

Modelos de Circulación General (MCGs)

La principal herramienta para la prospección del clima de las próximas décadas son los denominados Modelos de Predicción Numérica del Clima (MPNCs) o como se les conoce comúnmente, Modelos de circulación General (MCGs). Estos modelos (Gordon et al., 2000; Stendel et al., 2000) simulan flujos de energía, masa y cantidad de movimiento, mediante las ecuaciones primitivas de la dinámica, entre los puntos de una retícula tridimensional que se extiende por la Atmósfera y Océanos y las capas superiores de la Litosfera y Criosfera. Mediante la integración temporal de estos flujos, se obtienen evoluciones simuladas de los estados atmosféricos.

El sistema climático puede ser representado por modelos de distinto grado de complejidad, es decir, para cada componente o conjunto de componentes es posible identificar un espectro o jerarquía de modelos que difieren en aspectos como el número de dimensiones espaciales, el grado de representación explícita de los procesos físicos, químicos o biológicos, o el grado de utilización de ajustes empíricos.

Los modelos climáticos más modernos son los Earth System Models (ESM), que describen los procesos que tienen lugar dentro y entre la atmósfera, el océano, la criosfera y la biosfera marina y terrestre. Estas ecuaciones recogen los mecanismos físicos, químicos y biológicos que gobiernan a los elementos del sistema terrestre y también incluyen erupciones volcánicas y variaciones de la radiación solar entrante. Los ESM incluyen la representación del ciclo del carbono, permitiendo el cálculo interactivo de las emisiones atmosféricas de CO₂ o similares. También pueden incluir otros componentes, como la química de la atmósfera, las capas de hielo, la vegetación dinámica, el ciclo del nitrógeno, modelos urbanos o de cultivos, etc. El principal avance frente a los Modelos de Circulación General (MCG) utilizados anteriormente es que permiten la interacción del sistema con el ciclo del carbono y tienen en cuenta la bioquímica y la biogeología marina.

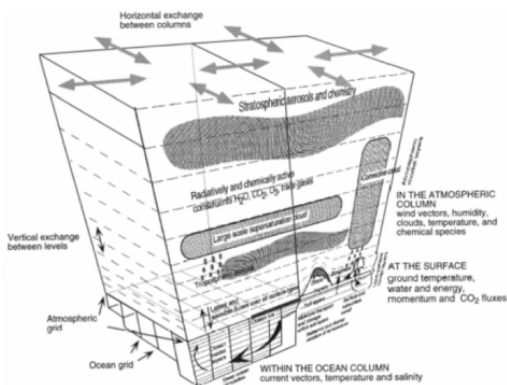


Imagen 1. Características y procesos principales que tienen lugar dentro de un MCG. Tanto la atmósfera como el océano son modelados como una interacción de columnas a lo largo de toda la superficie terrestre. Frecuentemente la rejilla atmosférica y oceánica difieren debido a que sufren distintos procesos y en distintas escalas de tiempo. (Fuente: K. McGuffie y A. Henderson-Sellers, 2001).

Hay distintos tipos de modelos, según las dimensiones en las que trabaje, se distinguen: modelos en 1D (balance de energía, modelos de radiación convectiva), en 2D (plano altura-latitud) y 3D (MCGs; atmósfera, océano, atmósfera-océano). Los MCGs más modernos incluyen capas en la baja y media estratosfera, ya que los recientes estudios demuestran su influencia en el sistema climático (Smagorinski, 1965; Manabe y Hunt, 1968), y se espera su inclusión en el próximo IPCC. Desde 1990 se está trabajando con modelos acoplados atmósfera-océano y son estos los incluidos en el cuarto informe del IPCC y con los que se está trabajando en la actualidad.

