

ANALISIS DE MODELOS REGIONALES DE CAMBIO CLIMATICO PARA LA  
REGION NOR-ORIENTAL DE COLOMBIA.

HECTOR FABIAN FANDIÑO USECHE  
FABIO ELISEO PADILLA ESTUPIÑAN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FISICO MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA

2011

ANALISIS DE MODELOS REGIONALES DE CAMBIO CLIMATICO PARA LA  
REGION NOR-ORIENTAL DE COLOMBIA.

HECTOR FABIAN FANDIÑO USECHE  
FABIO ELISEO PADILLA ESTUPIÑAN

Tesis de grado modalidad de Investigación para optar por el título de  
Ingeniero Civil

Director  
Luis Fernando Salazar  
Ingeniero Civil, Msc, Ph.D.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FISICO MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA

2011

*A mi madre, porque te has esforzado mucho para ofrecerme un mejor futuro, me has enseñado grandes valores y virtudes, me has dado tu confianza. Gracias por tu amor y apoyo incondicional, eres mi modelo a seguir.*

*Te amo,*

*Héctor Fabián Fandiño Useche*

*Con especial agradecimiento a mis padres quienes con su esfuerzo y trabajo lograron brindarme su apoyo incondicional, en cada una de las pruebas que en el transcurso de la carrera tenía que superar. Doy gracias al Dios creador por brindarme a tan especiales seres, y espero poder seguir compartiendo mis logros y éxitos con ellos.*

*Fabio Eliseo Padilla Estupiñan*

## AGRADECIMIENTOS

Es importante resaltar aquellas personas que mediante su continuo apoyo fueron fundamentales en la realización de este proyecto.

Especialmente a nuestro director de proyecto, el Ingeniero Luis Fernando Salazar, quien en el transcurso de este, siempre nos brindo su asesoría y herramientas, a él muchas gracias.

Al Grupo de Predicción Hidroclimatica (GPH) por brindarnos la oportunidad de participar en sus actividades y hacer parte de sus proyectos.

A nuestros familiares que con su apoyo moral y económico hizo posible la realización de este proyecto.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.3 METODOLOGIA	19
1.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	19
2. INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS CLIMATICOS.	21
3. MODELOS REGIONALES Y CLIMATOLOGIA UTILIZADA	29
3.1 NewETA	29
3.2 PRECIS	30
3.3 RegCM3	32
3.4 Climatología Observada	34
4. ZONA DE ESTUDIO	35
5. ANALISIS DE DATOS CLIMATICOS EN ZONA DE ESTUDIO	39
5.1 Climatología del período actual	39
5.1.1. Climatología Observada	40
5.1.2 Modelo Regional NewETA (Eta/CPTEC)	41
5.1.3 Modelo Regional RegCM3	42
5.1.4 Modelo Regional PRECIS	43
5.2 Proyecciones futuras	45
5.2.1 Proyección Modelos Regionales Escenario A2	49
5.2.2 Proyección Modelos Regionales Escenario B2	53

6. CONCLUSIONES	57
7. BIBLIOGRAFIA	59

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diferencia resoluciones modelos globales (GCM) y modelos regionales (RCM).	25
Figura 2. Ubicación Zona de Estudio	38
Figura 3. Ciclo anual de la climatología (1961-1990) de precipitación observada (CLIMAT) y simulada por los tres modelos regionales para el nordeste de Colombia (región presentada en la figura). A la derecha se presenta el error cuadrático medio de la precipitación entre los modelos regionales y la climatología observada en la zona de estudio para los trimestres analizados y el total anual.	39
Figura 4. Ciclo anual de la climatología (1961-1990) de precipitación observada (CLIMAT) para el nordeste de Colombia.	40
Figura 5. Ciclo anual de la climatología (1961-1990) de precipitación observada (CLIMAT) y simulada por el modelo regional NewETA (Eta/CPTEC) para el nordeste de Colombia (región presentada en la figura). A la derecha se presenta el error cuadrático medio de la precipitación entre el modelo regional y la climatología observada en la zona de estudio para los trimestres analizados y el total anual.	41
Figura 6. Ciclo anual de la climatología (1961-1990) de precipitación observada (CLIMAT) y simulada por el modelo regional RegCM3 para el nordeste de Colombia (región presentada en la figura). A la derecha se presenta el error cuadrático medio de la precipitación entre el modelo regional y la climatología observada en la zona de estudio para los trimestres analizados y el total anual.	42
Figura 7. Ciclo anual de la climatología (1961-1990) de precipitación observada (CLIMAT) y simulada por el modelo regional Precis para el nordeste de Colombia (región presentada en la figura). A la derecha se	

presenta el error cuadrático medio de la precipitación entre el modelo regional y la climatología observada en la zona de estudio para los trimestres analizados y el total anual.	44
Figura 8. Evolución de las concentraciones de CO <sub>2</sub> para diferentes escenarios de emisiones; traducción leyenda eje vertical: “Concentración CO <sub>2</sub> (ppmv)”, traducción leyenda eje horizontal: “Año”.	48
Figura 9. Anomalías en la precipitación (mm/día) anual y trimestral en el escenario climático futuro A2 periodo 2071 – 2100, proyectado por los modelos regionales RegCM3, ETA, PRECIS.	50
Figura 10. Anomalías en la temperatura (°C) anual y trimestral en el escenario climático futuro A2 periodo 2071 – 2100, proyectado por los modelos regionales RegCM3, ETA, PRECIS.	52
Figura 11. Anomalías en la precipitación (mm/día) anual y trimestral en el escenario climático futuro B2 periodo 2071 – 2100, proyectado por los modelos regionales RegCM3, ETA, PRECIS.	54
Figura 12. Anomalías en la temperatura (°C) anual y trimestral en el escenario climático futuro B2 periodo 2071 – 2100, proyectado por los modelos regionales RegCM3, ETA, PRECIS.	56

## RESUMEN

**TITULO:** ANALISIS DE MODELOS REGIONALES DE CAMBIO CLIMATICO PARA LA REGION NOR-ORIENTAL DE COLOMBIA\*

**AUTORES:** HECTOR FABIAN FANDIÑO USECHE, FABIO ELISEO PADILLA ESTUPIÑAN\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Escenarios Climáticos, Nor-Oriente Colombiano, Modelo NewETA, Modelo RegCM3, Modelo Precis.

La región Nor-Oriental de Colombia (Santander y Norte de Santander) es afectada constantemente por la variabilidad climática lo cual afecta sus actividades económicas y podría seguir presentándose en el futuro debido al cambio climático. Acorde a esto, este trabajo tiene como objetivo analizar los modelos regionales y tener una aproximación de las proyecciones futuras en la precipitación y temperatura. Para esta evaluación del cambio climático futuro (2071 – 2100) se utilizaron tres modelos climáticos regionales (NewETA, Precis y RegCM3) y se analizaron las variables de precipitación y temperatura. Inicialmente, se validó el clima presente (1961-1990) de estos tres modelos, en relación a la climatología observada y posteriormente se analizaron sus proyecciones futuras (2071-2100). Los resultados de la validación mostraron que el modelo Precis fue el que presentó mejor desempeño en la simulación de la precipitación sobre la región en estudio, representando mejor el ciclo anual de la precipitación y sobreestimando a la climatología observada hasta en 2 mm/día. Existen datos de temperatura, pero se decidió no validar estos mismos ya que en general los modelos representan bien la temperatura. El modelo Precis por ser el que más se aproximó a lo observado fue en el que se basaron los posibles cambios climáticos futuros. Entonces, en el futuro 2071 – 2100, la precipitación proyectada por el modelo Precis en el escenario A2 (altas concentraciones de CO<sub>2</sub>) mostró tanto incrementos como decrecimientos de precipitación de hasta 3 mm/día en variados sectores de la región en todas las épocas del año, y en el escenario moderado B2 (bajas concentraciones de CO<sub>2</sub>) similares al patrón actual con tendencia al decrecimiento de la precipitación. Por otro lado, la temperatura proyectada, obtenida del modelo Precis simuló para los escenarios A2 y B2 incrementos entre 2°C a 4°C, más aún en la cordillera andina con incrementos de hasta 6°C.

---

\* Tesis de grado modalidad investigación

\*\* Facultad Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela Ingeniería Civil. Director Phd. Luis Fernando Salazar.

## ABSTRACT

**TITLE:** ANALYSIS OF REGIONAL CLIMATE MODELS FOR THE NORTH-EASTERN REGION OF COLOMBIA \*

**AUTHORS:** HECTOR FABIAN FANDIÑO USECHE, FABIO ELISEO PADILLA ESTUPIÑAN\*\*

**KEYWORDS:** Climate Scenarios, North-Eastern Colombia, NewETA Model, RegCM3 Model, Precis Model.

The North-Eastern region of Colombia (Santander and North of Santander) is constantly affected by de climate variability wich affect his economic activities and may continue to occur in the future due to climate change. According to this, this paper aims to analyze regional climate models and have an approximation of future projections in precipitation and temperature. For this assessment of future climate change (2071-2100) we used three regional climate models (NewETA, Precis, RegCM3) and analyzed the variables of precipitation and temperature. Initially we validated the present climate (1961-1990) of these three models comparing them to the observed climatology and then analyzed their future projections (2071-2100). The validation results showed that the Precis model were the one who presents better performance simulating precipitation in the studied region, better representing the precipitation annual cycle and overestimating the observed climatology up to 2/mm/day. There was temperature data, but there wasn't data validation because in general the models offer a good representation of it. Being the Precis model the one who get closest to the observed data, were the one that we based on to the possible future climate changes. Then, in the future 2071-2100, rainfall projected by the Precis model in scenario A2 (high CO2 concentrations) showed both increases and decreases in rainfall up to 3mm/day in various sectors of the region in all seasons, and in the moderate scenario B2 (low CO2 concentrations) similar to the current pattern with a tendency to decrease in precipitation. On the other hand, the projected temperature, obtained from the Precis model simulated for scenarios A2 and B2 increases between 2°C to 4°C, especially in the Andes with increases up to 6°C.

---

\* Work degree investigation modality

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering.  
Directress: Phd. Luis Fernando Salazar.

## INTRODUCCIÓN

Se define el cambio climático como la variación global del clima de la tierra. Esta variación se produce debido a causas naturales y también por causa del hombre, quien en el transcurso de la historia se ha encargado de aumentar los gases con efecto invernadero. Este efecto invernadero se origina porque la energía que proviene del sol, al proceder de un cuerpo de muy alta temperatura, está formada por ondas de frecuencias altas que traspasan la atmosfera con gran facilidad. La energía emitida hacia el exterior, desde la tierra, al proceder de un cuerpo mucho más frio, está conformada por ondas de frecuencias bajas, y es absorbida por los gases con efecto invernadero. Esta retención de energía hace que la temperatura sea más alta, aunque hay que entender que en condiciones normales, la cantidad de energía que llega es la misma que sale, si no fuera así, la temperatura de nuestro planeta habría ido aumentando continuamente, cosa que por fortuna no ha sucedido. Para simplificar se podría decir que lo que hace el efecto invernadero es que la energía que llega a la tierra sea “devuelta” más lentamente, lo que hace que esta sea “mantenida” por más tiempo en la superficie y así se mantienen las condiciones de temperatura en la tierra.

El cambio climático se produce a diversas escalas de tiempo y algunas variables que están presentes en esta variación climática son la temperatura, precipitaciones, nubosidad, etc. Es un fenómeno que nos afecta a todos, su impacto potencial ambiental es enorme y sus implicaciones económicas y sociales hacen que se haya convertido en una problemática mundial que se ha incrementado con el tiempo, sus consecuencias serian desastrosas, según estudios realizados los desiertos se harían cálidos pero no mas húmedos, entre un tercio y la mitad de todos los glaciares del mundo y gran parte de los casquetes polares se derretirían, poniendo en peligro ciudades y valles que se encuentren bajo estos glaciares; además, grandes superficies costeras se inundarían debido

al aumento entre 1.5 y 2 m del nivel del mar, a lo que la humanidad tendría que hacer frente en poco tiempo a obras de contención del mar, y la emigración de millones de personas que habitan estos lugares. Dicho lo anterior cabe resaltar que el estudio del cambio climático merece gran importancia.

La Organización meteorológica mundial (OMM) y el programa de Naciones Unidas para el medio ambiente (PNUMA) crearon el grupo intergubernamental de expertos sobre Cambio Climático (IPCC) y es este el que se ha encargado de investigar el fenómeno del cambio climático analizando el comportamiento de este mismo históricamente.

