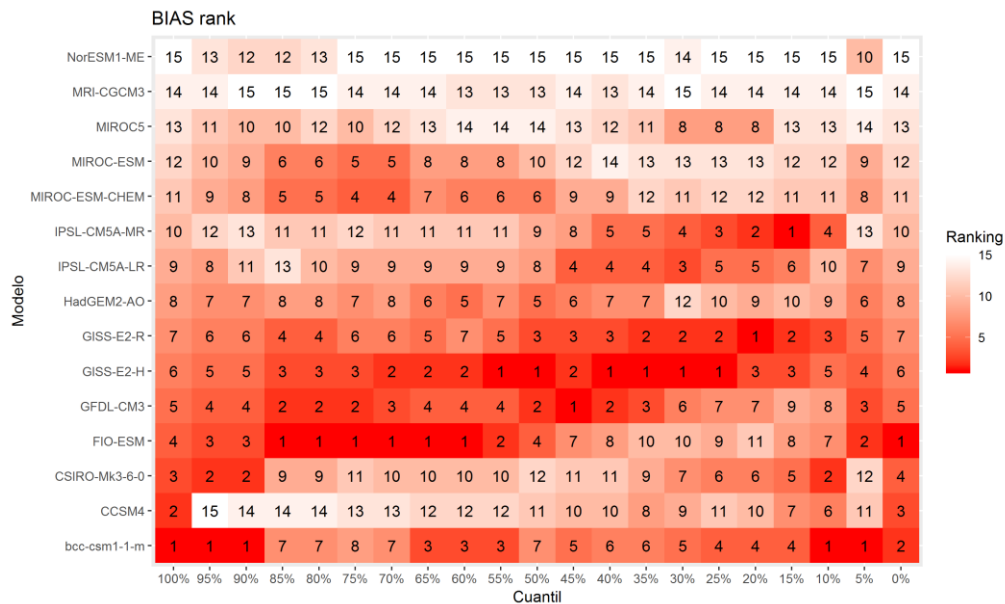


Figura 16 Ranking de los modelos de temperatura basados en la métrica RMSE en cada uno de los cuantiles. Entre más alto el valor, mejor posición en el ranking. El 1 significa el peor y 15 el mejor.

Como se puede observar en las figuras 15 y 16, algunos modelos son consistentes en su posición respecto a los demás modelos en su valor de la métrica BIAS a lo largo de los diferentes cuantiles.

Los modelos seleccionados para temperatura bajo el criterio 25% - 25% fueron:

TEMPERATURA MEDIA
bcc-csm1-1-m
CCSM4
GFDL-CM3
HadGEM2-AO
IPSL-CM5A-LR
IPSL-CM5A-MR
MIROC5
MRI-CGCM3
NorESM1-ME

3.2.2 Ensamble Multimodelo para las Variables de Precipitación y Temperatura Media en 4 RCP

Una vez identificados los Modelos de Circulación General óptimos con mejor desempeño para cada variable climatológica analizada, se procedió a realizar la descarga de las series mensuales multianuales del periodo futuro 2011-2040.

Posteriormente, se realizó un ensamble multimodelo para cada uno de los escenarios de cambio climático, es decir para los RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5, usando el método del factor de cambio.

Existen diferentes metodologías de factor de cambio para estimar futuros escenarios de cambio climático, y no existen directrices claras disponibles en la literatura para decidir qué metodologías son las más adecuadas para las diferentes aplicaciones (Anandhi, y otros, 2011). Para este estudio, se utilizó la metodología descrita en Anandhi *et al.*, 2011.

En este sentido, inicialmente se obtuvieron los valores promedios del periodo de referencia 1981-2005 de los modelos óptimos para cada variable y para cada RCP ($MCGO_{Referencia}$); los valores promedios del periodo futuro 2011-2040 de los modelos óptimos para cada variable y para cada RCP ($MCGO_{Futuro}$); y los valores promedios del periodo de referencia 1981-2005 observados (datos ajustados a partir de las estaciones IDEAM, tanto para precipitación como para temperatura media) (LOb).

Posteriormente, se cálculo del factor de cambio multiplicativo para la precipitación (FC_{mul}) y el factor de cambio aditivo para la temperatura media (FC_{add}) (Ecuaciones (7) y (8)).

$$FCmul = \frac{\overline{MCGOFuturo}}{\overline{MCGOReferencia}} \quad (\text{Ecuación No. 7})$$

$$FCadd = \overline{MCGOFuturo} - \overline{MCGOReferencia} \quad (\text{Ecuación No. 8})$$

Finalmente, se procedió a obtener las proyecciones para las variables de precipitación (P_{Prec}) y temperatura media (P_{Temp}) en cada uno de los escenarios de cambio climático, es decir para los RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5; lo anterior, se realizó aplicando el factor de cambio multiplicativo para la precipitación a los valores promedios del periodo de referencia 1981-2005 observados (LOb) y el factor de cambio aditivo para la temperatura media a los valores promedios del periodo de referencia 1981-2005 observados (LOb) (Ecuaciones (9) y (10)).

$$P_{Prec} = LOb * FCmul \quad (\text{Ecuación No. 9})$$

$$P_{Temp} = LOb + FCadd \quad (\text{Ecuación No. 10})$$

3.2.3 Anomalías de la Precipitación y Temperatura Media en 4 RCP Respecto al Periodo 1981-2005

Una vez se obtienen las proyecciones para las variables de precipitación y temperatura media en cada uno de los escenarios de cambio climático, es decir para los escenarios RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5; se procedió a analizar el aumento o disminución de la precipitación y la temperatura en el periodo 2011-2040 respecto al periodo de referencia 1981-2005 (Ecuaciones (11) y (12)).

