

# **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

## **RESUMEN**

Las series analizadas para este estudio, correspondieron a los datos mensuales de la variable precipitación en milímetros (mm) de 1072 estaciones y temperatura media (°C) de 331 estaciones, información suministrada por el IDEAM. Se aplicaron métodos de control y calidad a las series de tiempo entre los que se destacan, la identificación del dato extremo debido a eventos de variabilidad climática, la homogenización estadística, agrupación mediante componentes principales, entre otros. Bajo los algoritmos como el de la Razón de Valores Normal, ARIMA y Gradiente de temperatura, se completaron las series y se validó la consistencia del dato con el test de McCuen para precipitación y el coeficiente de variabilidad para temperatura. La proyección del cambio climático bajo un ensamble multiescenario, se realizó con un método híbrido (dinámico estadístico) y se interpoló la precipitación con IDW y la temperatura media con Cokriging. El clima presente mantuvo la distribución del régimen de lluvias bimodal y monomodal y la temperatura su comportamiento climático. A partir de las proyecciones de cambio climático se hicieron las comparaciones de las distintas normales climatológicas y las proyecciones decadales respecto al periodo de referencia 1971-2000. En el clima presente se encontraron aumentos entre el 10 y el 40% en el cambio de porcentaje de la precipitación para las décadas 1971-1980 y 2001- 2010, mientras que la temperatura no ha tenido mayores cambios con respecto al periodo de referencia, con anomalías entre 0.5 y 1.5°C. La regionalización de la proyección de los escenarios de cambio climático indica que se presentaría, en general para Colombia, una disminución de la precipitación y un aumento de temperatura media para el periodo 2011-2100.

**PALABRAS CLAVES:** Precipitación, cambio climático, Temperatura media.

## **ABSTRACT**

Data analyzed for this study, corresponded to monthly data of variable rainfall in millimeters (mm) of 1072 stations, this information is provided by IDEAM. It applied control and quality methods of the series like confidence percent and lack of data, identification of data due extreme climate variability events; they were homogenized and collective using principal components. Under the value algorithms of normal basis and ARIMA series were completed and validated data consistence with McCuen test. The projected climate change under a multi-scenario ensemble, it was performed using a hybrid method (dynamic statistics) and was interpolated with IDW. The present weather continue with bimodal and monomodal distribution rainfall. It did, from climate change projections, comparisons of different climatologically normal and decade projections regarding the reference period 1971 – 2000. In the present weather were found increasing between 10 and 40 percent in the percentage of precipitation for decades 1971 – 1980 and 2001 – 2010 to the Guajira, north part of Magdalena, Atlántico, Chocó and some areas of eje cafetero and Norte de Santander. Forecast indicates that climate change would be occur a decrease in rainfall between 2011 – 2100 in most of Andina an Caribe region, while for Pacific and departments of Caquetá and Amazonas, there would be a slender increase in precipitation, while in the eastern part of Colombia do not expect significant changes.

**KEY WORDS:** Rainfall, Climate Change, temperature.

## 1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, Colombia es uno de los países más ricos en recursos hídricos. Su clima presenta comportamientos variados, lo más frío en nevados hasta los más cálidos a nivel del mar. La precipitación está regida por el doble paso de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), no obstante, también existe la influencia de los vientos alisios y los eventos de variabilidad climática como El Niño-La Niña, Ondas intraestacionales (MJO), entre otros; al igual que los factores físico-geográficos regionales, como la orografía (IDEAM, 2005). Estos patrones de circulación y de acuerdo con IPCC podrían verse alterados por emisión de gases efecto invernadero.

En la actualidad el cambio climático global es una de las mayores preocupaciones de la humanidad dadas las enormes repercusiones que tiene para la sostenibilidad futura de su desarrollo socioeconómico y ambiental. Este cambio climático comenzó a constatarse hace unas décadas a partir de distintas observaciones que indicaron no sólo un calentamiento global del planeta durante el último siglo, sino también un incremento de condiciones extremas que se traducen en sequías, olas de calor, inundaciones, etc. (Stott et al. & Jones et al., 2004), con la consiguientes incidencias en la salud humana, la seguridad alimentaria, el acceso a los recursos naturales trayendo desplazamiento de la población para la adquisición de los mismos, así como por efectos de los eventos extremos, entre otros. A partir de estos hechos, la comunidad científica ha realizado un gran esfuerzo para desarrollar modelos que permitan simular el sistema climático y que sean capaces de reproducir el cambio observado para, finalmente, determinar los factores que contribuyen al mismo y se analicen en los distintos escenarios socio-económicos de emisión que se utilizan para forzar los modelos en el futuro. De acuerdo con IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático), un escenario de cambio climático es una respuesta del clima bajo un supuesto de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera; por lo tanto, dependiendo del escenario analizado, se admite un cambio en los patrones meteorológicos distinto, inducido por una mayor o menor emisión de gases a lo largo del siglo XXI (Jones et al., 2004). Los escenarios de cambio climático en

Colombia, por ser un país con insipiente desarrollo industrial, no emite una cantidad de gases de efecto invernadero tal que se conviertan en factor decisivo para la afectación de la composición de la alta atmósfera del planeta, sin embargo, se prevé que el País sea una de las zonas más afectadas del globo con el cambio climático, en especial, los Andes colombianos (Oviedo, B., 2010).

De acuerdo a lo anterior, es necesario un estudio para averiguar el posible cambio de precipitación y la temperatura media, parámetro seleccionado por ser un elemento climatológico que caracteriza el estado del tiempo atmosférico (Montealegre, E., 2009) en Colombia para el período 2011-2100 frente al clima de referencia 1971-2000, llevando a cabo una metodología similar a la que IDEAM realizó para elaborar la Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de la Las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (Ruiz, F., 2010). Se presentan dos metodologías para el relleno de datos ausentes, enfocadas hacia su uso en series de tiempo geo-estadística. Para ello, en una primera etapa se agruparon la estaciones por descomposición en componentes principales y en una segunda etapa se complementaron las series de tiempo mensuales con metodologías como la Razón de los Valores Normales, el cual utiliza datos de las estaciones cercanas y el modelo Arima, cuando el proceso se debe hacer con la información de la misma estación, para temperatura media, se

utilizó el Gradiente de Temperatura, que tuvo en cuenta la elevación de la estación a completar. El proceso de complementación se validó mediante el Test de McCuen para precipitación y el coeficiente de variación para temperatura media, obteniendo índices de confiabilidad sobre las metodologías, para ambos parámetros.

A partir de la complementación de las series, estas se utilizaron como materia prima (Clima presente), para generar las proyecciones de cambio climático a partir de 3 escenarios de emisión de gases de efecto invernadero con base en los datos disponibles de los modelos globales de circulación general atmosférica de baja resolución espacial suministrados por el Centro Hadley de Reino Unido; los cuales tienen la ventaja de representar bien el clima de referencia de Colombia como son el HadCM3 y el ECHAM5 (Rodríguez; A., 2010); dichos datos de los modelos globales, se utilizaron como condiciones de frontera e iniciales para obtener resultados en alta resolución usando el modelo PRECIS (Providing Regional Climates for impact Studies). El ajuste a nivel de estación, se realizó con la técnica denominada Factor de Cambio (Anandhi et al., 2011), la cual establece el coeficiente de ajuste entre los datos simulados de clima presente del modelo global ERA40 con las observaciones de IDEAM para luego ser aplicados a los escenarios proyectados de cambio climático (en este caso, del mismo modelo regional). Dichos coeficientes, son aplicados al clima de referencia en forma multiplicativa para la precipitación y aditiva para temperatura media, con el fin de obtener la proyección de cambio climático a nivel local. Finalmente, se obtuvo el cambio de porcentaje de la precipitación y las diferencias de la temperatura media, mes a mes, para 2011-2100 indicando que se presentaría una disminución de la precipitación entre 2011-2100 en la mayor parte de las regiones Andina y Caribe, mientras que para el Pacífico y los departamentos de Caquetá y Amazonas, se presentaría un aumento ligero de precipitación y en la parte oriental de Colombia no se espera cambios significativos. Por su parte la temperatura media presentaría incrementos para el periodo 2011-2100 entre 0.5°C y 1.5°C en los primeros años, llegando a anomalías de hasta 2.5°C en casi todo el territorio nacional para el 2031-2040, que puede llegar incluso a 5.5°C para la región Andina, hacia la década 2091-2100.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Área de estudio

Colombia está localizada entre las coordenadas  $12^{\circ} 30' 46''$  N y  $4^{\circ} 13' 30''$  S y  $66^{\circ} 50' 54''$  W y  $79^{\circ} 01' 23''$  W (Fig.1), limita al este con Venezuela y Brasil, al sur con Ecuador y Perú, al norte con el mar Caribe, al noroeste con Panamá, y por el oeste con el Océano Pacífico. Geológicamente, Colombia hace parte del Cinturón de Fuego del Pacífico. El territorio nacional se encuentra dividido en 5 regiones naturales, Caribe, Pacífico, Andina, Orinoquía y Amazonía, adicionalmente la insular perteneciente a las islas de San Andrés y Providencia.

### 2.2 Datos utilizados

Las series analizadas para este estudio, correspondieron a los datos mensuales de las variables precipitación en milímetros (mm) y temperatura media en ( $^{\circ}$ C) de 1072 y 331 estaciones respectivamente (Fig.1), información suministrada por el IDEAM. El periodo analizado para ambas variables, correspondió a 1971-2010, cumpliendo con el mínimo de extensión del registro (30 años), recomendado por la Organización Mundial de Meteorología (OMM, 1989), para obtener estadísticas confiables.

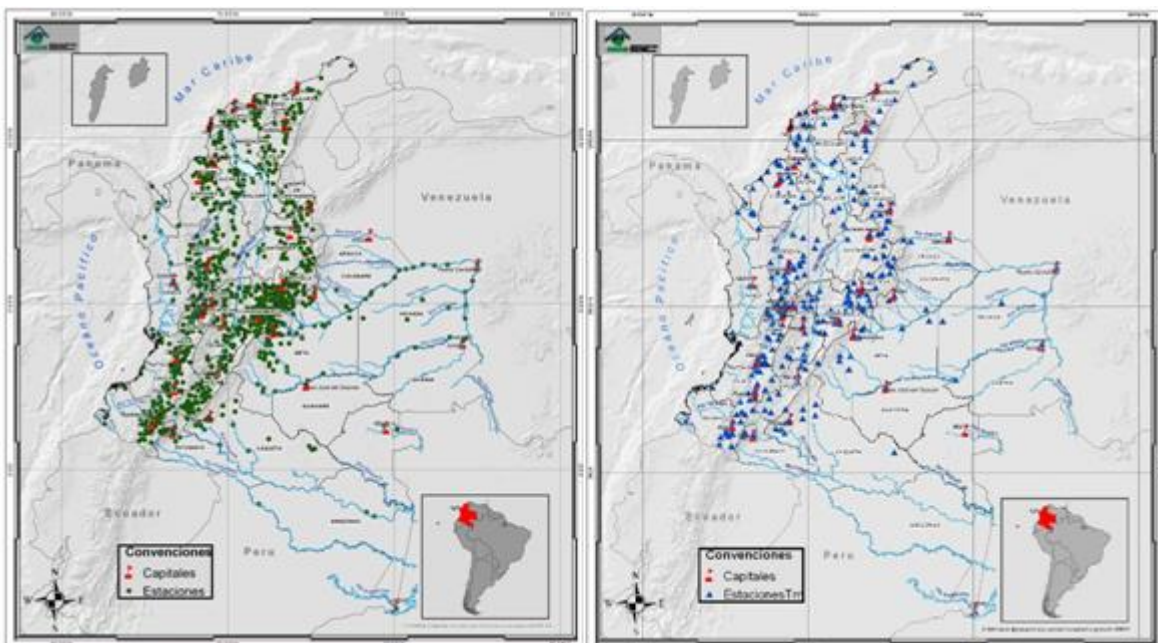


Figura 1. Distribución espacial de las estaciones empleadas en este estudio, a la izquierda (precipitación), a la derecha (temperatura media)

Para la proyección de cambio climático, se tomaron las condiciones iniciales de los Modelos Globales MPIECH5 (ECHAM5) y UKHADCM3, para los escenarios A2, B2 y A1B, en el periodo 2011-2100. El clima presente, de referencia, fue a partir de ERA 40 1971-2000.

## 2.3. Metodología

Para las proyecciones de cambio climático de las diferentes décadas entre el 2011 y el 2100 y normales climáticas 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100, respecto a 1971-2000 en precipitación, fue necesario en primer lugar hacer un tratamiento a los datos que consistió en hacer homogeneidad, agrupamiento y complementación de las series seleccionadas; mediante el control de calidad de datos, análisis de componentes principales y el uso de metodologías como el valor de la razón normal, ARIMA (Modelo auto-regresivo integrado de media móvil) y el gradiente de temperatura. Se realizó una validación de los datos completados por medio del test de McCuen (Precipitación) y el coeficiente de variabilidad (Temperatura media). En segundo lugar, se realizó la simulación del clima presente y el proyectado mediante una metodología híbrida, dinámico- estadístico. El downscaling dinámico se realizó con el modelo PRECIS, que se encuentra validado en clima presente, por el IDEAM (Ruiz, F., 2010) y el factor del cambio como método estadístico. Los resultados se interpolaron con IDW para precipitación y Cokriging para temperatura media en ArcGis V10 para los análisis finales.

### 2.3.1 Tratamiento de la información

Las series de tiempo se trabajaron para el período 1971-2010; para cada serie se contaron con 480 datos mensuales y se trabajó por porcentaje de datos existentes del orden del 90, 85, 80 y 70% para agrupar según la ausencia de datos (Ver Tabla 1). En regiones como el oriente colombiano, se permitieron porcentajes hasta del orden del 65% de la serie, debido a la poca densidad de estaciones y la calidad de las mismas, lo cual no permitió cumplir con lo descrito por la OMM (1989), que establece que las normales climatológicas estándar para un mes de calendario sólo se deben calcular si se dispone de valores de por lo menos 25 de los 30 años, con no más de 2 años consecutivos sin datos.

Tabla 1. Porcentaje de datos para agrupar las series según su ausencia

Confianza para la serie (Datos)	90%	85%	80%	70%	60%	50%
Conteo de datos por serie	432	408	384	336	288	240
Conteo de datos faltante por serie	48	72	96	144	192	240
Total de datos por estación	480	480	480	480	480	480

Teniendo en cuenta las sugerencias de la OMM (2007), se realizaron las comprobaciones efectuadas para determinar la calidad de una observación que consistieron en:

- Comprobaciones sintácticas (la temperatura del aire debe ser una cifra de no más de un decimal).
- El valor de la precipitación fuese mayor a 0 mm.
- 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 espacial (por ejemplo, no se excedieran las diferencias plausibles entre los valores de temperatura de una estación y los de estaciones vecinas).

