



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Metodología para estimar caudales medios y extremos en escenarios de cambio climático**

**”Methodology for estimating average and extreme flows in climate change scenarios”**

**Susana Cadavid Valencia**

Director:

**Ph.D. Carlos David Hoyos Ortiz**

Trabajo para optar a título de:

**Magister en Ingeniería - Recursos Hidráulicos**

**Escuela de Geociencias y Medio Ambiente**

**Facultad de Minas**

**Universidad Nacional de Colombia**

**Sede Medellín**

**2015**

# Abstract

Currently we face changes of anthropic nature that affect the terrestrial circulation dynamics. The IPCC reports strongly emphasize that the greenhouse emissions are growing at a rate that hasn't been seen in 800.000 years, and such emissions are the major contributors to radiative forcing. All these effects impact the water availability, so the study of variables like rainfall, in the context of climate change scenarios, become necessary. In this work, the monthly precipitation is predicted with tools like Global Circulation Models (GCM), phases 3 and 5, the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), reanalysis data, and in-situ stations. A total of 64 models were analyzed; we evaluated their ability to correctly capture the governing phenomena of Colombian climatology. As a result of the analysis we selected the acceptable models for the study area, which we took as the input for precipitation prediction at a local scale in the Aburra Valley (Antioquia-Colombia). This downscaling process is carried out through a non-parametric statistic technique based on physical and dynamic fields which are more stable and less uncertain than the GCM rainfall. Finally we observed that the extremes of monthly rain conditions have an upward trend for the 90 percentile and a downward trend for the 10 percentile. It was clear that the climate change effect does not have significant implications in the mean values; in other words, the 50 percentile doesn't move and the mean values remain constant. However, the tails are in fact affected by climate change. Generally, the joint changes in the rainfall and physical fields are not as consistent as the changes in the dynamical fields, which provide more information about precipitation variability, particularly of subsidence/convective fluxes.

**Keywords:** Climate Change, GCM, Downscaling, Precipitation.

# Resumen

Actualmente nos enfrentamos a cambios de naturaleza antrópica que están afectando la dinámica de la circulación terrestre. En los informes de la IPCC se afirma de manera categórica que la tasa de emisiones de gases de efecto invernadero tiende a un aumento no observado en 800.000 años, que a su vez es el mayor contribuyente al forzamiento radiativo. Todos estos efectos impactan la disponibilidad del recurso hídrico a nivel global y se hace necesario el estudio de variables, como la lluvia, en escenarios de cambio climático. En este trabajo se proyecta la precipitación mensual haciendo uso de herramientas como los modelos de circulación general del Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) fases 3 y 5, datos de reanálisis y estaciones in situ. En total fueron analizados 64 modelos de los cuales se evaluó su capacidad para capturar correctamente los fenómenos gobernantes influyentes en la climatología de Colombia. De este análisis se seleccionaron los modelos adecuados para la zona de estudio que serán el insumo para la proyección de la lluvia a escala local en el Valle de Aburrá. Este salto de escala se realiza mediante una técnica de reducción de escala ("*downscaling*") estadística no paramétrica a partir de campos físicos y dinámicos atmosféricos que proporcionan información de menor incertidumbre que la precipitación directa de los modelos acoplados. Finalmente se pudo observar cómo las condiciones extremas de precipitación mensual tienen tendencias de aumento para el percentil 90 y disminución para el percentil 10. Es claro que el efecto del cambio climático no tiene implicaciones significativas en valores medios, es decir, no existe traslado del percentil 50 y se mantiene constante en el tiempo, mas sí implicaciones en las colas. En general los cambios conjuntos de la lluvia y los campos físicos no fueron tan consistentes como los campos dinámicos, que muestran aportar mayor información de la variabilidad de la precipitación, en particular procesos convectivos/subsidentes.

**Palabras Clave:** Cambio Climático, MCG, Reducción de Escala, Precipitación.

# Agradecimientos

A mi madre quien ha sido el motor para siempre mirar adelante y buscar una mejor versión de mi misma.

A mi familia quien me apoyó de todas las formas posibles.

A mi director por su gran aporte a este trabajo y a mi formación como investigadora.

A mis amigos con quienes compartí no solo conocimientos sino experiencias de vida.

A los profesores por sus conocimientos.

A la Universidad por darme un espacio de conocimiento y me proporcionó soporte económico.

A Empresas Públicas de Medellín quien me proporcionó soporte económico y los datos que hicieron posible este trabajo

# Contenido

<b>Resumen</b>	<b>2</b>
<b>Resumen</b>	<b>3</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>4</b>
<b>Contenido</b>	<b>5</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>9</b>
<b>2. Datos y Metodología</b>	<b>17</b>
2.1. Metodología . . . . .	17
2.2. Modelos de Circulación General . . . . .	22
2.3. Reanálisis NCEP/NCAR . . . . .	24
2.4. Registros históricos de Precipitación en el Valle de Aburrá a partir de estaciones de EPM . . . . .	25
<b>3. Evaluación de los Modelos de Circulación General</b>	<b>27</b>
3.1. Coherencia espacial y temporal de los modelos de circulación general sobre Colombia . . . . .	28
3.1.1. Climatología Regional en Modelos del CMIP3 y CMIP5 de la Variable Omega . . . . .	28
3.1.2. Climatología Regional en Modelos del CMIP3 y CMIP5 de Velocidad Horizontal U y V . . . . .	37
3.2. Representatividad de la Relación entre la Climatología Colombiana y la Variabilidad del Pacífico . . . . .	40
3.3. Resultados Evaluación de Modelos . . . . .	49
<b>4. Reducción de Escala</b>	<b>58</b>
4.1. Zonas de mayor influencia de la variabilidad regional a la variabilidad local . .	59
4.2. Ajuste Cuantil-a-Cuantil de la variabilidad de Reanálisis y Modelos Seleccionados	62
4.3. Proyección probabilística No-Paramétrica de lluvia . . . . .	66
<b>5. Resumen y Conclusiones</b>	<b>72</b>
<b>A. Modelos de Circulación General</b>	<b>76</b>

A.1. Características Modelos CMIP3 . . . . .	76
A.2. Escenarios CMIP3 . . . . .	77
A.3. Características Modelos CMIP5 . . . . .	78
A.4. Escenarios CMIP5 . . . . .	80
<b>B. Representatividad de los Modelos Acoplados</b>	<b>82</b>
B.1. Climatologías Modelos CMIP3 - Omega para 500 y 700 hPa . . . . .	82
B.2. Climatologías Modelos CMIP5 - Omega para 500 y 700 hPa . . . . .	92
B.3. Evaluación de las climatologías - Modelos CMIP3 variable Omega para 500 y 700 hPa . . . . .	114
B.4. Evaluación de las climatologías - Modelos CMIP5 variable Omega para 500 y 700 hPa . . . . .	116
B.5. Evaluación de ciclos anuales - Modelos CMIP3 variable Omega para 500 y 700 hPa . . . . .	119
B.6. Evaluación de ciclos anuales - Modelos CMIP5 variable Omega para 500 y 700 hPa . . . . .	121
B.7. Evaluación de las Climatologías - Modelos CMIP3 variable Vientos Horizontales para 500 y 700 hPa . . . . .	124
B.8. Evaluación de las Climatologías - Modelos CMIP5 variable Vientos Horizontales para 500 y 700 hPa . . . . .	125
<b>C. Proyección Probabilística No-Paramétrica</b>	<b>129</b>
C.1. Relaciones Cuantil-a-Cuantil . . . . .	129

# Capítulo 1

## Introducción

El agua en el océano, tierra y atmósfera es un regulador fundamental del clima. A su vez el clima impone restricciones de su disposición, disponibilidad y variabilidad temporal, principalmente en tierra y atmósfera, lo cual resalta la importancia del estudio y planeación de su uso teniendo en cuenta la información climática histórica (Mesa et al., 1997). Este hecho ha motivado la preocupación acerca de las implicaciones y consecuencias que el cambio climático antrópico, el cual se refiere a variaciones del estado medio de largo plazo de las características climáticas en un periodo extendido como resultado de la actividad humana, puede tener a nivel ambiental y económico en el ámbito mundial. Los cambios de la dinámica hidroclimática han sido entonces de amplio estudio en las últimas décadas por parte de los investigadores en las ciencias de la tierra.