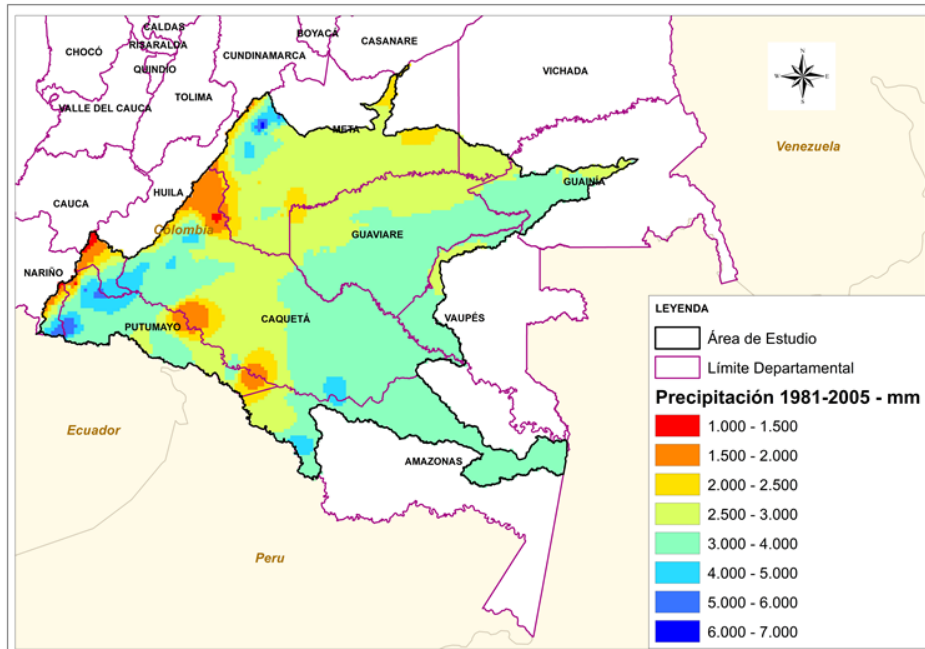
$$Anomalía_{Prec} = P_{Prec} * LOb_{Prec} \quad (\text{Ecuación No. 11})$$

$$Anomalía_{Temp} = P_{Temp} * LOb_{Temp} \quad (\text{Ecuación No. 12})$$

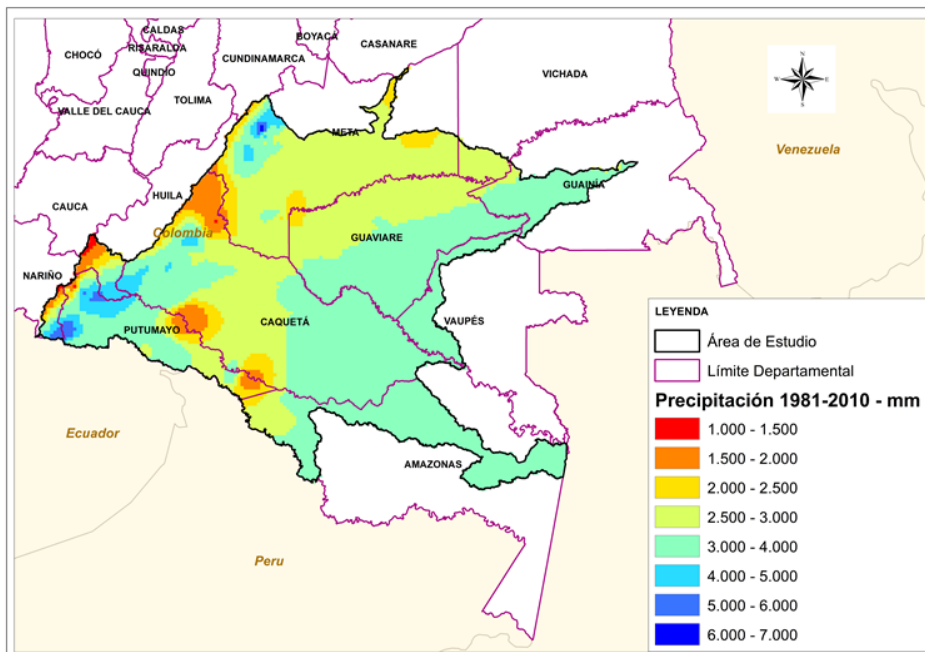
4 RESULTADOS

4.1 Periodos de referencia 1981-2005 y 1981 – 2010

Para la variable de la precipitación se obtuvo una base de datos de 9636 puntos con datos de precipitación a resolución espacial de 5.5 km x 5.5 km para las series multianuales de los periodos climatológicos históricos de referencia 1981-2005 y 1981-2010 (Mapa 5 y Mapa 6). Los 9636 puntos con datos de precipitación se obtuvieron de la base de datos de precipitación CHIRPS v.2 ajustada a 78 estaciones del IDEAM con datos de esta variable para los periodos 1981-1981-2005 y 1981-2010 para el área de estudio.