A través de 3 desviaciones estándar ( $3\sigma$ ), se examinaron las series de tiempo de los datos para identificar si existían valores atípicos, con ello se buscó identificar si los datos correspondían a: un evento extremo, un evento de variabilidad climática (El Niño/La Niña), un error digital o un error de la estación; de no ser así, se despreció el dato.

### 2.3.2. Homogeneidad de las series

La densidad de las estaciones dentro de una misma región hidroclimática no garantiza que presente un mismo comportamiento climatológico estacional, por tal razón, se procedió a identificar las series que presentaban un comportamiento climático homogéneo. Para precipitación (régimen de lluvias monomodal y bimodal) y temperatura (por altura) que mantuvieran su variabilidad. Este método permitió agrupar las estaciones por medio de una regionalización estacional, con el objetivo de evitar la excedencia en los datos calculados al momento de realizar el proceso de complementación de series.

### 2.3.3 Análisis de componente principales

El análisis de componentes principales utiliza la información de estaciones correlacionadas al descomponer la información en “patrones” que capturan y separan la variabilidad de las series, donde se espera que recupere los efectos de escala mayor y que se pierdan los de la escala menor (Alfaro & Soley, 2008). Para este proceso se utilizó el software Systat, y se escogió las estaciones según el coeficiente de significación, usando solo aquellas que cumplieran una correlación mayor a 0.6 y además formaran un conjunto de más de seis estaciones (Richman & Lamb, 1985).

Para aumentar la correlación entre los factores y minimizar en número de variables que tienen “saturaciones” altas en cada factor, se llevó a cabo una rotación ortogonal de los ejes factoriales mediante el método del varimax, desarrollado por Kaiser (1958). El objetivo de la rotación varimax, es conseguir que la correlación de cada una de las variables se lo más próxima a 1 con sólo uno de los factores y próxima a cero con todos los demás.

### 2.3 4 Complementación de series

**Razón de los valores normales:** Cuando se desconoce el valor de la precipitación de un determinado mes para una estación meteorológica dada pero que, se conocían 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, la ecuación utilizada fue la siguiente (Montealegre, E., (1990) & Monsalve, G., (1995)).

$$P_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{N_x}{N_i} P_i \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

$n$ : 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  $n$ .

**Modelo Arima:** Se aplicó la metodología desarrollada por Gómez & Maravall (1986) la cual tiene en cuenta las fuentes de variabilidad de una serie de tiempo como la tendencia, la estacionalidad, la ciclicidad y las posibles intervenciones de carácter exógeno que afecten los valores de la variable aleatoria que constituye el proceso (cambio de equipo de medición, modificación de datos, entre otros). Para la construcción del modelo ARIMA se examinó en la serie de tiempo la condición de estacionalidad y, en caso de ser necesario, se indujo dicha condición para la identificación del modelo. También se analizó la estacionalidad en la serie de tiempo con respecto a la varianza, a la presencia de tendencia, a cambios de nivel en la media y la existencia de una componente estacional. Se identificó el modelo mediante la definición de los órdenes de diferenciación simple y estacional y de los polinomios autorregresivos y de promedios móviles. Posteriormente se estimaron los parámetros de los polinomios y se examinó su significancia estadística utilizando el estadístico T-Student a un nivel de confianza del 95%.

**Gradiente de la Temperatura:** La temperatura del aire disminuye con la altitud; esto ocurre debido al aporte del calor latente liberado en la condensación del vapor de agua de la atmósfera de una región donde permanentemente hay un alto contenido del mismo. La razón del cambio de la temperatura por unidad de distancia, tienen dos gradientes, el adiabático de 10.0 C/Km (en aire seco) y el pseudoadiabático (aire húmedo) es 6.5 C/Km. (Reyes, C., 2002)

Para este estudio se tuvo en cuenta que la temperatura en una atmósfera real disminuye con la altura a una razón de 6.5°C cada kilómetro aproximadamente, y se clasificaron las estaciones por su elevación respecto al nivel del mar, tomando como temperatura de referencia la información de la estación con el menor porcentaje (%) de datos faltantes, llevando a cabo la complementación con la siguiente ecuación.

$$T_x = T_R - \left(\frac{0.65}{100}\right)\Delta Z \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde

$T_R$ : Temperatura de referencia y  $T_x$  Temperatura desconocida (°C)

$\Delta Z$ : Diferencias de altura (m).

### 2.3.5 Verificación del complemento de series de tiempo

**Precipitación (Test de McCuen):** Cuando las medias anuales de las series observadas y la serie complementadas difieren en más del 10%, queda en decisión del analista si la acepta o la rechaza. No obstante, McCuen dice que si este valor es superado, la complementación podría



ser dudosa. Una vez obtenido este valor, se espacializó la densidad de estaciones a nivel nacional para identificar la calidad de la complementación; para este caso, la clasificación se hizo según el conteo del número de errores anuales que presentaba la serie en los 40 años. Los rangos fueron: Muy buenas (color verde) entre 0 y el 33 %, normales (amarillo) 33 y 66% y malas (rojo) 66 y 100% (ver Figura 4).

**Temperatura media:** Para fines de validación, se utilizan normalmente ciertas mediciones estadísticas que ayudan a establecer si el método se encuentra dentro de un parámetro aceptable. Para este estudio, se evaluó la variabilidad de las series (con vacíos y completas) mediante el coeficiente de variación anual y se verificó si el valor calculado correspondía a la variabilidad de la serie original por medio de su diferencia.

Una serie presenta más variabilidad cuanto más grande sea su desviación estándar en relación a su media aritmética, con lo que series que presenten coeficientes de variación superiores a 0,5 pueden considerarse series con una elevada variabilidad (Barrera. A., 2004).

### 2.3.6 Generación de escenarios de Cambio Climático

**Modelos Globales utilizados:** Los modelos climáticos Globales o también denominados Modelos de Circulación General (MCGs), son las herramientas disponibles para simular la respuesta del sistema climático global al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero. El IDEAM realizó una evaluación de 20 MCG utilizados en el cuarto informe de evaluación (AR4) del IPCC. En esta evaluación se analizó la capacidad de los mismos para representar el clima de referencia dado por el ERA40 y la variabilidad climática interanual de Colombia (Rodríguez, A., 2010). Los resultados muestran que los modelos que mejor tienen un comportamiento para Colombia son, entre otros, el MPIECH-5 (ECHAM5) y el UKHADCM3, modelos que se utilizaron en la presente investigación.

**Escenarios de emisión empleados:** Un escenario de cambio climático es una representación del clima bajo una condición de gases de efectos invernadero basado sobre un conjunto de supuestos acerca de factores externos socio-económicos y tecnológicos. En este sentido los escenarios SRES utilizados en este trabajo fueron:

A2: orientado hacia el desarrollo regional con una población en constante crecimiento, el crecimiento económico y tecnológico es más lento que en otros escenarios.

A1B: Rápido crecimiento económico, con una población mundial en su máximo auge hacia mediados de siglo, se destaca por la utilización equilibrada de todo tipo de fuentes de energía.

B2: Predomina la sostenibilidad Económica, social y ambiental, la población aumenta a un menor ritmo que A2, con un nivel de desarrollo económico intermedio.

**Escenarios regionales de cambio climático:** El IDEAM, en su labor de generar proyecciones de cambio climático para Colombia, utilizó una técnica dinámico-estadística; este método es utilizado para acoplar las escalas espaciales de los modelos de circulación global (MCG) con las de circulación regional y local. Para realizar el downscaling dinámico se utilizó el

modelo regional PRECIS<sup>1</sup>, con una resolución espacial de 25kmx25km. Para obtener la escala local, se realizó la comparación entre el dato de la estación con el punto de la grilla más cercana que ofreció el modelo (Ruiz, F., 2010) y finalmente, se ajustó su resultado usando el Método del Factor de Cambio a la escala local.

Existen diferentes metodologías de factor de cambio para estimar futuros escenarios climáticos, y no existen directrices claras disponibles en la literatura para decidir qué metodologías son los más adecuados para las diferentes aplicaciones (Anandhi et. al., 2011). En esta investigación, para calcular el factor de cambio, inicialmente, se obtuvieron los valores promedios del periodo de referencia 1971-2000, (ver ecuación 3) y de cambio climático bajo los distintos escenarios dados por PRECIS, (ver ecuación 4):

$$\overline{RCM}_b = \frac{1}{N_b} \sum_{i=1}^{N_b} RCM_{bi} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\overline{RCM}_f = \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} RCM_{fi} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde RCM<sub>bi</sub> y RCM<sub>fi</sub> representan los valores de clima presente y futuro respectivamente, y N<sub>b</sub> y N<sub>f</sub> son la cantidad de datos en los dominios temporales del clima presente y escenarios futuros. A partir de estos resultados se calcularon los factores de cambio multiplicativo para la precipitación, (ver ecuación 5) los factores de cambio aditivo para la temperatura (ecuación 6):

$$CF_{mul} = \overline{RCM}_f / \overline{RCM}_b \quad \text{Ecuación 5}$$

$$CF_{add} = \overline{RCM}_f - \overline{RCM}_b \quad \text{Ecuación 6}$$

Finalmente, se reescalaron los valores del futuro aplicando los factores de cambio: (ver ecuaciones 7 y 8)

$$LS_{addi} = OBS_i + CF_{add} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$LS_{mul} = OBS_i \times CF_{mul} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde OBS<sub>i</sub> son los valores observados de clima presente de la estación meteorológica en el paso de tiempo, y LS<sub>add</sub> y LS<sub>mul</sub>, son los valores escalados a nivel local de los escenarios de cambio climático usando la formulación aditiva y multiplicativa respectivamente.

### 2.3.7. Cálculo de incertidumbres

Los datos nacionales de las anomalías tanto para precipitación como para temperatura, se dividieron por regiones naturales (Caribe, Pacífico, Andina, Orinoquía y Amazonía) y se

calcularon los valores mínimos, medios y máximos (rojo, azul y verde, respectivamente) para posteriormente graficar las proyecciones de las variables e identificar su comportamiento a través de las décadas (1971-2100) a nivel regional.

### 2.3.8. Interpolación de escenarios

Los métodos de interpolación presentan diversas características, para interpolar, existen varios métodos en ArcGis, en especial tres algoritmos en el módulo Spatial Analyst, IDW, Spline y Kriging. Estos algoritmos han sido ensayados para estudios de modelos digitales, climatológicos y de relieve (Solis, Z & Florez J.G, 2005). Autores como (Ariza, F.J., 2002) comentan que ningún método de interpolación es mejor que otro. Para este trabajo, los resultados de precipitación fueron espacializados mediante el método de interpolación de IDW, bajo la asunción de que cada punto posee una influencia local que disminuye con el inverso de la distancia. De esta manera, el método ponderó con mayor fuerza a los puntos cercanos a la celda proceso y con menor intensidad sobre aquellos ubicados a mayor distancia.

Esta interpolación se apoya en el concepto de continuidad espacial, con valores más parecidos para posiciones cercanas que se van diferenciando conforme se incrementa la distancia. El uso de este algoritmo ha sido empleado en la representación de variables con continuidad espacial (Canto, C. del, 1998: 368; Siabato, W & Yudego, C., 2004:13). Es el método menos complejo de los tres pero con el de mejor resultados. Su utilidad básica es la identificación de patrones generales de comportamiento así como su comparación espacial con otras regiones de similar extensión. En ciertos casos, algunos mapas pueden presentar los denominados “ojos de buey”, los cuales se ha preferido no eliminar, luego de su respectiva validación, precisamente porque identifican en la precipitación comportamientos locales que en casos particulares requerirán de estudios más detallados.

Para el caso de la temperatura media, se interpolo mediante el método Cokriging basado con el Dem (Digital Elevation Model) de 90m (empleado por IDEAM, para resultados oficiales). Esta interpolación utiliza la información conjunta sobre diferentes tipos de variables, para este caso la temperatura respecto a la elevación del Dem. La interpolación toma como variable de interés el Z1, de ella genera la correlación espacial para Z1 junto a las correlaciones cruzadas entre Z1 y los valores a espacializar, para este caso temperatura media (según el nivel del Z1), mejorando así las predicciones generadas en la interpolación. Cokriging puede utilizar semivariogramas o covarianzas (las formas matemáticas para expresar autocorrelación), cross-covarianza (la forma matemática utilizada para expresar la correlación cruzada) para generar la interpolación, eliminando valores sobrecalculados en la predicción de la interpolación, lo cual minimiza el error al realizar el Cokriging sobre el mapa (ESRI, 2010).

La escala de los resultados finales que se presentan en este trabajo, es la que actualmente utiliza el IDEAM para comparar las alteraciones de la precipitación y temperatura media con respecto a los valores históricos.

### 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Procesamiento de la información

Los resultados de clima presente obtenidos en la distribución espacial anual de la precipitación (mm), se compararon con el Atlas Climatológico de Colombia (IDEAM, 2005), encontrando comportamientos climáticos similares. Algunas diferencias se deben al número de densidad de estaciones con que contaron los dos estudios. Primero, el Atlas conservó todas las estaciones del IDEAM sin realizárseles algún tipo de tratamiento, mientras que este trabajo, sólo se contó con estaciones de calidad en sus series; en segundo lugar, el periodo analizado del Atlas climatológico fue 1961-1990 y en este trabajo el periodo de referencia fue 1971-2000.

Con el análisis de series de tiempo se encontraron datos atípicos, correspondientes a eventos de variabilidad climática y otros a errores aleatorios. En la figura 2 y 3, se muestra un ejemplo para algunas estaciones de precipitación (box plot) y temperatura media (series con tendencia) respectivamente. Lo propio se realizó para las series que se completaron, hallando que éstas conservaron de las series originales su variabilidad, homogeneidad y los momentos estadísticos de primer orden.

Completando lo mencionado anteriormente, el análisis de componentes principales realizado mediante la rotación del varimax, mejoró la correlación entre las series de tiempo, permitiendo tener mayor grupo de estaciones con un solo factor y muy cercano a uno, cumpliendo con lo establecido por Richman & lamb (1985).