El *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) tuvo inicio en 1988 mediante el *United Nations Environment Programme* (UNEP) y el *World Meteorological Organization* (WMO), con la idea de generar reportes suficientemente rigurosos sobre las evidencias del cambio climático y su influencia en la dinámica de los procesos físicos terrestres, recopilando de forma exhaustiva investigaciones relacionadas, con el fin de realizar la divulgación científica a nivel ambiental y socioeconómico de importancia global para así contribuir a la toma de decisiones sobre el manejo y aprovechamiento del recurso hídrico (Pachauri & Reisinger, 2007).

En el IV y V reporte de la IPCC se presentan evidencias inequívocas de cambio climático como lo son el aumento de la temperatura media global, el aumento del promedio mundial del nivel del mar y disminución en la cobertura del casco polar del Hemisferio Norte mediante datos observados de diferente índole (ej: satélite, mareométricos) (ver Figura 1.1 tomada del IV (sup.) y Figura 1.2 tomada del V (inf) informe de la IPCC, Pachauri & Reisinger (2007); Stocker et al. (2013)). Adicionalmente el IPPC manifiesta que existen múltiples evidencias que confirman que el aumento de gases de efecto invernadero en el período industrial no están asociados a mecanismos naturales, y que este aumento a su vez está relacionado con el incremento observado de temperatura de la superficie del planeta. La influencia de las actividades antrópicas en el cambio climático observado se relaciona con el aumento considerable en las emisiones de gases de efecto de invernadero a partir de 1975, que en conjunto con la variación de la cubierta terrestre y la radiación solar alteran el equilibrio energético del clima (Pachauri & Reisinger, 2007; Stocker et al., 2013). El IV reporte de la IPCC (Pachauri & Reisinger,

2007) también incluye el resultado de diversos estudios que muestran evidencia de cambios de largo plazo en otros aspectos climáticos tales como la circulación atmosférica y oceánica, contenidos de humedad atmosférica, precipitación a escala continental y regional, y en general todas las variables que determinan el estado del sistema climático.

En el V reporte (Stocker et al., 2013) se actualizan las bases físicas del cambio climático observado en las recientes publicaciones científicas, y se concluye nuevamente y con mayor grado de certeza que el aumento de temperatura del sistema climático, evidente tanto en la atmósfera y el océano, el aumento del nivel del mar, y la disminución de la cantidad de nieve y hielo es inequívoco, y que, la mayoría de los cambios observados desde la década de los 50 no tienen precedentes en el último milenio. Paralelamente, las concentraciones de gases de efecto invernadero como dióxido de carbono, metano, y óxido nitroso han aumentado a niveles no vistos en por lo menos 800.000 años. En particular el dióxido de carbono ha aumentado 40 % desde el periodo preindustrial principalmente por las emisiones de combustibles fósiles y en menor medida, por cambios en el uso del suelo. Diferentes publicaciones señalan que el océano ha absorbido 30 % del dióxido de carbono antropogénico emitido, causando su acidificación. Dicho reporte enfatiza que el forzamiento radiativo total en la superficie es positivo, ocasionando un aumento de la energía en el sistema climático. El mayor contribuyente a dicho forzamiento radiativo es además, sin lugar a dudas, el incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> desde 1750, haciendo evidente la influencia del hombre en el sistema climático. En este sentido, el reciente reporte (IPCC 2013) es el más categórico hasta ahora en cuanto la atribución a la influencia antrópica en el cambio climático, estableciendo que, es extremadamente probable (95-100 %) que la acción humana es el factor dominante en el aumento de temperatura observado desde la mitad del siglo XX.

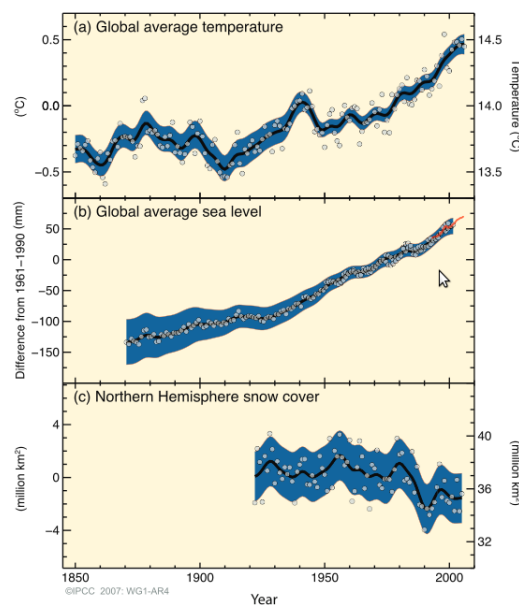
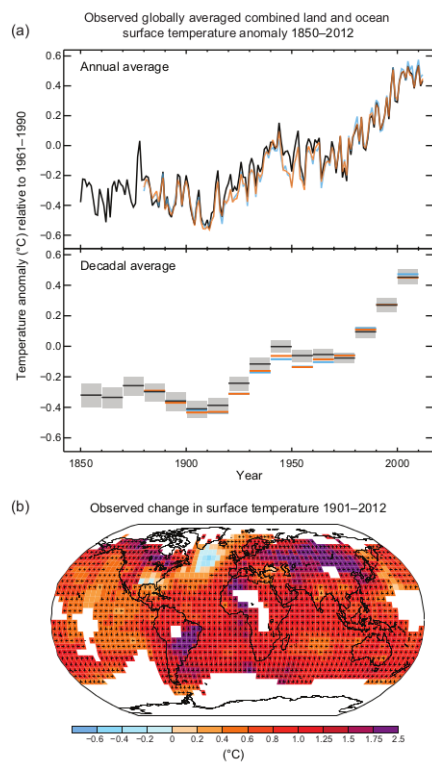


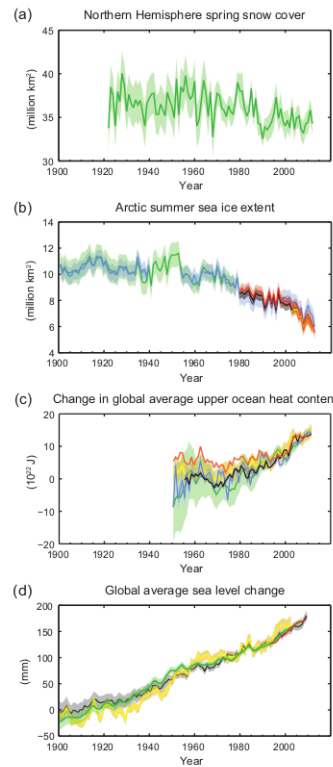
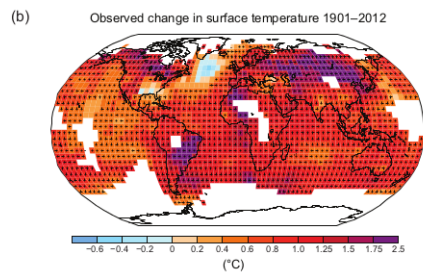
Figura 1.1: Evidencias de cambio climático IV Informe de la IPCC

En general, cambios en el ciclo hidrológico regional ante cambios de condiciones climáticas





(a) Promedio temperatura superficial global



(b) Cobertura de nieve en el Hemisferio Norte, contenido de calor del océano y nivel del océano

Figura 1.2: Evidencias de cambio climático V Informe de la IPCC

de gran escala son bastante complejos en cuanto que los procesos convectivos son altamente no lineales y dependen a su vez de cambios en la temperatura en superficie y del perfil vertical de la misma variable, cambios en la humedad y cambios en la circulación. Específicamente cambios en el contenido de humedad máximo en la atmósfera, el cual ha aumentado con el incremento en la temperatura, modulan el comportamiento del ciclo hidrológico global, regional y también a escala de cuenca (ej. Trenberth et al. (2003)). Es importante destacar que a diferencia de variables como temperatura y nivel del mar, en donde los cambios fundamentalmente se dan en la magnitud de dichas variables, los cambios en la precipitación pueden evidenciarse tanto en la magnitud como en la intensidad de los eventos de lluvia, la duración de los eventos, el tipo de precipitación, la frecuencia de ocurrencia y, tal vez más importante aún, cambios en los eventos extremos. En general, convección de aire con mayor humedad específica resulta en eventos de precipitación más intensa, con posibles reducciones en la duración de la misma. Con respecto a los eventos extremos de precipitación, el (Meehl et al., 2007) resume que es probable que la frecuencia de los eventos de precipitación extrema, en proporción con el número total de eventos de precipitación aumenta, en la mayoría de las regiones del globo. Proyecciones de precipitación y caudal asociadas a la variabilidad y al cambio climático son una fuente de información indispensable para la planificación óptima del recurso hídrico, manejo de periodos de inundación y sequía, y análisis de vulnerabilidad en general (Arnell, 2003, 2004; Milly et al.,

2002; OKI et al., 2001; Seckler et al., 1999; Vorosmarty, 2000).

