

SIMULACIÓN DE LA PEQUEÑA EDAD DE HIELO USANDO EL MODELO EdGCM

Reinaldo A. Maenza⁽¹⁾, Rosa H. Compagnucci^{(1) (2)}

⁽¹⁾Universidad de Buenos Aires, Facultad de ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, 2do. Piso, Pabellón II, Ciudad Universitaria
CPC1428EHA – Ciudad de Buenos Aires, Argentina.

⁽²⁾CONICET, Avenida Rivadavia 1917 - CP C1033AAJ - Ciudad de Buenos Aires, Argentina.
reynalm16@hotmail.com

RESUMEN

La Pequeña Edad de Hielo fue un período frío que abarcó desde mediados del siglo XIV hasta mediados del siglo XIX. Durante ese tiempo ocurrieron tres pulsos de temperaturas extremadamente bajas. En el presente trabajo se analiza el segundo de ellos denominado Mínimo de Maunder (MM) que ocurrió entre 1645 y 1715. La disminución de la actividad solar, el aumento de la actividad volcánica y el cambio en las concentraciones de Dióxido de Carbono fueron sus principales forzantes. Mediante el Modelo de Circulación General EdGCM se realizan distintas simulaciones de las condiciones climáticas, con el fin de obtener escenarios de respuesta de la temperatura y la circulación atmosférica a los cambios producidos en la irradiancia y los gases invernadero, en especial del CO₂. A su vez, son calculadas por medio de los re-análisis del NCEP/NCAR, las diferencias climáticas entre años de máxima y mínima irradiancia a fin de compararlas con las diferencias ocurridas entre las condiciones actuales y del MM dadas por el modelo. Las anomalías anuales de temperatura, entre el MM y las condiciones de fines del siglo XX, son negativas para ambos hemisferios y las anomalías de temperatura resultan más intensas para el semestre frío. Además, sobre Sudamérica, se observa un centro más intenso en latitudes subtropicales y desde el centro hasta el sur de Patagonia. El patrón de enfriamiento simulado por el modelo concuerda, en algunos casos aún en magnitud, con la información de proxy datos de algunas regiones de Sudamérica. La componente zonal del oeste se muestra desplazada hacia menores latitudes durante el MM. Los campos de anomalías de circulación atmosférica simulados para el MM, muestran un patrón, en latitudes medias y altas, en que alternan tres ó cuatro centros positivos con negativos, el cual concuerda con una mayor componente meridional del flujo. Ambos resultan patrones parecidos con los que ocurren actualmente durante eventos El Niño. **Palabras claves:** Mínimo de Maunder, Paleoclima, Simulaciones con modelo EdGCM, Irradiancia, Dióxido de Carbono.

ABSTRACT

The Little Ice Age (LIA) was a cold period that ranged from taken part of the century XIV until taken part of the century XIX. In the period occurred three pulses of minimum values of temperature and will study the second of them comprised between 1645-1715 designated Maunder Minimum (MM). The decrease of the solar activity, the increase of the volcanic activity and the change in the Carbon Dioxide concentrations were the main forcings during these periods. In present work we realize distinct simulations of the climatic conditions for the South Hemisphere, by means of the General Circulation Model EdGCM, with the end to obtain stages of answer to the changes of irradiancia and CO₂ for the MM. At the same time, the climatic differences between years of maxima and minimum values of sunshine during the century XX determined by means of the results of the re-analysis of the NCEP/NCAR, compare with the differences between the current conditions and the ones of the MM, simulated by the model. The anomalies between the XX century and the MM obtained with the EdGCM are in agree qualitatively, and also quantitatively in some locations, with the proxy data

information for various regions of the Hemisphere South. The annual temperature anomalies, between the MM and the 20th century ending conditions, are negative for both hemispheres and the temperature anomalies result more intense on semester November-April. Furthermore, over South America, shows a more intense centre in subtropical latitude and central and south Patagonia. The cold pattern obtained by the model is in agreement, on magnitude too, with proxy information obtained in some South America regions. The westerly wind component undergoes a shift to lower latitudes during the MM. The atmospheric circulation anomalies obtained in the simulations, show a pattern, over middle and high latitudes, where alternate three or four positive and negative anomaly centres, which is in agreement with a greater meridional component of the flux. Both patterns are similar to those present during El Niño events.

Keywords: Maunder Minimum, Paleoclimate, EdGCM model simulations, Irradiance, Carbon Dioxide.

INTRODUCCIÓN

La Pequeña Edad de Hielo fue un período frío que abarcó desde mediados del siglo XIV hasta mediados del siglo XIX. En el mismo ocurrieron tres pulsos de valores mínimos. El segundo de ellos comprendido entre 1645-1715 denominado Mínimo de Maunder (MM) fue el más extremo y extendido (Lamb, 1982). La disminución de la actividad solar, el aumento de la actividad volcánica y el cambio en las concentraciones de los gases invernadero en especial del CO₂ fueron los principales forzantes durante estos períodos fríos (IPCC, 2007).

Existen estimaciones de la intensidad del fenómeno a partir de diversos proxy datos (estimaciones indirectas) como la información histórica que indica el congelamiento del río Támesis hasta el invierno de 1895 y evidencias globales de la expansión de los glaciares. Pero algunas de ellas sugieren que las situaciones más crudas ocurrieron en ciertas regiones, las cuales se alternaron con otras de condiciones relativamente atemperadas. Este patrón estaría asociado con una mayor componente meridional de la circulación atmosférica que la actual. Correspondería a una estructura de anomalías con tres a cuatro centros positivos alternados con centros negativos, llamado patrón de onda 3 ó 4, el cual resulta típico durante eventos El Niño (Hughes y Díaz, 1994, Crowley y North, 1991).

Los Modelos de Circulación General (MCG) son una representación espacial y temporal aproximada de los principales procesos físicos que ocurren en la atmósfera y de las interacciones entre las diversas componentes del clima. Existen algunas simulaciones de las condiciones durante el MM pero ellas se refieren mayormente al Hemisferio Norte (HN). Shindell *et al.* (2001, de aquí en más Sh2001) mediante una versión del MCG GISS de NASA analizó las anomalías ocurridas entre el MM y el período posterior. Las concentraciones de gases atmosféricos fueron las del período pre-industrial para ambas corridas. Los autores consideran solo el cambio producido por el forzante solar, asignando los valores de radiación de 1680 al MM y los de 1780 al período post-MM. Los resultados mostrados corresponden sólo al HN. Las mayores anomalías están centradas en 60°N y exhiben alternancia de centros positivos y negativos. Fischer-Bruns *et al.* (2002), con un modelo acoplado que tiene en cuenta el vulcanismo, gases invernadero y la variabilidad solar, simulan las anomalías ocurridas entre los períodos 1675-1715 y 1550-1800. Las anomalías anuales muestran que los mayores enfriamientos ocurrieron entre el noreste de Canadá y el sudoeste de Groenlandia. Langematz y otros (2005) simulan el período 1645-1715 considerando la irradiancia solar, los gases invernadero y la temperatura superficial del mar. Ambos trabajos muestran ciertas diferencias con los resultados previamente obtenidos por Sh2001. El objetivo del presente trabajo es presentar a partir de escenarios simulados por un MCG, la situación del MM versus la del clima de la segunda mitad del siglo veinte, analizando en especial las condiciones para Sudamérica.

