

Variaciones del Clima Terrestre y Rayos Cósmicos Galácticos durante el Ciclo Solar de 11 años

Revisión teórica

Eduardo Andres Agosta^{1,2}

¹ Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Resumen

En los últimos años, han sido numerosos los estudios en torno a la interacción entre los rayos cósmicos galácticos (RCGs) y el clima de la tierra con una gran variedad de resultados, algunos de ellos controversiales. Parece haberse dado un gran avance en el aspecto teórico de la posible interacción, siendo dos los principales mecanismos físicos candidatos: la nucleación mediada-por-el-ión (ion-mediated nucleation, IMN) y la electrocolección. En una y otra teoría, el papel fundamental de los RCGs es la ionización en la atmósfera. La teoría del IMN prescribe cambios en las propiedades de la microfísica de la nube (vida de la nube, albedo, espesor óptico, concentración de núcleos de condensación, entre otros) y consecuentes cambios en la cobertura nubosa global. La electrocolección añade a la anterior, modificaciones en la dinámica de la nube que, en mayor escala, produce modificaciones en la circulación atmosférica. Hay algunas evidencias observacionales de relación consistente con las teorías propuestas a lo largo del ciclo solar de 11 años entre RCGs y variables climáticas (cobertura nubosa global, circulación atmosférica, precipitación). No obstante, la complejidad del sistema deja entrever otros posibles mecanismos; por ejemplo, la interacción estratosfera-troposfera por la relación UV-ozono. A su vez, la existencia de tendencias seculares en el flujo de RCGs, que se asociarían al calentamiento global, sugiere incorporar otra variable a evaluar en la problemática del cambio global.

Abstract

In recent years, a number of studies are concerned on the relationship between the Earth's climate and the Galactic Cosmic Rays (GCRs). A variety of results are found and some are controversial. Theoretical advance seems to be reached through two main candidate theories: the ion-mediated nucleation (IMN) and the electro-scavenging. In both theories, the main role of GCRs is ionization in the Atmosphere. The IMN theory prescribes changes in microphysical properties of cloud and concomitant changes in the global cloud cover. The electro-scavenging adds to the before, changes in the cloud dynamics that, in a larger scale, produce modifications in the atmospheric circulation. Some observational evidences support the theories along the 11-year solar cycle. Nonetheless, due to the complexity of the climate system, some other potential mechanisms appear to be essential too, as the interaction between stratosphere and troposphere through the UV-ozone relationship. In turn, long term tendencies of the GCRs flux, that would be associated to the global warming, suggest incorporating another variable to be evaluated in the global change issue.

1. Introducción

Tradicionalmente el estudio del sistema climático ha involucrado cinco componentes del geosistema: la atmósfera, las cuencas hidrológica y lacustre, los glaciares y hielos continentales y marinos, los océanos y el suelo con sus variaciones espaciales en tipo y estructura. La influencia astronómica quedaba reducida principalmente a la variabilidad temporal de la actividad solar. Pero, ¿es el sol el único factor astronómico que modula el clima?

Es evidente que el sol juega un rol importante en el clima de la tierra. No solo siendo la principal fuente de energía de radiación para el sistema terrestre sino también en su actividad magnética medida, por ejemplo, con el número de manchas solares. A lo largo del período instrumental se han observado relaciones notorias entre la actividad magnética del sol y diversas variables meteorológicas y ligadas al clima. Por ejemplo un famoso científico londinense, William Herschel, publicaba en 1801 que el precio del trigo estaba directamente controlado por el número de manchas solares. Sus observaciones se basaban en que había menos precipitación durante un mínimo de manchas solares. Desde entonces, las relaciones encontradas entre sol y clima son numerosísimas (Eddy 1976, Herman y Goldberg 1978).

Asimismo, el origen físico de la variabilidad climática no es del todo conocido en detalle. Son varios los factores que influyen en el clima de la tierra cuya importancia relativa tampoco está totalmente esclarecida. Entre ellos: *i*) la variabilidad interna del sistema por efectos no lineales y la auto-variación que dan lugar a cambios naturales en la circulación de la atmósfera y los océanos; *ii*) extensas erupciones volcánicas, a las que se le atribuye enfriamientos de la tierra en período de 2-3 años – en ese sentido, períodos de mayor actividad volcánica se asociarían a prolongados enfriamientos; *iii*) cambios en la concentración de gases de invernadero. Por ejemplo, debido al consumo antropogénico de combustible fósil durante los últimos cien años, el contenido de CO₂ por unidad de volumen en la atmósfera se ha incrementado de 280 a 367 ppm (IPCC 2001). Conjuntamente, la temperatura superficial de la tierra se ha incrementado en 0,7°C en ese período y dado que el CO₂ tiene la propiedad de retener la

radiación de onda larga saliente, hay una creciente preocupación de que este aumento conduzca a un calentamiento global con consecuencias adversas para la biosfera actual (IPCC 2001); *iv*) cambios en la actividad solar que afectan tanto el espectro electromagnético (radiación solar) como el campo magnético interplanetario (CMI) producido por el sol y que modula el ingreso de rayos cósmicos originados en procesos estelares. Los rayos cósmicos parecen también influir notoriamente el clima terrestre y es de ellos que se ocupará el presente trabajo.

La influencia de la variabilidad solar en el clima también ha sido con frecuencia tema de controversia. Este es el caso de la variación de la constante solar, como indicador grueso de la energía del espectro electromagnético solar en el tope de la atmósfera, que no puede explicar por sí misma las variaciones intra-decádicas del clima. De acuerdo a mediciones satelitales obtenidas desde 1979, para un cuasi-ciclo solar de 11 años (CS) el valor de la constante cambia apenas 0,1%, es decir, menos de 0,3 W.m⁻² (Frölich y Lean 1998, Rind 2002), lo cual podría explicar tan solo una variación de 0,1° C en la temperatura global media (Wigley y Raper 1990, Carlsaw y otros 2002).

Sin embargo, para los convencidos de la real influencia del sol, las correlaciones encontradas entre *proxy* datos de actividad solar o datos de irradiancia solar y las observaciones del clima pasado son más que suficientes para probarla. Para los críticos, las series actuales no son lo suficientemente largas como para arrojar confianza estadística.

Muy recientemente se han realizado notables avances en la comprensión de los mecanismos físicos que están involucrados en la relación sol y clima de la tierra. La influencia de la variabilidad de la energía asociada a la actividad solar a lo largo de un CS sobre el clima en las distintas fases del proceso podría explicarse a través de dos mecanismo indirectos.

Uno es la variación de la radiación solar en la banda de ultravioleta (UV) en un CS que alcanza hasta un 15% en promedio y afecta la temperatura en la estratosfera por absorción del ozono, lo cual potencialmente influye la dinámica de la troposfera y el clima (Shindell y otros 1999, 2001). El otro es la relación establecida entre la actividad solar, los rayos cósmicos galácticos (RCGs) y la cobertura

global de nubes que también potencialmente afecta el balance energético terrestre y, en parte, la dinámica de la atmósfera (Marsh y Svensmark 2000, MS20 en adelante).

A continuación, se discutirán los resultados y teorías más relevantes en relación a los plausibles efectos moduladores del clima en escala de frecuencias mayores o iguales a la decádica; así como los mecanismos físicos propuestos por distintos autores para la interacción entre RCGs y la atmósfera junto con los puntos fuertes y débiles de los mismos, ilustrando con algunos ejemplos.

2. El Clima y los Rayos Cósmicos Galácticos

Las nubes juegan un rol importante en el balance energético de la superficie de la tierra y baja atmósfera. De acuerdo al IPCC (1996, 2001), son probablemente el principal contribuidor a la incertidumbre sobre el cambio climático global dado que pequeñas modificaciones en cantidad, distribución o propiedades radiativas de las nubes tienen impactos significativos en la predicción del clima (Hartmann 1993).

El impacto radiativo de una nube particular depende principalmente de la altura de la base y el espesor. Nubes altas ópticamente delgadas tienden a calentar la troposfera baja, mientras que nubes bajas ópticamente gruesas tienden a enfriar (Hartmann 1993). Algunos autores estiman que el enfriamiento producido por la cobertura global de nubes genera un forzante de $27,7 \text{ W.m}^{-2}$ (Hartmann 1993, Ardunay y otros 1991). Es claro, entonces, que en el balance energético global el rol jugado por las nubes parece no ser despreciable.