Con el test de McCuen, se encontró para las 1072 estaciones empleadas para este estudio que, el 98,2% de las estaciones evaluadas, pertenecen a la clasificación muy buena, 1,6% normal y 0,3% malas. En la Figura 4, se muestran las estaciones de acuerdo a la clasificación de los intervalos.

Cabe aclarar que se mantuvieron las estaciones identificadas en rojo de la Figura 4 para los análisis finales, debido a que son pocas las estaciones meteorológicas ubicadas en esta región hidroclimatológica (Sinu, San Jorge, Bajo Nechí y Urabá) y se necesitan para realizar la interpolación en el momento de espacializar. Este método permitió dar un grado de confianza, a la información trabajada y representada como clima presente.

Por su parte, al comparar el coeficiente de variación de la temperatura media para la serie original y la complementada (Fig. 5), se observa que está última aunque tiene mayor variabilidad, hay poca dispersión en los datos lo que indica que mantienen un comportamiento similar y hay buena fiabilidad en el proceso de complementación. Igualmente, la magnitud del coeficiente siempre fue inferior a 0,5 °C en ambas series, permitiendo mantener las estaciones que están más dispersas en el gráfico.

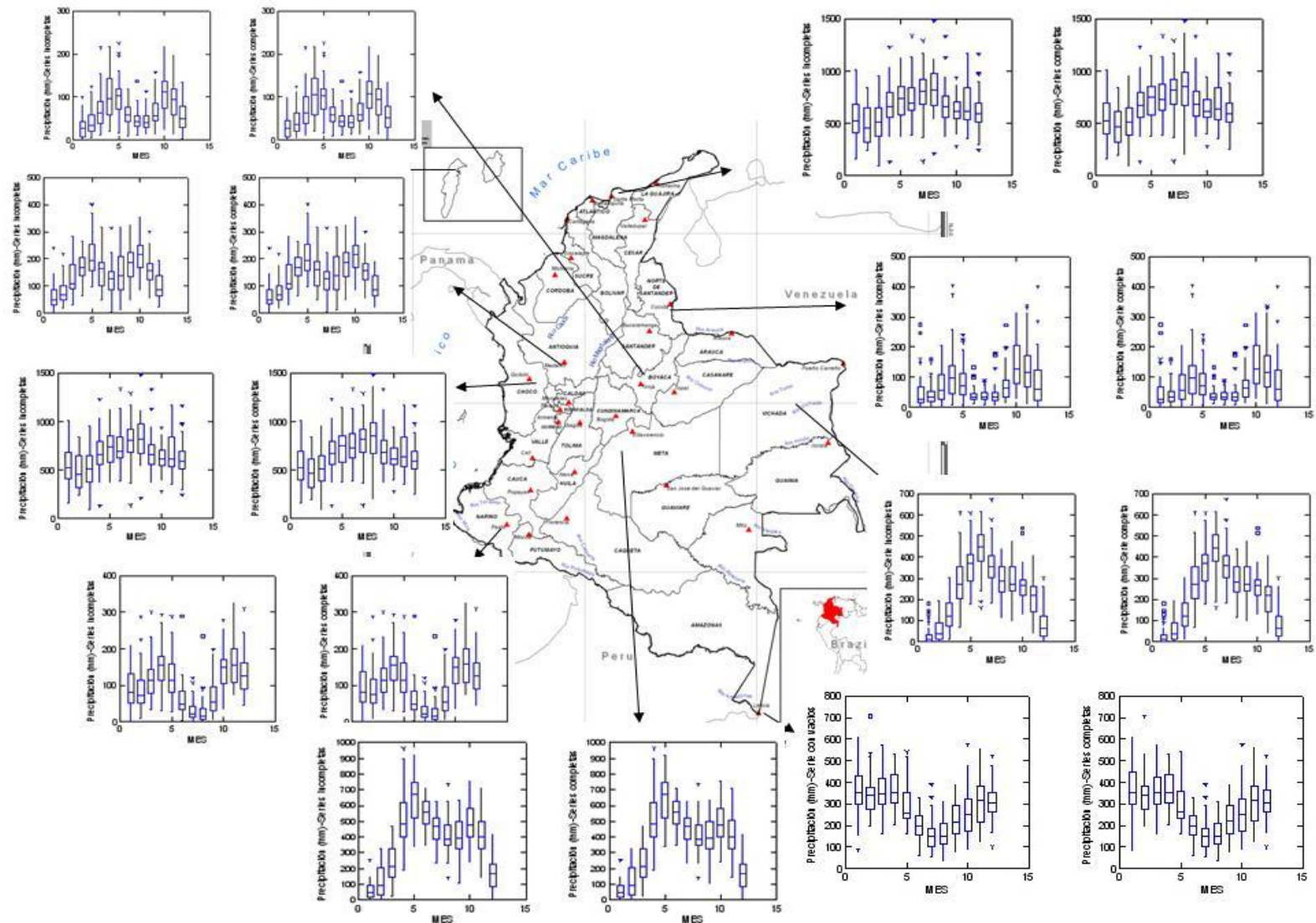


Figura 2. Ciclo estacional de la precipitación para algunas estaciones meteorológicas del país. A la izquierda datos originales y a la derecha datos complementados. Como se observa se mantuvo la estadística descriptiva.

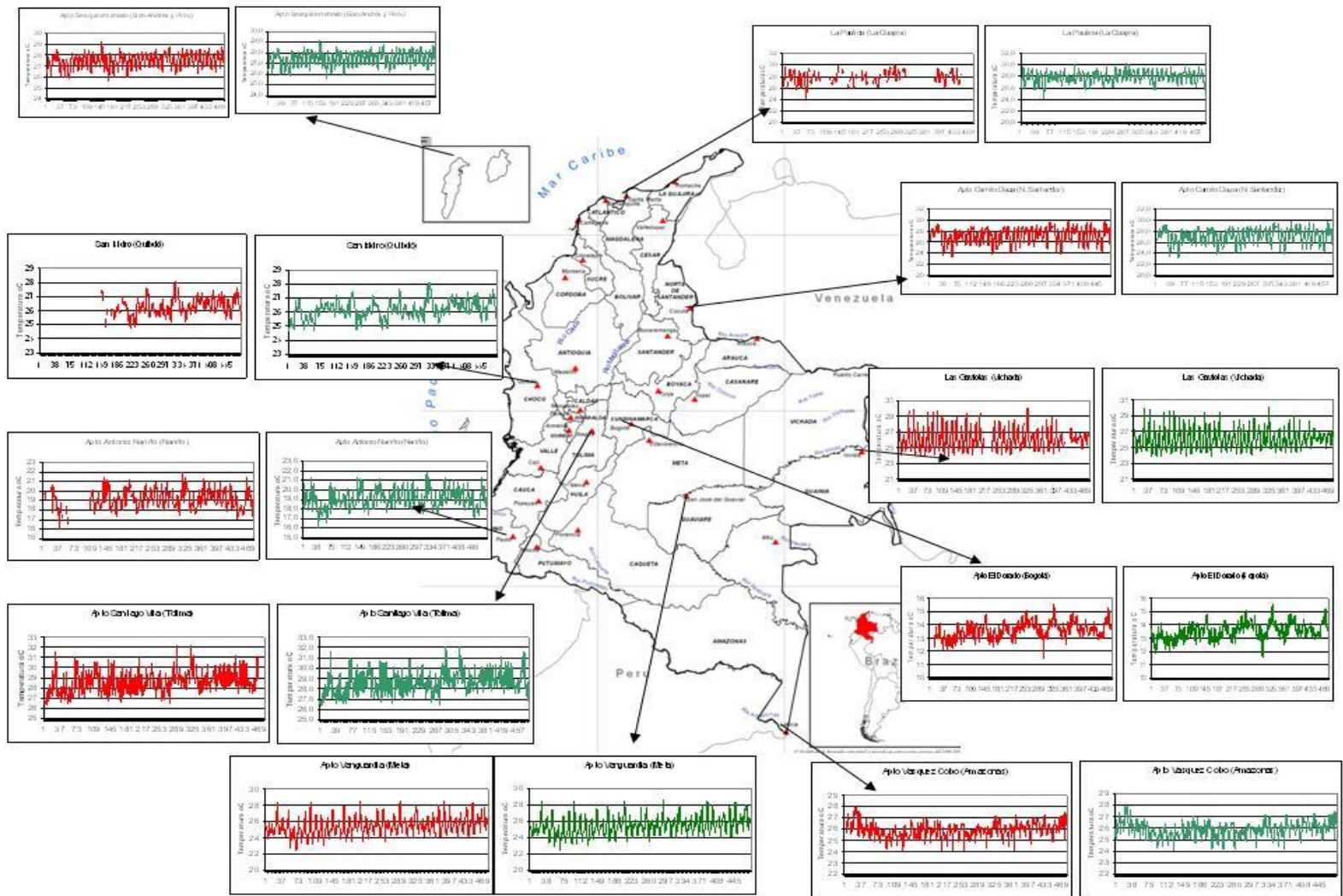


Figura 3. Variabilidad climática de temperatura media de algunas estaciones meteorológicas del país. A la izquierda datos originales (en rojo) y a la derecha datos complementados (en verde). Como se observa se mantuvo la estadística descriptiva.



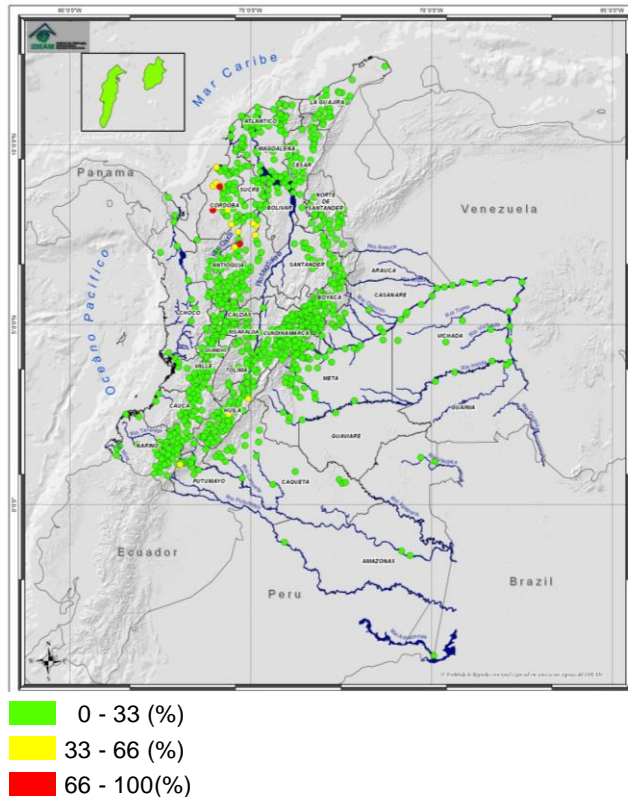


Figura 4. Distribución espacial de los resultados obtenidos en el Test de McCuen

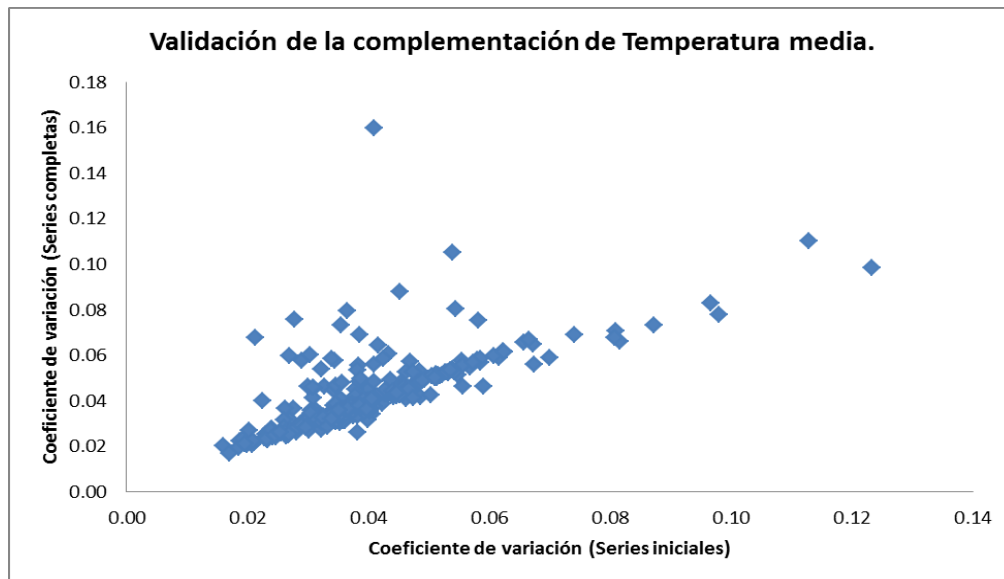


Figura 5. Paralelo del coeficiente de variabilidad de las series iniciales y completas y su clasificación de acuerdo al valor del coeficiente

### 3.2 Análisis del clima presente

El análisis del patrón general del comportamiento de la precipitación sobre Colombia para clima presente y con base a las 1072 (precipitación) y 331 (temperatura media) estaciones es el siguiente:

**Precipitación:** Las menores lluvias se presentan en la Alta Guajira con totales de 500 mm y menos; los núcleos máximos se han registrado en la Región Pacífica con totales anuales de más de 9000 mm. La región Caribe registra lluvias entre 500 y 4000 mm con un gradiente muy definido en dirección Sur. La región Andina posee una gran diversidad pluviométrica, con lluvias relativamente escasas (hasta 500 mm), para el sur del Huila y el nororiente del Tolima (límites con Cundamarca); a lo largo de la cordillera oriental entre 1000 y 1500 mm, en los valles del Alto Magdalena y Alto Cauca desde 2500 hasta 3000 mm, y núcleos máximos (de 5000 a 7000 mm) en las cuencas del Medio Magdalena y Medio Cauca. En la Orinoquia predominan las lluvias altas de 2000 a 3500 mm en su parte central y Oriental, aun cuando hacia el piedemonte pueden observarse hasta 7000 mm y por el contrario en el extremo Norte de Arauca las lluvias pueden ser menores de 1500 mm. La mayor parte de la Amazonia recibe entre 4000 y 5000 mm por año, mientras que en la Región Pacífica se reciben entre 3000 y 9000 mm. Sin embargo, a nivel regional se presentan grandes desviaciones respecto a este comportamiento, en razón de la accidentada topografía y/o a factores de mesoescala ya reseñados. A nivel mensual, este patrón se conserva relativamente constante, variando únicamente algunas cantidades (Fig. 6).

