

¿Por qué estudiar señales electromagnéticas durante sismos?

J.A.L. Cruz-Abeyro*
R. Pérez Enríquez*
R. Zúñiga*
A. Kotsarenko*

Abstract

We make a review of the investigations that have been carried out in order to study the diverse manifestations of seismic activity to look for a better understanding of this phenomenon in a general way. To do that we describe the associate phenomenology, that means the seismic phenomena that take place in the lithosphere, atmosphere and ionosphere/magnetosphere and the related events. We show some important observations of different investigators as well as some micropulsations and seismic activity recorded in Mexico.

Resumen

Hacemos una revisión de las investigaciones que se han desarrollado para estudiar diversas manifestaciones de actividad sísmica con el fin de buscar un mejor entendimiento de este fenómeno en un contexto general. Para ello se hace una descripción de la fenomenología asociada, esto es el fenómeno sísmico que toma lugar en la litosfera, atmósfera e ionosfera/magnetosfera y sus eventos relacionados. Se presentan algunas observaciones importantes de diferentes investigadores así como algunas observaciones de pulsaciones geomagnéticas y actividad sísmica en México.

Introducción

A través de más una década de estudios se ha visto que el método electromagnético (EM) es prometedor en la investigación de la predicción de terremotos.

* Centro de Geociencias, UNAM, Campus UNAM-Juriquilla, Juriquilla, 76230, Qro., correos electrónicos: lcabeyro@geociencias.unam.mx; roman@geociencias.unam.mx; ramon@geociencias.unam.mx y kotsarenko@geociencias.unam.mx

Organizaciones como la “frontera internacional sobre investigación en terremotos” (Internacional Frontier Research on Earthquakes IFREQ (1996)) han contribuido a la ciencia de la predicción de terremotos, a través del estudio de los fenómenos electromagnéticos EM asociados a ellos.

El fenómeno EM asociado con terremotos ocurre en un amplio rango de bandas de frecuencia desde DC hasta VHF y están clasificadas en dos tipos: emisiones desde el origen del terremoto y transmisión de ondas electromagnéticas. Los investigadores asociados al tema se han enfocado a la emisión de señales de más baja frecuencia; este es el caso del registro en los cambios en DC (llamado el método VAN) y la emisión en la banda de las ondas ULF del campo geomagnético.

Los resultados más importantes en las medidas de DC (tipo VAN) han sido: la observación de cambios en los niveles de DC en la superficie de la tierra antes de los terremotos. Estos cambios en DC surgen antes de la ocurrencia de terremotos con magnitudes de Ms 5 dentro de los 20 km a la redonda donde se tiene las estaciones testigos. Se han detectado cambios también a mayores distancias epicéntricas (hasta 75 km) por el Internacional Frontier Research on Earthquakes IFREQ (1996). Se han observado señales que no empiezan al mismo tiempo en que se originan los terremotos, pero sí al tiempo de llegada de las ondas sísmicas. Quizás ellas son causadas por efectos electrocinéticos cerca de los electrodos de medición.

Por otro lado, se han llevado a cabo observaciones conjuntas de científicos japoneses, rusos y ucranianos en la banda ULF, quienes también han desarrollado hardware y software. Hay varios ejemplos de señales geomagnéticas ULF presísmicas que se han observado y con ello se han desarrollado modelos teóricos. Estos grupos de investigación cuentan con sistemas de redes de observación, de donde se han obtenido algunos resultados importantes: Por ejemplo, donde hubo una evidencia positiva de cambios ULF presísmicos fue en los terremotos de 1996 con Ms6.5, 6.3 de Kagoshima y en el terremoto de 1998 Ms6 de Iwate-san, donde hubo una correlación entre el nivel de anomalía magnética ULF y el de la actividad sísmica regional (Reporte de la Riken, 1996).

¿Qué significa la predicción de terremotos?

Qué podamos decir de antemano en cuanto a ¿cuándo? y ¿dónde? ocurrirá un terremoto y ¿qué tan grande puede ser? A estas tres incógnitas se le suele llamar elementos de la predicción de un terremoto. La predicción de un terremoto se puede clasificar en tres categorías: predicciones a largo, intermedio y corto plazo. Para el caso de corto plazo, es necesario tomar algún fenómeno natural observable como precursor y su asociación con el terremoto, lo cual se debe establecer científicamente. Una vez que esto es hecho, podemos decir con certeza que la “predicción científica del terremoto” se puede considerar y los resultados se pueden usar.

