

LA VARIABILIDAD DE LA CIRCULACIÓN MERIDIANA DEL OCÉANO ATLÁNTICO EN SIMULACIONES DEL ÚLTIMO MILENIO CON EL MODELO CLIMÁTICO DE CIRCULACIÓN GENERAL ECHO-G

Pablo Ortega⁽¹⁾, J. Fidel González-Rouco⁽¹⁾, Marisa Montoya⁽¹⁾

⁽¹⁾ Dpt. de Astrofísica y ciencias de la atmósfera. Universidad Complutense de Madrid
(portegam@fis.ucm.es, fidelgr@fis.ucm.es, marisa.montoya@fis.ucm.es)

Resumen

En este trabajo se analiza la variabilidad de la AMOC a partir de varias simulaciones realizadas con el Modelo ECHO-G: una simulación de control de mil años (CTRL), dos simulaciones forzadas del último milenio (FOR1 y FOR2) y dos simulaciones forzadas de los escenarios de futuro A2 y B2.

1.- Introducción

La circulación meridiana del Océano Atlántico (AMOC, del inglés “Atlantic Meridional Overturning Circulation”) transporta una gran cantidad de energía desde el Ecuador hacia latitudes altas del Hemisferio Norte, y de esta forma contribuye a la variabilidad climática en el Atlántico Norte.

De hecho, numerosos trabajos científicos respaldan el papel fundamental que ha jugado la AMOC en la variabilidad climática de los últimos 120.000 años, principalmente durante el último periodo glacial (Bond *et al.*, 1992; Rahmstorf 2002). Con el comienzo del Holoceno, las excursiones climáticas decrecen en magnitud, y la influencia de la AMOC en el clima es menos clara.

La comparación de 5 transectos hidrográficos en la cuenca Atlántica (Bryden *et al.*, 2005) y el comienzo de la monitorización continua de la intensidad de la AMOC desde marzo de 2004 (Cunningham *et al.*, 2007), todos ellos realizados a 26.5°N, ha reactivado el interés en la caracterización de la variabilidad a corto plazo de la AMOC, dada su relevancia para la identificación de posibles tendencias. Sin embargo, estas observaciones son demasiado recientes para poder identificar cambios en la circulación, y en este contexto el uso de modelos climáticos se hace imprescindible.

Este trabajo se centra en la descripción y reconstrucción de la variabilidad de la AMOC durante el último milenio, y en dos simulaciones de

escenarios de futuro. También se analizan los factores que influyen en la variabilidad de la circulación en las distintas escalas de tiempo.

2.- Modelo y simulaciones

El modelo ECHO-G, utilizado para realizar las simulaciones, es un Modelo de Circulación General con Atmósfera y Océano acoplados, que consta de la componente atmosférica ECHAM4, con una resolución horizontal T30 (3.75° x 3.75°) y 19 niveles en la vertical; y de la componente oceánica HOPE-G, con una resolución T42 (c.a. 2.8° x 2.8°) que se mejora latitudinalmente en latitudes tropicales, y 20 niveles de profundidad.

Cinco simulaciones se han utilizado en este trabajo: una simulación de control (CTRL) de mil años en la que los factores de forzamiento externo se toman del clima actual y se mantienen constantes; dos simulaciones del último milenio (FOR1 y FOR2); y dos simulaciones de futuro (A2 y B2) que parten de FOR1. Para las simulaciones del último milenio se han empleado tres factores de forzamiento externo: la variabilidad de la irradiancia solar, el efecto radiativo de los aerosoles volcánicos, y las concentraciones de gases de efecto invernadero (Figura 1), que corresponden a reconstrucciones recogidas por Crowley (2000). En las simulaciones de futuro se fija la irradiancia solar neta y se toman las concentraciones de gases de invernadero de los escenarios de futuro A2 y B2, tomados del informe especial IPCC sobre escenarios de emisiones (Houghton *et al.*, 2001).

3.- Climatología y evolución de la AMOC

La AMOC se suele representar mediante la función de corriente, que describe de una manera sencilla las principales características de las células de circulación. En la Figura 2 se muestran los promedios a largo plazo de la función de corriente en nuestras 5 simulaciones.

