

MEDIO AMBIENTE

CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA: TENDENCIAS EN LA SEGUNDA MITAD DEL SIGLO XX Y ESCENARIOS POSIBLES PARA EL SIGLO XXI

José Daniel Pabón Caicedo*

RESUMEN

Pabón Caicedo J.D.: Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **36** (139): 261-278, 2012. ISSN 0370-3908.

Con base en el uso del sistema de análisis estadístico RClindex aplicado a las series climatológicas de diferentes regiones del territorio colombiano, se realizó una reevaluación de las tendencias de largo plazo observadas durante la segunda mitad del siglo XX en la temperatura del aire, la precipitación y los eventos extremos de temperatura del aire y de lluvia; complementariamente, con ayuda de modelamiento del clima, se elaboraron escenarios A2 y B2 como posibles condiciones a observarse en el territorio colombiano durante el siglo XXI. En cuanto a las tendencias actuales, se confirmó el calentamiento generalizado entre 0,1-0,2°C/decenio, la reducción de los fenómenos de heladas y el incremento de la frecuencia de las temperaturas máximas; así mismo, se señalan los cambios (reducciones y aumentos) en la precipitación anual y la frecuencia de los eventos de lluvia intensa en las diferentes regiones del territorio colombiano. Los escenarios para el siglo XXI indicaron incrementos paulatinos de la temperatura media del aire de 2-3° entre 2011-2014 y de 3 y 4°C hacia finales de siglo; aunque en los valles del Magdalena y del Cauca el calentamiento sería mayor que en el resto de regiones; la precipitación hacia finales del siglo XXI registraría reducciones hasta del 30% en la parte interandina, y en la región Caribe, y aumentos un poco más del 30% de los acumulados anuales observado en 1961-1990 en la región Pacífica, en los piedemonte orientales de la Cordillera Oriental y en un sector sobre el sur de Bolívar y Sucre.

Palabras clave: cambio climático en Colombia; escenarios de cambio climático para Colombia; clima de Colombia

ABSTRACT

Using the statistical tool RClindex applied to the climatological time series of different regions of Colombian territory, a reassessment of the long term trends observed in air temperature, precipitation and extreme events during the second half of the 20th Century was made; additionally, supported by climate modeling and using the A2 and B2 IPCC climate change scenarios, regional scenarios were elaborated to provide the possible conditions will be observed over Colombia during the 21st Century. The identified trends corroborate the widespread

* Grupo de Investigación "Tiempo, clima y sociedad" Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Colombia

warming of 0,1-0,2°C/decade, a decreasing of annual number of frost days and an increasing of the maximum temperatures frequency; the results also indicate the changes (reduction and increasing) have been occurring over different regions of Colombian territory in both annual precipitation and rainfall extreme events frequency. The elaborated scenarios show a gradual increase of air temperature in the range of 2-3°C for 2011-2040 and 3-4°C for 2071-2100 periods, however over Magdalena and Cauca valleys the warming could be greater than the rest of the regions; at the end of 21st Century the annual precipitation could be reduced in 30% over the interandean area, and in the Caribbean region, meanwhile in the Pacific region, the eastern foothills of Eastern Cordillera, and in a zone of Bolivar and Sucre the precipitation could be increase in 30% of the annual amounts observed during 1961-1990.

Key words: climate change in Colombia; climate change scenarios for Colombia; Colombian climate.

Introducción

Desde el decenio anterior el **IPCC (2007a)** ha señalado con contundencia las evidencias inequívocas del calentamiento global y de cambio climático que se han venido generando tanto por procesos naturales como por diversas actividades antrópicas. Estos fenómenos, que han sido muy notorios hacia finales del siglo XX y que serán más marcados en la medida como transcurra el siglo XXI, afectarán considerablemente los ecosistemas y los sistemas humanos de diferentes regiones del planeta (**IPCC, 2007b**). Como respuesta ante esta situación ambiental se desarrollan acciones para reducir la magnitud de tales cambios (mitigación) y para preparar a las comunidades ante las nuevas condiciones climáticas (adaptación). Con el propósito de sustentar las diferentes medidas de esta respuesta, diversos países desarrollan el estudio de la expresión regional del cambio climático y proyectan a mediano y largo plazo las posibles condiciones climáticas del futuro con el fin de orientar la planificación para una óptima adaptación. De ahí que los países estén haciendo esfuerzos para mejorar el conocimiento acerca de la expresión del cambio climático en sus regiones y para plantear con la menor incertidumbre posible las condiciones climáticas futuras.

En lo que respecta a Colombia, el tema del cambio climático reviste especial importancia toda vez que le concierne por las siguientes razones: 1) Con sus emisiones de gases de efecto invernadero originadas en diversos procesos antrópicos, aunque en menor proporción (según **MAVDT-IDEAM-PNUD (2010)**, el consolidado nacional de emisiones constituye el 0,37% del total mundial), el país contribuye en la generación del problema global; 2) Experimenta los efectos de la expresión regional del fenómeno global, lo que impactará el medio biofísico, los ecosistemas y el sistema socioeconómico de sus regiones (**Pabón, 2003**); 3) Se afecta por las medidas que se tomen en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (ver, por ejemplo, **Rodríguez-Becerra & Mance, 2009**). En estas tres vías de participación en el problema ambiental hay para el país

tanto efectos negativos como oportunidades, lo que señala la necesidad de mejorar el conocimiento en estos aspectos para fundamentar la reducción de los impactos negativos y el aprovechamiento de los posibles beneficios que las nuevas condiciones climáticas puedan brindar.

Como un aporte en la construcción del conocimiento necesario para la elaboración de medidas de adaptación orientadas a la reducción de los impactos negativos que pudiera tener el cambio climático, se desarrolló un estudio en el que se revisaron las tendencias de largo plazo registradas en los últimos 50 años sobre el territorio colombiano y se elaboraron escenarios que anticipan las posibles condiciones climáticas del siglo XXI, los que pueden servir de base para inferir el impacto potencial del cambio climático en diferentes regiones del país e identificar las vulnerabilidades que sería necesario reducir con miras a la adaptación al cambio climático. El presente documento sintetiza los resultados de dicho trabajo.

Progresos en el estudio del cambio climático en Colombia

La posibilidad de un cambio climático y la inminencia de sus impactos en Colombia han estimulado el desarrollo de estudios sobre el tema en los últimos decenios. Investigadores, grupos de investigación y diversas instituciones se han ocupado particularmente en la identificación de evidencias del cambio climático en el país y en la elaboración de escenarios de cambio climático para el siglo XXI.

La identificación de las evidencias del cambio climático en Colombia

En el tema del cambio climático es necesario identificar dos variantes: los cambios climáticos del pasado lejano (hace miles y millones de años) y reciente (el último siglo) y el cambio climático actual.

Las evidencias de cambios climáticos de los últimos 3 millones de años (los ocurridos en el Cuaternario, principalmente)

han sido analizadas con la aplicación de diferentes metodologías (estratigrafía, glacio-morfología, análisis de polen en sedimentos lacustres, dendroclimatología, principalmente) en diversas zonas del territorio colombiano. En la actualidad se dispone de los resultados de las investigaciones realizadas para la Sabana de Bogotá (**van der Hammen & Gonzales, 1963, 1964; van Geel & van der Hammen, 1983; Hooghiemstra, 1984; Hooghiemstra & Ran, 1994**), diferentes zonas de la región Andina (**Gonzalez et al., 1965; van der Hammen et al., 1981**), el río Magdalena (**Wijmstra, 1967; van der Hammen, 1986; Dueñas, 1992; van der Hammen & Cleef, 1992**) y la Amazonía colombiana (**van der Hammen et al., 1992**). Es posible que queden sin mencionar otros autores que han contribuido al desarrollo del conocimiento del clima del Plioceno y del Cuaternario en Colombia. **Van der Hammen & Hooghiemstra 1995, 1997**, resumieron las investigaciones que sobre el tema de cambios climáticos del pasado se había realizado hasta la época. De los trabajos de **van der Hammen & Ortiz-Troncoso (1988)** y **van der Hammen et al., (2002)** es posible inferir que en el Pleniglacial de hace 25000-15000 años, la temperatura media del aire estuvo en 6-8°C por debajo de lo actual y que hace 15 000 años el hielo en las montañas colombianas descendió hasta altitudes ligeramente inferiores a los 3.000 metros. Estos estudios también demuestran que los pisos bioclimáticos sufrieron importantes desplazamientos altitudinales y los altiplanos de Cundinamarca y Boyacá, por ejemplo, tenían una vegetación similar a la de los páramos actuales. De otra parte, en la zona costera del país numerosas cavernas sumergidas actualmente a diversas profundidades reflejan el ascenso del nivel del mar desde sus niveles mínimos durante los períodos glaciales (última glaciación) hasta los niveles que se observan hoy en día. Adicionalmente, presentan evidencias de que los patrones de distribución espacial de la precipitación también sufrieron grandes cambios; por ejemplo, los campos de dunas de los Llanos orientales, que actualmente se encuentran inactivos y estabilizados por la vegetación, registraron condiciones desérticas preholocénicas, muy diferentes a las observadas hoy en día en esa región.

De igual manera, los resultados de **van der Hammen & Cleef (1992)** sugieren que en el máximo del Holoceno medio (entre hace 7000 y 5000 años) la temperatura media del aire estuvo hasta en 2°C por encima de los promedios multianuales que se registraron en la segunda mitad del siglo XX y que sobre el altiplano cundiboyacense se registraron condiciones relativamente más secas que las del período actual. La fase de enfriamiento que duró cerca de mil años (entre hace 11 000 y 10 000), correspondiente al Younger Dryas, registrada regionalmente como el stadial El Abra, tuvo efectos sobre el territorio colombiano con disminución de las temperaturas medias anuales hasta de entre 1 y 3°C y reducciones de los

volúmenes de precipitación en los Andes colombianos (**van der Hammen & Gonzalez, 1963; van der Hammen & Hooghiemstra, 1995; van't Veer et al., 2000**).

La expresión de las dos fases de cambio climático del último milenio (el Calentamiento Medieval entre los años 900 y 1200 y la Pequeña Edad de Hielo entre el 1400 y 1800, aproximadamente) no ha sido descrita aún. Solo a partir de los resultados algunos estudios en los que se representa la región de Suramérica (**Mann, 2002; Mann et al., 2009; Reuter et al. 2009; Gonzalez-Roucco et al. 2011**), se puede concluir que en la Pequeña Edad de Hielo, sobre la región en la que se localiza el territorio colombiano la temperatura media anual estuvo en 1-3°C por debajo de la actual, la precipitación estuvo por encima de lo actual y en la región Andina se presentaron condiciones más húmedas que las registradas en la segunda mitad del siglo XX.

Los primeros esfuerzos en el tratamiento del tema del cambio climático reciente en Colombia ha quedado compilado en los trabajos de **Lozano & Pabón (1995)** y **Lozano et al. (1996)**. A partir de esa época se han realizado variedad de estudios en los que se han analizado las diferentes expresiones del cambio climático en curso sobre diversos elementos del medio biofísico de Colombia. Se han analizado las tendencias de largo plazo en variables climatológicas, especialmente de la temperatura del aire y de la precipitación (**Pabón, 1995a, 1995b; Mesa et al., 1997; Perez et al., 1998; Quintana-Gómez, 1999; León, 2000a; Pabón & Hurtado, 2002; Pabón, 2003b; Poveda, 2009; MAVDT-IDEAM-PNUD, 2010**). Al sintetizar los resultados se puede establecer que, durante la segunda mitad del siglo XX, en diversas regiones del país la temperatura media del aire está aumentando a razón de 0.1-0.2° por decenio y la temperatura máxima en alrededor de 0,6°C, en tanto que la precipitación presentó cambios entre el -4% y el 6% por decenio, aunque los sectores con disminución o aumento son diferentes según los autores, se estaría observando una generalizada reducción en sectores de la región interandina (valles de los ríos Magdalena y Cauca) y Caribe, e incrementando en áreas de piedemonte del lado Este de la Cordillera Oriental y en el sector centro-norte de la región Pacífica. Se debe mencionar los trabajos sobre la identificación de cambios climático por factores locales como la urbanización particularmente para Bogotá (**Pabón et al., 1998; Perico-Agudelo, 2009; Poveda, 2008; Ángel et al., 2010**) y otras ciudades (**León, 2000b**).

La expresión contundente del calentamiento global y del cambio climático en el territorio colombiano es la reducción del área de los glaciares de montaña. Entre 1940 y 1985 desaparecieron en Colombia ocho glaciares y actualmente sólo existen cuatro nevados sobre estructuras volcánicas (Huila,

Ruiz, Santa Isabel, Tolima) y dos sierras nevadas (Cocuy y Santa Marta). Se estimó que a finales del siglo XX la recesión en lenguas glaciares era del orden de 15 a 20 metros/año y que la pérdida de espesor variaba entre 1-2 metros/año (**Flórez, 1992b**). Hay evidencias de que el ritmo del retroceso fue mayor en los últimos decenios del siglo XX (**Florez, 1992a**) y, especialmente, en el primer decenio del siglo XXI (**Ceballos et al., 2006; Huggel et al., 2007**). Recientes estimaciones del retroceso glaciario (**MAVDT-IDEAM-PNUD, 2010**), basadas en observaciones del primer decenio del siglo XXI, señalan un ritmo de 20-25 metros por año y proyectan una desaparición de los glaciares entre el decenio de 2030 y 2040, aunque una evaluación realizada por **Poveda & Pineda (2009)** alertan sobre la desaparición en el decenio 2010-2020.

