

---

# SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

## Capacidades tecnológicas para la estimación del fenómeno

Mario Bidegain<sup>1</sup>

---

**Se examinan las tendencias climáticas observadas en la concentración de los gases de efecto invernadero y en las temperaturas a nivel global y sobre Uruguay.**

---

### ATMÓSFERA Y CLIMA

La atmósfera alrededor de nuestro planeta, es hoy muy distinta de la que había en el pasado. La atmósfera, se mantiene unida a la tierra por la fuerza de la gravedad, hallándose el 98 por ciento, en peso, de sus gases y partículas dentro de una capa de 30 kilómetros de altura a partir de la superficie, y más de la mitad de este peso en los primeros 5.5 kilómetros de altura. El tope de la atmósfera se desvanece gradualmente en el espacio y se considera, por lo general, que está a unos 50 km. de la superficie de la tierra. Los gases se hallan bien mezclados, especialmente en la tropósfera (los primeros 8 km.) y están constituidos sobre todo de nitrógeno (78 por ciento de la atmósfera seca), oxígeno (21 por ciento), argón (0.94 por ciento) y anhídrido carbónico (0.03 por ciento), que es esencial para el crecimiento de las plantas. Entre los gases residuales existen el metano, hidrógeno, ozono, neón, helio y xenón. El vapor de agua, que resulta de extrema importancia para regular el sistema climático y producción de la precipitación, se halla en cantidades muy variables. La atmósfera transporta también muchas partículas existentes dentro del aire.

Pero la atmósfera no siempre fue así. Hace unos 4.500 millones de años, cuando la tierra se formó y antes de que apareciesen las formas de vida más primitivas, la atmósfera carecía de oxígeno. En realidad, la tierra tenía una capacidad enorme para eliminar oxígeno mediante agentes reductores, tales como el hierro y el azufre contenidos en los océanos. Al ser radiactivos, es decir, calentados internamente además de hacerlo por el Sol, los gases fluían de las fisuras, grietas y volcanes creando una primitiva cubierta atmosférica de metano, amoníaco, vapor de agua y anhídrido carbónico, que son los que ahora conocemos

---

<sup>1</sup> Máster en Ciencias Atmosféricas por la Universidad de Sao Paulo (Brasil), egresado del Curso Internacional de Meteorología (España). Revisor del Cuarto Informe del IPCC Grupo I (Bases Físicas del Clima) y de Cambio Climático y Recursos Hídricos.

Docente e Investigador en la Universidad de la República (Facultad de Ciencias). Especializado en Variabilidad y Cambio Climático en América del Sur. Actualmente se desempeña como Director de la Escuela de Meteorología del Uruguay.

[bidegain@fisica.edu.uy](mailto:bidegain@fisica.edu.uy)

con el nombre de gases de efecto invernadero. El resultado de la acción de aquellos gases de efecto invernadero fue el mantener la temperatura media de la superficie terrestre alrededor de 15°C, adecuada para el desarrollo de la vida.

La energía del Sol no ha permanecido constante en los 4.500 millones de años que tiene la Tierra. Como estrella típica que es, el Sol cada vez está un poco más caliente, y durante los milenios transcurridos ha emitido cada vez más energía. Actualmente, irradia a la Tierra quizás hasta un 30 por ciento más calor que lo hacía cuando la Tierra se formó. Sin embargo, las temperaturas de la superficie de la Tierra parecen que han permanecido sorprendentemente estables todo el tiempo, por intervención de la atmósfera y sus interacciones con las plantas y animales, y también a causa de los cambios en la capacidad de absorción de calor que tiene la superficie terrestre con motivo de la extensión de sus aguas, tierras, vegetación y hielos.

Las fluctuaciones de la composición de la atmósfera y los cambios de temperatura experimentados en los últimos 200.000 años pueden ser determinados por el análisis de las pequeñas burbujas de aire retenidas en el hielo, acumulado año tras año en la Antártica y en el Ártico. A partir de las muestras extraídas por perforación en estos casquetes de hielo, se puede medir y deducir un registro de los cambios que han ocurrido. A partir de una de la muestra más famosa, la muestra de Vostok, se han podido determinar la concentración de anhídrido carbónico y la temperatura estimada correspondiente a los últimos 160.000 años. El análisis muestra que, durante este período breve en comparación con la historia de la Tierra, pero muy largo en términos humanos, el anhídrido carbónico fluctuó aproximadamente entre 180 y 290 partes por millón (ppm) en la atmósfera, y la temperatura aumentó y descendió dentro de una gama de 9 ó 10°C, siguiendo con un paralelismo casi perfecto el aumento y descenso de las concentraciones de anhídrido carbónico. El anhídrido carbónico constituye el principal, aunque no único, gas de efecto invernadero o regulador del calor de la moderna atmósfera.