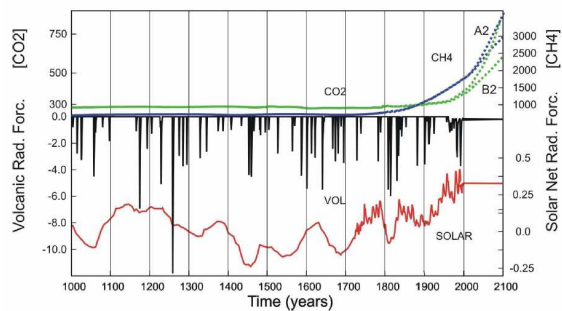


Fig 1.- Datos del Forzamiento utilizado en las simulaciones. Las concentraciones de gases de efecto invernadero están expresadas en p.p.b (partículas por billón). El forzamiento de carácter radiativo está expresado en W/m^2

Todos los experimentos milenarios (CTRL, FOR1 y FOR2) muestran una circulación realista, con valores máximos próximos a los 15 ± 2 Sv estimados por Ganachaud & Wunsch (2000). Se observa que la simulación de control se caracteriza por una célula con circulación más somera y de menor intensidad que las dos forzadas. Éstas muestran patrones parecidos, con una circulación que en ambos casos llega a las capas más bajas del Atlántico Norte, aunque en general se observa que FOR1 toma valores ligeramente más altos que FOR2. En el caso de las simulaciones de futuro la circulación experimenta un debilitamiento generalizado, más evidente en las capas más profundas del océano.

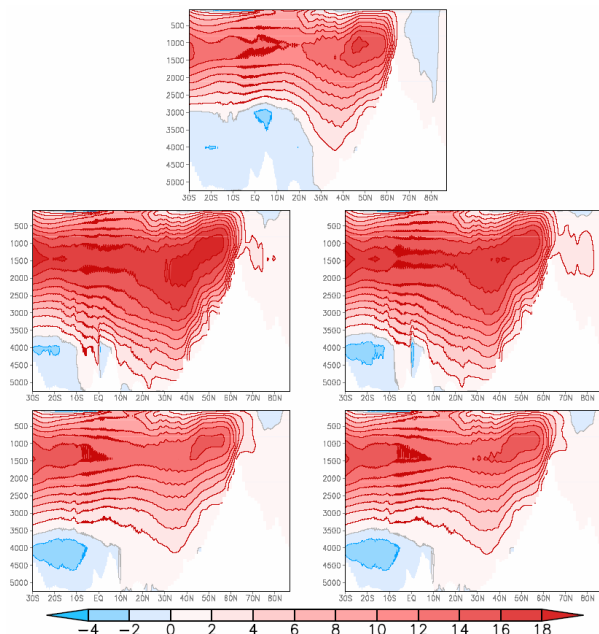


Fig. 2.- Mapas promedio de la función de corriente (en Sv) Atlántica para: CTRL (arriba), FOR1 (centro izquierda), FOR2 (centro derecha), A2 (abajo izquierda) y B2 (abajo derecha). El intervalo de contorno es de 2 Sv.

Una vez descritos los principales cambios espaciales se procede al análisis de su variabilidad temporal.

Para ello se utiliza el índice MOI, calculado como el valor máximo que toma la función de corriente en el Atlántico Norte (Delworth et al., 1993). En la Figura 3 se muestra su evolución para las 5 simulaciones. De nuevo se ve que en CTRL la intensidad de la AMOC toma en promedio valores más bajos que en los dos casos forzados, aunque también se observa que su rango de variabilidad es mayor en la simulación no forzada. Respecto a las simulaciones del último milenio, ambas muestran un debilitamiento de la circulación durante el periodo industrial, que se hace más pronunciado al continuar en los escenarios de futuro. En todo caso, ninguno de los escenarios muestra un colapso completo de la circulación.