Historia

Desde el inicio de la sismología, uno de los principales objetivos ha sido la predicción de la ocurrencia de un terremoto (John Milne, 1986). J. Milne fue fundador de la Sociedad Sismológica Japonesa. Al poco tiempo de este acontecimiento sobrevino el terremoto de Noubi en 1891 de magnitud Ms8.0, y ocasionó la muerte de más de 7000 gentes. Al año siguiente se estableció el comité imperial de la investigación de terremotos y uno de sus fundadores fue Dairoku Kikuchi, quien dijo: “Uno de nuestros objetivos es averiguar si hay un método para predecir la ocurrencia de un terremoto, pero otro es buscar un plan racional para mitigar el desastre ocasionado por el terremoto”. Vemos pues que ya desde cien años atrás se visualizaba como hoy en día que los principales objetivos son la predicción del terremoto y la prevención del desastre.

Incidentalmente, con el gran terremoto de Kanto de 1923 de magnitud Ms7.9, el Comité Imperial en la Investigación de Terremotos se disolvió y se creó el Instituto de Investigación de Terremotos de la Universidad de Tokio. Cuando el nuevo Instituto se inició, el Dr. Torahiko Terada, el cual estaba muy involucrado en el nuevo Instituto, mencionaba que cuando un esfuerzo, tensión o fatiga estaba siendo aplicado a una estructura tan complicada como la corteza terrestre, es demasiado difícil prever o anticipar dónde ocurrirá la concentración de esfuerzos y dónde empezará la ruptura. Dijo además que un terremoto es un fenómeno en el cual aun una causa infinitesimalmente pequeña puede traer grandes efectos finitos. Esta visión se asemeja la idea de hoy en día de un “caos determinístico” o “un sistema auto organizado críticamente (*Self-Organized Criticality*)”. Terada menciona que un terremoto no es un problema meramente sismológico sino un problema de la física de la Tierra y que debe estudiarse en todos sus aspectos fenomenológicos.

Sin embargo la importancia que merecía la predicción de terremotos fue apreciada sólo por unos pocos investigadores pioneros, y el progreso en tales estudios se estancó. Por desgracia el desarrollo de la sismología ha girado alrededor de la teoría y medida de la propagación de ondas sísmicas. Pero poco después de la segunda guerra mundial, Japón fue embestido por dos grandes terremotos: el de Nankai de 1946 de magnitud Ms8.1 y el de Fukui de 1948 de magnitud Ms7.3, fue entonces que se intentó abordar de nuevo el problema de la predicción de terremotos pero aun así se tomó como algo raro y no se apreció.

Pero por ahí de los años 1960s tres sismólogos: K. Wadachi, C. Tsuboi y T. Hagiwara propusieron un plan de predicción de terremotos tomando en cuenta el status presente y los planes futuros para 1962 y públicamente mencionaron que el progreso de la ciencia terrestre pronto podría hacer posible la predicción de terremotos. El documento escrito por estos autores no solo sirvió como guía para los esfuerzos en la predicción de terremotos en Japón, sino también dio un fuerte impacto sobre los programas de predicción de terremotos en China, Estados Unidos y otros países.

En Japón, el programa nacional actual de predicción de terremotos comenzó en 1965. Desde entonces, el proyecto de 5 años se ha repetido hasta ahora. Pero durante el séptimo proyecto, 30 años después de iniciado, ocurrió el trágico terremoto de Hanshin-Awaji (Kobe EQ) en 1995 de una magnitud de Ms7.2, sin tener, por desgracia, predicción alguna a corto plazo.

Predicción de terremotos: la nueva ciencia

¿Es difícil la predicción de terremotos?... ¡¡¡Es ciertamente difícil mientras el punto de vista con el que se estudia tiene un marco de visión muy angosto como es la sismología ordinaria!!!. Sin embargo; si se le mira por encima, desde un punto de vista amplio, la situación es diferente. Por aproximación amplia queremos significar considerar ramas de la ciencia tales como el geoelectromagnetismo, la geoquímica y la hidrológica subterránea. El significado de tales campos de la ciencia sobre la predicción de terremotos no está necesariamente bien entendida entre los científicos así como con la sociedad en general.

El fenómeno de la ocurrencia de un terremoto corresponde a una fractura de gran escala de la corteza sólida terrestre. Aparentemente es un fenómeno natural que cubre un amplio panorama y no solamente la dinámica de un cuerpo elástico lineal. Por otra parte, lo que más preocupa a la comunidad científica es el estado de “pre-terremoto”, en el cual se genera una onda sísmica debido a la fractura. En otras palabras, lo que necesitamos es de conocimientos sobre una sismología de “prefractura”.

En un futuro quizás cercano, habrá una tecnología avanzada que nos podrá permitir ver con mayor detalle hacia el interior de la Tierra. El tiempo dirá, más pronto de lo que esperamos, cuando podamos monitorear visualmente en tiempo real la deformación de la superficie y el cambio de estado en el interior de la Tierra.