METODOLOGÍA

El MCG utilizado es el EdGCM de la Universidad de Columbia, una versión del GISS de NASA disponible en internet, lo cual facilita comparar parte de los resultados con los obtenidos por Sh2001. Los diversos cambios en los forzantes se evalúan mediante seis simulaciones que están sintetizadas en la Tabla 1. Los valores de los forzantes corresponden al promedio de 22 años para considerar el ciclo solar completo incluyendo la polaridad del campo magnético. La parametrización de las diversas concentraciones de gases invernadero y de la irradiancia solar utilizadas son los promedios de 1669 a

1690 y de 1979 al 2000 en las simulaciones llamadas “Mínimo de Maunder (MM)” y “Actual (CA)” respectivamente. Las concentraciones de los gases invernadero fueron extraídas del trabajo de Robertson *et al.* (2001).

Tabla 1. Concentraciones de los gases invernadero y constante solar de cada simulación.

Corrida de 100 años	Condiciones Iniciales						Siglas
	CO2 (ppm)	CH4 (ppm)	N2O (ppm)	CFC11 (ppm)	CFC12 (ppm)	Cte. Solar (W/m ²)	
Mínimo Maunder	276,4136	0,7354	0,2851	0	0	1363,4394	MM
Actual	352,6045	1,6825	0,3059	0,2362	0,4442	1366,1676	CA
Mínimo con CO2 actual	352,6045	0,7354	0,2851	0	0	1363,4394	MM_CO2
Mínimo con Cte. Solar actual	276,4136	0,7354	0,2851	0	0	1366,1676	MM_Sol
MM : irradiancia de 1680	276,4000	0,7355	0,2851	0	0	1363,4401	MM_Shin
PostMM : irradiancia de 1780	276,4000	0,7355	0,2851	0	0	1365,2184	Post_Shin

Los cambios producidos durante el MM sólo por el decrecimiento de la irradiancia solar son evaluados en la simulación “Mínimo con CO₂ actual (MM_CO₂)” y los producidos por sólo la disminución de los gases invernadero son “Mínimo con Cte. Solar Actual (MM_Sol)”. En ambos casos tanto las concentraciones de CFC11 como CFC12 se mantuvieron en cero. A fin de comparar los resultados del EdGCM con los de Sh2001 se realizan otras dos corridas, con los valores utilizados los autores, esto es los valores de concentración de gases invernadero correspondientes al período pre industrial y la irradiancia de 1680 (MM_Shin) para el MM y la de 1780 (Post_Shin) para el PostMM.

Los escenarios de anomalías obtenidos entre MM y CA son comparados con la información de diversos proxy datos que se hallan disponibles para algunas localidades de Argentina. Las anomalías de temperatura entre años de mínimo solar (valores iguales o menores a la media menos un desvío estándar) y años de máximo solar (valores de media + desvío) son calculados con base en los datos del reanálisis NCEP/NCAR para el período 1960-2000.

Tiempo de Estabilización del modelo EdGCM

El tiempo que tarda el modelo en alcanzar el equilibrio se analiza a través del gráfico del valor global de la variable climática versus el “año” de corrida. Cada una de las simulaciones dieron resultados similares y sólo se muestra la simulación para MM y CA. Tanto el albedo como la temperatura del aire de superficie resultaron similares. Podemos ver en el panel izquierdo de la figura 1 que el tiempo de caída de la temperatura global hasta alcanzar valores estables y representativos del MM, al disminuir los gases invernadero y la irradiancia solar, es de aproximadamente 60 años. El océano alcanza más rápidamente el equilibrio. Para CA en el panel derecho de la figura 1, el modelo se estabiliza en menor tiempo.

Los valores medios que determinan la situación climática simulada por cada corrida se calculan utilizando los últimos 30 años, de los 100 años de corrida, dado que las curvas para todas las corridas y variables representan al menos para ese período la situación de equilibrio del modelo.

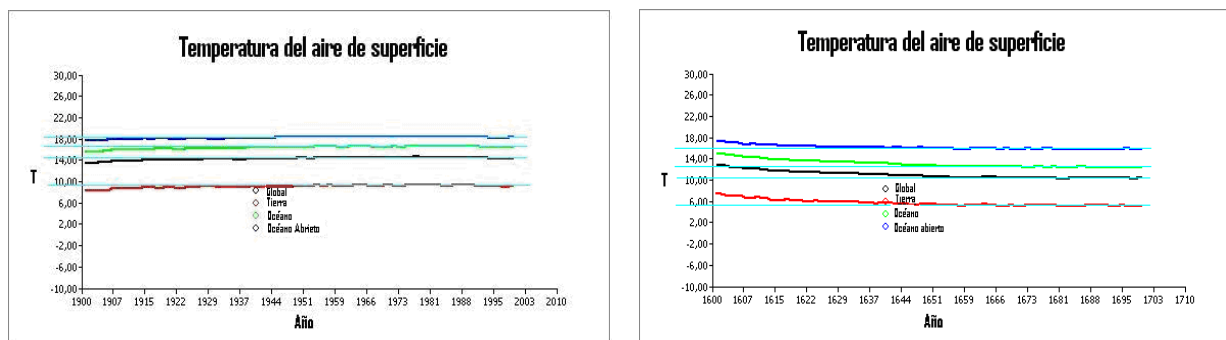


Figura 1. Valores medios de temperatura global ($T^{\circ}\text{C}$) versus año de corrida para el Mínimo de Maunder (panel izquierdo) y las condiciones actuales (panel derecho)

Validación de las simulaciones

Las anomalías de temperatura entre el MM (1689) y el post-MM (1780) mostrados por Sh2001 en figura 2 son comparables a las obtenidas del modelo EdGCM mostradas en figura 3. La simulación del EdGCM muestra anomalías menos intensas que los resultados previos de Sh2001. Sin embargo, ambos presentan patrones con alternancia de anomalías frías y cálidas. Una de las anomalías cálidas está localizada sobre Alaska y el Océano Pacífico Norte en el área bajo la influencia de la baja de las Aleutianas, indicando profundización del sistema, propio de condiciones El Niño (Niebauer, 1988).