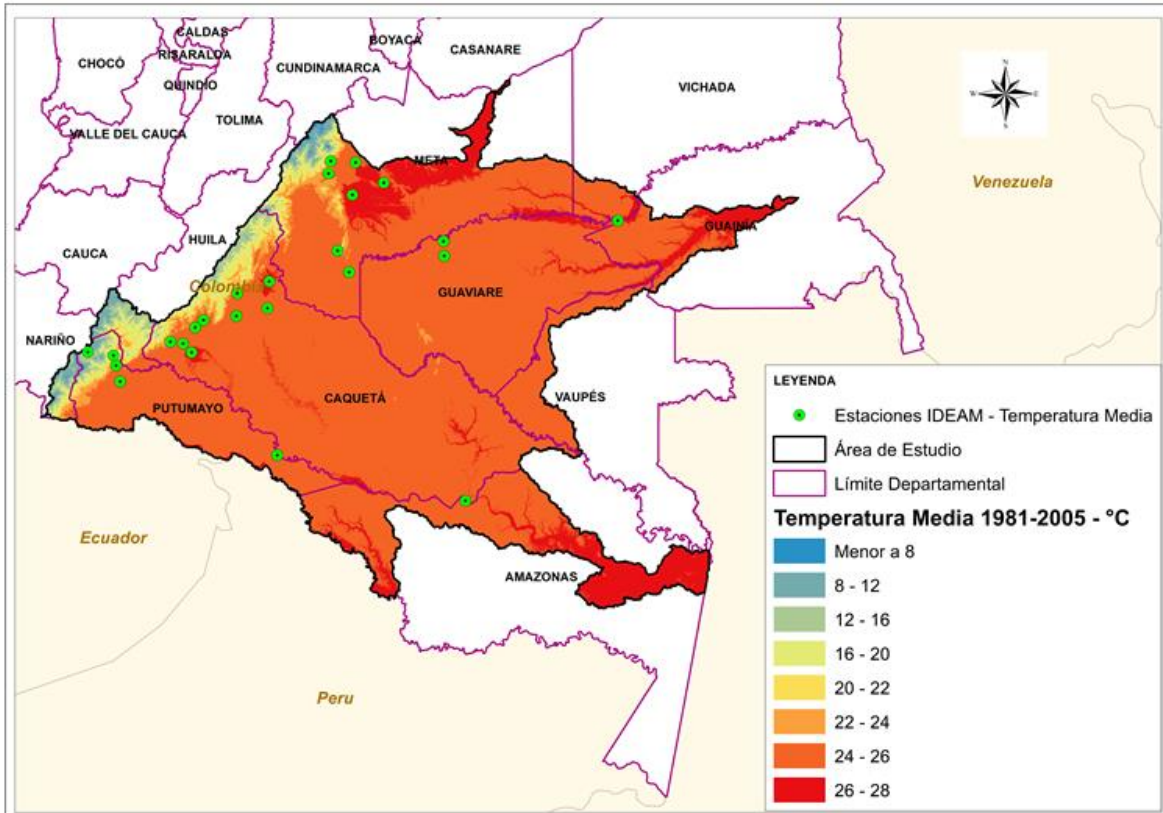


Mapa 5 Precipitación Final de Referencia para el Periodo 1981-2005

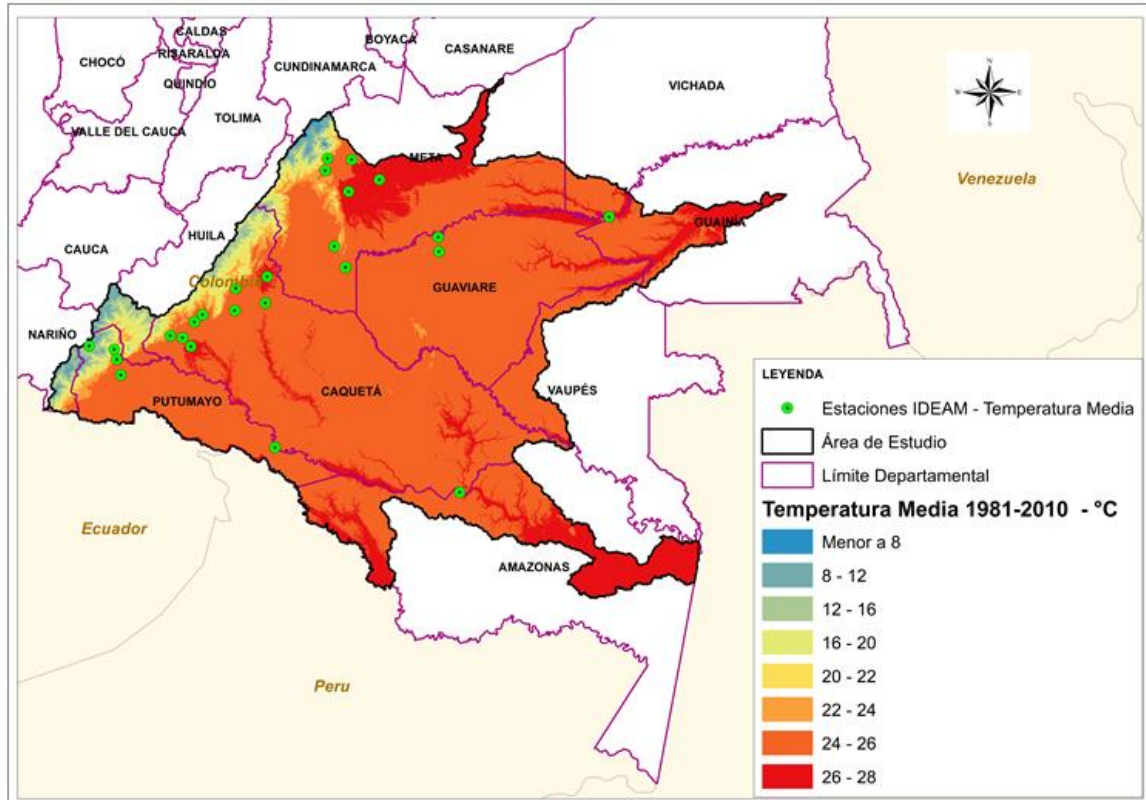


Mapa 6 Precipitación Final de Referencia para el Periodo 1981-2010

Para la variable de temperatura media se obtuvo una base de datos de temperatura media a resolución espacial de 30 m x 30 m para las series multianuales de los periodos climatológicos históricos de referencia 1981-2005 y 1981-2010 (Mapa 7 y Mapa 8). Los datos de temperatura media se obtuvieron a partir de la aplicación de la metodología del gradiente térmico vertical que utilizó como insumo el Modelo Digital de Terrero – DEM para Colombia con resolución de 30 metros y 25 estaciones del IDEAM con datos de esta variable para los periodos 1981-1981-2005 y 1981-2010 para el área de estudio.



Mapa 7 Temperatura Media Final de Referencia para el Periodo 1981-2005



Mapa 8 Temperatura Media Final de Referencia para el Periodo 1981-2010

4.2 Escenarios de Cambio Climático para el Periodo Futuro 2011-2040

Los modelos resultantes para la región de trabajo mostraron un patrón espacial similar al previsto previamente por los datos de referencia en el período 1981-2005. En el caso de la precipitación, cada uno de los escenarios toma como referencia la distribución geográfica del patrón de lluvias actual. Si bien esto se cumple en la ventana de tiempo 2011-2040, la incertidumbre asociada no fue estimada, por lo que los intervalos de error de estas estimaciones puedan dar lugar a variaciones espaciales diferentes a lo visto hasta hoy (*Figura 17*).