Los diferentes programas de investigación internacional se enfocan principalmente a los aspectos electromagnéticos (EM) como el método VAN (que es la medida del geopotencial de la tierra) desarrollado en Grecia, así como todas las posibles señales electromagnéticas en un amplio rango de frecuencias desde la banda ULF (*Ultra Low Frequencies*) hasta la banda VHF (*Very High Frequencies*).

El propósito de los programas de investigación en predicción de terremotos es lograr un entendimiento comprensible de los fenómenos electromagnéticos relacionados con terremotos. Por esta razón es necesario aportar conocimientos para el establecimiento de una ciencia de su predicción. En este sentido, la meta es establecer qué es lo que ocurre realmente, a través de las observaciones, y así clarificar sus mecanismos físicos y geolo-geofísicos, a través de experimentos, estudios teóricos y de campo.

Eventos M en rangos de frecuencias de DC a VHF asociados a terremotos

El estudio de fenómenos EM relacionados a la predicción de terremotos se remontan a Rikitake (1987). Desde entonces se han manejado dos grandes corrientes. Una es encontrar algunos cambios presísmicos en las propiedades de la Tierra, tales como la resistividad eléctrica y la magnetización. La otra, es detectar señales electromagnéticas precursoras. A ambas corrientes se les ha dado un seguimiento. A la fecha, la gran mayoría de los científicos dedicados al tema consideran válida la primera corriente pero, sin embargo, se han enfocado más a la segunda corriente, el de la detección de radiación EM, como son los trabajos pioneros de Sobolev (1975), Miyakoshi (1985), así como de Warwick *et al.* (1982), Gokhberg *et al.* (1982). Desafortunadamente, estos trabajos no fueron tomados en serio realmente por la comunidad geofísica por esa época.

El método VAN, que tuvo un gran impacto al principio de los años 80s, no fue aceptado en forma general, pero por lo menos ha creado controversias interesantes Geller, ed. (1996); Lighthill, ed. (1996). Al inicio de los años 90s. algunos resultados convincentes fueron reportados en ULF, Fraser-Smith *et al.* (1990); Kopytenko *et al.* (1993); Hayakawa *et al.* (1996). Motivados por estos, varios científicos empezaron a hacer mediciones EM a diferentes frecuencias, así como realizar estudios teóricos al respecto, ver Surkov and Pilipenko (1999); Surkov (1999). Así mismo, se ha intentado correlacionar los eventos sísmicos con observaciones que se llevan a cabo desde sondas y satélites que están muestreando regiones de la ionosfera en busca de ondas de plasma asociadas con las ondas sísmicas, ver por ejemplo Afonin *et al.* (1999); Sinelnikov and Chmyrev (1999).

Es importante hacer notar la presentación de trabajos respecto a predicción sísmica en la reunión anual de la Sociedad Geofísica Europea llevada a cabo en Niza en abril de 2002, EGS (2002), en la cual se considera con bastante aceptación el uso de señales ULF como precursores de terremotos.

El sismo de Kobe 1995

El sismo de Kobe de 1995 fue de gran impacto, ya que se observaron cambios electromagnéticos pre-sísmicos en diferentes rangos de frecuencias, los cuales fueron detectados por científicos que trabajaron ardua e independientemente en el problema, Fujinawa and Takahashi (1995); Hayakawa *et al.* (1996); Maeda (1996); Okamoto *et al.* (1996); Yamada and Oike (1996); Kushida y Cusida (1997).

La Figura 1 muestra los resultados obtenidos por los diferentes investigadores. Este es quizás el primer caso donde múltiples métodos detectaron posibles precursores para un terremoto, donde algunas estaciones estaban a cientos de kilómetros de distancia del epicentro.

Electro-magnetic anomalies before the Kobe EQ

(December 1, 1994 to February 28, 1995, 90 days)