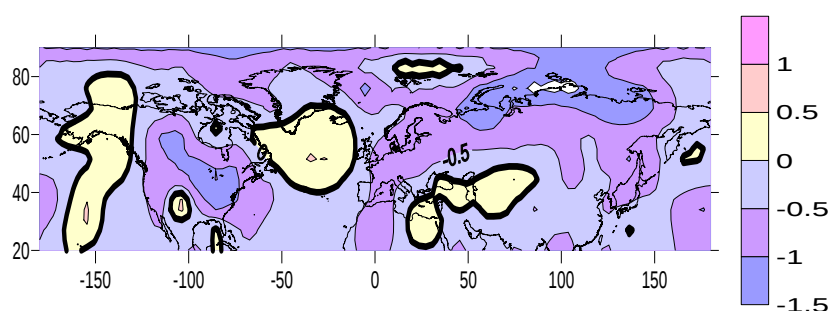


Figura 2. Anomalía de temperatura ($T^{\circ}\text{C}$) del semestre frío del HN obtenida por Sh2001.

El dipolo generado entre la anomalía cálida sobre Alaska y la fría sobre el noreste de América del Norte está más acentuado en los resultados de Sh2001 que en los resultados del EdGCM. En Fritts et al., (1979) las cronologías de América del Norte muestran para los inviernos de los periodos 1602-1650 y 1651-1700 anomalías positivas de temperatura en el sudoeste de Estados Unidos y negativas en el noreste, similar al obtenido con el EdGCM (Fig. 3). Dichos patrones son consistentes con las anomalías de temperatura durante los eventos El Niño del siglo veinte.

Así mismo, durante el MM ambas simulaciones muestran anomalías cálidas en el área del Atlántico Norte entre Groenlandia y Europa. Estos resultados coinciden con el patrón de anomalías de temperatura superficial del mar dado por Lamb (1979) y se asocian a la fase fría de la Oscilación del Atlántico Norte que permite que el aire frío de Siberia penetre profundamente en Europa (Rodwell y otros, 1999). La región cálida de Medio Oriente está más extendida en Sh2001 mientras que la localizada sobre el sector noreste de Asia está mucho más pronunciada en la corrida del EdGCM y está asociada a una intensa anomalía cálida sobre el Ártico inexistente en Sh2001.

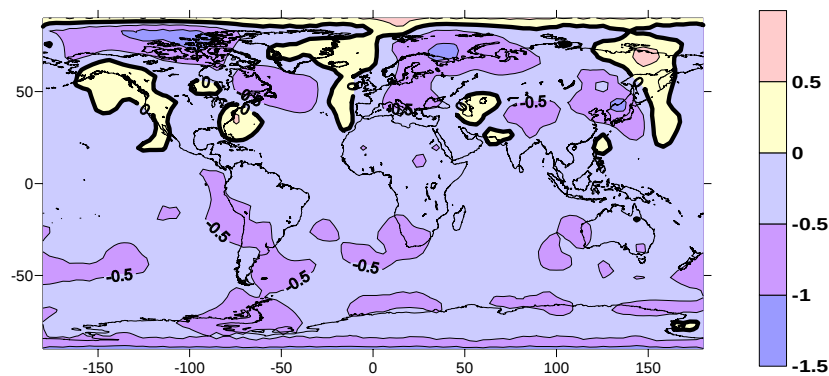


Figura 3. Anomalía de temperatura ($T^{\circ}\text{C}$) del semestre frío del HN, MM menos Post-MM, obtenida con el EdGCM.

Por otra parte, los campos de anomalías de temperatura anual, para extremos de mínimo menos máximo de manchas solares, obtenidos con datos del NCEP/NCAR (Fig. 4a) y las simuladas por el EdGCM entre MM y CA (Fig. 4b), son cualitativamente comparables. En las anomalías de temperatura obtenidas con el EdGCM se observan máximos relativos en distintas regiones del globo que se ajustan a los obtenidos con datos del NCEP/NCAR.

La diferencia radica en que el campo de anomalías es considerablemente más intenso, entre el MM y CA, dado que la diferencia en los valores de irradiancia y CO_2 son considerablemente mayores. Estos resultados indicarían que es razonable inferir al menos cualitativamente los patrones de anomalías climáticas a partir de las simulaciones realizadas con el modelo EdGCM.

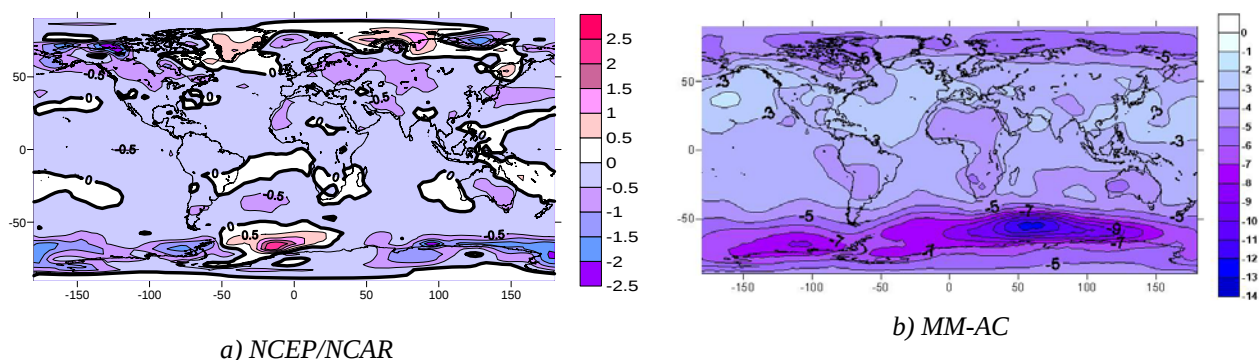


Figura. 4: **a)** Anomalías anuales de temperatura ($T^{\circ}\text{C}$) realizada con datos del re-análisis NCEP/NCAR. Los años de mínimo solar (valores iguales o menores a media-desvío) menos años de máximo solar (valores mayores o iguales a media + desvío) en base al período 1960-2000); **b)** Anomalía anual de temperatura ($T^{\circ}\text{C}$) entre MM y segunda mitad del siglo veinte (CA).

Análisis de las diversas simulaciones

Un rasgo importante de todas las simulaciones correspondientes a los semestres fríos respectivos, períodos Noviembre-Abril en el HN y Mayo-October en el HS, es que las anomalías son más intensas desde 50° de latitud hacia los polos. Las anomalías en las regiones subtropicales a tropicales en general más débiles y sólo resultan intensas sobre los continentes. Estos resultados confirmarían que la Pequeña Edad de Hielo fue un fenómeno principalmente de invierno, como lo mostraría la reconstrucción de la temperatura de verano en París (Le Roy Ladurie y Baulant, 1980).