Las tendencias de incremento del nivel medio del mar en las costas colombianas han sido analizadas por **Rangel y Montealegre (2003)**, **Pabón (2003a,b)**; **Pabón & Lozano (2005)**, quienes han utilizado las series de nivel medio del mar en el Pacífico y Caribe y los datos de topografía del océano generados por el programa TOPEX/POSEIDON. Se ha establecido que durante el período 1961-1990 el incremento regional del nivel del mar tuvo un ritmo de 3-5 milímetros al año para el Pacífico y 1-2 milímetros/año en la costa Caribe.

El progreso en la elaboración de escenarios de cambio climático para Colombia

La elaboración de escenarios de cambio climático para Colombia data de comienzos del presente siglo con la aplicación de la metodología de escalamiento estadístico de los productos de modelos globales de circulación general de la atmósfera (**Eslava & Pabón, 2001; Pabón et al., 2001a**). **Mulligan (2000)** desarrolló escenarios de cambio climático para el Valle del Cauca y se debe mencionar también el trabajo realizado por **Hulme & Sheard (1999)** para los países del sector norte de la región Andina. Estos trabajos iniciales generaron información que fue incluida en **IDEAM-MI-NAMBIENTE-PNUD (2001)**.

Con base en seis modelos y apoyándose en los modelos incluidos en los sistemas MAGGIC y SCENGEM, **Hulme & Sheard (1999)** establecieron los posibles cambios de la temperatura anual del aire y de la precipitación anual en el noroeste de Suramérica (los Andes del Norte) considerando los escenarios B1, B2, A1 y A2 formalizados por IPCC en su Reporte Especial de Escenarios un año después (**IPCC, 2000**). Según estos autores, considerando los escenarios más extremos, la temperatura del aire para el territorio colombiano en el año 2050 estaría entre 1.0°C (escenario bajo) y un

poco más de 2.5°C (escenario alto) por encima del promedio de 1961-1990; hacia el año 2080 el cambio estaría entre 1.5 y 4.5°C, respectivamente. Según el estudio de **Hulme & Sheard (1999)** hacia el año 2050 la precipitación anual en el sector centro, sur y sur-occidente del territorio colombiano aumentaría entre un 2-10% del volumen anual 1961-1990; en el sector norte y nororiente disminuiría hasta en un 4%. Hacia el 2080 el aumento es mayor en el suroccidente y puede alcanzar un 28%, mientras que las disminuciones en la región Caribe podrían alcanzar el 8% del valor de referencia del período 1961-1990. Los resultados relacionados con la temperatura del aire, son consistentes con las tendencias que se han identificado en el país y que se mencionaron arriba; no obstante, los cambios obtenidos para la precipitación resultan contradictorios ya que, según las tendencias observadas, en el suroccidente el país la precipitación está disminuyendo y en el norte y nororiente, la precipitación está aumentando (ver **Pabón, 2003b**).

Mulligan (2000) aplicó la regionalización con escalamiento estadístico a los datos generados por GFDL, HadCM2 y ECHAM para generar escenarios de cambio climático para el Valle del Cauca. Obtuvo como resultado que hacia el 2050 en esa región la temperatura del aire podría aumentar hasta en 2.7°C por encima de lo observado en 1998-1999, mientras que la precipitación anual tendría un incremento de 27 a 59 milímetros (0.4-0.5% del valor observado en 1995-1996).

El Grupo de Investigaciones en Meteorología de la Universidad Nacional de Colombia (**Eslava & Pabón, 2001**) usó el Community Climate Model, versión 3 (CCM3) para simular el clima de la América tropical y generar escenarios de cambio climático para Colombia. Usando el escenario de duplicación de dióxido de carbono y aplicando la técnica de regionalización con escalamiento estadístico (**Molina et al., 2000; Bernal et al., 2001; Pabón et al., 2001e**) establecieron los cambios que se darían bajo ese escenario en la temperatura media del aire y en la precipitación anual sobre diferentes regiones del territorio colombiano. Los resultados (**Pabón et al., 2001b, c y d; Tellez-Guio et al., 2001; Molina et al., 2003**) mostraron que bajo una duplicación del dióxido de carbono la temperatura del aire cambiaría en diferentes regiones no más de 1.0°C (aunque hubo una región que presentó un valor un poco mayor); la precipitación (**Tellez-Guio et al., 2001**) en general aumentaría en valores que en algunos son exagerados (60-100%), pero se presentaron regiones como el Alto Magdalena y Alto Cauca, Pacífico Sur y Central, el Patía, la montaña nariñense y el pie de monte amazónico en donde en algunas épocas del año la precipitación estaría por debajo del promedio 1961-1990.

Posteriormente, **Pabón et al. (2001a)**, tomaron los datos de los 6 modelos que publicó el Data Distribution Center

(DDC) del IPCC y analizaron las simulaciones del clima de 1961-1990 efectuadas por estos modelos y las compararon con el clima representado por el NCEP/NCAR Reanalysis (**Kalnay et al., 1996**) para ese mismo período. Como resultado se obtuvo que del grupo de modelos analizados el Hadley, ECHAM4 y el CSIRO representaron mejor el clima de América tropical, pero considerando que el ECHAM4 (malla de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ de latitud y longitud, respectivamente) presenta la información en mayor resolución que el modelo del CSIRO (malla de $5^\circ \times 5^\circ$), se usó el primero para simular el clima nacional y generar escenarios climáticos aplicando la metodología de la reducción de escala estadística (**Pabón et al., 2001e**). Los resultados mostraron que en una duplicación del CO_2 , que muy probablemente ocurrirá en mediados del siglo XXI, la temperatura del aire cambiaría entre 1.0 y 2.0°C en relación con el promedio 1961-1990 y la precipitación anual entre -10% (algunas regiones) y $+15\%$ del volumen anual observado en ese mismo período de referencia (ver **Pabón, 2003b, Pabón 2004**).

En una nueva aproximación se analizaron 16 simulaciones de modelos globales diferentes para el escenario de duplicación del CO_2 y se tomaron los cambios de la temperatura media anual del aire y de la precipitación anual para 24 regiones del territorio colombiano. Se identificó entonces que aunque los cambios previstos para la temperatura del aire oscilan entre 0°C y un poco más de 2.0°C , el umbral en el que más coinciden los modelos está entre 1.1 y 1.5°C (ver **Pabón, 2007**). En lo que a la precipitación se refiere, la mayor parte de los modelos señalaron que habría un incremento hasta del 5% en la precipitación anual en comparación con lo que había en el período 1961-1990; sin embargo algunos modelos que señalaron reducciones del 5% para regiones como el Bajo Magdalena, cuencas de los ríos Sinú, San Jorge y Nechí, en Urabá, así como en el Medio Cauca y Magdalena, las cuencas de los ríos Sogamoso, Catatumbo, Arauca y el Medio Meta. Esto último no coincide con las tendencias observadas en la precipitación de estas regiones.

Ruiz y Martínez (2007) utilizaron los productos de simulación del clima presente y del escenario A1B generados para la región del norte de Suramérica por el modelo global de alta resolución espacial (grilla de 20×20 kilómetros) del Meteorological Research Institut (MRI) de Japón. De otra parte **Pabón (2006)** utilizó el modelo climático regional PRECIS y se consideraron los escenarios concentraciones de dióxido de carbono equivalente del Second Report on Emission Scenarios (**IPCC, 2000**), se obtuvieron los cambios que se tendrían en la temperatura media del aire y en la precipitación anual hacia finales del siglo XXI (2070-2100) bajo el escenario A2 sin sulfatos, que se resumen así: El calentamiento en podría estar entre 2 y 4°C con relación a las temperaturas del

período 1961-1990 en la mayor parte del territorio nacional, pero hay regiones en las que podría sobrepasar los 4°C ; En las regiones interandina y Caribe se presentará reducción de la cantidad anual de lluvias, en algunas regiones de más del 30% ; en el piedemonte oriental de la Cordillera Oriental y en la región Pacífica habría aumentos.

Con base en la estimación de los cambios de la temperatura media anual y la precipitación anual en los escenarios A2 y B2 usando el modelo regional PRECIS en resolución espacial de 25×25 kilómetros, **Pabón (2008)** indicó que la temperatura media del aire hacia el 2070-2100 en general estaría entre $2-4^\circ\text{C}$ por encima de la observada en 1961-1990, pero identificó sectores con aumentos mayores de 4°C localizados en el Valle del Magdalena y en la región Caribe. En cuanto a la precipitación, los dos escenarios sugirieron para las regiones interandina y Caribe reducciones de más del 30% en la cantidad anual de lluvias, con sectores en donde tal reducción es mayor del 50% localizados en Tolima, Huila, Altiplano cundiboyacense, litoral central Caribe y en la Península de La Guajira; en el piedemonte oriental de la Cordillera Oriental y en la región Pacífica habría aumentos de más del 30% . La capacidad de PRECIS para reproducir las particularidades del clima regional se infiere de la evaluación realizada por **Alves & Marengo (2009)**, quienes probaron PRECIS en resolución de 50×50 kilómetros para Suramérica.

Ruiz (2010) efectuó el ajuste del escenario A1B obtenido con el modelo del MRI, a los escenarios con PRECIS y elaboró escenarios de cambio climático con el modelo Weather & Research Forecasting - WRF (usando las salidas del modelo global CAM para las condiciones de contorno). Realizó escenarios para tres períodos a partir del 2011 hasta el 2100. En términos generales obtuvo incremento paulatino de la temperatura media anual del aire de 1.4 , 2.4 y 3.2°C para los períodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100, respectivamente; para la precipitación los cambios identificados como probables fueron disminución en la región Caribe y Andina y aumento en la región Pacífica.

También se ha avanzado en el desarrollo de escenarios para otras variables hidroclimáticas. Así, **Acevedo (2009)** y **Acevedo & Poveda (2011)** validaron cuatro modelos globales en cuanto a la simulación de los extremos de lluvia y desarrollaron escenarios para la precipitación mensual, los eventos extremos de lluvia a través de la estimación de las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) y los caudales; encontraron el ECHAM5 como el que mejor aproxima las condiciones hidroclimáticas regionales. Al elaborar escenarios (tomando A1 y B1 de los propuestos por **IPCC, 2000**), identificaron que habría grandes cambios en la frecuencia de eventos de lluvia intensa y un posible aumento de las precipitaciones en la cuenca del río Magdalena y de sus cauda-

les. Los escenarios elaborados por **Nakaegawa & Vergara (2010)** para la cuenca Magdalena-Cauca, sugieren que hacia finales del siglo XXI habría una reducción de los caudales medios de febrero y un aumento en los de julio. Se han explorado otras opciones con miras a disponer de información sobre las condiciones climáticas del futuro para usarla en estudios de impactos del cambio climático en Colombia (ver, por ejemplo, **Peña et al., 2010**). De igual manera, se han examinado los cambios en el clima local o regional asociados al cambio en el uso del suelo (**Rodríguez et al., 2010**) y elaborado escenarios de cambio climático para regiones dentro del territorio colombiano (**Pabón, 2011**).

Con base en este estado del tema en el país, se abordó un nuevo análisis de las tendencias de largo plazo en las variables climatológicas temperatura media del aire, precipitación anual y en los eventos extremos de lluvia. Adicionalmente se elaboraron escenarios de cambio en las variables temperatura media del aire, precipitación anual para diferentes períodos del siglo XXI.

Metodología

El análisis de las tendencias de largo plazo en las variables climatológicas y la elaboración de escenarios se realizó con la metodología que se describe a continuación.

Metodología de análisis de las tendencias de largo plazo

Para el análisis de las tendencias se utilizaron las series de datos diarios de temperatura del aire, temperatura máxima y mínima diaria y precipitación diaria de los puntos de medición (estaciones meteorológicas de diverso tipo) disponibles en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) para el período 1960-2005. Se tomaron inicialmente 200 estaciones, sin embargo, después de la aplicación del control de calidad (verificación de períodos completos, homogeneidad, etc) se descartó una gran cantidad de series (cerca del 75%) y quedaron únicamente las series de 46 puntos distribuidos a lo largo y ancho del territorio colombiano.

Se utilizó la metodología incluida en la herramienta de análisis estadístico RCLimdex para análisis de series de datos climatológicos y se aplicaron los procedimientos planteados por **Zhang & Yang (2004)**, las recomendaciones de **WMO (2009)** y las obtenidas de publicaciones de resultados de análisis de extremos (ver **New et al., 2005; Vincent et al., 2005; Haylock et al., 2006; Alexander et al., 2007**). En Colombia RCLimdex fue usado en el IDEAM (**Benavides et al., 2007**) para el análisis de las series de datos de 15 estaciones climatológicas y se identificaron tendencias generales y cambios en los fenómenos extremos de precipitación y de tempera-

tura del aire, que fueron incluidas en **MAVDT-IDEAM-PNUD, 2010**.

Con base en los datos diarios de las diferentes variables, RCLimdex genera índices climáticos y, mediante procedimientos estadísticos, establece las tendencias de largo plazo en los valores medios y en los extremos.