Los reportes mencionados han sido enriquecidos por investigaciones que tienen por insumos las bases de datos producidas por el *Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison* (PCMDI) en varias fases, entre ellas y las más recientes, son la tercera y quinta fase del *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP3 y CMIP5). Gran cantidad de variables climáticas, oceánicas, bioquímicas, entre otras, se encuentran disponibles producto de la simulación usando modelos de circulación general desarrollados por varios grupos de investigación alrededor del mundo. Dichos modelos han ido evolucionando con el tiempo de manera que se han integrado nuevos procesos físicos y variables (vegetación, topografía, sistemas hídricos internos (lagos), gases de efecto de invernadero de naturaleza diferente al  $CO_2$ , entre otras) para así mejorar la representatividad de los procesos físicos que hacen parte del sistema climático, se ha mejorado la resolución espacial de los mismos, y se han mejorado tanto las parametrizaciones para que estas capturen de manera más apropiada los diferentes procesos, al igual que los esquemas numéricos para la integración de las ecuaciones. Esto ha permitido, gracias al esfuerzo realizado por los grupos de modelamiento de todo el mundo, obtener una mejor representación de las condiciones reales y la física gobernante, que agrega mayor confianza en los resultados (Solomon et al., 2007). Sin embargo, se debe reconocer, como se evidenciará a lo largo del presente trabajo, el alto grado de incertidumbre aun existente en la representación del sistema climático a escala regional en el estado del arte de la modelación acoplada.

Los modelos de circulación general se deben ver como herramientas de acoplamiento integral del sistema interconectado atmósfera, océano, tierra e hielo oceánico, desarrollados para simular y/o proyectar la variabilidad climática global bajo forzadores en las condiciones de emisión de  $CO_2$  de acuerdo a época en la cual se esté representando, es decir, el pasado, presente o futuro. Históricamente cada componente del sistema era simulado y analizado independientemente, llevando en ocasiones a errores en la representación de física que involucra intercambios de energía entre componentes. Actualmente, se tiene no solo mayor conocimiento del comportamiento del sistema sino también simulaciones de mayor exigencia y rigurosidad que pueden ser llevadas a cabo gracias a la evolución de los sistemas computacionales.

El desarrollo de modelos numéricos globales acoplados océano-atmósfera, permite proyectar los cambios futuros de parámetros dinámicos y físicos tanto de la atmósfera como del océano, incluyendo la precipitación, la cual puede ser usada en conjunto con modelos hidrológicos para la estimación de caudales (ej: Arnell (1999c); Arora & Boer (2001); Manabe et al. (2004)). Sin embargo, el subescalamiento directo de los valores medios a escala continental y regional proyectados para los próximos 100 años para aplicaciones a escala de cuenca, es una tarea compleja desde el punto de vista físico y estadístico.

Gracias a estas herramientas y a las bases de datos climáticas disponibles de forma abierta, la comunidad climática a llevado a cabo estudios aplicados relacionados con adaptación en temas de agricultura, seguridad alimentaria, políticas ambientales, biodiversidad (Arnell et al., 2011; Lal, 2004; Vörösmarty et al., 2010; Zhang, 2005), el análisis de la disponibilidad del recurso hídrico (Anandhi et al., 2008; Arnell, 1999a; Vörösmarty et al., 2000) incluyendo el comportamiento de reservorios de agua subterránea (Crosbie et al., 2011) y la proyección de caudales para cuencas en específico. Entre las diferentes proyecciones de caudales se destaca el trabajo de Arnell (1999c) y Arnell (1999b), quien proyectó el caudal de los ríos de manera global usando resultados del modelo climático del centro Hadley y consideraciones

hidrológicas básicas concluyendo que la descarga anual incrementa en regiones de latitudes altas, África ecuatorial, y el sureste Asiático, pero decrece en latitudes medias y regiones subtropicales. Por su parte Arora & Boer (2001), usando datos similares en naturaleza pero provenientes de diferentes modelos atmosféricos, llega a conclusiones contradictorias con Arnell (1999c), sugiriendo disminución en África ecuatorial y el Sureste Asiático. Este hecho resalta la importancia de la selección de modelos numéricos climáticos acoplados y la elección de las variables predictoras, dado que los resultados de las proyecciones a futuro dependen de la habilidad de los modelos para la representación adecuada de la climatología de la región de estudio (Tripathi et al., 2006).

Otro aspecto importante que ha sido de amplio estudio es la resolución a la cual trabajan los modelos y la resolución requerida para estudios hidrológicos a escala de cuenca. Los modelos de circulación general son en principio aceptables a escala sinóptica, pero con representación deficiente de la escala local (Dibike & Coulibaly, 2005; Grotch & MacCracken, 1991; Joubert & Hewitson, 1997; Wong et al., 2014). En estudios de esta naturaleza es necesario tener escenarios realistas de resolución considerable para la detección de cambios en las características de la precipitación incluyendo intensidades normales y extremas, variabilidad temporal desde diaria a decadal y la variabilidad espacial (Maraun & Wetterhall, 2010; Wong et al., 2014). Dado este condicionamiento, los efectos de menores escalas se han introducido mediante parametrizaciones que simplifican los procesos a escala de submalla (Landman et al., 2001), que aunque mejoran su rigurosidad en el camino al desarrollo y perfeccionamiento de los modelos (Tripathi et al., 2006), continúan teniendo complicaciones para representar adecuadamente las condiciones climáticas a escala local (Dibike & Coulibaly, 2005), y en especial en variables como la lluvia (Landman et al., 2001; Wong et al., 2014), altamente variable espacio-temporalmente. Muchos estudios se han realizado sobre cambios en los valores medios de las variables climáticas asociados con el cambio climático antrópico, cuyos objetivos han sido estimar cambios en la variabilidad y el estado medio de la precipitación. Sin embargo, dichos estimativos son en general provenientes de modelos numéricos de escala gruesa, lo que, sumado a los sesgos y errores inherentes a la modelación, hacen que dichas simulaciones no puedan ser usadas de manera directa en aplicaciones en los diferentes sectores asociados al aprovechamiento del recurso hídrico.

Para resolver los problemas de resolución espacial, tan necesarios para mejorar la calidad de las estimaciones de las proyecciones de variables climatológicas e hidrológicas, se han desarrollado técnicas de subescalamiento (Gutmann et al., 2014; Tripathi et al., 2006) de variables como precipitación, temperatura, humedad, entre otras, con el objetivo de relacionar los datos de modelos globales con datos de precipitación. El salto de brecha entre escalas ha motivado el planteamiento de diversas técnicas que en general se clasifican entre enfoques estadísticos y dinámicos. El primero se refiere a relaciones empíricas que se plantean a través de su comportamiento estadístico (Frías et al., 2006) y el segundo en general se refiere a modelos de circulación regional, que mediante las ecuaciones gobernantes y las parametrizaciones que se dispongan, simulan el comportamiento climático tomando como condiciones de frontera las salidas de los modelos de circulación general (anidamiento). En general las técnicas dinámicas tienen una mayor exigencia computacional y de tiempo, ya que las modelaciones a menudo deben realizarse de forma múltiple para lograr capturar los patrones de precipitación de la zona. Los modelos estadísticos tienen en general menor exigencia computacional, pero las diferencias estadísticas entre los datos observados y los datos modelados son principalmente

causadas por el sesgo del modelo como tal y adicionalmente por el salto en la escala (Wong et al., 2014).