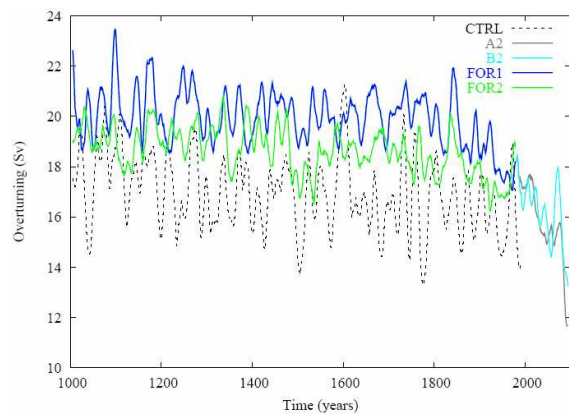


Fig. 3.- Serie del máximo de la AMOC (en Sv) para las simulaciones de CTRL (línea negra discontinua), FOR1 (línea azul oscura), FOR2 (línea verde), A2 (línea gris) y B2 (línea azul clara). Las series han sido suavizadas con un filtro pasobaja de 11 términos para una mejor visualización.

Mediante el análisis de Fourier y el análisis Wavelet se estudia el espectro del máximo de la circulación en las tres simulaciones de mil años (Figura 4) y se observa que el comportamiento de la AMOC se ajusta bien al espectro de un ruido rojo, con variabilidad significativamente mayor a escalas interanual y multidecadal. El origen de esa variabilidad es radicalmente distinto en ambas escalas de tiempo, como se verá en el siguiente apartado.

4.- Mecanismos que controlan la variabilidad de la AMOC.

4.1 Alta frecuencia

La variabilidad de la circulación Atlántica en alta frecuencia está dominada por la dinámica atmosférica, que fuerza al océano a través de cambios en los regímenes de viento superficiales. Para poder localizar las diferentes características locales en la variabilidad a corto plazo de la AMOC

la definición del índice como máximo es insuficiente. Es necesario introducir nuevos índices de carácter local que representen las diversas regiones del Atlántico Norte. Las cuatro definiciones recogidas en la Tabla 1 clasifican los posibles índices atendiendo a su relación con el forzamiento atmosférico (Figura 5).

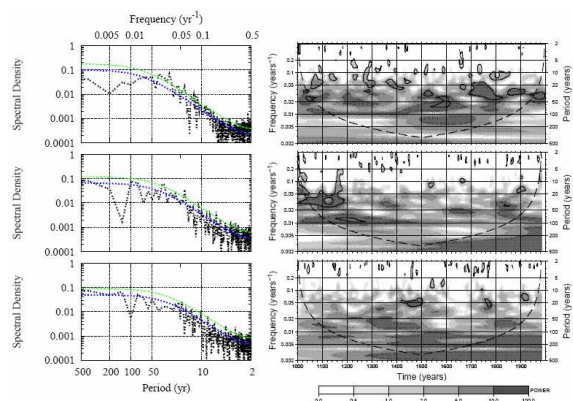


Fig. 4.- A la izquierda: Espectro de Fourier del máximo de la AMOC en las simulaciones CTRL (arriba), FOR1 (en medio) y FOR2 (abajo). La línea azul discontinua describe un ruido rojo con el mismo coeficiente autorregresivo de primer orden que la serie del máximo, y la línea verde marca su intervalo de confianza al 90%. A la derecha: Espectro wavelet de las mismas series. Las líneas gruesas delimitan las regiones con varianza que excede el intervalo de confianza al 95 % del proceso autorregresivo. La curva discontinua marca las regiones donde los efectos de borde son importantes.

	Latitud (° N)	Profundidad (m)
MOI-loc1	55.8	1050
MOI-loc2	41.8	1450
MOI-loc3	33.5	2100
MOI-loc4	13.0	1450

Tabla 1: Índices locales de la AMOC

Los índices MOI-loc1 y MOI-loc3 están asociados a una estructura de presiones tipo NAO, aunque de signo contrario en ambos casos, reflejando que la influencia de la NAO sobre la circulación es diferente en las altas y las bajas latitudes de la banda subtropical. El índice MOI-loc2, representativo de latitudes subtropicales intermedias, está relacionado con una estructura de carácter más local. Finalmente, el índice MOI-loc4, que es el único definido en latitudes tropicales, tiene asociado un patrón de presiones de carácter global, muy parecido al patrón relacionado con el fenómeno ENSO. Todos los resultados de alta frecuencia son comunes en las tres simulaciones de mil años, indicando que en estas escalas de tiempo los factores de forzamiento considerados no introducen cambios en la circulación.

