



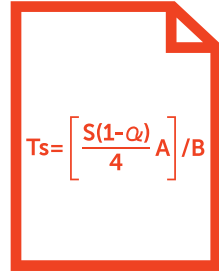
$$T_s = \left[\frac{S(1-Q)}{4} A \right] / B$$

Los Modelos Climáticos y la Estimación del Clima Futuro

Lic. Abel Centella Artola
INSTITUTO DE METEOROLOGÍA



COLECCIÓN
ENTENDIENDO
EL CAMBIO CLIMÁTICO



Los Modelos Climáticos y la Estimación del Clima Futuro

Lic. Abel Centella Artola
INSTITUTO DE METEOROLOGÍA



COLECCIÓN
**ENTENDIENDO
EL CAMBIO CLIMÁTICO**

**Autor:**

Lic. Abel Centella Artola
orlando570598@yahoo.com

Diseño:

Carlos L. Mesa Vera
Alfredo Aguilera Torralbas

El contenido de este material solo refleja la opinion del autor

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, citándola de forma siguiente:

*Centella, A, 2019: Los Modelos Climáticos y la Estimación del Clima Futuro.
ISBN: 978-959-300-157-1. Editorial AMA.*

*Realizado con la contribución del Proyecto Tercera Comunicación Nacional
y Primer Reporte Bienal a la Convención Marco de Naciones Unidas
sobre Cambio Climático. Proyecto GEF/PNUD.*

Índice

Prólogo / 5

Una introducción necesaria / 9

¿Qué son los modelos climáticos? / 13

**El espectro o sistema jerárquico de modelos climáticos
¿Qué es y por qué existe? / 17**

¿Cómo se verifican los modelos climáticos? / 25

¿Cómo se usan los modelos climáticos para predecir el futuro? / 29

**Uso de los modelos climáticos en Cuba. Una experiencia
de trascendencia nacional y regional / 39**

A manera de Epílogo / 47

Agradecimientos / 48

$$S = \frac{S(1-\alpha)}{4} A/B$$

●● Prólogo

Prólogo

Esta demostrado científicamente que el cambio climático es la mayor de las amenazas medio ambientales que enfrenta la humanidad. Un reciente artículo publicado por la Revista *BioScience*¹, declara que se producirá una emergencia ambiental debida a este fenómeno. Ese artículo, avalado por la firma de más 11 mil científicos de 153 países, indica que el cambio climático “provocará un sufrimiento humano no revelado”, si no se producen cambios profundos y duraderos en las emisiones de gases de efecto de invernadero.

A pesar de 40 años de negociaciones mundiales, el cambio climático transcurre de manera más acelerada que lo previsto por la comunidad científica. También es un hecho que el propósito de los Acuerdos de París de evitar transgredir la frontera de los 2°C, parece ser una ilusión inalcanzable. Las alternativas para enfrentar la crisis continúan siendo la mitigación y la adaptación. Para países como Cuba, la adaptación es la senda de mayor prioridad, tal y como se propone el Programa del Estado Cubano para el Enfrentamiento al Cambio Climático (Tarea Vida).

Cuba se ha mantenido en la vanguardia de los estudios sobre los impactos y las medidas de adaptación al cambio climático. Desde 1991 los resultados alcanzados han sido el sustento de las medidas de mitigación y adaptación que se implementan. Pero el camino aun es largo, pues se requieren mayores precisiones, nuevos métodos de análisis y un abordaje más integrador para responder a preguntas cada vez más complejas.

¹ William J Ripple, Christopher Wolf, Thomas M Newsome, Phoebe Barnard, William R Moomaw. **World Scientists' Warning of a Climate Emergency.** *BioScience*, 2019; DOI: 10.1093/biosci/biz088.

Para enfrentar de manera exitosa los impactos adversos del cambio climático, es imprescindible entender mejor este fenómeno. La adaptación al cambio climático es un proceso de visión estratégica al futuro, que debe iniciarse desde el presente y fundamentarse en modelar cómo funcionarían los ecosistemas naturales y humanos bajo la influencia de un nuevo estado climático. Entender mejor el fenómeno no es una acción exclusiva de los científicos; significa que todos los actores de la sociedad deben comprender de qué se trata y cómo se debe responder.

Esta serie es una iniciativa del proyecto GEF/PNUD *“Tercera Comunicación Nacional y Primer Reporte Bienal a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático”*, en la cual han participado reconocidos investigadores y especialistas. Es una contribución al entendimiento de diferentes aspectos del cambio climático, que en su mayoría son muy complejos.

Dr. Eduardo O. Planos Gutiérrez
Director Proyecto 3CN+1BUR

$$TS = \frac{S(1-\alpha)}{4} \left[\frac{A}{B} \right]$$

$$S = \frac{S(1-\alpha)^4}{4} A/B$$

- ● **Una introducción necesaria**

Una introducción necesaria

Intentar explicar el tema de los modelos y la modelación del clima futuro en un espacio relativamente reducido y en un lenguaje orientado a un público general, es una cuestión difícil, aunque ciertamente útil. Los modelos climáticos pueden ser tan simples como para que su formulación se escriba en un pequeño pedazo de papel. También pueden ser extremadamente complejos, como para que se requieran varios miles de líneas de código de un programa de computadora. La gran mayoría de los textos que tratan este tema son extensos e incorporan numerosos elementos relacionados con el funcionamiento de la atmósfera y los océanos principalmente.

Un texto divulgativo como este, sólo pretende poner en lenguaje simple este complejo y apasionante tema para:

- Contribuir a que se comprenda qué son los modelos climáticos;
- Ayudar a aquellos que, estando lejos de las ciencias de la atmósfera, comprendan cómo se producen los datos que los modelos generan;
- Reconocer que existen diferencias entre los modelos y que las mismas producen variados resultados que son igualmente válidos;
- Explicar que las únicas y mejores herramientas que existen para estimar el clima futuro, son los modelos climáticos y
- Comprender que cuando se dice **“modelo climático”** no se está hablando de una bola de cristal, ni de un método exacto que no se puede perfeccionar o de algo que se pueda criticar de forma desmedida.

● **El tema de la modelación del clima es de especial importancia para poder emplear e interpretar los resultados de los modelos. Más aún, es relevante para informar a los decisores. Poner el tema en lenguaje general es un reto difícil, pero muy útil.**

A lo largo de este texto se intentará que los lectores encuentren respuestas relativamente simples a la pregunta ¿Qué son los modelos climáticos? También se incorporan otras interrogantes válidas, entre las que se encuentran: ¿Todos los modelos climáticos son iguales y se usan para lo mismo? ¿Cómo se verifican los modelos climáticos? ¿Cómo se usan los modelos climáticos para predecir el futuro? ¿Cuán diferentes son los modelos de pronóstico del tiempo y los modelos de predicción del clima? ¿Por qué existe incertidumbre en la estimación del clima futuro? ¿Qué desarrollo y avance ha tenido este tema en Cuba?

Pudiera pensarse que el tema de la modelación de clima y la proyección del mismo en el futuro es estrictamente científico. Personalmente pienso que no es así. Comprender la importancia que esto tiene, significa entender la utilidad que posee para la planificación del desarrollo a diferentes escalas espaciales, incluyendo la local. No sólo sirven como una foto general de cuál puede ser el clima futuro, pueden servir para probar posibles alternativas de desarrollo, incluso a escala local.

$$TS = \frac{S(1-\alpha)}{4} \left[\frac{A}{B} \right]$$

$$S = \frac{S(1-\alpha)}{4} \left[\frac{A}{B} \right]$$

- • ¿Qué son los modelos climáticos?