Maraun & Wetterhall (2010) realizan un recuento, clasificación y descripción de las técnicas estadísticas que hasta ahora han sido parte de estudios de reducción de escala. Entre la clasificación mas gruesa se encuentran los modelos "*Perfect Prognosis*" (PP), los "*Model Output Statistics*" (MOS) y "*Weather Generators*" (WG). Los primeros se refieren a técnicas de regresión que tienen habilidad para la simulación satisfactoria de la precipitación extrema (Wong et al., 2014); los segundos se refieren a la corrección de los sesgos entre los observados y los simulados para corregir sus características estadísticas como la media o la varianza; y finalmente los generadores producen series de correlaciones espaciales y temporales. Entre los modelos tipo PP se pueden incluir los modelos lineales. Estos relacionan los predictores con la media de la variable a proyectar; sin embargo, estos modelos tienden a subestimar la variabilidad de la lluvia, razón por la cual se han usado estrategias para incorporar aleatoriedad a los datos. Los modelos generalizados lineales (GLM), también hacen parte de esta categoría y tienen una forma muy similar a los modelos lineales, sin embargo describen la media como una función de una gama amplia de distribuciones a una escala en particular donde la relación con los predictores es lineal. También se encuentran los modelos de vectores lineales generalizados (VGLM), que determinan una serie de parámetros de la distribución, no sólo la media como en los casos anteriores. En el caso de la precipitación extrema es necesario tener información de parámetros adicionales a la media, como la varianza, lo cual es posible en este modelo. También se encuentran los modelos weather typing que tipifican el tiempo atmosférico (WT: *weather typing*), que puede ser considerado como un caso especial del modelo lineal donde se hace clasificación de tipos de clima. Los modelos de regresión como las redes neuronales, capturan relaciones no lineales (NR: *Nonlinear Regression*) y no aditivas entre predictores y variables a predecir. Finalmente en esta categoría se encuentra el método análogo (*Analog Method*) que usa casos particulares históricos, generando proyecciones a corto plazo. Éste tiene problemas por la no estacionariedad que el cambio climático requiere, ya que no genera eventos de precipitación que no hayan sido observados en el pasado.

Los modelos tipo MOS en general han sido desarrollados para la corrección de modelos numéricos. En el caso de observaciones y simulaciones de los MCG, el MOS puede vincular las distribuciones mas no las series directas, ya que no hay una correspondencia temporal, entonces sólo es posible hacerlo mediante sus distribuciones. El método de escalamiento es un tipo de enfoque que hace parte de los MOS, donde mediante un factor definido por la razón entre la media de los datos observada y la media de los datos simulados, se corrige la variable a futuro y a su vez se corrigen la media y la varianza. El mapeo de cuantiles realiza un proceso similar donde la función de distribución acumulada se ajusta a la observada, en general haciendo uso de una distribución gamma. Este proceso en general se realiza en la etapa de calibración del modelo. Resultados satisfactorios se obtuvieron para la precipitación media mensual usando datos de reanálisis frente a MCG en el estudio de J. Eden et al. (2010). Los generadores de tiempo (WG) son usados para producir series sintéticas que simulan correlaciones espaciales y/o temporales de forma directa. Esto los hace distintos de los PP y MOS. Estos también son conocidos como modelos estocásticos que suelen presentar relación con las condiciones antecedentes en las series que generan. Existen básicamente "Generadores de Estación Única" ("*Single-Station Generators*") o "Generadores Multiestación" ("*Multistation Generators*"). En general estos métodos presentan subestimación de la variabilidad interanual

y la frecuencia en extremos.

De los estudios realizados que involucran enfoques de diversas naturalezas (dinámicos y estadísticos) se hacen diversas afirmaciones relacionadas con el desempeño de cada uno, y en general la incertidumbre es la forma más común de evaluar el desempeño de las técnicas. No existe un consenso claro que determine una técnica como el camino a seguir. Algunos autores reportan que las dinámicas tienen mejor desempeño a nivel físico ya que resuelve interacción entre variables en el tiempo y el espacio. Sin embargo las simulaciones de enfoques dinámicos dependen de las condiciones iniciales de los modelos, de características como las parametrizaciones, la habilidad del investigador para poder capturar las características climáticas para un sitio determinado, entre otras, donde en muchos casos, se traduce en mayor incertidumbre en los resultados (Cavazos & Hewitson, 2005; Chiew et al., 2010; Frost et al., 2011).

El trabajo desarrollado por Dibike & Coulibaly (2005) presenta dos técnicas de reducción de escala para la proyección de caudales, mediante las cuales resultan tendencias opuestas de cambios en el caudal, lo cual resalta la importancia de la elección de la técnica de reducción de escala. Gutmann et al. (2014) aplica cuatro enfoques estadísticos donde cada uno representa bien diferentes características de la lluvia como ocurrencia, intensidad, duración, pero en general todas presentan algunos problemas para reproducir cambios en el futuro. Chiew et al. (2010) y Frost et al. (2011) aplican técnicas PP, MOS, WG y dinámicas para proyectar precipitación en la misma zona de estudio, y cada método presentó habilidades para diferentes características de la precipitación. Estos estudios resaltan la complejidad de los procesos de reducción de escala.

En general el subescalamiento directo de los valores medios a escala continental y regional proyectados para los próximos 100 años para aplicaciones a escala de cuenca, es una tarea compleja desde el punto de vista físico y estadístico, como ya se ha reportado. Cavazos & Hewitson (2005) evaluaron una técnica reducción de escala que incluyera los predictores a gran escala con mayor influencia en diversos sitios ubicados en el trópico, subtropical y latitudes medias. Se observó una gran dependencia del desempeño del método con respecto a qué tanto los mecanismos de gran escala controlen la variable a proyectar, en especial para zonas con ubicaciones geográficas de alta complejidad como lo es el trópico, además de características de superficie, como la topografía, orografía, entre otros aspectos (Cavazos & Hewitson, 2005; Wang et al., 2014), cuyos efectos presentan influencia variable en dicha dinámica. Esto sugiere que proyecciones satisfactorias no depende netamente de la naturaleza de las técnicas (estadísticas y dinámicas), éste, a su vez, requiere del conocimiento de las fuentes de variabilidad al comportamiento climático a escala local. Estas observaciones llevan a la necesidad de identificar los mecanismos de gran escala que aportan variabilidad a la variable objetivo, y que a su vez, se desempeñen satisfactoriamente, lo cual hace imperativo la corrección previa de los predictores a usar, tal como lo proponen Boé et al. (2007) y Wong et al. (2014), donde en ambos casos, usan técnicas tipo MOS que resuelven en primera instancia problemas de sesgo sistemático de las variables insumo para, posteriormente, aplicar otras técnicas en la generación de lluvia.

Es claro que el éxito del proceso de proyección de variables climáticas bajo escenarios de cambio climático se encuentra sujeto a que, si bien los modelos de circulación general son herramientas de alta complejidad que, en general, logran capturar la variabilidad a largo plazo de las variables de salida, su buena representación depende del criterio físico suficiente del

investigador que de acuerdo a la zona de estudio en particular evalúe el desempeño del modelo y efecto del salto de escala. Es importante resaltar que debido al uso de parametrizaciones de los procesos convectivos y de formación de nubes, los cuales ocurren en la naturaleza a escalas más pequeñas que la resolución de los modelos climáticos globales, una de las variables peor representadas por dichos modelos es precisamente la precipitación. Es por esto que es recomendable en general evitar caer en subescalamiento directo de la precipitación proveniente de modelos climáticos, de igual forma en extrapolaciones estadísticas de valores observados o técnicas estadísticas sin validez física.

Como se expresó anteriormente, el sistema climático terrestre es altamente dinámico y es caracterizado por fluctuaciones a diferentes escalas temporales y espaciales determinando la disponibilidad del recurso hídrico en una región. Colombia, y en particular la región Andina y el departamento de Antioquia, enfrenta retos de consideración en la planificación y gestión del recurso hídrico asociados a la alta variabilidad climática e hidrometeorológica natural de la región. Dicha variabilidad se debe justamente a la ubicación geográfica en la franja tropical y a la entrada de humedad y modulación de la circulación regional por la cercanía de dos océanos y a las condiciones topográficas y geomorfológicas del territorio nacional y regional. De igual manera, la climatología de la región también se ve influenciada por cambios de largo plazo de origen natural (interno al sistema) o antrópico. Vale la pena resaltar que la variabilidad natural incluye, más no se limita, al Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (Eventos El Niño y La Niña) que históricamente ha alterado la hidroclimatología de Colombia con consecuencias importantes. Dicha variabilidad interanual y de largo plazo se convierte, desde el punto de vista de la definición de riesgos, en una amenaza para la gestión del recurso. Adicional a la variabilidad natural, el país también enfrenta amenazas asociadas al cambio climático de origen antrópico, que si bien requieren ser cuantificadas en detalle, la evidencia sugiere que dicho cambio exacerba las condiciones extremas aumentando aun más la variabilidad hidrometeorológica.

