

El centelleo interplanetario y el viento solar



La astronomía moderna cuenta con métodos antes inimaginables. Hoy, gracias a la técnica del centelleo interplanetario, podemos conocer con más detalle las características de los cuerpos celestes.

**Román Pérez Enríquez, Armando Carrillo Vargas,
José A. López CruzAbeyro, A. Kotsarenko,
Américo González Esparza, Xóchitl Blanco Cano,
Stanley Kurtz y Ernesto Andrade Mascote**

En el estudio del impacto de la actividad solar sobre el ambiente terrestre, el medio interplanetario juega un papel muy importante. La técnica de centelleo interplanetario permite el monitoreo remoto de concentraciones de plasma en el viento solar entre el Sol y la Tierra, lo que se conoce como la *heliosfera interna*. La heliosfera es la región controlada por el plasma y el campo magnético del Sol. Se piensa que la heliosfera se extiende a más de 100 unidades astronómicas, es decir, más de cien veces la distancia entre el Sol y la Tierra. La técnica de centelleo interplanetario da también la posibilidad de calcular si una estructura de gran escala específica se mueve en dirección a nuestro planeta, así como su tiempo aproximado de arribo al ambiente terrestre. Dado que estas estructuras llevan consigo flujos intensificados de energía que generan actividad geomagnética y otros posibles efectos sobre la atmósfera y la tecnología, las mediciones de centelleo interplanetario son importantes para pronosticar dicha actividad.

El centelleo interplanetario se basa en el hecho de que la amplitud de las señales de radio que pasan a través de la heliosfera interna es modulada por el movimiento de irregularidades del plasma del viento solar que atraviesan la línea de visión (Figura 1). Esta modulación es lo que se conoce como centelleo interplanetario. La amplitud del centelleo es proporcional a la amplitud de las fluctuaciones de la concentración de plasma.

Hewish y Duffett-Smith (1987) utilizaron datos de centelleo interplanetario para un periodo de 14 meses cerca del máximo del ciclo de actividad solar 21, y reportaron que las 16 tormentas geomagnéticas con un índice geomagnético alto que ocurrieron durante el periodo iban precedidas (entre 1 y 7 días) por ob-