Por otra parte, las variaciones temporales del flujo de RCGs están moduladas por la intensidad del CMI, el cual tiene un importante ciclo de 11 años y otras variaciones de más alta frecuencia.

La Fig. 1 muestra la variación mensual del flujo de RCGs de baja energía en Climax, Colorado, medido a través de un monitor de neutrones en superficie. También muestra la variación mensual del flujo solar de la microonda de 10,7 cm, que es un medida del espectro electromagnético (irradiancia solar), y el número relativo mensual de manchas solares ($NR = k(10g + s)$, con g el número de grupos de manchas solares en la fotosfera, s el

número total de manchas y $k < 1$ una constante de escala).

Para el período 1953-2003 la correlación entre las manchas solares y el flujo solar de onda 10,7 cm es superior a 0,95. A su vez, el flujo de RCGs tiene una correlación cercana a -0,8 con las anteriores medidas solares, estando en contrafase. Un mínimo de actividad solar está asociado a un máximo de flujo de RCGs y viceversa.

En consecuencia cabría esperar que las correlaciones encontradas entre variables climáticas y el CS puedan tener, en parte, a los RCGs como forzante astronómico externo si hubiera alguna conexión física.

Ahora bien, ¿cómo es la posible interacción de los RCGs y la atmósfera a fin de poder modificar patrones climáticos? Hay dos procesos físicos candidatos para la misma, la *nucleación* inducida por ionización y la *electrocolección*. Ambos afectan las propiedades microfísicas de la nube. El primero parece afectar principalmente sus propiedades radiativas mientras que el segundo tendría efectos dinámicos en la tropósfera.

2.1 Ionización atmosférica

A partir de un artículo de Ney (1959), Mc Donald and Roberts (1960) y Roberts y Olsen (1973) especularon por primera vez que las correlaciones encontradas entre la variabilidad solar de alta frecuencia y la intensificación de ciclones en el Golfo de Alaska tendría que involucrar cambios en la ionización estratosférica, producida por la precipitación de partículas solares, afectando las nubes.

La ionización en la atmósfera se debe principalmente al flujo entrante de partículas espaciales tales como los RCGs, los electrones de alta energía emitidos desde los cinturones de radiación de la magnetosfera y, ocasionalmente, los flujos de protones solares (rayos cósmicos). Los flujos de RCGs de energía entre 0.5-20 GeV – la cola inferior del espectro energético de RCGs- son la principal fuente de ionización atmosférica en altitudes entre 1-35 km sobre tierra y entre 0-35 km sobre océano. En tierra, las rocas son la fuente de ionización en la capa límite (Herman y Goldberg 1978).

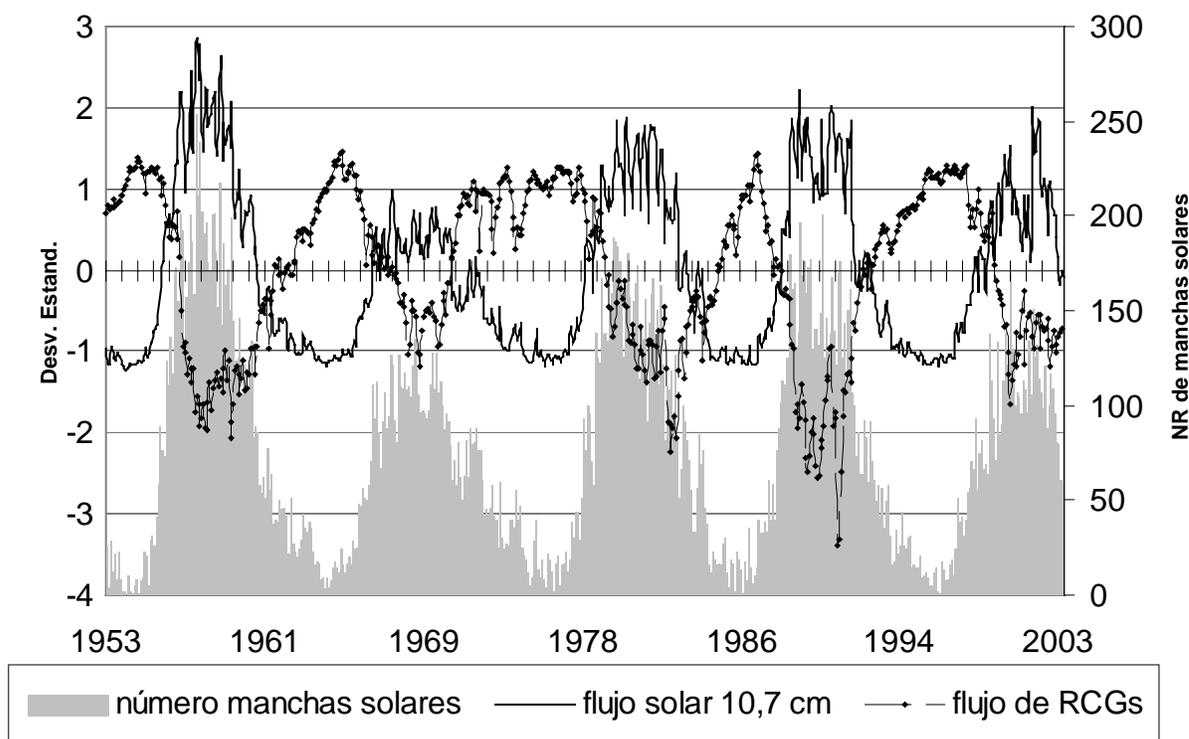


Fig. 1: Variación intermensual del número relativo (NR) de manchas solares (barras verticales), del flujo solar de la microonda de 10,7 cm (línea continua) y del flujo de RCGs en Climax, Colorado, (línea con marcador) en unidades de desvío estándar; período 1953-2003 (Datos provistos por SPIDR de la NOAA, en <http://spidr.ngdc.noaa.gov>).

Debido a la profundidad atmosférica, la tasa de ionización (pares de ión por $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$) maximiza en torno a 15 km en el nivel llamado de Pfozter (Allkofer y Grieder 1984). Por debajo de este nivel es donde las nubes se forman. Los otros flujos de partículas espaciales ionizan principalmente en la atmósfera alta por encima de 80 km y, por tanto, no interesan en términos de formación de nubes.

Dickinson (1975) señaló que la condensación del vapor agua debido a ionización por flujo de RCGs no ocurre en la atmósfera porque requiere altas sobresaturaciones. No obstante, la presencia de vapor de ácido sulfúrico (H_2SO_4) ionizado por RCGs en la atmósfera permite la condensación de estos iones con las moléculas de agua. Si estos crecen lo suficiente como para actuar como núcleos de condensación de nubes (NCN), podrían afectar la distribución del tamaño de las partículas y la duración de las nubes y, en consecuencia, las propiedades radiativas que afectan el clima. Este proceso actualmente es denominado nucleación

mediada por el ión (ion-mediated nucleation, IMN), el cual ha sido estudiado analítica y experimentalmente por Yu y Turco (2000, 2001).

Entre los parámetros que controlan la formación de aerosoles en la troposfera están la concentración de H_2SO_4 , la temperatura (T), la humedad relativa (HR), la presión (P) y el área de superficie (A) de aerosoles preexistentes. La teoría IMN según Yu (2002, Y02 en adelante) añade otro parámetro importante a la lista que es la concentración de iones o tasa de ionización (Q).

De acuerdo a Y02 las tasas de producción de partículas ultrafinas, o núcleos de condensación (NC), son sensibles tanto a la concentración de iones como a la de ácido sulfúrico. El vapor de H_2SO_4 controla la tasa de crecimiento de las agrupaciones (clusters) de iones, mientras que la ionización determina tanto la vida de las agrupaciones con carga como la disponibilidad de iones. La neutralización por recombinación de pares de iones hace que las agrupaciones de carga pierdan

su ventaja de crecimiento y resulten en agrupaciones neutras que se disocian si son más pequeñas que un tamaño crítico. Para valores típicos de concentración de ácido sulfúrico donde se ha observado significativa nucleación, en condiciones de muy bajas concentraciones de iones, la mayoría de las agrupaciones de iones tiene tiempo suficiente como para alcanzar tamaños estables antes de la recombinación y la tasa de nucleación final está limitada por estas concentraciones de iones iniciales. A medida que aumenta la ionización, la concentración de iones también aumenta pero la vida de los iones decrece y así también la fracción de iones que tienen tiempo suficiente para crecer a tamaños estables. Como resultado, el número total de partículas nucleadas primero aumentan rápidamente y luego decrecen con el aumento de la ionización.