Como características predominantes de la distribución durante el año se encuentran régimen bimodal, para la mayor parte de la región Andina y de la región Caribe con excepción de la región del Bajo Nechi, parte de la cuenca del río Sinú y sectores de la vertiente oriental de la cordillera central a la altura de Samaná (Caldas) y régimen monomodal para la mayor parte de la Orinoquia y Amazonia colombiana y los sectores mencionados anteriormente como excepciones en la parte andina (Fig. 7). La región Pacífica no presenta una tendencia definida y muestra escasa diferencia entre las cantidades aportadas por cada mes en particular. □ En los valles interandinos de la Cuenca Magdalena y Cauca se aprecia que hacia el sur se hace más marcada la temporada seca de mitad de año y es más lluviosa la temporada seca de principios de año. Lo contrario sucede hacia el norte de dicha cuenca, al punto de que en el medio y bajo Cauca, la temporada seca de mitad de año casi tiende a desaparecer. En la cuenca Magdalena no es tan marcado este efecto latitudinal, pero se nota asimismo la importancia que adquiere la temporada seca de principio de año. Aproximadamente al sur de los 2° N, el régimen comienza a invertirse, hasta el punto de que en el extremo sur de Colombia la temporada menos lluviosa tiene lugar a mediados de año (Fig. 7).



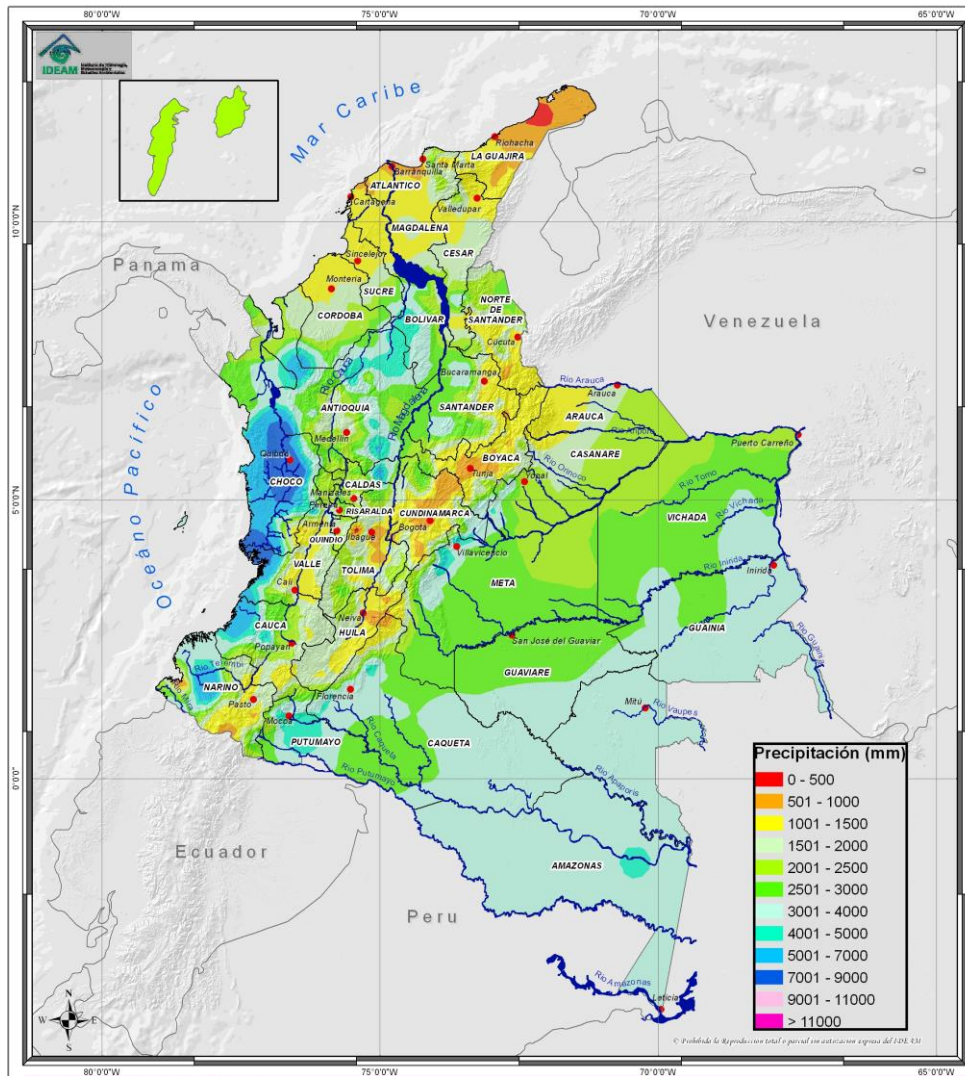


Figura 6. Distribución espacial de la precipitación (mm) para Colombia, periodo 1971-2000

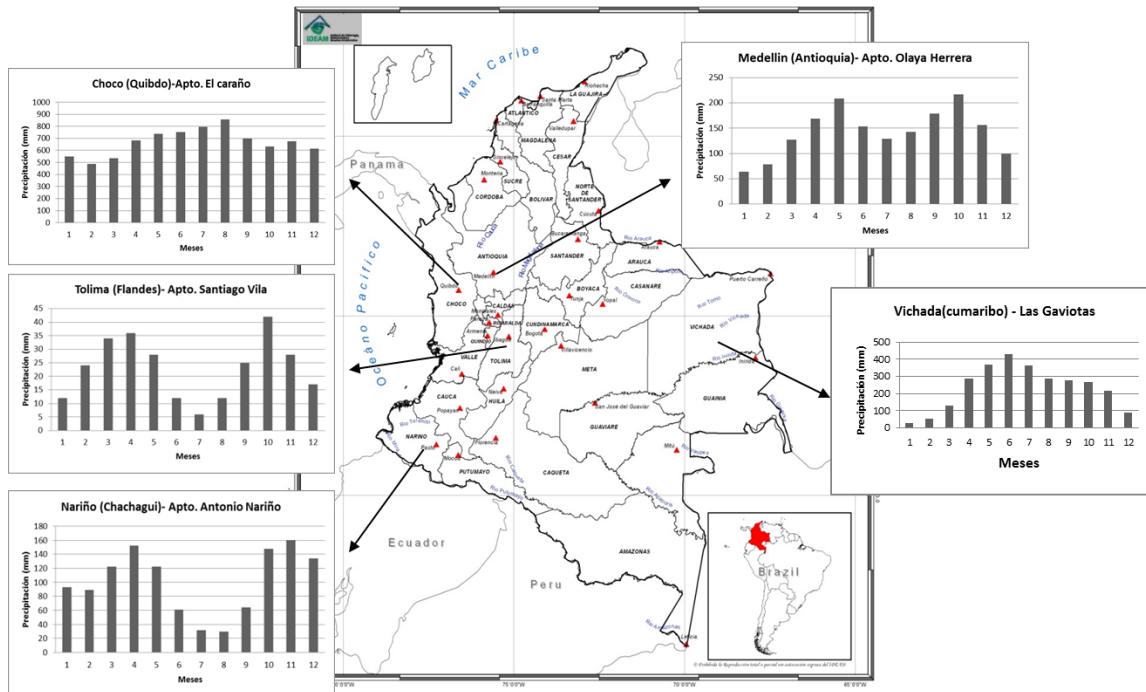


Figura 7. Régimen de la precipitación para algunas zonas de Colombia.

**Temperatura media:** Para la región del Caribe, la temperatura media del aire presenta un comportamiento entre 27 y 34 °C en sectores como la Alta y Media Guajira, en la parte central del Cesar y Bolívar y en el sur de los departamentos de Magdalena, Atlántico y Sucre, en el resto de la región, exceptuando el pico de la Sierra Nevada de Santa Marta y sus alrededores, las temperaturas medias oscilan 26,6 y 28,5 °C. En la región andina, los valles de los principales ríos como el Magdalena, el Cauca, el Patía y el Sogamoso, registran los valores más altos de temperatura, entre 23 y 26°C, mientras que en los altiplanos de Cundinamarca, Boyacá y Nariño, la zona montañosa del centro de Antioquia, Cauca y el Viejo Caldas, se presentan valores bajos, entre 12 y 16°C. En la alta montaña se registran valores inferiores a 8°C.

En la región Pacífica, se encuentran temperaturas medias comprendidas entre 22 y 28°C. En forma general, las temperaturas son relativamente más bajas que para otras regiones del país con estas mismas elevaciones, dado que es la región más lluviosa del país. El Pacífico Sur presenta temperatura media del aire casi constante a lo largo del año con valor promedio de 25°C, al igual que las temperaturas extremas medias que fluctúan entre 22°C y 28°C. En la Región de la Orinoquía no existen accidentes orográficos notables, siendo bastante homogénea la distribución de temperatura la cual presenta valores entre 24 y 28°C. Por su parte, la región de la Amazonía, se caracteriza por tener una fisiografía muy homogénea y por tanto las temperaturas poco varían espacialmente. En la mayor parte del territorio de la Amazonía se registran valores entre 24 y 28°C. Hacia el piedemonte los registros oscilan entre 12 y 20°C, en dependencia de la elevación.

Para el territorio colombiano, la temperatura sigue un patrón muy determinado por la altitud, en la Figura 8 se presenta el comportamiento de la temperatura para el territorio nacional.

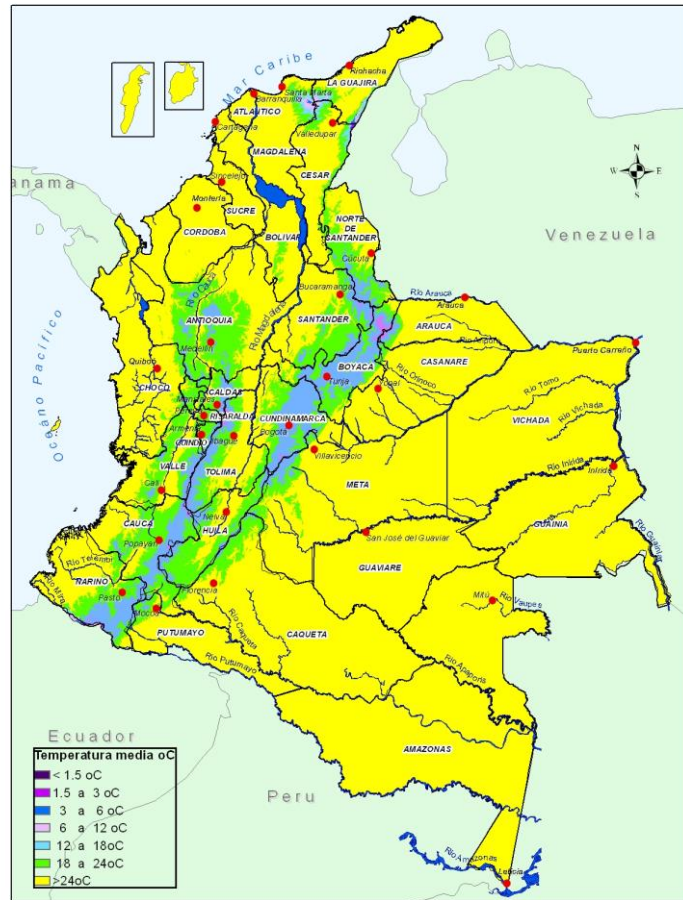


Figura 8. Distribución espacial de Temperatura media (°C) para Colombia, periodo 1971-2000

Respecto a las particularidades en el comportamiento de la temperatura media para algunas regiones de Colombia (Fig 9), en la Sierra Nevada de Santa Marta y Cuenca del Cesar, tiene un comportamiento bastante uniforme, siendo los meses más cálidos los de finales y a principios del año. La temperatura del aire para el Litoral Central presenta un comportamiento muy regular a lo largo del año, los meses más cálidos son mayo a agosto; mientras que principios y finales del año las temperaturas son ligeramente menores por efecto de los vientos Alisios.

En general para la región Andina se presenta una un régimen bimodal en su temperatura; para regiones como el Alto Magdalena, Medio Cauca, Alto Patía y la Montaña Nariñense, las temperaturas del aire en estas zonas del país son bastante cálidas y los primeros meses de cada semestre se distinguen por ser ligeramente más cálidos que los otros

meses. En el Alto Cauca presentan un régimen bimodal a lo largo del año, siendo los meses de enero a marzo y de julio a septiembre cuando se presentan las temperaturas medias más altas. La Sabana de Bogotá, específicamente en la altiplanicie, la temperatura media del aire es inferior durante los periodos diciembre a marzo y de julio a septiembre donde pueden presentarse la ocurrencia de heladas. En el sector del Catatumbo, las temperaturas medias presentan un comportamiento monomodal, con registros más altos a mediados de año, mientras que las temperaturas extremas tienden a presentar sus valores absolutos en los primeros meses.

Por su parte, el Pacífico Norte y Central, el régimen de las temperaturas medias es muy uniforme a lo largo del año. En el Piedemonte Llanero, los primeros y últimos meses del año tienen la particularidad de presentar las temperaturas más elevadas, mientras que los de mediados de año presentan los valores más bajos. La temperatura del aire para la Orinoquía Oriental presenta un comportamiento monomodal, con los valores más bajos en los meses de mayo a septiembre y los más altos a principios y a finales del año. En la región Amazónica, las temperaturas medias del aire presentan una marcha casi uniforme a lo largo del año, con tendencia a registrar los valores más bajos a mediados de año.