Se han creado modelos matemáticos que analizan series de datos históricos de distintos parámetros climáticos (nubosidad, radiación, precipitación, humedad del suelo entre otros) y cuyos resultados ofrecen una idea del comportamiento climático. En un principio debido a la extensión de la superficie terrestre se crearon modelos con resoluciones espaciales o áreas entre (100 – 300 km<sup>2</sup>) que se llamaron Modelos Globales de Cambio Climático (MGC). Pero con el avance tecnológico y con la poca precisión de los modelos anteriores, se tuvo la necesidad de generar nuevos modelos que ofrecieran mayor precisión mediante una mayor resolución utilizando áreas de estudio más pequeñas (25 – 50 km<sup>2</sup>) a los que se les denominó Modelos Regionales de Cambio Climático (MRC) los cuales nos ofrecen proyecciones del clima más exactas y mejores estimaciones futuras del clima.

Colombia no es ajena a esta problemática mundial a pesar que tan solo emite el 0.35% de gases efecto invernadero del mundo (América Latina emite el 6%), siendo estos gases generados por la humanidad la principal causa del cambio climático. Colombia actualmente posee problemas a causa del cambio climático, pues los inviernos han sido más intensos y sus veranos más secos, esto se debe a alteraciones en su ciclo hidrológico, las cuales pueden tener origen en parte en el

aumento de la temperatura lo que ocasiona el derretimiento de los nevados del país (nevado del cocuy, sierra nevada de santa marta, el nevado del Ruiz entre otros) al mismo tiempo también el aumento de la minería ilegal y la tala indiscriminada de árboles y la destrucción de paramos los cuales son fuentes retro alimentadoras del ciclo hidrológico. Razón por la que se creó un ente gubernamental dedicado específicamente al estudio de estos fenómenos (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia-IDEAM).

Este proyecto se concentrara en analizar la región Nor-Oriental de Colombia (Departamentos de Santander y Norte de Santander), para lo cual utilizaremos tres modelos regionales de cambio climático (Precis, ETA, RegCM3) de resolución  $50 \text{ km}^2$ , a los que validaremos analizando la confiabilidad de estos modelos en la representación de las condiciones climáticas actuales y se analizarán, basados en esta confiabilidad, las proyecciones futuras de cambio climático para esta región. El análisis de los datos climáticos generados por los modelos regionales para las condiciones actuales del clima se realizará a través del cálculo del error cuadrático medio entre la climatología observada y la generada por los MRC.

## **1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

Se llama cambio climático a la variación global del clima de la Tierra. Es debido a causas naturales y también a la acción del hombre y se producen a muy diversas escalas de tiempo y espacio, estudiando más que todos los parámetros climáticos: temperatura, precipitaciones, nubosidad, etc.

Se entiende por clima a las condiciones promedio de variables atmosféricas en un largo periodo de tiempo, para una región determinada. Si se conociera la variación del clima a futuro, se podría tomar medidas que mitigaran los efectos del cambio climático.

Los modelos regionales de cambio climático son herramientas que ayudan en la representación del clima en áreas determinadas, y consideran una mejor resolución espacial que los modelos climáticos globales. Estos modelos permiten estudiar el comportamiento futuro del clima a partir de diferentes escenarios de cambio climático. Como una primera verificación de la confiabilidad de estos modelos, se realiza una validación entre la climatología actual que el modelo genera y los datos observados de variables hidro-climáticas fundamentales, como la temperatura y la precipitación. Después de esta primera validación y considerando los posibles errores que los modelos presentan en la representación del clima, se pueden sacar algunas conclusiones en relación a proyecciones futuras, basados en escenarios climáticos.

En este proyecto se quiere validar estos modelos regionales para la región Nor-Oriental de Colombia, la cual incluye nuestro departamento Santander y su capital Bucaramanga, y además, realizar un análisis de proyecciones a futuro del comportamiento climático de nuestra región basado en el modelo que presente mayor confiabilidad.

## **1.2 OBJETIVOS**

El objetivo principal de este proyecto de grado es determinar la confiabilidad de los modelos regionales de cambio climático para la región Nor-Oriental de Colombia, y evaluar las posibles alteraciones climáticas para diferentes escenarios de cambio climático.

Para lograr esto será necesario analizar la aplicabilidad de los modelos regionales de cambio climático para la región Nororiental de Colombia, evaluar las proyecciones de cambio climático para el final del siglo XXI bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, identificar las zonas afectadas críticamente por el cambio climático y realizar observaciones y

recomendaciones para tratar de disminuir el impacto del cambio climático en la región Nor-Oriental de Colombia.

### **1.3 METODOLOGIA**

Para el desarrollo de los objetivos propuestos, se plantearon varias etapas. La primera de ellas consistió en la conceptualización y la recopilación tanto de los datos observados de precipitación y temperatura, como de los escenarios climáticos regionales que serán analizados.

Luego realizamos la etapa de análisis, la cual contempla el análisis de los modelos regionales de cambio climático aplicado a nuestra región, esta etapa consistirá en el análisis del error cuadrático medio y correlaciones entre los datos observados y los datos generados por el modelo.

También se realizó el análisis de las proyecciones de cambio climático para diferentes escenarios de gases de efecto invernadero y la evaluación de las regiones más vulnerables al cambio climático en la región Nororiental de Colombia.

También se planteo una última etapa, que consiste en el análisis de los resultados y la elaboración del presente informe final.

### **1.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

El conocimiento de la confiabilidad de los modelos climáticos regionales en la representación del clima actual es fundamental para entender las proyecciones futuras de cambio climático. Con este trabajo se pretende mostrar las deficiencias y cualidades que estos modelos ofrecen para la región Nororiental de Colombia. Este análisis servirá como una primera aproximación en la utilización de estos

modelos a nuestra región y presentará las zonas que pueden ser consideradas más vulnerables al cambio climático.

Con este trabajo de grado se busca desarrollar un material para que el estudiante o cualquier persona interesada en los modelos regionales de cambio climático ó en el comportamiento climático de nuestra región puedan acceder a trabajar en ellos con facilidad y dominio en los modelos regionales presentados. Lo anterior dará origen a líneas de investigación relacionadas con la implementación de modelos regionales para análisis de cambio climático dirigido al estudiante universitario.

## 2. INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS CLIMATICOS.

Los modelos globales y regionales de clima son representaciones matemáticas de la naturaleza, su función es simular el comportamiento del clima para un determinado lugar. Sus componentes e interacciones, con un grado de complejidad tal que solo con computadoras pueden ser usados.

En los modelos climáticos globales (MCGs), la superficie de la tierra se divide en grillas o cuadros, de dimensiones iguales; dependiendo del tamaño de la grilla tendremos una resolución espacial alta o baja, por lo tanto a mayor tamaño de la grilla menor resolución, y menor tamaño mayor resolución. Los modelos climáticos globales trabajan con resoluciones espaciales muy bajas, con grillas entre 100 a 500 km de extensión en latitud y longitud aproximadamente; estos dependen del MCGs en el cual se esté trabajando. Los MCGs describen elementos físicos y procesos importantes en la atmósfera, el océano y el suelo que ocurren dentro del sistema climático, además son capaces de reproducir las características básicas del ciclo estacional de la precipitación del presente, aunque estas difieren en la exactitud estacional de la precipitación sobre las principales cuencas del continente.

Algunos MCGs como MIROC, GISS y HadCM3 se han utilizado en Sudamérica obteniendo resultados en los que HadCM3 simula mejor el patrón de circulación de verano y primavera en comparación a los demás modelos globales, pero aunque se aproxima a lo observado no es lo suficiente fino o exacto, ya que esta resolución baja no detecta los cambios en las áreas costeras, zonas de alta topografía, ni fenómenos de pequeña escala, como lluvias de gran intensidad en los valles. Las montañas altas y empinadas de nuestra región no son bien analizadas en los modelos climáticos de baja resolución, por esta razón los errores aparecen por la necesidad de rellenar los detalles regionales que faltan utilizando interpolación lineal.

Como podemos ver una de las desventajas de los MCGs es su resolución espacial, la cual no es adecuada para capturar detalles meteorológicos regionales y locales, ni los procesos físicos como el forzamiento a meso escala asociado con montañas, líneas costeras, lagos y características de vegetación, que influyen fuertemente en los climas locales.

Bhaskaran et al (1996), Zhang et al (2006), Xu et al. (2006), mencionan que se ha encontrado que la precipitación tiene un fuerte componente relacionado con la orografía, que los MCG no resuelven adecuadamente. Otro de los inconvenientes de los MCG, es que requieren una muy alta capacidad de infraestructura, por lo que son económicamente muy costosos.

Con el fin de conocer el impacto del cambio climático a nivel local, se necesita predecir cambios sobre escalas más pequeñas. Una de las técnicas más conocidas para hacer esto, es a través del uso de los modelos regionales de Clima (MCR); los cuales tienen el potencial de mejorar la representación de la información climática, que a su vez, es importante para calcular la vulnerabilidad de un país al cambio climático.

Los modelos climáticos regionales (MCR) por lo general son modelos físicos de atmósfera y superficie terrestre, que contiene procesos importantes en el sistema climático como por ejemplo nubes, radiación, precipitación, humedad en suelo, entre otros. Los MCR no tienen en cuenta el componente oceánico, con el fin de reducir su complejidad y la utilización de recursos informáticos. De cualquier forma, las evaluaciones de impacto, solo requieren de datos de superficie terrestre o de la atmósfera. Es recomendable que las salidas de un MCR sean de por lo menos 30 años, para así obtener una gran estadística climática, como puede ser la distribución de la precipitación diaria o la variabilidad inter-estacional.

Los MCR son la mejor herramienta para reducir de la escala global a regional las características del clima, ya que se obtiene información más detallada de una región en particular; aunque hay otras técnicas de regionalización disponibles, destinadas a refinar la escala (“downscaling”) de la información climática generada por los MCGs. Estas herramientas se conocen tradicionalmente como:

- Modelos de circulación general atmosférica a “intervalos de tiempo” de alta resolución (MCGA).
- MCGAO de resolución variable (VarMCG)
- Modelos climáticos regionales (MCR)
- Métodos de regionalización estadística (SD)

Entre las principales ventajas de usar los MCR, se puede encontrar:(i) una simulación más realista del clima actual, debido a su alta resolución que permite interactuar con el terreno; (ii) predicciones a más detalle del cambio de clima a futuro; (iii) representación de pequeñas áreas; (iv) mejor simulación y predicción en eventos extremos climáticos y (v) generación de datos a detalle para el análisis y estudios de impactos a nivel local.

Algunos aspectos a tener en cuenta en la modelación regional del clima son:

- a. **Dominio del modelo:** En general el dominio del modelo debe ser lo suficientemente grande para que permita desarrollar circulaciones internas de meso escala e incluir forzamientos regionales relevantes (Giorgi & Mearns, 1999).

Hay muchos factores a considerar:

- Escoger el dominio donde el área de interés este bien retirada de la zona lateral intermedia. Esto prevendrá ruido de las condiciones de frontera la cual contaminaría la respuesta en el área de interés.

- Todas las regiones que incluyen forzamientos y circulaciones, que afectan directamente detalles de fina escala del clima regional, deberían ser incluidos en el dominio.
- Es aconsejable no localizar las condiciones de frontera en áreas de terreno complejo para evitar ruidos debido a la discordancia entre los datos de resolución gruesa y el modelo topográfico de alta resolución en el interior adyacente a la zona lateral intermedia.
- Cuando sea posible, localizar las condiciones sobre el océano para evitar posibles efectos de balance energético superficial no realista cerca de las fronteras.
- Escoger un dominio que asegure que la simulación de MCR no diverge del que da el MCG.

Si ésta consistencia no se mantiene entonces los valores de las proyecciones del cambio climático en el MCR son cuestionables.

- b. **Resolución:** La resolución de un MCR debe ser suficientemente alta para resolver detalles de escala fina que caracterice forzamientos regionales. La resolución debería ser también capaz de suministrar información útil para aplicaciones específicas que capturen escalas relevantes de movimiento (Giorgi & Mearns, 1999). En la Figura 1 se observa la diferencia de resolución entre un MCR y un MCG que permite identificar las ventajas en la distribución espacial de de los MCR.