En consecuencia, la variación del flujo de RCGs puede afectar las propiedades de la nube a través de su influencia en la abundancia de NC y de los NCN (Y02). También las variaciones de la densidad de carga espacial (σ) como resultado de los cambios en el flujo de corriente del circuito eléctrico global (J) entre la ionósfera y la tierra, que puede afectar la concentración de cargas de iones positivos y negativos, tienen un impacto en la nucleación mediada por el ión (Tinsley y otros 2001, Tinsley y Yu en prensa, TY en adelante).

En suma, la dependencia de la tasa de nucleación de partículas en la ionización Q por RCGs y el vapor de ácido sulfúrico es una función compleja entre ambas variables y una combinación adecuada de parámetros atmosféricos (T , HR , P , A y σ).

Asimismo, las anteriores especulaciones teóricas parecen encontrar sustento empírico en el complejo geosistema, si bien, los problemas inherentes a la observación no están del todo clarificados todavía.

Es así que a partir de observaciones satelitales de las propiedades de nubes suministradas como promedios mensuales por el análisis del Internacional Satellite Cloud Climate Project (ISCCP), versión D2, para el período 1983-1994 (un CS completo), Svensmark y Friss-Christensen (1997), y Svensmark (1998, S98 en adelante) mostraron correlaciones significativas entre la cobertura global de nubes bajas (>680 hPa, aproximadamente 3,2 km) y el flujo de RCGs en Huancayo, Perú, con correlaciones mayores entre

45°N y 45°S. Este comportamiento asociado entre los RCGs y las nubes bajas pueden observarse en la Fig. 2c sobre el período de análisis 1983-1994. S98 propone que tal asociación podría tener un amplio impacto en el calentamiento global observado.

A su vez, MS20 atribuyeron las variaciones de la cobertura nubosa del orden del 3% en un CS a las variaciones del flujo de RCGs por ionización en la atmósfera. A su vez, propusieron el proceso IMN como principal mecanismo explicativo de tal asociación. Son varios autores que adhirieron a esta hipótesis de los autores daneses (Kikby y Laaksonen 2000, Palle y Butler 2000, Kniveton y Todd 2001, Carslaw y otros 2002).

Ciertamente tampoco faltaron críticos para esta presunción científica. Para algunos todavía no había un real mecanismo físico explicativo (Kristjánsson y Kristiansen 2000), la cobertura nubosa total no variaba con la radiación cósmica aunque sí la cobertura de nubes bajas en latitudes medias sobre los océanos (Kristjánsson y Kristiansen 2000, Gierens y Ponater 1999) y, globalmente, el efecto de la radiación de las nubes no variaba según variaciones de la cobertura nubosa (Kristjánsson y Kristiansen 2000, Jorgensen y Hansen 2000, Norris 2000, Farrar 2000).

Haciéndose eco de estas críticas, Kristjánsson (2001) afirmó que en los trabajos de S98 y MS20 se estima mal la cobertura de nubes bajas porque la base de datos utilizada se basa solo en sensores infrarrojos (IR). Ellos, utilizando una combinación más ventajosa, al parecer, de la información provista por la banda visible (VIS) e infrarroja cercana (NIR), muestran para el período 1989-1994 (medio CS) ninguna relación evidente entre cobertura nubosa baja y rayos cósmicos.

No obstante, los resultados de Svensmark y colaboradores encuentran apoyo teórico en los trabajos de Yu. Este autor en Y02 demuestra, aplicando la teoría IMN en un modelo de microfísica de nubes, que la concentración de NC (de diámetro > 3nm) aumenta en niveles bajos de la troposfera (>640 hPa) al considerar cambios del 20 % en la ionización Q , como los observados debido a variaciones de RCGs a lo largo de un CS.

Respecto de las críticas de Kristjánsson, Marsh y Svensmark (2003, MS03 en adelante) sostienen que su metodología es discutible porque si bien las propiedades IR de las nubes se ajustan con la banda VIS, en el procedimiento hay que hacer un importante número de suposiciones sobre la

distribución del tamaño de gotas de nube que afectan al mismo tiempo la exactitud del ajuste en escalas interanuales.

Con todo, los problemas observacionales no terminan aquí. La Fig. 2 muestra una actualización del trabajo de MS20 añadiendo datos posteriores, desde 1994 a 1998 (Svensmark, com. pers.). De la figura, es evidente que la asociación establecida entre el flujo de RCGs y la nubosidad baja ha disminuido a partir de 1995 (Fig. 2c). La caída del porcentaje de nubosidad a partir de 1995 es notoria al igual que el abrupto descenso de la nubosidad en capas superiores (Fig. 2a). El máximo pico aparentemente creciente desde 1998 en nubosidad media (Fig. 2b) y la caída en nubosidad baja (Fig. 2c) hacen pensar más bien en un producto artificial por fallas en la visualización del satélite.

Por otro lado, anteriormente Kuang y otros (1998) habían confirmado la correlación entre los RCGs y el total de nubes bajas para el período 1983-1994 utilizando los datos del ISCCP C2 (una versión anterior), no obstante, no pudieron discernir entre efectos en el espesor medio óptico de la nube debido a RCGs o debido a convección inducida por El Niño/Oscilación del Sur (ENOS).

De esta manera, la pregunta que emerge es si la relación entre RCGs y nubes bajas es un artefacto que puede ser explicado fácilmente por procesos internos de la circulación tales como el ENOS o si es una señal solar de variabilidad real que se ha visto oscurecida desde 1994 por problemas observacionales de satélite.

MS03 ha analizado estos problemas mediante una comparación entre los datos del ISCCP D2 y los del instrumento SSMI (Special Sensor Microwave Imager) de los satélites del DMSP (Defence Meteorological Satellite Program), junto con la señal del ENOS para el período 1983-2001.

Ellos encuentran que las correlaciones halladas para el período 1983-1994 se basan en propiedades reales de nubes bajas y que tales asociaciones no pueden explicarse fácilmente por cambios en la circulación. La ausencia de señal solar en la nubosidad media-alta apunta, en consecuencia, a un mecanismo físico restringido a la troposfera inferior para la explicación de las asociaciones. Los autores afirman que el mecanismo troposférico requerido para la formación de estas nubes es más consistente con los efectos a partir de interacciones aerosol-ionización-RCGs que con

efectos de la relación UV-ozono sobre la circulación de la troposfera.