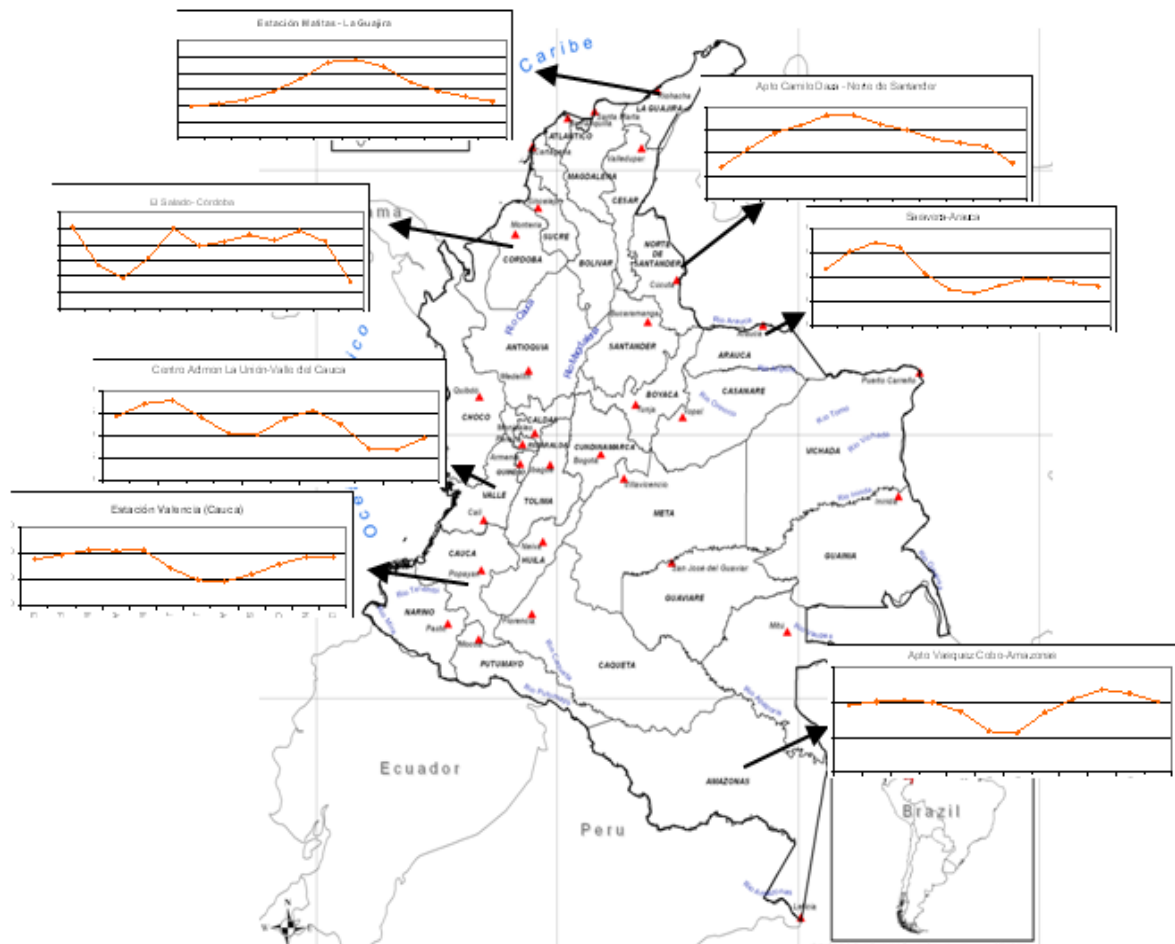


Figura 9. Comportamiento de la Temperatura media para algunas zonas de Colombia

### 3.3 Comportamiento de la última década frente a los promedios históricos

**Precipitación:** En general, se observó que en gran parte del territorio colombiano, la precipitación mantuvo un comportamiento constante, con cambios poco significativos que se encuentran dentro de un rango normal con respecto al periodo de referencia 1971-2000. Sin embargo, se aprecia que las décadas 1971-1980 y, principalmente 2001-2010, han sido las más lluviosas, siendo éstos resultados similares a los planteados por (OMM, 2012) en el contexto mundial; donde menciona que, a nivel global, el decenio 1951-1960 fue el que presentó mayor cantidad de precipitaciones medias mundiales desde 1901, seguido de los decenios 2001-2010 y 1971-1980 (Fig. 10), y el fenómeno extremo que se notificó con mayor frecuencia fueron las inundaciones.

En la década 2001-2010 se encuentran precipitaciones ligeramente por encima de lo normal (entre 10 y 40%) respecto a 1971-2000 en los departamentos de La Guajira, parte norte del Magdalena, Atlántico, Chocó, y algunas zonas del eje cafetero y Norte de Santander. Por otro lado, se han presentado precipitaciones ligeramente por debajo de lo normal (entre -40% y -10%) en algunas partes del Huila, Cauca, Cundinamarca, Santander y Magdalena.

**Temperatura:** En los cuatro decenios que van desde 1971 a 2010 (Fig. 11) la temperatura no ha tenido mayores cambios con respecto al periodo de referencia, con anomalías entre -0.5 y 0.5°C, hacia las regiones de Amazonía, Orinoquía, Pacífico, los valles interandinos y algunas zonas del Caribe. Sin embargo, se han presentado aumentos de temperatura en las zonas altas del territorio nacional, con anomalías entre 0.5 y 1.5°C, principalmente hacia la región Andina y la Sierra Nevada de Santa Marta, siendo el decenio más caluroso el comprendido entre 2001-2010, donde también se presentan anomalías positivas hacia el sur oriente Colombiano. Lo anterior es acorde con lo expuesto por la OMM (2012), que indica que, a nivel global, Desde que se están registrando con instrumentos la temperatura media superficial global, los trece años más calientes se han producido en los últimos quince años, a partir de 1997. Por su parte, la década 1971-1980 ha sido la mas fría de los últimos 40 años, con temperaturas mas bajas que el promedio (-1.5 y -0.5°C) ubicadas principalmente en la región Andina y algunas partes de la región Caribe, donde se destacan el norte de La Guajira, y la Sierra Nevada con anomalías que descienden hasta los -2.5°C.



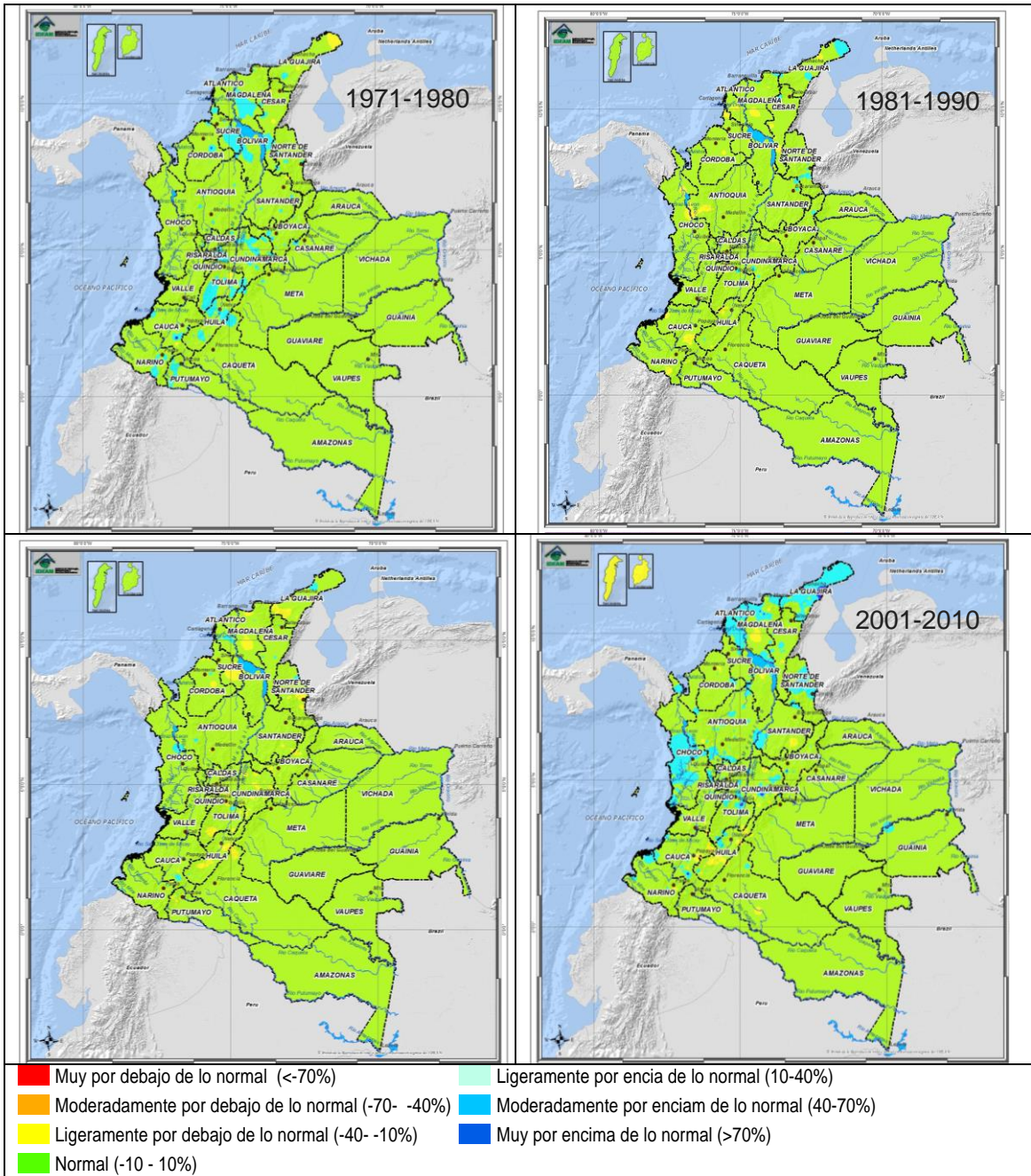


Figura 10. Distribución espacial de las anomalías de precipitación (%) decadal (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010) para Colombia

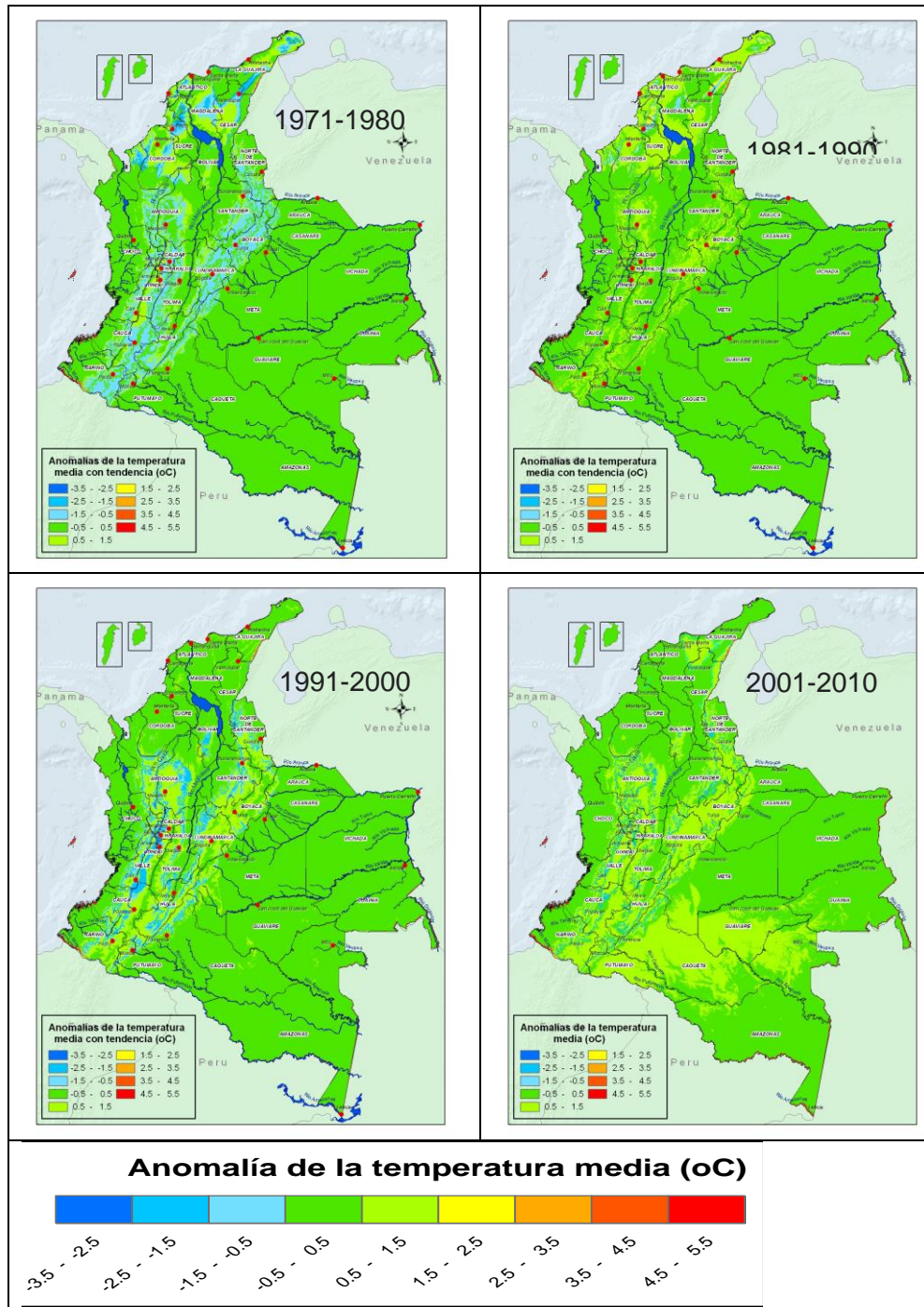


Figura 11. Distribución espacial de las diferencias promedio decadal de la temperatura (°C) con tendencia para Colombia

### 3.4 Escenario más probable de precipitación y temperatura media a lo largo del siglo XXI. (Promedio multiescenario)

Se compararon los distintos escenarios para algunas estaciones representativas de la precipitación (Fig. 12) y de la temperatura media (Fig. 13).

**Precipitación:** Los escenarios de IPCC sugieren una disminución en todas las estaciones, excepto las ubicadas en el oriente colombiano (estaciones del Vichada), que presentaría un comportamiento normal. Sin embargo, se puede distinguir que el periodo 2051-2070 la tendencia hacia la disminución de las precipitaciones se haría menos acentuada como se presenta en la Fig. 12. El escenario que presenta una disminución más significativa de la precipitación es el A1B, mientras que el A2 es el escenario que se acerca más hacia la normalidad. El escenario ensamblado muestra un promedio de los escenarios proyectados, como se esperaba.

De igual manera, la proyección de los escenarios de la Fig. 14, muestra una marcada disminución de la precipitación con anomalías moderadamente y ligeramente por debajo de lo normal (entre -70 y -10%) sobre toda la región Andina, Caribe, sur del Pacífico. Los impactos más grandes se presentarían a lo largo de la cordillera oriental y la Guajira en el periodo 2071-2100 y en el sur del Pacífico en el periodo 2011-2070. San Andrés también mostraría una disminución en la precipitación para ese mismo periodo. Por otro lado, se observa un aumento del 10% al 40% para la región comprendida entre los departamentos del Amazonas y Caquetá principalmente para el periodo 2061-2100, con una expansión de la precipitación en el territorio para la década 2081-2090. También se puede apreciar un aumento ligero de la precipitación (10%- 40%) hacia el norte de la región Pacífica - Golfo de Urabá y Santander para el periodo 2071-2100, llegando a aumentar hasta en un 70% en algunos puntos para la década 2091-2100. Para el resto del país, hacia el oriente, prevalece una situación de precipitación que no cambia significativamente con respecto al clima actual. Para apoyar estos resultados, en la Fig. 15, se presenta una comparación de los resultados de anomalías proyectados por IDEAM (Ruiz, F., 2010) con los obtenidos en este estudio (en puntos).