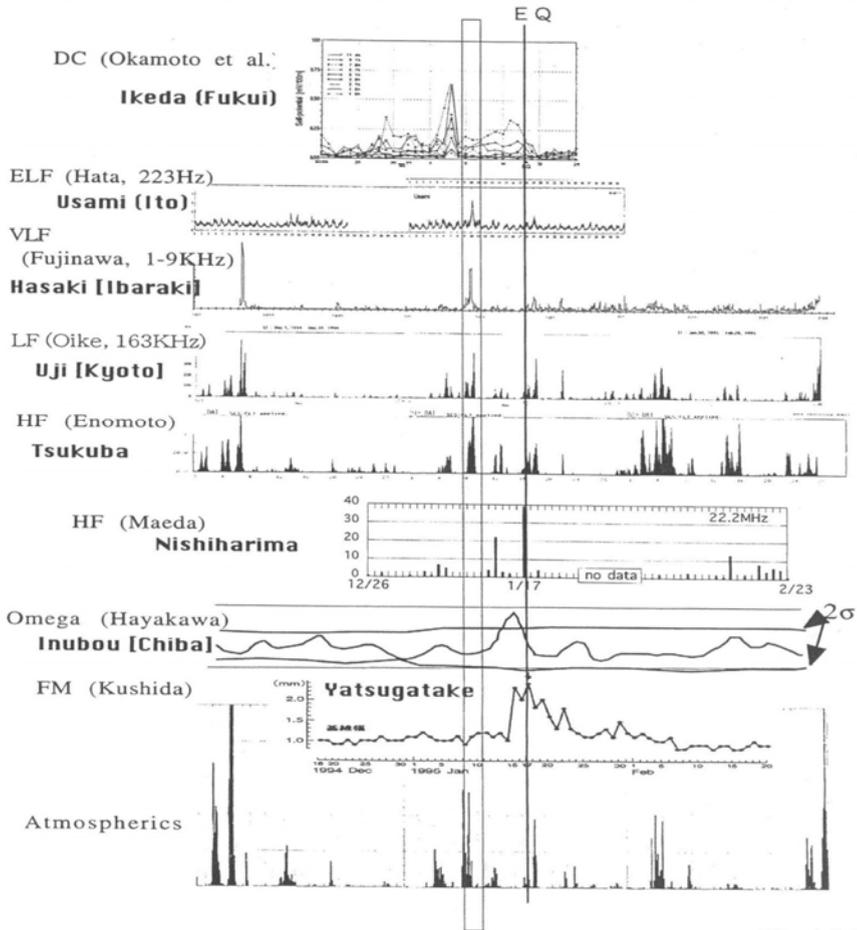


Figura 1. Sismo de Kobe de 1995, donde se aprecian los diferentes precursores EM.

Los datos presentados en la Figura 1 corresponden a: cambios en el geopotencial DC, Okamoto *et al.* (1996); máximos de señales de pulsos de radio ondas en la banda VLF (1-9 kHz), Fujinawa and Takahashi (1995); máximos en el número de espigas de ruido en la banda LF (163 kHz), Yamada and Oike (1996); emisiones en la banda 22.2MHz, Maeda (1996); comportamiento anormal en la banda VLF transmisión de onda Omega (ca. 10kHz), Hayakawa *et al.* (1996); dispersión de retroceso de onda en FM en la banda VHF (77.1 MHz) y medidas de atmosféricas por las compañías eléctricas, Kushida y Cusida (1997).

Los registros muestran señales simultáneas anómalas en las bandas ELF, VLF, LF, HF y se llevan a cabo 7 días antes del terremoto y normalmente las señales con altas frecuencias ocurren muy cerca de la ocurrencia del evento. Ellos aconsejan tener cuidado con el ruido producido por los relámpagos ya que generan señales similares.

Los métodos y la instrumentación usada por los científicos involucrados en este estudio, así como las bandas de frecuencias medidas se muestra en la Figura 2.

Las señales fueron clasificadas en dos grupos: en el primer grupo las señales supuestamente emitidas desde la fuente del terremoto como es el del caso VAN (se representan con una estrella) y las otras transmisiones anómalas de ondas electromagnéticas (se representan con un triángulo).

Basado en el evento de Kobe y otros datos, proponen la hipótesis de que generalmente los precusores de altas frecuencias ocurren cerca del choque principal como se muestra en el esquema de la Figura 3.