En Colombia diferentes sectores, incluyendo el energético, el asociado al suministro de agua potable, y manejo de drenaje urbano y aguas servidas, dependen de información climática de calidad para la formulación de estrategias futuras de mediano y largo plazo. En particular la disponibilidad de agua lluvia y el caudal de los ríos son de vital importancia para los sectores mencionados. Para citar un ejemplo específico, inversiones de largo plazo, como son por ejemplo la construcción de plantas generadoras de energía hidroeléctrica asociada a grandes embalses, requieren de información de precipitación y caudal a futuro no solo para evaluar la viabilidad de los proyectos sino también para definir parámetros de diseño físico y aspectos asociados con energía firme. La alta variabilidad climática, sumada a cambios de largo plazo, afectan y/o modulan de manera directa e indirecta tanto la generación de energía como la disponibilidad del recurso para distribución de agua potable.

Dado lo expuesto anteriormente, el objetivo principal del presente trabajo es estimar de manera objetiva los cambios de la magnitud y variabilidad de la precipitación en regiones de interés en escenarios de variabilidad y cambio climático. La estrategia seguida para el desarrollo de la presente investigación se basó en la siguiente línea de pensamiento:

- Actividades antrópicas asociadas directamente a la gestión de recursos fósiles no renovables para la generación de energía han aumentado los niveles de gases de efecto invernadero, y en particular de dióxido de carbono, a niveles nunca antes observados en

registros climáticos.

- El aumento de dichos gases ha intensificado el efecto invernadero aumentando la temperatura superficial del planeta.
- El aumento de temperatura ha significado cambios transitorios y de largo plazo en diferentes variables climáticas que van desde la extensión de la criósfera, el nivel del mar, entre otros, hasta cambios en regímenes de precipitación incluyendo cambios en los acumulados promedio, cambios en el ciclo anual, y cambios en la distribución de valores extremos y duración de los mismos.
- Cambios en la naturaleza de la precipitación a escala global y regional afecta la precipitación a escala de cuenca.
- Los modelos climáticos globales simulan de manera aceptable potenciales cambios en los patrones de variables climáticas y de circulación ante cambios en el forzamiento antrópico. Sin embargo, y a pesar de los avances en los últimos años, dichos modelos no capturan de manera satisfactoria la variabilidad y tendencias a escala subcontinental.
- Uso combinado de resultados de simulaciones climáticas de calidad aceptable, con herramientas estadísticas diseñadas partiendo del conocimiento de la climatología e hidrología local permiten hacer una estimación cuantitativa de posibles cambios en la precipitación en escenarios de cambio climático global.
- La naturaleza altamente no-lineal de los procesos físicos a considerar obliga a que las estimaciones sean a manera de probabilidades y no de manera determinista.

El documento está organizado en cinco capítulos. El Capítulo 2 presenta la metodología planteada para el desarrollo del presente estudio y se describen las bases de datos de reanálisis y de modelos acoplados. El Capítulo 3 presenta la evaluación y selección de modelos de circulación general donde se incluyen análisis de las características espacio-temporales de la zona de estudio en los productos CMIP3 y CMIP5. El Capítulo 4 contiene el desarrollo de la proyección de variables bajo escenarios de cambio climático. Finalmente las conclusiones principales se encuentran en el Capítulo 5.

## Capítulo 2

# Datos y Metodología

Tal como se había mencionado en el Capítulo 1 la evaluación de los impactos del cambio climático en la proyección de variables para aplicaciones de naturaleza científica (cambios en el comportamiento de variables geofísicas) y práctica (actividades antrópicas de generación de energía y obras de infraestructura que requieren el conocimiento de variables hidrológicas) se hace indispensable para la planeación del recurso hídrico. Herramientas como los modelos de circulación general, consideradas como el mecanismo más complejo e idóneo de conocimiento de los cambios en la dinámica global bajo forzamientos en la generación de gases de efecto de invernadero incluyendo acoplamientos entre módulos atmosféricos, terrestres, oceánicos y hielo oceánico, reproducen el intercambio de energía entre estos ambientes incluyendo la física de manera más rigurosa que lo que el desarrollo computacional y el conocimiento de la naturaleza física de los fenómenos a diversas escalas, hasta ahora lo permite. Todos los modelos desarrollados por diferentes grupos de investigación tienen aspectos específicos únicos que van desde las parametrizaciones hasta la configuración de las mallas para la solución de las ecuaciones por un método numérico en particular. Esto implica diversidad en los resultados de las simulaciones a nivel global para cada modelo, asociados no solo en dichas características sino también a la incertidumbre matemática que inherentemente se genera.

### 2.1. Metodología

La metodología planteada en el presente estudio parte del análisis de los cambios en las características climáticas regionales bajo escenarios de cambio climático usando las simulaciones de los modelos de circulación general. Es claro que el análisis de los modelos debe estar condicionado al uso de aquellos que tienen aplicación en la región de estudio, es decir, aquellos que representan de manera adecuada, por ejemplo, los fenómenos físicos macroclimáticos que influyen en el comportamiento climático de la zona, en este caso Colombia, lo cual obliga a realizar una selección de los mismos que sean físicamente coherentes con la región de estudio.

El objetivo general es aplicar una metodología objetiva que permita estimar cambios en la magnitud y variabilidad de la precipitación de estaciones asociadas al Valle de Aburrá bajo escenarios de cambio y variabilidad climática a partir de una combinación de modelos numéri-



cos globales y técnicas estadísticas. Una de las bases de la metodología que se propone en esta sección es que una buena estimación de cambios del ciclo hidrológico a futuro debe combinar resultados de modelos numéricos con técnicas estadísticas partiendo del diagnóstico de los registros históricos físicamente basadas que permitan subescalar datos de modelos a partir de los cambios en los campos de circulación o dinámicos, los cuales generalmente son mejor simulados que los campos físicos.

En general, para esta investigación se propone usar modelos climáticos globales del Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) fases 3 y 5 los cuales son disponibles de manera gratuita pero cuyo volumen de información hace que sea un reto su análisis. Dichos modelos son de relativa baja resolución pero algunos de ellos reproducen satisfactoriamente las condiciones de circulación atmosférica que permiten a su vez, en caso de ser necesario, desarrollar herramientas de estimación de la precipitación a partir de otros campos; por ejemplo, campos de circulación. Esto se hace dado que, en general, las predicciones o simulaciones de lluvia obtenidas directamente de los modelos no son de alta calidad como se mencionó anteriormente. Es relevante mencionar que a nivel global y continental los modelos climáticos han mejorado considerablemente desde los usados para el cuarto reporte del IPCC (AR4, CMIP3).

En este trabajo se ha diseñado una técnica de subescalamiento que permite obtener series de precipitación a escala de cuenca entre 2013 y 2100 usando los escenarios de compromiso de emisiones a niveles actuales (commit), y escenarios de estabilización a 550, 720 y 850 ppm (SRES A1, A1B y A2) al igual que los nuevos escenarios RCP (Representative Concentration Pathways) del CMIP5.

En primera instancia, la evaluación de los modelos se enfoca en dos de los forzadores mas importantes que modulan la variabilidad climática del país. El movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical y la dinámica de la celda de Walker que modulan gran parte del comportamiento regional de las variables atmosféricas; la primera en mayor proporción que la segunda. Mediante promedios multianuales y climatologías de variables dinámicas se puede observar la estructura espacio-temporal a escala regional de la zona de estudio, lo que da lugar a la selección de modelos que representen de manera aceptable el paso de la ZCIT en Colombia durante el siglo XX. En la evaluación de los modelos frente a la modelación de la variabilidad del Pacífico y su influencia en la climatología sobre Colombia se identifican patrones espaciales del comportamiento convectivo mediante correlaciones de la región de estudio frente a la franja tropical. Este procedimiento, usando en un total a 64 modelos entre los pertenecientes a CMIP3 y CMIP5, permite evaluar la representatividad en los éstos de la relación entre la climatología colombiana y los aspectos macroclimáticos. Los modelos satisfactorios fueron sometidos a una última evaluación de la influencia de la variabilidad, en esta oportunidad temporal, del Pacífico. El espectro de ondas "wavelets" es útil para este tipo de análisis. Los modelos seleccionados son reportados y usados en la proyección de variables bajo escenarios de cambio climático.

Dado que la escala de los modelos de circulación general es inherentemente incapaz de capturar complementamente la variabilidad local, es necesario una herramienta estadística que permita asociar la variabilidad de precipitación a escala local en zonas de influencia a aspectos climáticos y de circulación de escala regional o global. Este paso es vital pues permite el desarrollo de una herramienta de subescalamiento físicamente basada, partiendo de mediciones de EPM.