La elaboración de escenarios de cambio climático para Colombia

Para la elaboración de escenarios de cambio climático se utilizó el sistema integrado de modelamiento climático regional PRECIS ("Providing Regional Climates for Impacts Studies"), versión 1.6.1 (**Jones et al., 2004**), desarrollado por el Hadley Centre, del Reino Unido. En síntesis, PRECIS es un sistema de modelamiento del clima regional que simula la interacción de la superficie (suelo-cobertura vegetal) y la atmósfera a través de la inclusión de las particularidades regionales como la orografía mejor representada que en los modelos globales y de los procesos el balance de radiación, la dinámica de la circulación atmosférica en la mesoescala, el ciclo de los sulfatos, la formación de nubes y precipitación, así como la transferencia de masa y energía desde la cobertura vegetal y la capa del suelo a la atmósfera. En cuanto al componente de la superficie, que es un aspecto esencial en el presente estudio, PRECIS contempla una cobertura vegetal que interactúa con el viento, con la radiación solar y la precipitación, provee a la atmósfera flujos de calor y regula la escorrentía. El suelo del modelo, por su parte, dependiendo de si su textura tiene propiedades térmicas e hidrológicas, participa con su color en el balance de radiación con el albedo. Para la cobertura vegetal y el suelo PRECIS utiliza la base de datos organizada por **Wilson & Henderson-Sellers (1985)**.

PRECIS se validó para un clima de referencia basado en los promedios multianuales del período 1961-1990 (calculados a partir de los series de datos mensuales) de temperatura del aire y de precipitación de 680 estaciones climatológicas suministradas por el IDEAM. Antes de calcular los promedios multianuales, las series de datos mensuales se sometieron a control de calidad en cuanto se refiere a faltantes o vacíos en las series, a identificación de homogeneidad, detección de cambios por medio de procedimientos estadísticos y verificación de la historia de las estaciones climatológicas para explicar si los cambios fueron causados por alguna alteración de los procedimientos en las mediciones; esto último se efectuó con consulta directa del archivo del IDEAM.

En el contexto de este trabajo, el modelo regional PRECIS fue ejecutado para una grilla con resolución horizontal de 25x25 kilómetros, con 19 niveles en la vertical (de la su-

perficie hasta 30 km en la estratosfera) cuatro niveles en el suelo. Se ejecutó para una región localizada sobre el norte de Suramérica, seleccionada de tal manera que ubica el territorio colombiano en el centro (con ello, se buscó incluir tanto la parte continental como la marítima e insular del territorio colombiano, localizándolos lejos de los bordes para evitar el efecto de éstos en el comportamiento del clima simulado. La información de entrada o condiciones de borde del modelo fue la disponible en el re-análisis denominado ERA40 (Uppala et al., 2005).

El clima de referencia se representó con los promedios multianuales y con las desviaciones estándar de las variables hidrológicas (temperatura del aire, humedad relativa y precipitación) registradas en el período 1961-1990. Con base en esta información se efectuó la descripción del ciclo anual y la distribución espacial de las variables mencionadas.

Con base en los promedios multianuales se elaboraron mapas con la distribución espacial para lo cual se utilizó el método de interpolación Inverse Distance Weighted (IDW); de igual manera se analizó el ciclo anual de la temperatura, de la humedad del aire y de la precipitación. Todo lo anterior como línea base para la validación del modelo y para el cálculo de los cambios que se presentaría en el futuro.

Para elaborar los escenarios se consideraron los aspectos planteados por **IPCC-TGCIA (1999)** y **Mearns et al. (2003)** y mediante las siguientes fases:

- Simulación del clima del territorio colombiano, utilizando ERA40 como condiciones de contorno, mediante la representación de la distribución espacial y el ciclo anual de la temperatura media del aire, la humedad relativa y de la precipitación.
- Validación de las simulaciones del clima regional mediante comparación con el clima de referencia.
- Ajuste de los productos del modelo para reducir las diferencias entre el clima real y el simulado.
- Simulación del clima futuro para la región de estudio utilizando los escenarios A2 y B2 de **IPCC (2000)** generados por el modelo global HadCM3 para los períodos 2011-2030 y 2071-2100.
- Aplicación del ajuste a los datos generados para el futuro en diferentes escenarios
- Comparación de los resultados del clima futuro y el clima actual (el de referencia).

Para efectos del presente trabajo se extrajeron los datos mensuales de temperatura, humedad del aire y de precipitación correspondientes a la región estudiada. De los datos

generados por el modelo se obtuvieron valores multianuales y las series de datos mensuales para el período 1961-1990. La validación se efectuó a través de la comparación entre lo observado 1961-1990 ($[1961-1990]_{OBS}$) (los datos de mediciones están disponibles solo para este intervalo de tiempo) y lo simulado por PRECIS ($[1961-1990]_{SIM}$) para ese período.

Se compararon los valores multianuales, la distribución espacial de las variables (mapas $[1961-1990]_{OBS}$ y $[1961-1990]_{SIM}$) y el ciclo anual. Igualmente se calcularon los coeficientes de correlación entre las series observadas y las simuladas para establecer en cuales puntos (lugares) se obtiene la mejor aproximación; adicionalmente se calcularon los coeficientes de comparación como el error cuadrático medio (RMSE) y el sesgo (BIAS).

Después de comparados, los datos multianuales simulados se ajustaron para que se acercaran más en su comportamiento a las observadas. Este ajuste se efectuó reduciendo la diferencia de los valores medios de las dos series (observada y simulada) a través del siguiente procedimiento:

$$X_{i,j}^* = \alpha_j X_{i,j}^{mod}$$

Donde:

$X_{i,j}^*$ - el valor ajustado de la variable X (temperatura del aire o de precipitación) del mes j del año i ; $X_{i,j}^{mod}$ - es el valor modelado de la variable X para el mes j y año i .

$$\alpha_j = \frac{\overline{X_{i,j}^{obs}}}{\overline{X_{i,j}^{mod}}}$$

$\overline{X_{i,j}^{obs}}$ - promedio multianual para el mes j con los valores observados a través de los años i .

$\overline{X_{i,j}^{mod}}$ - promedio multianual para el mes j con los valores simulados para los años i .

El horizonte temporal para el que se desarrollaron los escenarios de cambio climático fue el período 2011-2030 y 2070-2100. Para ello se realizaron simulaciones con PRECIS bajo los escenarios A2 y B2.

Una vez generados los datos para este período y aplicados los ajustes correspondientes se calcularon las diferencias entre el clima futuro $[2011-2030]_{SIM}$ o $[2071-2100]_{SIM}$ y el clima de referencia $[1961-1990]_{SIM}$ y, este último para los escenarios A2 y B2.

Los escenarios se presentan en términos del cambio que se obtiene de la comparación entre el clima futuro y el clima actual (de referencia). Para la temperatura del aire este cam-

bio se calcula la diferencia (en °C) entre el clima futuro y el actual.

$$\text{Cambio de T} = T_{\text{futuro}} - T_{\text{actual}}$$

Para la precipitación (Pr) el cambio se calcula como el porcentaje que la diferencia entre el clima futuro y el actual representa en relación con el valor multianual del clima de referencia, así:

$$\text{Cambio Pr} = 100 * (\text{Pr}_{\text{futuro}} - \text{Pr}_{\text{actual}}) / \text{Pr}_{\text{actual}}$$

$$\text{Cambio ETP} = 100 * (\text{ETP}_{\text{futuro}} - \text{ETP}_{\text{actual}}) / \text{ETP}_{\text{actual}}$$

Resultados

Los resultados se resumen en las Tablas 1 y 2, en las que se presentan los resultados obtenidos en cuanto a tendencias de la precipitación (46 estaciones) y de la temperatura del aire (55 estaciones) de diferentes regiones del territorio colombiano, como también en las Figuras 1-3 que muestran los cambios que estas variables experimentarían bajo los escenarios A2 y B2 en los períodos 2011-2040 y 2071-2100.

Los cambios observados en la segunda mitad del siglo XX

Como se puede observar a simple vista en la Tabla 1, en cuanto a tendencias de la precipitación no hay un comportamiento homogéneo para los diversos índices en diferentes regiones: hay signos contrarios y valores muy variados. Esto se podría atribuir a la diversidad climática del territorio colombiano, aunque la calidad de los datos podía estar influyendo aún después de haberse surtido un estricto control de calidad. Las tendencias de la precipitación anual se presentan en el mapa de la Figura 1 (izquierda) que se construyó a partir de los datos de la columna de “PRECIPITACIÓN ANUAL (TODOS LOS DIAS HUMEDOS)” de la Tabla 1. Es posible ver una generalizada tendencia al incremento de los volúmenes anuales de lluvia en el sector oriental (Orinoquia y Amazonía). El aumento de la precipitación también ocurre en la isla de Providencia, en el sector central del litoral Pacífico, litoral central Caribe y de La Guajira, en la Sierra Nevada de Santa Marta, así como entre Sucre y Bolívar, el Magdalena medio y en lugares del Eje cafetero, sur de Nariño y en Cundinamarca. La disminución de la precipitación anual se concentra en San Andrés isla, en sectores de la región Caribe, en el

Tabla 1. Tendencias en los valores medios y extremos de la precipitación en diferentes lugares del país