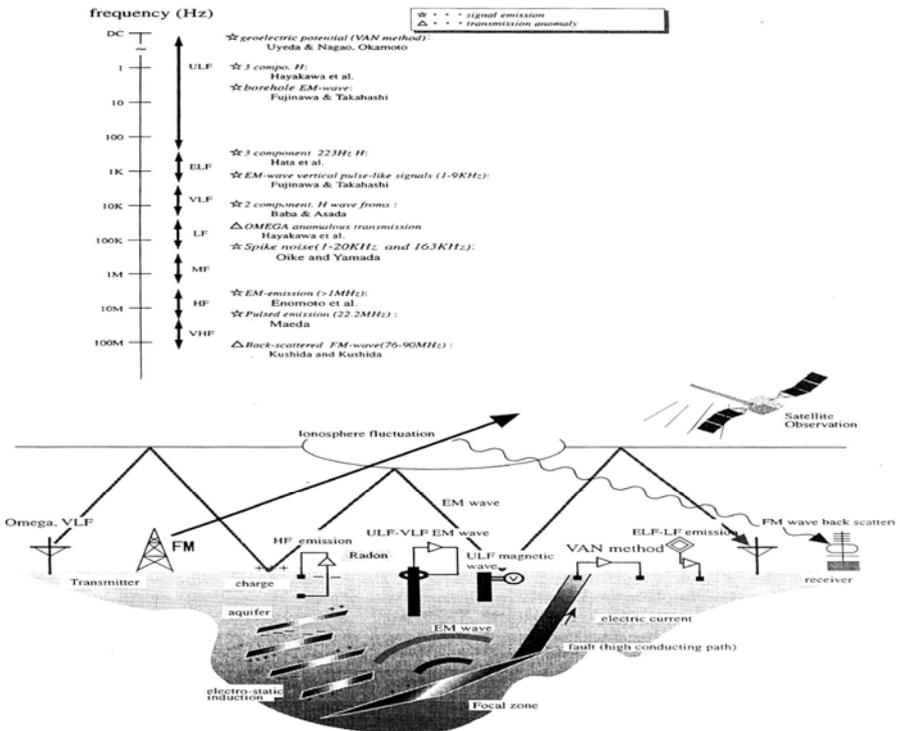


Figura 2. Esquema que muestra la instrumentación utilizada y las frecuencias EM involucradas.

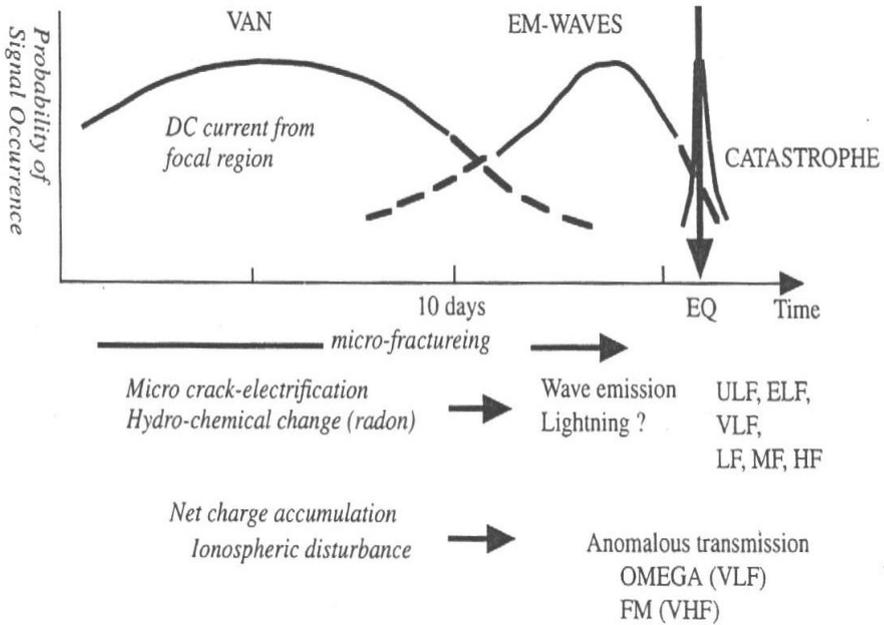


Figura 3. Esquema de ocurrencia de los precursores electromagnéticos.

Los resultados anteriores nos muestran la necesidad de llevar a cabo investigaciones posteriores serias del fenómeno electromagnético asociado a terremotos. Por otro lado los estudios en DC y ULF requieren estaciones localizadas en áreas amplias donde pueden participar diferentes universidades.

Existe actualmente un programa de cooperación internacional, en el cual los científicos están involucrados en los diferentes sistemas de registro de señales electromagnéticas. Cada grupo se encarga de la instalación y mantenimiento de sus estaciones, así como de la adquisición y análisis de los datos, por ejemplo el Dr. T. Nagao asesora en los registros en DC y el Dr. K. Hattori en la banda ULF como se muestra en el esquema de la Figura 4.

Terremoto de UAM de magnitud Ms. 7.1. ocurrido el 08 de agosto de 1993

La Figura 5 muestra la evolución temporal de la actividad ULF y la actividad geomagnética. Se muestran 8 intervalos donde los círculos blancos están relacionados con la actividad geomagnética, los círculos negros no están relacionados con la actividad geomagnética (posiblemente relacionado con el terremoto) y los medios círculos representan casos dudosos.