Siendo consistentes con la incertidumbre que los modelos cuentan frente a las magnitudes de las variables macroclimáticas, se hace necesario, como paso inicial de la técnica estadística, realizar el ajuste mediante relaciones Cuantil-a-Cuantil entre Reanálisis y modelos en el siglo XX que participarán como medio de reproyección de estas variables a futuro para cada escenario de forzamiento. Ya teniendo la reproyección se presenta los histogramas conjuntos entre el reanálisis y la lluvia como herramienta probabilística No-Paramétrica, esto como punto de relación entre la variabilidad de gran escala en la precipitación. Las distribuciones asociadas con las variables a futuro re proyectadas, son obtenidas a partir de los histogramas conjuntos mencionados anteriormente. Finalmente se obtendrá una asociación entre campos atmosféricos forzados y el campo de lluvia de forma probabilística.

En resumen la metodología planteada se puede plantear en las siguientes fases:

Evaluación de los modelos del CMIP3 y CMIP5 en su capacidad de reproducción de patrones de circulación que modulan la hidroclimatología de Colombia. La evaluación se hace durante el siglo 20 dando lugar a la selección de modelos que representen de manera aceptable la variabilidad y climatología durante el siglo 20. Dicha selección de modelos se ha planteado a partir de tres diferentes miradas: (i) representatividad de la climatología regional, (ii) Representatividad en los modelos de la relación de la climatología colombiana con aspectos macroclimáticos, y (iii) variabilidad espaciotemporal de los modelos comparados con las observaciones. Las Figuras 2.1 y 2.3 presentan ejemplos de validación como los que se usan para la evaluación y selección de modelos del CMIP3 y CMIP5. En el primer caso (Figura 2.1) se presenta un ejemplo de una comparación entre los promedios multianuales (siglo XX) de la velocidad vertical  $\omega$  en los 500 hPa para el mes de mayo usando valores obtenidos de reanálisis (panel superior) y obtenidos de 2 modelos acomplados diferentes. En uno de los casos el modelo simula de manera aceptable la estructura espacial de  $\omega$  observada, mientras en el otro caso el ascenso de aire sobre el continente es pobremente representado, haciendo el modelo en cuestión no usable para obtener conclusiones sobre cambios en la precipitación en el siglo XXI. Por otro lado, en la Figura 2.3 se evalúa la relación entre la climatología regional sobre Colombia con la circulación vertical en todo el planeta a escala interanual, mediante la comparación de la estructura espacial del mapa de correlaciones entre la serie de tiempo estandarizada de  $\omega$  a los 500 hPa sobre Colombia y la misma variable en todos los pixeles del mapa. Nótese que en el mapa obtenido a partir de reanálisis se observa una relación importante entre la climatología regional y la variabilidad sobre el océano Pacífico, la cual es representada de manera aceptable por uno de los modelos (a pesar de presentar un corrimiento hacia el oeste del centro de correlaciones), mientras que el segundo modelo representa pobremente dicho patrón espacial. Ambos ejemplos resaltan la importancia de la evaluación, validación y selección de modelos del CMIP3 y CMIP5.

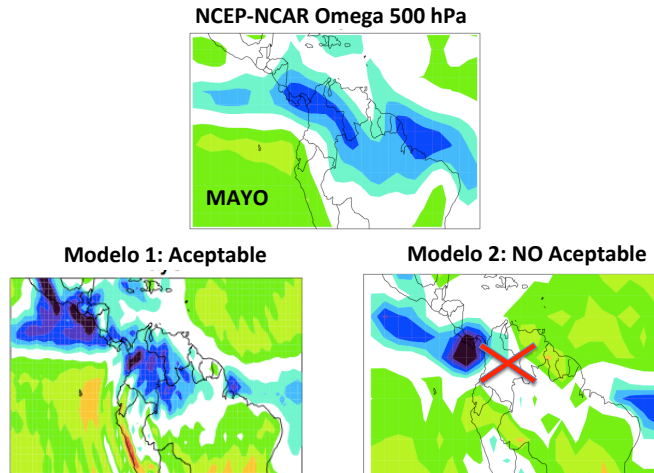


Figura 2.1: Ejemplo de validación de la climatología regional para la velocidad vertical  $\omega$  a los 500 hPa

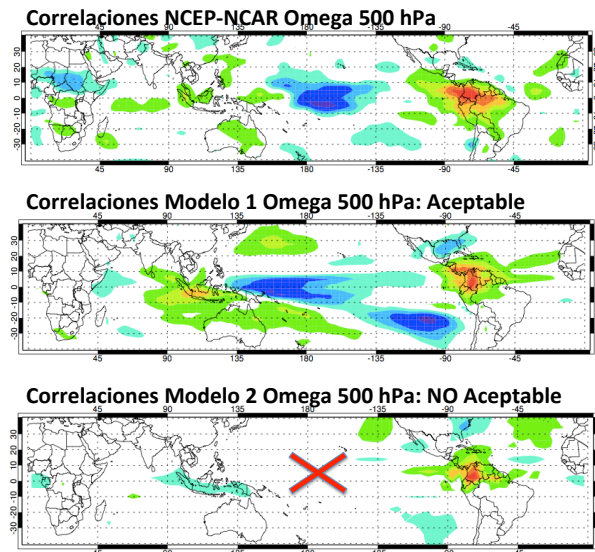


Figura 2.2: Ejemplo de validación de la relación de la climatología colombiana con aspectos macroclimáticos usando correlaciones entre  $\omega$  a los 500 hPa sobre Colombia y  $\omega$  sobre todo el globo

Desarrollo de herramienta estadística que permita asociar la variabilidad de precipitación a aspectos climáticos y de circulación de escala regional o global. En este ítem se usarán datos de estaciones de EPM y datos de reanálisis globales. Este paso es vital pues permite el desarrollo de una herramienta de subescalamiento físicamente basada. La Figura ?? presenta un ejemplo del punto de partida de la construcción de dichas relaciones, en el cual el mapa resultante de la función relación -correlación lineal- entre las anomalias de precipitación de una serie de EPM y la variabilidad de  $\omega$  en los 500 hPa se convierte en la base para relacionar cambios regionales observados en los modelos seleccionados y la precipitación local.

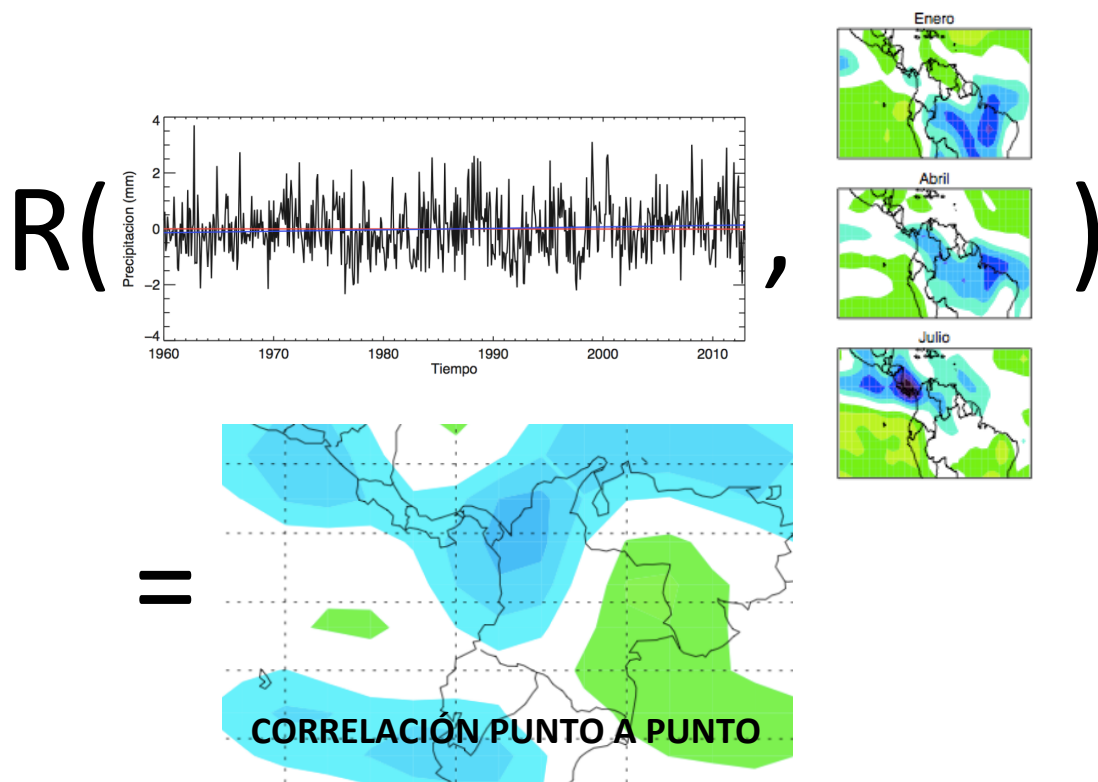


Figura 2.3: Ejemplo esquemático de la construcción de una herramienta estadística que relacione patrones espaciales de escala regional con la precipitación local. En el presente caso, el mapa resultante de la función relación-correlación lineal- entre las anomalias de precipitación de una serie de EPM cualquiera y la variabilidad de  $\omega$  en los 500 hPa se presenta en el panel inferior, y se convierte en la base para relacionar cambios regionales observados en los modelos seleccionados y la precipitación local