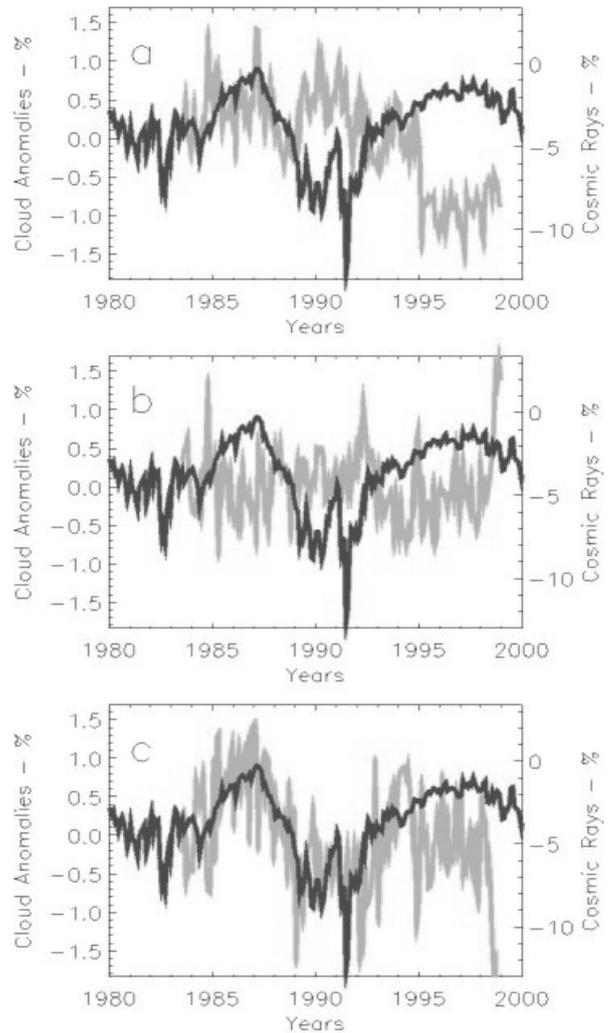


Fig. 2: Promedio global de anomalías porcentuales de nube (gris) para cobertura nubosa (a) alta (<440 hPa), (b) media (440-680 hPa) y (c) baja (>680 hPa). Para el cálculo de la anomalía mensual se remueve el ciclo anual sustrayendo el promedio mensual del período julio 1983-junio 1994 para cada mes en un enrejado equiespaciado, antes de promediar sobre todo el globo. El promedio global del ciclo anual sobre el período para nubes detectadas por IR altas, medias y altas es 13,5%, 19,9% y 28,7%, respectivamente. Rayos cósmicos Galácticos (en negro) observados en Huancayo, Perú (rigidez de corte 12.91 GV), normalizados a octubre de 1965. (Después de MS20. Actualización hasta 2001, por de Svensmark, com. pers.).

Además, demuestran la existencia de un hueco en los datos del ISCCP entre septiembre de 1994 y enero de 1995, que genera problemas en la recalibración y consecuentes inhomogeneidades en los datos de satélite. Con una corrección adecuada de los datos de satélite es posible extender los resultados hasta el 2003 (Svensmark, com. pers.).

En resumen, el efecto neto de la ionización en la atmósfera por RCGs parece contribuir a la formación de nubes bajas que, en escala global, afectan el balance energético. A mayor (menor) flujo de RCGs se esperaría enfriamiento (calentamiento) en la troposfera baja por mayor (menor) nubosidad media, baja, global.

2.2 Electrocolección

Un efecto aún más indirecto de las variaciones del flujo de RCGs es que tanto éste como otros flujos de partículas espaciales modulan el flujo de corriente J en el circuito eléctrico global (Herman y Goldberg 1978, Tinsley 1996, Bering y otros 1998). Al mismo tiempo, el pasaje de esta densidad eléctrica a través de las nubes afecta la electrificación inicial, es decir la densidad areal de cargas σ . Así, Tinsley y Deen (1991) sugirieron que los procesos eléctricos en las nubes que contienen agua sobreenfriada conducen a la producción incrementada de hielo, lo cual indirectamente produce precipitación incrementada por medio del proceso de Wegner-Bergeron-Findeisen.

Más recientemente, Tinsley y otros (2000, 2001) han sugerido la *electrocolección* como otro proceso de conexión eléctrica que lleva a mayor precipitación. Pequeñas cargas eléctricas en aerosoles inducen la colección de tales partículas por parte de gotas precipitantes en las nubes.

Para el caso de electrocolección, TY propone que el efecto climático dominante no es debido a cambios en el balance radiativo de la nube sino a un efecto dinámico sobre el sistema de tormenta que se ve afectado en mayor precipitación. El efecto dinámico estaría inducido por la transferencia de calor latente involucrado. Es decir, un incremento en la precipitación conlleva una disminución en la cantidad de agua de nube disponible para la evaporación en el aire seco arrastrado del entorno hacia el sistema de tormenta. La reducción de este enfriamiento diabático es equivalente a un calentamiento diabático, el cual aumenta las

ascendentes y redistribuye la vorticidad hacia el centro de la tormenta.

Para un ciclón de latitudes medias, la inestabilidad baroclínica del flujo básico es el conductor primario de su dinámica, extrayendo vorticidad de la cortante latitudinal de la circulación y convirtiéndola en vorticidad del ciclón. El calentamiento diabático asociado con la precipitación y el enfriamiento reducido por arrastre de aire seco se suman para incrementar la vorticidad potencial y el ascenso del aire, concentrando la vorticidad en el centro del ciclón. Además, al favorecerse un proceso de retroalimentación inherente a la vorticidad baroclínica, se incrementa la vorticidad total del ciclón (TY). Van Delden (1989) mostró analíticamente la existencia de una retroalimentación positiva entre la configuración dinámica de la tormenta y los procesos diabáticos. Zimmerman y otros (1989) y Mallet y otros (1999) mostraron lo mismo numéricamente. De esta manera, cambios en la precipitación pueden explicar las numerosas correlaciones encontradas entre el índice areal de vorticidad con cambios en el flujo de RCGs (Tinsley y otros 2001).

Para Tinsley, la electrocolección seguida de nucleación en hielo por contacto es probablemente más importante en nubes con distribuciones de tamaño de gotas grandes, alto contenido de agua líquida y topes de nubes justo en niveles inferiores al punto de congelación. En consecuencia, las nubes stratocumulus marinas de capas bajas poseen estas características favorables y sobre áreas oceánicas cabría esperar mayores efectos. No obstante, la dependencia en tipo de nubes, disponibilidad de vapor de agua, concentraciones de agua sobreenfriada y/o cristales de hielo todavía queda por evaluar empíricamente.

Por otro lado, una ciclogénesis incrementada tiene como efecto mayor transporte meridional de calor y momento y debilitamiento del flujo de los oestes. Estos efectos han sido observados sobre el centro-oeste de Europa durante el abrupto decrecimiento y paulatino aumento del flujo de RCGs debido eyecciones de masa coronal del sol en escala de días (decrecimientos de Forbush, Herman y Goldberg 1978). En estas escalas la identificación de las teorías de electrocolección y de IMN permite diferenciar efectos atribuidos a la irradiancia solar de la variación del flujo de RCGs (Tinsley 2000, Tinsley y otros, 2001).

Esta aparente relación entre el clima y los RCGs también tienen asidero en el paleoclima. La ciclogénesis incrementada en el Atlántico Norte (AtlN) debido a mayor flujo de RCGs durante la “pequeña edad de hielo” (PEH) registrada en Europa, bajo reducido número de manchas solares entre los siglos XV y XVIII, pudo haber contribuido a reducidos oestes y a inviernos más fríos en Europa (Luterbacher y otros 2001).

En este sentido, bajo la hipótesis de que la dinámica del clima durante la PEH es similar al presente, se observa con los datos provenientes del reanálisis NCEP que Europa occidental presenta condiciones de anomalías de circulación ciclónica intensificadas en invierno (diciembre a febrero) durante años de máximo flujo de RCGs (Fig. 3b) respecto de años de mínimo flujo de RCGs (Fig. 3a) en la troposfera baja (850 hPa) sobre el AtlN y costas. Esto revela un flujo del oeste más perturbado con mayor transporte ecuador-polo de temperatura y cantidad de movimiento. El campo de anomalía del viento meridional (figura no mostrada) también muestra un mayor gradiente en latitudes medias y altas en Europa occidental para máximos de flujo de RCGs.

Dentro de la PEH, hay un período de ausencia casi total de manchas solares entre 1645-1715 que por vez primera Eddy (1976) asoció a mínimos de irradiancia solar y condiciones climáticas severas en Europa. Este período, conocido como el Mínimo de Maunder, estuvo acompañado de un mayor ingreso de RCGs, tal como lo revelan los *proxy* datos de ^{10}Be y ^{14}C , ambos isótopos producidos en la atmósfera por efecto de RCGs (Mursula y otros 2003).

De la Fig. 4b, los puntos de estrella denotan valores suavizados de producción de núcleos cosmogénicos por ^{10}B (PNC) estimada por Bard y otros (2000) en el polo sur. Puede verse que ocurre un máximo relativo de PNC hacia fines del 1600. Este máximo de PNC coincide con el registro de más bajas temperaturas (período 1690-1705, Fig 4b, curvas llenas) reconstruidas para HN y el HS por Jones y otros (1998a). También este período aparece como mínimo relativo en otras reconstrucciones de temperatura globales (Mann y Jones 2003). Al mismo tiempo, la irradiancia solar reconstruida por Lean y otros (1995) a partir de datos del número de manchas solares (Fig 4a) yace en un mínimo y no presenta variaciones que pudieran asociarse a las variaciones de temperatura global reconstruidas.