Los MCGs tienen tres características principales: resolución, formulación y configuración. Dado que los modelos se integran para periodos extensos de tiempo (desde semanas hasta cientos de años), es más importante que representen la circulación general de grandes áreas que los detalles puntuales del tiempo en zonas localizadas, por lo que una resolución de varios grados de latitud/longitud es suficiente. La formulación hace referencia a la resolución matemática de los modelos (rejilla o espectral). Por último, la configuración es la manera en la que se ejecuta un MCG: hay dos tipos de modelos, los atmosféricos y los acoplados (atmósfera-océano). Los primeros son modelos atmosféricos que representan la interacción con el océano mediante la introducción de datos fijos de la temperatura en la superficie del mar, mientras que en los segundos, un modelo oceánico se encarga de simular los cambios en la temperatura del mar pudiendo reaccionar a posibles cambios atmosféricos. Estos últimos son los más utilizados hoy en día.

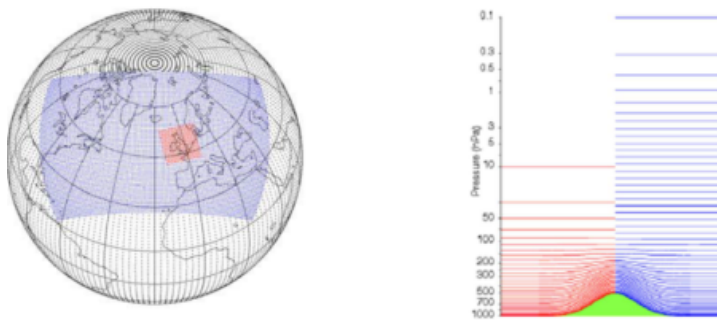


Imagen 2. Características y procesos principales que tienen lugar dentro de un MCG. Modelo de rejilla (izquierda) y resolución vertical (derecha) de un MCG. En el modelo de rejilla se representan tres ventanas diferentes: global, Atlántico Norte y las Islas Británicas. Estas ventanas se eligen en función del área a estudiar.

La resolución vertical nos indica cuantos niveles de presión utiliza el modelo y que altura cubren. En la gráfica se representan dos modelos, el rojo llega hasta los 10 hPa (estratosfera), mientras que el azul hasta los 0,1 hPa (mesosfera). Fuente: ECMWF.

Las características anteriores, son las que van a distinguir unos modelos de otros, especialmente su resolución, es decir, el tamaño de la rejilla en la que trabajan. Otra característica que los difiere es su resolución en la vertical y que informa de los niveles de presión.

Los MCGs más avanzados inician sus simulaciones en los comienzos del siglo XIX con los forzamientos radiactivos de la era preindustrial. Durante la integración temporal se van modificando dichos forzamientos en concordancia con los registros o estimaciones de las concentraciones históricas de gases invernaderos y aerosoles, cuando la integración alcanza el momento actual y se interna en el futuro, las concentraciones de dichos agentes se estiman en función de las previsiones de la actividad humana: son los escenarios de cambio climático (Nakicenovic & Swart, 2000).

Los MCGs muestran una capacidad notable para reproducir las principales características de la circulación atmosférica general, como “células de Hadley”, cinturones extratropicales de borrascas, etc. (Stendel et al., 2000). El problema surge cuando se chequean los resultados a escala más pequeña (es decir, se seleccionan unos pocos puntos de la rejilla de trabajo) donde las variables, especialmente en superficie, no se aproximan a los valores observados en realidad.

Estas limitaciones se pueden explicar por varias razones, en general relacionadas con la insuficiente resolución espacial de los modelos (Von Storch, 1994) que a día de hoy es de unos 2º-3º de latitud/longitud. Esta resolución pasa por alto:

- La topografía (cordilleras, líneas de costa, etc.) es descrita con poco detalle lo que hace que algunos forzamientos relacionados con la misma y de extraordinaria importancia a nivel local, sean omitidos y no tenidos en cuenta por el modelo.