## **GASES DE EFECTO INVERNADERO**

Desde el comienzo de la revolución industrial hemos sido testigos de un aumento cada vez más rápido de la concentración de gases de efecto invernadero. Es este aumento del efecto natural de invernadero lo que nos preocupa.

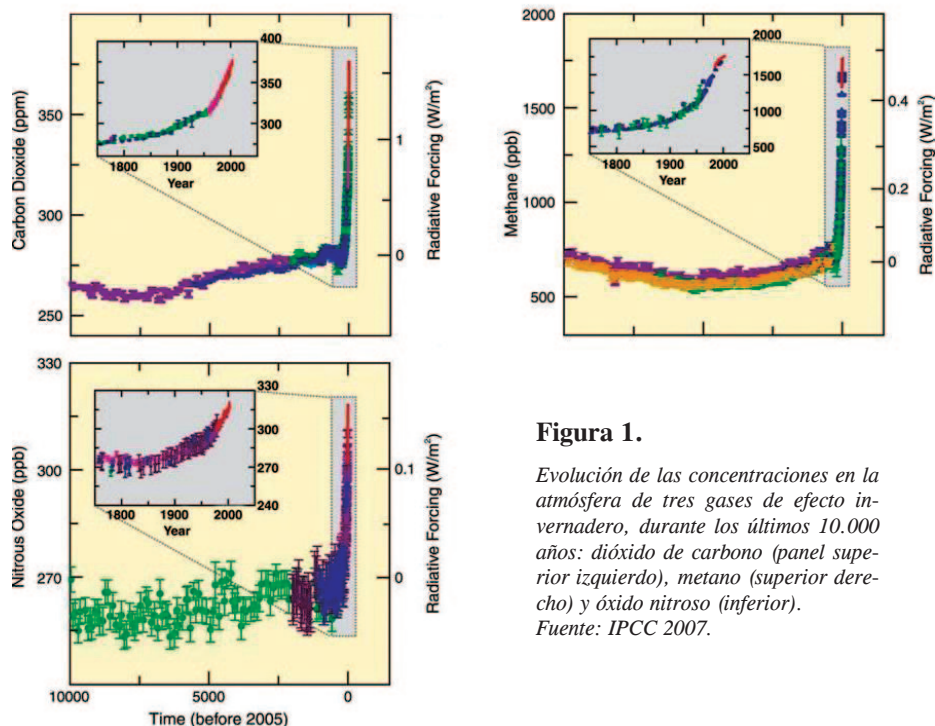
El nitrógeno y el oxígeno –que constituyen el 97 por ciento de la atmósfera en volumen– ejercen poco efecto en el balance de energía de la tierra. La radiación procedente del Sol y devuelta por la Tierra puede pasar a través de estos gases sin gran dificultad. Si fuesen estos gases los únicos componentes, el clima de la tierra sería mucho más riguroso y, por término medio, la temperatura del aire cerca de la superficie sería 33°C más fría que en la actualidad.

Ciertos gases de menor importancia cambian todo esto. Ellos tienen una propiedad vital en común: permiten a los rayos del Sol penetrar hasta la superficie de la Tierra, pero retardan el flujo de retorno de la radiación infrarroja. Entre los gases activos de efecto invernadero –así denominados debido a que su función es en cierto modo similar a la de un tejado de vidrio– se incluye el vapor de agua, el anhídrido carbónico y otras diversas sustancias menos abundantes, especialmente el óxido nitroso, ozono y metano, que calientan la superficie de la Tierra.