Para Svensmark (2000), que compara las curvas con concentraciones de ^{10}Be de una resolución interanual, este hecho revela una clara relación entre el flujo global de RCGs y la temperatura terrestre.

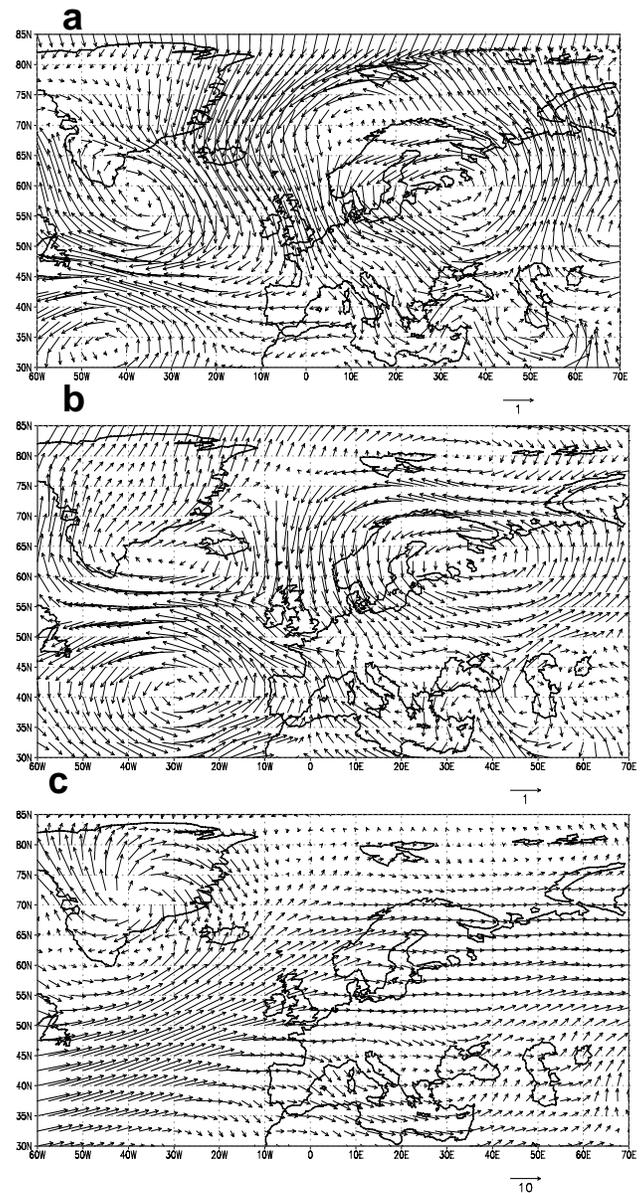


Fig. 3: Campo compuesto de la anomalía del vector viento (m/s) en 850 hPa, para dic-feb, durante años de mínimo flujo de RCGs (a), de máximo flujo de RCGs (b) y campo medio climatológico 1968-1998 (c) usado de base; datos de reanálisis del NCEP. Años de mínimo flujo: 1958, 1959, 1968, 1969, 1981, 1982, 1983, 1990, 1991; de máximo flujo: 1964, 1965, 1974, 1975, 1976, 1977, 1987, 1988, 1995, 1996, 1997, 1998.

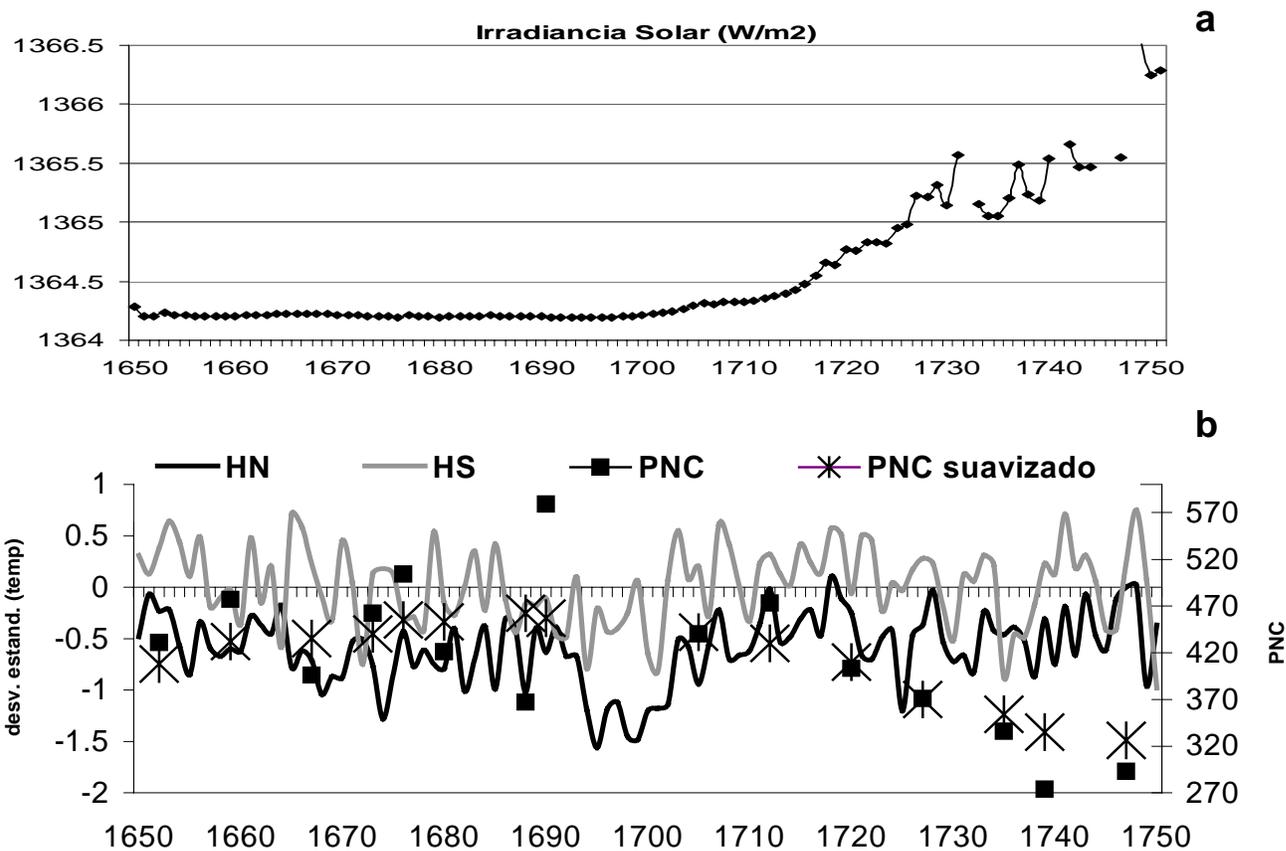


Fig. 4: Reconstrucción de la irradiancia solar según Lean y otros (1995) para el Mínimo de Maunder (a); temperaturas normalizadas para el HS (gris) y HN (negro) reconstruidas pro Jones y otros (1998b) y producción de núcleos cosmogénicos por ^{10}B (PNC) en un core de hielo en el polo sur; cuadrado: dato crudo; asterisco: suavizado gaussiano, (Bard y otros 2003).

No obstante, Shindell y otros (2001) han atribuido este principal efecto de enfriamiento durante Mínimo de Maunder a reducida radiación UV y consecuente cambios en la dinámica estratosférica que modularían patrones de circulación en la troposfera.

2.3 Variaciones regionales y temporales

De lo visto hasta aquí, un aumento del flujo de RCGs está asociado a enfriamiento en capas bajas de la troposfera por aumento global de la nubosidad y a precipitación incrementada por cambios en la termodinámica de la tormenta. Este último efecto también tendría consecuencias en la circulación de la atmósfera.

En escala global, la relación entre los campos de temperatura media anual y el de total anual de precipitación en superficie y los RCGs parece acompañar estas teorías.

La Fig. 5a muestra la correlación entre el flujo de RCGs y la temperatura de aire en superficie, estimada con datos sobre tierra y océanos provenientes del reanálisis NCEP para el período 1953-2001. En rasgos generales, predominan las áreas negativas de correlación significativa al 90% sobre océanos y continentes. Las áreas significativas sobre continentes también se observan con la base de datos de temperatura observada del aire interpolados en $1,0^\circ \times 1,0^\circ$ grados de lat-lon, estimados por la Universidad de Delaware (UnDel) y provistos por la NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center.