En ninguno de los resultados de los autores aquí mencionados se comparan las condiciones del MM con las del calentamiento global ocurrido principalmente en la segunda mitad del siglo veinte. Posiblemente por esta causa las anomalías positivas de latitudes medias y altas que aparecen en los resultados previos y entre el MM y el Post-MM simuladas aquí con el EdGCM (Fig. 3) resultan como anomalías negativas relativamente débiles en las diferencias entre MM y CA en el panel izquierdo de la figura 5 correspondiente al invierno del HN. Sin embargo, igualmente es posible reconocer el

mismo patrón de onda 3 dado que las regiones de débiles anomalías negativas en el panel izquierdo de la figura 5 y las correspondientes anomalías positivas de la figura 3 están similarmente localizadas. En el HN las importantes anomalías negativas de altas latitudes son reflejo del gran calentamiento sufrido en el Ártico durante las últimas décadas del siglo veinte. El enfriamiento producido por la disminución de la irradiancia durante el MM se encuentra en figuras 5b. Estas anomalías son la diferencia entre MM_CO2, simulaciones manteniendo los valores actuales de CO₂ y cambiando la irradiancia y los otros gases a valores del MM, y las condiciones actuales (CA).

Tabla 2: Promedios latitudinales de anomalías de temperatura (T°C) para los escenarios de las figuras 6 y 7.

Latitud	May-Oct CO2	May-Oct Sol	May-Oct Otros gases	May-Oct CA-MM	Nov-Abr CO2	Nov-Abr Sol	Nov- Abr Otros gases	Nov- Abr CA- MM
90	1,83	0,63	1,05	3,51	2,43	0,21	2,65	5,29
84	1,96	0,70	0,77	3,42	3,09	0,64	3,15	6,87
76	1,51	0,50	1,13	3,14	3,42	1,00	3,06	7,48
68	1,51	0,40	0,99	2,89	3,09	0,93	2,29	6,32
60	1,17	0,34	0,95	2,46	2,45	0,63	1,76	4,84
52	1,26	0,37	1,08	2,71	2,04	0,58	1,28	3,91
44	1,32	0,32	1,07	2,70	1,83	0,52	1,07	3,42
36	1,43	0,40	0,96	2,79	1,54	0,43	0,98	2,96
28	1,62	0,55	1,01	3,19	1,52	0,42	1,05	2,99
20	1,81	0,64	0,89	3,34	1,75	0,59	0,88	3,22
12	1,76	0,67	0,76	3,19	1,77	0,63	0,90	3,29
4	1,89	0,70	0,81	3,41	1,95	0,69	0,87	3,51
-4	1,96	0,76	0,84	3,56	1,93	0,74	0,88	3,54
-12	2,16	0,75	0,93	3,84	2,04	0,73	0,88	3,65
-20	2,31	0,76	1,01	4,08	2,14	0,77	0,96	3,87
-28	2,22	0,76	0,99	3,97	2,17	0,73	1,08	3,98
-36	2,27	0,82	0,82	3,91	2,31	0,80	0,93	4,04
-44	3,14	1,07	0,84	5,05	2,86	0,94	0,96	4,76
-52	5,97	2,27	0,21	8,45	3,19	0,92	1,42	5,53
-60	7,09	2,63	2,20	11,92	2,16	0,70	1,59	4,45
-68	4,67	1,54	2,56	8,77	2,67	0,66	1,68	5,00
-76	4,56	1,55	2,17	8,28	2,68	0,68	1,32	4,68
-84	3,12	1,17	1,64	5,93	2,43	0,83	1,19	4,46
-90	2,58	1,13	1,58	5,29	1,93	0,92	1,32	4,17
Promedio	2,55	0,89	1,14	4,57	2,31	0,70	1,42	4,43

Las mayores anomalías se presentan durante el invierno del H.S. en la región del Océano Circumpolar Antártico. El enfriamiento es considerablemente mayor en los escenarios generados con concentraciones de gases correspondientes al MM e irradiancia de fin del siglo veinte manteniendo los valores de irradiancia del siglo veinte (MM_Sol-CA en Fig. 5c). O sea que de acuerdo con el EdGCM el calentamiento que se hubiese producido en la segunda mitad del siglo veinte al aumentar sólo el CO2 es aproximadamente el doble el debido sólo al incremento de la irradiancia solar.

En la Tabla 2 se muestran los valores de anomalías por bandas de latitud para las simulaciones de

la figura 5 que sintetizan algunas de las inferencias previas. En todas las simulaciones el semestre Mayo-Octubre presenta las mayores anomalías para latitudes medias y altas del HS, aún mayores que las anomalías del HN para el período Noviembre-Abril.