No.	ESTACION	LONTD	LATD	ALTD	# DIAS CONSECUTIVOS RR <1,0mm [días]	# DIAS CONSECUTIVOS RR >=1,0 mm [días]	PRECIPITACION ANUAL (TODOS LOS DIAS HUMEDOS) [mm]	# DIAS EN EL AÑO CON RR >=10,0 mm	# DIAS EN EL AÑO CON RR >=20,0 mm	# DIAS EN EL AÑO CON RR >=25,0 mm	RR anual > percentil 95 [mm]	RR anual > percentil 99 [mm]	Máximo anual precipitación [mm]	Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos [mm]	Precipitación anual días húmedos [mm/día]
1	Agronomía	-75,48	5,05	2150	0,064	-0,11	-11,739	-0,276	-0,164	0,153	-5,554	-0,92	-0,58	-1,567	-0,025
2	Apto. Arauca	-70,73	7,07	128	-0,152	0,49	6,817	-0,038	0,055	-0,043	4,832	3,234	0,344	0,43	-0,155
3	Apto. Artunduaga	-75,52	1,36	244	0,101	0,003	8,886	0,136	0,156	0,034	8,68	5,234	0,151	0,951	0,059
4	Apto. Buenaventura	-76,58	3,51	14	-0,126	0,186	26,276	0,542	0,232	0,207	18,022	8,126	0,042	1,142	-0,029
5	Apto. El Embudo	-81,35	13,37	1	0,065	-0,096	13,658	0,16	0,233	0,221	12,504	7,224	0,711	3,582	0,121
6	Apto. El Otu	-74,72	7,02	630	0,136	-0,176	-3,865	-0,311	0,096	0,099	6,069	-1,397	-0,685	-0,648	0,136
7	Apto. Palanquero	-74,65	5,48	172	-0,072	-0,161	-23,561	-0,689	-0,5	-0,38	-5,394	0,888	0,152	-0,951	-0,063
8	Apto. Santiago Vila	-74,8	4,28	286	-0,003	-0,002	0,808	-0,106	0,03	0,034	1,552	-0,231	0,189	-0,22	0,021
9	Apto. Vanguardia	-73,62	4,17	423	-0,412	0,066	33,354	0,675	0,505	0,494	12,815	4,601	0,432	1,085	0,079
10	Galerazamba	-75,27	10,78	7	0,506	-0,023	3,304	0,114	0,08	0,072	0,817	-0,825	-0,164	0,525	0,057
11	Apto. La Florida	-75,18	8,7	13	-1,45	0,036	-3,203	-0,189	-0,129	0,165	-2,78	1,76	0,291	0,355	-0,11
12	Apto. Las Flores	-73,98	9,07	34	0,7	0,001	-2,501	-0,048	-0,08	-0,014	0,039	-1,421	0,291	1,35	0,029
13	Apto. Rafael Nuñez	-75,52	10,45	2	-0,165	-0,035	-2,164	-0,14	-0,031	-0,027	-0,204	-0,039	0,242	-0,151	0,036
14	Avapel	-75,13	8,32	22	0,507	0,009	4,138	0,021	0,107	0,13	4,384	-2,746	-0,487	-0,025	0,128
15	Berlin	-72,87	7,18	3214	-0,178	-0,089	-1,355	-0,15	0,029	0,024	0,695	0,899	0,224	-0,225	-0,015
16	Bocas del Tuparro	-67,52	5,32	250	2,074	0,109	5,506	0,036	-0,006	0,135	14,145	0,221	-0,983	-5,634	0,164
17	Carimagua	-71,37	4,58	200	0,11	0,041	15,513	0,321	-0,207	0,256	11,212	6,545	1,072	0,827	0,045
18	Escuela Agraria Carraipia	-72,37	11,22	118	-0,237	0,049	-4,147	0,053	0,049	-0,93	-7,128	-4,377	-0,707	-1,944	0,004
19	Carrizal	-73,77	5,2	2860	0,106	0,043	-3,241	-0,135	-0,031	-0,003	-0,953	-0,363	-0,14	-0,336	-0,022
20	Chapeton	-75,27	4,45	1300	0,259	-0,03	-0,38	-0,089	0,102	0,101	-2,55	-0,694	-0,089	0,545	-0,002
21	Cheuca Nemocon	-73,87	5,12	2580	-0,17	-0,057	-1,605	-0,06	-0,019	0,014	-0,043	0,652	0,329	0,046	0,019
22	Colmueros	-77,05	0,35	10	-0,008	-0,331	16,421	-0,03	-0,164	-0,131	22,872	9,604	4,246	3,427	0,079
23	El Centro	-73,77	6,87	162	0,033	-0,156	-10,208	-0,384	-0,052	-0,126	8,168	3,212	0,946	-1,173	0,232
24	El Cucharo	-73,22	6,52	975	0,029	-0,015	-4,754	0,039	0,077	0,078	3,859	2,365	0,519	0,322	0,25
25	El Paraiso	-77,38	1,05	3120	0,117	-0,064	-0,553	-0,098	0,007	-0,003	0,432	0,536	0,05	0,159	0
26	El Rincon	-73,17	10,27	350	-0,341	0,022	5,116	0,03	0,161	-0,135	5,411	-0,976	-0,531	-0,241	0,042
27	El Salado	-75,58	8,92	40	0,75	0,002	-3,451	-0,254	0,054	-0,053	-0,816	-0,362	-0,816	-0,727	-0,032
28	El Salto	-74,46	4,47	450	-0,002	-0,017	4,056	0,039	0,161	0,107	1,19	2,361	0,456	1,065	0,06
29	Escuela Naval CIOH	-75,53	10,38	1	0,194	-0,003	5,413	0,177	0,159	0,115	0,394	2,139	0,742	0,438	0,023
30	Matitas	-73,05	11,25	20	0,373	-0,038	3,073	0,181	0,093	0,05	3,52	-3,477	0,613	-0,264	0,046
31	Galerazamba	-75,27	10,78	7	0,506	-0,023	3,304	0,114	0,08	0,072	0,817	-0,825	-0,164	0,525	0,057
32	Grania Bertha	-73,60	5,88	1700	0,09	-0,025	-2,231	-0,119	-0,016	0,02	-2,362	-0,604	0,184	-0,125	0,005
33	Grania San Jorge	-74,20	4,52	2900	0,076	0,064	-2,162	0,014	-0,012	-0,005	-0,849	-0,306	-0,038	-0,071	0,011
34	Grania Tibacuv	-74,42	4,35	1550	-0,088	-0,067	-1,403	-0,111	-0,008	0,011	0,527	0,773	0,317	-0,626	0,004
35	Grania Velez	-73,39	6,00	2170	-0,126	0,035	19,252	0,549	0,58	0,448	10,881	2,986	0,12	1,001	0,06
36	Guamo	-74,97	4,03	360	-0,233	-0,087	2,994	-0,181	0,047	0,082	8,383	4,482	1,343	0,735	0,122
37	Isla Santuario	-73,73	5,47	2580	-0,057	-0,01	2,271	0,605	0,1	0,038	2,145	1,237	-0,073	0,114	0,018
38	La Paulina	-72,82	10,92	170	0,565	0,025	-1,499	-0,026	-0,06	-0,01	1,424	0,881	0,783	0,003	0,565
39	Lorica	-75,82	9,27	30	-0,562	-0,017	1,32	-0,088	0,083	0,044	-0,209	1,307	0,496	-0,198	0,037
40	Manauere	-72,45	11,77	1	-0,064	0,008	1,238	0,01	0,015	0,029	0,831	0,591	0,645	0,514	0,061
41	Motilonia	-73,25	10,00	180	0,466	-0,035	0,607	0,046	0,074	0,028	0,032	-2,879	-1,057	-1,099	-0,008
42	Nueva Florida	-74,21	9,57	13	-0,048	-0,021	6,496	0,284	0,251	0,19	-2,278	-2,827	-1,104	-1,323	0,07
43	Prado Sevilla	-74,1	10,46	18	-0,622	-0,024	5,605	0,056	0,075	0,061	6,398	3,769	0,058	0,73	0,04
44	San Bernardo del Viento	-75,97	9,37	22	-0,293	-0,003	-2,657	0,019	0,122	0,048	6,257	-1,35	-0,071	0,132	-0,043
45	San Lorenzo	-74	11	2200	0,418	-0,024	8,772	0,141	0,003	0,204	14,638	5,295	1,092	2,275	0,05
46	Turipana	-75,82	8,85	20	0,27	0,024	-1,679	0,045	-0,112	-0,075	-0,17	-0,728	-0,52	-1,06	-0,032

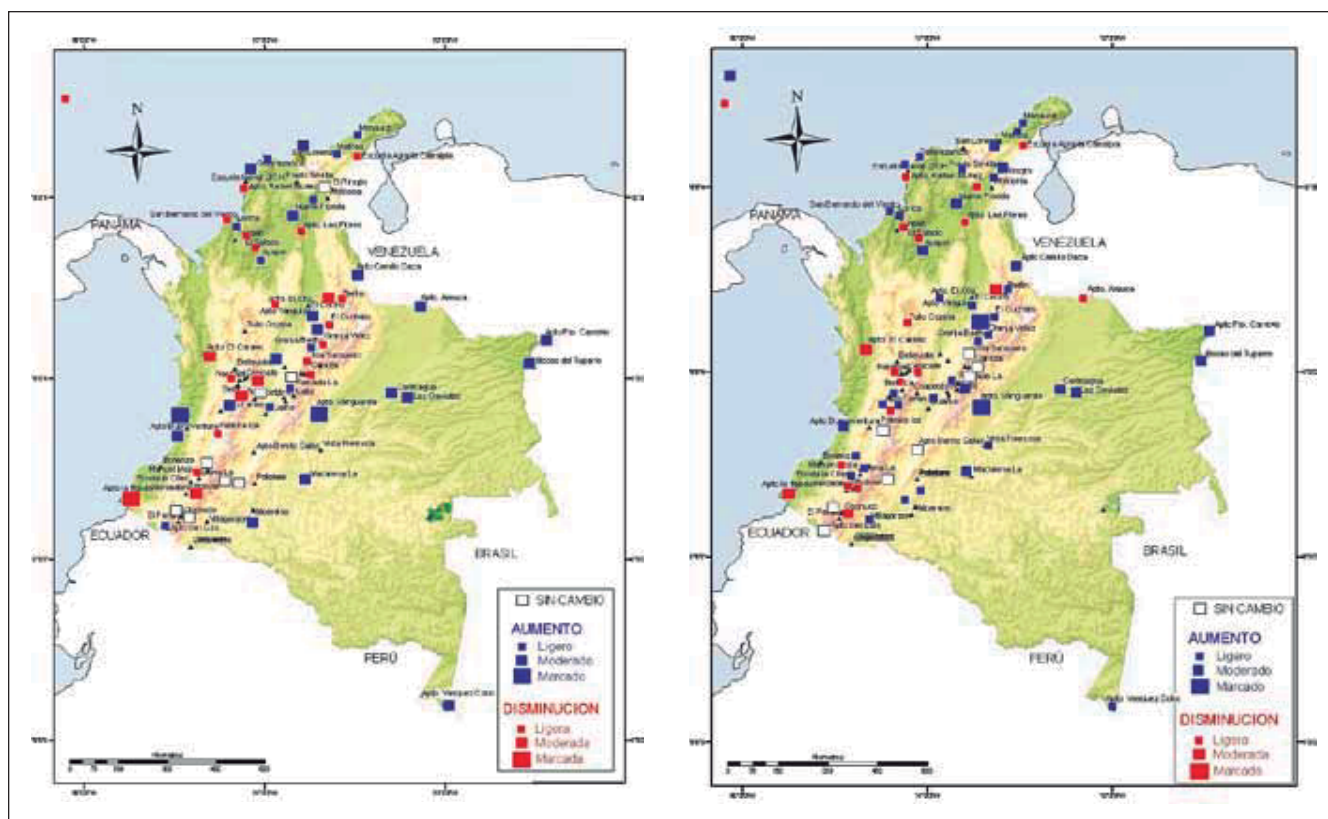


Figura 1. Distribución de las tendencias de la precipitación anual (izquierda) y de la frecuencia de los eventos de lluvia diaria superiores a 25 milímetros (derecha) en el territorio colombiano.

altiplano cundiboyacense, gran parte del eje cafetero, el Alto Cauca y Patía y la montaña nariñense.

El comportamiento de la frecuencia de los eventos extremos de precipitación se puede obtener a través de los datos de las columnas respectivas de la Tabla 1 y de la Figura 1 (derecha) en la que se visualiza la distribución espacial de las tendencias de los eventos de lluvia mayores a 25 milímetros. (Se toma este umbral porque corresponde a la intensidad de las tormentas frecuentes que con sus fenómenos asociados (crecientes, desbordamientos, inundaciones instantáneas) en ocasiones impactan de manera importante generando desastres en diferentes regiones del país). En la Figura 1 (derecha) aparece que los eventos con lluvias diarias superiores a 25 mm están siendo más frecuentes en la isla de Providencia, litoral Caribe central, La Guajira, todo el sector del piedemonte llanero y amazónico, litoral Pacífico central y alto Cauca. Llama la atención el piedemonte llanero y un sector del Magdalena medio, los que presentan un marcado aumento de la frecuencia de este tipo de eventos; estos mismos sectores se destacan también un aumento marcado en el volumen de

precipitación (Figura 1, izquierda). También es posible constatar que una disminución en la frecuencia de eventos de esta naturaleza se está registrando en sectores de la región Caribe, en el eje cafetero y la montaña antioqueña, altiplano nariñense, sector sur del litoral pacífico y en el Chocó.

En cuanto a cómo se está comportando la intensidad de las lluvias en 24 horas en diferentes partes del país, la columna “MÁXIMO ANUAL PRECIPIT/DIA” de la Tabla 1 permite apreciar que una tendencia generalizada a reducción de este tipo de eventos en la Sabana de Bogotá, Medio Cauca y Alto Nechí, Sinú, San Jorge, Bajo Nechí, Sierra Nevada de Santa Marta y cuenca del río Cesar y en el Pacífico Sur, aunque dentro de estas regiones aparecen puntos en los que la tendencia es la contraria (a aumento de la intensidad de los eventos). En el resto de regiones no es posible identificar una tendencia dominante: hay zonas con aumento y otras con disminución dentro de la misma región. Se destaca un considerable (al compararlo con las demás estaciones) aumento de la intensidad en el sector central del litoral Pacífico.

Tabla 2. Tendencias en diferentes índices asociados a la temperatura del aire en diferentes lugares del país