**Temperatura:** Los escenarios de IPCC sugiere un aumento en todos sus escenarios (Fig. 13), sin embargo, para la década 1991-2000, Bogotá y La Guajira muestran una leve disminución, y para el periodo 2050 -2060 y 2070-2100 se observa que la tendencia al aumento es más leve en todas las estaciones y escenarios. Al igual que en precipitación, la estación gaviotas presenta el menor aumento con un rango entre 2°C y 6°C. Esta estación presenta un comportamiento especial a partir del 2060, ya que mientras en los escenarios A1B y A1B-ECHAM5 aumentan drásticamente la temperatura, el escenario B2 muestra una caída considerable. Por otro lado, el escenario “ensamble con tendencia” es el que presenta el menor aumento para todas las estaciones, con un promedio de 4°C para el 2100, mientras que los escenarios A1B, A2 y ensamble sin tendencia son los que muestran los mayores aumentos.



De igual forma, en la figura 16, se muestra las proyecciones futuras de temperatura y se indica un constante aumento para todas las regiones del país. En general, los mayores aumentos se darían hacia el Oriente de Colombia y los valles interandinos, mientras que los menores aumentos se presentarían principalmente al sur del Golfo de Urabá, también hacia las Cordilleras y algunas zonas de los departamentos de La Guajira, Atlántico y Cesar.

Los primeros tres decenios presentarían aumentos entre 0.5°C y 1.5°C en los primeros años, llegando a anomalías de hasta 2.5°C en casi todo el territorio nacional para el 2031-2040. Un comportamiento singular es que el aumento de temperatura en la región Orinoquía para la década 2021-2030 sería menor con relación a la década predecesora. El periodo 2041-2070 tendría un comportamiento casi que constante, con anomalías que llegan hasta 2.5 y 3.5°C a lo largo del País, exceptuando algunas zonas de las regiones Pacífico y Caribe, y de las cordilleras Oriental y Central, donde los aumentos llegarían máximo a los 2.5°C. De la misma manera, el periodo 2071-2100 presenta una anomalía entre 3.5°C y 4.5°C en los 30 años en casi todo el territorio nacional, con una acentuación muy particular en la última década en toda la región Andina en la cual la temperatura podría llegar a los 5.5°C.

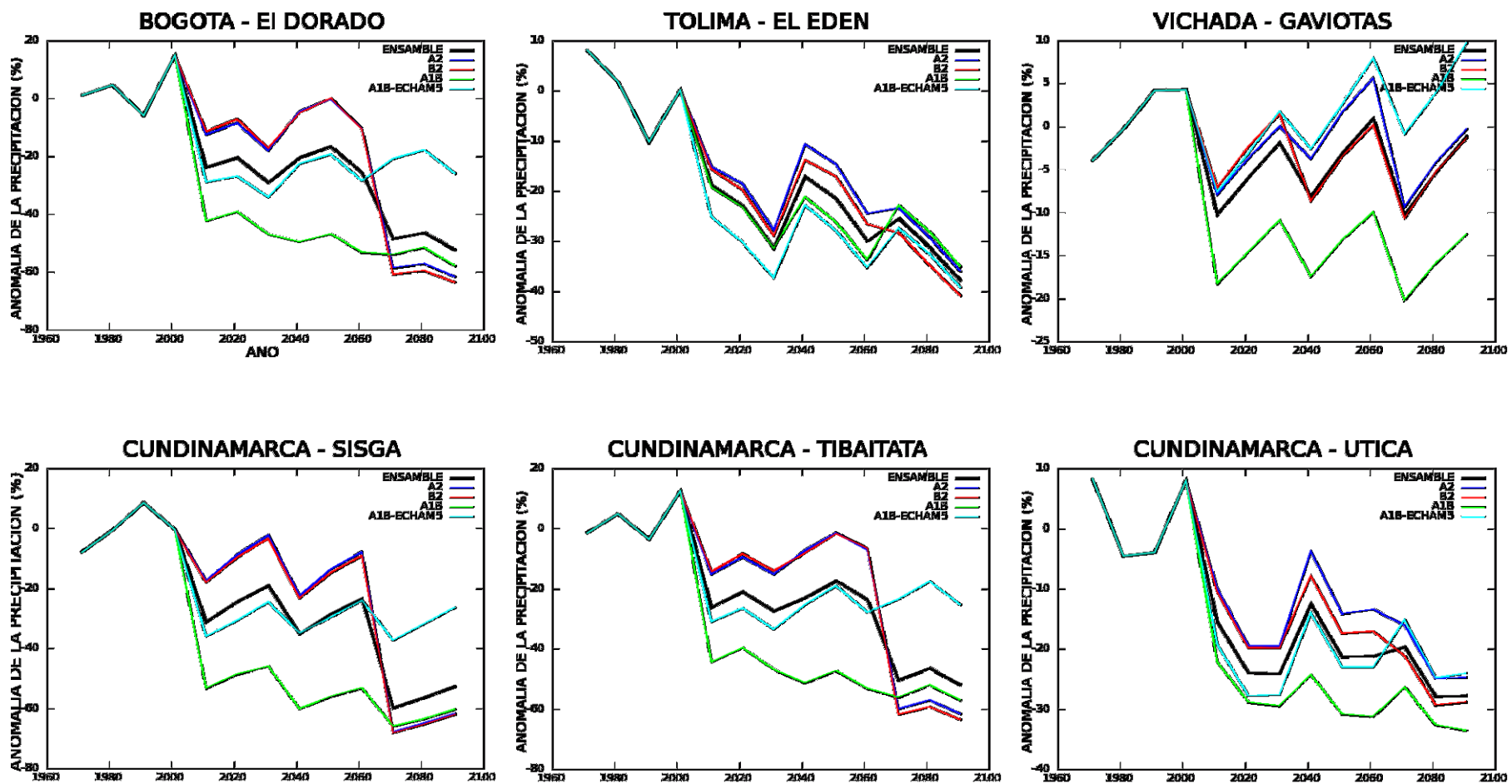


Figura 12. Cambios de precipitación en (%) decadal por escenario para algunas estaciones del territorio nacional

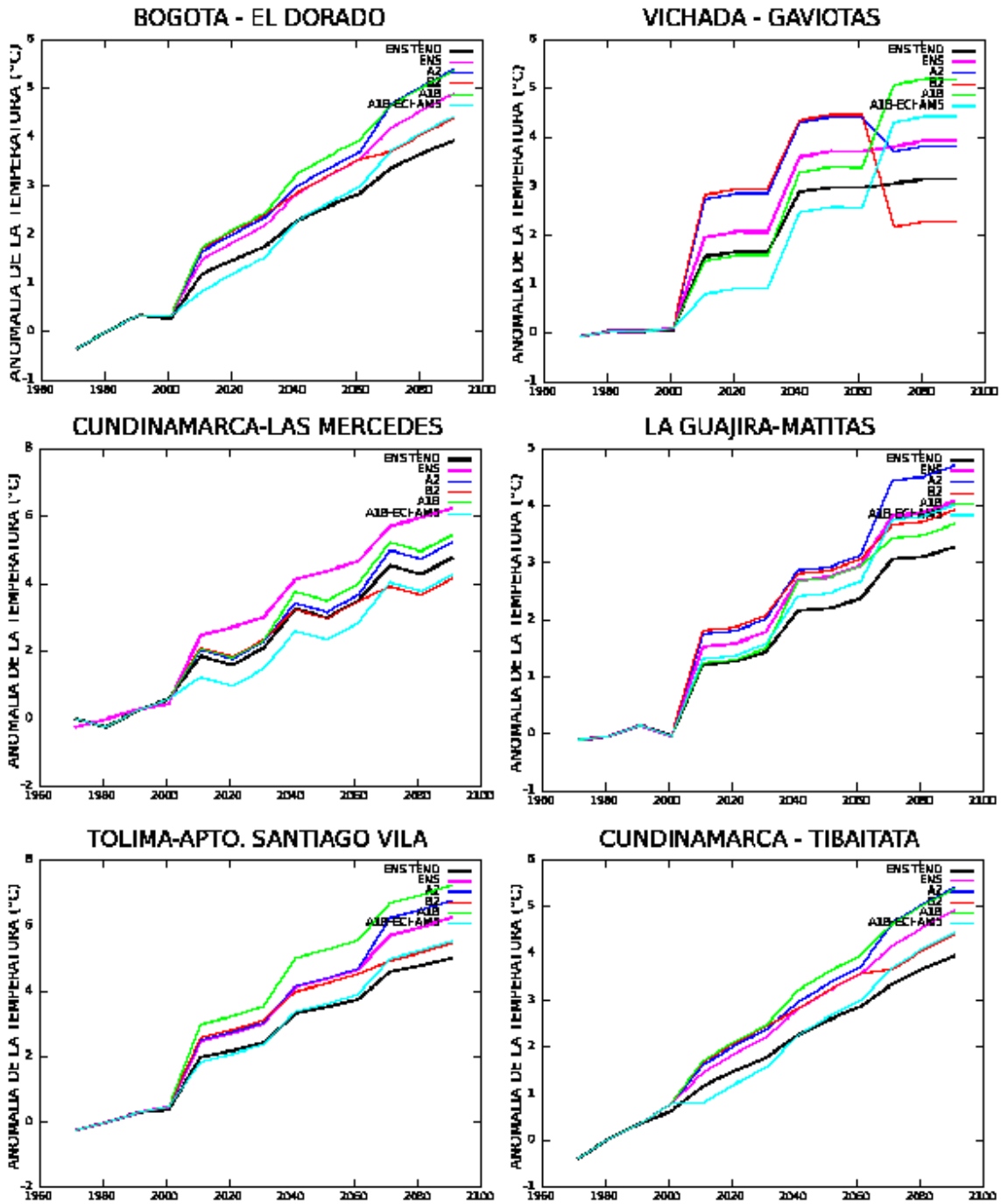


Figura 13. Cambios en la temperatura media (°C) decadal por escenario para algunas estaciones del territorio nacional

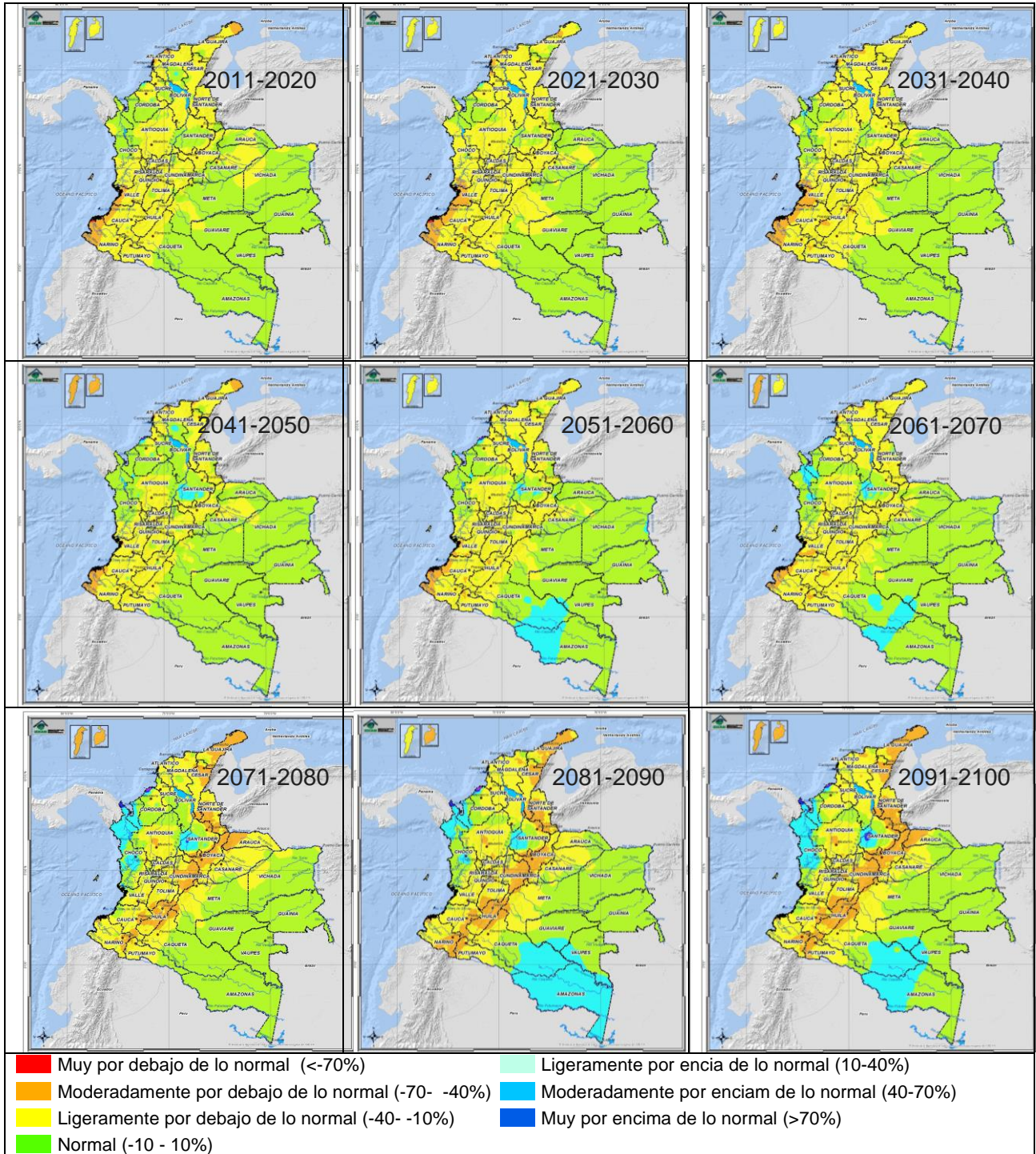


Figura 14. Distribución espacial de las anomalías decadales de la precipitación para Colombia