Como antes se dijo, el vapor de agua es también un gas de efecto invernadero, aunque de una manera muy distinta a los otros. Procede de la evaporación de los mares, lagos y vegetación dentro del ciclo hidrológico mundial. Se condensa para formar las nubes, algunas de las cuales son trampas incluso más eficaces para la energía de larga longitud de onda procedente de la Tierra, pero que también reflejan y devuelven alguna de la energía entrante procedente del Sol. El vapor de agua se presenta en concentraciones muy variables y, aunque parece existir una aparente tendencia de aumento, especialmente en las zonas tropicales, no es seguro si dicha tendencia se relaciona con el calentamiento del clima o con la evolución de las técnicas de observación.

Se hallan claramente en aumento las concentraciones de los otros cinco importantes gases de efecto invernadero: anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ); ozono ( $\text{O}_3$ ) cerca de la superficie y en la tropósfera inferior; metano ( $\text{CH}_4$ ); óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y clorofluorocarbonos (CFC).

El tiempo de permanencia en la atmósfera de estos gases varía entre unas pocas horas o semanas, en cuanto al ozono de bajo nivel, hasta más de 100 años para el CFC-12. El anhídrido carbónico puede tener un tiempo de permanencia combinada en la atmósfera, la biósfera y la parte superior del océano de unos 200 años desde el momento de su liberación. Cuando las estimaciones del tiempo de permanencia en la atmósfera se combinan con la capacidad relativa que tiene cada molécula del gas para absorber la radiación infrarroja procedente de la Tierra, resulta posible estimar la contribución que al efecto invernadero aporta cada gas expresándola en función de la que ejerce el  $\text{CO}_2$ .



**Figura 1.**

*Evolución de las concentraciones en la atmósfera de tres gases de efecto invernadero, durante los últimos 10.000 años: dióxido de carbono (panel superior izquierdo), metano (superior derecho) y óxido nitroso (inferior).*

*Fuente: IPCC 2007.*

## **EFECTO ANTROPOGÉNICO**

La actividad industrial del mundo ha aumentado veinte veces desde 1900 y en la actualidad afecta profundamente al sistema climático. La población había alcanzado 1.000 millones aproximadamente en el año 1800, a finales de 1950 había 2.500 millones de seres humanos y, hoy en día, somos más de 6.000 millones de personas en el mundo.

Es muy preocupante el aumento de la utilización de combustibles fósiles, ya que constituye el principal motivo de los profundos cambios que afectan al sistema climático. La sociedad industrial excava o perfora profundamente la tierra para extraer el carbón, petróleo o gas natural de los niveles en que quedó enterrado en eras anteriores como resultado de la actividad biológica pretérita. Después, procedemos a quemar estos antiguos depósitos, estos combustibles fósiles, de modo que emitimos carbono a la atmósfera en forma de anhídrido carbónico. Las cantidades utilizadas no son triviales.

Se estima que, con el ritmo actual, el consumo anual de combustibles fósiles representa aproximadamente un millón de años de acción de la naturaleza que tuvo lugar hace mucho tiempo para sepultar el material carbonado. No es pues sorprendente que se manifieste de manera tan evidente el deterioro atmosférico. La utilización de combustibles fósiles en nuestros vehículos de motor, camiones, hornos, fábricas y plantas generadoras de electricidad, no solamente aumenta la concentración de anhídrido carbónico, sino que también es la principal fuente de otros contaminantes del aire.

La deforestación de las tierras para la agricultura y otros fines ha ejercido importantes efectos: en primer lugar, reduciendo la cantidad de carbono absorbido por los grandes bosques y contribuyendo al aumento del anhídrido carbónico atmosférico. Además, aumenta también las emisiones de metano procedentes del suelo y de las actividades agrícolas.