¿Qué son los modelos climáticos?

Generalmente, los modelos científicos son instrumentos que nos ayudan a trabajar con problemas complicados y a entender sistemas complejos. Ellos permiten probar teorías y encontrar soluciones a diferentes escollos. Por esa razón se puede afirmar que los modelos se utilizan de forma casi permanente para explorar y entender cómo funcionan las cosas. Comúnmente al uso de los modelos se le denomina modelación.

Los modelos climáticos son la mejor herramienta para proyectar el clima futuro, pero no son bolas de cristal. No se puede olvidar que “todos los modelos están equivocados, pero algunos son útiles”

Dado que son modelos y que resultan ser aproximaciones de la realidad, siempre tendrán errores. Así, se puede recordar que el notable científico norteamericano George Box sentenció: “todos los modelos están equivocados, pero algunos son útiles”.

Profundizando en la idea anterior, proponemos el siguiente ejemplo para que el público más distante al tema pueda comprender mejor. Se pide pensar en un mapa, algo que es muy familiar a la mayoría de las personas. El mapa es un modelo o aproximación de la realidad que se logra al aplicar técnicas más o menos complejas. Se puede afirmar que, aun los mejores mapas, estén libres de errores de mayor o menor magnitud. Aun así se puede afirmar que los mapas de diferentes escalas o tipo son útiles.

En la práctica, uno de los mecanismos que se utiliza para entender las diferentes complejidades de la realidad, es dividir los componentes complejos en partes más pequeñas. Una vez que las pequeñas partes se comprenden, entonces se combinan para

entender cómo funcionan en su conjunto. Se hace de manera similar a colocar adecuadamente las piezas de un complejo rompecabezas, para que permita entonces ver el panorama general.

En esencia, los científicos del clima utilizan modelos compuestos de muchas partes pequeñas, para comprender y estudiar las complejidades de este tema a nivel global. Al hacer esto, se está en capacidad de poder estimar o predecir cómo evolucionará el clima en el futuro.

En este punto se puede afirmar que **los modelos climáticos son modelos científicos** y constituyen las herramientas o instrumentos que se emplean para saber cómo será el clima futuro. En términos científicos, el impacto de las perturbaciones que la humanidad ha producido sobre el Sistema Climático² (el incremento de las emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero), puede ser proyectado simulando todos los procesos claves que operan en el Sistema. Para eso se utilizan formulaciones matemáticas que se sustentan en principios físicos bien establecidos (Leyes de Newton, entre muchas otras).

Debido a la variedad y complejidad de los procesos que se consideran, las formulaciones matemáticas sólo pueden ser implementadas en un programa de computadora, que se denomina **modelo climático**. En general, esas formulaciones se expresan como ecuaciones en derivadas parciales y se incluyen también otros valores de parámetros y condiciones de frontera (características de la superficie terrestre, topografía, entre otros).

Las formulaciones o sistemas de ecuaciones a las que se hace referencia son tan complejas que resulta imposible resolverlas de forma analítica utilizando papel y lápiz. La solución de las mismas debe hacerse por vías aproximadas, utilizando métodos numéricos y para ello se requiere el uso de las computadoras. Se reconoce que los modelos climáticos son las únicas y mejores herramientas para realizar la estimación futura del clima.

² Sistema compuesto por la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre, la criósfera (cubiertas de hielo) y la biósfera. En términos simples, el clima de la tierra es el resultado de los intercambios e interacciones que suceden entre esas componentes.

$$TS = \frac{S(1-\alpha)}{4} \left[\frac{A}{B} \right]$$

- • **El espectro o sistema jerárquico de modelos climáticos**
¿Qué es y por qué existe?

El espectro o sistema jerárquico de modelos climáticos ¿Qué es y por qué existe?

Como se expresó con anterioridad, los modelos climáticos se derivan de las leyes físicas fundamentales, las cuales están sujetas a aproximaciones apropiadas para un sistema de escala global como lo es el Sistema Climático. Los medios computacionales que hoy existen y nuestro conocimiento de cómo funcionan las cosas son insuficientes, y por ello, limitan la resolución espacial en la cual es posible simular los procesos.

¿Qué quiere decir lo anterior? Pues simplemente que el Sistema (que es espacialmente continuo) tiene que dividirse espacialmente (discretizado³) en partes más o menos pequeñas, dentro de las cuales se realizan entonces los cálculos de los diferentes procesos. Al discretizar el Sistema lo que se hace es dividirlo artificialmente formando una rejilla. En esa rejilla el mayor o menor tamaño de las cuadrículas (menor o mayor cantidad de cuadrículas) indica una menor o mayor resolución espacial, respectivamente. La distancia entre los puntos de la rejilla (cuadrículas) es Δx ; por ello es que cuando la resolución es baja (menos resolución), Δx es mayor. La discretización se realiza tanto en sentido horizontal como en sentido vertical (niveles verticales). Se tiene así una rejilla que en esencia es tridimensional.

³ En matemáticas aplicadas, la discretización es el proceso de transferir funciones continuas a contrapartes discretas. En general se lleva a cabo para lograr que esos procesos sean adecuados para la evaluación numérica y la implementación en computadoras digitales.

Con la disminución de Δx , la cantidad de cálculos aumenta y por ello Δt (diferencia del tiempo para resolver las ecuaciones entre los puntos de la rejilla) se reduce consecuentemente. Existe una relación entre Δx y Δt para asegurar la estabilidad del método. Así, un mayor valor de Δx se asocia con un mayor valor de Δt y viceversa. Con esto se explica la estrecha relación que existe entre la resolución espacial de los modelos con los recursos computacionales disponibles. Es difícil aspirar a encontrar soluciones de alta resolución espacial con recursos computacionales insuficientes. Se trata entonces de tener la mayor resolución posible y obtener resultados en un plazo de tiempo aceptable.

Otra consideración importante que limita el incremento de la resolución se relaciona con el conocimiento de cómo funcionan los procesos en cuadrículas cada vez más pequeñas. Otra consideración importante que limita el incremento de la resolución se relaciona con el conocimiento de cómo funcionan los procesos en cuadrículas cada vez más pequeñas. Si ese conocimiento no es suficiente (como realmente lo es), resulta difícil poder explicar, y a la vez representar, cómo funcionan los procesos físicos en esas escalas más pequeñas. Entonces, aparece la pregunta ¿Cómo incrementar la resolución espacial con esa limitación o insuficiencia?

Para incorporar esos procesos, que resultan clave y que ocurren en escalas menores que la resolución del modelo, se utilizan métodos que son aproximaciones y que emplean diferentes algoritmos. A esos algoritmos se les denomina "parametrizaciones"⁴. La incorporación de los mismos en los modelos tiende a

⁴ Un ejemplo de procesos que ocurriendo en escalas pequeñas, tienen un impacto notable en el clima global son aquellos relacionados con la formación y desarrollo de las nubes. El papel de las nubes en el balance de radiación del Sistema es notable, por eso no se pueden desestimar. Las diversas formas de parametrización que existen y que se emplean, es una causa importante para explicar las diferencias en los resultados de los diferentes modelos y en los errores que poseen. Es una de las causas de las incertidumbres. En el desarrollo de las parametrizaciones a veces se emplean relaciones estadísticas, que son las responsables de decidir los valores de los parámetros. Es por ello que se dice que los modelos climáticos no están libres de los métodos estadísticos.

incrementar la cantidad de cálculos a realizar y es otro elemento que se relaciona con la capacidad computacional disponible.