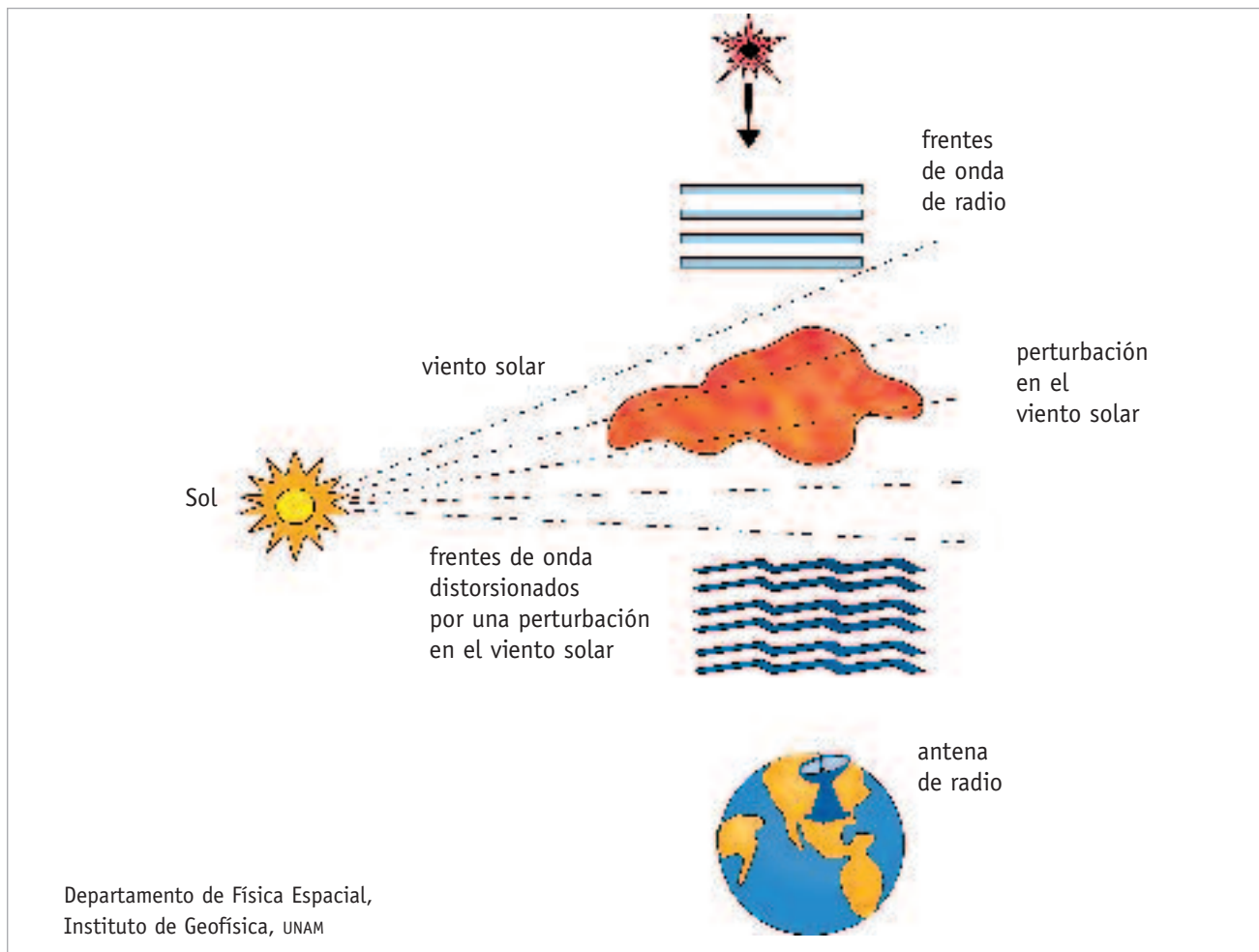


Figura 1. Generación de centelleo cuando una señal electromagnética atraviesa una región de plasma, como es el viento solar.

Lucek, Clark y Moore examinaron los mapas de centelleo interplanetario producidos en el Observatorio de Cambridge y encontraron un número importante de falsas alarmas

servaciones de centelleo intensificado. Estos resultados sugieren una relación entre el centelleo intensificado y la actividad geomagnética. Lucek, Clark y Moore (1996) han cuestionado los resultados anteriores porque aun cuando hay observaciones de perturbaciones de centelleo interplanetario que preceden a la actividad geomagnética, hay dudas acerca de la significancia estadística de la correlación entre la intensificación del centelleo y la actividad geomagnética. Estos autores examinaron los mapas de centelleo interplanetario producidos en el Observatorio de Cambridge y encontraron un número importante de falsas alarmas.

LIMITACIONES DEL CENTELLEO INTERPLANETARIO

Algunas limitaciones del centelleo interplanetario son las siguientes:

Las estructuras de densidad que no llegan a la Tierra. En efecto, la técnica de centelleo interplanetario es adecuada para de-

tectar estructuras de densidad sólo a un cierto ángulo, llamado *elongación*, con respecto a la dirección del Sol.

Orientación del campo magnético interplanetario. Dado que el centelleo interplanetario detecta estructuras de densidad pero no tiene necesariamente una buena correlación con la componente sur del campo magnético interplanetario, que ha mostrado ser uno de los elementos esenciales para una buena conexión Sol-Tierra, se espera que haya un buen número de eventos de centelleo interplanetario que no estén asociados con la intensificación de la actividad geomagnética.

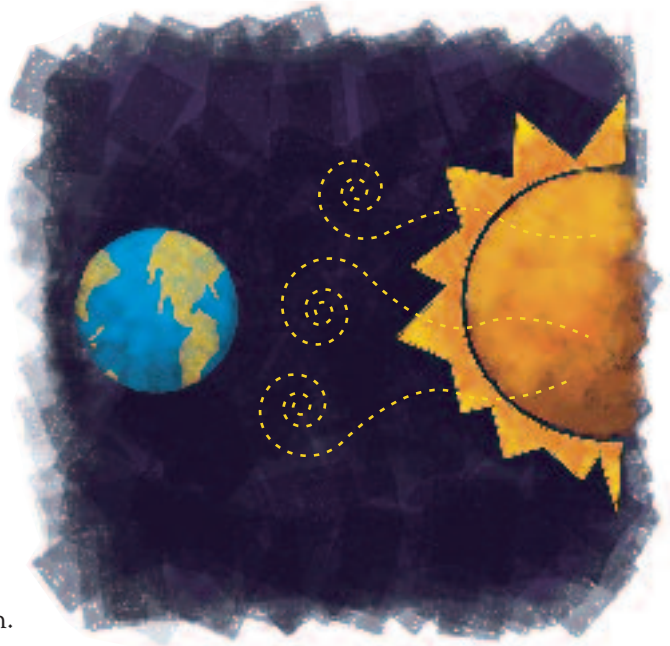
Centelleo ionosférico. Ésta es una señal adicional que puede confundir nuestra interpretación del centelleo interplanetario. Puede ser disparado por actividad geomagnética, y puede por tanto ocurrir junto con los eventos reales de centelleo interplanetario que se supone predicen.

Efectos estacionales. El centelleo interplanetario detecta estructuras de densidad cuando éstas se encuentran a un cierto ángulo de la línea Sol-Tierra, por lo que presenta marcadas variaciones estacionales.

Muestreo limitado. Existen pocos instrumentos dedicados a la investigación de centelleo interplanetario.