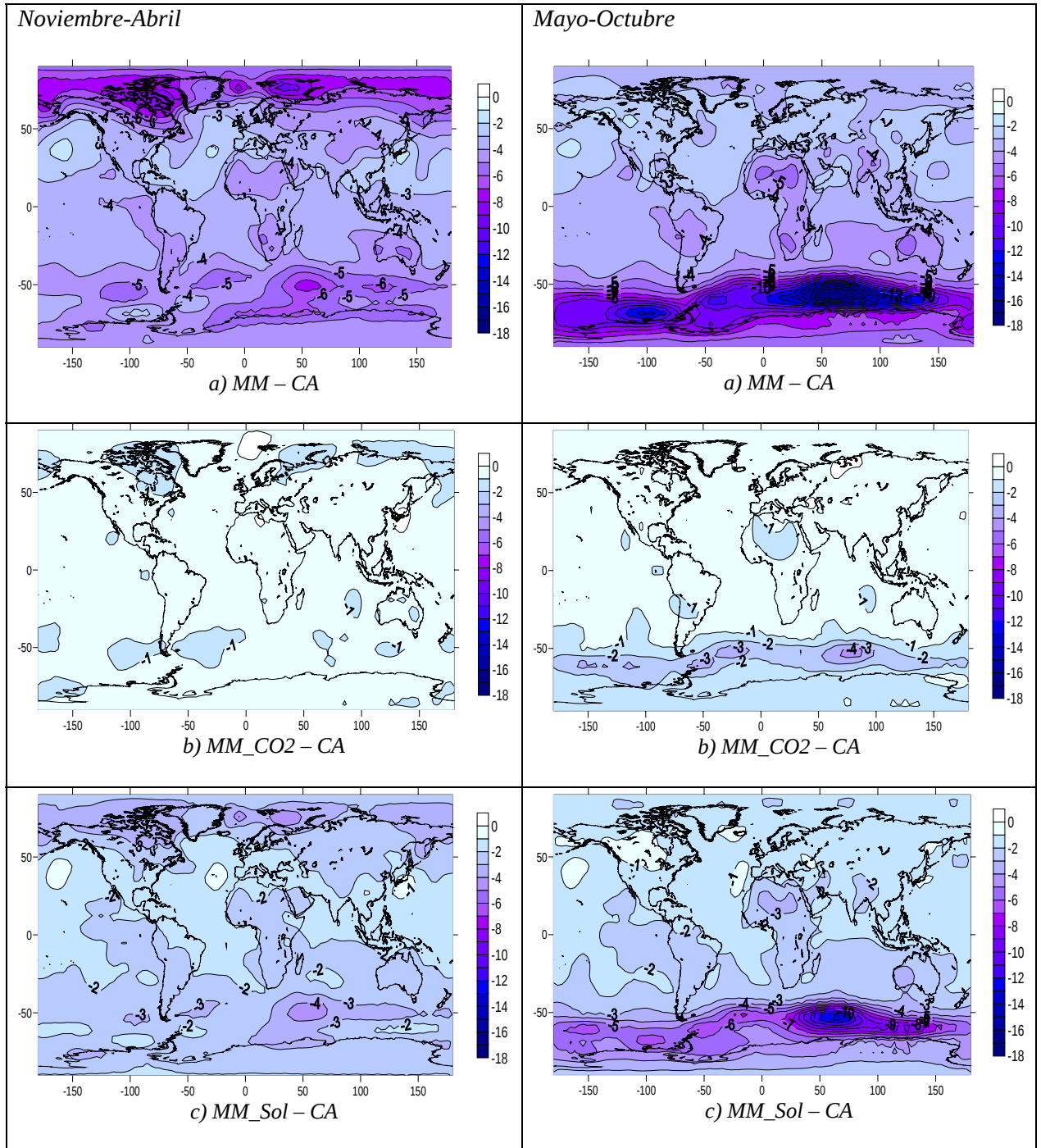


Figura 5. Anomalías de temperatura (T°C) entre: **a)** MM y segunda mitad del siglo veinte (CA); **b)** irradiancia del MM, gases del MM y CO2 actual (MM_CO2) versus CA; **c)** concentración de gases del MM con irradiancia actual (MM_Sol) y CA (Ver Tabla 1). Semestre Noviembre-Abril (cálido para HS) en el panel izquierdo y Mayo-Octubre (frío para HS) en el panel derecho.

Considerando estos resultados surge la siguiente pregunta de difícil respuesta: ¿el modelo está simulando adecuadamente las condiciones en el entorno de 60°S? En el Océano Circumpolar Antártico las anomalías son extremadamente bajas, especialmente en el Océano Indico alcanza valores

inferiores a -17°C . En esa región los proxy datos provienen de testigos marinos, pero los mismos carecen de la resolución requerida para tener información que permita corroborar estos valores.

ESCENARIO DE ANOMALÍAS PARA EL MM Y PROXY DATOS

El escenario de anomalías de temperaturas anuales globales muestra las mayores anomalías sobre altas latitudes de ambos hemisferios producto del mayor enfriamiento ocurrido en el semestre frío como se vio anteriormente (Fig. 6). El patrón de anomalías sobre Sudamérica se caracteriza por un centro de anomalías sobre el noroeste del sector subtropical y la influencia sobre el extremo sur de Patagonia de la gran anomalía localizada sobre el Mar Circumpolar Antártico. Los proxy datos utilizados para contrastar la simulación se hallan señalados con flechas sobre el campo de anomalías en la figura 6 y discutidos a continuación.

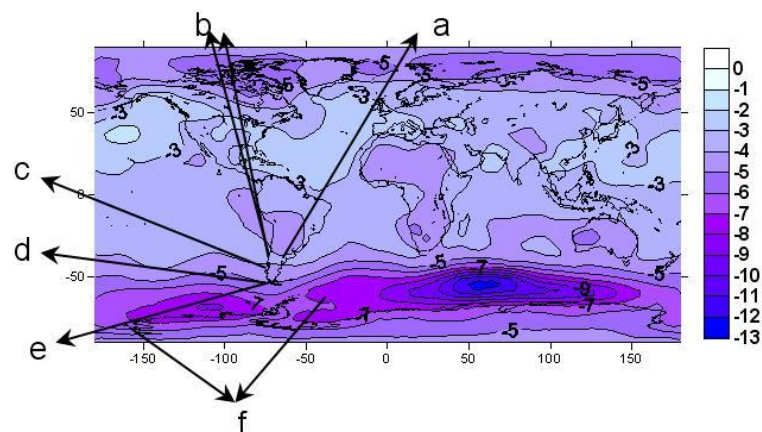


Figura 6. Anomalías Anuales de Temperatura ($T^{\circ}\text{C}$) para la diferencia entre el MM y CA.

Deschamps et al. (2003) y Tonni et al. (2001) destacan el hallazgo en la provincia de Buenos Aires de fósiles correspondientes a animales característicos de la Patagonia, cuyas dataciones corresponden a la Pequeña Edad de Hielo. Esto implicaría que la región sufrió un enfriamiento del orden de 4°C que es la diferencia actual entre la temperatura media anual en la zona de los hallazgos y el norte de la región patagónica. Este valor coincide con la estimación obtenida por la simulación. Villalba et al. (2003) reconstruyeron con anchos de anillos de árboles las anomalías de temperatura en la cordillera de los Andes para 42°S y 48°S (Fig. 7). Para el período del MM (1650-1700) en promedio las anomalías fueron de $-1,05^{\circ}\text{C}$ en 48°S y de $-0,74^{\circ}\text{C}$ en 41°S . La simulación sobre estima las anomalías en esa región estimándolas entre -4°C y $-3,5^{\circ}\text{C}$ (ver Fig. 7).

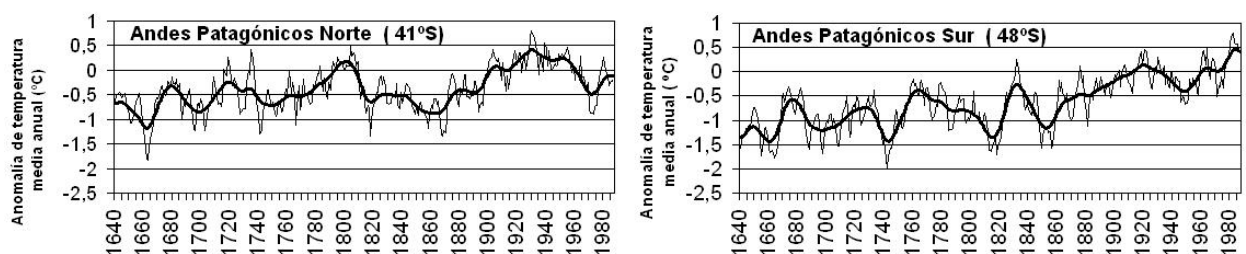


Figura 7. Reconstrucción de las anomalías medias anuales de temperatura ($T^{\circ}\text{C}$) en base a anchos de anillos de árboles para los Andes Patagónicos (adaptado de Villalba et al., 2003).