Desarrollo de herramienta probabilística de generación de series de tiempo futuras entre

2013 y 2100 a partir de metodologías estadísticas usando datos de modelos CMIP3, CMPI5 y reanálisis usando técnicas de Cuantil-a-Cuantil.

La metodología anterior permite estudiar, a partir de series generadas futuras de precipitación entre 2012 y 2100 en la zona de influencia.

## 2.2. Modelos de Circulación General

Estos modelos fueron desarrollados partiendo de las ambiciones investigativas acerca del entendimiento de la circulación global, los procesos físicos involucrados y su variabilidad a largo plazo, en el presente, pasado y futuro bajo forzadores de diferente naturaleza. Con esta motivación fueron concebidos los modelos de circulación general atmosférica (AGCMs) como algoritmos matemáticos acoplados a escala sinóptica que resuelven las ecuaciones gobernantes (Ecuaciones 2.1, 2.2, 2.3, 2.4) de los procesos físicos que a nivel atmosférico y oceánico obedecen a la física de los mismos ((Holton, 2004)) y reconociéndolos como la representación más compleja actualmente disponible (Solomon et al. (2007)).

Momentum horizontal

$$\frac{D\mathbf{V}}{Dt} + f\mathbf{k} \times \mathbf{V} = -\nabla\phi + \sigma\nabla \ln p_s \frac{\partial\phi}{\partial\sigma} \quad (2.1)$$

Conservación de masa

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} + \nabla \cdot p_s \mathbf{V} + p_s \frac{\partial\phi}{\partial\sigma} = 0 \quad (2.2)$$

Energía termodinámica

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla\theta + \sigma \frac{\partial\theta}{\partial\sigma} = \frac{J}{C_p} \frac{\theta}{T} \quad (2.3)$$

Evolución de la presión

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} = \int_0^1 \nabla \cdot (p_s \mathbf{V}) d\sigma \quad (2.4)$$

A mediados de la década de 1990 el comité *World Climate Research Programme* (WCRP) organizó el primer ejercicio de intercomparación de modelos globales acoplados con recolección y almacenamiento de datos por parte del *Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison* (PCMDI), y puesto a disposición (Meehl et al., 2007). Estos programas han tenido varias fases, con mejoras e implementación de estrategias para hacer una mejor representación de la física de circulación global con respecto a fases previas. Los resultados recopilados por la PCMDI durante el 2005 y 2006 se consideran como la fase 3 del *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP3) y fue insumo del *Fourth Assessment Report* (AR4) de la IPCC (Solomon et al., 2007). Análogamente para el 2014 se publicó el *Fifth Assessment*

Report (AR5) de la IPCC como producto de la quinta fase del *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5) (Stocker et al., 2013).

Los vacíos identificados en la comprensión del clima pasado y futuro y las diferentes fallencias identificadas en los experimentos diseñados en fases previas, sirvió como insumo en la planificación de escenarios y diversas mejoras hechas a los modelos en fases posteriores en el aporte de nuevos conocimientos sobre el sistema climático y los procesos responsables del cambio y la variabilidad climática. Adicionalmente, se corren mayor número de escenarios con respecto a las fases anteriores, lo que significa un mayor reto no sólo en costo computacional, sino también en la capacidad de almacenamiento y en costo humano (Meehl et al., 2007; Solomon et al., 2007; Stocker et al., 2013).

En el desarrollo del trabajo se realiza el análisis del escenario del Siglo XX en la selección de modelos, y en la proyección de cambio climático se hizo uso de los datos para cuatro escenarios diseñados en la fase 3 y 5 del CMIP, especificados en la Tabla 2.1 y la Tabla 2.2. La totalidad de escenarios diseñados para cada fase se encuentra en Apéndice A, al igual que la totalidad de los modelos CMIP3 y CMIP5 con el grupo desarrollador, país, nombre del modelo y resolución. Aquí se presentan solo los modelos con disponibilidad de datos en vientos, especificando su resolución (Tabla 2.3 y Tabla 2.4).

Cuadro 2.1: Escenarios de simulación CMIP3

Escenarios	Descripción
La simulación del siglo XX al 2000	Empezando desde las condiciones preindustriales a finales del 1800 con forzadores antropogénicos y naturales.
Experimento de cambio climático 1	Simulación del siglo XXI con SRES B1 (forzador bajo, es decir, concentraciones de CO2 cerca 550ppm para 2100) de 2000 a 2100.
Experimento de cambio climático 2	Simulación del siglo XXI con SRES A1B (forzador medio, es decir, concentración de CO2 cerca de 700ppm para 2100) de 2000 a 2100.
Experimento de cambio climático 3	Simulación del siglo XXI con SRES A2 (forzador alto, es decir, concentraciones de CO2 cerca 820 ppm para 2100) de 2000 a 2100.
Escenario de compromiso para cambio climático 1	Fija todos los valores de concentración para el año 2000 y hasta 2100 (CO2 aproximado de 360ppm).

En el caso de CMIP3, los desarrolladores incluyeron las salidas de los experimentos de las fases anteriores como modo de calibración e información disponible para su análisis por parte de los grupos de investigación relacionados con el clima, usuarios de las bases de datos ((Meehl et al., 2007)). CMIP5 incluye dos tipos de experimentos, donde el primero realiza la integración a largo plazo con modelos de cambio climático, y el segundo realiza integraciones a corto plazo de predicción decadal (10-30 años); el primero inicia desde el control preindustrial, mientras el segundo inicia con condiciones observadas del océano y hielo oceánico (Taylor et al., 2012).

Cuadro 2.2: Escenarios de simulación CMIP5

Escenarios	Descripción
historical	Pasado aproximadamente 1.5 siglos (1850-2005)
rep26	Proyección futura (2006-2300)forzada por RCP2.6
rep45	Proyección futura (2006-2300)forzada por RCP4.5
rep60	Proyección futura (2006-2100)forzada por RCP6
rep85	Proyección futura (2006-2300)forzada por RCP8.5

Cuadro 2.3: Modelos CMIP3

Modelo	Resolución	Modelo	Resolución
CGCM3.1(T47)	3,750°x3,750°	CGCM3.1(T63)	2,800°x2,800°
CNRM-CM3	1,900°x1,900°	GFDL-CM2.0	2,000°x2,500°
GFDL-CM2.1	2,000°x2,500°	GISS-AOM	3,000°x4,000°
GISS-EH	4,000°x5,000°	GISS-ER	4,000°x5,000°
IAP FGOALS-g1.0	2,800°x2,800°	INGV-ECHAM4	1,125°x1,125°
INM-CM3.0	4,000°x5,000°	IPSL-CM4	2,500°x3,750°
MIROC3.2 (hires)	1,125°x1,125°	MIROC3.2 (medres)	1,125°x1,125°
MPI ECHAM5	1,875°x1,875°	MRI-CGCM2.3.2	2,800°x2,800°
NCAR CCSM3	1,400°x1,400°	NCAR PCM1	2,800°x2,800°
UKMO-HadCM3	2,500°x3,750°	UKMO-HadGEM1	1,250°x1,250°