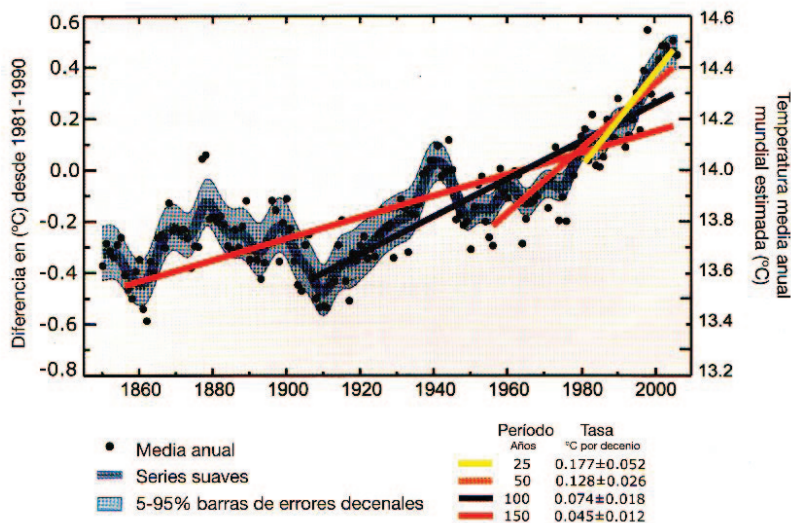
En resumen, podemos decir que la raza humana se ha multiplicado tanto y ha organizado sus actividades de tal manera que en un instante, si medimos el tiempo en relación con la historia de la Tierra, hemos comenzado a perturbar gravemente los equilibrios establecidos desde hace mucho tiempo, dentro del sistema climático, por haber causado bruscos cambios químicos en la atmósfera terrestre.

## **TENDENCIAS CLIMÁTICAS DURANTE EL SIGLO XX**

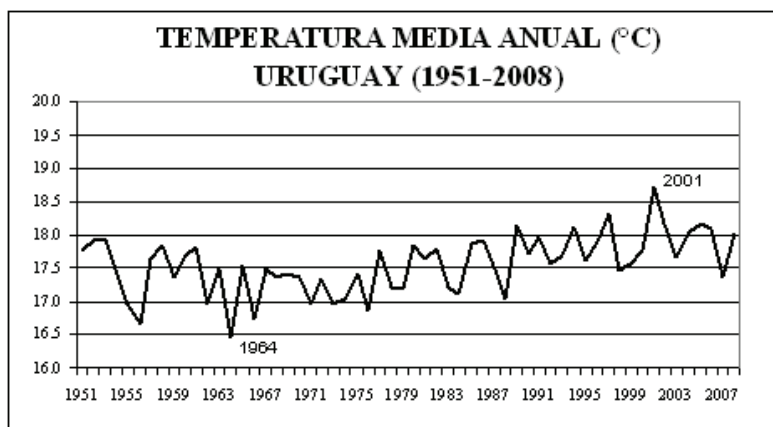
Las observaciones de la temperatura media en la superficie terrestre, demuestra sin lugar a dudas que existe un proceso de calentamiento, el cual se ha incrementado desde finales de la década de los 70s. Los valores de las tendencias observadas muestran que el aumento ha sido de aproximadamente  $+0.8^{\circ}\text{C}$  durante el siglo XX en promedio sobre todo el planeta (Figura 2). En Uruguay la tendencia en el sur del País, donde disponemos de series que cubren todo el siglo XX, presentan valores de incremento similares (Figura 3).

El incremento observado de las temperaturas sobre la superficie terrestre sin embargo ha sido desigual, las latitudes más altas del hemisferio norte han presentado las tasas más altas de calentamiento, mientras que las latitudes medias de ambos hemisferios lo han hecho a un precio inferior. Este comportamiento se debe al cambio en el albedo de la superficie terrestre en latitudes altas del H.N. debido al temprano retiro de la nieve y hielo de la superficie terrestre en la primavera del H.N. y su situación por una superficie de color más oscuro (tundra).