Si todo el conocimiento que existe sobre el sistema climático pudiera incorporarse completamente, el modelo sería muy complejo para ejecutarlo en cualquiera de las computadoras existentes. Por este motivo y debido a razones prácticas, se realizan simplificaciones para reducir complejidad, aumentar la eficiencia computacional y responder a interrogantes de diferentes características. Se crea entonces un **espectro de modelos** con diferente nivel de complejidad y aplicabilidad. En sentido general, el espectro está integrado por:

1. Modelos climáticos tridimensionales océano-atmósfera (Figura 1): Son los de mayor complejidad pues integran o acoplan, 1) modelos de circulación general de la atmósfera, 2) modelos de circulación general del océano, 3) modelos de hielos marinos y 4) modelos de procesos de la superficie terrestre. Por lo general, la resolución espacial de estos modelos es del orden de los cientos de kilómetros, aunque en años recientes se ha reducido. Estos modelos son los que ofrecen toda la información posible sobre el clima, tanto a nivel horizontal como vertical (en la atmósfera y los océanos).

2. Modelos climáticos simples (Figura 2): Modelos simplificados con reducida complejidad. Aquí el número de dimensiones se reduce al máximo y puede que todo el sistema se represente en una sola cuadrícula. Los resultados de estos modelos se reflejan solamente como medias globales de temperatura en superficie e incremento del nivel del mar.

3. Modelos del sistema terrestre de complejidad intermedia: Se diseñaron como variante intermedia entre los modelos tridimensionales y los modelos simples. Estos modelos describen muchos de los procesos que están implícitos en los modelos complejos, pero en una forma más simple. Como son computacionalmente más eficientes que los modelos complejos, se utilizan para realizar simulaciones para largos períodos con un nivel de detalle mucho mayor que el de los modelos simples, pero significativamente menor que en los complejos.

4. Modelos climáticos regionales: En general son similares a los modelos complejos, en lo que se refiere a su estructura interna. Sin embargo, se implementan solamente para una región geográfica limitada con una resolución espacial sustancialmente más alta (de 10 a 50 km²). Como el área en que se aplican es una región limitada, estos modelos tienen que ser “alimentados” por sus fronteras laterales y por las superficiales, a partir de las salidas de modelos globales o de observaciones (Figura 3). Es decir, los modelos regionales no son autosuficientes, ellos son como una lupa que magnifica los resultados de los modelos globales.

Aunque los **modelos climáticos tridimensionales océano-atmósfera** son la mejor herramienta para representar los procesos que ocurren en el sistema climático, las limitantes que imponen los recursos computacionales, restringen su empleo en el examen de un rango amplio de diferentes procesos⁵. La simplicidad de los **modelos climáticos simples** los convierte en una herramienta más eficiente para evaluar rápidamente. Por ejemplo, cuáles serían los niveles de respuesta del sistema climático a diferentes procesos y condicionantes (diferentes perfiles de emisiones de gases de efecto invernadero). A diferencia de los modelos complejos, los resultados de los modelos simples no reflejan variaciones espaciales, pues se obtienen como medias globales.

Queda claro entonces que existen modelos climáticos de diferente grado de complejidad y que se usan para dar respuestas diferentes, más o menos complejas y de una forma más eficiente desde el punto de vista computacional y práctico.

Por ejemplo, si la pregunta a responder fuera: ¿En qué momento se producirá un incremento de 1,5°C o de 2,0°C en la temperatura media global respecto a los niveles preindustriales⁶? La respuesta

⁵ A modo de ejemplo, empleando una supercomputadora NEC SX-6, el modelo del Centro Hadley de Inglaterra, realiza la simulación del clima para un período de 250 años en un plazo de aproximadamente 3 meses. El código de programa de ese modelo puede tener más de mil líneas y los resultados generados actualmente significan unos 300 terabytes (millón de millones de bytes) de datos para su posterior análisis. Se estima que cada año, el volumen de información obtenida se duplica.

⁶ Los niveles que existían antes de la revolución industrial.

podría encontrarse de forma fácil y rápida (minutos) con un modelo climático simple. Por el contrario, si lo que se requiere saber es cómo será el clima en la región de América del Norte, cuando el incremento de la temperatura media global llegue a 1,5°C o superior, entonces es necesario un modelo climático tridimensional.

No existe un tipo único de modelo climático. El sistema jerárquico de modelos se refiere al que “organiza” estas herramientas en función de su complejidad, su uso y su eficiencia para responder interrogantes diferentes.

Finalmente, si se desea saber detalles de qué pasará en Cuba, entonces pudiera utilizarse un modelo climático regional, alimentado por un modelo tridimensional. En resumen, diferentes interrogantes, diferentes modelos.

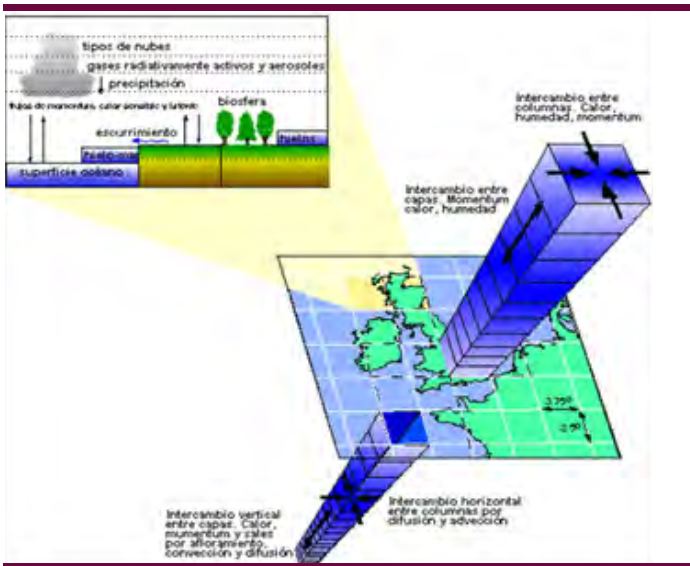


Figura 1. Representación esquemática de la estructura de un modelo tridimensional océano-atmósfera. Para cada punto de rejilla (se consideran también los niveles), el modelo resuelve las ecuaciones físicas mediante las cuales se representan los intercambios (calor, humedad, momentum, entre otros), que suceden en la atmósfera y los océanos.

Fuente: Hadley Center for Climate Prediction, UK MetOffice.