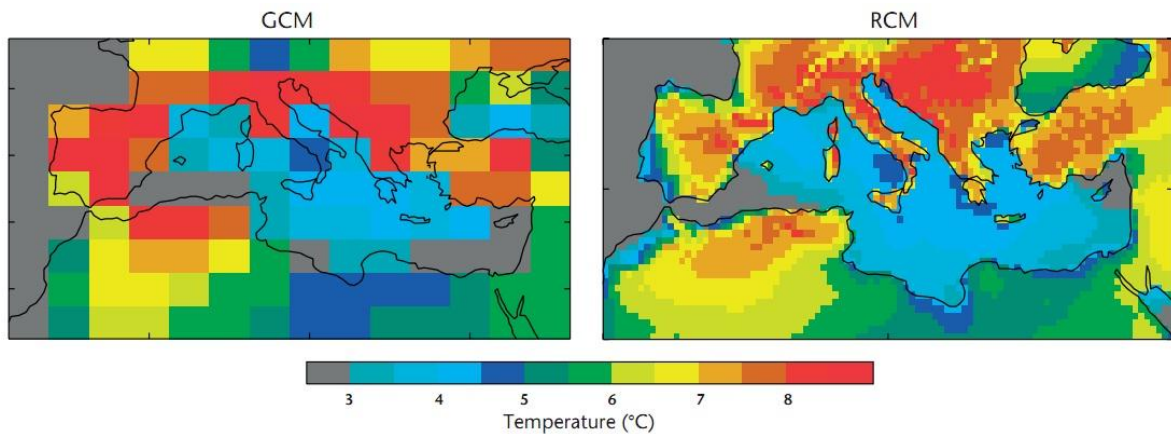


Figura 1. Diferencia resoluciones modelos globales (GCM) y modelos regionales (RCM).

Fuente: Climate Change Scenarios Using Precis, Hadley Center (2004).

- c. **Condiciones iniciales:** Las condiciones iniciales para comenzar la integración en un MCR son tomadas o de los MCG o de las observaciones de Re-análisis (base de datos que contiene información observada e interpolaciones de estas en regiones donde no se cuenta con registros). Sin embargo, el estado inicial de las variables de superficie en el modelo de uso del suelo pueden ser importantes para que éste pueda tomar uno o más ciclos anuales manteniendo un equilibrio con el forzamiento atmosférico. En este caso, simulaciones de temperatura en superficie, precipitación y variables relacionadas podrían ser preferibles dentro del período de inicialización.

Ahora, en cuanto a las condiciones de frontera, hay dos métodos comunes usados para manejar el modelo regional (Kida et al., 1991 & Sasaki et al., 1995):

- El método de Relajación: consiste en la aplicación de un término Newtoniano, el cual lleva la solución del modelo hacia los campos de gran escala sobre la zona intermedia. El término de forzamiento es multiplicado por un factor de peso.

- Anidamiento espectral: los campos de gran escala limitan la componente con un número de onda pequeño a través de todo el dominio, mientras que el modelo regional resuelve la componente de altos números de onda.
- d. **Condición baja de frontera:** la mayoría de los desarrollados hasta la fecha incluyen representaciones de la atmósfera y el suelo solamente. Como un resultado, ellos necesitan ser alimentados con condiciones superficiales sobre los océanos (por ejemplo: Temperatura Superficial del Mar) e información apropiada de extensión y espesor de hielo de mar. En algunas ocasiones, el modelo de suelo requiere información de temperatura de algunos espesores sub-superficiales.
- e. **Longitud de la simulación:** Con el fin de investigar el estado del clima regional, la longitud de la simulación debe ser al menos de 10 años para dar una idea razonable de los cambios climáticos medios; aunque 30 años es preferible para determinar cambios en estadísticas de orden superior. Esto es particularmente importante para analizar aspectos de variabilidad climática, tales como distribuciones de lluvia o climas extremos.
- f. **Representación de los procesos físicos:** Errores en las simulaciones de clima regional se derivan de las condiciones de frontera y la formulación del modelo. En general hay dos aproximaciones que considerar en la formulación de :
- Uso de diferentes formulaciones para el modelo global y regional: La ventaja es que cada modelo está desarrollado y optimizado para su respectiva resolución. La desventaja es que cualquier diferencia de formulación entre el MCG y MCR causa resultados confusos para que las proyecciones del MCR puedan ser interpretadas como una versión de alta resolución de la proyección de MCG.

- Uso de la misma formulación para el modelo global y regional: La ventaja es la máxima compatibilidad y uso de la información diseñada para integrar sobre todas las condiciones climáticas. La desventaja es que cualquier dependencia de la resolución en la formulación del modelo necesita ser corregida o puede traer perjuicios.

Como valor agregado que tienen los modelos regionales de clima (MCRs) sobre los globales, se destaca que:

- Simulan el clima actual de forma más real: donde el terreno es llano por miles de kilómetros y lejos de las costas, la resolución de la malla gruesa de un MCG puede no ser importante. Sin embargo, la mayoría de los suelos tiene montañas, líneas de costa, etc. sobre escalas de 100 kilómetros o menos y los modelos regionales pueden tener en cuenta muchos de los efectos del terreno que los MCGs no hacen.
- Proyectan el cambio climático con mayor detalle: La alta resolución espacial también será aparente, por supuesto, en proyecciones. Cuando el calentamiento es incrementado por gases de efecto invernadero, cambian los patrones de viento sobre una región, luego la presencia de montañas y otras características locales que interactúan con este flujo también cambiarán. Esto afectará la cantidad de lluvia y la posición de las áreas de barlovento y sotavento. Para muchas montañas incluso para cordilleras, tales cambios no son vistos por los MCGs, pero la fina resolución de los MCRs los resolverán.
- Representan las islas más pequeñas: La superficie del suelo tiene una capacidad calorífica más baja que los océanos y se calentarán más rápido. Si la superficie de la isla tiene montañas significativas, estas tendrán una influencia sustancial sobre los patrones de precipitación. En un MCR,

muchas de las islas son vistas y los cambios proyectados pueden ser muy diferentes a aquellos sobre los que se presentarían en el océano cercano.

- Pueden simular ciclones y huracanes: no sabemos si los huracanes serán más o menos frecuentes con la aceleración del calentamiento global, aunque hay indicadores que ellos serán más severos. Resoluciones de unos cientos de kilómetros de los MCGs no permiten representar propiamente huracanes, mientras que MCRs, con su alta resolución puede representar tales características de meso escala.

Teniendo en cuenta los aspectos en la modelación regional del clima mencionamos a continuación los MCR con los que trabajamos.

### 3. MODELOS REGIONALES Y CLIMATOLOGIA UTILIZADA

#### 3.1 NewETA

El concepto del modelo regional ETA se deriva de la Universidad de Belgrado, por Fedor Mesinger y Zavisla Janjic, en colaboración con el Instituto de Hidrometeorología de Yugoslavia, y entró en funcionamiento en los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP) (Mesinger et al 1988;. Black, 1994). Este modelo se implanto en el CPTEC (En el Centro de Pronóstico del Tiempo y Estudios Climáticos) de Brasil en 1996, para complementar la predicción numérica del tiempo que ha llevado a cabo desde principios de 1995 con el modelo de circulación general atmosférica. En Sudamérica principalmente desarrollado por Brasil pero con la capacidad de adaptarse mas allá de sus fronteras. El modelo NewETA tiene en cuenta seis parámetros; temperatura, presión, humedad relativa del aire y viento- con tres componentes, uno para cada eje cartesiano del espacio. Con el modelo regional NewETA, es posible obtener, para toda América del Sur y océanos adyacentes, resoluciones de 40 km x 40 km.

Los profesionales brasileños involucrados en el proyecto NewETA fueron capacitados en Estados Unidos, en donde se produjo la primera versión oficial del Eta, que entró en funcionamiento en 1997, pero precariamente. Desde entonces, el equipo se ha empeñado en mejorar el modelo regional, adaptando cada vez más sus parámetros a la realidad brasileña. Así llegaron a la versión actual, cuya principal novedad consiste en la incorporación de los efectos meteorológicos producidos por la vegetación, que no formaban parte del modelo original. El NewETA tiene también una descripción más detallada de la topografía y una evaluación más sofisticada del mecanismo de formación de las lluvias.

El modelo cubre un área que va desde los 55 grados de latitud sur (en el extremo sur del continente) hasta los 15 grados de latitud norte (en el Mar de las Antillas) y

desde los 30 grados de longitud oeste (en el Océano Atlántico) hasta los 90 grados de longitud oeste (en el Océano Pacífico, a la altura de las Islas Galápagos). Se extiende, por lo tanto, mucho más allá de las fronteras de Brasil, y esto ayuda a detectar e incorporar las interferencias de factores externos, tales como la temperatura de los océanos.

En esta escala continental, el modelo NewETA permite efectuar pronósticos a cada hora para plazos de 12, 24, 36, 48, 60 y 72 horas.

Este último intervalo de tiempo es el límite máximo, porque, en meteorología, el precio que se paga por un mayor detalle es la disminución del plazo del pronóstico. Las previsiones de largo plazo son necesariamente genéricas pues apenas se puede cualificar con palabras como 'poco', 'mucho' o 'más o menos'. Cuando se pretende algo más que eso, se debe sacrificar el plazo.

### **3.2 PRECIS**

El modelo regional PRECIS es un sistema de modelado regional derivado del GCM de tercera generación del Hadley Centre en el Reino Unido, el cual puede ser configurado para correr sobre cualquier área del globo, en ordenadores personales relativamente potentes. El modelo PRECIS está disponible gratis para ser usado por científicos en países en desarrollo involucrados en estudios de vulnerabilidad y adaptación llevados a cabo por sus gobiernos. La idea de construir un modelo regional flexible tiene origen en la creciente demanda de muchos países para las proyecciones del clima a escala regional. Sólo unos pocos centros de pronóstico del clima en el mundo han desarrollado modelos climáticos regionales para generar proyecciones sobre las áreas específicas, ya que esta tarea requiere una gran demanda de personal calificado y experimentado en el análisis de modelos climáticos, además de potentes ordenadores para la realización de los cálculos. Sus creadores han hecho que el RCM de tercera generación del Centro Hadley sea fácil de configurar. Esto, junto con el software

para permitir la visualización y el tratamiento de los datos producidos por el RCM, forma PRECIS.

El modelo climático regional PRECIS usa como condiciones de fronteras los datos suministrados por el GCM del Hadley Centre correspondiente a un rango de escenarios de emisión. El modelo PRECIS produce enormes cantidades de datos climáticos incluidos variables estándares como la temperatura y la precipitación para períodos futuros (2070-2100). Debido a su alta resolución, se pueden recrear escenarios de cambio climático nacionales para países pequeños como los que componen el área del Caribe. Además con el modelo PRECIS se proveen software para el post-procesamiento, análisis y graficación de los datos generados por el modelo. Además es un modelo atmosférico y de suelo, de área limitada y alta resolución el cual requiere la descripción de la superficie y condiciones laterales de frontera. Las condiciones de superficie son solo requeridas en el agua, donde los modelos necesitan series de tiempo de temperatura superficial del mar y extensiones de hielo. Las condiciones laterales de frontera suministran información de la dinámica atmosférica en los bordes latitudinales y longitudinales del dominio. No hay restricción prescrita en las condiciones de altura del modelo. Las condiciones laterales de frontera comprenden variables atmosféricas estándar como la presión en superficie, las componentes horizontales del viento y medidas de temperatura y humedad. También ciertas configuraciones de PRECIS contienen la representación total del ciclo de azufre y un conjunto de condiciones de frontera (incluyendo SO<sub>2</sub>, aerosoles sulfatados y especies químicas asociadas) que también son requeridas.

El modelo PRECIS (Providing REgional Climates for Im-pacts Studies) forma parte de la versión del modelo de circulación regional británico HadRM3P, el cual tiene 19 niveles verticales y dos posibles resoluciones horizontales, 25 y 50km. Las condiciones de borde pueden ser elegidas de varias posibles opciones dependiendo el periodo en el cual se necesitan las simulaciones. Para el caso del

periodo 1961-1990 existen resultados no solamente obtenidos de GCMs sino también de fuentes observacionales como los re-análisis europeos y estadounidenses. Como todo modelo climático las características de la resolución de las ecuaciones de desenvolvimiento atmosférico suelen dividirse en dos partes, una denominada "dinámica" y otra denominada "física".

En cuanto a la dinámica del modelo, éste es hidrostático, es decir no considera de manera explícita los procesos convectivos que generan nubes y por lo tanto no determina de manera directa la precipitación.

En cuanto a la física del modelo, se recurren a parametrizaciones, que son representaciones de fenómenos que ocurren en una escala menor que la resolución del modelo. Este proceso se logra utilizando funciones determinísticas simples. Para los procesos como la formación de nubes y precipitación se utilizan parametrizaciones. La radiación sigue el esquema desarrollado por Edwards y Slingo (1996). Estos esquemas son fijos independientemente de las características geográficas sobre las que se corre el modelo. Para fines de la solución de las ecuaciones, los años son de 360 días y cada mes consta de 30 días.

### **3.3 RegCM3**

El modelo de RegCM (Giorgi et al., 1993), que se originó en el NCAR (National Center for Atmospheric Research) surge de una versión de meso-escala. El modelo RegCM describe los procesos de interacción suelo-planta-atmósfera utilizando el BATS (Biosfera-Atmósfera del Esquema de Transferencias; Dickinson et al 1993). Este modelo considera la presencia de la vegetación y la interacción del suelo con los cambios de tiempo, energía y vapor de agua entre la atmósfera y la superficie. Este modelo regional posee una capa de vegetación, una de nieve y tres capas de suelo a diferentes profundidades.