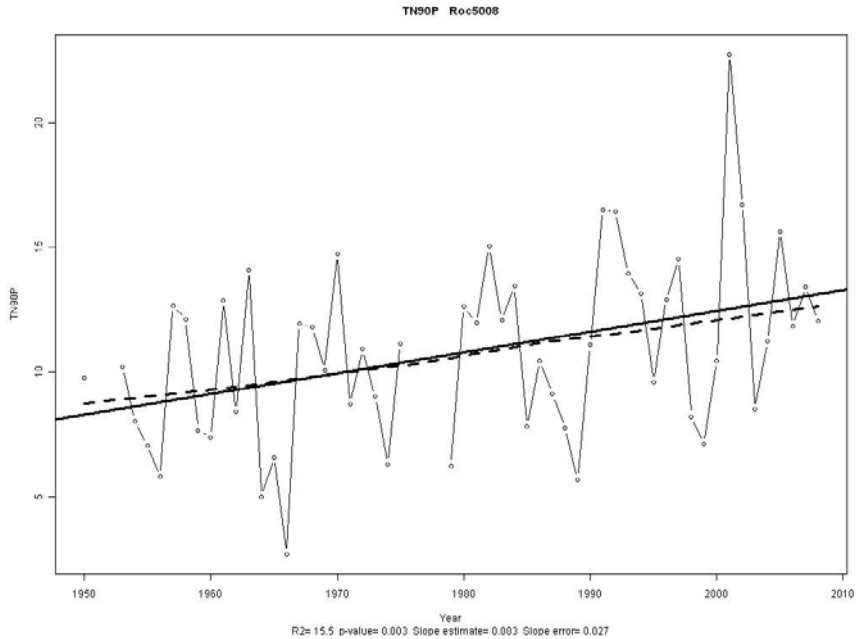
La temperatura media sobre Uruguay es en promedio de 17.5°C pero existe una gran variabilidad interanual, donde hemos tenido años en que el valor medio anual ha estado entre 16.5°C (1964) y otros que han llegado a 18.8°C (2001). Aún más preocupante son las tendencias en las temperaturas mínimas nocturnas que han aumentado significativamente, por ejemplo en nuestro litoral atlántico, donde hemos observado aumentos de 2 – 3°C en los últimos 50 años.



**Figura 2.** Valoración y tendencias observadas de la temperatura media en la superficie de la Tierra, durante los últimos 150 años. Observar el incremento en las tendencias en los últimos 30 años. Fuente IPCC 2007.



**Figura 3.** Evolución de la temperatura media anual en superficie de Uruguay, durante los últimos 60 años. Fuente: Dirección Nacional de Meteorología.

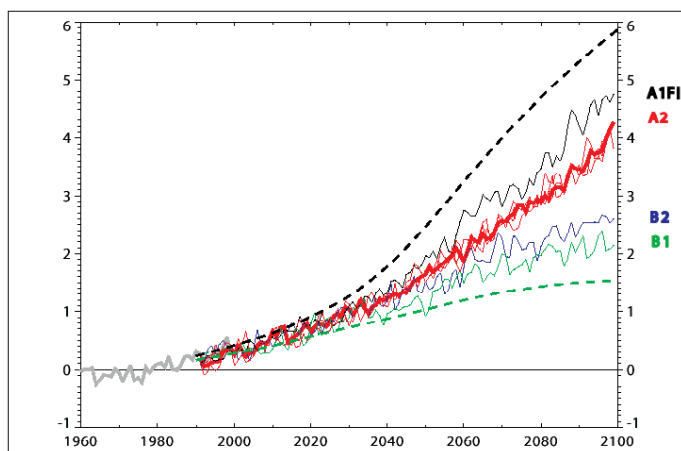


**Figura 4.** Evolución de las temperaturas mínimas nocturnas en Rocha, durante los últimos 60 años.  
Fuente: Dirección Nacional de Meteorología.

## **ESCENARIOS CLIMÁTICOS PARA EL SIGLO XXI**

Es de gran importancia estimar los futuros cambios climáticos que podríamos experimentar en las próximas décadas. Los escenarios climáticos están basados en los esquemas SRES del IPC y obtenidos de las salidas de Modelos Climáticos Globales. El cambio en las emisiones de dióxido de carbono de fuentes energéticas/industriales para el año 2100 varía, según los escenarios socioeconómicos, desde una disminución del 4 por ciento (escenario B1) a un aumento de alrededor de 320 por ciento (escenario A2), si se compara con lo estimado para el año 2000 para los cuatro escenarios. De acuerdo a estas estimaciones en futuras emisiones, se asume que no existe reducción de emisiones de acuerdo a la aplicación de acuerdos climáticos internacionales (ejemplo Protocolo de Kyoto). Las emisiones de dióxido de carbono atmosférico aumentarían desde una emisión de 6 GtC/año en 1990 a una emisión de 30.3 GtC/año para el escenario A1F1 en el año 2100, y de 4.3 GtC/año para el escenario A1. Las emisiones de otros gases invernadero también aumentarían.