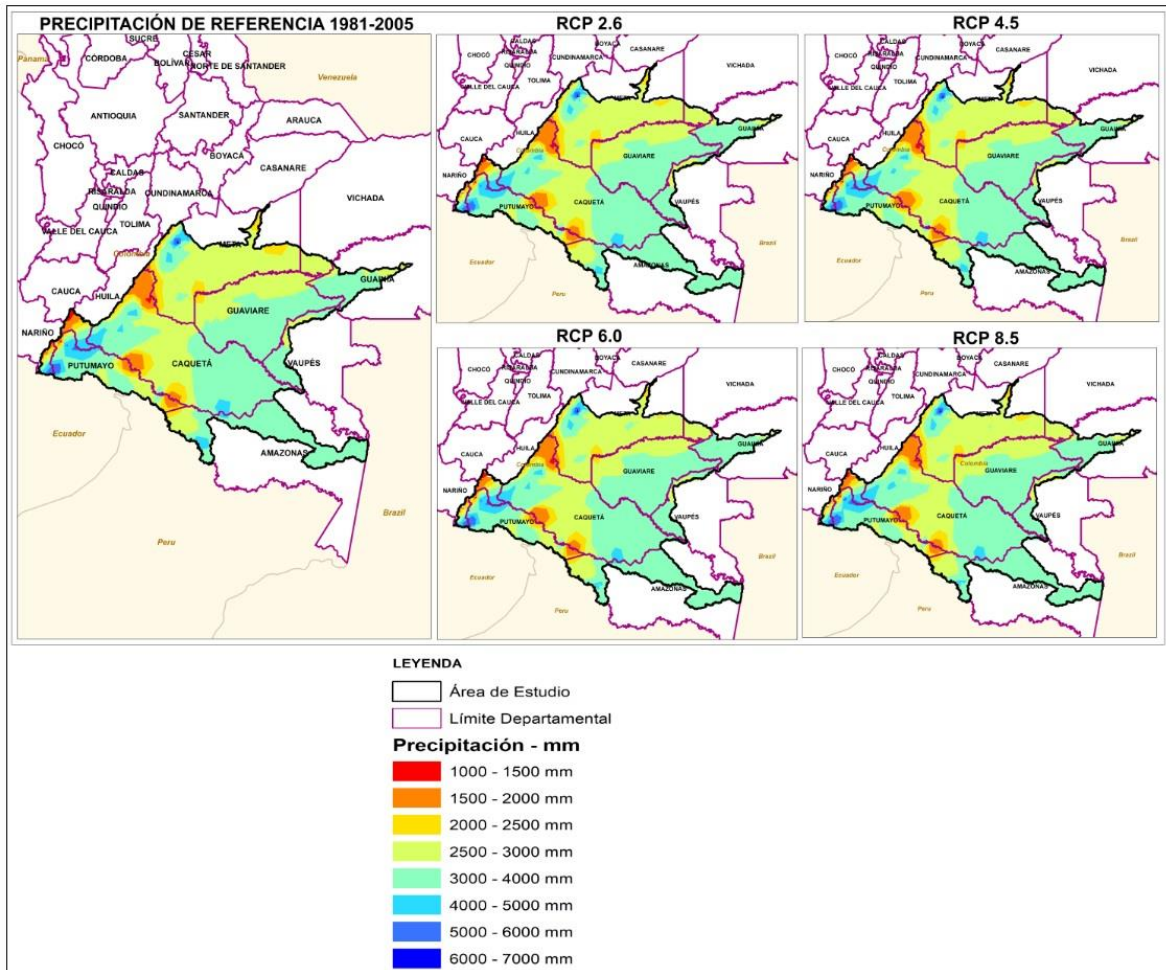


Figura 17 Ensamble de la Precipitación Bajo Diferentes Escenarios de Cambio Climático - RCP

Las anomalías por su lado muestran variaciones entre cada RCP. Esto puede indicar que, si bien los patrones regionales se mantienen, algunas zonas pueden verse más afectadas que otras. En los