Cuadro 2.4: Modelos CMIP5

Modelo	Resolución	Modelo	Resolución
BCC CSM1.1	2,8°x2,8°	BCC CSM1.1m	1,125°x1,1°
CanESM2	2,8°x2,8°	CCSM4	1,25°x0,94°
CESM1 BGC	1,25°x0,94°	CESM1 CAM5	1,25°x0,94°
CESM1 FASTCHEM	1,25°x0,94°	CESM1 WACCM	2,5°x1,9°
CMCC CESM	3,75°x3,7°	CMCC CM	0,75°x0,75°
CMCC CMS	2,81°x2,79°	CNRM CM5	1,875°x1,85°
CNRM CM5 2	1,4°x1,4°	CSIRO BOM ACCESS 1.0	1,875°x1,25°
CSIRO BOM ACCESS 1.3	1,875°x1,25°	CSIRO Mk3.6.0	1,875°x1,86°
FGOALS G2	2,8°x3,27°	FIO ESM	2,8°x2,8°
GFDL CM2.1	2,5°x2,0°	GFDL CM3	2,5°x2,0°
GFDL ESM2G	2,5°x2,0°	GFDL ESM2M	2,5°x2,0°
GISS E2 H	2,5°x2,0°	GISS E2 H CC	2,5°x2,0°
GISS E2 R	2,5°x2,0°	GISS E2 R CC	2,5°x2,0°
HadCM3	3,75°x2,5°	HadGEM2 AO	1,875°x1,25°
HadGEM2 ES	1,875°x1,25°	INM CM4	2,0°x1,5°
IPSL CM5A LR	3,75°x1,9°	IPSL CM5B LR	3,75°x1,9°
IPSL CM5A MR	2,5°x2,5°	MIROC4h	0,56°x0,56°

Modelo	Resolución	Modelo	Resolución
MIROC5	1,4°x1,4°	MIROC CHEM	2,8°x2,8°
MIROC ESM	2,8°x2,8°	MPI ESM LR	1,87°x1,87°
MPI ESM MR	1,87°x1,87°	MPI ESM P	1,87°x1,87°
MRI CGCM3	1,87°x1,87°	MRI ESM1	1,125°x1,12°
NorESM1 M	2,5°x1,9°	NorESM1 ME	2,5°x1,9°

Entre las diferencias más notables entre la fase 3 y la fase 5 es que por primera vez se acoplan componentes bioquímicos que dan respuesta a flujos de carbono entre el océano, la atmósfera y la biósfera terrestre (Modelos de sistema terrestre (ESM)). En algunos modelos se incluye pronóstico de interacción de aerosoles, química y vegetación. Varios grupos modeladores realizan simulaciones con mejor resolución e integración de la química atmosférica. Adicionalmente, una mayor cantidad y mejor calidad de escenarios se puso a disposición para análisis más completos no sólo de la interacción atmósfera/tierra/océano/hielo oceánico sino también la inclusión de cadenas químicas y orgánicas más complejas, además de proporcionar resultados a mayor resolución espacial (Taylor et al., 2012).

Algunas variables fueron incluidas para el uso investigativo en la comparación y el análisis de datos satelitales, paquetes de simulación, entre otros (*Simulator Package (COSP)*, *Cloud-Sat/Cloud-Aerosol Lidar y Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO)*, *International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP)*). Dichas variables mencionadas facilitan la evaluación y análisis de la reproducción de las nubes en los modelos climáticos ((Taylor et al., 2012)).

### 2.3. Reanálisis NCEP/NCAR

Mediante el proyecto señalado como "reanalysis", el *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) y el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) se han unido para la producción de un registro interactivo de más de 50 años de asimilación de datos alimentando la modelación de variables atmosféricas. En la primera década (1948-1957) se asimilaron datos 3 horas más tarde de lo que actualmente se realiza (tiempo real). (Kistler et al., 2001).

El proceso de asimilación consiste en la combinación de datos provenientes de mediciones de estaciones, sondeos, satélites, boyas, entre otras fuentes de información, se combina con las simulaciones. Se espera que los datos generados a partir de asimilación de información confiable reproduzcan variaciones anuales e interdecadales de variables macroclimáticas como también tendencias de largo plazo. En el proceso de asimilación, los datos son producidos mediante un esquema o algoritmo secuencial que hace ciclos de análisis cada 12 horas y en cada uno de ellos son combinadas las observaciones con los resultados del modelo. Se incorpora un sistema automático de corrección que evalúa cada una de las variables del modelo con respecto a una variable de control, determinando que tan acorde es el resultado con respecto a las desviaciones estándar de dicha variable, proceso en el cual los datos modelados juegan un papel importante en la extrapolación de variables donde no exista información conocida tanto en espacio como en tiempo.



Las variables principales que se observan y son sometidas a los procesos de asimilación son: Presión, humedad relativa, componentes zonales, meridionales y verticales de la velocidad del viento, y temperatura; siendo obtenidas de fuentes como estaciones en tierra, barcos de medición, boyas, radiosondeos, perfiladores de viento, satélites, aeronaves, entre otros. Las fuentes pueden presentar errores en la recolección como en la transmisión, en este punto es donde se hace importante el sistema automático de corrección.

Una vez se consolida la información para el reanálisis se sigue un proceso de interpolación óptima y un nuevo control de calidad con el cual se quiere detectar errores desde la asimilación dado por problemas de medición de los instrumentos, fallas humanas, errores en la construcción de los datos y en la transmisión. El algoritmo usa una interpolación estadística tridimensional para comparar cada uno de los valores con sus vecinos cercanos, también se evalúan colectivamente mediante interpolación y detecta cuando hay errores.

De la base de datos que se encuentra disponible en la pagina web de la *Physical Sciences Division* del *National Center for Environmental Prediction* (NOAA) se encuentra la base de datos separada en 7 secciones, de las cuales se tomó la sección de variables en niveles de presión donde se encuentran disponibles a una resolución espacial de  $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ , y resoluciones temporales desde 4 veces por día, diarias y medios mensuales.

## 2.4. Registros históricos de Precipitación en el Valle de Aburrá a partir de estaciones de EPM

EPM ha suministrado a la Universidad Nacional, bajo estrictas cláusulas de confidencialidad, registros hidrometeorológicos históricos de 24 estaciones ubicadas sobre el Valle de Aburrá.

Para los análisis incluidos en el presente capítulo, se seleccionan un total de 14 estaciones considerando a partir de la calidad de las mediciones y la longitud de tiempo de registro. El proceso posterior se realiza agregando los registros in situ a escala mensual para desarrollar el análisis de cambio climático bajo los escenarios de forzamiento de  $\text{CO}_2$  que tienen disponibles los modelos de la tercera y quinta fase de CMIP.

Los registros históricos incluidos en esta sección corresponden a estaciones de EPM presentadas en el Cuadro 2.5, donde describen de forma general la localización y características de las estaciones analizadas.

Cuadro 2.5: Estaciones EPM asociadas a la Cuenca Force

Codigo	Nombre	Longitud	Latitud	Tipo Est	Municipio	Cuenca
2701023	Palmas	75°32'21,8"	6°9'18,13"	PVM	Envigado	Negro
2701024		75°29'18,04"	6°12'17,68"	PVM	Rionegro	Negro
2701034	Mazo	75°30'32,60"	6°15'46,00"	PVM	Guarne	Piedras Blancas

<b>Codigo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Tipo Est</b>	<b>Municipio</b>	<b>Cuenca</b>
2701035	Chorrillos	75°30'21,9"	6°17'56,9"	PVM	Medellín	Piedras Blancas
2701036	Caldas	75°37'30,27"	6°3'37,74"	PVM	Caldas	Medellín
2701037	Fabricato	75°36'0,68"	6°21'42,80"	PVM	Bello	Medellín
2701038	San Antonio de Prado	75°39'53,8"	6°11'15,6"	PVM	Medellín	Medellín
2701045	Villa Hermosa Planta	75°33'2,2"	6°15'38,8"	PVM	Medellín	Medellín
2701046	San Cristobal	75°38'20,5"	6°17'1,2"	PVM	Medellín	Medellín
2701053	Alto San Andrés	75°26'40,10"	6°26'11,50"	PVM	Girardota	Medellín
2701057	Barbosa	75°19'51,39"	6°26'30,94"	PVM	Barbosa	Medellín
2701093	Ayurá	75°34'5"	6°10'8"	PVM	Envigado	Medellín
2701517	Medellín	75°35'5,61"	6°13'45,19"	CLM	Medellín	Medellín
2701736	RMS-15 Gabino	75°12'25,09"	6°33'38,75"	LM	Santa Rosa de Osos	Nechí