No	NOMBRE DE LA ESTACION CLIMATOLÓGICA	LONGD	LATD	ALTD	# DIAS CON HELADAS	# DIAS CON T>25°C	# DIAS CON T>20°C	# DIAS CON T>5°C (longitud dep periodo de crecimiento)	Máximo de las Tmx del mes (en °C/año)	Máximo de las Tmin del mes (en °C/año)	Mínimo de las Tmx del mes (en °C/año)	Mínimo de las Tmin del mes (en °C/año)	Amplitud del ciclo diario de la temperatura en °C
1	EL CARAÑO	-76,65	5,70	53	NA	0,05	0,09	0,04	0,05	-0,03	-0,01	-0,07	0,00
2	EL SALADO	-75,58	8,92	40	NA	-0,01	0,97	0,01	-0,07	0,02	-0,12	0,13	-0,22
3	TURIPANÁ	-75,82	8,85	20	NA	0,06	-1,53	SD	SD	SD	SD	SD	SD
4	LORICA	-75,82	9,27	30	NA	-0,53	-0,37	0,00	-0,04	0,06	0,01	-0,03	-0,02
5	GALERAZAMBA	-75,27	10,78	7	NA	-0,24	0,21	-0,01	-0,01	0,07	0,07	0,23	0,01
6	APTO RAFAEL NUNEZ	-75,52	10,45	2	NA	0,01	-0,35	0,01	0,19	0,00	0,06	-0,03	0,03
7	APTO SIMON BOLIVAR	-74,23	11,13	4	NA	0,33	-0,01	0,01	-0,01	0,00	0,01	0,01	0,02
8	MATITAS	-73,05	11,25	20	NA	0,35	0,75	SD	SD	SD	SD	SD	SD
9	MANAURE	-72,45	11,77	1	NA	-1,23	12,33	SD	SD	SD	SD	SD	SD
10	ESCUELA AGRARIA CARRAIPA	-72,37	11,22	118	NA	-1,00	6,00	3,00	0,50	0,00	-0,20	0,20	0,08
11	APTO. CAMILO DAZA	-72,52	7,93	250	NA	0,03	0,94	0,01	0,04	0,02	0,03	0,02	0,01
12	APTO SESQUICENTENARIO	-81,72	12,58	1	NA	0,10	0,22	0,27	0,10	-0,02	0,00	0,07	0,05
13	APTO BENITO SALAS	-75,30	2,97	439	NA	0,06	0,25	0,02	0,03	-0,04	0,03	0,01	0,00
14	APTO SANTIAGO VILLA	-74,80	4,28	286	NA	0,00	0,16	0,03	0,01	-0,09	0,04	-0,03	-0,03
15	TIBAITATA	-74,22	4,70	2543	-0,25	0,01	SD	-0,01	0,10	0,02	0,07	0,06	0,03
16	EL DORADO DIDACTICA	-74,15	4,70	2546	-0,18	0,00	0,00	0,00	0,17	0,05	0,01	0,10	0,08
17	GRANJA SAN JORGE	-74,20	4,52	2900	0,00	NA	NA	0,04	0,03	-0,02	-0,08	0,00	-0,10
18	LA SELVA	-75,42	6,13	2090	NA	0,31	SD	-0,07	0,01	0,03	-0,01	0,16	-0,06
19	APTO. YARIGUIES	-73,80	7,02	126	NA	0,03	-0,16	-0,01	-0,01	0,04	0,04	0,02	-0,01
20	EL CENTRO	-73,77	6,87	162	NA	-0,05	0,23	0,12	0,03	-0,11	0,06	0,11	0,00
21	APTO. EL OTU	-74,72	7,02	630	NA	0,83	-4,29	0,00	0,12	-0,02	0,05	-0,11	0,17
22	UIS	-73,10	7,13	1018	NA	1,39	4,45	0,09	-0,13	-0,12	0,26	0,10	-0,04
23	ISLA DEL SANTUARIO	-73,73	5,47	2580	0,00	-1,40	0,00	0,03	-0,03	0,02	0,05	-0,04	-0,14
24	EL CUCHARO	-73,22	6,52	975	NA	0,85	-0,51	-0,31	-0,08	-0,02	0,20	0,09	0,08
25	SURBATA BONZA	-73,07	5,82	2485	0,08	3,31	NA	NA	1,04	-0,03	-0,20	-0,04	0,35
26	APTO. BARACOA	-74,82	9,27	18	NA	0,50	0,13	NA	-0,50	-0,27	-0,10	0,00	-0,54
27	AYAPEL	-75,13	8,32	22	NA	0,02	-0,35	NA	0,18	0,01	0,20	-0,11	0,04
28	APTO.GUILLERMO L. VALENCIA	-76,58	2,43	1730	NA	2,30	SD	-0,03	0,10	-0,01	0,02	0,05	-0,01
29	PALMIRA ICA	-76,32	3,52	975	NA	0,09	0,80	0,02	0,06	-0,02	-0,01	0,06	-0,05
30	APTO. FARFAN	-76,22	4,10	955	NA	0,48	-1,09	-0,06	0,14	-0,06	0,25	0,01	0,15
31	APTO. EL EDEN	-75,77	4,47	1204	NA	1,07	SD	0,03	-0,04	-0,01	-0,01	0,05	-0,06
32	APTO. MATECAÑA	-75,73	4,82	1342	NA	1,38	0,05	0,22	-0,02	0,02	0,06	0,13	-0,04
33	BELLAVISTA	-75,82	5,28	2000	NA	1,08	SD	-0,13	0,36	-0,12	0,13	-0,07	0,14
34	CAMELIA LA	-75,87	5,05	1670	NA	-18,50	SD	2,00	-0,61	-0,59	-0,07	-0,87	0,11
35	APTO. OLAYA HERRERA	-75,58	6,22	1490	NA	-0,07	0,14	-0,09	-0,06	0,06	0,02	0,15	-0,06
36	TULIO OSPINA	-75,55	6,32	1438	NA	1,45	0,01	0,29	0,02	0,05	0,04	0,01	-0,04
37	EL RINCON	-73,17	10,27	350	NA	-0,07	-8,57	0,04	0,10	-0,07	-0,12	-0,02	0,05
38	MOTILONIA CODAZZI	-73,25	10,00	180	NA	0,07	0,55	0,09	0,21	0,02	-0,15	0,03	-0,40
39	APTO. CORTISSOZ	-74,78	10,88	14	NA	0,17	-0,12	-0,08	0,08	0,02	-0,05	-0,03	0,16
40	LA MACARENA	-73,80	2,18	350	NA	0,67	6,59	-1,67	0,10	0,17	0,12	0,27	-0,31
41	CARIMAGUA	-71,37	4,58	200	NA	0,38	0,11	0,11	-0,04	-0,02	0,22	0,03	0,02
42	LAS GAVIOTAS	-70,93	4,55	171	NA	0,09	-0,75	-0,10	0,00	-0,08	0,04	-0,09	0,04
43	APTO.VANGUARDIA	-73,62	4,17	423	NA	0,14	0,76	-0,07	0,06	-0,01	0,05	0,02	0,04
44	NUEVO COLON	-73,45	5,35	2438	NA	3,78	0,03	0,01	-0,32	0,02	0,19	-0,01	0,02
45	HACIENDA LAS MARGARITAS	-72,17	4,35	150	NA	0,21	1,41	-1,00	0,04	0,10	0,07	0,22	-0,19
46	BERLIN	-72,87	7,18	3214	-0,35	0,12	NA	0,14	-0,29	0,04	0,06	-0,06	0,17
47	VILLAGARZON	-76,60	1,05	440	NA	6,43	6,81	-0,43	0,76	0,02	0,24	0,10	0,04
48	APTO. VASQUEZ COBO	-69,95	-4,15	84	NA	0,01	1,07	-0,02	0,00	0,00	0,03	0,02	-0,02
49	FONDA LA CITEC	-77,05	2,15	580	NA	-0,74	-3,60	0,78	0,08	0,08	0,00	-0,02	0,08
50	BOLIVAR	-77,00	1,83	1510	NA	-1,41	0,36	0,00	0,06	0,10	0,04	0,08	-0,19
51	MERCADERES	-77,17	1,82	1174	NA	-0,52	-0,17	0,00	-0,03	-0,05	-0,06	0,09	-0,01
52	OBONUCO	-77,30	1,18	2710	0,00	0,12	NA	0,01	0,06	0,01	0,00	-0,03	0,03
53	APTO. ANTONIO NARIÑO	-77,28	1,40	1796	NA	1,50	-0,02	0,06	0,12	-0,11	0,04	0,04	0,04
54	APTO. SAN LUIS	-77,68	0,85	2961	0,04	-0,08	NA	-0,01	0,31	0,00	0,08	-0,02	0,06
55	PANAMERICANA	-77,40	6,22	4	NA	0,50	1,14	0,00	0,25	-0,14	0,20	-0,06	0,11

Estimados con P valores <0.06
Significancia estadística

SD - Sin Dato

NA - No aplica

En cuanto a los extremos relacionados con la temperatura del aire (Tabla 2) los aspectos más aplicables al territorio colombiano son los siguientes. Se puede apreciar que una disminución de la frecuencia de heladas (columna “# DE DIAS CON HELADAS” calculados solo para estaciones con temperaturas por encima de 2400 msnm); solo llama la atención el caso de Ipiales (estación del Aeropuerto de San Luis) en el Altiplano nariñense y una estación en el altiplano cundiboyacense (Surbatabonsa), donde el dato sugiere un incremento en el número de días con temperaturas por debajo de cero, no obstante la tendencia es tan pequeña, que podría descartarse.

Para las temperaturas máximas mayores de 25°C (las cuales pueden observarse en altitudes menores de 2500 msnm) dominan los valores positivos de tendencia de diferente magnitud en el número de días que ocurre el evento al año (columna SU25), aunque hay algunos lugares que muestran una disminución.

Para el número de eventos con temperaturas nocturnas por encima de 20°C (columna TR20), en las regiones (zonas por debajo de los 1500msnm) en donde se observan tales valores, no hay una tendencia en el sentido al aumento de la

frecuencia; se registra tendencias tanto positivas como negativas sin llegar a dominar uno de los signos.

Los valores extremos absolutos (máximas absolutas y mínimas absolutas representadas en las columnas correspondien-

tes de la Tabla 2) no se puede identificar un patrón de tendencia, excepto para el Altiplano cundiboyacense (Sabana de Bogotá, principalmente), la cuenca del Cesar y occidente de la Amazonía en donde la mayor parte de las estaciones muestran un incremento de los valores máximos.

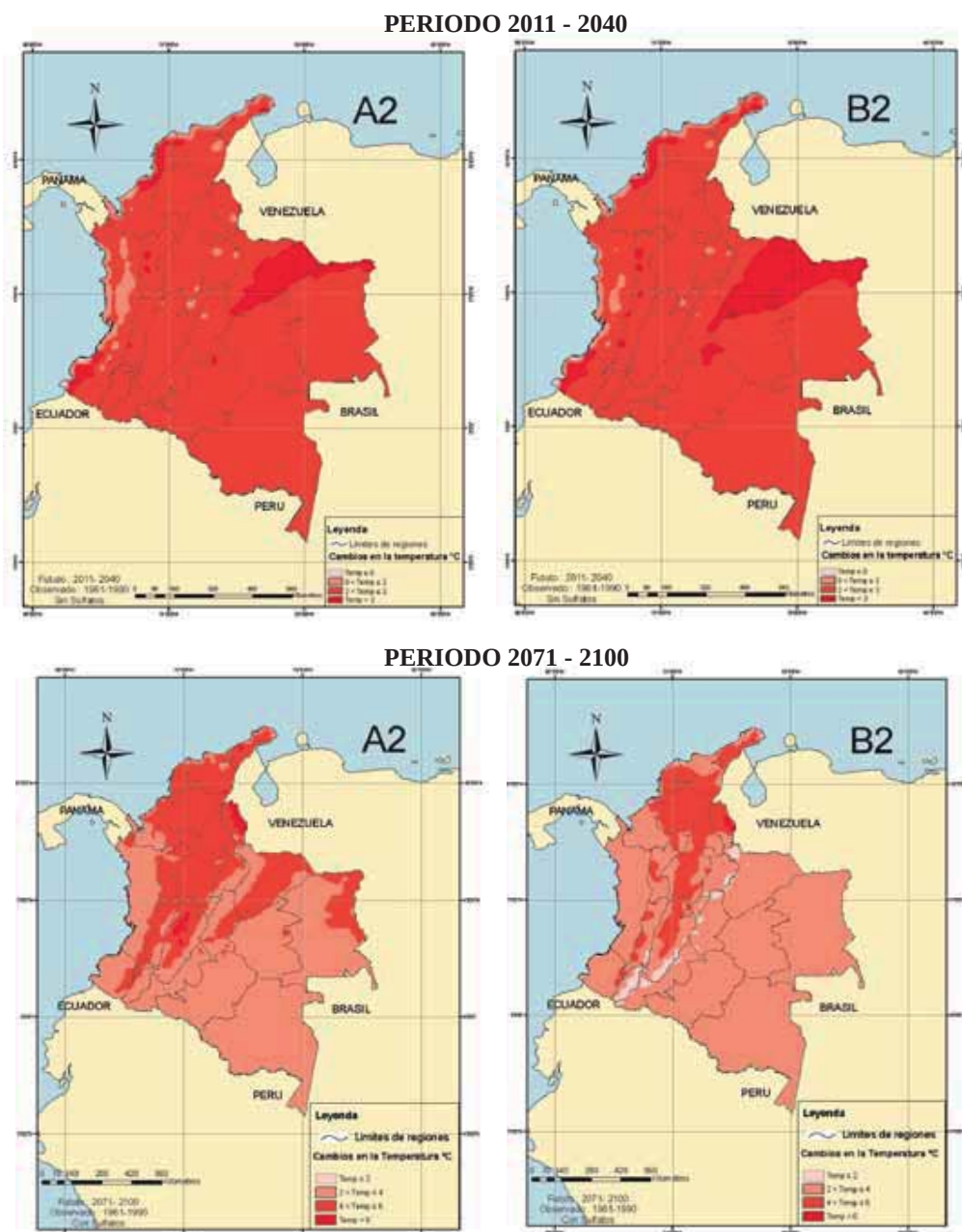


Figura 2. Cambios de la temperatura media del aire que se observarían en el período 2011-2040 (arriba) y 2071-2100 (abajo) en los escenarios A2 (izquierda) y B2 (derecha) del IPCC (2000). La magnitud de los cambios se ilustran con diversas intensidades desde el rosado al rojo intenso (este último es la máxima).

La tendencia en la amplitud del ciclo diario de temperatura se puede inferir a partir de la última columna a la derecha de la Tabla 2. Este índice igualmente no presenta una tendencia dominante: hay valores positivos y negativos en los cambios que se han venido dando en la misma y la magnitud de los de un signo son similares a los del opuesto. Así las cosas no es posible definir con certeza en que sentido está cambiando la amplitud del ciclo diario de la temperatura del aire.

Las posibles condiciones durante el siglo XXI

Los resultados de la elaboración de escenarios de cambio climático para los períodos 2011-2040 y 2071-2100 se presentan en las Figuras 2, 3 y 4, respectivamente para temperatura media anual del aire, humedad relativa y precipitación anual.

La distribución de los cambios de temperatura media anual del aire en el período 2011-2040 (Figura 2, arriba) muestran que en gran parte del territorio colombiano habría un incremento de hasta 3°C en relación con el período 1961-1990. Aunque en el primer decenio (2011-2020) habría sectores del país con cambios menores de los 2°C, en la medida como se avanza en el período los cambios llegan a 2-3°C y en algunos sectores del país son mayores de 3°C. Llama la atención que el calentamiento tiende a ser mayor en los valles del Magdalena y del Cauca, en la Orinoquía, un amplio sector de la Amazonía colombiana y el sector central del litoral Caribe, así como en el sur de la costa Pacífica.