A reserva de explicar los diferentes instrumentos que se utilizan para llevar a cabo las mediciones del centelleo, se pueden señalar algunas formas de minimizar estos problemas. En México, por ejemplo, el radiotelescopio de centelleo interplanetario (MEXART, por sus siglas en inglés) opera a una frecuencia de 140 megahertz, comparado con los 89 megahertz del radiotelescopio de Cambridge; así que, en primera instancia, el rango de visión del MEXART es mayor, y los efectos ionosféricos son menores. Más aún, se está considerando la instalación de un sistema de posicionamiento global (GPS) para monitorear el centelleo ionosférico, de tal manera que los datos de centelleo interplanetario puedan ser corregidos respecto a una posible contaminación ionosférica. La localización del instrumento cerca del Ecuador llevará a una menor dependencia estacional. Finalmente, el problema de la orientación del campo magnético interplanetario se puede eliminar con una buena modelación de la interacción del viento solar con la magnetosfera terrestre, lo cual ya se viene realizando en diferentes laboratorios del mundo.

La técnica del centelleo interplanetario tiene un gran potencial para estudiar la estructura del medio interplanetario y rastrear perturbaciones de origen solar que puedan tener consecuencias para el medio terrestre, lo que se conoce como “clima espacial”. Para ello, describiremos primero cómo se construyen



La técnica del centelleo interplanetario tiene un gran potencial para estudiar la estructura del medio interplanetario y rastrear perturbaciones de origen solar que puedan tener consecuencias para el medio terrestre, lo que se conoce como “clima espacial”

los mapas de centelleo, los instrumentos que existen actualmente y los que se están construyendo para estudiarlo, las técnicas numéricas que se utilizan para extraer la información, y cómo el centelleo se puede utilizar para estudiar otro tipo de fenómenos, como la turbulencia hidromagnética del viento solar, y cómo esto puede ayudar a estudiar la estructura de plasma del medio interplanetario en regiones cercanas al Sol.

MAPAS DE CENTELLEO INTERPLANETARIO

Aunque el interés principal del centelleo es el estudio del Sol, con la técnica de centelleo no se observa el Sol directamente. Los mapas de centelleo se construyen a partir de la observación de fuentes de radio muy lejanas que se encuentran a un cierto ángulo con respecto al Sol. Qué tan cerca del Sol se pueden detectar las fuentes, depende de la frecuencia de observación del instrumento. Entre más alta la frecuencia de observación, más cerca del Sol se puede observar el cielo en busca de fuentes. Las fuentes estelares pueden ser todo tipo de objetos por demás extraños, tales como cuasares, núcleos activos de galaxias, radiogalaxias, etcétera. No importa mucho qué sean, sino

que se pueda detectar su señal. A diferencia de las observaciones astronómicas de un objeto en las que la señal se corrige para “ver” más nítidamente un objeto, el propósito del centelleo es eliminar la señal y estudiar solamente el ruido asociado con ella. Este ruido, como ya hemos mencionado, es producido en el medio interplanetario, por lo que se puede utilizar para estudiarlo.

Una vez que se tienen detectadas un número importante de fuentes, se observan por un cierto tiempo con el fin de determinar su centelleo normal, es decir, aquel ruido o centelleo intrínseco de determinada fuente, y se procede a calcular su índice de centelleo diario, g . El índice g es una medida del nivel de centelleo de todas las fuentes en una parte del cielo que se encuentran en un plano perpendicular a la línea Sol-Tierra. No obstante que la señal representa una integración a lo largo de la línea de visión entre el observador y la fuente, la mayor contribución al centelleo proviene del punto en donde la línea de visión pasa más cerca del Sol, dado que allí es donde la densidad del medio interplanetario es mayor. Una vez obtenidos los valores de g , éstos se asignan, según la localización de la fuente en el día en cuestión, a un cierto punto (o píxel) en un mapa que representa el plano del cielo. En la Figura 2 se ilustra uno de estos mapas, obtenido con el radiotelescopio de Cambridge, Inglaterra.

INSTRUMENTOS PARA LA DETECCIÓN DEL CENTELLEO INTERPLANETARIO

Es necesario empezar por la descripción del primer instrumento de este tipo: el Observatorio de Cambridge, Inglaterra. Este instrumento ya no se encuentra en operación; de él sólo contamos con datos de algunos años. No obstante, como veremos más adelante, estos datos se siguen utilizando hoy en día. El arreglo de gran área de Cambridge tenía como características principales un área física de 21 mil 150 metros cuadrados, y su frecuencia central de operación era de 81.5 megahertz, con un ancho de banda de 1 megahertz. El arreglo de antenas operaba como un interferómetro; es decir, que estaba dividido eléctricamente en dos partes iguales sobre un eje este-oeste. Del estudio original de 2 mil 500 fuentes de radio, sólo 900 presentaron un centelleo suficiente-