diferentes casos, es coincidente que las zonas norte tienen un aumento en las lluvias más generalizado que en el sur, y en la región de los andes sur no es reiterativo el sentido de la anomalía (Figura 18).

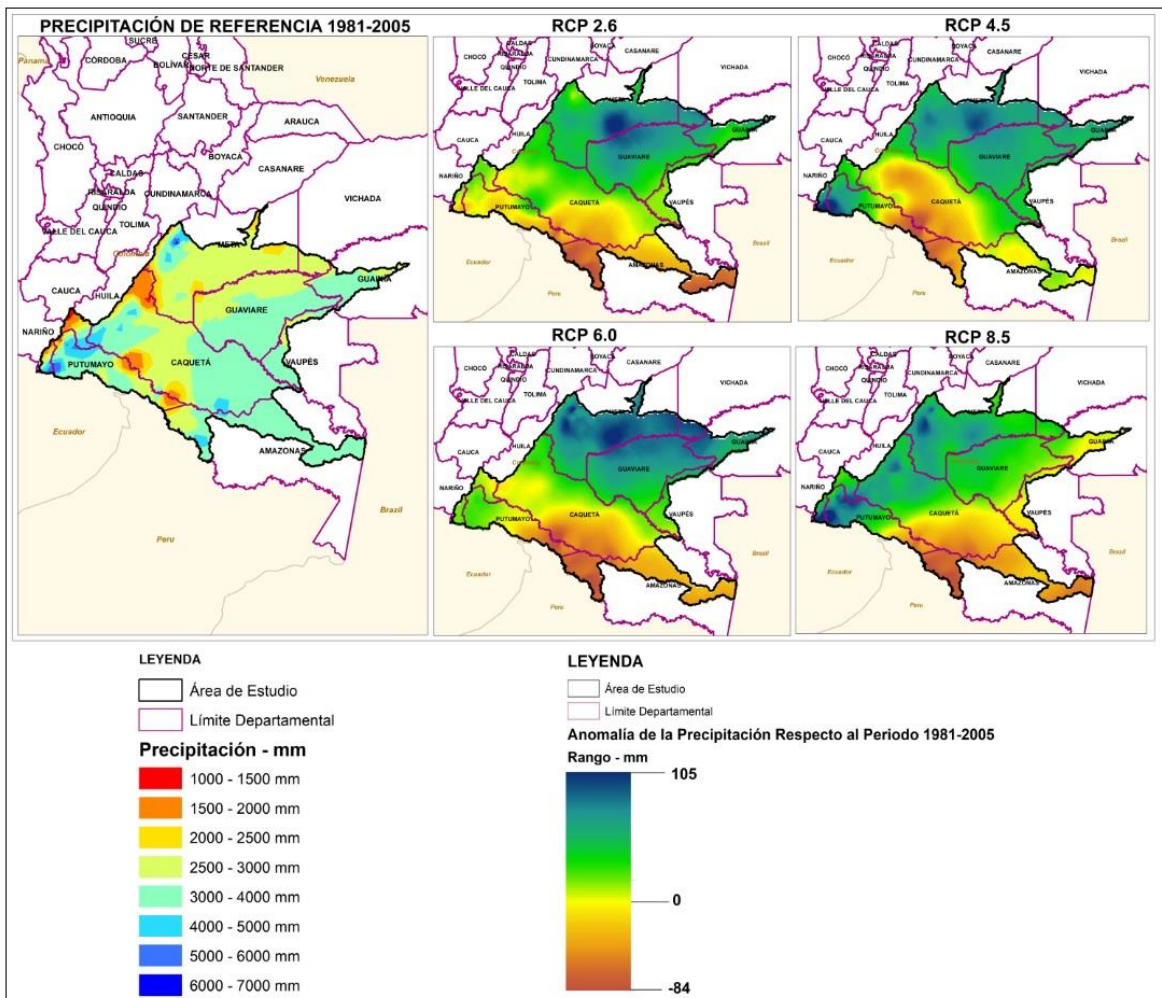


Figura 18 Anomalías de la Precipitación respecto al Periodo de referencia 1981-2005