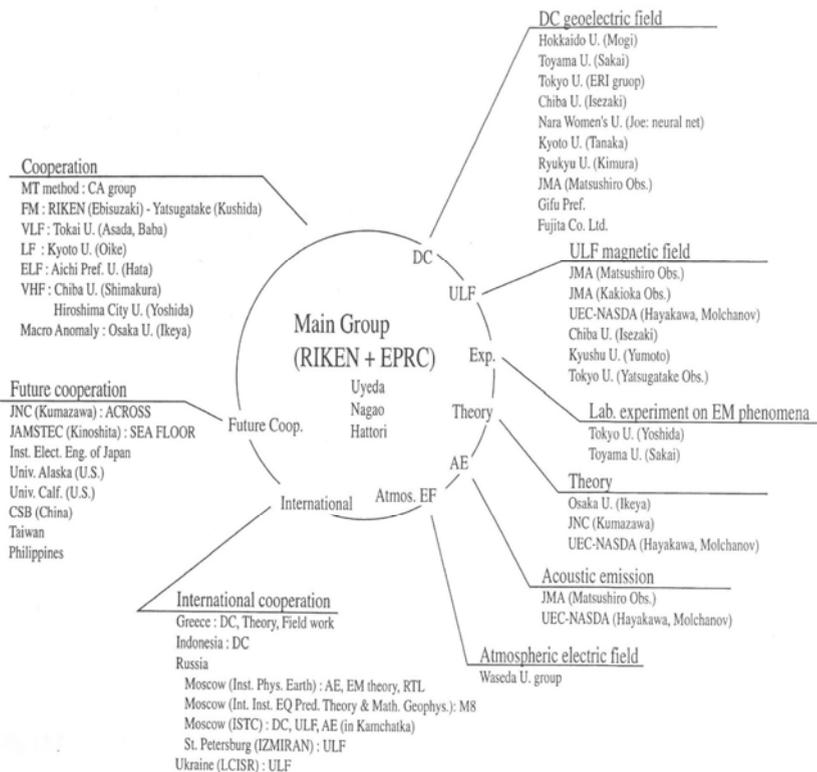


Figura 4. Esquema que muestra los diferentes participantes internacionales en la búsqueda de precursores electromagnéticos sísmicos.

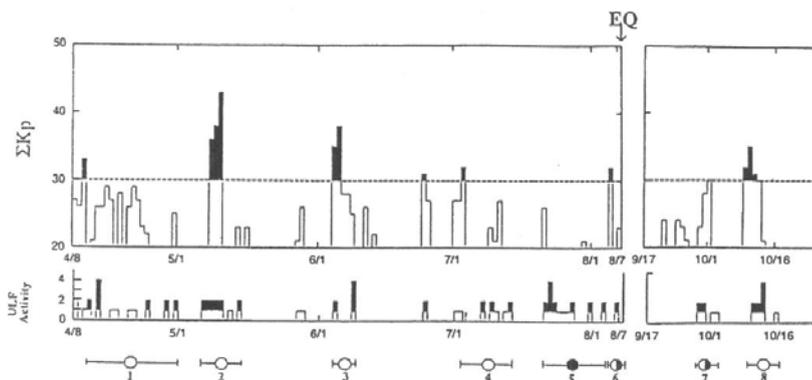


Figura 5. Evolución temporal de la actividad geomagnética y ULF previas al sismo de Guam.

Por otro lado, la Figura 6 nos muestra la evolución temporal del coeficiente de polarización (Z/H) sobre todo en el periodo de observación, esto es, 5 días. Este parámetro es muy importante para distinguir entre las pulsaciones geomagnéticas y otras emisiones. En esta Figura podemos ver un incremento gradual en el índice de polarización antes del sismo.

Terremoto de Spitak Armenia magnitud Ms 6.9, ocurrido el 8 de diciembre de 1988, datos del observatorio de Dusheti a 200 km del epicentro.

Los Registros en Dusheti de emisiones ULF del 7 y 8 de diciembre de 1988 antes del sismo, se muestran en la Figura 7, los cuales muestran una gran actividad antes del evento.

La Figura 8 muestra las variaciones de los valores medios diarios de la amplitud de la componente horizontal de las emisiones ULF registradas en dusheti en el rango de 0.1 a 1.0 Hz, durante el periodo de noviembre 14 de 1988 a marzo 5 de 1989. Notamos en esta gráfica un incremento en los valores medios antes del sismo y un decremento posterior después del mismo. El índice Kp muestra que la actividad geomagnética no varía antes, durante, y después del sismo.

Terremoto de Loma Prieta de magnitud M7.1 ocurrido el 17 de octubre de 1989

Las emisiones ULF mostradas en la Figura 9 se registraron con un magnetómetro de inducción de una componente, registrando en la banda de frecuencia entre 0.01 – 10 Hz. A continuación se describen las características observadas más importantes:

- a) Un incremento en la amplitud en una banda amplia de la emisión en las más bajas frecuencias, alrededor de 0.01 Hz, 12 días antes del choque principal.
- b) Tres horas antes del choque principal persiste un considerable incremento, alrededor de 5 veces.
- c) El nivel de amplitud en las más bajas frecuencias permanece muy alto por varios días después del choque principal y gradualmente va decreciendo al nivel de fondo en un intervalo de varios meses.