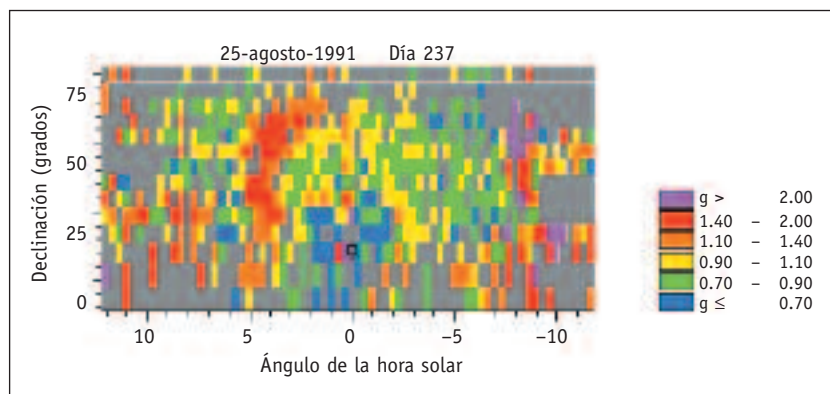


Figura 2. Mapa de centelleo interplanetario obtenida con datos del radiotelescopio de Cambridge, Inglaterra.

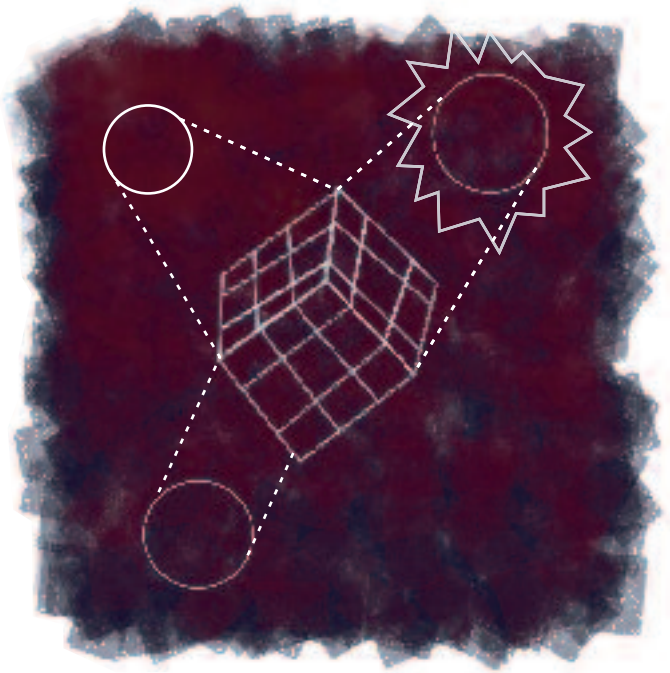
mente intenso como para ser consideradas en la generación de los mapas de centelleo y en el cálculo de la velocidad del viento solar.

En la India se utiliza otra técnica para los estudios de centelleo. De un proyecto original de tres arreglos de antenas dipolares, sólo el radiotelescopio de Thaltej funcionó por un tiempo. Es un arreglo de antenas de gran área, que consiste en 2 mil 48 dipolos, con una frecuencia central de 103 megahertz y un ancho de banda de 1 megahertz. El arreglo está dividido eléctricamente en dos partes iguales, en configuración norte-sur. En sus años de operación, el arreglo alcanzó a detectar hasta 500 fuentes. Se espera que las observaciones continúen en un futuro próximo.

En 1970 empezó a operar otro instrumento en la India: el gran radiotelescopio de Ooty, con capacidad para realizar observaciones continuas del cielo encaminadas a realizar estudios de pulsares, cuasares, radiogalaxias y viento solar. La frecuencia central de operación del radiotelescopio de Ooty es de 327 megahertz, con un ancho de banda de 4 megahertz. El arreglo está constituido por mil 56 dipolos polarizados en la dirección norte-sur, divididos en módulos de 48 dipolos cada uno. Con este instrumento se han podido catalogar más de 500 fuentes de radio estelares con un centelleo interplanetario bien definido.

La Universidad de California en San Diego opera el Arreglo de Gran Área, ubicado en La Jolla, el cual inició operaciones en 1972. Está construido con base en tres arreglos de 256 antenas periódicas con un área física de alrededor de 4 mil 900 metros cuadrados, operando en una frecuencia central de 73.8 megahertz, con un ancho de banda de 2 megahertz. Las observaciones realizadas diariamente en la Universidad de California desde 1972 han permitido catalogar más de 500 fuentes de radio estelares, para ser usadas en los mapas de centelleo.