El ciclo hidrológico se obtiene por medio de ecuaciones para predecir el contenido de agua en tres capas. Por último, el flujo de calor, vapor de agua y de movimiento en la superficie se calcula en términos de coeficientes de resistencia obtenidos a partir de la teoría de similitud aplicada a la superficie. El transporte de calor, el impulso y la humedad en la capa límite planetaria (CLP) se deriva del producto entre el gradiente vertical de estas variables y el coeficiente de difusión vertical con las correcciones propuestas por Holtslag et al. (1990).

La versión RegCM3 conserva la misma estructura de las versiones anteriores, pero incluye nuevas características tales como los gases de efecto invernadero (NO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CFC), los aerosoles atmosféricos, y hielo en las nubes.

Los principales cambios se dan en el análisis de las nubes y precipitación. La humedad explícita original del esquema ha sido sustituida por una versión simplificada, debido a que los costos computacionales eran demasiado elevados para ser ejecutados en modo climático. En el régimen simplificado hay una única ecuación para predecir el agua en la nube.

La principal novedad de este régimen, radica en la microfísica simplista, pero el hecho de que la nube de pronóstico de variable del agua se utiliza directamente en los cálculos nube de radiación.

Esta nueva función añade un elemento muy importante y de gran alcance de la interacción entre el ciclo hidrológico simulado y la energía cálculos de presupuesto.

Los cambios en la física del modelo incluyen la nube de gran escala y el esquema de la precipitación que representa la variabilidad de la sub-cuadrícula escala de las nubes (Pal et al., 2000), nuevas parametrizaciones para los flujos de la superficie del océano (Zeng et al. 1998), y el esquema de convección de cúmulos (Emanuel, 1991, Emanuel y Zivkovic Rothman, 1999).

Otra de las novedades en el modelo es la parametrización de tipo mosaico de heterogeneidad sub-cuadrícula escala en el uso y la topografía de la tierra (Giorgi et al. 2003b).

### **3.4 Climatología Observada**

La climatología mensual de precipitación y temperatura del aire es de Willmott y Matsuura (1998) con rango de  $0.5^\circ * 0.5^\circ$ . Esta climatología comprende el período de 1961 a 1990 y fue realizada con métodos de interpolación a partir de datos observados en todo el mundo.

#### 4. ZONA DE ESTUDIO

Como se mencionó en el título de nuestra tesis, nuestra zona de estudio corresponde a la región Nor-Oriental de Colombia, la cual incluye los departamentos de Santander y Norte de Santander. A continuación se hará una descripción de cada uno de los departamentos predominantes en esta región.

##### a. Departamento de Santander

El Departamento de Santander está ubicado al nor-oriental del país, entre las latitudes **05°42'34" N** y **08°07'58" N**, y las longitudes **72°26' W** y **74°32' W**. Tiene una extensión de 30.537 km<sup>2</sup>, aproximadamente el 2.7 % del territorio nacional. Limita por el Norte con los departamentos de Cesar y Norte de Santander, por el Este y por el Sur con el departamento de Boyacá y por el Oeste con el río Magdalena que lo separa de los departamentos de Antioquia y Bolívar.

En su relieve se distinguen dos grandes unidades fisiográficas denominadas Valle Medio del Magdalena y la cordillera Oriental. El valle del Magdalena se caracteriza por un territorio plano y suavemente ondulado; en sus márgenes predomina la vegetación selvática y al oriente de éstas, se encuentra una faja de bosque ecuatorial.

Por su parte, la cordillera Oriental ocupa la mayor parte del departamento, su relieve es quebrado y de pendientes fuertes con alturas superiores a los 3.000 m.s.n.m, sobresalen algunos accidentes orográficos, como los páramos de Chontales, Consuelo, Cruz Colorada, Carcasí, Almorzadero y Santurbán.

También hacen parte de esta cordillera occidental, una serie de terrazas de ambiente muy seco (ej. La mesa de los Santos); estas mesetas se presentan en forma escalonada, muy erosionadas y cortadas abruptamente ante el cañón del Chicamocha.

La red hidrográfica de este departamento está conformada por numerosos ríos, quebradas y corrientes menores, entre ellos se destacan por su importancia los ríos Magdalena, Carare, Lebrija, Opón, Sogamoso.

El departamento de Santander presenta variedad de climas, esto debido a la diversidad de altitudes presentes, la cual proporciona pisos térmicos y paisajes diferentes. En el valle del bajo Magdalena, las temperaturas promedio son del orden de 29°C y precipitaciones abundantes, registrándose hasta 3.800 mm anuales; en el flanco de la cordillera disminuye la temperatura, las precipitaciones son de 1.500 a 2.000 mm en promedio anual; cabe destacar que en el sur del Departamento, especialmente en el cañón del Chicamocha la precipitación es menor de 500 mm diarios, y altas temperaturas que alcanzan valores hasta de 32°C; el área de los páramos registra temperaturas inferiores a 7°C y escasa precipitación. Sus tierras se distribuyen en los pisos térmicos cálidos, templados y bioclimático páramo.

#### **b. Departamento de Norte de Santander**

El **Departamento de Norte de Santander** está ubicado en el nor-orienté del país; entre las latitudes **06°56'42' N** y **09°18'01" N** y las longitudes **72°01'13" W** y **73°38'25" W**. Tiene una extensión de 22.367 km<sup>2</sup>, aproximadamente el 1.9% del territorio nacional. Limita por el Norte y Este con la República de Venezuela, por el Sur con los departamentos de Boyacá y Santander, y por el Oeste con los departamentos de Santander y Cesar.

Este departamento se caracteriza por tener un relieve montañoso, aunque se pueden distinguir dos grandes unidades fisiográficas, una montañosa y una plana. La montañosa corresponde a la cordillera Oriental, cuya parte meridional, en límites con el departamento de Santander, forma el nudo de Santurbán, del cual

se desprenden dos grandes ramales, uno que sigue hacia el norte para formar la serranía de los Motilones y otro hacia el noreste, que se interna en la República de Venezuela.

Se destacan numerosas elevaciones, entre ellas los páramos de Tamá con 3.329 m.s.n.m. y Santurbán.

Por la distribución del relieve, las corrientes fluviales del departamento de norte de Santander pertenecen a tres cuencas hidrográficas: por el occidente la del Magdalena, por el norte la del Catatumbo y por el sureste la del Orinoco. Dentro de los principales río que riegan sus tierras se encuentran el Magua, Borra, Cáchira.

El relieve departamental de Norte de Santander determina una amplia variedad de climas; las temperaturas van desde los 30°C, en los valles del Zulia y Catatumbo, hasta los 3°C en los altos páramos. El régimen de lluvias varía de norte a sur; en tanto que en las tierras selváticas del Catatumbo la precipitación alcanza los 3.500 mm anuales; en el sur, valle del Zulia y zonas montañosas, sólo se registran 500 mm. Por las características del relieve se encuentran los pisos térmicos cálido, templado y frío y el piso bioclimático páramo.

Para abarcar ambos departamentos fue necesario delimitar la zona de estudio en coordenadas geográficas enunciadas a continuación:

**Latitud: 5.30° N – 9.30° N**

**Longitud: 74.30° W – 71.30° W**

Se puede observar que en la zona de estudio también se incluyó una parte del territorio de la República de Venezuela al estar delimitado por las coordenadas escogidas, así mismo, se incluyó sectores de los departamentos de Bolívar, Boyacá y Casanare.

Para visualizar mejor la zona de estudio, a continuación presentamos una figura que la representa:

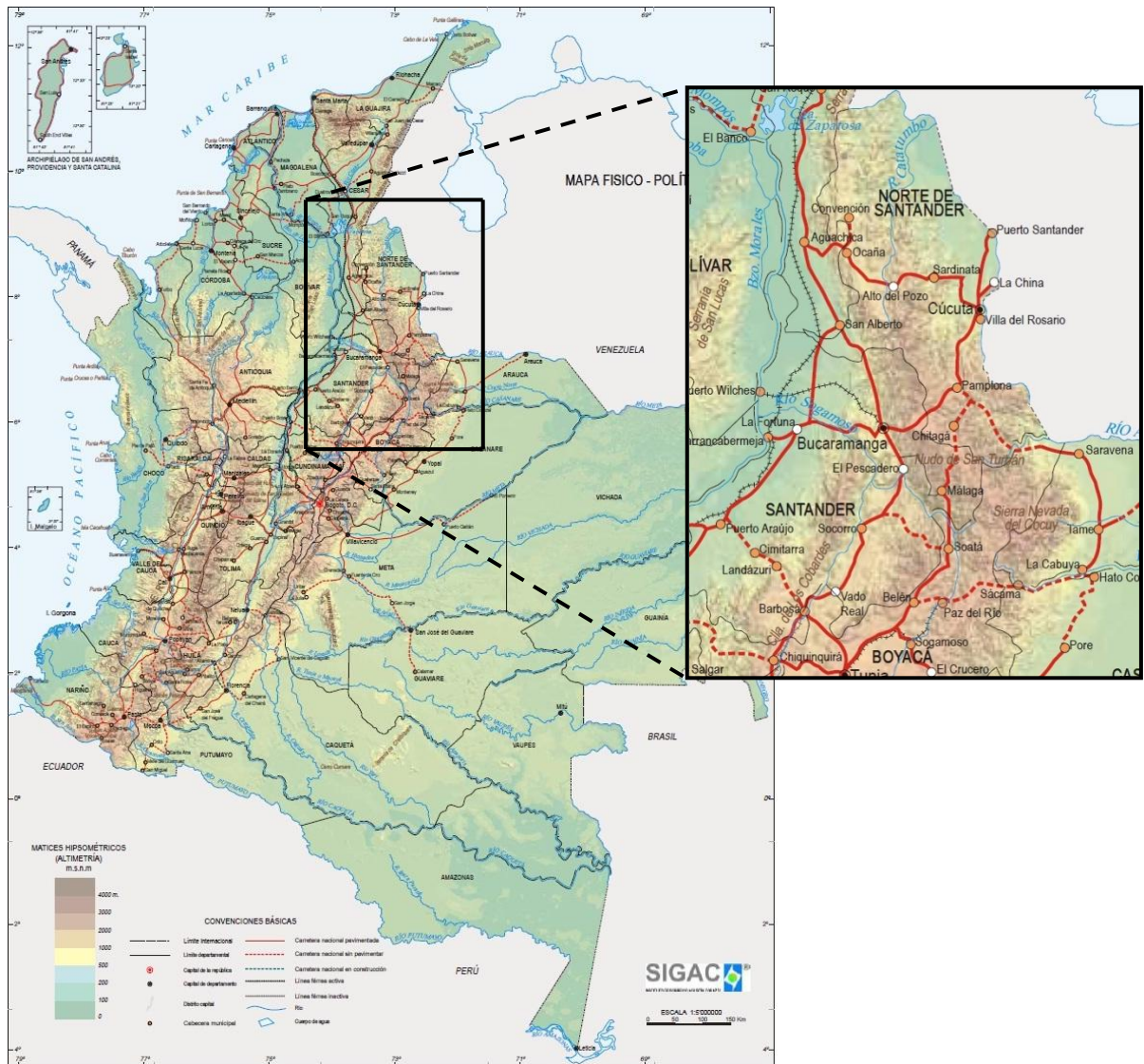


Figura 2. Ubicación Zona de Estudio

Fuente: Elaboración Propia Basado en mapas Agustín Codazzi

## 5. ANALISIS DE DATOS CLIMATICOS EN ZONA DE ESTUDIO

### 5.1 Climatología del período actual

El análisis de los datos climáticos en la zona de estudio se realizó en un software de análisis de variables espaciales, el cual toma datos de los MCR y de la climatología observada para esta zona, realiza el análisis del error cuadrático medio entre cada modelo y la climatología observada, posteriormente grafica los resultados. Los análisis se realizaron para el total anual y para los trimestres: MAM (Marzo, Abril y Mayo); JJA (Junio, Julio y Agosto); SON (Septiembre, Octubre y Noviembre) y DEF (Diciembre, Enero y Febrero). La comparación entre todos los modelos analizados y la climatología observada se puede observar en la figura 3.