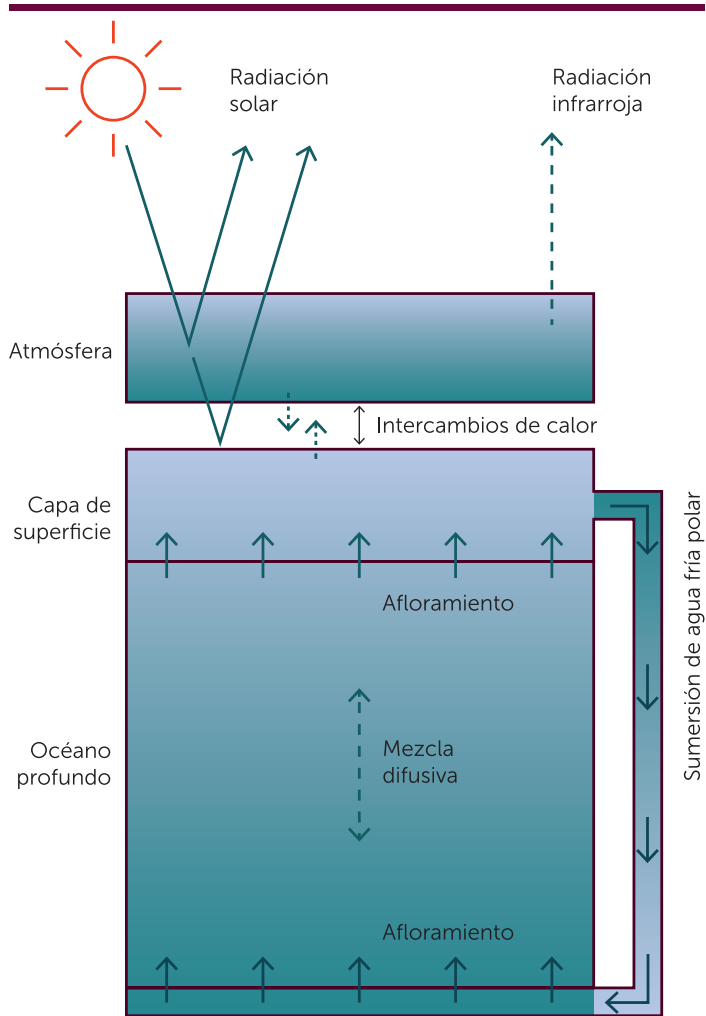


Figura 2. Ilustración esquemática de un modelo climático simple (difusión-afloramiento). Se representan las transferencias de radiación y los intercambios de calor aire-mar y el océano profundo. La atmósfera, la superficie (aire-tierra- océano) y el océano profundo, son tratados como cajas que interactúan e intercambian magnitudes físicas. **Fuente:** Documento técnico II del IPCC. Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el segundo informe de evaluación científica.

Modelos climáticos regionales

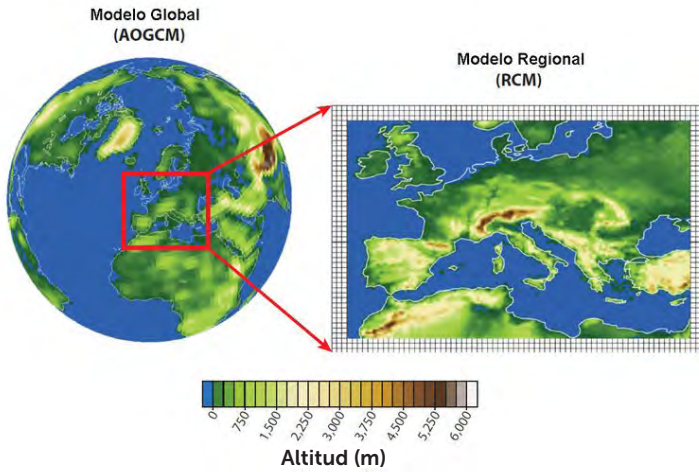


Figura 3. Representación esquemática y simplificada de la relación del modelo global (GCM) con el modelo regional (RCM).

- • **¿Cómo se verifican los modelos climáticos?**

¿Cómo se verifican los modelos climáticos?

En palabras muy simples el desarrollo de la verificación o validación se ejecuta comparando críticamente los resultados del modelo con la información de las observaciones disponibles. Esto ayuda a orientar el trabajo de los investigadores que desarrollan los modelos, pues les ofrece información sobre aquellos aspectos que resultan mejor representados, los que no son apropiadamente reflejados o los que resulta imprescindible modificar o cambiar.

En esencia el proceso de verificación ayuda a "sintonizar" los modelos según las observaciones disponibles del clima actual o pasado. Aquí surge el conflicto de que los modelos se sintonizan o verifican según el funcionamiento del sistema climático actual y pasado pero no pueden verificarse para las condiciones del sistema futuro. Entonces, la ciencia del cambio climático se basa en el supuesto de que la verificación actual, es válida para el futuro.

La verificación es práctica científica obligada. Se comparan los resultados de los modelos con las observaciones. Es, sin embargo, un ejercicio científico complejo donde no existe una mejor o única metodología.

A pesar de que se han desarrollado numerosos métodos de verificación e intercomparación de los resultados de los modelos, este asunto continúa siendo un gran reto científico. Por ejemplo, en ocasiones sucede que un modelo ofrece mejores resultados que otro al simular un grupo de variables, pero el otro hace lo mismo con otras variables. Entonces, es difícil decidir cuál de los dos es "mejor".

Como sucede muchas veces en la ciencia, en la validación existen diversos caminos. Muchos utilizan métodos en que seleccionan los “mejores” modelos simulando una o un grupo de variables clave. Otros consideran todos los modelos disponibles, pero le otorgan mayor (o menor) peso a los que mejor (o peor) simulan una variable o un grupo de variables y viceversa. Algunos utilizan todos los modelos sin realizar discriminación entre ellos.

En este punto se puede utilizar un ejemplo que tuvo un impacto de gran importancia científica global. Hace algunos años, existían dudas sobre el efecto real del incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) sobre la temperatura global. Entonces, el Cuarto Informe de Evaluación Científica del IPCC demostró la existencia de una señal humana sobre el clima global al comparar los resultados de los modelos globales con las observaciones existentes de la temperatura media global del aire.

Se utilizó una ilustración que resulta muy descriptiva para esos fines (Figura 4). Presenta los valores estimados de la temperatura media global según todos los modelos tridimensionales para dos condiciones diferentes. En una condición, los modelos sólo consideran el forzamiento natural, mientras que en la otra toman en cuenta el efecto conjunto de los GEI y el forzamiento natural.

De esta manera se verificó que la inclusión del efecto de los GEI permitía explicar el calentamiento observado en la última parte del período. Aun cuando existían diferencias entre los modelos (ver zona sombreada en rosado), todos fueron capaces de reflejar el comportamiento observado.

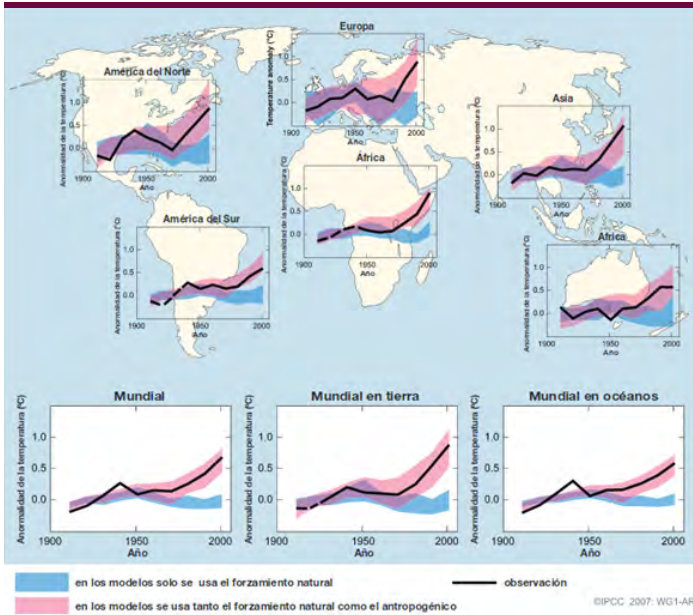


Figura 4. Comparación de los cambios observados a escala continental y mundial en la temperatura superficial, producidos por los modelos usando forzamientos naturales y antropogénicos. **Fuente:** 4to Informe de Evaluación Científica del IPCC.

•• ¿Cómo se usan
los modelos
climáticos para
predecir
el futuro?

¿Cómo se usan los modelos climáticos para predecir el futuro?

La proyección del cambio climático utilizando los modelos climáticos puede explicarse de manera simple, siguiendo las etapas que se reflejan en la Figura 5. La primera etapa (que no se incluye explícitamente dentro de los modelos climáticos) consiste en estimar los posibles perfiles de emisiones futuras de GEI y otros compuestos.