En cuanto a los resultados obtenidos sobre temperatura media, debido a que esta se encuentra ligada a un gradiente vertical, su dependencia sobre la elevación hace que los cambios espaciales sean irrelevantes, y que por el contrario las magnitudes proyectadas sean homogéneas a lo largo de la región; sin embargo, para un periodo futuro 2011-2040 se puede observar un aumento de la temperatura media significativa respecto al periodo de referencia. Por último, se observa en las anomalías de la precipitación grandes diferencias espaciales entre los resultados de los RCP (*Figura 19*).

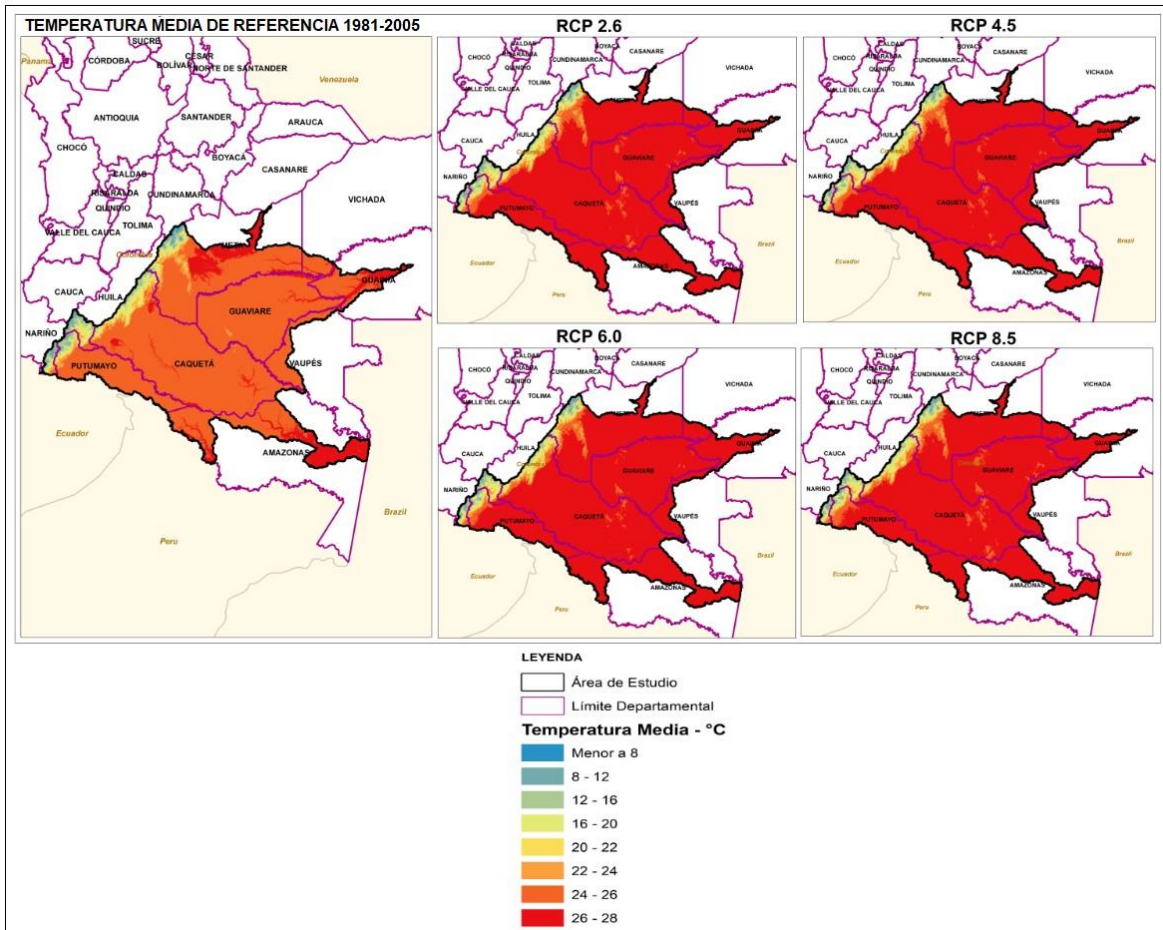


Figura 19 Ensamble de la Temperatura Media Bajo Diferentes Escenarios de Cambio Climático – RCP

Las anomalías de la temperatura media del periodo 2011-2040 respecto al periodo de referencia 1981-2005, muestra un aumento de temperatura en los 4 escenarios de cambio climático; sin embargo, los aumentos mas significativos se observan en el RCP 8.5 alcanzando valores de 1.3 grados celsius en el noreste del departamento del Guaviare y el noroeste del departamento del Amazonas. Por último, se observa en las anomalías de la temperatura media grandes diferencias espaciales entre los resultados de los RCP (Figura 20).