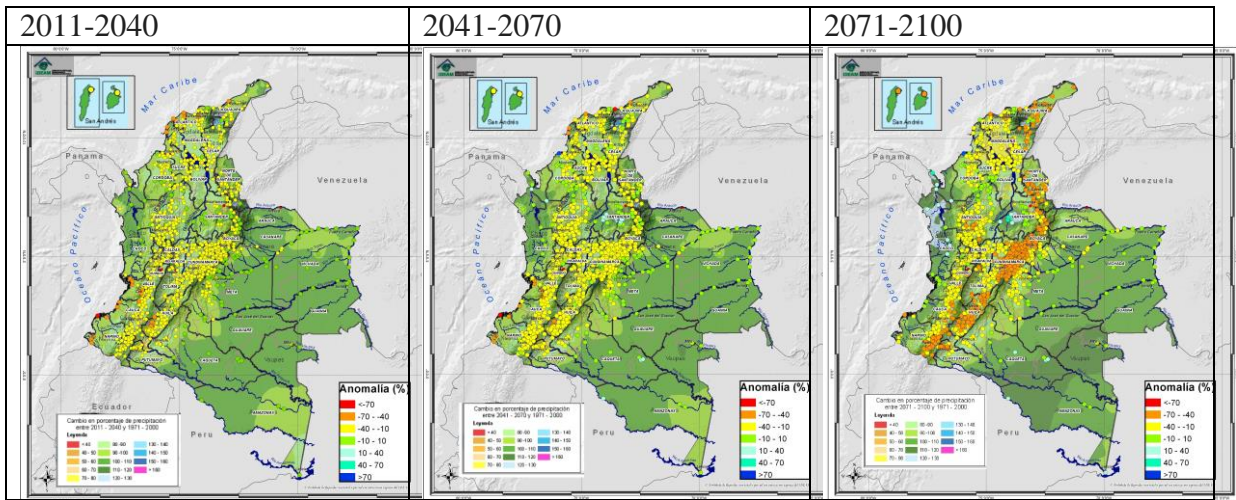


Figura 15. Distribución de las Anomalías de la precipitación (puntos de colores) para las tres normal climatológica sobre los resultados generados por IDEAM para Colombia



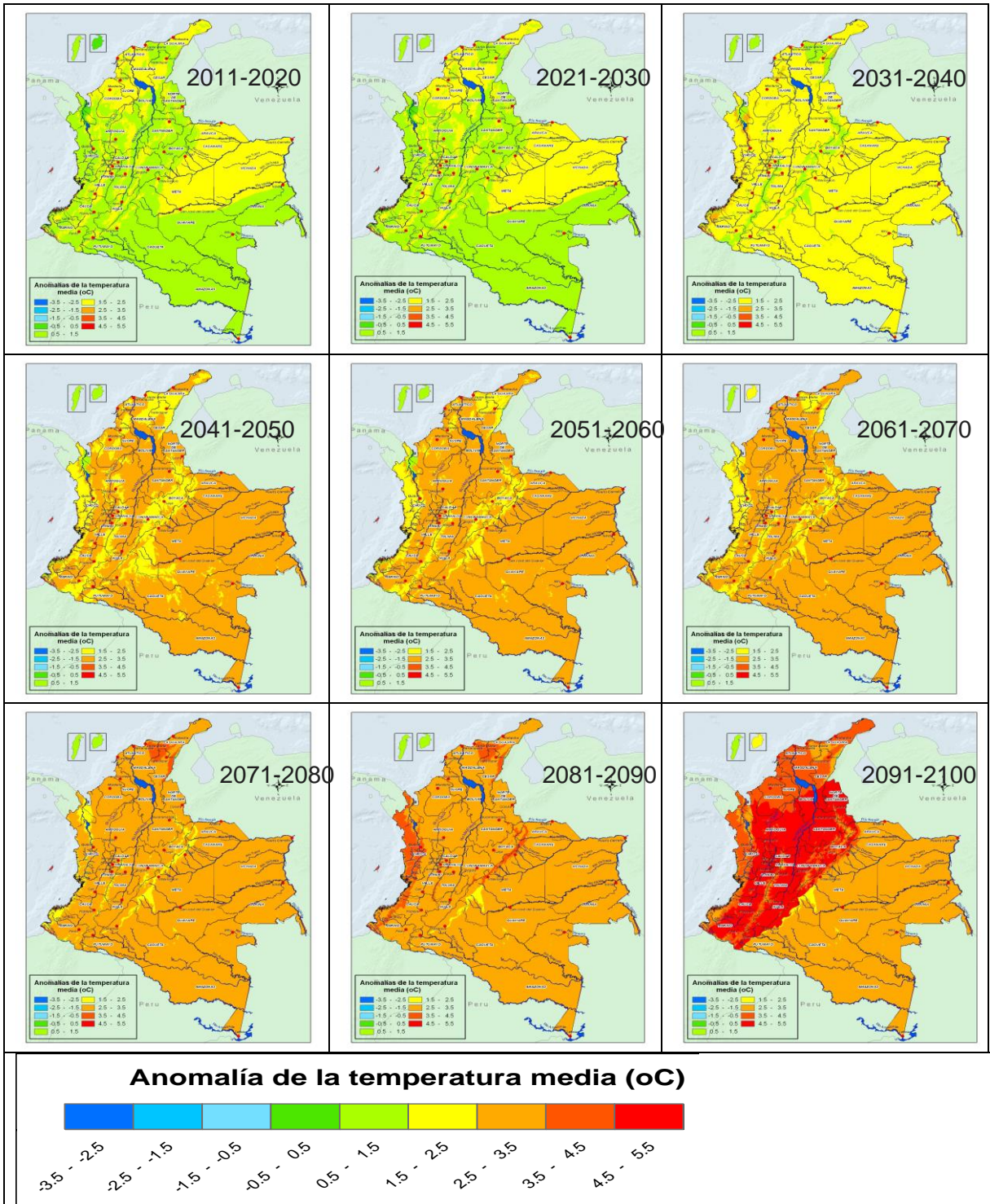


Figura 16. Distribución espacial de las anomalías de la temperatura media (oC) con tendencia de las diferentes décadas para Colombia

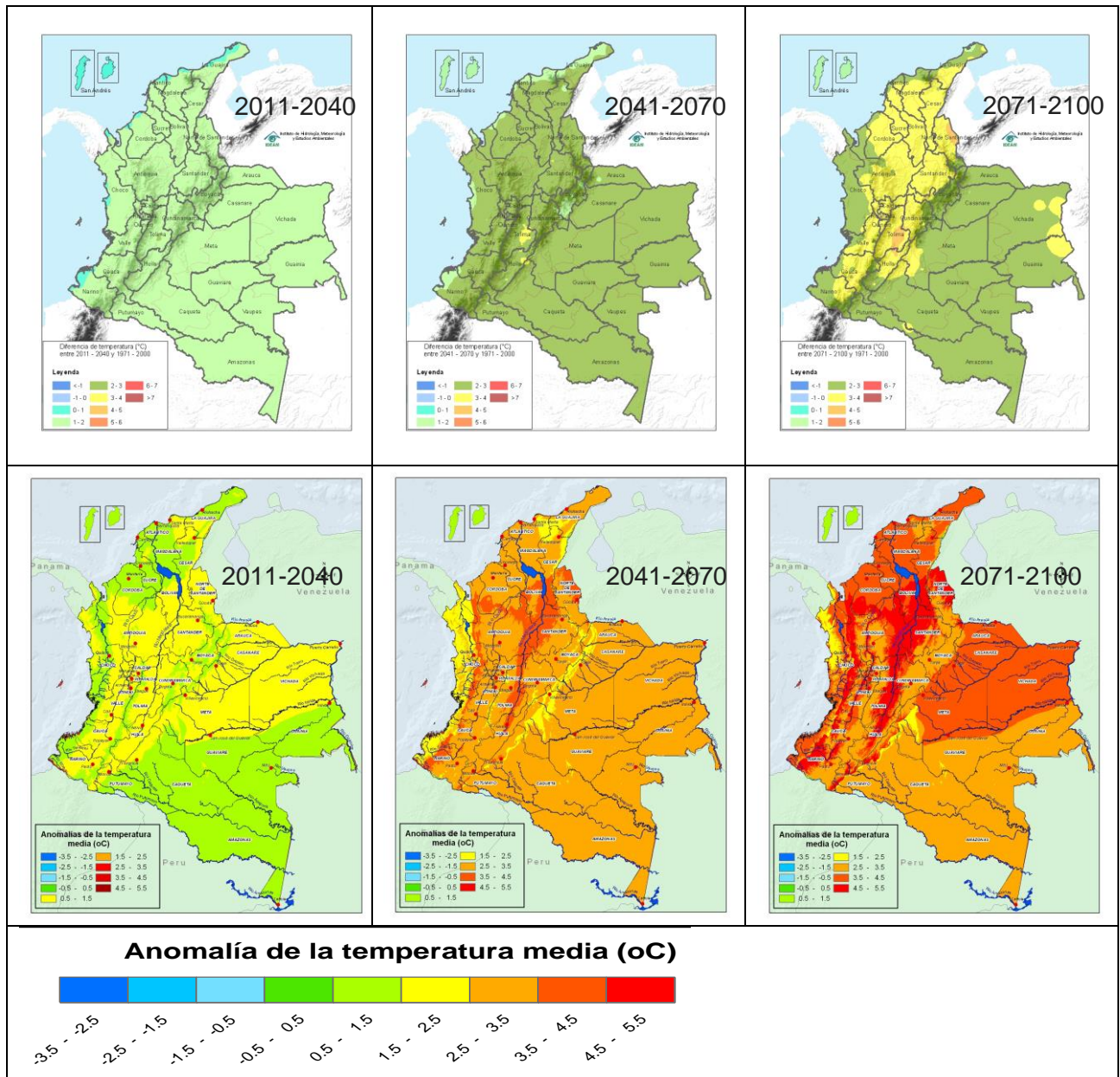


Figura 17. Comparación de las diferencias de temperatura con tendencia (°C) entre IDEAM (arriba) para años anteriores y (abajo) este estudio



### 3.4.1 Análisis del Escenario más probable de la precipitación y temperatura media por regiones naturales (Incertidumbres)

El cambio porcentual de la precipitación presenta un mayor rango de variación; lo que indica que tiene una incertidumbre más alta en los modelos climáticos, pero además, indica también que, dentro de una misma región, la disminución de la precipitación sería heterogénea. Las regiones Pacífica y Andina presentarían un comportamiento similar, marcado en la disminución de la precipitación para los periodos medios y crecimiento al final de la serie. La región del Caribe, exhibió amplitudes extremas en sus series (entre mínimo y máximo), sin embargo, su promedio mostraría una tendencia en decrecimiento a través del tiempo. La Orinoquía, expondría un comportamiento en disminución porcentual de la incertidumbre para todo el periodo mientras que la Amazonía proyectaría uniformidad en toda la serie (Fig. 18).

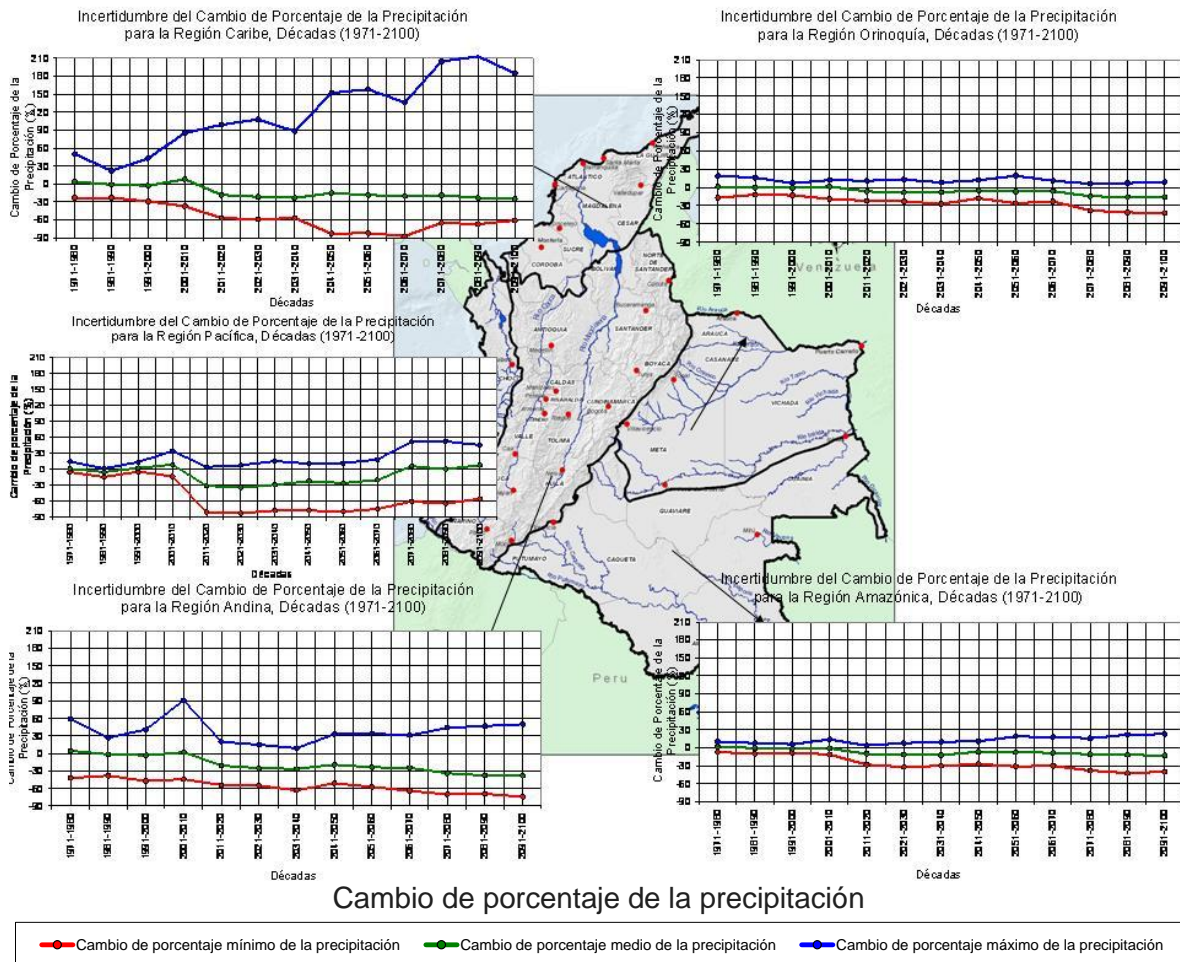
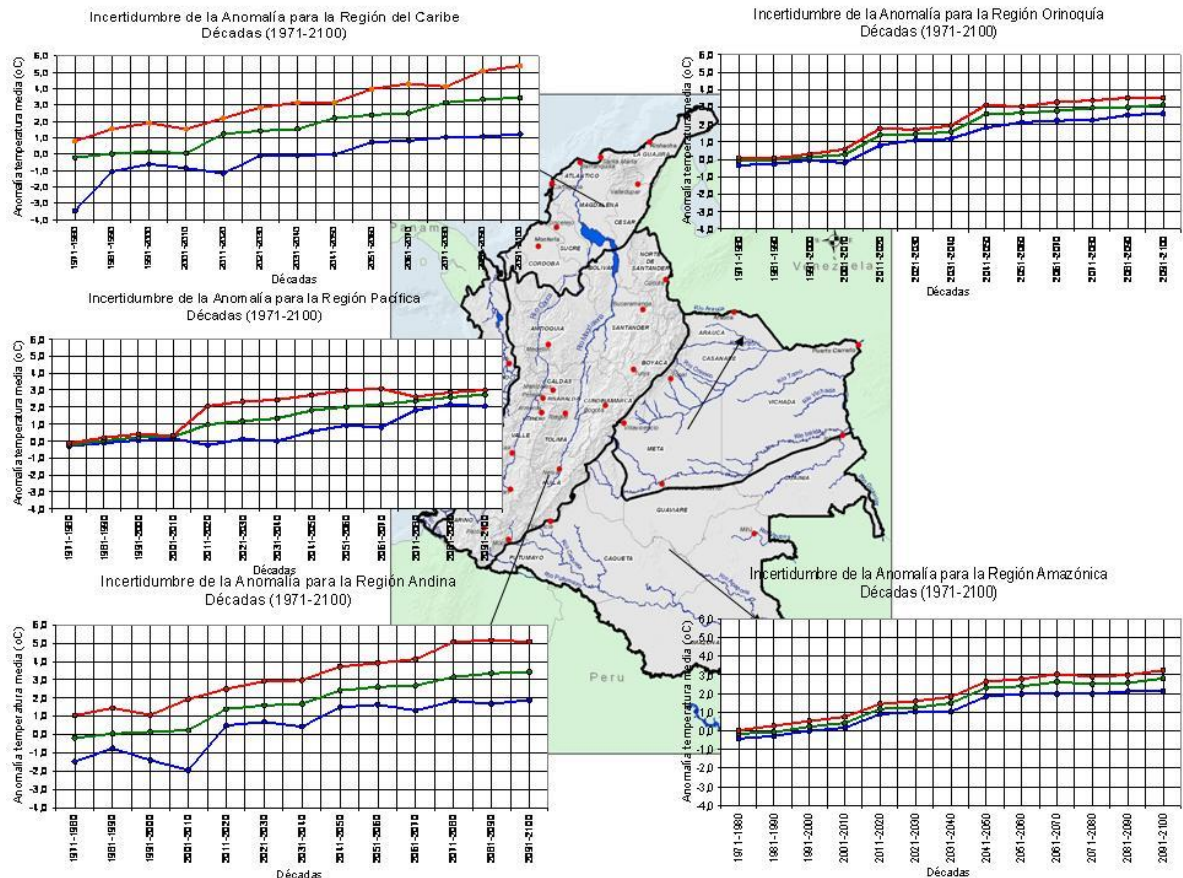