Prestemos mucha atención a esta sección. Es clave para comprender cómo utilizar los datos que generan los modelos. También es crucial para empezar a comprender el origen de las incertidumbres en la proyección del clima futuro.

Los perfiles de emisiones de GEI, también denominados escenarios de emisiones, se deducen con modelos independientes que toman en consideración el crecimiento poblacional, el empleo de la energía, el desarrollo tecnológico, entre otros. El IPCC desarrolló un conjunto de escenarios de emisiones denominados comúnmente como SRES (por sus siglas en inglés, Special Report on Emission Scenarios).

Existen cuatro familias denominadas A1, B1, A2 y B2, cada una de las cuales agrupa un conjunto de escenarios que siguen narrativas comunes. Con posterioridad se desarrolló otro grupo de escenarios (esta vez no se crearon por el IPCC, sino por equipos de investigación independientes), que se denominaron “Trayectorias Representativas de Concentraciones” (RCP, por sus siglas en inglés).

Los RCP se tratan en términos de forzamiento radiactivo⁷, donde existen cuatro escenarios representativos (RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5 y RCP2.6), que solo son muestras de todo el rango de escenarios publicados. Con estos últimos escenarios la comparación entre los resultados de los modelos es más precisa que cuando se realizaba con escenarios anteriores.

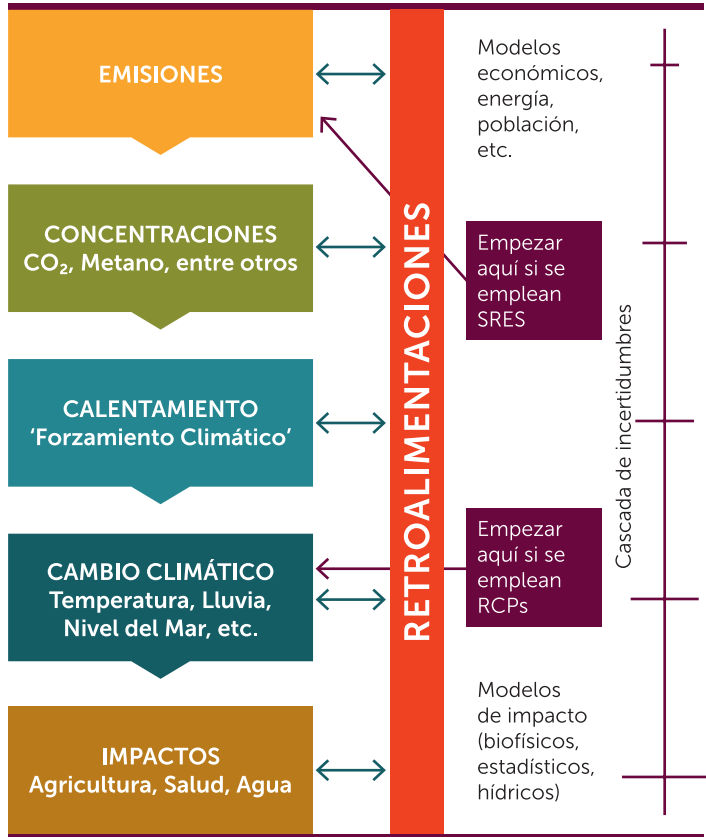


Figura 5. Representación esquemática de las etapas para la predicción del cambio climático. *Fuente del original: Hadley Center for Climate Prediction.*

⁷ Diferencia entre la cantidad de radiación solar neta recibida en el tope de la atmósfera y la radiación emitida por la tierra. Si el forzamiento radiativo es positivo indica que hay calentamiento de la tierra.

A partir de los escenarios y al emplear modelos de ciclo de vida de los gases en la atmósfera, se estiman las concentraciones atmosféricas, es decir, la cantidad de gases de efecto invernadero que queda en la atmósfera. Posteriormente, con el empleo de modelos de transferencia radiativa, se utilizan las concentraciones estimadas para determinar el forzamiento o "efecto de calentamiento". Por simplicidad, en muchas ocasiones se utilizan magnitudes de CO_2 -equivalente⁸ para representar el efecto de todos los gases.

Finalmente, se estima el efecto del calentamiento sobre el clima o el forzamiento radiativo. Todos estos pasos eran válidos para escenarios como los SRES o anteriores. Si se usan los RCPs, esta tarea no es necesaria, ya que los mismos refieren un forzamiento radiativo determinado (8.5, 6.0, 4.5 y 2.6 Wm^{-2}).

Existen mecanismos de retroalimentación que complican este simplificado panorama. Por ejemplo, el calentamiento adicional del sistema climático (forzamiento radiativo) para el doble de la concentración de CO_2 respecto a los niveles preindustriales, sería de unos 3,8 Wm^{-2} . En términos simples, tal forzamiento produciría un incremento de la temperatura media global del orden de 1°C. Sin embargo, una vez que el cambio se produce y la temperatura aumenta, se inician una serie de procesos a los cuales se les denomina retroalimentaciones. Ellas por un lado, tienden a reforzar el cambio inicial (retroalimentación positiva) o a debilitar el mismo (retroalimentación negativa).

Por ejemplo, el calentamiento de la atmósfera, posibilita que esta pueda contener más vapor de agua y como este es un gas de efecto invernadero muy potente, entonces su mayor concentración incrementa el calentamiento inicial. Por otro lado, un incremento de la concentración de CO_2 aumenta la velocidad de crecimiento de las plantas (efecto de fertilización por incremento de la fotosíntesis), las que a su vez absorben más CO_2 , actuando entonces como una retroalimentación negati-

⁸ Concentración de CO_2 que posee el mismo forzamiento radiativo que el de una mezcla de gases de efecto invernadero (CO_2 y otros gases de efecto invernadero).

va. La existencia combinada de estas retroalimentaciones debe representarse en los modelos y como no existe una comprensión completa de las mismas, entonces se convierte en una importante fuente de incertidumbre.

Una vez que se tiene el forzamiento climático o forzamiento radiativo, se puede estimar el cambio climático empleando diferentes modelos (tridimensionales, simples, entre otros) y así se obtienen los cambios de temperatura, lluvia, nivel del mar, entre otros. Estos son los valores que se emplean entonces, en los estudios de evaluación de impactos. Nótese que a medida que se recorren las diferentes etapas, las incertidumbres crecen. Además, ellas no están únicamente asociadas a lo que pasa con los modelos climáticos propiamente, sino a lo que sucede en los escenarios de emisiones o en la diversidad de métodos y modelos de impactos.

En este punto del documento, luego de haber descrito cómo utilizar los modelos en la proyección del clima, vienen a la mente preguntas que muchas personas hacen con frecuencia. Por ejemplo dos interrogantes muy relacionadas pueden ser:

- ¿Cuán diferentes son los modelos de pronóstico del tiempo y los modelos climáticos?
- Si no se puede predecir el tiempo del mes próximo, cómo se puede predecir el clima del próximo decenio



El tiempo y el clima están muy relacionados pero no son lo mismo. “El clima es lo que yo espero, mientras que el tiempo es lo que tenemos” (Mark Twain)

En primer lugar, las respuestas están estrechamente relacionadas con las definiciones de tiempo y clima. Ambos conceptos, aunque muy relacionados, son cosas diferentes. El tiempo se define como el estado atmosférico en un momento y lugar dados que puede variar de una hora a otra y de un día a otro. El clima, en cambio, se refiere generalmente a las estadísticas de las condiciones meteorológicas durante un decenio o un período

do más largo. Entonces lógicamente, los modelos de pronóstico deben producir información diferente a la de los modelos climáticos, sobre la base incluso, de condiciones iniciales que también son diferentes.