Trabajos anteriores en México

Varios trabajos se han realizado hasta la fecha para tratar de correlacionar sismos con señales electromagnéticas; como es el caso del trabajo de Yépez *et al.* (1999) con investigadores del Instituto Politécnico Nacional (IPN), de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), en el que hicieron un estudio de las variaciones en el campo eléctrico en la región de las ULF en seis estaciones en la costa del pacífico

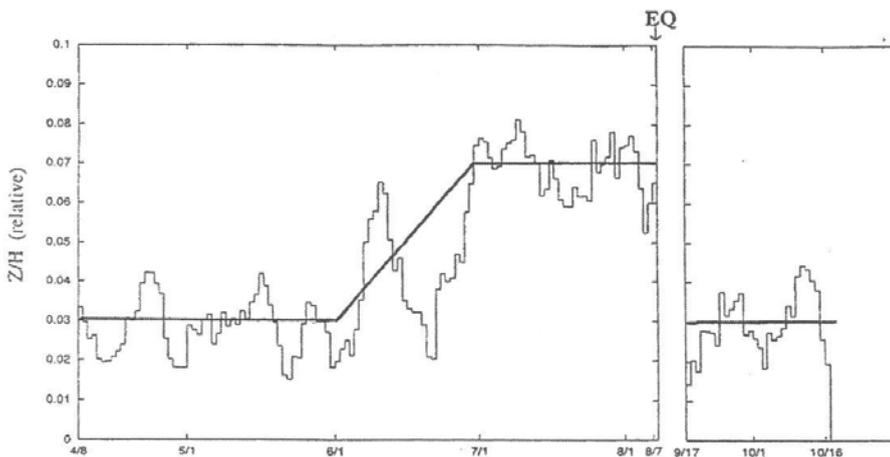


Figura 6. Gráfico que muestra la evolución temporal de la razón de polarización (Z/H) previo al sismo de Guam.

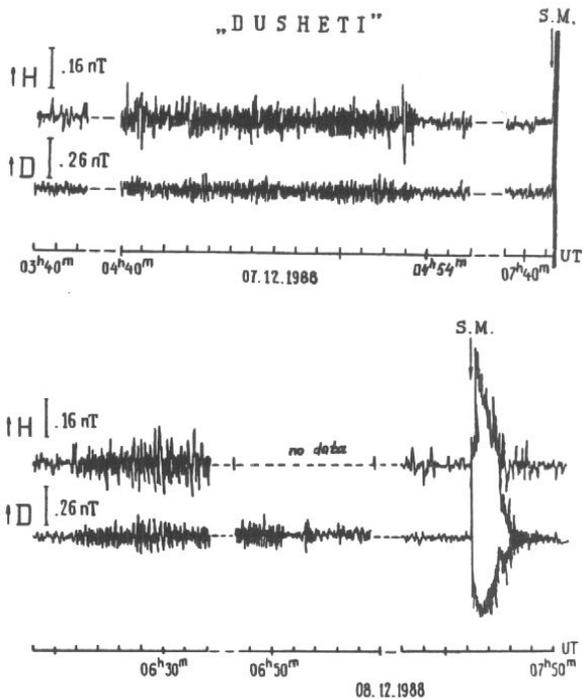


Figura 7. Registro de ondas ULF antes del sismo de Spitak, en el observatorio de Dusheti.

mexicano, analizaron el espectro de potencia de las señales buscando algún indicio precursor de la señal eléctrica antes de un sismo y notaron que en varios sismos con magnitud $M > 6$ se establecen cambios notables en el campo eléctrico medido varios meses antes del terremoto.

Self-Organized-Criticality (SOC) aplicado a sismos

Es importante hacer notar que el concepto de SOC (*Self-Organized-Criticality*) es actualmente usado ampliamente para la interpretación del comportamiento de sistemas naturales peligrosos que incluye el sistema tectónico de los terremotos, Smirnova, Hayakawa and Itoh (2000). Sabiendo que el principal aspecto del estado de SOC es una organización fractal de los parámetros de salida, ambos en espacio (escala invariante de la estructura) y en tiempo (ruido fluctuante $1/f$), se pueden usar métodos fractales para investigar el proceso dinámico a diferentes etapas de la preparación del evento catastrófico.

Smirnova, Hayakawa e Itoh (2000), han aplicado los métodos de fractales en el análisis de series de tiempo para buscar firmas precursoras de terremotos, con los datos ULF obtenidos en regiones sismo activas durante los terremotos de Guam en agosto 8 de 1993 (Ms8) y el terremoto de Biak de febrero 17 de 1996 (Ms8). Los sitios de observación estuvieron localizados a 65 km y 100 km, respectivamente, de los epicentros. La razón de muestreo de las señales fue de un segundo, lo cual permite analizar la densidad de potencia espectral de las señales ULF en el rango de frecuencia donde se encuentran las pulsaciones geomagnéticas ($f = 0.002 - 0.3$ Hz).

El periodo que escogieron cubre unos pocos meses antes y después de los terremotos, lo que les permitió dar a conocer la dinámica de gran escala de las características de escalamiento de las emisiones ULF (pendiente del espectro, dimensión fractal de las series de tiempo, etc.). Para excluir el efecto del tiempo local, los autores hicieron un análisis separado para los sectores del mediodía y noche.