Figura 18. Cambio del porcentaje de la Precipitación respecto al clima presente para las Regiones Naturales de Colombia



La temperatura media presentaría un aumento en todas las regiones de forma paulatina. Sus comportamientos particulares estarían enmarcados de la siguiente manera, las regiones Caribe y Andina, mostrarían amplitudes similares a través del tiempo, caso contrario en las regiones Orinoquía y Amazonía donde su comportamiento no presentaría variaciones en la serie, y la Pacífica reflejaría ambos comportamientos, uniforme al inicio y al final de la serie y grandes amplitudes en mitad del periodo analizado (Fig. 19).



### Anomalías de la temperatura media

● Anomalía mínima de la temperatura media ● Anomalía media de la temperatura media ● Anomalía máxima de la temperatura media

Figura 19. Incertidumbres de las anomalías para la temperatura media respecto a clima presente de las Regiones Naturales de Colombia

Cabe aclarar que las figuras 18 y 19 no solo muestran la proyección de la anomalía de cada región en términos de precipitación y temperatura media respectivamente, sino que también indican el grado de incertidumbre (variación) que tiene cada región con referencia a cada variable.

## 5. CONCLUSIONES

- El análisis de las series de tiempo mediante los gráficos de Box-Plot y el test de McCuen, demostraron que el proceso de complementación de datos, no afectó la estadística ni la variabilidad de la estación. En general, el 98,2 % de las 1072 estaciones para precipitación pasaron los debidos métodos de evaluación, caso similar para la temperatura donde el 99% de las 331 estaciones de temperatura, empleadas en este estudio, pasaron los debidos métodos de evaluación (Coeficiente de Variación), manteniendo los momentos estadísticos de primer orden y los comportamientos entre las series con vacíos y las completas..
- Para clima presente y a nivel decadal, la precipitación presentó cambios poco significativos respecto al periodo de referencia 1971-2000. Sin embargo, los registros pluviométricos manifestaron que las décadas 1971-1980 y, principalmente 2001-2010, fueron las más lluviosas. Para esta última década en particular, se mostraron aumentos de precipitación entre el 10 y 40% en las regiones hidroclimáticas de la Alta Guajira, Litoral Central, Pacífico Norte y Central, vastos sectores de la Cuenca del Río Sogamoso, norte y centro del Alto Magdalena así como sobre las franjas centrales del Medio Magdalena y Catatumbo.
- En cuanto a la temperatura, se observó que presenta una tendencia en aumento para todas las series del país, sin embargo, los cambios no fueron significativos respecto al periodo de referencia. Las regiones Amazonía, Orinoquía y Pacífica, los valles inteandinos y algunas zonas del Caribe presentaron anomalías entre los -0,5 y los 1,0°C y los mayores aumentos se presentaron en las zonas altas como la Región Andina y el pico de la Sierra Nevada de Santa Marta (en el Caribe) con anomalías entre los 1,3 y 1,8°C. Este comportamiento hace indicar que el decenio 2001-2010 fue el más “caluroso” respecto a los iniciales. Lo anterior es acorde con lo expuesto por la OMM (2012), donde indica que a nivel global, desde que se están registrando con instrumentos la temperatura media superficial global, los trece años más calientes se han producido en los últimos quince años, a partir de 1997. Por su parte, la década 1971-1980 ha sido la más fría de los últimos 40 años, con temperaturas más bajas que el promedio (-1.5 y -0.5°C) ubicadas principalmente en la región Andina y algunas partes de la región Caribe, donde se destacan el norte de La Guajira, y la Sierra Nevada con anomalías que descienden hasta los -2.5°C.
- Contrario a lo que se esperaba y de acuerdo con el escenario pesimista o de mayor emisión de gases de efecto invernadero de IPCC (Escenario A2) el análisis multiescenarios, para la precipitación del país no presentaría disminuciones tan significativas como ocurriría bajo un escenario balanceado (A1B) de emisiones, lo propio ocurre con la temperatura media en el que el escenario A1B y A2 mostraron los mayores aumentos, mientras que el escenario ensamble sin tendencia presenta una anomalía más baja. Caso especial para Colombia, son los llanos Orientales, en especial el Departamento del Meta, donde las estaciones presentaron normalidad en la serie respecto al resto del país donde existe caída en la misma.

- La proyección de los escenarios mostró una marcada disminución de la precipitación (-70 y -10%) sobre toda la región Andina, Caribe, sur del Pacífico. Los cambios más significativos se presentarían a lo largo de la cordillera oriental y la Guajira para el periodo 2071-2100 y en el sur del Pacífico para el periodo 2011-2070. Igualmente, San Andrés presentaría una disminución en la precipitación para ese mismo período. Para la región comprendida entre los departamentos del Amazonas y Caquetá para el periodo 2061-2100 habría un aumento de la precipitación entre el 10% y el 40%, con una expansión de la misma variable meteorológica en el territorio para la década 2081-2090. Una situación similar se presentaría hacia el norte de la región Pacífica - Golfo de Urabá y Santander pero para el periodo 2071-2100, llegando a aumentar hasta en un 70% en algunos puntos alrededor de la década 2091-2100. El resto del territorio nacional no presentaría cambios significativos respecto al clima actual 1971-2000.
- Por su parte, la temperatura media tiende a aumentar en todas las series analizadas, llegando a incrementos de hasta 5.5°C en la región Andina para el 2100, sin embargo, en las décadas previas, las anomalías serían más altas en zonas de baja elevación. En las décadas comprendidas entre 2011 y 2040, la anomalía llegaría hasta 1.5°C y 2.5°C, en las siguientes tres décadas el aumento sería más homogéneo en el país con anomalías que podrían llegar hasta 3.5°C por encima de lo normal, mientras que en último periodo tridecadal la temperatura seguiría aumentando en todo el país hasta llegar en promedio a 4.5°C.
- Las incertidumbres indicaron disminución en la precipitación para todas las regiones y se encontraron mayores variaciones en la Región Caribe. Para el caso de la temperatura media, las incertidumbres indicaron incremento de la misma para el siglo XXI y las mayores variaciones se encontraron en la Región Pacífica. En general, las incertidumbres se vieron enmarcadas en los modelos climáticos, para las últimas décadas evaluadas (2071-2100) esto basado en las grandes amplitudes en la anomalía.

## **6. SUGERENCIAS**

Es importante replantear las zonas Hidroclimáticas de Colombia con base en los resultados de la homogenización de las series, debido a que hubo necesidad de regionalizar las estaciones de acuerdo al comportamiento climatológico encontrado y los análisis estadísticos de primer orden.

En cuanto a la densidad de estaciones, para el Oriente y Suroriente colombiano, la cantidad de las estaciones fue escasa a comparación de otras regiones, por lo cual, se sugiere hacer una metodología con filtros no tan detallados como la empleada en este trabajo, para poder rescatar estaciones que permitan mejorar la densidad de la red en esta área en cuanto al número de estaciones.

Se sugiere emplear el Test de Alexandersson (Stepánek, 2003), cuando los registros de las series presentan inhomogeneidades, caso muy común para los años iniciales y finales del periodo 1971-2010.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se hace un reconocimiento a los funcionarios del IDEAM, que con sus oportunos y valiosos aportes para esta investigación hicieron posible la elaboración del presente artículo, en especial a la Doctora Gloria León, por sus orientaciones y en formulación en la metodología del control de calidad de las series, al Ing. de Sistemas Guillermo Eduardo Armenta por la colaboración en el downscaling con el modelo PRECIS, la Ing Geógrafa Paola Bulla por su ayuda en los mapas de anomalías de la precipitación y a la Ing de Sistemas Blanca Oviedo, por su participación en la homogenización de los datos.

## **REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA**

Alfaro E, Soley F, (2008) Descripción de dos métodos de rellenado de datos ausentes en series de tiempo meteorológicas. Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones p 72

Anandhi A, Frei A, Pierson D., Schneiderman E, Zion M, Lounsbury D, & H. atonse. (2011) Examination of change factor methodologies for climate change impact assesment. Water Resources Research, Vol. 47, W03501. 1-10 p.

Ariza FJ (2002) Calidad en la producción cartográfica. Madrid, Ra-Ma. P 389.

Barrera A (2004) Técnicas de completado de series mensuales y aplicación al estudio de la influencia de la NAO en la distribución de la precipitación en España. Trabajo para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados (DEA). Programa de doctorado de Astronomía y Meteorología, Universidad de Barcelona, Barcelona, Junio de 2004.

Canto C (1998) Los mapas temáticos en trabajos prácticos en Geografía humana Carrera, C., Canto, C del, Gutiérrez, J. Méndez R. y Pérez, M. Síntesis. Madrid, Pp. 311-396

ESRI (2010). Herramienta de ayuda de ArcGis vs10, Interpolación Cokriging.

Gómez V, Maravall (1996) Programs tramo and seat. Instruction for the user, Banco de España, Servicio de Estudios, Documento de Trabajo No. 9628.

H.F. Kaiser (1958): The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika* 23: 187–200.

IDEAM (2005) Atlas Climatológico de Colombia. Bogotá D.C.

Jones R, M Noguera, D Hassell, D Hudson, S Wilson, G Jenkins & J Mitchell (2004) Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. Hadley Center for Climate Prediction and Research, UK.

McCuen, R.H. (1998) Hydrologic Analysis and Design. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Monsalve G., 1995. Hidrología en la Ingeniería. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería p 353

Montealegre E (2009) Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala. Nota Técnica IDEAM, IDEAM-METEO/022-2009, Bogotá D.C.

OMM (1989) Calculation of monthly and annual 30-year standard normals. Prepared by a meeting of experts, Washington, DC, USA. marzo de 1989. Organización Meteorológica Mundial, WCDP N°. 10, OMM, Ginebra.

OMM (2007) Programa mundial de datos y vigilancia del clima, WMO/TD No. 1377, Ginebra, Suiza.

OMM (2012) Organización Meteorológica Mundial. Declaración de la Organización Meteorológica Mundial: Resumen decenal sobre el estado del clima mundial, conclusiones preliminares.

Oviedo, B. (2010) Generación de escenarios de cambio climático regionales y locales a partir de modelos globales - guía para tomadores de decisiones. Nota Técnica IDEAM.

Reyes Coca, S. (2002) Introducción a meteorología. Universidad Autónoma de Baja California. pp 1-428. pp. (PA: CEOFZ20021)

Richman M & Lamb P (1985) Climatic Pattern Analysis of Three and Seven Day Summer Rainfall in the Central United States. Some Methodological Considerations and a Regionalization. Climate and Meteorological Section. Illinois State Water Survey. American Meteorological Society

Rodríguez A (2010) Evaluación de los modelos globales del clima utilizados para la generación de escenarios de cambio climático con el clima presente en Colombia. Nota Técnica IDEAM, IDEAM-METEO/009-2010, Bogotá D.C.

Ruiz F (2010) Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (Panorama 2011-2100). Nota Técnica IDEAM, IDEAM-METEO/05-2010, Bogotá D.C.

Solis, Z y Flórez, J.G (2005) Análisis comparativo de técnicas de interpolación en la estimación de la variación espacial de factores en una cuenca hidrográfica.

Stepánek Petr (2003) Homogeneización De Las Serie De Temperatura Del Aire en La República Checa Durante El Período Instrumental. Departament Of Geography, Masaryk University, Kotlářská 2, 611 37 Brno,. Geographicalia, República Checa.

Stott P, Stone D A, Allen, M.R. (2004) Human contribution to the European heatwave of 2003, Nature 432, 610-614.