En 1970, el Observatorio Solar de Toyokawa, en Japón, inició sus operaciones con un radiotelescopio que inicialmente tenía el objeto de detectar perturbaciones de gran escala en el viento solar, en una región más bien lejana al Sol (a una distancia mínima de 0.5 unidades astronómicas). El instrumento, que es también un arreglo de antenas en una estructura cilíndrico parabólica asimétrica, parecido al de Ooty, India, fue modificado en los ochenta para cambiar su frecuencia de operación a 327 megahertz, logrando con ello ampliar las observaciones a una región más cercana al Sol, hasta una distancia mínima de 0.2 unidades astronómicas. El seguimiento de las fuentes ha



En 1970 empezó a operar otro instrumento en la India: el gran radiotelescopio de Ooty, con capacidad para realizar observaciones continuas del cielo encaminadas a realizar estudios de pulsares, cuasares, radiogalaxias y viento solar

permitido a los japoneses concentrarse en la medición de la velocidad del viento solar por varias décadas.

El Radar Europeo de Dispersión Incoherente (EISCAT) realiza desde 1990 operaciones rutinarias para estudiar el viento solar. Consta de dos sistemas: uno de frecuencia ultra alta, a 931.5 megahertz, con un ancho de banda de 8 megahertz, y otro de frecuencia muy alta, a 224 megahertz, con un ancho de banda de 3 megahertz. Con el Radar Europeo se ha logrado estudiar el viento solar en una región entre 10 y 120 radios solares, empleando por lo general un grupo de 20 fuentes de radio estelares (dependiendo de la época del año). El sistema de ultra alta frecuencia del Radar Europeo es especialmente bueno para medir la velocidad del viento solar, debido a la gran distancia entre sus antenas.

Se está terminando la construcción del Arreglo de Gran Área en México (MEXART), que consiste de 4 mil 96 antenas, en un arreglo de

64 líneas en dirección este-oeste, contando cada una con 64 dipolos. El radiotelescopio estará ubicado en Coeneo, Michoacán. La frecuencia central de operación es de 139.5 megahertz, con un ancho de banda de 1.5 megahertz. El área total de la antena es de 10 mil metros cuadrados, y el elemento básico de detección en arreglo es un dipolo de onda completa. A mediados de este año se iniciaron las observaciones rutinarias operando con 16 líneas (para más detalles ver González-Esparza y colaboradores, 2004).

LA ESTRUCTURA TRIDIMENSIONAL DEL MEDIO INTERPLANETARIO

El centelleo interplanetario es actualmente la única manera de estudiar la estructura tridimensional del viento solar, dado que no requiere de la presencia física de un instrumento en toda la zona para medir sus componentes. Mediante esta técnica es posible detectar la presencia de grandes estructuras de plasma en el medio interplanetario que se originan en el Sol y se mueven a través del viento solar, lo que permite estudiarlas con cierto detalle, pero también permite estudiar el propio medio, como la turbulencia hidromagnética. A este respecto, recientemente Pérez-Enríquez y colaboradores (2005) analizaron los datos de centelleo obtenidos con el radiotelescopio de Cambridge para el periodo 1991-1994, con el fin de construir un índice diario, *G*, a partir de los índices *g*, por considerar que es representativo de la estructura de densidad de la heliosfera interna. La figura 3 muestra la serie de *G* para estos años. Como podemos ver, hay algunos huecos en los datos y, cuando la actividad solar es mayor, los datos se ven muy ruidosos.

Con el fin de extraer la información concerniente a la estructura subyacente en el centelleo, utilizamos dos técnicas de análisis: ondeletas (*wavelets*), y Fourier. El primero es una herramienta sumamente poderosa para detectar de manera eficiente facetas específicas como reconocimiento de patrones y filtrado direccional en señales e imágenes. El análisis de ondeletas fue de-