En la figura 5 se observa la evolución de la temperatura media global según los diferentes escenarios socioeconómicos SRES. Se destaca el escenario A1F1 como el más extremista con relación al aumento de la temperatura con un incremento de casi 5°C para el año 2100. Para los restantes escenarios se estiman aumentos de entre 2.1°C para el B1 hasta 4.4°C para el A2.



**Figura 5.** Evolución de las temperaturas medias anuales previstas según los cuatro escenarios socioeconómicos. Fuente: IPCC 2001.

## MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES

La única herramienta de que disponemos para estimar los escenarios climáticos futuros, con objetividad y con coherencia física en sus resultados son las salidas de los Modelos Climáticos Globales (GCMs). Un modelo climático global es una representación matemática (un sistema de ecuaciones) de los principales procesos físicos que ocurren dentro de los componentes del sistema climático y las interacciones entre ellos. Los principales componentes del sistema climático son la atmósfera, hidrosfera, criósfera, litosfera y biosfera.

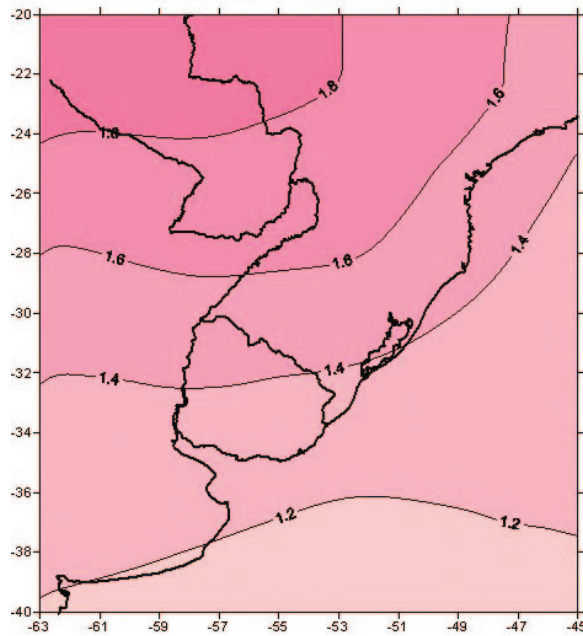
## CAMBIO DE TEMPERATURA SOBRE EL SURESTE DE SUDAMÉRICA

Los campos futuros de la temperatura media anual sobre la región fueron estimados basados en cuatro modelos climáticos globales de mejor performance sobre la región: HADCM3 del Hadley Centre (Reino Unido), ECHAM5 del Instituto Max Planck (Alemania), CSIRO mk2 (Australia) y GFDL CM2.0 (USA). Los modelos fueron forzados con el escenario socioeconómico A2 (media alta) y B2 (bajo).

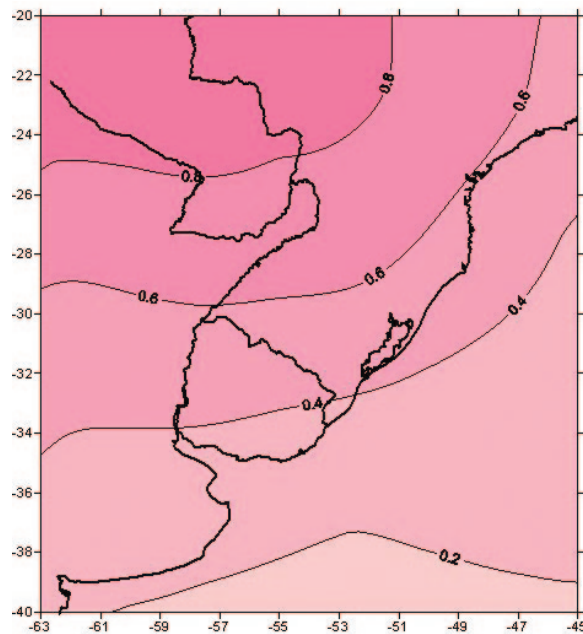
Según el escenario A2 los incrementos de la temperatura media anual son ligeramente superiores al escenario B2. Se espera para el escenario A2, incrementos de la temperatura sobre el País en promedio  $+0.4^{\circ}\text{C}$  para la década centrada en el 2020 (mapa A en figura 6). Los valores de temperatura para la década centrada en el 2050 (mapa B en figura 6).