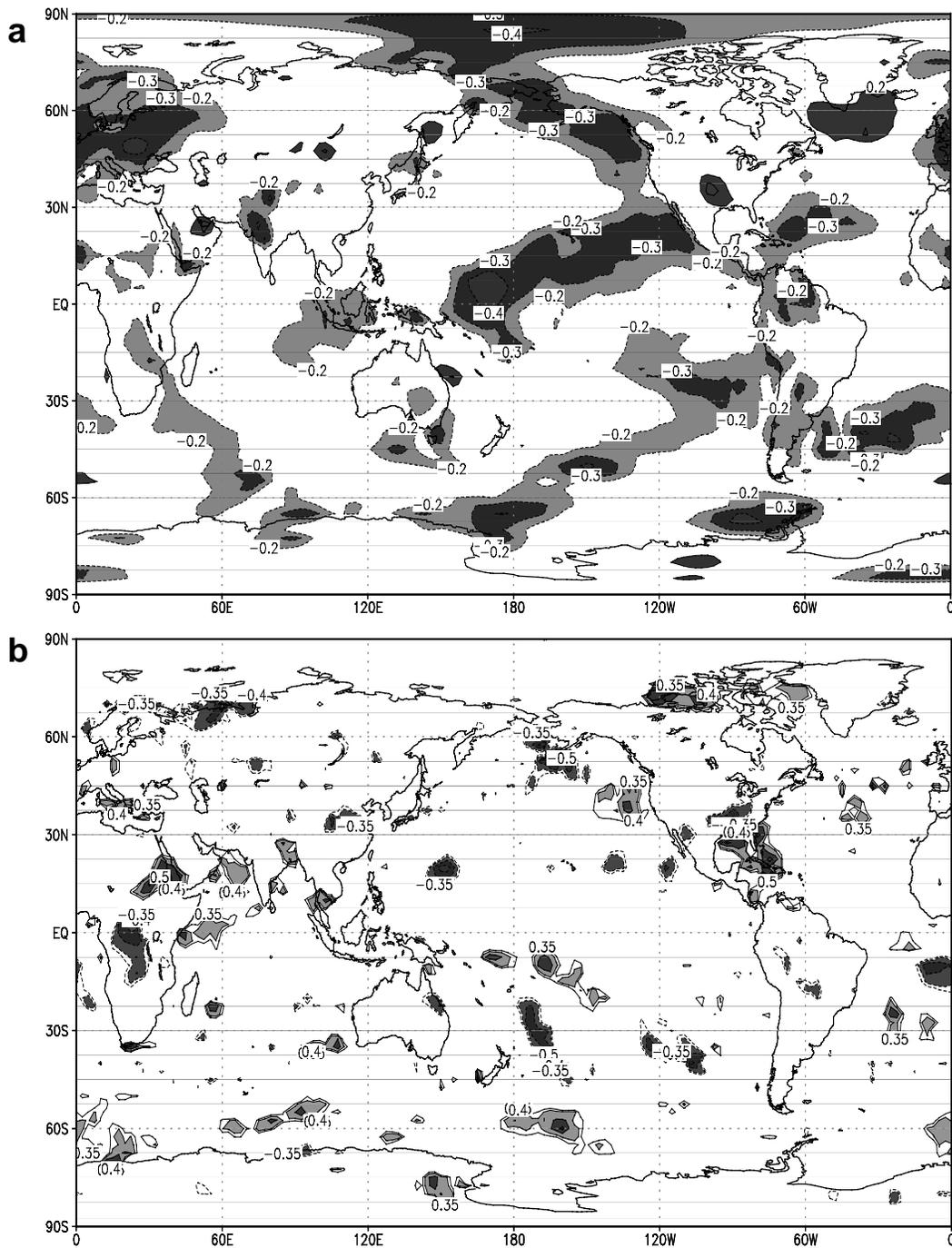


Fig. 5: Áreas de correlación significativa al 90% del flujo anual de RCGs en Climax, Colorado, con la temperatura media anual de aire (Datos del reanálisis del NCEP) para el período 1953-2001 (a), y con la precipitación total anual provista por el GPCP para el período 1979-2001 (b).

En cambio, para la precipitación, no hay un signo de correlación significativa prevaeciente entre los RCGs y el total anual de precipitación estimado con la base de datos del GPCP (Global Precipitation Climatology Project) para el período 1979-2001

(Fig. 5.b). No obstante, aunque las áreas significativas son más dispersas y menos extensas que para la temperatura – atribuible, en parte, al corto registro de las series - puede encontrarse cierta coherencia con la teoría de la electrocoleción

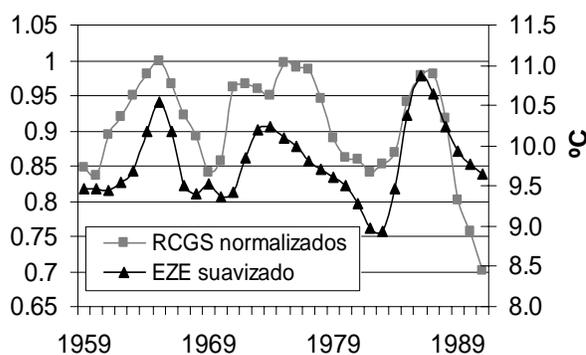


Fig. 6: Variación de RCGs (Climax, Colorado) normalizados a junio de 1965 (428942) y serie de temperatura de superficie para junio en Ezeiza suavizada en 7 términos para enfatizar la baja frecuencia. Período 1959-1991. Datos del SMN.

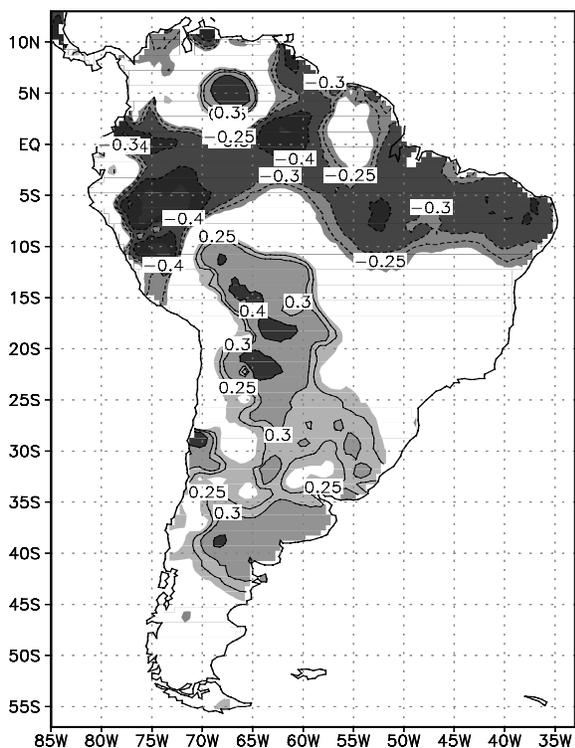


Fig. 7: Correlación entre RCGs (Climax) y temperatura media del aire para junio, 1959-1991, de la base de datos de la UnDel, NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center. Valores mostrados superiores a módulo 0,25.

(correlación positiva), principalmente en las zonas oceánicas del HS. Kniveton y Todd (2001) encuentran significativa correlación (al 95%) entre el promedio móvil de 12 meses en precipitación y el

flujo de RCGs sobre áreas oceánicas del HS en altas latitudes.

No obstante, estas señales globales encontradas entre los RCGs y variables del clima, que son parcialmente coherentes con las teorías de IMN y electrocolección, presentan variaciones regionales y temporales a lo largo del ciclo anual que hay que considerarlas a la hora de estudiar las posibles conexiones con el clima.

Por ejemplo, la Fig. 6 muestra la serie de temperatura media del aire para junio en Ezeiza (35°S 59°O), provista por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), en baja frecuencia (ondas mayores a 7 años) y el flujo de RCGs normalizados a junio 1965.

El comportamiento conjunto en fase de las series sugiere una posible relación entre ambas variables, sin embargo, la mayor dificultad es saber cuál es el mecanismo físico vinculante. Además, parece evidente que tal señal podría extenderse a otras áreas de Sudamérica (SA). La Fig. 7 muestra la correlación entre el flujo de RCGs y la temperatura media del aire para junio en SA. Las áreas positivas de correlación significativa se extienden sobre gran parte del cono sur de SA.