Bertrand et al., (2005) sugieren la distinción de dos períodos, uno húmedo (1490-1700) y otro seco (1700-1900) en la región de Puyehue, localizada en Chile a la misma latitud que Bariloche. El período húmedo corresponde al comienzo de la Pequeña Edad de Hielo y comprende al MM. Koch y Kilian (2005) A partir del análisis de anillos de árboles y otros proxy datos sugieren que el mayor avance de los glaciares se dio durante la Pequeña Edad de Hielo sobre la región de Campo

Nevado (Andes Chilenos a 52° 47' 54" S) y otros ubicados en regiones próximas a éste. Meyer y Wagner (2008) A partir de un downscaling de la corrida de un modelo GCM y su posterior comparación con un reanálisis del NCEP en el período 1951-2000 y con proxy datos (anillos de árboles, polen y avance de glaciares terrestres de otros autores) sugieren que durante la Pequeña Edad de Hielo predominó un clima de carácter húmedo y fresco al sudeste de la Patagonia.

Parkinson (1990) a partir de los diarios del Capitán Cook indica una desigual expansión de hielo alrededor de la Antártida. La cobertura de hielo fue generalmente mayor en el Mar de Weddell pero menor en el Mar de Ross. Esta inferencia sería consistente con las diferentes magnitudes de anomalías alrededor del Océano Circumpolar Antártico mostradas por la simulación. Resultan mayores las del este del Mar de Weddell que las del Mar de Ross (Fig. 6).

Neukom et al., (2010) reconstruyeron para el cono Sur de Sudamérica, a partir de diversos proxy datos, los campos de anomalías de temperatura con respecto al período 1901-1995. Considerando que con el modelo se compara el MM con el período de mayor calentamiento del siglo veinte y que en la reconstrucción las anomalías son calculadas en base a la temperatura media de todo el siglo veinte, que tiene temperaturas promedio menores, se puede decir que los patrones de anomalías son similares. El patrón de anomalías de invierno de la reconstrucción para el período 1727-1756 la región norte - centro de Argentina y el centro - sur de Patagonia son las áreas de mayor enfriamiento mientras que la transecta Buenos Aires- Mendoza presenta anomalías positivas. La simulación muestra una estructura de anomalías similar, pero en promedio con enfriamiento mayor en aproximadamente -3° a -2°C para todas las regiones.

ANOMALÍAS DE PRESIÓN DE SUPERFICIE

Los resultados de las anomalías de presión de superficie no pueden ser testeados directamente como en el caso de la temperatura. Además teniendo en cuenta que el modelo responde en forma dudosa a las condiciones de circulación de altas latitudes (Fig. 8), estos resultados son sólo presentados para ser tenidos en cuenta como referencia general.

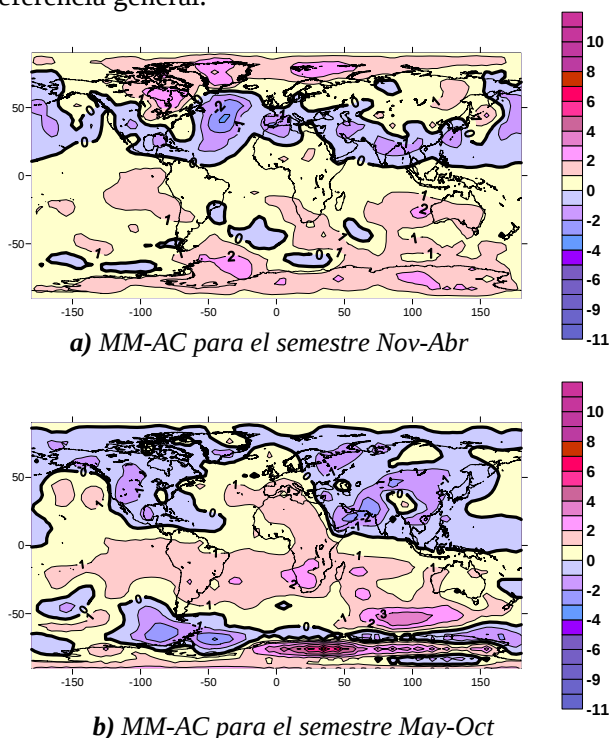


Figura 8. Anomalías de Presión reducida al nivel del mar (hPa) entre MM y segunda mitad del siglo veinte (CA) para: **a)** semestre Noviembre-Abril (cálido para HS); **b)** semestre Mayo-Octubre (frío para Hemisferio Sur).

Parecería que los patrones de anomalías de presión son opuestos entre el HN y el HS. Para el semestre cálido en el HS, la presión es superior a la actual en casi todo el hemisferio. Sin embargo para el semestre cálido del HN son generalizadamente negativas, salvo en las regiones oceánicas y

sobre África. Posiblemente la gran diferencia de distribución océano-continentes entre ambos hemisferios sea responsable de esta diferencia de patrones de anomalías de presión.

Otro resultado a mencionar es el considerable aumento de presión en aproximadamente 60°S que llevaría al debilitamiento de los oestes del HS durante Octubre-Abril. Esta característica, al igual que el aumento de presión sobre Australia, se aviene con las condiciones de circulación de los eventos El Niño. A su vez, diversos estudios dinámicos sugieren que hay tendencia a condiciones tipo-El Niño en períodos de enfriamiento radiativo (Clement et al., 1996; Cane et al., 1997; Mann et al., 2005).

ANOMALÍAS DE VIENTO SUPERFICIAL

Los campos de viento superficial zona y meridional se muestran en figura 9. Para el semestre cálido de Noviembre a Abril la componente zonal (Fig. 9a), manifiesta un corrimiento hacia menores latitudes del flujo de los oestes. La intensificación de la componente oeste sobre latitudes medias-subtropicales y debilitamiento en el extremo sur de Sudamérica se relacionaría con el aumento del gradiente meridional de temperatura correspondiente que ocurre durante el MM debido al mayor enfriamiento de las regiones polares y subpolares (panel izquierdo de la Fig. 5a).