En el período 2071-2100 (Figura 2, abajo), bajo el escenario A2, la temperatura media anual del aire presentaría aumentos drásticos (Figura 2, abajo izquierda). Si bien, en general el incremento de la temperatura es del orden de 2-4°C (color rosado) en la mayor parte del territorio colombiano, en el valle del Magdalena, valle del Cauca y en la región Caribe el aumento está entre 4 y 6°C (color rojo suave) y, a finales de siglo (en el último decenio), sobrepasaría los 5°C (área en rojo intenso). El calentamiento de los valles, que requiere de un análisis más profundo posteriormente, podría explicarse con el fortalecimiento que al efecto föhn daría el aumento del vapor de agua (humedad absoluta) en la atmósfera en un clima más cálido. En el escenario B2, el calentamiento que se observaría en el período 2071-2100 para la mayor parte de las regiones en el territorio colombiano estaría entre 2-4°C; también en este escenario las regiones localizadas en los valles del Magdalena y del Cauca experimentarían aumentos mayores a 6°C.

Los cambios en la humedad relativa están acordes con el calentamiento planteado por los escenarios de temperatura del aire: habría una disminución generalizada de la humedad relativa en todo el país. Así, para todo el período 2011-2040

(Figura 3, arriba) habría marcadas reducciones (de más del 10% en rojo, de 5% en rosado) en el sur de la costa Pacífica, en el litoral central del Caribe y en la Orinoquía. Como se puede observar, las mayores disminuciones ocurren en las regiones en donde el calentamiento es mayor, lo cual se explica por la particularidad de la relación de la humedad relativa con la temperatura del aire. Llama atención la marcada reducción de la humedad relativa en el sector sur de la región Pacífica colombiana. Ligeros incrementos (mayores de 2%) se registrarían en los piedemonte orientales y en sectores de la Cordillera Oriental, sobre las líneas costeras del Pacífico y del Caribe (excepto el litoral central), como también al Este de la Sierra Nevada de Santa Marta.

En el período 2071-2100 (Figura 3, abajo), bajo los escenarios A2 y B2 las máximas reducciones (más del 10%; expresadas en rojo) de la humedad relativa ocurrirían en los valles interandinos y en la región Caribe. Los cambios no serían tan marcados en la región Pacífica, ni en la Orinoquía y en la Amazonía. En estas dos últimas regiones, solo en el escenario A2 algunos sectores tendrían una disminución entre 5 y 10% de la humedad relativa.

Indistintamente del escenario (A2 o B2), la precipitación anual durante el período 2011-2040 (Figura 4, arriba) tendría un incremento mayor del 10% comparada con la que se observaba en el período 1961-1990 en todo un vasto territorio que cubre las regiones de la Orinoquía y de la Amazonia, el piedemonte amazónico y llanero, el Alto y Medio Magdalena, todo el Altiplano cundiboyacense, norte del Chocó, norte del Departamento del Cesar. Núcleos con incrementos mayores a 50% (color azul oscuro) se destacan en el piedemonte llanero, Sabana de Bogotá, parte alta del río Arauca, norte del Chocó y un sector al Este de la Sierra Nevada de Santa Marta. Por el contrario, durante este mismo período se observaría reducción (colores anaranjado y rojo) en la cuenca del río Cauca, en el Pacífico Sur y un sector centro-sur del Chocó, así como una amplia zona en la región Caribe. Las reducciones mayores de 50% (color rojo) se localizarían en una franja costera que bordea la costa de Nariño, Cauca, Valle del Cauca y sur de Chocó, todo el Litoral Caribe y la Península de La Guajira.

El análisis efectuado para los diversos decenios en el período 2011-2040 prácticamente muestra que no hay diferencias marcadas en este patrón de distribución de los cambios de la precipitación. Solo habría ligeras variaciones en el área de cubrimiento de tales cambios. No obstante, para la cuenca alta y media del río Magdalena se presentaría un incremento de la precipitación anual en 2011-2020 en los escenarios A2 y B2 y en 2021-2030 en el escenario B2. Aunque este aumento de la precipitación anual alcanzaría algunos secto-

PERIODO 2011 - 2040

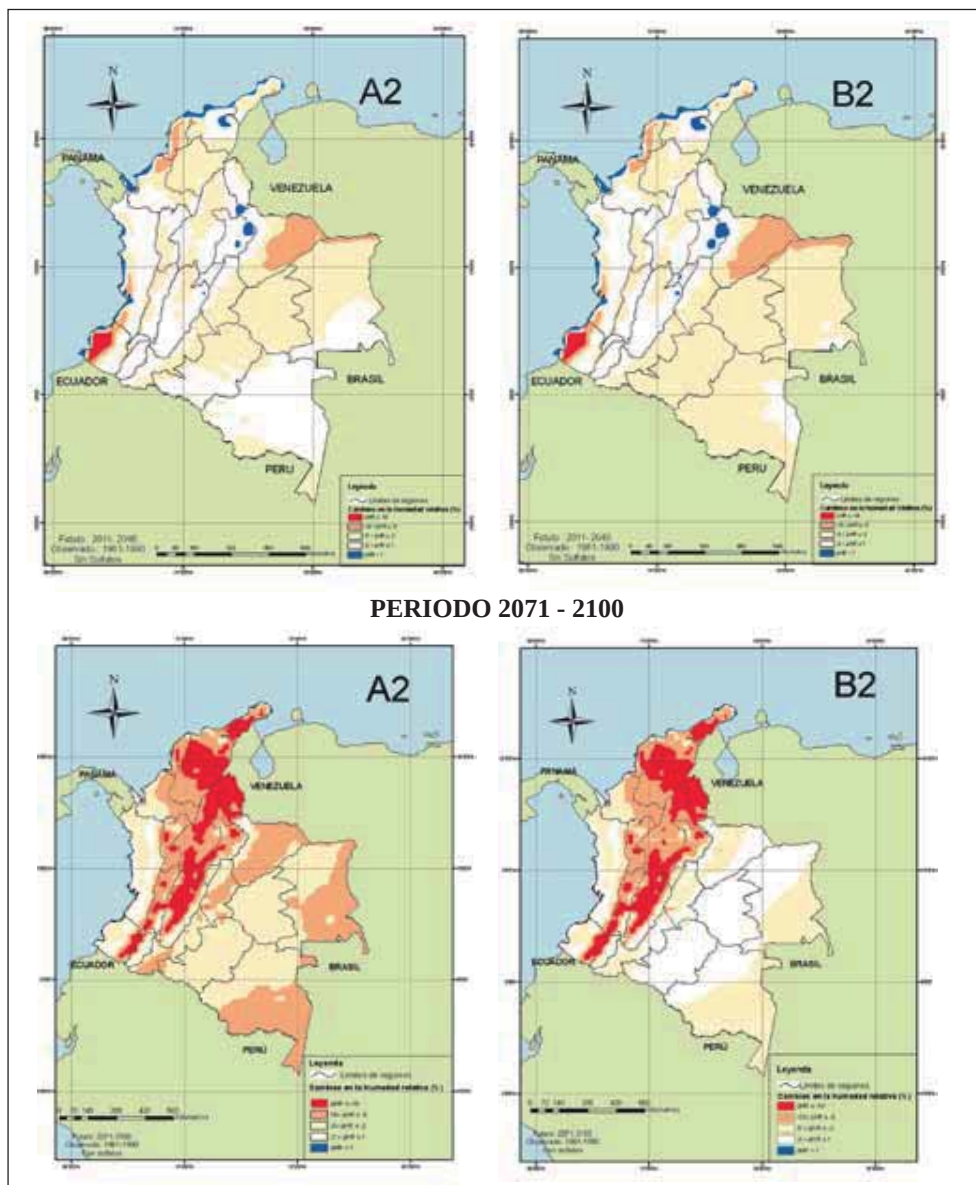


Figura 3. Cambios de la humedad relativa que se observarían en el período 2011-2040 (arriba) y 2071-2100 (abajo) con los escenarios A2 (izquierda) y B2 (derecha) del IPCC (2000). Los aumentos se señalan con diversas intensidades del color azul (el azul oscuro es la mayor); las disminuciones en rosado y tonos del rojo (este último es la máxima reducción).

res de la cuenca del río Cauca, esta durante las dos décadas tendría predominantemente disminución.

En la Figura 4 (abajo) los mapas de los cambios de precipitación correspondientes al período 2071-2100 sugieren que en los dos escenarios A2 y B2 las reducciones mayores del 30% en relación con los volúmenes anuales de 1961-1990 se ob-

servarían en la región interandina y Caribe (excepto el sector sur-occidental circundante el Golfo de Urabá). La reducción extrema (mas del 50%; presentados en rojo) se observaría en la parte andina de Nariño y Cauca, en Huila y Tolima, en el altiplano cundiboyacense, Norte de Santander, La Guajira y en sectores del Litoral Caribe central. Aumento de la precipitación ocurriría en la vertiente del Pacífico y en la Orino-

quía y Amazonía. Se destacan los sectores con incrementos mayores de 50% (núcleos en azul intenso) en el centro-norte de la costa Pacífica, en el Magdalena medio y en algunos pequeños núcleos en el piedemonte amazónico y llanero. En el escenario A2 el aumento de la precipitación en el área del Magdalena medio es más intenso y cubre mayor área en comparación con lo que ocurriría bajo el escenario B2.

En los escenarios de precipitación llama especialmente la atención los sectores en donde se presentaría aumentos: piedemonte llanero y amazónico, una amplia región del Magdalena medio y la vertiente del Pacífico.

El aumento de la precipitación en sectores de barlovento (piedemontes orientales, Magdalena medio y región Pa-

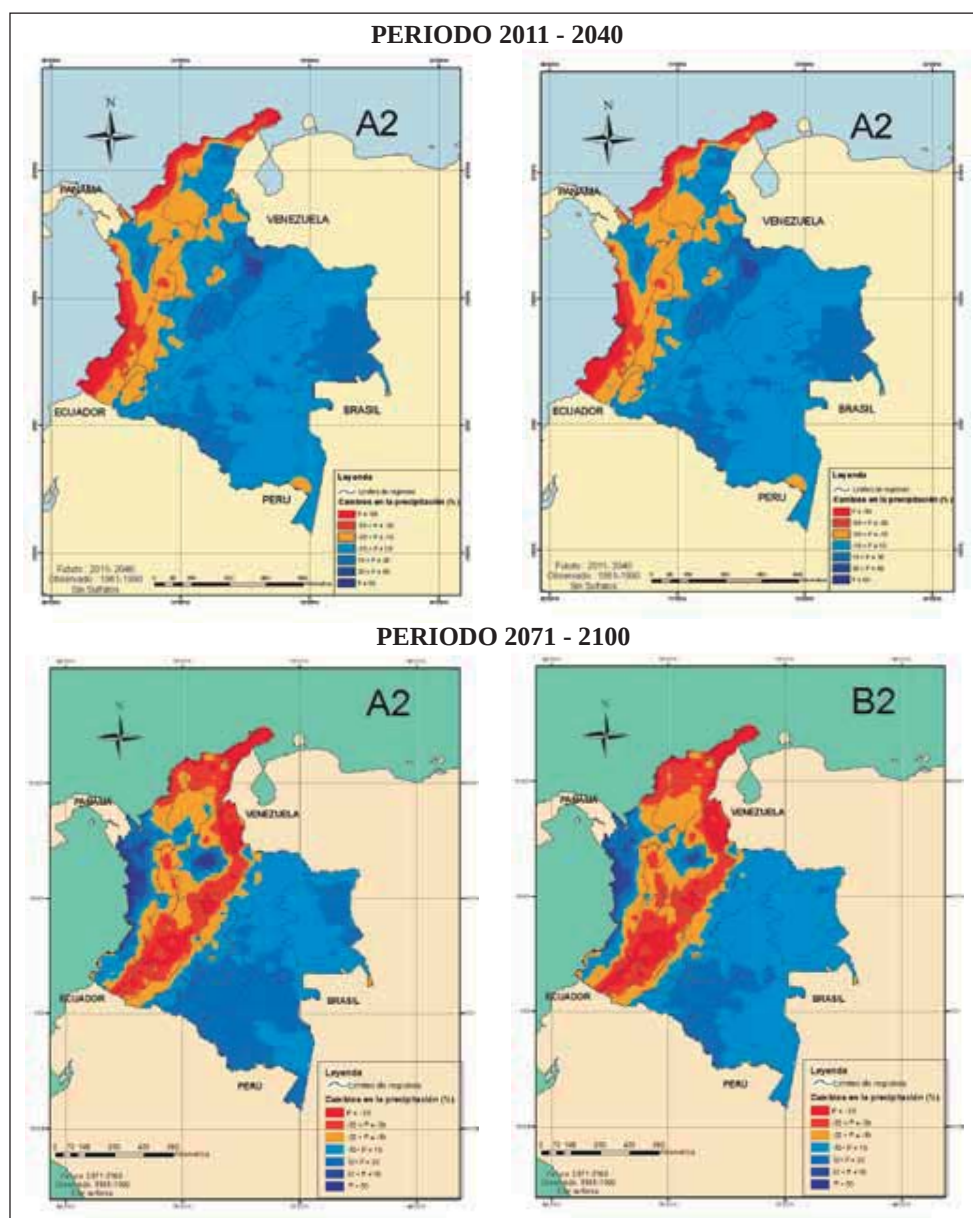


Figura 4. Cambios de la precipitación que se observarían en el período 2011-2040 (arriba) y 2071-2100 (abajo) en escenarios A2 (izquierda) y B2 (derecha) del IPCC (2000). Los aumentos están señalados en tonalidades del color azul (el azul oscuro es el mayor aumento); las disminuciones en anaranjado y rojo (este último es la máxima disminución)

cífica) y el mayor calentamiento en los valles a sotavento, estarían reforzando la hipótesis acerca de que una de los efectos regionales del cambio climático es el fortalecimiento del efecto föhn: en clima más cálido habría mayor humedad absoluta, que transportada a los piedemontes por la circulación regional (en el caso de Colombia, por los alisios) daría aumento de la precipitación en este sector e incremento de la temperatura de los valles interandinos. Esta particularidad estaría ocurriendo en otras regiones del planeta y podría explicar en parte la diferenciación espacial del calentamiento: unas regiones presentan mayor calentamiento. Habría que desarrollar un estudio especial orientado a corroborar o refutar esta hipótesis.