Para este caso, las teorías vistas hasta ahora no parecen cerrar fácilmente. Si es debido a los RCGs que modifican el campo de nubes (mayor nubosidad baja esperable a incrementos en el flujo de RCGs), cabría esperar un enfriamiento en superficie. Si es la irradiancia solar el efecto dominante a pesar de tener una variación apenas de 0,1% en el CS y cuyo comportamiento es inverso a la de RCGs, vemos que para junio hay aumento de temperatura cuando hay mínimo de irradiancia solar y viceversa.

Claramente para junio en esta región, lo observado es opuesto a lo esperado globalmente a través de la teoría de IMN o a efectos de irradiancia solar directa. Quizás se ponga en juego para este caso procesos dinámicos de la troposfera con fuente en la estratosfera (por absorción de UV por el ozono) que conducen a estos patrones climáticos locales, o bien en menor grado, modificaciones locales de circulación por el efecto de electrocolección que hay que evaluar ulteriormente.

No obstante, para el ciclo anual el campo térmico en superficie tiene un comportamiento en baja frecuencia variable en relación al CS en la región. Tanto las series de Ezeiza como los campos de correlación sobre el cono sur de SA cambian de

signo para otros meses, presentando en meses estivales, por ejemplo, valores negativos de correlación significativa entre la temperatura y los RCGs (figuras no mostradas), en concordancia con lo esperado teóricamente. Esto puede observarse en la Fig. 4a que muestra valores de correlación negativos y significativos al 90 % entre la temperatura media anual y el flujo de RCGs para la región.

De alguna manera el ejemplo anterior indica que la presencia de la actividad solar con su cuasi-ciclo de 11 años en el clima es indiscutible y el modo dinámico interno en que la atmósfera y clima responden ante el forzante astronómico es altamente complejo. Es decir, por ahora las teorías físicas propuestas se presentan insuficientes, o parciales, a fin de explicar satisfactoriamente la dinámica climática en baja frecuencia.

3. Discusión y futuros trabajos requeridos

Según Tinsley y otros (2001), en escalas decádicas o mayores no sería fácil distinguir entre efectos sobre el clima debido a cambios en el flujo de RCGs o a cambios en la irradiancia solar. Esto se hace evidente para el caso del Mínimo de Maunder durante la PEH, al que se le atribuyen causas dinámicas diferentes. Por un lado, al forzante dinámico estratosférico UV-ozono (Shindell y otros 2001) y, por el otro a la interacción atmósfera-RCGs (MS20). En cambio, en escalas diarias a semanales el efecto atribuido a RCGs es completamente diferente y diferenciable respecto de la irradiancia solar.

En estas escalas sería posible hallar correlaciones entre variables climáticas y el flujo de RCGs en concordancia con mecanismos físicos coherentes que modifican las propiedades microfísicas, radiativas y/o dinámicas de las nubes, a saber, la nucleación mediada-por-el-ión y la electrocolección.

La integración temporal (meses, estaciones, años) y espacial (regiones, bandas de latitudes, el globo) de la acción de estos mecanismos propuestos, permiten una primera aproximación lineal de la interacción de RCGs y el clima: *bajo condiciones que aún esperan ser dilucidadas, a mayor ingreso de RCGs, cabría esperar mayor nubosidad baja global y, en consecuencia, menores temperaturas en superficie junto con modificaciones*

de la circulación atmosférica debido a cambios en la dinámica de las tormentas.

Sin embargo, la existencia de correlaciones inversas a las esperadas por estas teorías en diversas escalas (al menos en escalas regional e intermensual) a lo largo del CS, revelan que la interacción no es tan lineal, o bien, podría deberse a interacciones dinámicas estratosfera-troposfera con origen en el calentamiento producido por absorción de UV-ozono. Más todavía, una vez identificados cualquiera de estos procesos físicos, resta por cuantificar y evaluar numérica y experimentalmente las variables involucradas a fin de determinar el impacto real sobre el clima.

En este sentido, la ulterior comprensión de la teoría IMN requerirá tanto de observaciones de campos como modelos dinámicos a fin de cuantificar y evaluar las variables involucradas (T, P, HR, A Q y H₂SO₂) en la conexión entre los rayos cósmicos modulados por el sol con la microfísica de nubes, sus propiedades y el clima (Y02). Por su parte, la teoría de la electrocolección tiene que progresar en la determinación cuantitativa y experimental de la dependencia de la conexión en tipo de nubes, localización geográfica, disponibilidad de vapor de agua, concentraciones de agua sobreenfriada y/o cristales de hielo (TY).

Asimismo, no cabe duda que la incorporación del flujo de RCGs como una variable a tener en cuenta en el estudio de la variabilidad climática global coopera aún más a la complejidad del sistema.

Algunos autores muestran que el CMI, que protege a la tierra del ingreso de RCGs, ha estado intensificándose en más del doble desde mediados del siglo XIX (McCracken y McDonald 2001, Mursula y otros 2003). Según Lockwood y otros (1999), desde 1964 la intensidad del CMI se ha incrementado en un 41% con la consecuente disminución del flujo de RCGs en un 3,7%. MS20 estipularon que tal reducción produce un calentamiento global de 1,4 W.m⁻², teniendo en cuenta los potenciales cambios en las propiedades radiativas de las nubes. En consecuencia, la consideración y seguimiento del efecto de los RCGs sobre el clima de la tierra cobra una relevancia notable en el estudio del cambio del clima global.

Por último, las señales de frecuencia del CS encontradas en variables climáticas invalidan cualquier pretensión de ignorar la potencialidad de los efectos sobre la atmósfera y el clima de la

actividad solar, ya sea a través de una posible mayor irradiancia solar asociada a cambios en la dinámica troposférica por la relación UV-ozono en estratosfera, o bien, por cambios en el ingreso de RCGs a la tierra. Discernir la importancia relativa de estos procesos respecto del aporte e impacto de la actividad antropogénica constituye, sin lugar a dudas, una tarea insoslayable y de valor para futuras investigaciones.

Agradecimientos:

Al Dr. Adrián Rovero del Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET, por sus comentarios y sugerencias en la interpretación de los flujos de rayos cósmicos. Este trabajo fue realizado con el aporte de los proyectos 01-x002 de UBA y PIP 428-98 de CONICET.

Referencias:

- Allkofer, O. C. y Grieder, P.K.F. 1984. Cosmic Rays on Earth. Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik GmbH Karlsruhe (in Germany 1983), págs. 377.
- Ardanuy, P. Stowe, L.L., Gruber, A. y Weiss, M., 1991. Shortwave, Longwave and net cloud-radiative forcing as determined from Nimbus-7 observations., *J. Geophys. Res.*, 96: 1-2.
- Bard, E., G. Raisbeck, F. Yiou, and J. Jouzel, 2000, Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides. *TELLUS*, B 52 (3): 985-992.
- Bard, E. et al., 2003, Reconstructed Solar Irradiance Data, IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series #2003-006. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.
- Bering, e.A., Few, A.A. y Benbrook 1998. The global electric circuit. *Physics Today*, 51:24-30.
- Carslaw, K.S., Harrison, R.G. y Kirkby J., 2002. Cosmic Rays, Clouds and Climate. *Science*, 298: 1732-1737.
- Dickinson, R., 1975. Solar variability and the lower atmosphere, *Bull. Am. Met. Soc.*, 56: 1240-1248.
- Eddy, J.A., 1976. The Maunder Minimum. *Science*, 192: 1189-1193.
- Farrar, P.D. 2000. Are cosmic rays influencing oceanic cloud coverage, or is it only El Niño? *Clim. Chan.*, 42: 7-15.
- Fröhlich, C. y Lean, J. 1998. Total solar irradiance variations: The construction of a composite and its comparison with models, en F. L. Deubner (ed.), *IAU Symposium 185: New Eyes to See Inside the Sun and Stars*, Kluwer Academic Publ., Dordrecht, The Netherlands, 89-102
- Gierens, K. y Ponater, M. 1999. Comment on "Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships" by H. Svensmark y E. Friis-Christensen 1999. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 61: 795-797.
- Hartmann, D.L., 1993. Radiative effects of clouds on Earth's climate, en *Aerosol-Cloud-Climate Interactions*, por Hobbs P.V., Academic Press Inc., págs. 151-173.
- Herman, J.R. y Goldberg, R.A., 1978. *Sun, Weather and Climate*. NASA, SP-426, 360.
- IPCC, *Climate Change 1995, 1996: The Science of Climate Change*, Intergovernmental Panel on Climate Change. J.T. Houghton y otros, Cam Univ Press.
- IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Intergovernmental Panel on Climate Change Watson, R.T. and the Core Writing Team, Cam Univ Press
- Jones, P.D. K.R. Briffa, T.P. Barnett, and S.F.B. Tett, 1998a, "High-resolution Palaeoclimatic Records for the last Millennium: Interpretation, Integration and Comparison with General Circulation Model Control-run Temperatures", *The Holocene* 8: 455-471.
- Jones, P.D., K.R. Briffa, T.P. Barnett, and S.F.B Tett, 1998b, *Millennial Temperature Reconstructions*. IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series #1998-039. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.
- Jorgensen, T.S. y Hansen, A.W., 2000. Comments on "Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships" by H. Svensmark y E. Friis-Christensen 1999. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 62:73-77.
- Kirkby, J. y Kristiansen, J. 2000. Solar variability and clouds. *Space Sci. Rev.*, 94: 397-409.
- Kniveton, D.R. y Todd, M.C., 2001. On the relationship of cosmic ray flux and precipitation, *Geophys. Res. Lett.*, 28: 1527-1530.
- Kristjánsson, J.E. y Kristiansen J. 2000. Is there a cosmic ray signal in recent variations on global cloud cover and cloud radiative forcing?, *J. Geophys. Res.*, 105: 11851-11863.
- Kristjánsson, J.E., 2001. Latest new on cosmic rays and clouds. *Cicerone (Noruega)*, 1: 1-5.
- Kuang, Z., Jiang, Y. y Yung, Y., 1998. Cloud optical thickness variations during 1983-1991: Solar cycle or ENSO? *Geophys. Res. Lett.*, 25: 1415-1425.
- Lpckwood, M.R., Stamper, R. y Wild, M.N., 1999. A doubling of the Sun's coronal magnetic field during the past 100 years. *Nature*, 399: 437-439.
- Luterbacher, J., Rickli, R., Xoplaki, E. Tinguely, C., Beck, C., Pfister, C. y Wanner, H., 2001. The late Maunder Minimum (1690-1715), a key period for studying decadal climate change in Europe. *Clim. Chan.*, 49: 441-462.

- Mallet, I., Cammas, J-P., Mascart, P. y Bechtold, P., 1999. Effects of cloud diabatic heating on the early development of the FASTEX IOP17 cyclone. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 125:3439-3467.
- Mann, M.E. y Jones, P.D., 2003. Global Surface Temperatures over the Past Two Millennia. *Geophys. Res. Lett.* 30 (15): 1820, doi: 10.1029/2003GL017814
- Marsh, N.D. y Svensmark, H., 2000. Low cloud properties influenced by cosmic rays. *Phys. Rev. Lett.*, 23: 5004-5007.
- Marsh, N. D., and H. Svensmark 2003. Galactic cosmic ray and El Nino-Southern Oscillation trends in ISCCP D2 low-cloud properties, *J. Geophys. Res.* 108(D6): 4195-4205, doi: 10.1029/2001JD001264
- Mc Cracken, K.G. y McDonald, F.B., 2001. The long term modulation of the galactic cosmic radiation, 1500-2000, Proceedings of the international Cosmic Ray Conference, Copernicus Gesellschaft.
- Mc Donald, N.J. y Roberts, W.O., 1960 Further evidence of a solar corpuscular influence on large scale circulation at 300 mb. *J. Geophys. Res.* 65: 529-534.
- Mursula, K., Usoskin, I.G. y Kovaltsov, G.A., 2003. Reconstructing the longterm cosmic ray intensity: linear relations do no work. *Ann. Geoph.*, 21: 863-867.
- Ney, E.R., 1959. Cosmic radiation and weather. *Nature*, 183: 451-452.
- Norris, J.R. 2000. What can cloud observations tell us about climate variability? *Space Sci. rev.*, 94: 375-380.
- Palle, E. y Butler, C.J., 2000. Sunshine, clouds and cosmic rays. Proceedings of the first SOLSPA Euroconference, Canary Islands,.
- Rind, D. 2002. The Sun's role in Climate Variations. *Science*, 296: 673-677.
- Roberts, W.O. y Olson, R.H., 1973. Geomagnetic storms and wintertime 300 mb trough development in the North Pacific-North America area. *J. Atmos. Sci.*, 30: 135-140.
- Shindell, D., Rind, D., Balachandran, N., Lean J. y Lonergan, P., 1999. Solar cycle variability, ozone and climate. *Science*, 284: 305-308.
- Shindell, D.T., Schimdt, G.A., Mann, M.E., Rind, D. y Waple, A., 2001. Solar forcing of regional climate change during the Maunder Minimum. *Science*, 294: 2149-2152.
- Svensmark, H. y Friis-Christensen, E. 1997. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage: a missing link in solar-climate relationships. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 59: 1225-1232.
- Svensmark, H., 1998. Influence of cosmic rays on Earth's climate. *Phys. Rev. Lett.*, 81: 5027-5030.
- Svensmark, H. 2000, Cosmic rays and Earth's climate. *Spac. Scien. Rev.*, 93: 155-166.
- Tinsley, B.A. y Deen, G.W. 1991. Apparent tropospheric response to MeV-GeV particle flux variations: A connection via electrofreezing of supercooled water in high level clouds? *J. Geophys. Res.* 96: 22283-22296.
- Tinsley, B.A., 1996. Correlations of atmospheric dynamics with solar wind-induced changes in air-earth current density into cloud tops, *J. Geophys. Res.*, 101(29): 701-710.
- Tinsley, B.A. Rohrbaugh, R.P. y Kirkland M., 1998. South pole electric field responses to overhead ionospheric convection, *J. Geophys. Res.* 103: 26137-26146.
- Tinsley, B.A., Rohrbaugh, R.P., Hei, R.P y Beard, K.V., 2000. Effects if image charges on the scavenging of aerosol particles by cloud droplets, and on droplet charging and possible ice nucleation processes. *J. Atmos. Sci.*, 57:2118-2134.
- Tinsley, B.A. 2000. Influence of Solar Wind on the Global Electric Circuit, and Inferred effects on Cloud Microphysics, Temperature, and Dynamics in the Troposphere. *Space Sci. Rev.* 94 (1-2): 231-258
- Tinsley, B.A. Rohrbaugh, R.P. y Hei, M. 2001. Electroscavenging in clouds with broad droplet size distributions and weak electrification, *Atmosph. Res.* 59-60: 115-135.
- Tinsley, B.A. y Yu, F., en prensa. Atmospheric ionization and Clouds as Links Between solar Activity, en AGU monograph: Solar Variability and Its Effects on the Earth's Atmospheric and Climate System. Disponible en www.utdallas.edu/dept/physics/Faculty/tinsley/tinsley.htm
- Van Dedlen, A., 1989. On the deepening and filling of balanced cyclones by diabatic heating. *Meteor. Atmos. Phys.*, 41: 127.
- Wigley, T.M.L. y Raper, S.C.B., 1990. Climatic change due to solar irradiance changes . *Geophys. Res. Lett.*, 17: 2169-2172.
- Yu, F. y Turco, R.P., 2000. Ultrafine aerosol formation via ion-mediated nucleation, *Geophys. Res. Lett.*, 27(6): 883-892.
- Yu, F. y Turco, R.P., 2001. From molecular clusters to nanoparticles: Role of ambient ionization in tropospheric aerosol formation, *J. Geophys. Res.* 106: 4797-4810.
- Yu, F. 2002, Altitude variations of cosmic ray induced production of aerosols: Implications for global cloudiness and climate, *J. Geophy. Res.*, 107(A7), 10.1029/2001JA000248.
- Zimmerman, J.E., Smith, P.J. y Smith, D.R. 1989. The role of latent heat release in the evolution of weak extratropical cyclone, *Mon. Wea. Rev.*, 117: 1039-1057.