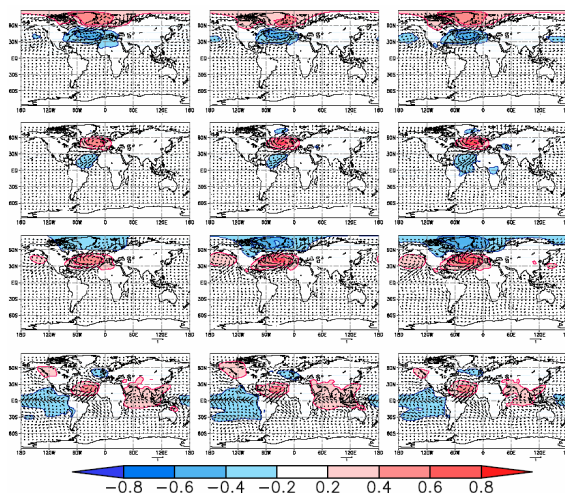


Fig. 5.- Mapas de correlación de los índices locales de la circulación con las anomalías de la presión a nivel del mar (contornos) y del esfuerzo del viento (vectores). Los índices se han ordenado de arriba abajo: MOI-loc1, MOI-loc2, MOI-loc3 y MOI-loc4. Las simulaciones se han ordenado de izquierda a derecha: CTRL, FOR1 y FOR2. Todos los datos han sido filtrados en pasoalta para periodos menores a 11 años.

4.2 Baja frecuencia

En el caso de la baja frecuencia, la variabilidad de la AMOC tiene un origen oceánico, y está forzada por la formación de anomalías de densidad en el Atlántico Norte. La variabilidad de baja frecuencia es común en casi toda la cuenca, y por tanto se estudia de nuevo a partir del máximo de la función de corriente. Para identificar los modos de la circulación, y evitar correlaciones incorrectas por el efecto de las tendencias finales comunes, filtramos la alta y la muy baja frecuencia, quedándonos con los periodos en la banda de frecuencias de 11 a 400 años.

En la Figura 6 se identifican dos modos diferentes de la AMOC, ambos de carácter oscilatorio y con influencia en toda la cuenca Atlántica, uno para la simulación de CTRL y otro para las forzadas. Sin embargo, muchas de las etapas identificadas son comunes a las tres simulaciones, sugiriendo que en este caso el forzamiento externo no excita nuevos modos de variabilidad, sino que modifica los ya observados en la simulación de control.

Las principales diferencias entre las simulaciones forzadas se han localizado para la variabilidad de muy baja frecuencia (no mostradas), donde se recogen las tendencias a largo plazo. Este resultado es lógico dado que ambas simulaciones parten de estados iniciales muy diferentes, y en los primeros siglos, en los que las simulaciones no han alcanzado todavía un estado próximo al equilibrio, van a presentar tendencias de naturaleza también diferente.