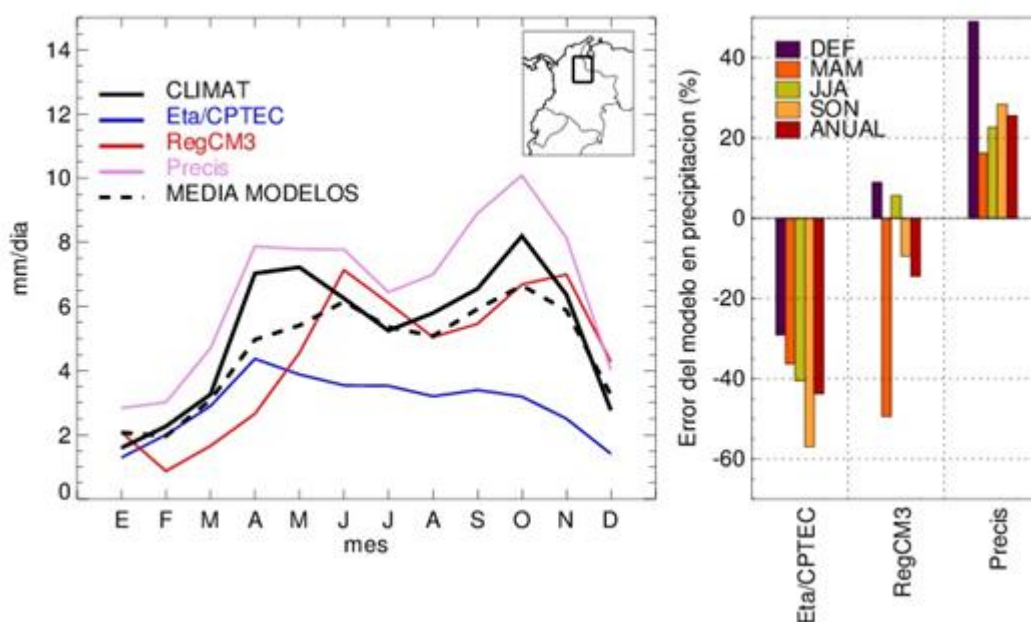


Figura 3. Ciclo anual de la climatología (1961-1990) de precipitación observada (CLIMAT) y simulada por los tres modelos regionales para el nordeste de Colombia (región presentada en la figura). A la derecha se presenta el error cuadrático medio de la precipitación entre los modelos regionales y la climatología observada en la zona de estudio para los trimestres analizados y el total anual.

A continuación se realizará un análisis por separado de cada modelo regional y de la climatología observada.

### 5.1.1. Climatología Observada

Se observó que los datos que se tomaron como climatología observada (CLIMAT), presentaron un comportamiento bimodal de precipitación, es decir, se presentan dos épocas claras al año de altas precipitaciones, consistente con la realidad histórica del comportamiento de la precipitación en nuestra región (Figura 4).

El primer periodo de lluvias en el trimestre de marzo, abril y mayo presenta precipitaciones promedio de 7.5 mm/día, y el segundo periodo de lluvias en el trimestre de septiembre, octubre y noviembre presentando precipitaciones promedio de 8 mm/día. También se observó un predominante periodo seco en los meses de diciembre, enero y febrero.

Este comportamiento de climatología observada se tomará como base para la comparación de los comportamientos de los modelos regionales utilizados.

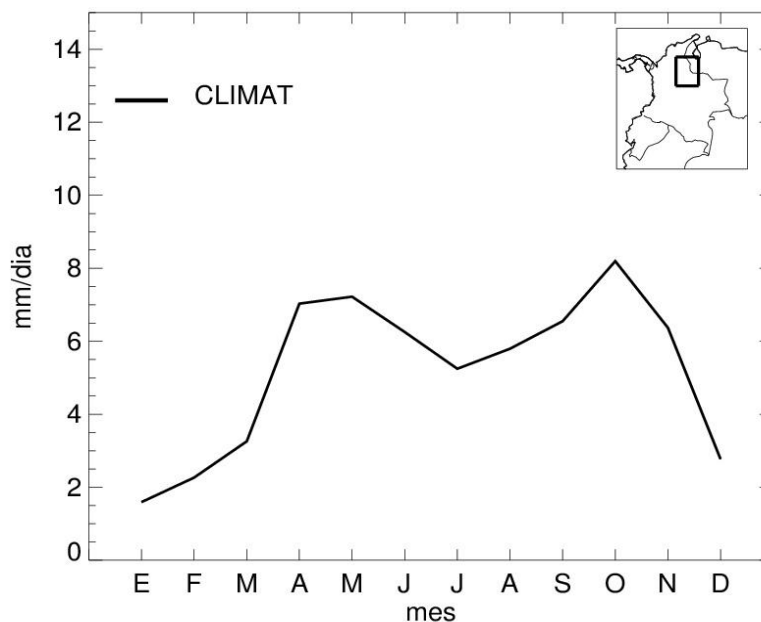


Figura 4. Ciclo anual de la climatología (1961-1990) de precipitación observada (CLIMAT) para el nordeste de Colombia.

### 5.1.2 Modelo Regional NewETA (Eta/CPTEC)

El modelo regional ETA(Eta/CPTEC), fue el que presentó peores resultados de los modelos estudiados, debido a la gran diferencia que presenta la climatología del modelo con la climatología observada, alcanzando errores de más del 50% en el trimestre de septiembre, octubre, noviembre (Figura 5).

Además de lo anterior el comportamiento de la precipitación de este modelo no se asemeja al comportamiento bimodal de la precipitación presente en nuestra región.

Por lo tanto podemos afirmar que el modelo regional ETA no representa el comportamiento climatológico de la región Nor-Oriental de Colombia.

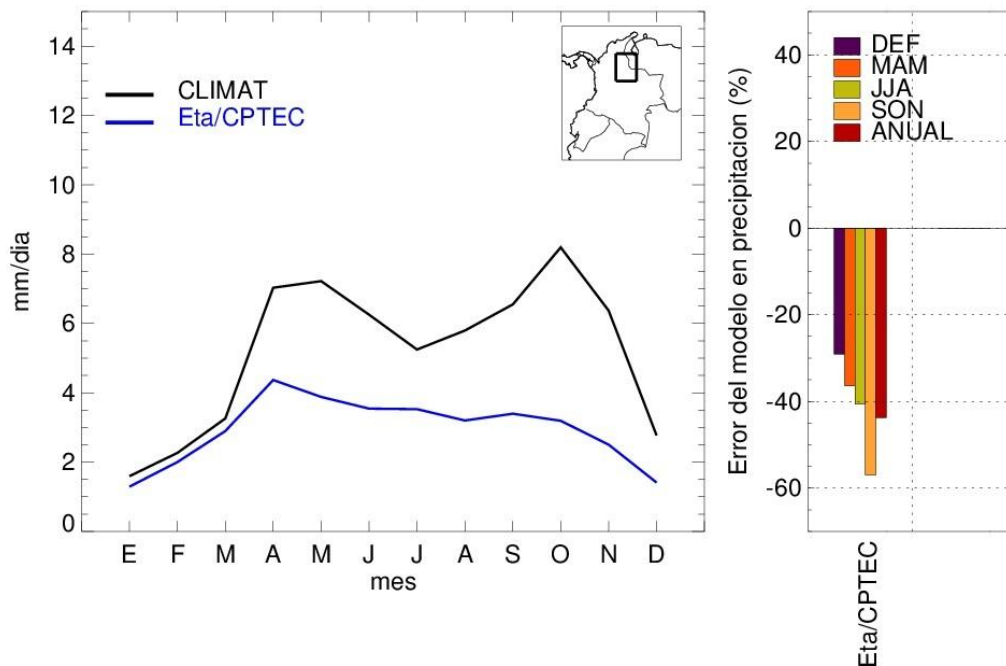


Figura 5. Ciclo anual de la climatología (1961-1990) de precipitación observada (CLIMAT) y simulada por el modelo regional NewETA (Eta/CPTEC) para el nordeste de Colombia (región presentada en la figura). A la derecha se presenta el error cuadrático medio de la precipitación entre el modelo regional y la climatología observada en la zona de estudio para los trimestres analizados y el total anual.

### 5.1.3 Modelo Regional RegCM3

El modelo regional RegCM3, es el que menor error anual (12%) tiene en la medición de la precipitación en base a la climatología observada. Además el RegCM3 también tiene un comportamiento climático bimodal asemejándose al comportamiento climático de nuestra región.

Sin embargo el RegCM3 tiene algunas diferencias en cuanto a los periodos donde se presentan los valores pico de precipitación, por decirlo de otra manera, los valores obtenidos mediante el RegCM3 están desfasados respecto de los obtenidos por la climatología observada (Figura 6).

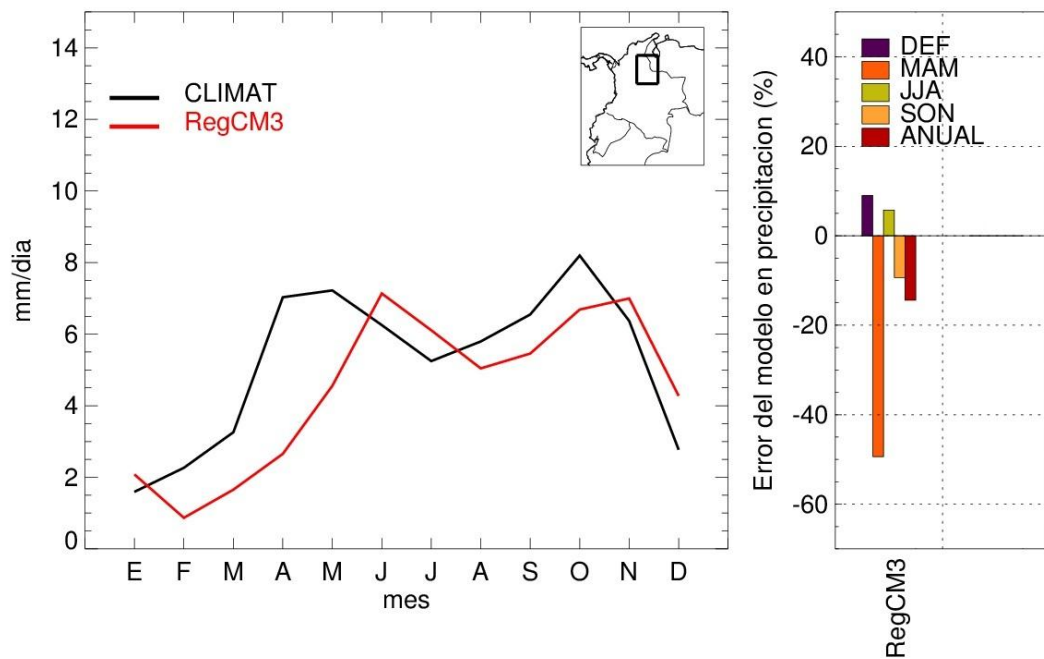


Figura 6. Ciclo anual de la climatología (1961-1990) de precipitación observada (CLIMAT) y simulada por el modelo regional RegCM3 para el nordeste de Colombia (región presentada en la figura). A la derecha se presenta el error cuadrático medio de la precipitación entre el modelo regional y la climatología observada en la zona de estudio para los trimestres analizados y el total anual.

Podemos observar que el valor pico del primer periodo de lluvias de la climatología observada se presenta en el mes de ABRIL, contrastando con el valor pico del primer periodo de lluvias del RegCM3 que se presenta en JUNIO. Aun cuando el valor es similar el hecho de que se encuentre en otro periodo de tiempo hace que no refleje el comportamiento de nuestra región.

De la misma manera podemos observar que el valor pico del segundo periodo de lluvias de la climatología observada se presenta en el mes de OCTUBRE, contrastando con el valor pico del segundo periodo de lluvias del RegCM3 que se presenta en el mes de NOVIEMBRE y además este valor es menor aproximadamente en 1.5 mm/día al valor pico del segundo periodo de lluvias de la climatología observada.

Por lo tanto podemos afirmar que el modelo regional RegCM3 no representa el comportamiento climatológico de la región Nor-Oriental de Colombia.

#### **5.1.4 Modelo Regional PRECIS**

El modelo regional Precis, presenta un error anual del 25 % en la medición de la precipitación respecto a la climatología observada. Sin embargo el Precis presenta un comportamiento climático bimodal semejante al comportamiento climático de los datos observados (Figura 7).

A diferencia del anterior modelo, el Precis tiene los valores picos de sus periodos lluviosos en el mismo periodo de tiempo en el que se presentan los valores picos de periodos lluviosos para la climatología observada, es decir, tanto el Precis como la climatología observada tienen sus periodos de lluvia en los trimestres de marzo, abril, mayo y de septiembre, octubre y noviembre.

Si bien el error en la medición anual se debe a que los resultados del comportamiento climático anual del Precis sobreestiman el comportamiento de la climatología observada llevando a tener diferencias de hasta 1.5 mm/día, estas diferencias no son tan elevadas y por ello no es razón suficiente para decir que

este modelo no representa el comportamiento de la región Nor-oriental de Colombia.

El hecho de que el comportamiento climático del modelo regional Precis tenga la misma periodicidad, es decir las épocas secas y las épocas lluvias en el mismo periodo de tiempo en el que se presentan estas épocas en la climatología observada, es razón suficiente para afirmar que este modelo regional es el que mejor representa el comportamiento climático de la región Nor-Oriental de Colombia, destacando que sus resultados sobreestiman los resultados de la climatología observada.