¿Lloverá o no mañana? es una pregunta que sólo pueden responder los modelos de pronóstico. Para esos modelos no interesa mucho la información sobre las variaciones de la temperatura del mar. Sucede que esas variaciones son tan lentas que llegan a ser mayores que las 24 horas (plazo del pronóstico). Así otras componentes que son “lentas” tampoco se consideran.

Es necesario aclarar que los modelos de pronóstico no pueden generar información muy fiable más allá de una semana. También, las más mínimas variaciones en las condiciones iniciales, suelen producir resultados muy diferentes en el pronóstico. Esto es conocido como “efecto mariposa”. Se invita al lector a buscar más información sobre este efecto que se relaciona con la naturaleza caótica de la atmósfera.

Los modelos de tiempo y clima son diferentes, aunque se basan en los mismos principios y formulaciones físicas. No se puede pedir la misma respuesta a ambos.

A diferencia de lo anterior, para los modelos climáticos las componentes lentas son imprescindibles, mientras que las “rápidas” resultan casi siempre despreciables. También se debe aclarar que para los modelos climáticos son más importantes las condiciones de contorno que las condiciones iniciales.

Un ejemplo gráfico que puede ayudar a ilustrar para qué están preparados o no los modelos climáticos, se puede apreciar en la Figura 6. En ella se muestra la marcha anual de los totales de precipitación en un lugar determinado para algunos años individuales, junto a la de la media de todos esos años.

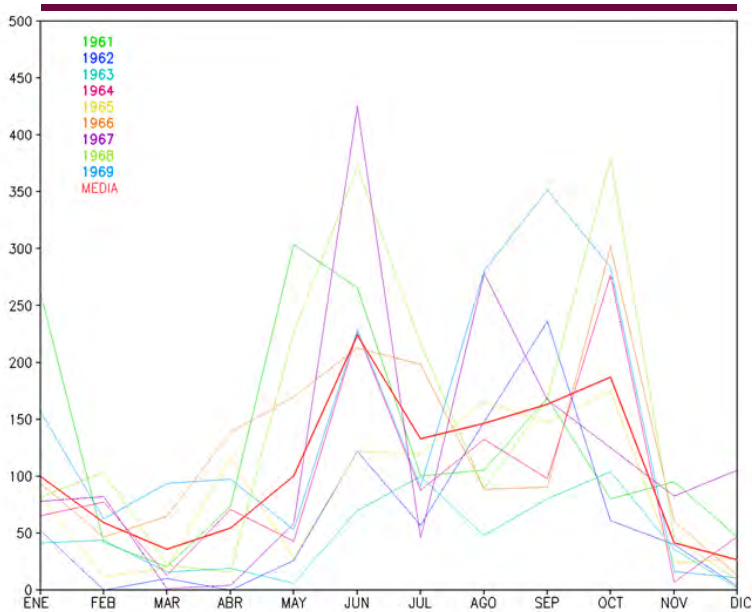


Figura 6. Comportamiento anual de los valores de precipitación (mm) para cada uno de los años referidos en la parte superior izquierda. La línea roja se corresponde con la media de todos los años (climatología).

En realidad, para lo que los modelos climáticos están preparados es para producir resultados plausibles sobre condiciones medias, como la que aparece en la línea roja más gruesa. Sin embargo, no están preparados para brindar información válida y útil de meses y años específicos como los mostrados en la figura anterior (nótese la variabilidad entre los diferentes años)⁹.

Un ejemplo menos académico quizá pueda ilustrar este asunto. Decimos que nuestra pregunta clave sería: ¿Cómo es posible que se pueda expresar cuál es la esperanza de vida de la población cubana y no se pueda decir lo mismo a nivel individual para cada habitante? Pensemos, la esperanza de vida

⁹ Obviamente producen la información, sólo que la misma no debe ser interpretada en términos específicos de años o meses individuales..

individual es el tiempo y no lo podemos predecir con tanta antelación. Sin embargo, la esperanza de vida de los cubanos se basa en la estadística con muestras grandes, como ocurre en el caso del clima; esa sí puede estimarse con cierta validez. Una última pregunta que a veces genera grandes dudas en aquellos que deben interpretar los resultados de los modelos climáticos y producir una nueva información para la toma de decisiones es: ¿Por qué existe incertidumbre en la estimación del clima futuro?

No esquivemos las incertidumbres. Incorporemos todos los elementos relacionados con ellas y hagamos más robustas las conclusiones y recomendaciones.

Recuérdese lo explicado cuando se habló de cómo se usan los modelos climáticos. Veremos que en las diferentes etapas hay aspectos que generan incertidumbres (ver cómo en la Figura 5 las barras de la cascada de incertidumbre aumentan). Desde que se inicia el proceso hay incertidumbres claras en los escenarios de emisiones/concentraciones. El desarrollo futuro de la humanidad es particularmente incierto y ello se trasmite a lo que ingresa en los modelos climáticos.

A pesar de lo anterior se debe reafirmar que en este texto solo se hará referencia a los elementos relacionados con los modelos climáticos en sí. Lo primero es que dos modelos pueden fácilmente producir resultados diferentes, pues suelen tener estructuras (por ejemplo rejillas) o esquemas de parametrizaciones que no son similares. Eso se resume, como que cada uno tiene configuraciones diferentes.

Resulta que esos modelos han sido desarrollados y validados de maneras independientes y cada uno es la mejor variante alcanzada. Por ello se utiliza lo que individualmente es mejor, pero que resulta diferente cuando se comparan entre sí. ¿Alguno es mejor que otro? Ya se comentó que es difícil responder con certeza a esta pregunta, pero por lo general no se puede decir cuál es mejor o peor.

Los modelos se basan en los mismos principios físicos válidos y por tanto, no hay debilidades conceptuales básicas. Existen procesos rigurosamente científicos donde esos modelos se intercomparan y donde los mismos deben mostrar niveles de habilidad determinados¹⁰. La idea de utilizar el mayor número posible de modelos para estimar el clima futuro, es porque se quiere reflejar la incertidumbre (existe y es inevitable), en lugar de esquivarla o pretender que no existe. Es una mala estrategia evitar o eliminar la incertidumbre cuando se informa a quienes toman las decisiones.

En este sentido, qué sucedería si informamos a los decisores utilizando los resultados de un solo modelo, al indicar que es el escenario más extremo. Se induciría, sin dudas, una decisión sesgada por la limitada o también sesgada información que se posee. En lugar de ello, se debería indicar que los modelos no coinciden en algunas estimaciones pero poseen similitud en otras. Hacer eso es la misión de los científicos y entenderlo es tarea de los decisores.

Ilústrese todo con una pregunta que puede servir de ejemplo. ¿Es apropiado decir que el incremento del nivel del mar para un país determinado en dos momentos futuros será de 65 mm y de 100 mm, respectivamente? En realidad no lo es. Se debería informar que esos pueden ser los valores promedios de muchas simulaciones e indicar al mismo tiempo, la amplitud o intervalo de las mismas. Eso permitiría indicar que si el intervalo es pequeño alrededor de ese promedio, quizás sea muestra de menor incertidumbre.