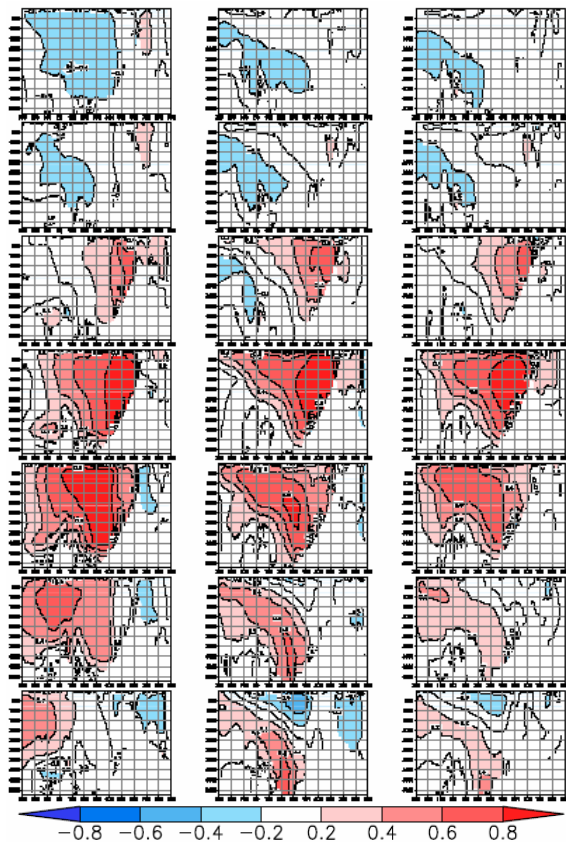


Fig. 6.- Lag-correlaciones del máximo de la AMOC con las anomalías de la función de corriente en las tres simulaciones de mil años, ordenadas de izquierda a derecha: CTRL, FOR1 y FOR2. Los diferentes lags aplicados están ordenados de arriba abajo: -12, -8, -4, 0, 4, 8 y 12 años. Para lags negativos $-x$, el mapa representa el estado de la AMOC x de años antes de un máximo temporal de la circulación.

Resumen y conclusiones

Hemos analizado la variabilidad forzada y no forzada de la AMOC a partir de dos simulaciones del último milenio, dos simulaciones de escenarios de futuro y una simulación de control de mil años, realizadas con el modelo de circulación general con atmósfera y océano acoplados ECHO-G.

Se observa que todas las simulaciones describen una circulación realista al compararla con las estimaciones. Durante el periodo industrial la intensidad de la AMOC comienza a debilitarse, y éste debilitamiento se acentúa durante los escenarios de futuro, aunque sin llegar a producirse un colapso de la circulación.

La variabilidad de la AMOC en alta frecuencia es común a las tres simulaciones de mil años, y tiene un origen atmosférico, que produce señales de carácter local que dependen principalmente de la latitud.

En la baja frecuencia, los modos de variabilidad de la AMOC son principalmente oceánicos, y tienen un carácter oscilatorio. En este caso ya se observan diferencias entre la simulación de control y las del último milenio, que sugieren que el forzamiento externo está modificando los modos de variabilidad natural.

Para realizar un análisis en mayor profundidad sería necesario incluir en el estudio el uso de técnicas estadísticas como el Análisis de Componentes Principales, y el Análisis de Correlación Canónica. Esta tarea será abordada en futuros trabajos.

Referencias:

Bryden, H. L.; Longworth, H. R. y Cunningham, S. A. : Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25° N. *Nature*, 438: 655–657, 2005

Crowley, T. J.: Causes of climate change over the past 1000 years. *Science*, 289: 270–277, 2000

Cunningham, S. A.; Kanzow, T.; Rayner, D.; Baringer, M. O.; Johns, W. E.; Marotzke, J.; Longworth, H. R.; Grant, E. M.; Hirschi, J. J. M.; Beal, L. M.; Meinen, C. S. y Bryden, H. L.: Temporal variability of the atlantic meridional overturning circulation at 26.5°N. *Science*, 317: 935–938, 2007

Delworth, T. L., Manabe, S. y Stouffer, R.J.: Interdecadal variations of the Thermohaline Circulation in a coupled ocean-atmosphere model. *Journal of Climate*, 6, 1993-2011, 1993

Ganachaud, A y Wunsch, C.: Improved estimates of global ocean circulation, heat transport and mixing from hydrographic data. *Nature*, 408: 453–457, 2000

Houghton, J.; Ding, Y.; Griggs, D. J.; Noguera, M.; van der Linden, P. J.; Dai, X.; Maskell, K. y Johnson, C. A.: Climate Change, 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2001

Rahmstorf, S.: Ocean circulation and climate during the past 120,000 years, *Nature*, 419: 207-214, 2002.