Conclusiones

Con base en la re-estimación de las tendencias de la temperatura media del aire, de precipitación y el análisis de eventos extremos de temperatura y de lluvia, realizadas para la segunda mitad del siglo XX en el territorio colombiano, se confirmaron las tendencias ya calculadas por otros autores y se obtuvieron nuevos resultados relacionados con eventos extremos.

Se corrobora que durante los últimos cincuenta años del siglo XX la temperatura media del aire ha registrado una tendencia general al aumento, el cual oscila entre 0,1-0,2°C. Se identificó una reducción del número de días con temperaturas iguales o menores de 0°C (heladas) en las zonas por encima de los 2500 metros sobre el nivel del mar; también se detectó un ligero aumento en la frecuencia de los días en los que se sobrepasan los valores de la temperatura máxima registrada en diferentes regiones; los valores máximos absolutos presentaron notable incremento en el Altiplano cundiboyacense (Sabana de Bogotá, principalmente), la cuenca del Cesar y occidente de la Amazonía. En el ciclo diario de la temperatura del aire no se identificó una tendencia definida.

La precipitación anual en la segunda mitad del siglo XX ha venido presentando cambios diferenciados por regiones así: reducción de diversa magnitud en el sector sur de la región Pacífica, en el sector andino de los departamentos de Nariño, Cauca, Valle, en el eje cafetero, en el altiplano cundiboyacense y los santanderes, sectores de la región Caribe; entre tanto, se ha venido incrementando en el trapecio amazónico y en la Orinoquía en general, en los pie de monte orientales (amazónico, llanero, cuenca alta del río Arauca y en el Catatumbo), en la vertiente del Pacífico del Departamento del Valle, en el Magdalena medio, sector central del litoral Caribe, sectores de los departamentos de Cesar; Magdalena, Bolívar y Sucre. Aunque la longitud (en días) de los períodos secos ha tenido cambios, estos últimos son relativamente peque-

ños (en general no sobrepasan un día más o de menos) y no señalan una tendencia clara a la prolongación o acortamiento de los mismos. La frecuencia de los eventos superiores a 25 milímetros/día se ha venido incrementando en los pie de monte orientales, en la Orinoquía y Trapecio amazónico, en sectores del Valle, del altiplano cundiboyacense, del Magdalena medio y de la región Caribe; dicha frecuencia ha venido disminuyendo en el suroccidente (Departamento de Nariño), Eje cafetero, Chocó y Antioquia y en algunas zonas de la región Caribe.

En lo que se refiere a las condiciones climáticas a finales del siglo XXI, los escenarios sugieren que el calentamiento sobre el territorio colombiano sería paulatino con incrementos de la temperatura media del aire de 2-3° entre 2011-2040 y de 3 y 4°C hacia 2071-2100; tal calentamiento sería más marcado en los valles del Magdalena y del Cauca. En esta versión de los escenarios la precipitación registra reducciones en la parte interandina, y en la región Caribe, y aumentos en la región Pacífica, en los piedemonte orientales y en un sector sobre el sur de Bolívar, Sucre y Magdalena Medio.

La configuración espacial de los cambios de la temperatura del aire y de la precipitación (mayor precipitación en sectores de barlovento y mayor calentamiento en los valles interandinos que están a sotavento) sugieren un fortalecimiento del efecto föhn, lo que da una particularidad a la expresión regional del cambio climático global.

Reconocimientos

El presente trabajo se realizó en el contexto de la línea de cambio climático que desarrolla el grupo de investigación “Tiempo, clima y sociedad” del Departamento de Geografía (Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional de Colombia), lo que ha sido posible gracias al apoyo de diversas instituciones y proyectos. Parte del componente de escenarios de cambio climático se realizó en el marco del proyecto “Perspectivas Culturales y Locales sobre el clima en Colombia”, el cual ha sido apoyado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS) mediante Contrato RC 297-2011 con la Universidad Nacional de Colombia; dicho proyecto se ha desarrollado junto con el grupo de investigación “Cultura y Ambiente” de la misma universidad. Se reconoce y agradece igualmente el apoyo de diferentes instituciones como la Universidad Nacional de Colombia (División de Investigación de la Sede Bogotá - DIB; la Vicedecanatura de Investigación y Extensión de la Facultad de Ciencias Humanas), el Instituto de Hidrología; Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), Corporación Autónoma Regional del Tolima (Cortolima), entre otras.

Un reconocimiento especial y el más sentido agradecimiento para Yenny Viviana Sánchez Alcalá, Germán Torres Soler y Guillermo Armenta. Germán Torres apoyó el análisis estadístico de los datos de observaciones; Guillermo Armenta se ocupó de la implantación, mantenimiento y operación del sistema PRECIS; Yenny Sánchez se encargó de la espacialización de las variables climatológicas para la elaboración de los mapas correspondientes.

Referencia Bibliográficas

- Acevedo L.A.**, 2009: Estimación hidrológica bajo escenarios de cambio climático en Colombia. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, p. (Consultado en <http://www.bdigital.unal.edu.co/2178/>).
- Acevedo L.A., Poveda G.**, 2011: Construcción y análisis de curvas intensidad-frecuencia-duración (idf), bajo escenarios de cambio climático en Colombia. *Revista Colombia Amazónica*, No. 3, pp. 11-30.
- Alexander L.V., Hope P., Collins D., Trewin B., Lynch A., Nicholls N.**, 2007: Trends in Australia's climate means and extremes: a global context. *Aust. Met. Mag.*, 56, pp.1-18.
- Alves L.M., Marengo J.**, 2009: Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. *Theoretical and Applied Climatology*, 100, pp. 337-350.
- Ángel L., Ramírez A., Domínguez E.**, 2009: Isla de calor y cambios espacio-temporales de la temperatura en la ciudad de Bogotá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, v. 34(131), pp. 173-183.
- Benavides H., Mayorga R., Hurtado G.**, 2007. Análisis de índices de extremos climáticos para Colombia usando el Rclimdex. Nota Técnica del IDEAM. No. METEO/007-2007. Bogotá D.C., 28 p.
- Bernal N.R., Martínez J., Pabón J.D.**, 2001: El método de reducción de escala estadístico aplicado a estudios de cambio climático. *Meteorología Colombiana*. No. 4, pp. 73-76.
- Ceballos J.L., Euscategui C., Ramírez J., Cañón M., Huggel C., Haberli W., Machguth H.**, 2006: Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia. *Annals of Glaciology*, v.43 (1), pp.194-201.
- Dueñas H.**, 1992: The Paleo ENSO record in the Lower Magdalena basin, Colombia. En: Ortlieb L., Macharé J. (Eds): *Paleo ENSO Records Internat. Symp., Extended Abstracts*. Lima. pp. 81-85.
- Eslava J.A., Pabón J.D.**, 2001: Proyecto "Proyecciones climáticas e impactos socioeconómicos del cambio climático en Colombia". *Meteorología Colombiana*, N° 3, pp. 1-8.
- Florez A.**, 1992a: Los glaciares residuales de Colombia. Enfoque histórico y geosituación actual. *Zenit*, N° 3, pp 35-45.
- Florez A.**, 1992b: Los nevados de Colombia. Glaciares y glaciaciones. *Análisis Geográficos IGAC*, Bogotá, N° 22, 95 p.
- Gonzalez-Rouco F.J., Fernandez-Donado L., Raible C.C., Barriopedro D., Luterbacher J., Jungclaus J.H., Swingedouw D., Servonnat J., Zorita E., Wagner S., Ammann C.M.**, 2011: Medieval Climate Anomaly to Little Ice Age transition as simulated by current climate models. *PAGES News*, v. 19(1), pp.7-8.
- González E.T., van der Hammen T., Flint R.F.**, 1965: Late Quaternary Glacial Vegetational Sequence in Valle de Lagunilla, Sierra Nevada del Cocuy, Colombia. *Leides Geol.*, 32, pp. 157-182.
- Hooghiemstra H.**, 1984: Vegetational and climatic history of the High Plain of Bogotá, Colombia: A continuous record of the last 3.5. million years. En T. van der Hammen (Edt.), 1984: *The Quaternary of Colombia*, 10, CRAMER, 368 p.
- Hooghiemstra H., Ran E.T.H.**, 1994: The Pliocene and Quaternary of the high plain of Bogotá (Colombia): An overview of climatic change. *Quaternary International*, 21, pp. 63-80.
- Haylock et al.**, 2006: Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature. *J. of Climate*, 19, pp. 1490-1512.
- Huggel C., Ceballos J.L., Pulgarín B., Ramírez J., Thouret J.C.**, 2007: Review and reassessment of hazards owing to volcano-glacier interactions in Colombia. *Annals of Glaciology*, 45, pp. 128-136.
- Hulme, M. y Sheard, N.**, 1999 Escenarios de Cambio Climático para Países de los Andes del Norte, Unidad de Investigación Climática, Norwich, Reino Unido, 6pp.
- IDEAM-MINAMBIENTE-PNUD, 2001: Colombia, Primera Comunicación Nacional ante la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Bogotá D.C, 307 páginas.
- IPCC-TG CIA, 1999: Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 1. Prepared by Carter, T.R., M. Hulme, and M. Lal (with contributions of X. Dai, P. Desanker, F. Giorgi, L.J. Mata, L.O. Mearns, J.F.B. Mitchell, T. Morita, R. Moss, D. Murdiyarso, J.D. Pabon-Caicedo, M.L. Parry, R.J. Scholes and P.H. Whetton). Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, 69pp.
- IPCC, 2000: Special Report on Emissions Scenarios. Edited by N. Nakicenovic and R. Swart. / Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2007a: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- IPCC, 2007b: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp.
- Jones R.G., Noguer M., Hassell D.C., Hudson D., Wilson S.S., Jenkins G.J., Mitchell J.F.B.**, 2004: Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS, Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 40pp.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D.**, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. of American Meteor. Soc.*, v.77, No.3, pp. 437-471.
- León G.E.**, 2000a: Tendencia de la temperatura del aire en Colombia. *Meteorología Colombiana*, N. 2, pp. 57-65.
- León G.E.**, 2000b: Variabilidad y tendencia de la temperatura del aire en las cuatro ciudades principales de Colombia. *Meteorología Colombiana*, No. 2, pp. 81-86.
- Lozano J.A., Pabón J.D.**, (Eds) 1995: *Memorias del Seminario Taller sobre Alta Montaña Colombiana*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Colección Memorias, No. 3, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Bogotá D. C. 114 p.
- Lozano J.A., León G.E., Pabón J.D.**, (Eds) 1996: *Memorias del Primer Seminario Nacional sobre Cambio Climático* (Santa Fe de Bogotá, 3 y 4 de marzo de 1994). Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Santa Fe de Bogotá, D.C. 133 p.
- Mann M.E.**, 2002: The Little Ice Age. In: *Encyclopedia of the Global Environmental Change*, volume I, "The Earth system: physical and che-