¹⁰ Hasta la fecha se han desarrollado 5 versiones de lo que se conoce como Programa de Intercomparación de Modelos Climáticos. El último conocido fue el CMIP5.

$$TS = \frac{S(1-\alpha)}{4} \left[\frac{A}{B} \right]$$

•• **Uso de los
modelos climáticos
en Cuba. Una expe-
riencia de trascen-
dencia nacional
y regional**

Uso de los modelos climáticos en Cuba. Una experiencia de trascendencia nacional y regional

Para hablar de las experiencias de la modelación climática en Cuba se tratarán de responder las siguientes preguntas:

- ¿Para qué se utilizan de forma sistemática los modelos climáticos en Cuba?
- ¿Cómo se ha avanzado en el uso de los modelos climáticos disponibles?

En el caso de la primera pregunta la respuesta más simple es:

- Para **informar** cómo será el clima de Cuba y en la región del Caribe en el futuro.
- Para que los datos de los modelos climáticos asimilados o considerados estén disponibles para estudios de evaluación de impactos.
- Para que los resultados de esos estudios sirvan para **informar** a los decisores.
- Para que esa **información** sea relevante y utilizada por todos los que hoy trazan las acciones a ejecutar dentro del Plan de Estado conocido como “Tarea Vida”.

- Para **informar** y contribuir potencialmente con el proceso de planificación de la economía cubana hacia el 2030.

Informar sobre el clima futuro de Cuba incluye llamar la atención de que el clima pudiera cambiar de forma diferente (en términos de magnitudes) en diversos lugares. Es **informar** que esas diferencias requieren respuestas o acciones que pudieran ser diferentes. Es **informar** para ayudar a guiar el proceso de planificación.

La ciencia de la modelación del cambio climático se ha desarrollado para informar. Su historia es bastante reciente, pero la magnitud e impacto de los resultados son significativos.

Responder la segunda pregunta motiva a hacer una historia que quizás sea interesante y que ha sido documentada con artículos publicados en revistas científicas internacionales. A continuación se narra brevemente la historia.

En el año 2003, un grupo de científicos de la región del Caribe se unió en torno a la idea de emplear los modelos climáticos en la región con vistas a informar. Fue así que nació el embrión de lo que hoy se ha consolidado como el Consorcio de Modelación Climática del Caribe (CMCC). En aquel entonces, el Centro de Cambio Climático de la Comunidad del Caribe, el Instituto de Meteorología de Cuba, los campos de Mona y Cave Hill de la Universidad de las Indias Occidentales, apoyados por el Programa de Naciones Unidas en un inicio, se reunieron en Cuba para asimilar el Modelo Climático Regional (MCR) PRECIS. Paralelamente, los científicos cubanos daban pasos sólidos para asimilar y utilizar otros MCR.

El nacimiento y progreso del CMCC permitió compartir éxitos en esta compleja actividad científica dentro de la región. Quizás lo más importante es que posibilitó tener más científicos trabajando de manera paralela y coordinada en diversas aristas de la modelación del clima en la región. El beneficio ha sido común

para todos, incluyendo aquellos países que no tienen presencia directa en el CMCC.

En todo ese progreso se han utilizado diferentes tipos de modelos en dependencia del grado de desarrollo que se ha alcanzado. En los inicios (años previos o cercanos al 2000), se usaron los modelos climáticos simples, los cuales sólo podían ofrecer información general, pero se utilizaban con recursos computacionales muy poco costosos (computadoras personales), que eran los disponibles entonces.

En momentos posteriores se inició la asimilación y empleo de los MCR utilizando, como es requisito, la información de entrada proveniente de los modelos climáticos globales (MCG). La participación de científicos de la región permitió compartir los recursos humanos y computacionales para hacer posible ese esfuerzo coordinado.

Los resultados iniciales permitieron documentar e informar sobre el clima futuro de la región a partir del MCR PRECIS "alimentado"¹¹ por los modelos climáticos globales ECHAM4 y HadAM3P. Así se lograba incrementar la resolución espacial de los resultados desde aproximadamente 150x150 km (de los MCG) a 50x50 km (del MCR).

Estos primeros resultados indicaban que el clima de la región del Caribe sería mucho más cálido, con una reducción notable de las precipitaciones en gran parte de la misma (Figura 7). Se puede apreciar, sin embargo, que no es un patrón generalizado y que existen países donde esa conclusión no es válida. A esto se refiere el valor añadido de los MCR, que permiten brindar mayores detalles que los MCG.

Estos resultados también permitieron ofrecer información relevante para el proceso de preparación de la Segunda Comunicación Nacional de Cuba y la misma se empleó en el estudio

¹¹ Recordar que la información de los MCG es pasada a los MCR por sus bordes. El MCG alimenta así al MCR.

de impactos del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba, preparada bajo la guía científica del Instituto de Meteorología. El Consorcio de modelación trabaja de manera sistemática para actualizar los resultados con nuevas salidas de modelos globales. Ahora, se ha producido una gran cantidad de información que se analiza y procesa.

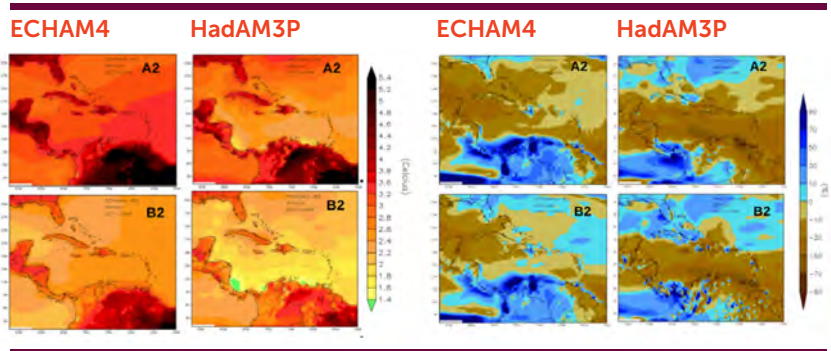


Figura 7. Distribución espacial de los cambios futuros de la temperatura en °C (bloque izquierdo) y de la precipitación en % (bloque derecho) para el período 2071-2099. A2 y B2 se refiere a los escenarios SRESA2 y SRESB2, respectivamente. **Fuente:** Centella A., A. Bezanilla y K. Leslie (2007): *A study of the uncertainty in future Caribbean climate using the PRECIS regional climate model. Technical Report of the Caribbean Community Climate Change Center, Belmopan, Belize.*

La Figura 8 se destaca como un ejemplo para ilustrar el tema de la incertidumbre. En la parte superior se aprecian las diferencias que pueden existir entre los diferentes modelos. Informar ese resultado así puede ser difícil, comprenderlo mucho más. Sin embargo, en la parte inferior los cambios de precipitación se calcularon a partir de la media de muchos modelos. Entonces, se adicionaron elementos de coincidencia y significación estadística. Así, se llegan a representar las áreas donde existe mayor/menor robustez (mayor/menor confianza) en los resultados (aquellas áreas donde existe mayor/menor coincidencia y significación estadística). Nótese que mientras se avanza hacia el futuro la robustez se incrementa en muchas zonas de la región.