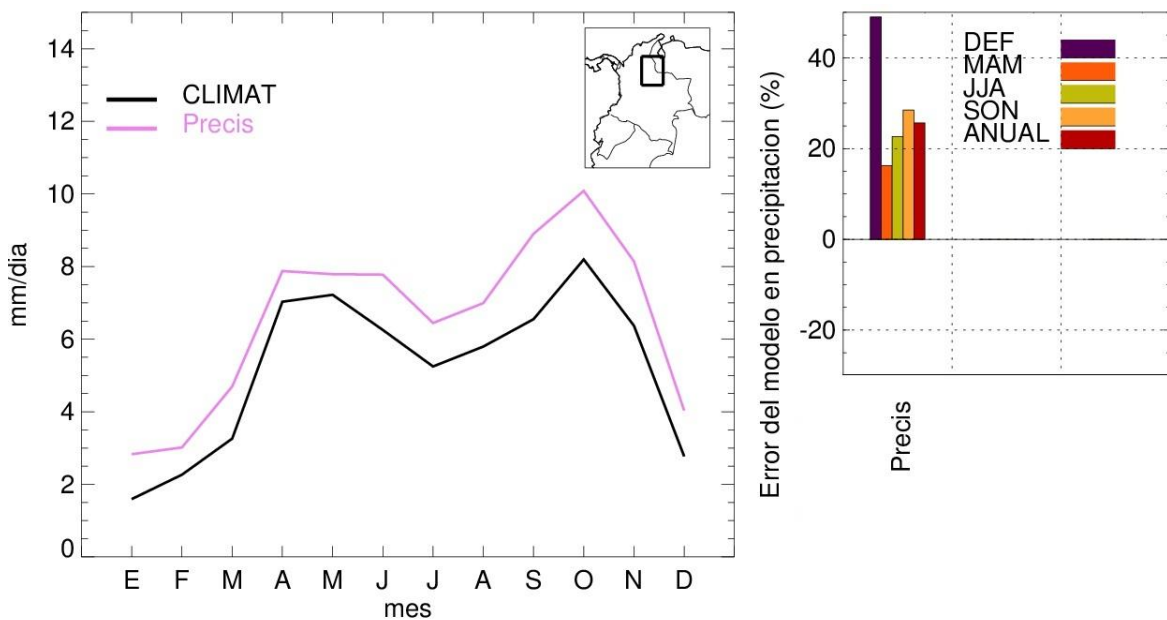


Figura 7. Ciclo anual de la climatología (1961-1990) de precipitación observada (CLIMAT) y simulada por el modelo regional Precis para el nordeste de Colombia (región presentada en la figura). A la derecha se presenta el error cuadrático medio de la precipitación entre el modelo regional y la climatología observada en la zona de estudio para los trimestres analizados y el total anual.

## **5.2 Proyecciones futuras**

Antes de hablar de las proyecciones futuras y sus resultados es necesario hablar de los escenarios de cambio climático, pues son la base de las proyecciones.

A fin de describir de manera coherente las relaciones entre las fuerzas determinantes de las emisiones y su evolución, y para añadir un contexto a la cuantificación de los escenarios, se desarrollaron cuatro líneas evolutivas diferentes. Los 40 escenarios resultantes (35 de los cuales contienen datos sobre toda la gama de gases necesarios para forzar los modelos climáticos) abarcan las principales fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas que determinarán las emisiones futuras de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y azufre. Cada escenario representa una interpretación cuantitativa específica de una de las cuatro líneas evolutivas. El conjunto de escenarios basados en una misma línea evolutiva constituye una "familia" de escenarios (véase la Tabla 1, que describe brevemente las principales características de las cuatro líneas evolutivas y familias de escenarios del Informe especial sobre escenarios de emisiones (IE-EE)). Los escenarios del IE-EE no incluyen otras iniciativas relacionadas con el clima, lo que significa que ninguno de ellos se basa explícitamente en la hipótesis de cumplimiento de la Convención Marco sobre el Cambio Climático o de los objetivos de emisiones del Protocolo de Kioto. Sin embargo, las políticas no vinculadas al cambio climático que apuntan a muchos otros fines (p.ej., la calidad del aire) influyen directamente en las emisiones de GEI. Por otra parte, las políticas de los gobiernos pueden repercutir, en distinta medida, en los factores determinantes de las emisiones, como el cambio demográfico, el desarrollo social y económico, el cambio tecnológico, el uso de los recursos o la gestión de la contaminación. Esta influencia se refleja ampliamente en las líneas evolutivas y escenarios resultantes.

Tabla 1: Los escenarios de emisiones del Informe especial sobre escenarios de emisiones (IE-EE)

<p><b>A1</b></p>	<p>La línea evolutiva y familia de escenarios A1 describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Los tres grupos A1 se diferencian en su orientación tecnológica: utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía no de origen fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B).</p>
<p><b>A2</b></p>	<p>La línea evolutiva y familia de escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. El índice de natalidad en el conjunto de las regiones converge muy lentamente, con lo que se obtiene una población en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.</p>
<p><b>B1</b></p>	<p>La línea evolutiva y familia de escenarios B1 describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza su valor</p>

	<p>máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios en las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y ambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.</p>
<b>B2</b>	<p>La línea evolutiva y familia de escenarios B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas A1 y B1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.</p>

Fuente: Informe especial sobre escenarios de emisiones (IE-EE)

A continuación mostraremos una breve descripción de las proyecciones de CO<sub>2</sub> en los diferentes escenarios, tomado de (Salazar, 2009).

En el escenario A2 (A1B, B1) la concentración de CO<sub>2</sub> alcanza valores de 850 ppm (720 ppm, 550 ppm) en 2100, posterior a esta fecha se mantiene constante la concentración de CO<sub>2</sub> para los escenarios A1B y B1. La figura 8. Muestra la evolución de las emisiones y concentraciones de CO<sub>2</sub> para los diferentes escenarios.

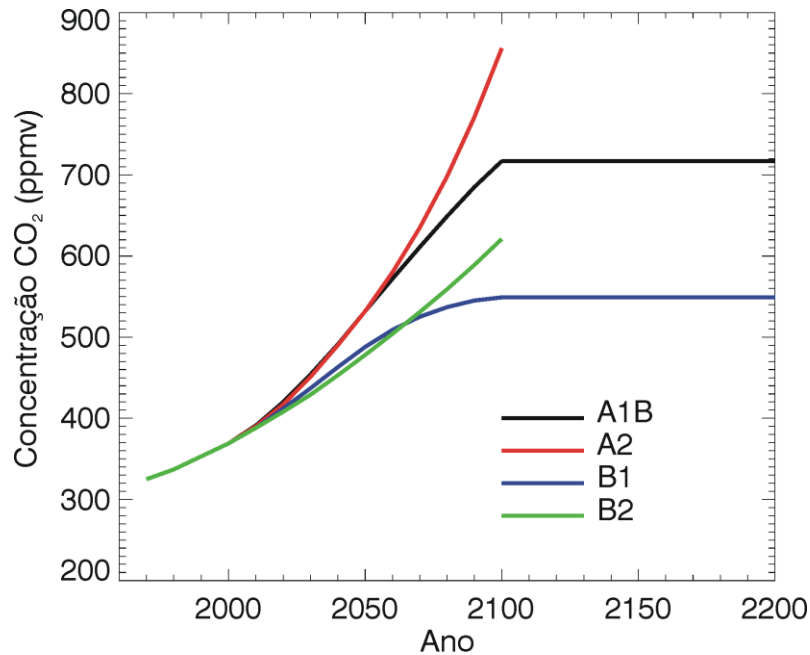


Figura 8. Evolución de las concentraciones de CO<sub>2</sub> para diferentes escenarios de emisiones; traducción leyenda eje vertical: “Concentración CO<sub>2</sub> (ppmv)”, traducción leyenda eje horizontal: “Año”.

Fuente: (Salazar, 2009).

Los escenarios A2 y B2 representan un rango importante de escenarios de emisiones, por ser un escenario pesimista y un optimista. Debido a la disponibilidad de información serán analizadas las proyecciones futuras de cambio climático en la Región Nor-Oriental de Colombia para estos dos escenarios.

Como resultado del análisis de las proyecciones de cambio climático para la región Nor-Oriental de Colombia se obtuvieron graficas donde se puede observar la distribución de las anomalías en el territorio escogido (entiéndase anomalías como la diferencia de los valores futuros con los valores presentes generados por el mismo modelo).

Así como en el análisis de la climatología actual se realizó análisis de cada trimestre (DEF, MAM, JJA, SON) y anual, estando organizados verticalmente en ese orden enunciado.

Se graficó con una barra de colores en base al valor de las anomalías, escogiendo un rango entre -3 mm/día y +3 mm/día para precipitaciones y de +0° C y +6° C para temperatura.

Los análisis se realizaron para todos los modelos, pero específicamente nos centraremos en el modelo regional que mejores resultados presentó en el análisis de la climatología observada, el PRECIS.

### **5.2.1 Proyección Modelos Regionales Escenario A2**

#### **a) Precipitación**

El análisis de las proyecciones de precipitación para este escenario se muestra en la figura 9, pudiéndose destacar lo siguiente:

Se puede observar que el modelo regional NewETA presenta muy pocas variaciones tal como se puede evidenciar en la grafica de anomalías anuales, cabe aclarar que este modelo fue el que peores resultados presentó en el análisis de la climatología actual, y se evidenció que este modelo no representa el comportamiento climático de nuestra región.

El modelo regional RegCM3 presenta pocas variaciones negativas en los dos primeros trimestres (DEF, MAM) del orden de -0.5 a -1 mm/día. Seguido de esto se evidencia grandes variaciones negativas en el trimestre (JJA) para casi todo el territorio alcanzando los -3 mm/día. Continuando la tendencia en el último trimestre del año (SON) se presentan variaciones negativas aproximadamente de -2 mm/día, aunque con un aumento considerable de la precipitación del orden de 2.5 mm/día, en el sector de la frontera de Santander con Boyacá. En general se

presenta una tendencia a la disminución de la precipitación como se puede evidenciar en la grafica de anomalías anuales.

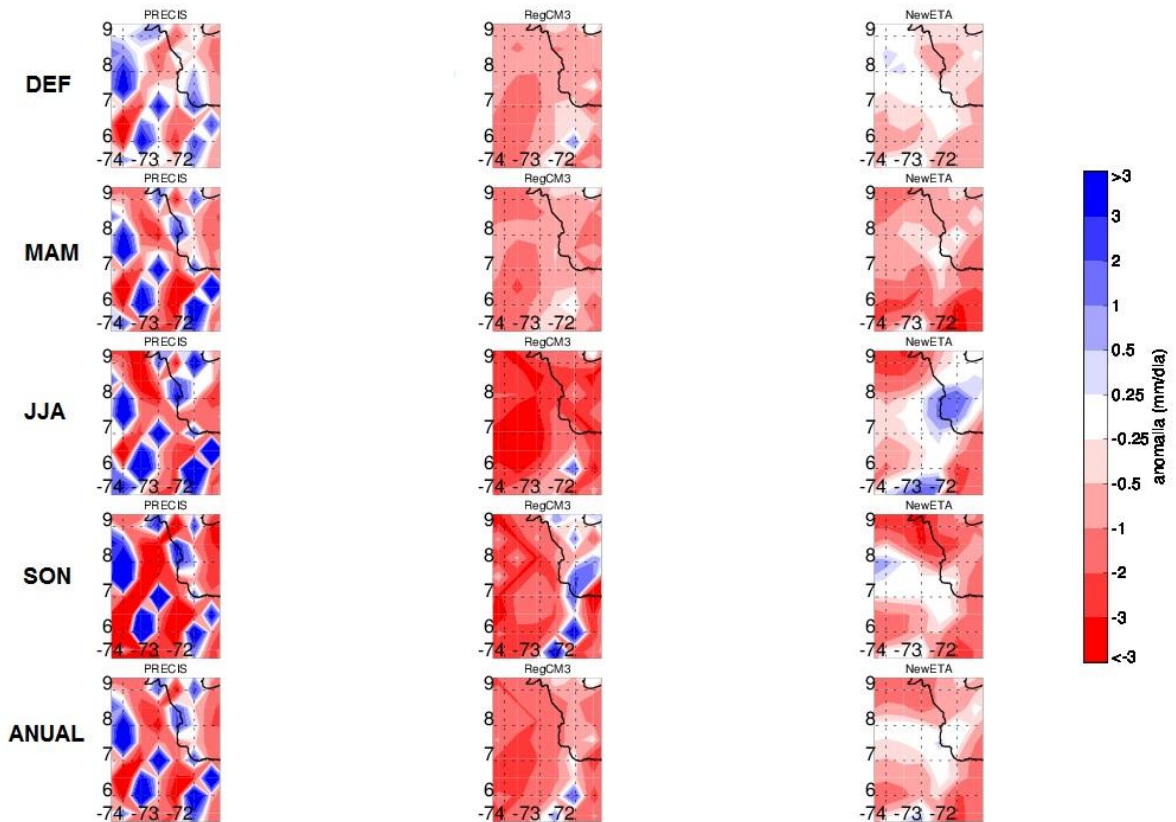


Figura 9. Anomalías en la precipitación (mm/día) anual y trimestral en el escenario climático futuro A2 periodo 2071 – 2100, proyectado por los modelos regionales RegCM3, ETA, PRECIS.