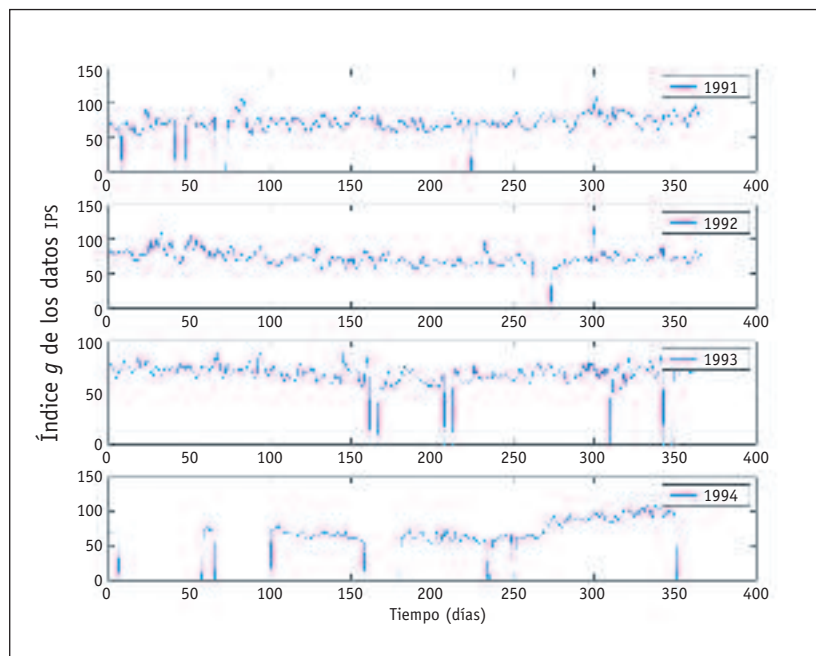


Figura 3. Serie de tiempo del índice *G* de centelleo del radiotelescopio de Cambridge, Inglaterra, para el periodo 1991-1994.

sarrollado originalmente para estudiar señales no estacionarias, pero ha resultado también excelente para la detección y análisis de estructuras fractales. El análisis de Fourier se refiere a la obtención de periodicidades en una señal, mostrando su distribución. Ambos análisis nos permiten visualizar la existencia de patrones y cuantificarlos (Figura 4).

Como se puede ver, el análisis de ondeletas muestra la existencia de patrones que se repiten a varias escalas, lo que se interpreta como estructura fractal, misma que es corroborada por la presencia de una ley de potencia aproximada, obtenida del análisis de Fourier.

Los resultados del análisis muestran evidencia de auto-organización en los datos, que es, de acuerdo con Nicolis (1989), la capacidad de un sistema que se encuentra fuera del equilibrio para moverse de un proceso estable a otro en un conjunto de procesos metaestables sin el control de un agente externo. Por otro lado, del análisis de Fourier se desprende que el índice espectral no es constante. Esto implica que G es realmente multi-fractal. Además, como se puede ver de la Figura 4, los diferentes índices tienen valores cercanos a uno, lo que puede ser indicativo de la llamada criticalidad auto-organizada. Este concepto fue introducido por primera vez por Bak y colaboradores en 1987, para explicar las propiedades invariantes de sistemas dinámicos complejos muy fuera del equilibrio. De acuerdo con estos autores, el estado natural de los sistemas disipativos inhomogéneos es uno en el cual no existen ni escalas temporales ni escalas espaciales; esto es, están en estado crítico.