El norte del País experimentaría tasas de calentamiento del orden de  $+0.5^{\circ}\text{C}$  para 2020, y entre  $+1.5^{\circ}\text{C}$  para 2050. Los menores calentamientos relativos sobre nuestro País estarán situados sobre el sur y litoral atlántico. El escenario B2 muestra menores incrementos de temperatura para el 2050 que el escenario A2.

**Figura 6 (A y B). ESCENARIOS DE CAMBIO DE TEMPERATURA PARA LAS DÉCADAS DE 2020 Y 2050. FUENTE: UCC (2005).**



**Figura 6 (A).** Cambio en la temperatura media anual ( $^{\circ}\text{C}$ ) para la década de 2020 según el escenario SRES A2.



**Figura 6 (B).** Cambio en la temperatura media anual ( $^{\circ}\text{C}$ ) para la década de 2050 según el escenario SRES A2.

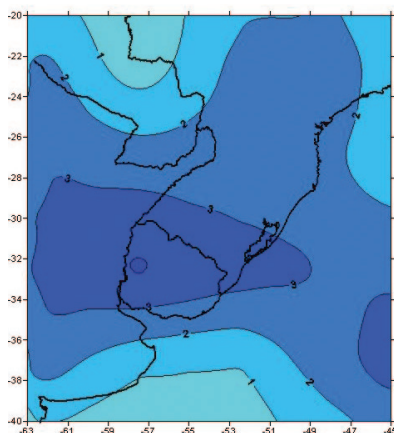


## CAMBIO DE LA PRECIPITACIÓN SOBRE EL SURESTE DE SUDAMÉRICA

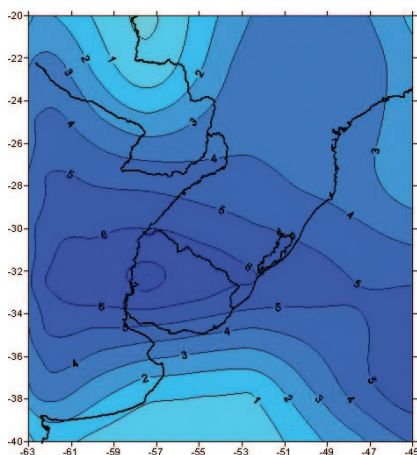
Los futuros campos de la precipitación sobre la región de interés fueron estimados basados en los cuatro modelos climáticos globales: HADCM3, ECHAM4, CSIRO-MK2 y GFDL CM2.0. Todos los modelos fueron forzados con los escenarios socioeconómicos A2 (medio alto) y B2 (bajo) (ver figura 7 A y B).

Los campos de precipitación previstos para las décadas del 2020 y 2050 para el escenario A2 se presentan en la figura 7. Estos campos previstos presentan valores de incrementos en toda la región del orden del 5% para el 2020 y de +10% para el 2050.-

**Figura 7 (A Y B). ESCENARIOS DE CAMBIO DE TEMPERATURA PARA LAS DÉCADAS DE 2020 Y 2050 FUENTE: UCC (2005).**



**Figura 7 (A).** Cambio en la precipitación anual (%) para la década de 2020 según el escenario SRES A2.



**Figura 7 (B).** Cambio en la precipitación anual (%) para la década de 2050 según el escenario SRES A2.

## **BIBLIOGRAFÍA**

BIDEGAIN et. al. (2005) Tendencias Climáticas, Hidrológicas y Oceanográficas en el Río de la Plata, Cap. 14, 137 – 144. AIACC – CIMA – UBA, Buenos Aires, 2005.

CAMILLONI I. y M. Bidegain (2005) Escenarios Climáticos para el Siglo XXI. Cap. IV del Libro “El Cambio Climático en el Río de la Plata”. AIACC – CIMA – UBA. Ed. Barros, Menendez y Nagy. Buenos Aires.

SOLOMON, S. D. Qin, M. Manning Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and A.L. Miller (eds). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Unidad de Cambio Climático (2004). 2ª Comunicación Nacional al UNFCC. UCC – DINAMA – MVOTMA.

Unidad de Cambio Climático (2005). Análisis de la Estadística Climática y Escenarios Climáticos Futuros en el Uruguay. UCC – DINAMA – MVOTMA.