El modelo regional PRECIS el cual es el que mejor representa el comportamiento climático de la Región Nor-Oriental de Colombia presentó variadas anomalías en las proyecciones a futuro, esto puede ser debido a la forma de interpolación de datos de este modelo regional.

Para algunos sectores del territorio se alcanza diferencias de  $-2.5$  mm/día mientras que en otros alcanza diferencias de  $+3$  mm/día, todo esto para un mismo periodo de tiempo.

Aproximadamente se puede apreciar que existirán aumentos en la precipitación en Bucaramanga y municipios aledaños, así mismo en el sector comprendido entre los municipios de Barbosa, Landázuri y Vado Real. También existirán aumentos de precipitación en los municipios de Saravena, Tame, La Cabuya, Puerto Wilches y municipios aledaños al norte.

Sin embargo, existirán decrecimientos en la precipitación aproximadamente en los municipios de Málaga, Barrancabermeja, Puerto Araujo, San Alberto, Ocaña y de Soata, Belén y Tunja del departamento de Boyacá.

## **b) Temperatura**

El análisis de las proyecciones de temperatura para este escenario se muestra en la figura 10, pudiéndose destacar lo siguiente:

La proyección de temperatura según el modelo NewETA presenta crecimientos entre 3°C y 5°C para la mayoría del territorio en la zona de estudio, destaca el incremento de temperatura >5°C observado en la frontera de los departamentos de Santander y Boyacá, al sur-este de nuestra zona de estudio, en todos los trimestres.

Para el modelo regional RegCM3 se presentaron menores aumentos de temperatura que el modelo anterior, del orden de los 2°C a 4°C anuales, se evidencia crecimientos homogéneos en la zona de estudio, destacando menores aumentos en el trimestre SON del orden de 1°C a 2°C, además de lo anterior también se destaca que este modelo también registra un mayor aumento de temperatura en la frontera de los departamentos de Santander y Boyacá, al sur-este de nuestra zona de estudio.

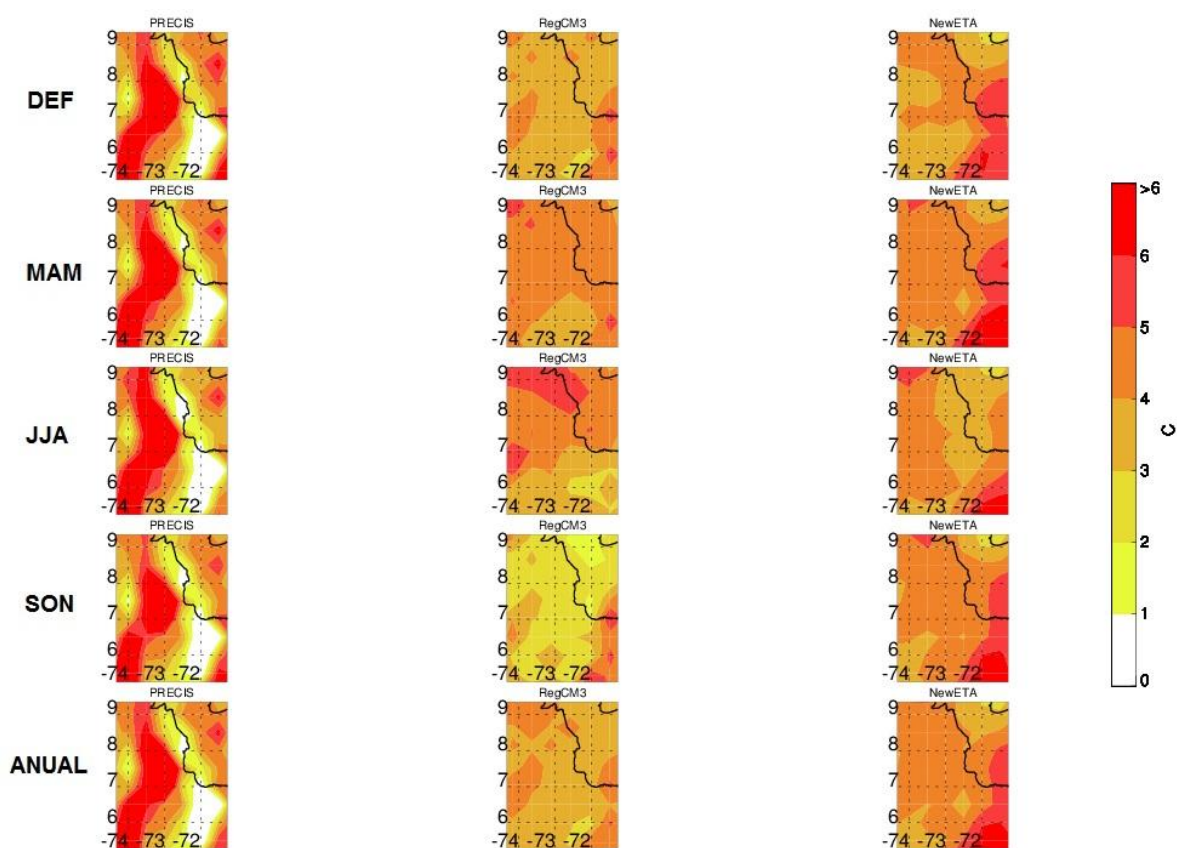


Figura 10. Anomalías en la temperatura (°C) anual y trimestral en el escenario climático futuro A2 periodo 2071 – 2100, proyectado por los modelos regionales RegCM3, ETA, PRECIS.

Según el modelo regional PRECIS, existen variados aumentos de temperatura en cada uno de los trimestres en estudio, pero con una tendencia clara. Se observan aumentos  $>5^{\circ}\text{C}$  en gran parte de nuestra zona de estudio, principalmente en las cordilleras presentes en este territorio.

Por otra parte, este modelo regional presenta pocos o nulos aumentos de temperatura en sectores más planos en nuestra zona de estudio.

De lo anterior podemos afirmar que las zonas montañosas o de cordilleras presentarían mayores aumentos de temperatura que las zonas de valle o planas en el territorio de nuestra zona de estudio.

## **5.2.2 Proyección Modelos Regionales Escenario B2**

### **a) Precipitación**

El análisis de las proyecciones de precipitación para este escenario se muestra en la figura 11, pudiéndose destacar lo siguiente:

Se puede observar que el modelo regional NewETA presenta muy pocas variaciones tal como se puede evidenciar en la grafica de anomalías anuales, cabe aclarar que este modelo fue el que peores resultados presento en el análisis de la climatología actual, y se evidenció que este modelo no representa el comportamiento climático de nuestra región.

El modelo regional RegCM3 presenta grandes variaciones negativas en la mayoría de trimestres, principalmente en JJA y SON del orden de -3 mm/día para la mayoría del territorio en nuestra zona de estudio. En general se presenta una tendencia a la disminución de la precipitación como se puede evidenciar en la grafica de anomalías anuales.

El modelo regional PRECIS el cual es el que mejor representa el comportamiento climático de la Región Nor-Oriental de Colombia presento variadas anomalías en las proyecciones a futuro.

Para el primer trimestre en estudio DEF muestra muy pocas variaciones, solamente una leve disminución en la precipitación principalmente en la frontera con Venezuela.

En el segundo trimestre en estudio MAM continua esta tendencia negativa en la precipitación cada vez un poco más pronunciada, es decir, en este trimestre se alcanzan a presentar disminuciones de hasta -2 mm/día aproximadamente en Bucaramanga y sus sectores aledaños, y en sectores aledaños a Cimitarra y Landázuri.

Para el tercer trimestre JJA se mantiene esta tendencia negativa en gran parte del territorio de la zona de estudio, se presentan disminuciones en la precipitación de hasta -2 mm/día desde el centro hasta el nor-oeste de la zona de estudio. Al

mismo tiempo un pequeño sector aproximadamente al sureste de la zona de estudio, podría decirse que en la frontera entre Santander y Boyacá, donde presenta incrementos en la precipitación del orden de +2 mm/día, y poca variación en la precipitación alrededor de los anteriores sectores.

Podría decirse que la tendencia general del modelo regional PreciS es a la disminución leve de la precipitación, en donde se presentará la mayor disminución de la precipitación aproximadamente en Cúcuta y sectores aledaños, pero en general disminuirá poco o habrá cambios casi nulos para gran parte del territorio de la zona en estudio.

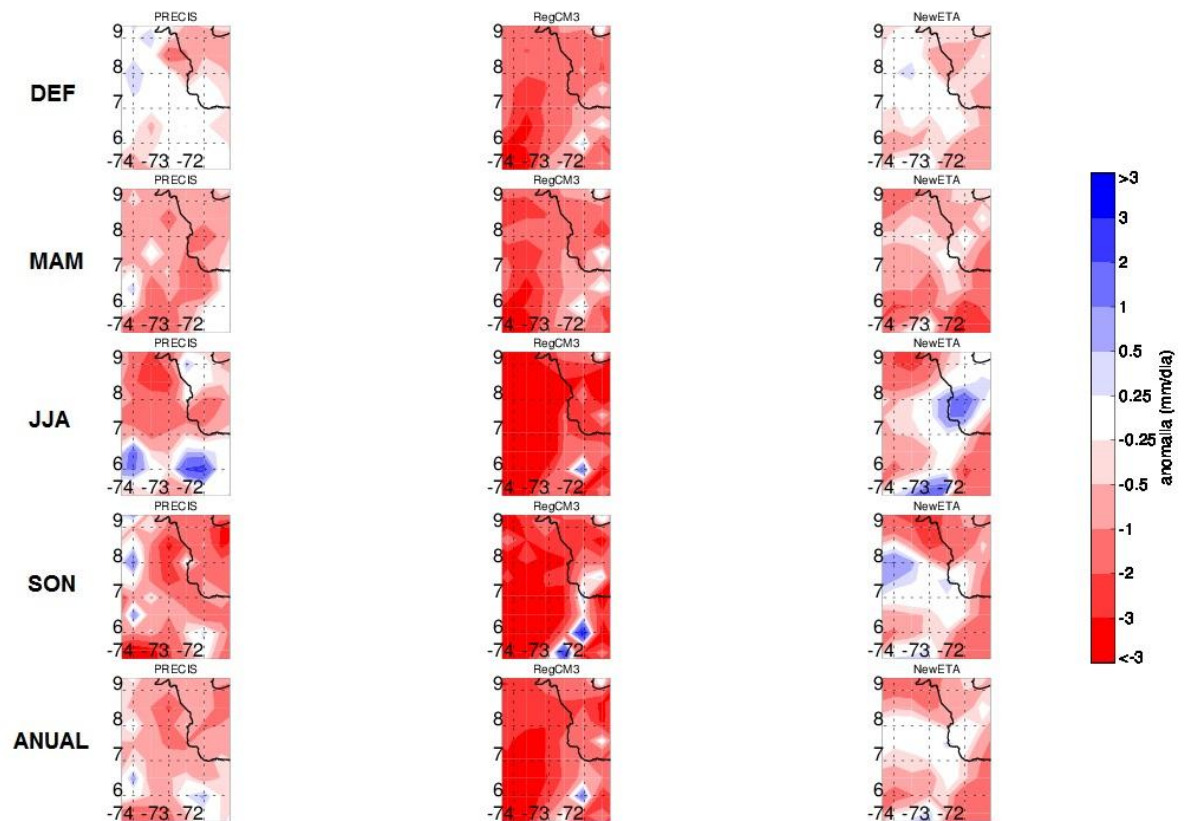


Figura 11. Anomalías en la precipitación (mm/día) anual y trimestral en el escenario climático futuro B2 periodo 2071 – 2100, proyectado por los modelos regionales RegCM3, ETA, PRECIS.

## **b) Temperatura**

El análisis de las proyecciones de temperatura para este escenario se muestra en la figura 11, pudiéndose destacar lo siguiente:

El modelo regional NewETA presento variaciones homogéneas en todos los trimestres del año, con aumentos de temperatura del orden de 2 a 3°C para gran parte del territorio de la zona de estudio. Se observa aumentos un poco mas grandes en el sector sureste de la zona de estudio, donde alcanza un aumento de 5°C.