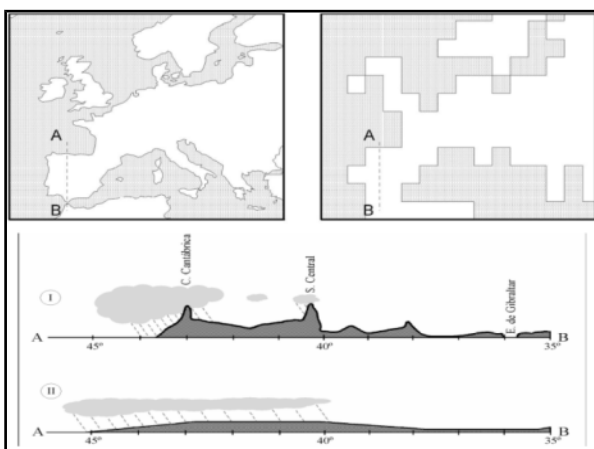


Imagen 3. Superior: Distribución tierra-mar (izquierda) en la realidad y simulada por un MCG (derecha). La línea AB señala el segmento de estudio en la figura inferior. Inferior: Situación real de la precipitación (arriba) y situación simulada por el MCG (abajo). Se observa que la precipitación no es simulada de forma correcta debido a la omisión por parte del modelo de la orografía.

- Algunos de los procesos a escala “subgrid” están basados en parámetros que son ajustados de manera estadística en todo el planeta pudiendo ser ineficientes en regiones concretas.
- El conjunto de parámetros que definen el flujo de energía desde las escalas sinópticas (106 km²) a las “subgrid” afecta a la fiabilidad de las menores escalas resueltas.

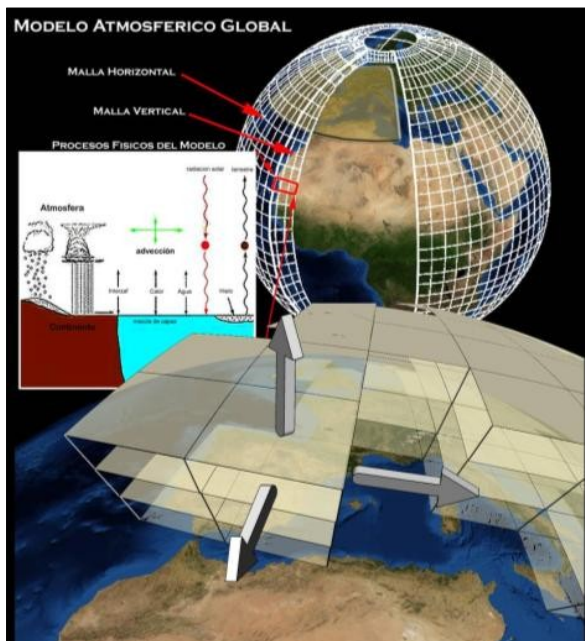


Imagen 4. Esquema del Modelo Atmosférico global usado para los MCGs.

En la imagen 3 se puede ver la limitación referente a la parametrización y la topografía, respectivamente. El uso de parametrizaciones da lugar a que ciertos fenómenos, que son de gran importancia a nivel local, sean omitidos por los modelos sin tenerse en cuenta su influencia en el clima de la región.

Los MCGs no simulan correctamente la topografía española, el estrecho de Gibraltar y los sistemas montañosos desaparecen, lo que provoca que la distribución espacial de las precipitaciones se simule de forma incorrecta.

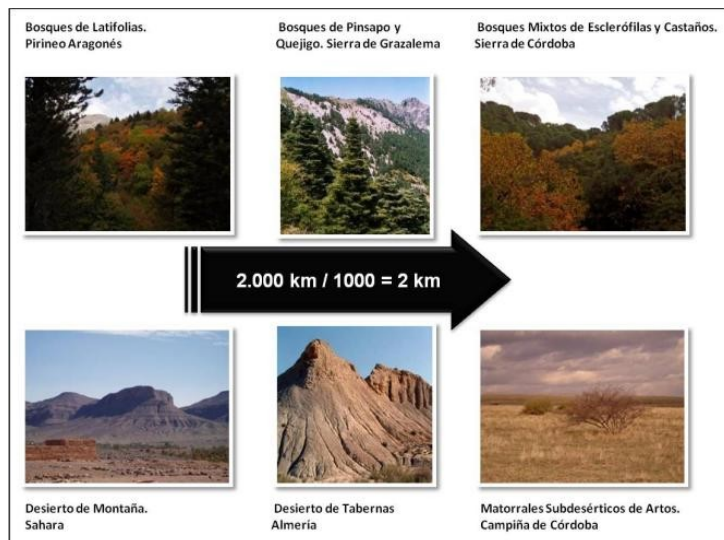


Imagen 5. Importancia de la escala en Andalucía. A menos de 200 kilómetros coexisten ecosistemas asociados a climas muy diferentes.