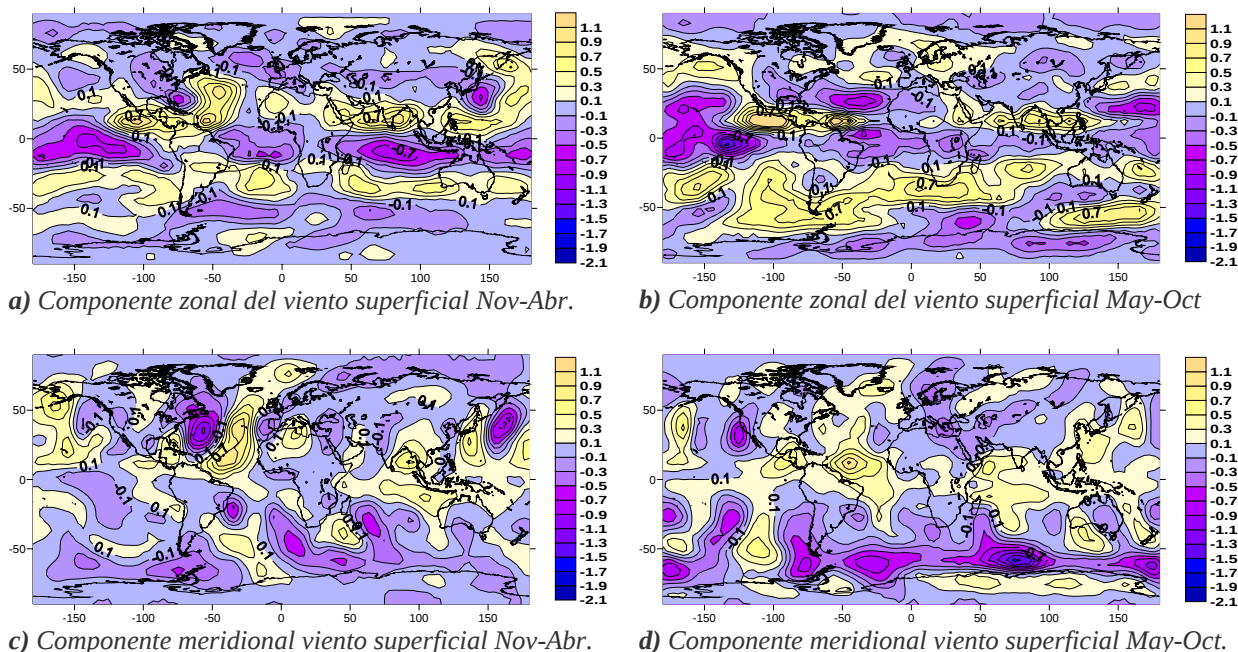


Figura 9. Anomalías de viento zonal y meridional (m/s) entre MM y segunda mitad del siglo veinte (CA) para los semestres indicados.

Durante el semestre frío el efecto en el flujo de los oestes es mayor, intensificándose sobre toda la Patagonia y expandiéndose hacia el polo hasta aproximadamente 65°S (Fig. 9b), también el gradiente meridional de temperatura es mayor (panel derecho de la Fig. 5a). La componente meridional del viento (Fig. 9c y 9d) se ve intensificada indicando la mayor ondulación del flujo de los oestes condición que acompaña la necesidad de un mayor transporte de calor del ecuador al polo producto del aumento del gradiente meridional de temperatura. Esta situación es típica de los eventos El Niño, en que el aumento ecuador-polo de temperatura debido la anomalía positiva del Pacífico ecuatorial, se asocia a un patrón de ondas 3 a 4 en latitudes medias del HS (Magaña y Ambrizzi, 2005). Desde aproximadamente 1400DC, durante la Pequeña Edad de Hielo, la circulación atmosférica fue caracterizada por este incremento en la componente meridional de latitudes medias (Kreutz et al., 1997).

CONCLUSIONES

En el presente estudio se empleó el EdGCM modelo de circulación general, de la Universidad de Columbia que resulta una modificación del GISS de NASA disponible en internet, que permite

simular distintas condiciones climáticas a partir de varios forzantes, entre ellos la concentración de los gases invernaderos y la irradiancia solar. Por esto resulta útil para simular las condiciones durante el periodo llamado Mínimo de Maunder, el cual fue el pulso más frío de la Pequeña Edad de Hielo. A pesar de la baja resolución espacial de este modelo, el mismo resultó útil para obtener resultados que permitieron un avance sobre el conocimiento de las características climáticas del Mínimo de Maunder respecto de las ocurridas durante la fase más notoria Calentamiento Global del siglo XX.

Los resultados obtenidos al mimetizar el experimento realizado por Sh2001 utilizando el GISS, resultaron cualitativamente concordantes. Las diferencias entre nuestros resultados y los previamente obtenidos por Sh2001 se podrían adjudicar principalmente a que los modelos son diferentes aunque el EdGCM es derivado del GISS y luego a que Sh2001 sólo cambiaron la irradiancia solar manteniendo tanto para el MM como para el post-MM los valores de la concentración de gases correspondientes al período pre-industrial. Además podría influir que Sh2001 emplearon sólo 60 años de corridas de las cuales promediaron los últimos 25 años. En este sentido encontramos que la estabilidad para el EdGCM se la estabilidad de los resultados recién comienza a los 60 años de corridas y por ello en nuestro caso tomamos los últimos 30 años de una corrida de 100 para obtener los promedios climáticos mostrados.

Al testear los campos de anomalías anuales de temperatura del H.H. con proxy datos, estos se correspondieron muy bien con los escenarios producidos por el EdGCM, en especial el dipolo de anomalías sobre América del Norte. Además para el cono sur de América del sur y el Océano Circumpolar Antártico, las informaciones provenientes de diferentes proxy resultaron coherentes con las anomalías dadas por el modelo.

El fenómeno climático ocurrido durante el MM parecería ser más importante durante el semestre frío y para latitudes medias y altas. Las anomalías resultaron menores en los semestres cálidos y en latitudes subtropicales a tropicales.

En la circulación atmosférica de latitudes medias del H.S., parecería preponderar un patrón de onda 3-4 en tal como encontró Sh2001 para el H.N. En nuestros resultados este patrón estaría definido por centros de anomalías más intensas con alternancias de valores relativamente más débiles. Por un lado sugiere la existencia de componente meridional en la circulación atmosférica y por el otro la presencia potencial del fenómeno “like-El Niño”. Esta inferencia se ve reforzada por las anomalías positivas de presión de superficie en Australia. En acuerdo con esta inferencia, el resultado de otros autores sugieren el aumento de la frecuencia e intensidad de El Niño durante la Pequeña Edad de Hielo (Crowley y North, 1991)

Al simular las condiciones forzantes del MM manteniendo los valores del Sol propios de las CA, con lo cual la mayor influencia es debida al cambio producido en el CO₂ y los otros gases invernadero, las anomalías negativas fueron más intensas, llegando a casi el doble, que cuando se mantuvieron los valores de concentración de CO₂ iguales a los actuales, con lo cual el principal forzante sería la disminución de irradiancia solar.

Esto implicaría que para el EdGCM el aumento de la irradiancia solar no es despreciable resultando en un efecto de la mitad a un tercio del producido por aunque el aumento antropogénico de CO₂ durante la segunda mitad del siglo XX y que condujeron al Calentamiento Global. El efecto del CO₂ es ampliamente aceptado por la comunidad científica, pero sin embargo algunas veces es subestimado el efecto del incremento de actividad solar, dándole una relevancia casi insignificante. En futuros trabajos se propone utilizar diversos modelos de mayor resolución espacial e incluir otros factores como la actividad volcánica.