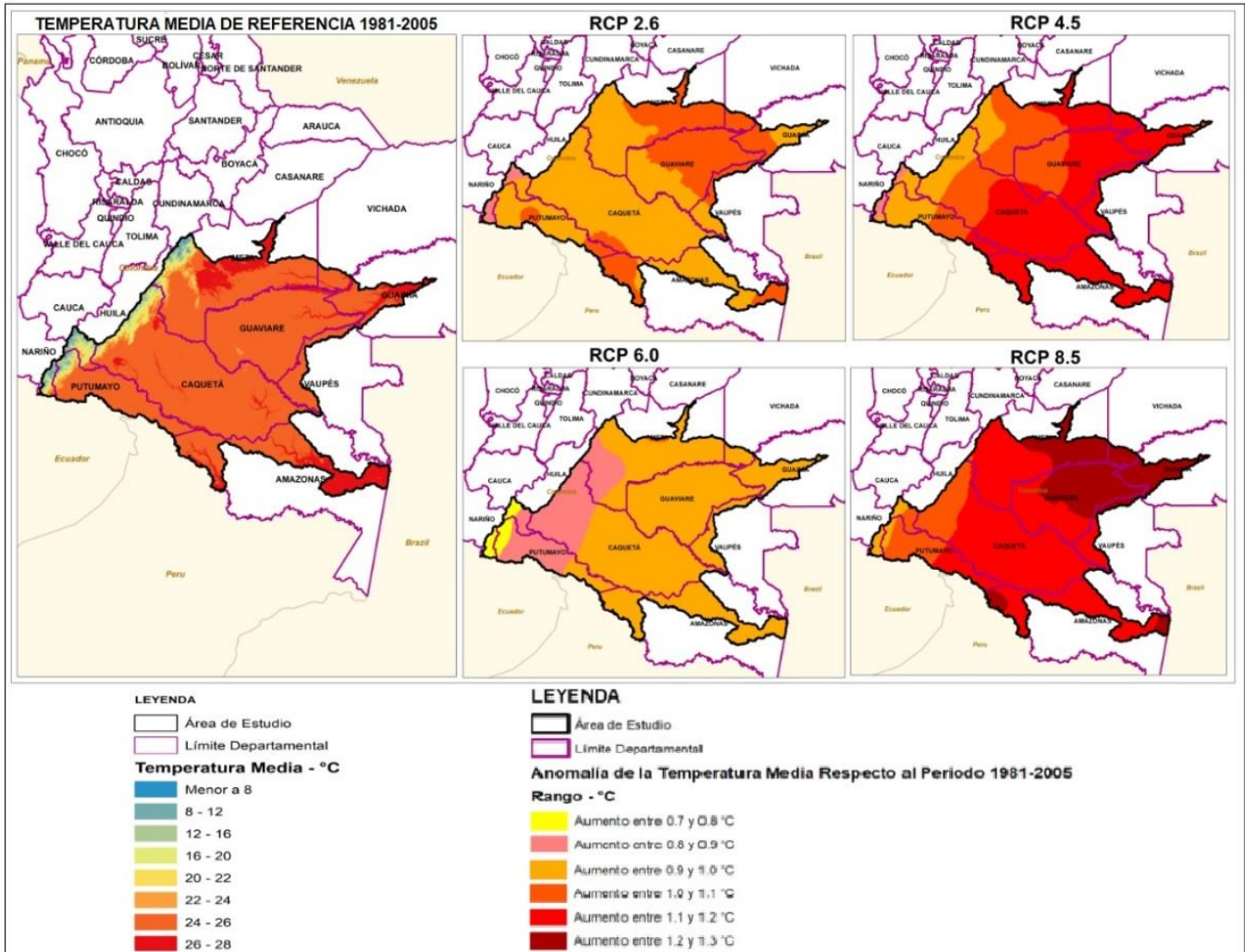


Figura 20 Anomalías de la Temperatura Media respecto al Periodo de referencia 1981-2005

5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

- Una de las dificultades recurrente al momento de generar estudios que incluyan la climatología de referencia es la deficiente y mala distribución de las estaciones climatológicas en especial para la región de la Amazonía Colombiana; por lo anterior, se debe complementar el catálogo de estaciones que capturen información de caudal, precipitación, temperaturas media, máxima y mínima, entre otras variables de importancia para la región; de esta manera se podrán generar reportes, pronósticos, predicciones y escenarios de cambio climático con menor grado de incertidumbre que permita a los tomadores de decisiones proponer y gestionar programas y medidas acordes a las necesidades de las comunidades y sectores productivos.
- Ante la deficiente y mala distribución de las estaciones climatológicas en especial para la región de la Amazonía Colombiana, es de tener en cuenta que en la actualidad se cuenta con una serie de modelos de datos estimados de lluvia generados a partir de imágenes satelitales. Una de estas bases de datos para la variable de precipitación es la denominada “Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data (CHIRPS v.2)” la cual contiene información desde el año 1981 hasta el presente. Para la región de la Amazonía Colombiana, según la validación con datos de las estaciones IDEAM, las estimaciones de precipitación provenientes de CHIRPS v.2 constituyen una alternativa aceptable de información, o bien para desarrollar productos que permitan mejorar los procesos de mitigación de desastres y adaptación al cambio climático. Una de las fortalezas destacadas de CHIRPS v.2 es que provee datos que se generan con una resolución espacial más alta que los productos actualmente disponibles para la región.