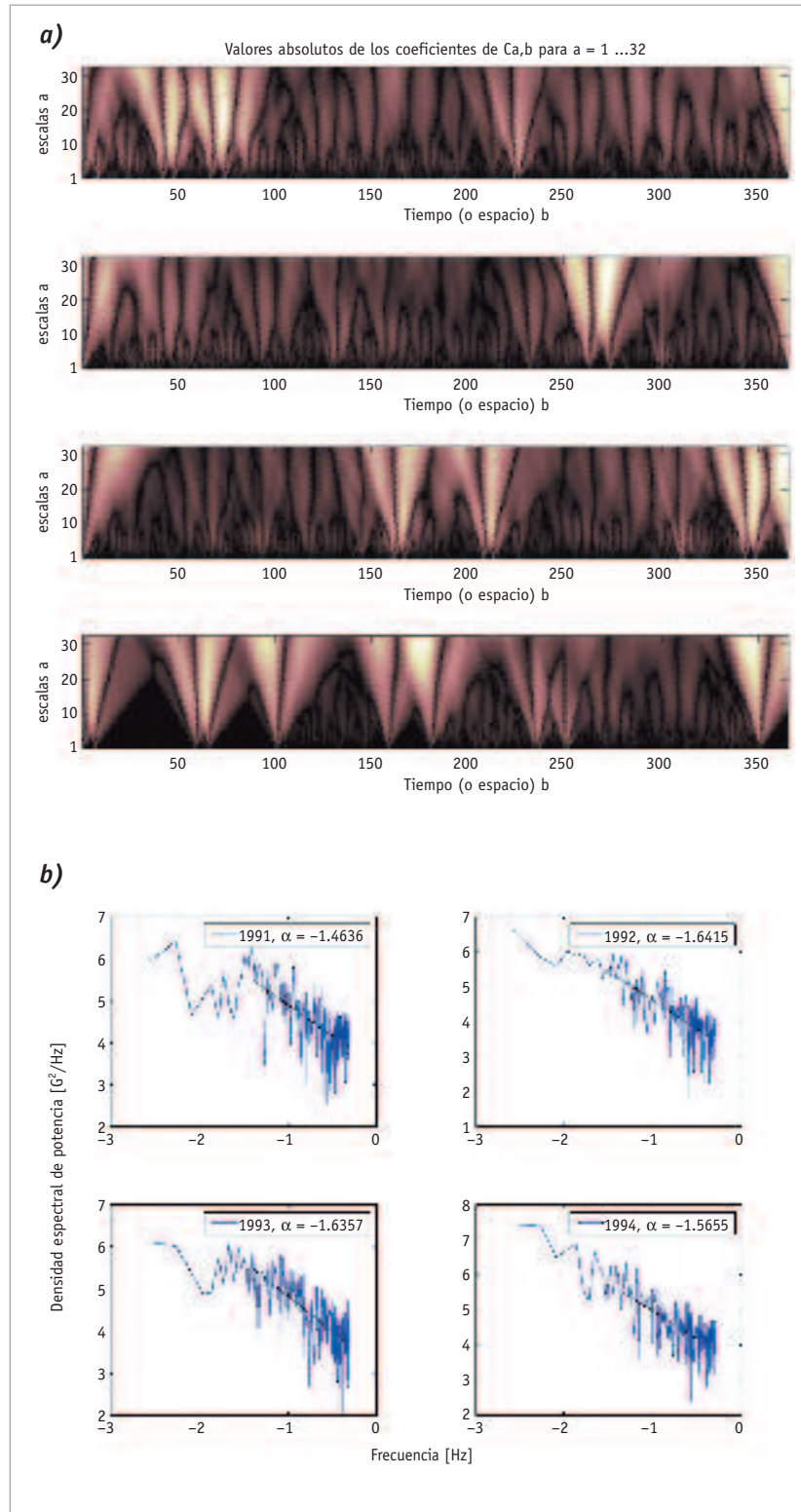
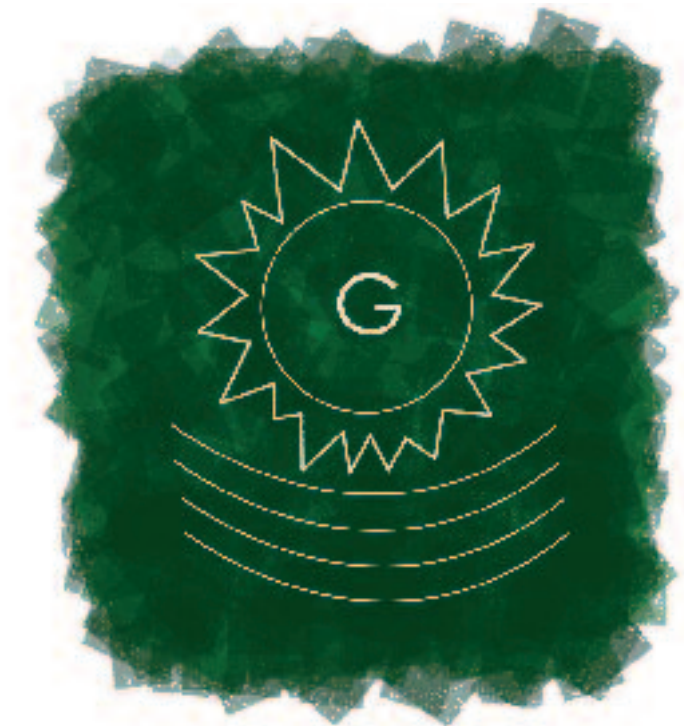


Figura 4. a) Resultados del análisis multiescala de ondeletas para el periodo 1991-1994. Las escalas involucradas van de 11.4 a 365 días. **b)** Espectro de potencias para el mismo periodo. Los índices espectrales son -1.065, -1.23, -1.55 y -1.11.

Consideramos que el trabajo conjunto de estos observatorios puede ser muy útil en la búsqueda de mecanismos para rastrear las grandes estructuras que, de venir en dirección de la Tierra, podrían tener un impacto sobre nuestro planeta y sus tecnologías

CONCLUSIONES

En este artículo hemos explicado una manera alternativa de estudiar el medio interplanetario y el viento solar. Hemos indicado los pros y contras de la técnica de centelleo interplanetario, señalando los lugares en el mundo que utilizan esta herramienta de manera rutinaria. Consideramos que el trabajo conjunto de estos observatorios puede ser muy útil en la búsqueda de mecanismos para rastrear las grandes estructuras que, de venir en dirección de la Tierra, podrían tener un impacto sobre nuestro planeta y sus tecnologías (ver artículo “Efectos de la actividad solar en el clima y la biota”, en este número de *Ciencia*). Asimismo, se ha descrito un modelo que muestra cómo, en el caso de la heliosfera interna, y en ausencia de eyecciones de masa coronal, el medio interplanetario parece tener un comportamiento de tipo fractal, de tal manera que, al menos durante ciertos periodos, el fenómeno parece entrar en el contexto de la tendencia natural de algunos sistemas para moverse hacia un estado crítico en ausencia de agentes externos. Hemos visto cómo este comportamiento se pierde cuando eventos asociados con la actividad solar, como son las eyecciones de masa coro-



nal, son más frecuentes. Por lo tanto, parece haber dos regímenes en el medio interplanetario, uno que es producido por la actividad solar y uno que es producido internamente por el fenómeno de auto-organización.