Cabe recordar que este modelo fue el que peores resultados presentó en el comportamiento de la precipitación en comparación a la climatología observada, por lo que se concluyó que este modelo no representa el comportamiento climático de la región Nor-Oriental de Santander.

Para la proyección de temperatura del modelo regional RegCM3 se observaron crecimientos anuales de temperatura entre 3 - 4 °C, destacando que el sector noroeste de nuestra zona de estudio, aproximadamente en limites con el departamento de Bolívar y parte de este departamento, se presentaron los mayores incrementos, especialmente en los trimestres MAM y JJA donde alcanzan aumentos de 5°C.

Para el modelo regional PRECIS las variaciones de temperatura estuvieron entre 2 y 3°C para todos los trimestres del año. Cabe destacar que en el sector de Bucaramanga y municipios aledaños es donde se presentaron menores aumentos en temperatura, así como en el sector de Cimitarra, Puerto Araujo.

También es importante destacar en el sector noroeste de la zona de estudio, aproximadamente en límites con el departamento de Bolívar y partes de este mismo, donde se presentaron mayores aumentos en temperatura, tendencia que se presentó en este sector en los tres modelos regionales estudiados (ETA, RegCM3, Precis).

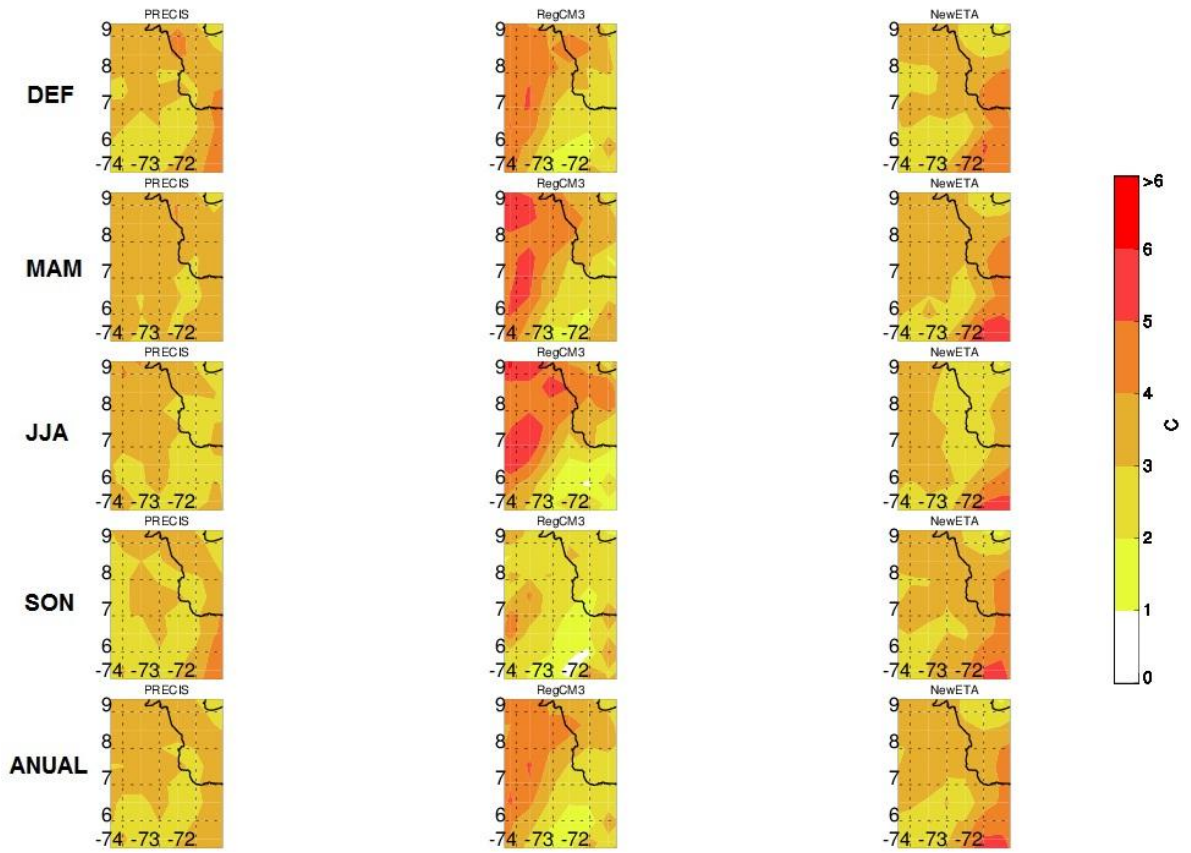


Figura 12. Anomalías en la temperatura (°C) anual y trimestral en el escenario climático futuro B2 periodo 2071 – 2100, proyectado por los modelos regionales RegCM3, ETA, PRECIS.

## 6. CONCLUSIONES

- Se observó que el comportamiento climatológico de la región Nor-Oriental de Colombia presenta dos épocas claras de lluvias (MAM = Marzo, Abril, Mayo; SON= Septiembre, Octubre, Noviembre) y una temporada seca (DEF= Diciembre, Enero, Febrero).
- Como resultado del análisis de los modelos regionales observamos que el modelo PRECIS es el que mejor representa el comportamiento climático de la región Nor-Oriental de Colombia representando el ciclo anual de precipitación, aun cuando el modelo regional que presentó menor error cuadrático medio en comparación a la climatología observada fue el RegCM3 pero este desfasaba las épocas lluvias y secas. El modelo regional ETA no representa en lo absoluto el comportamiento del clima de la región en estudio.
- Las proyecciones realizadas mostraron tanto aumentos como decrecimientos en la precipitación para determinados sectores. Además también se observó que la proyección de temperatura del modelo Precis en el escenario A2, mostró bajos aumentos en las cordilleras y grandes aumentos en regiones más planas.
- Tanto para el escenario A2 como para el B2 se observó disminución en la precipitación y aumento en la temperatura para la zona que incluye el departamento de Bolívar y su frontera con el departamento de Norte de Santander. Igualmente se observó lo mismo en menor medida en el sector que se incluyó del departamento de Casanare. Estos departamentos poseen territorios semiáridos, los cual se podrían ver afectados por los aumentos de la temperatura y la disminución de la precipitación, los cuales se presentaron más notoriamente en los periodos de DEF y JJA.

- En la medida que tengamos una estimación del comportamiento climático de nuestra región podremos intervenir zonas que se proyecten críticas, es por esto que esta investigación tiene cierto grado de importancia ya que se evalúan diversos modelos regionales con la intención de escoger el que mejor represente el comportamiento del clima en la región, además se analizan proyecciones basados en diferentes escenarios de emisiones futuras.
- El análisis de proyecciones de cambio climático deberían ser consideradas por los tomadores de decisión de los gobiernos, con el fin de analizar vulnerabilidades y medidas de mitigación y adaptación al cambio. Este proyecto de grado pretende ser una herramienta de análisis con este objetivo.

## 7. BIBLIOGRAFIA

Álvarez O.D, Vélez J.I. Y Poveda G. Improved long-term mean annual rainfall fields for Colombia. International journal of climatology. Int. J. Climatol. (2010). DOI: 10.1002/joc.2232.

Anthes RA (1984) Enhancement of convective precipitation by mesoscale variations in vegetative covering in semi-arid regions. J Climate Applied Meteor 23:541–554

Bhaskaran B, Jones RG, Murphy JM, Noguera M (1996) Simulation of Indian summer monsoon using a nested regional climate model: domain size experiment. Clim Dynam 12:573–587

Black T. L., 1994: The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. Wea. Forecasting, 9, 256-278.

Carbajal G, Agosta E, y Canziani P, Validación de los datos de la línea de base del modelo climático regional PRECIS, el re análisis Era40 y datos CRU en la región de centro de Sudamérica.

Dickinson, R. E.; Errico, R.M.; Giorgi, F.; Bates, G. T., 1989: A regional climate model for western United States. Clim. Change, 15, 383-422

Dickinson, R.E., A. Henderson-Sellers, and P.J. Kennedy, 1993: Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) Version 1e as coupled to the NCAR Community Climate Model. NCAR Technical Note, NCAR/TN-387+STR, 72pp.

Edwards, J. M. and Slingo, A. 1996, Studies with a flexible new radiation code. I: Choosing a configuration for a large-scale model.

Emanuel, K. A., A scheme for representing cumulus convection in large-scale models", J. Atmos. Sci., 48(21), PP 2313{2335(1991)

Giorgi, F.; Marinucci, M. R.; Bates, G. T .1993a: Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes. Monthly Weather Review, 121, 2749-2813

Giorgi, F.; Marinucci, M. R.; Bates, G. T.; De Canio, G., 1993b: development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. Monthly Weather Review, 121, 2814-2832

Giorgi, F., and L. O. Mearns, 1999: Introduction to special section: Regional climate modeling revisited, J. Geophys. Res., 104, 6335-6352.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climatico, Tercer Informe de Evaluacion Cambio Climatico 2001: Mitigacion.

Holtstag, A., E. De Bruijn, and H.L. Pan, 1990: A High Resolution Air Mass Transformation Model for Short-Range Weather Forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1561-1575

[http://precis.metoffice.com/docs/PRECIS\\_Handbook.pdf](http://precis.metoffice.com/docs/PRECIS_Handbook.pdf) páginas 6, 35.

[http://precis.metoffice.com/docs/PRECIS\\_Introduction.pdf](http://precis.metoffice.com/docs/PRECIS_Introduction.pdf) página 9.

[http://pronostico.yv5fih.org.ve/ETA\\_Venezuela.html](http://pronostico.yv5fih.org.ve/ETA_Venezuela.html)

<http://rcmlab.agron.iastate.edu/narccap/plots/exp0.2.regcm3.tmax.7902.gif>  
<http://revistapesquisa.fapesp.br>; Previsões detalhadas, Edição Impressa 69 - 10.2001

[http://www.grida.no/publications/other/ipcc\\_tar/?src=/climate/ipcc\\_tar/vol4/spanish/099.htm](http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/vol4/spanish/099.htm), visitado el 20 de enero de 2011.

<http://www.todacolombia.com/departamentos/nortedesantander.html>, visitado el 14 de enero de 2011.

<http://www.todacolombia.com/departamentos/santander.html>, visitado el 14 de enero de 2011.

Kida, H., T. Koide, H. Sasaki, and M. Chiba, 1991: A new approach to coupling a limited area model with a GCM for regional climate simulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 69, 723–728

Lincoln M, Marengo J.A, Ambrizzi T, Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando tres modelos regionais.

Lincoln M. Alves, Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. *Theor Appl Climatol*. DOI 10.1007/s00704-009-0165-2.

Marengo J, Climate Change in South America for the late 21st Century: Intercomparison of scenarios from three regional climate models, Editorial Manager(tm) for Climate Dynamics Manuscript Draft CLIDY-D-09-00066R1. 2009.

Marengo J, Climate Change in South America for the late 21st Century: Intercomparison of scenarios from three regional climate models, Editorial Manager(tm) for Climate Dynamics Manuscript Draft CLIDY-D-09-00066R1. 2009.

Mesinger, F., Z. I. Janjic, S. Nickovic and D. Gavrilov, 1988: The Step-Mountain Coordinate: Model Description and Performance for Cases of Alpine Lee Cyclogenesis and for a Case of an Appalachian Redevelopment. Mon. Wea. Rev., 116, 1497-1518.

Pal, J. S., and E. A. B. Eltahir, On the pathways relating soil moisture conditions to future summer rainfall within a model of the landatmosphere system, J. Clim., in press, 2000

RegCM Version 3, Nellie Elguindi, Xunqiang Bi, Filippo Giorgi, Badrinath Nagarajan, Jeremy Pal, Fabien Solmon, Sara Rauscher, and Ashraf Zaakey  
Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA (1), 134-149 (2009).

Ruiz Murcia J. F, Cambio Climático en temperatura, Precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (Panorama 2011-2100). IDEAM–METEO/005-2010.

Salazar, L.F., (2009) Conseqüências das mudanças climáticas na distribuição dos biomas na América do Sul, com ênfase na amazonia e nordeste. 277 p. (INPE-16573-TDI/1566). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil.

Sanabria J, Marengo J y Valverde M. Escenarios de Cambio Climático con modelos regionales sobre el Altiplano Peruano (Departamento de Puno).  
Trieste, Italy July 2007

Willmott, C.J.; Rowe, C. M.; Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. *Journal of Climatology*, v. 5, p. 589-606, 1985

Xu L, Raman S, Madala RV, Hodur R (1996) A non-hydrostatic modeling study of surface moisture effects on mesoscale convection induced by sea breeze circulation. *Meteorol Atmos Phys* 58:103–122

Zeng X, Shaikh M, Yongjiu D, Dickinson RE, Myneni R (2002) Coupling of the command land model to the NCAR community climate model. *J Climate* 15(14):1832–1854