Es de esta manera que la base de datos CHIRPS v.2 puede ser considerada para próximos estudios por parte del IDEAM luego de realizar una validación por regiones que permita conocer su desempeño en diferentes partes del país y en diferentes temporalidades; si bien esta base de datos no reemplaza la información de las estaciones climatológicas, si pueden ser ajustadas con la información observada y poder suplir necesidades en las regiones.

- Respecto a la temperatura media de referencia, se observa que aun no hay bases de datos consistentes que permitan utilizar sus datos, por lo que la metodología del “Gradiente Térmico Vertical” sigue siendo la más consistente y aplicable en el territorio colombiano en especial en regiones como la Amazonía Colombiana que no cuenta con suficiente información de estaciones climatológicas.
- La metodología para la proyección de la precipitación y la temperatura media en escenarios de cambio climático para la región de la Amazonía Colombiana difiere de la aplicada en la Tercera Comunicación de Cambio Climático del IDEAM, ya que el IDEAM empleada un ensamblaje multiescenario que para este estudio no se realizó. Entre otra diferencia se encuentra la validación y los modelos empleados para el ensamble, razón por la cual los resultados son diferentes y permiten intuir que la metodología empleada en este estudio es más detallada para la región en el periodo 2011-2040. En este sentido, es necesario que se realicen comparaciones estadísticas y geoespaciales que permita conocer las diferencias exactas entre la Tercera Comunicación del IDEAM y los datos obtenidos en este estudio.

- A pesar de que los datos de anomalías obtenidos para la proyección de la precipitación en el periodo 2011-2040 respecto a la precipitación de referencia 1981-2005, no muestran variaciones significativas en escala de milímetros, es de resaltar que se identifican áreas donde la precipitación aumenta y otras en las que esta variable disminuye independientemente del valor puntual, lo cual permite la generación de programas y medidas por parte de los tomadores de decisiones en torno a la adaptación al cambio climático.
- Por otra parte, las anomalías obtenidas para la proyección de la temperatura media en el periodo 2011-2040 respecto a la temperatura de referencia 1981-2005, muestran para toda el área de estudio aumento en los valores de esta variable alcanzando temperaturas de 1,3 grados celsius en el noreste del departamento del Guaviare y el noroeste del departamento del Amazonas para el escenario de cambio climático RCP 8.5. Estos aumentos de la temperatura media para el periodo 2011-2040 hay que interpretarlos en el territorio, es decir, se considera necesario traducir los valores de aumento en impactos para la región, permitiendo la generación de medidas de adaptación al cambio climático para los sectores, para el espacio público, para los recursos naturales, para los ecosistemas y para la población humana y sus actividades.
- Finalmente, se recomienda aplicar la metodología de este estudio para la generación de proyecciones climatológicas en escenarios de cambio climático para los periodos **mensuales** multianuales 2011-2040, 2040-2070 y 2070-2111 en la totalidad de la región de la Amazonía Colombiana y en periodos. De esta manera, se establecen anomalías de precipitación y temperatura media que apliquen de manera mensual y hasta fin de siglo.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Anandhi, A., Frei, A., Pierson, D., Schneiderman, E., Zion, M., & Lounsbury, D. (2011). *Examination of change factor methodologies for climate change impact assesment*. (Vol. 47). Water Resources Research.
- Armenta, G., Villa, J., & Jácome, P. (2016). Proyecciones Climáticas de Precipitación y Temperatura para Ecuador, Bajo Distintos Escenarios de Cambio Climático.
- Catie, T., & Rojas, N. (2018). Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS v.2 para Costa Rica a escala mensual en el período 1981-2013. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11554/8799>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., . . . Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*. Recuperado el 15 de 12 de 2019, de <https://www.nature.com/articles/sdata201566>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA. (2015). *Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura en Colombia - Estudio Técnico Completo*.
- IPCC, I.P. (2013). *Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambridge University Press.
- Pabón, J. (2011). *El cambio climático en el territorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR*. Cundinamarca, Colombia.
- Paredes, F., Álvarez, H., Peñaloza, M., Moreno, F., & Farias, A. (2016). Intercomparison of improved satellite rainfall estimation with CHIRPS gridded product and rain gauge data over Venezuela. *Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México.*, 323-342. Obtenido de <http://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/ATM.2016.29.04.04/46577>
- Urrea, V., & Ochoa, A. (2016). Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el período 1981-2014. In *XXVII Congreso Latinoamericano de hidráulica*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/310844678_Validacion_de_la_base_de_datos_de_precipitacion_CHIRPS_para_Colombia_a_escaladiaria_mensual_y_anual_en_el_periodo_1981-2014



El Gobierno de Cundinamarca