Bibliografía

- Bak, P., C. Tang y K. Wiesenfeld (1987), "An explanation of $1/f$ noise", *Physical Review Letters*, 59, 381, 1987.
- González-Esparza, A., A. Carrillo, E. Andrade, R. Pérez Enríquez y S. Kurtz (2004), "Construction of an Interplanetary Scintillation Array in Mexico: MEXART", *Geofísica Internacional*, 43, 61-73.
- Harrison, R. A., M. A. Hapgood, V. Moore y E. A. Lucek (1992), "An interplanetary scintillation index", *Annales Geophysicae* 10, 519-526.
- Hewish, A. y P. J. Duffett-Smith (1987), "A new method of forecasting geomagnetic activity and proton showers", *Planetary and Space Science*, 35, 487-491.
- Lucek, E. A., T. D. G. Clark y V. Moore (1996), "The use of various interplanetary scintillation indices within geomagnetic forecast", *Annales Geophysicae*, 14, (2)139-149.
- Nicolis, G. (1989), "Physics of far-from-equilibrium systems and self-organization", en P. Davis (comp.), *The New Physics*, Cambridge U. Press, págs. 316-347.
- Pérez-Enríquez, R., A. Carrillo y C. Rodríguez (2005), "Fractal character of G index of IPS data for the period 1991-1994, obtained from multi-scale wavelet analysis", *Advances in Space Research* (en arbitraje).

Román Pérez Enríquez es físico y doctor en geofísica espacial. Es investigador titular del Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y profesor del posgrado en Ciencias de la Tierra de la misma universidad. Pertenece al sistema nacional de investigadores. Su investigación se ha centrado en el impacto de la actividad solar sobre el medio terrestre. Actualmente participa en la construcción del Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario (MEXART) y es investigador responsable del Observatorio de Geoelectromagnetismo del Centro de Geociencias, en Juriquilla, Querétaro.
roman@geociencias.unam.mx

Armando Carrillo Vargas es graduado de la licenciatura en física de la Facultad de Ciencias de la UNAM, y de la maestría en física espacial del posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM. Es miembro del Departamento de Física Espacial, IGEF-UNAM desde 1991.

Es el responsable técnico del radiotelescopio de centelleo interplanetario de Coeneo, Michoacán. Sus líneas de trabajo principales son técnicas de calibración en radiotelescopía, técnica de centelleo interplanetario, detección y seguimiento de estructuras transitorias de gran escala en el viento solar.
acvips@fis-esp.igeofcu.unam.mx

José A. López CruzAbeyro es doctor en geofísica del posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM. Es miembro del Centro de Geociencias de la UNAM. Participa en el proyecto MEXART. Su especialidad son la física magnetosférica y las micropulsaciones magnéticas.
lcabeyro@geociencias.unam.mx

Anatoly Kotsarenko, doctorado en física teórica, Universidad Nacional de Kiev, Ucrania; investigador del Centro de Geociencias en Juriquilla, UNAM. Estudios actuales: coplamiento ionosfera-magnetosfera terrestres, fenómenos electromagnéticos que acompañan los terremotos y erupciones de volcanes.
kotsarenko@geociencias.unam.mx

Américo González es investigador titular del Instituto de Geofísica de la UNAM. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores y de la Academia Mexicana de Ciencias. Su especialidad son los plasmas espaciales y la modelación de ondas de choque interplanetarias. Es líder académico del MEXART.
americo@geofisica.unam.mx

Xóchitl Blanco Cano es investigadora en el Instituto de Geofísica de la UNAM y profesora del posgrado en Ciencias de la Tierra de la misma universidad. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores y a la Academia Mexicana de Ciencias. Se dedica al estudio de plasmas espaciales en diferentes entornos del Sistema Solar. Sus principales áreas de investigación son la física del viento solar, ondas e inestabilidades en plasmas espaciales, perturbaciones de gran escala en el viento solar, regiones de interacción del viento solar con planetas, antechoques, asteroides.
xbc@geofisica.unam.mx

Stanley Kurtz es investigador titular en el Centro de Radioastronomía y Astrofísica de la UNAM, campus Morelia. Se dedica a estudios radioastronómicos en general, pero sobre todo en el área de la formación de estrellas masivas y su impacto sobre el medio interestelar.
kurtz@astrosmo.unam.mx

Ernesto Andrade Mascote es egresado de la carrera de Ingeniero Mecánico Electricista de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la UNAM. Es técnico asociado del Departamento de Física Espacial, IGEF-UNAM, desde el 2000, cuando participó en el diseño y construcción del radiotelescopio de centelleo interplanetario en Teoloyucan, Estado de México. Actualmente es corresponsable técnico del Observatorio de Centelleo Interplanetario de Coeneo, Michoacán.
ernesammx@yahoo.com.mx