Como la cobertura de los modelos es a nivel global se necesita información de todo el planeta. Debido a que la cobertura de observaciones es muy desigual entre unas zonas y otras, la fiabilidad del modelo va a depender de la región en la que se esté trabajando. En la mayor parte de los estudios de evaluación de impactos (Beersma et al., 2000; Cramer et al., 2000) es necesaria la presencia de escenarios climáticos con resolución local de variables cercanas a la superficie terrestre (temperatura a 2 m., precipitación, etc.).

Surge, por tanto, la necesidad de adaptar la información más fiable proporcionada por los MCGs (baja resolución espacial) a la información requerida por los modelos de impacto (mayor resolución espacial-local en superficie). Este proceso se conoce como “downscaling”.

Por otro lado, los MC se corren bajo diferentes hipótesis de la concentración futura de Gases de Efecto Invernadero (GEI), como descripciones plausibles de cómo será la evolución futura de factores socioeconómicos, tecnológicos, energéticos, de uso del suelo, de emisiones de GEI y contaminantes, etc.,

basadas en un conjunto coherente de hipótesis sobre las fuerzas que las determinan (por ejemplo, el desarrollo demográfico y socioeconómico y la evolución tecnológica) y las principales relaciones entre ellas. Las diferentes hipótesis con las que se ejecutan los MCGs corresponden a los escenarios de emisiones GEI.

Los escenarios o proyecciones climáticas generados por los modelos son representaciones plausibles, más o menos simplificadas, del clima futuro, basadas en un conjunto internamente coherente de relaciones climáticas definidas explícitamente para investigar las posibles consecuencias del cambio climático antropogénico, y que pueden introducirse como entrada en los modelos de impacto.

Los esfuerzos para coordinar todos los asuntos relacionados con el cambio climático son responsabilidad del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). El IPCC es el organismo intergubernamental de las Naciones Unidas que se encarga de elaborar informes que abarquen "información científica, técnica y socioeconómica pertinente para comprender la base científica del riesgo del cambio climático inducido por el hombre, sus posibles repercusiones y las opciones de adaptación y mitigación". Estos informes contribuyen al trabajo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), el principal tratado internacional sobre el cambio climático. Su objetivo es "estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas (inducidas por el hombre) peligrosas en el sistema climático".

El IPCC es una autoridad internacionalmente aceptada en materia de cambio climático y elabora informes que cuentan con el acuerdo de los principales científicos del clima y el consenso de los gobiernos participantes. El IPCC publica periódicamente informes que recogen todos los avances y estudios desarrollados por la comunidad científica y los expertos multisectoriales en materia de Cambio Climático. Actualmente se están evaluando los informes correspondientes al sexto informe del IPCC y se espera que se publiquen en breve. Anteriormente, las conclusiones del Quinto Informe de Evaluación del IPCC se presentaron a finales de 2014.

Paralelamente al IPCC, el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP) es un marco de colaboración diseñado para mejorar el conocimiento del cambio climático. Fue creado en 1995 por el Grupo de Trabajo sobre Modelización Acoplada (WGCM) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC). El CMIP ha permitido comprender mejor el cambio y la variabilidad del clima en el pasado, el presente y el futuro en un marco multimodelo, y define también protocolos de experimentación, forzamientos y resultados comunes. Se desarrolla en fases para fomentar la mejora de los modelos climáticos, pero también para apoyar las evaluaciones nacionales e internacionales del cambio climático. A lo largo de las diferentes fases por las que ha pasado este proyecto, se han introducido mejoras en la calidad de los modelos climáticos hasta llegar a los actuales ESM. Asimismo, se han definido nuevos escenarios de emisión en cada una de las fases, ajustándose a las nuevas necesidades de adaptación y mitigación ante el cambio climático.