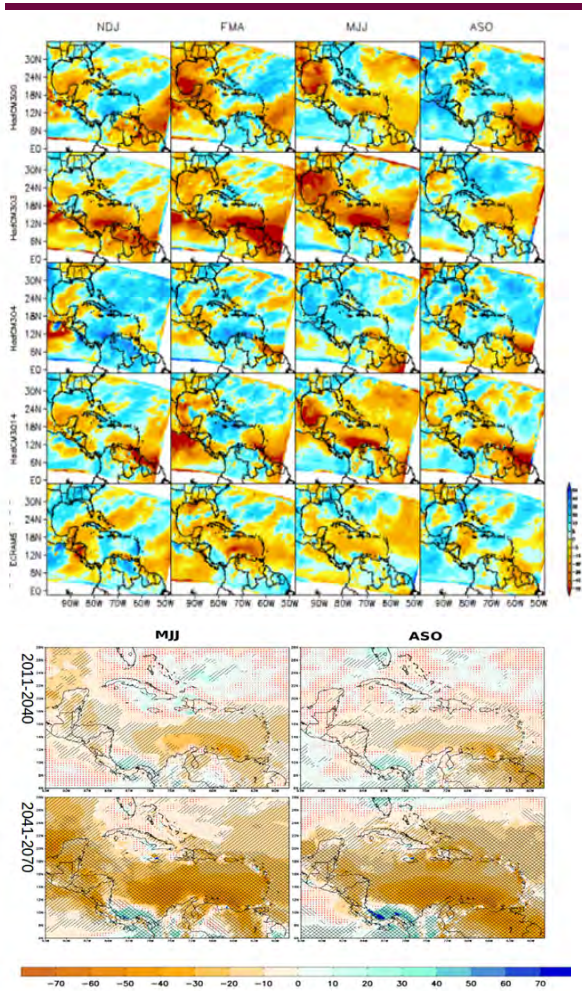


Figura 8. En la parte superior se muestran los cambios futuros de la precipitación en porcentaje por trimestres para el período 2041-2070. Se utilizó un grupo de nuevos modelos bajo el escenario SRESA1B. En la parte inferior aparece el cambio de la precipitación en porcentaje basado en la media de 11 modelos nuevos. Donde aparece / significa que el 60% de los modelos coincide en la dirección de la señal de cambio. Donde aparece \ se indica que los cambios son significativos estadísticamente. Se puede, entonces apreciar, dónde los cambios son robustos.

El impacto de la modelación del cambio climático en Cuba y la región del Caribe ha sobrepasado el interés puramente científico. Ha contribuido también a responder interrogantes de interés social y político.

Otros resultados vinculados con los esfuerzos que se realizan en el campo de la modelación del cambio climático se relacionan con la capacidad de la región para informar sobre las implicaciones que tiene el acuerdo de París. Recuérdese que ese Acuerdo trata de mantener el incremento de la temperatura media global (TMG) muy por debajo de 2,0°C respecto a los preindustriales y exhorta a hacer esfuerzos para que sea menos que 1,5°C.

Pues bien, científicos de la región realizaron una investigación donde se concluyó que:

- El valor de 1,5°C en el incremento de la TMG se alcanza tan temprano como a finales de los 2020s, mientras que 2,0°C sucede en la parte temprana de los 2050s;
- Mantener el valor de incremento de 1,5°C de la TMG es cuestión de necesidad. Los cambios serán más significativos mientras mayor sea el calentamiento. Si el cambio aumenta de 1,5°C a 2,0°C, entonces en el Caribe existirán incrementos significativos en la temperatura, en el número de períodos cálidos, en la cantidad de días secos y cálidos y en la sequía. Mientras tanto, se reducirán las precipitaciones y la cantidad de días con lluvias intensas;
- El límite de 1,5°C no está exento de desafíos. La región estaría en un estado climático arriesgado o en el reino de lo poco conocido. Si el calentamiento es superior, se puede llegar a estar en un ámbito de condiciones climáticas sin precedentes.

La región del Caribe ha otorgado especial atención a estas investigaciones dentro del proceso de negociación en el marco de la Convención de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. También ha tenido un impacto importante dentro de la comunidad científica y el IPCC. Así, en el informe especial que pre-

paró el IPCC sobre el 1,5°C, los resultados del Caribe son de los pocos estudios realizados y documentados en zonas de los pequeños estados insulares.

Existen muchas muestras de los avances que se han producido en el Caribe y Cuba en la modelación del cambio climático. También existen notables aportes en el terreno de la modelación del pronóstico del tiempo, no sólo de la atmósfera, sino del océano. Otros autores podrían imitar esta iniciativa de divulgación y documentar ese tema de igual complejidad. Se les invita a hacerlo.

$$S = \frac{S(1-\alpha)^4}{A/B}$$

- **A manera de Epílogo**

A manera de Epílogo

Se ha tratado de divulgar varios aspectos de un tema muy apasionante desde el punto de vista científico. Un tema bastante complicado para escribirlo con un lenguaje que esté al alcance de una mayoría de personas. Ojalá que los que lean este documento realicen muchas preguntas. Eso significaría que entendieron muchas cosas y tienen interés o preocupación por otras.

Para terminar se pueden resumir algunas ideas que parecen importantes e interesantes. Hay algunas que son preocupaciones desde el punto de vista científico y que es bueno compartirlas con los lectores. La primera idea es que al tema de la modelación no se le debe temer. Es complejo, pero puede llegar a comprenderse, al menos para emplear correctamente la información que los modelos producen. Tomar otra posición limitaría los resultados y los efectos de nuestros mensajes.

Otra idea se relaciona con el necesario aporte que los resultados pueden tener en diferentes acciones que se desarrollan en Cuba. Por mucho tiempo se escucha “estamos trabajando para identificar la forma de enfrentar el cambio climático”. Eso es lícito, correcto, necesario e importante. Se percibe que se reconoce el cambio climático, pero ¿Se toma en cuenta qué aspectos del cambio climático son los importantes y dónde lo son? Por ejemplo, si se va a identificar qué hacer para adaptarnos, debemos definir con precisión ¿Adaptarnos a qué?, ¿Adaptarnos dónde?, ¿Adaptarnos cuándo? Para todas esas preguntas los esfuerzos y resultados de la modelación que existen en Cuba pueden ser muy útiles.

La modelación del tiempo y el clima merecen un mayor apoyo para que su desarrollo continúe hacia adelante. Los recur-

Los recursos computacionales necesarios deben continuar mejorándose, la ciencia asociada a esta tarea debe seguir priorizándose y los recursos humanos necesarios deben continuar preparándose. Pensar que con lo que se ha avanzado y con lo que hoy se posee es suficiente, resulta una ilusión totalmente injustificada.

AGRADECIMIENTOS

En el proceso de preparación de este texto ha sido crucial el apoyo recibido del Proyecto “Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático”. También es preciso reconocer al Proyecto de Investigación “Soporte Unificado de Proyecciones para Estudios Regionales del Cambio Climático”, dado que muchos de los resultados y figuras empleados en el documento provienen del mismo. Ambos proyectos son dirigidos por el Instituto de Meteorología y se enmarcan dentro del Programa Nacional de Ciencia y Técnica “El cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación”.

Un agradecimiento especial a diferentes personas que tuvieron la amabilidad de revisar el texto y hacer comentarios para mejorar el mismo. En primer lugar, agradezco la exhaustiva revisión y las contribuciones del Dr. Tomás Gutiérrez Pérez. Agradezco al Dr. Orlando Rey Santos por sus comentarios sobre la utilidad que la proyección climática, tiene para el proceso de planificación del desarrollo cubano y por sus apreciaciones respetuosas a un tema científico que no le es cercano. Así mismo se ofrece un agradecimiento a los comentarios y sugerencias realizadas por Dr. Eduardo Planos Gutiérrez, Dr. Ramón Pérez Suárez, Lic. Alejandro Vichot Llano, Lic. Milena Alpizar Tirzo, y Dr. Roberto Acosta Moreno.

$$TS = \frac{S(1-\alpha)}{4} \left[\frac{A}{B} \right]$$

Notas

Notas

Notas



COLECCIÓN
**ENTENDIENDO
EL CAMBIO CLIMÁTICO**



Al servicio
de las personas
y las naciones