Agradecimientos: Los autores agradecen las sugerencias y comentarios de los revisores anónimos que ayudaron a mejorar la presentación. El trabajo fue realizado en el marco de los proyectos del CONICET PIP N°5006, AGENCIA-MINCYT PICT-2007-00438 PESTRAMO BID, A0811 Proyecto bilateral: República Argentina (MINCYT) y el NRF de Sudáfrica y UBACYT X016.

REFERENCIAS

- Bertrand, S., Boës, X., Castiaux, J., Charlet, F., Urrutia, R., Espinoza, C., Lepoint, G., Charlier, B. and Fagel, N., 2005. Temporal evolution of sediment supply in Lago Puyehue (Southern Chile) during the last 600 yr and its climatic significance. *Quaternary Research* 64: 163-175.
- Cane, M. A., A. C. Clement, A. Kaplan, Y. Kushnir, D. Pozdnyakov, R. Seager, S. E. Zebiak, and R.

- Murtugudde, 1997. Twentieth-century sea surface temperature trends, *Science*, 275, 957 – 960.
- Clement, A. C., R. Seager, M. A. Cane, and S. E. Zebiak, 1996. An ocean dynamical thermostat, *J. Clim.*, 9, 2190 – 2196.
- Crowley, T.J. and G.R. North, 1991, *Paleoclimatology*, Oxford Monographs on Geology and Geophysics 18, 349 págs.
- Deschamps, J.R., O. Otero y E. P. Tonni, 2003. “Cambio climático en la pampa bonaerense: las precipitaciones desde los siglos XVIII al XX”. Universidad de Belgrano, Departamento de Investigación, Documentos de Trabajo 109: 1-18.
- Fischer-Bruns, I., Cubasch, U., von Storch, H., Zorita, E., González-Rouco, F. and Luterbacher, J., 2002. Modelling the Late Maunder Minimum with a 3-dimensional OAGCM. *CLIVAR Exchanges*, 7: 59-61. International CLIVAR Project Office, Southampton, UK, ISSN No. 1026-0471.
- Fritts, H. C., G. R. Logfren, and G. A. Gordon, 1979. Variations in climate since 1602 as reconstructed from tree rings. *Quat. Res.* 12:18-46.
- Hughes, M.K., y H.F. Diaz, 1994: Was there a Medieval Warm Period, and if so, where and when? *Clim. Change*, 26(2–3), 109–142.
- IPCC, 2007, IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, Working Group I: The Physical Science Basis of Climate Change, Chapter 6: Paleoclimate, Online in: <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>
- Koch, J. y Kilian, R., 2005. "Little Ice Age" glacier fluctuations, Gran Campo Nevado, southernmost Chile. *The Holocene* 15.: 20-28.
- Kreutz, K.J., Mayewski, P.A., Meeker, L.D., Twickler, M.S., Whitlow, S.I. and Pittalwala, I.I., 1997: Bipolar changes in atmospheric circulation during the Little Ice Age. *Science*, 277: 1294–1296.
- Lamb, H. H., 1979. Climate variation and changes in the wind and ocean circulation: The Little Ice Age in the North Atlantic. *Quat. Res.* 11:1-20.
- Lamb, H.H., 1982 “*Climate, History and the Modern World.*” 387pp Methuen, London.
- Langematz U., A. Claußnitzer, K. Matthes, and M. Kunze, 2005, The climate during the Maunder Minimum: A Simulation with the Freie Universität Berlin Climate Middle Atmosphere Model (FUB-CMAM), *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 67, 55-69.
- Lean, J.. 2004. Solar Irradiance Reconstruction. IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series # 2004-035. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.
- Le Roy Ladurie, E. y Baulant, B., 1980, Grape harvests from the fifteenth through the nineteenth centuries. *Interdisc. Hist.* 10:839-849.
- Magaña, V. y Ambrizzi, T.: Dynamics of subtropical vertical motions over the Americas during El Niño boreal winters, *Atmósfera*, 18(4), 211–233, 2005.
- Mann, M., M. Cane, S. Zebiak, and A. Clement (2005), Volcanic and solar forcing of the tropical Pacific over the past 1000 years, *J. Clim.*, 18, 447– 456.
- Meyer, I. y Wagner, S, 2008, The Little Ice Age in southern Patagonia: Comparison between paleoecological reconstructions and downscaled model output of a GCM simulation. *PAGES News* 16:12-13.
- Neukom, R., Luterbacher, J., Villalba, R., Küttel, M., Frank, D., Jones, P.D., Grosjean, M., Wanner, H., Aravena, J.C., Black, D.E., Christie, D.A., D’Arrigo, R., Lara, A., Morales, M., Soliz-Gamboa, C., Srur, A., Urrutia, R. y von Gunten, L., 2010. Multiproxy summer and winter surface air temperature field reconstructions for southern South America covering the past centuries. *Climate Dynamics* doi: 10.1007/s00382-010-0793-3.
- Niebauer, H.J., 1988, Effects of El Nino-Southern Oscillation and North Pacific weather patterns on interannual variability in the subarctic Bering Sea, *Journal of Geophysical Research* **93** (1988), pp. 5051–5068.
- Parkinson, C. L., 1990, Search for the Little Ice Age in Southern Ocean sea ice records. *Ann. Glac.* 14:221-225.
- Robertson A., Overpeck J., Rind D., Mosley-Thompson E., Zielinski G., Lean J., Koch D., Penner J., Tegen I., y Healy R., 2001: Hypothesized Climate Forcing Time Series for the Last 500 Years *Journal of Geophysical Research*, v.106, No. D14, pp. 14,783-14,803.

- Rodwell, M. J., D. P. Rowell, and C. K. Folland, 1999: Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic oscillation and European climate. *Nature*, 398, 320-323.
- Shindell, D.T., G.A. Schmidt, M.E. Mann, D. Rind, y A. Waple, 2001: Solar forcing of regional climate change during the Maunder Minimum. *Science*, 294, 2149-2152.
- Tonni, E.P., 1990, Mamíferos del Holoceno en la provincia de Buenos Aires. *Paula-Coutiana, Porto Alegre* (4):3-21.
- Villalba, R, Lara, A., Boninsegna, J.A., Masiokas, M., Delgado, S., Aravena, J.C., Roig, F.A., Schmelter, A., Wolodarsky, A. y Ripalta, A., 2003, Large-scale temperature changes across the Southern Andes: 20th century variations in the context of the past 400 years. *Climatic Change*, 59, 177-232.

Recibido: 26 de abril de 2010

Aceptado: 7 de noviembre de 2010