Las simulaciones de los modelos del CMIP también han sido evaluadas periódicamente como parte de los Informes de Evaluación del Clima del IPCC y de diversas evaluaciones nacionales. Actualmente está en marcha la sexta fase del CMIP (CMIP6), siendo los modelos pertenecientes a esta los más actualizados hasta la fecha.

Modelos Climáticos pertenecientes al CMIP6

Se ha trabajado con la salida de 10 Modelos Climáticos globales pertenecientes al CMIP6. Para todos los modelos se cuenta con un escenario de control (Historical) y, cuatro escenarios de emisiones (como recomienda el CMIP6 como Tier 1): SSP1 2.6, SSP2 4.5, SSP3 7.0 y SSP5 8.5. En total, se han generado 40 proyecciones de clima futuro. La descarga de los modelos se realiza de forma gratuita a través de los archivos suministrados por el Programa de Diagnóstico e Intercomparación de Modelos Climáticos (PCMDI).

Modelo de Circulación General BCC-CSM2-MR

Resolución: 1.125°x1.121°

Centro responsable: Beijing Climate Center (BCC), China Meteorological Administration, China Wu, T. et al. (2019).

Resumen: BCC-CSM2-MR es una versión de alta resolución del Modelo del Sistema Climático del Centro Climático de Beijing (BCC) (T266 en la atmósfera y 0.5° latitud x 0.5° longitud en el océano). Su desarrollo se basa en

la versión de media resolución BCC-CSM2-MR (T106 en la atmósfera y $1^\circ\text{latitud} \times 1^\circ\text{longitud}$ en el océano), que es la línea de base para la participación de BCC en la Fase 6 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6). Este estudio documenta el modelo de alta resolución y destaca importantes mejoras en la representación del núcleo dinámico atmosférico y los procesos físicos. BCC-CSM2-HR se evalúa para simulaciones climáticas históricas de 1950 a 2014, realizadas bajo el forzamiento histórico prescrito por CMIP6, en comparación con su versión anterior de resolución media BCC-CSM2-MR. Las tendencias de calentamiento global observadas de la temperatura del aire en la superficie desde 1950 hasta 2014 están bien capturadas tanto por BCC-CSM2-MR como por BCC-CSM2-HR. Los estados medios atmosféricos básicos actuales durante el período de 1995 a 2014 se evalúan luego a escala global, seguidos de una evaluación de las variabilidades climáticas en los trópicos, incluidos los ciclones tropicales (CT), El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), la Oscilación de Madden-Julian (MJO) y la oscilación cuasi bienal (QBO) en la estratosfera. Se muestra que BCC-CSM2-HR representa bien el balance energético global y puede reproducir de manera realista los principales patrones de temperatura atmosférica y viento, precipitación, temperatura del aire en la superficie terrestre y temperatura de la superficie del mar (TSM). También mejora los patrones espaciales del hielo marino y las variaciones estacionales asociadas en ambos hemisferios. El sesgo de la doble zona de convergencia intertropical (ZCIT), evidente en BCC-CSM2-MR, casi desaparece en BCC-CSM2-HR. La actividad de TC en los trópicos aumenta con una resolución mejorada. El ciclo de ENSO, la característica de propagación hacia el este y la intensidad de convección de MJO, y la propagación hacia abajo de QBO en BCC-CSM2-HR concuerdan mejor con las observaciones que sus contrapartes en BCC-CSM2-MR. Sin embargo, se observan algunas imperfecciones en BCC-CSM2-HR, como la nubosidad excesiva en la cuenca oriental del Pacífico tropical con sesgos de TSM fría y el número insuficiente de ciclones tropicales en el Atlántico Norte.

Referencia: Wu T., Lu Y., Fang Y., Xin X., Li L., Li W., Jie W., Zhang J., Liu Y., Zhang L., Zhang F., Zhang Y., Wu F., Li J., Chu M., Wang Z., Shi X., Liu X., Wei M., Huang A., Zhang Y. and Liu, X. (2019). The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): the main progress from CMIP5 to CMIP6 , *Geosci. Model Dev.* 12, 1573–1600. DOI:10.5194/gmd-12-1573-2019, 2019.