- mical dimensions of global environmental change", John Wiley & Sons, Chichester. pp 504-509.
- Mann M.E., Zhang Z., Rutherford S., Bradley R.S., Hughes M.K., Shindell D., Ammann C., Faluvegi G., Ni F.,** 2009: Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science*, v.326, pp. 1256-1260.
- MAVDT-IDEAM-PNUD, 2010: Segunda Comunicación de Colombia ante la Convención Marco de Cambio Climático. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá D.C. 443 p.
- Mearns L.O., Giorgi F., Whetton P., Pabon J.D., Hulme M., Lal M.,** 2003: Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, 38pp.
- Mesa O.J., Poveda G., Carvajal L.F.,** 1997: Introducción al clima de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Medellín, 390 p.
- Molina A., Bernal N.R., Pabón J.D., Martínez J., Vega E.,** 2000: Reducción de escala estadístico aplicado a datos del CCM3 para generar datos de temperatura del aire en superficie. *Meteorología Colombiana*, N° 2, pp. 95-100.
- Molina A., Bernal N.R., Vega E.E., Martínez J., Pabón J.D.,** 2003: Cambios en la temperatura del aire en Colombia bajo un escenario de duplicación de dióxido de carbono. *Meteorología Colombiana*, No.7. Marzo de 2003, pp. 21-35.
- Mulligan M.,** 2000: Downscaled Climate Change Scenarios for Colombia and their Hydrological Consequences. *Advances in Environmental Monitoring and Modeling*, Vol. 1, No. 1, pp.3-35.
- Nakaegawa T., Vergara W.,** 2010: First Projection of Climatological Mean River Discharges in the Magdalena River Basin, Colombia, in a Changing Climate during the 21st Century. *Hydrological Research Letter*, 4, pp. 50-54.
- New M., Hewitson B., Stephenson D.B., Tsiga A., Kruger A., Manhique A., Gomez B., Coelho C.A.S., Masisi D.N., Kululanga E., Mbambalala E., Adesina F., Saleh H., Kanyanga J., Adosi J., Bulane L., Fortunata L., Mdoka M.L., Lajoie R.,** 2005: Evidence of trends in daily climate extremes over Southern and West Africa, *Journal of Geophysical Research*. 111 (D14) doi:10.1029/2005JD006289
- Pabón J.D.,** 1995a: Búsqueda de Series de Referencia para el Seguimiento de la Señal Regional del Calentamiento Global". *Cuadernos de Geografía*, v.V., pp. 164-173.
- Pabón, J. D.** 1995b. Aspectos globales y regionales del cambio climático y su impacto en la alta montaña colombiana. En: *Memorias del Seminario Taller sobre Alta Montaña Colombiana* (Santa Fe de Bogotá, octubre de 1993). Colección Memorias No. 3, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Bogotá D. C. p. 19-32.
- Pabón, J.D., Pulido S.I., Jaramillo O., Chaparro J.A.,** 1998: Análisis Preliminar de la Isla de Calor en la Sabana de Bogotá. *Cuadernos de Geografía*, v. VII, No. 1-2, pp.87-93.
- Pabón J.D., Cárdenas I., Kholostyakov R., Calderón A.F., Bernal N., Ruiz F.,** 2001a: Escenarios climáticos para el siglo XXI sobre el territorio colombiano. Informe Técnico Interno del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Bogotá, D.C., Colombia.
- Pabón J.D., Eslava J.A., Pelkowski J., Montoya G.J., Vega E.E.,** 2001b: Resultados de la simulación del clima por CCM3. *Meteorología Colombiana*. No. 4, pp. 61-64.
- Pabón J.D., Eslava J.A., Vega E.E.,** 2001c: Comparación entre los climas simulados por los modelos CCM3 y CSM1. *Meteorología Colombiana*. No. 4, pp. 25-37.
- Pabón J.D., Eslava J.A., Pelkowski J., Montoya G.J., Vega E.E.,** 2001d: Resultados de la simulación del clima por CCM3. *Meteorología Colombiana*. No. 4, pp. 61-64.
- Pabón J.D., Martínez J., Bernal N.R., Molina A., Vega E.E.,** 2001e: Aspectos metodológicos del método de reducción de escala. *Meteorología Colombiana*. No. 4, pp. 65-72.
- Pabón J.D.,** 2003a: El aumento del nivel del mar en las costas y área insular de Colombia. En: *El Mundo marino de Colombia investigación y desarrollo de territorios olvidados* Red de Estudios del Mundo Marino – REMAR, Universidad Nacional de Colombia, pp.75-82.
- Pabón J.D.,** 2003b: El cambio climático global y su manifestación en Colombia. *Cuadernos de Geografía*, v XII (1-2), pp. 111-119
- Pabón J.D.,** 2011: El cambio climático en la región de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Universidad Nacional de Colombia – Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Bogotá D.C., 128 páginas.
- Pabón J.D., Hurtado G.,** 2002 : Cambios en los patrones de temperatura media anual del aire y precipitación anual en los páramos de Colombia. En: *Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en Condiciones HotSpot & Global Climatic Tensor*. (Castaño-Uribe C (Editor), 2002, Bogotá D.C., 387 páginas; pp. 242-251.
- Pabón J.D., Lozano J.A.,** 2005: Aspectos relacionados con las estimaciones globales y regionales del ascenso del nivel del mar y su aplicación a Colombia. *Cuadernos de Geografía*, No. 14, pp. 97-106.
- Pabón J.D.,** 2006: Escenarios de cambio climático para Colombia. En: *Memorias del IV Encuentro de la Red de Universidades del Pacífico Sur (RUPSUR)*, 8-10 de noviembre de 2006.
- Pabón J.D.,** 2007: El cambio climático en Colombia. Tendencias actuales y proyecciones para el siglo XXI. En: *Memorias de la Primera Conferencia Internacional de Cambio Climático: Impacto en los Sistemas de Alta Montaña*. IDEAM-Universidad de Zurich. Bogotá D.C.-Zurich, pp.31-48.
- Pabón J.D.,** 2008: Escenarios de cambio climático para 24 regiones de Colombia. Informe presentado en el marco del proyecto Integrated National Adaptation Pilot (INAP). Conservación Internacional – Departamento de Geografía (Universidad Nacional de Colombia). Bogotá D.C., 15 páginas.
- Peña A.J., Arce B.A., Ayarza M.A., Lascano C.E.,** 2010: Simulación de los requerimientos hídricos de pasturas en un escenario de cambios climáticos generados con análisis espectral singular. *Acta Agronómica*, No.59 (1), pp. 1-8.
- Pérez C.A., Poveda G., Mesa O.J., Carvajal L.F., Ochoa A.,** 1998: Evidencias de cambio climático en Colombia: Tendencias y cambios de fase y amplitud de los ciclos anual y semianual. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*. 27 (3), pp. 537-546.
- Perico-Agudelo D.,** 2009: El espacio público de la ciudad: una aproximación desde el estudio de sus características microclimáticas. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 2 (4), pp. 278-301.
- Poveda E.A.,** 2008: Efecto del proceso de urbanización en el clima de Bogotá durante el periodo 1960-2000. Trabajo de Grado. Departamento de Geografía, Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional de Colombia, 55 p.
- Poveda G.,** 2009: Evidences of climate and environmental change on water resources and malaria in Colombia, *IOP Conf. Series, Earth Environ. Sci.*, 6, 292054, doi:10.1088/1755-1307/6/9/292054, online available at : <http://www.iop.org/EJ/toc/1755-1315/6/29>
- Poveda G., Pineda K.,** 2009: Reassessment of Colombia's tropical glacier's retreat rates: are they bound to disappear during the 2010-2020 decade? *Advances in Geosciences*, v.22, pp.107-116.

- Quintana-Gómez R.A.**, 1999: Trends of Maximum and minimum Temperatures in Northern South America. *Journal of Climate*, v. 12 (6), pp. 2104-2112.
- Rangel E.S., Montealegre J.E.**, 2003: Análisis de las series del nivel del mar en el Pacífico colombiano y su relación con el cambio climático. *Meteorología Colombiana*, No.7, pp. 53-66.
- Reuter J., Stott L., Khider D., Sinha A., Cheng H., Edwards R.L.**, 2009: A new perspective on the hydroclimate variability in northern South America during the Little Ice Age. *Geophysical Research Letters*, 36 (21): L21706 DOI: 10.1029/2009GL041051.
- Rodríguez-Becerra M., Mance H.**, 2009: Cambio climático: lo que está en juego. Fondo Nacional Ambiental. Bogotá D.C., 73 p.
- Rodríguez N., Pabón J.D., Bernal N., Martínez J.**, 2010: Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos. Instituto de Investigaciones Alexander von Humboldt – Universidad Nacional de Colombia – Colciencias. Bogotá D.C., 80 páginas.
- Ruiz, F., Martínez M.C.**, 2007: Report on Activities Performed in MRI-Japan to Simulate Climate in Colombia and the A1B Scenario with the Japanese Model using a Resolution of 20 x 20 Km. Visualizing Future Climate in Latin America: Results from the application of the Earth Simulator. Latin America and Caribbean Region Sustainable Development Working Paper 30, pp. 43-59.
- Ruiz F.**, 2010: Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (panorama 2011-2100). Nota Técnica de IDEAM, No. IDEAM-METEO/005-2010, Bogotá D.C., 91 páginas
- Tellez-Guio P., Boshell J.F., Zea J.A.**, 2001: Proyecciones en los cambios del balance hídrico en Colombia bajo alteraciones en el contenido del dióxido de carbono. *Meteorología Colombiana*, No. 4, pp. 87-102.
- Uppala S.M., Kållberg P.W., Simmons A.J., Andrae U., da Costa Bechtold V., Fiorino M., Gibson J.K., Haseler J., Hernandez A., Kelly G.A., Li X., Onogi K., Saarinen S., Sokka N., Allan R.P., Andersson E., Arpe K., Balmaseda M.A., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Cairns S., Chevallier F., Dethof A., Dragosavac M., Fisher M., Fuentes M., Hagemann S., Hólm E., Hoskins B.J., Isaksen I., Janssen P.A.E.M., Jenne R., McNally A.P., Mahfouf J.-F., Morcrette J.-J., Rayner N.A., Saunders R.W., Simon P., Sterl A., Trenberth K.E., Untch A., Vasiljevic D., Viterbo P., Woollen J.** 2005: The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2961-3012.
- Vincent L.A., Peterson T.C., Barros V.R., Rusticucci M., Marino M.B., Carrasco G., Ramirez E., Alves L.M., Marengo J., Ambrizzi T., Berlato M.A., Grimm A.M., Molion L., Moncunill D.F., Rebello E., Anunciacao Y.M.T., Quintana J., Santos J.L., Baez J., Coronel G., García J., Trebejo I., Bidegain M., Haylock M.R., Karoly D.**, 2005: Observed Trends in Indices of Daily Temperature Extremes in South America 1960-2000. *J. of Climate*, 18, pp. 5011-5023.
- Van der Hammen T.**, 1985: The Pleistocene climatic record of the tropical Andes. *J. Geol. Soc. London*, 142 pp. 483-489.
- Van der Hammen T.**, 1986: Fluctuaciones holocénicas del nivel de inundaciones en la cuenca del Bajo Magdalena-Cauca-San Jorge (Colombia). En *Geología Norandina*, 10, Bogotá, pp. 11-18.
- Van der Hammen T. & Gonzales E.**, 1963: Historia del clima y vegetación del Plesitoceno superior y del Holoceno de la Sabana de Bogotá. *Bol. Geol.* 11(1-3) 189-266, SGN.
- Van der Hammen T. & Gonzales E.**, 1964: A pollen diagram from the Quaternary of the Sabana de Bogotá (The Tilatá and Sabana formations). *Geologie en Mijnbouw*, 45, pp. 102-109.
- Van der Hammen T., Barelds J., de Jong H., de Veer A.A.**, 1981: Glacial sequence and environmental history in the Sierra Nevada del Cocuy (Colombia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 32, pp. 247-340.
- Van der Hammen T., Ortiz-Troncoso O.R.**, 1992: Arqueología y medio ambiente en Suramérica septentrional. In *Archaeology and Environment in Latin America*, pp. 9-24 (O.R. Ortiz-Troncoso and Th. van der Hammen, Eds) Proceedings of a symposium held at the 46th International Congress of Americanists Amsterdam July 4-8, 1988, 304 p.
- Van der Hammen T., Pabón J.D., Gutierrez H., Alarcón J.C.**, 2002: El cambio global y los ecosistemas de montaña de Colombia, En: *Páramos y Ecosistemas Andinos de Colombia en Condición de HotSpot & Global Climatic Tensor* (Castaño C., (Editor), IDEAM, Bogotá DC, 387 p), pp. 163-209.
- Van der Hammen T., Urrego L.E., Espejo N., Duivenvoorden J.F., Lips J.M.**, 1992: Late glacial and Holocene sedimentation and fluctuations of river water level in the Caqueta area (Colombian Amazonia). *Journal of Quaternary Science*, 7, pp. 57-67.
- Van der Hammen T. & Hooghiemstra H.**, 1995: The El Abra Stadial, a Younger Dryas Equivalent in Colombia. *Quaternary Science Reviews*, 14, pp. 841-851.
- Van der Hammen T. & Hooghiemstra H.**, 1997: Chronostratigraphy and correlation of the Pliocene and Quaternary of Colombia. *Quaternary International*, v. 40, pp. 81-91.
- Van der Hammen T. & Cleef M.**, 1992: Holocene Changes of Rainfall and River Discharge in Northern South America and the El Niño Phenomenon. *Erdkunde*, 46, pp. 252-
- Van Geel B. & van der Hammen T.**, 1983: Upper Quaternary vegetational and climatic sequence of the Fuquene area (Eastern cordillera, Colombia). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 14, pp. 9-92.
- Van't Veer R., Islebe GA, Hooghiemstra H.** 2000. Climate change during the Younger Dryas chron in northern South America: a test of the evidence. *Quaternary Science Reviews* 19: 1821-1835.
- Wijmstra T.A.**, 1967: A pollen Diagram from the Upper Holocen of the Lower Magdalena Valley. *Leidse Geologische Mededelingen*, 39, pp. 261-267.
- Wilson M.F., Henderson-Sellers A.**, 1985: A global archive of land cover and soils data for use in general circulation climate models. *Journal of Climatology*, 5, pp119-143
- WMO, 2009: Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing in Support of Informed Decisions for Adaptation. Climate data and monitoring. WCDMP No. 72. Geneva – Switzerland, 52 p.
- Zhang X., Yang F.**, 2004: R Climdex (1.0) User Manual. Climate Research Branch of Meteorological Service of Canada 23 p.

Recibido: 5 de febrero de 2012

Aceptado para publicación: 5 de junio de 2012