Encontraron que el espectro de las emisiones exhiben, en promedio, un comportamiento de ley de potencia f^β , el cual es típico para la dinámica SOC. Para el terremoto de Guam las pendientes del espectro β y las dimensiones fractal D de las series de tiempo ULF manifestaron fluctuaciones estocásticas entre valores $\beta = 2.5 - 0.7$ y $D = 0.2 - 2.1$ con una pronunciada tendencia de la pendiente a decrecer, y para la dimensión fractal a crecer en el proceso de preparación del terremoto. Tomando en cuenta ciertos valores de la pendiente crítica β_c y la dimensión fractal crítica D_c , ellos sugirieron que el incremento gradual en los intervalos de tiempo de los valores en β disminuyendo y D incrementándose antes del terremoto se pueden considerar como firmas precursoras en lugar de los mismos valores críticos.

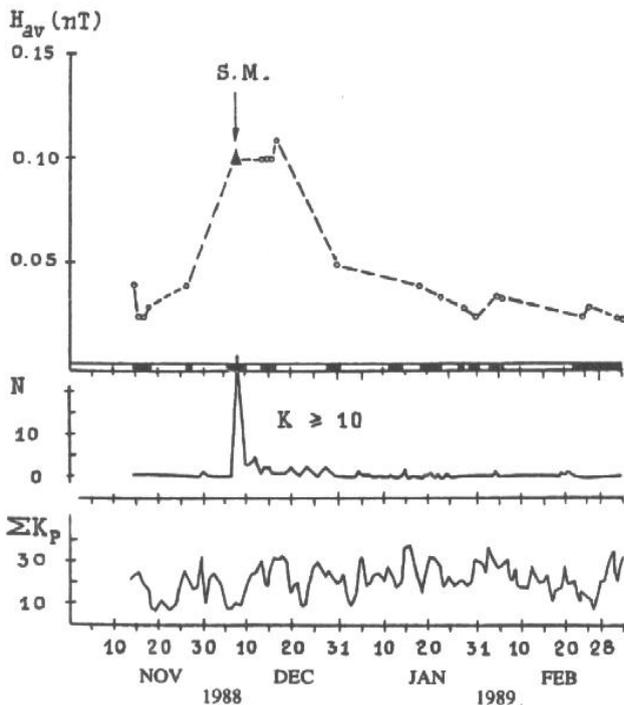


Figura 8. Variaciones de los valores medios diarios de la amplitud de la componente horizontal de las emisiones ULF registradas en Dusheti.

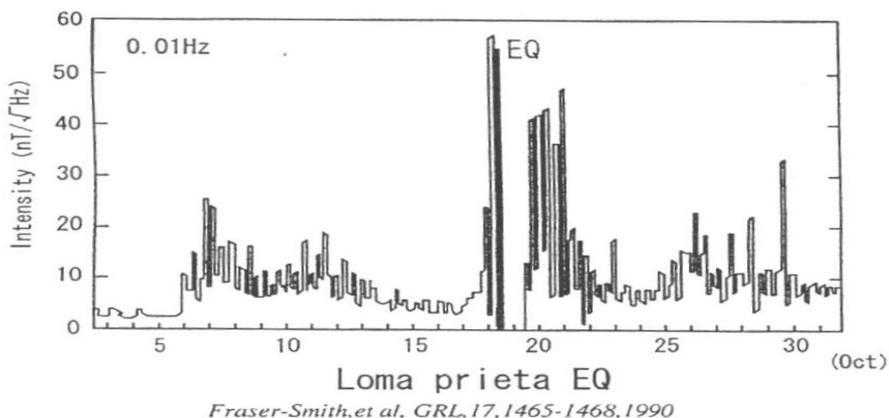


Figura 9. Emisiones ULF registradas con un magnetómetro de inducción de una componente previas al sismo de Loma Prieta.

Smirnova, Hayakawa e Itoh (2000), hacen notar también que los valores de β y D ponen al descubierto el efecto de la actividad geomagnética. Esto es, se ponen de manifiesto las variaciones que hay cada 27 días en la pendiente del espectro de las emisiones ULF. Estas oscilaciones muestran que están en fase con las variaciones de 27 días en el índice K_p de actividad geomagnética. Este mismo análisis se llevó a cabo con el terremoto de Biak encontrándose las mismas características. Las propiedades fractales de las emisiones ULF en regiones sísmo activas fueron comparadas con las correspondientes características de emisiones ULF obtenidas en regiones sísmicamente quietas. Y la interpretación física de las propiedades fractales reveladas en las series de tiempo ULF geomagnéticas se hizo sobre la base de considerar el concepto SOC.

Micropulsaciones en el observatorio magnético de Teoloyucan antes, durante y después del sismo de junio de 1999, de magnitud $M_s7.0$ a las 20:42 GMT con epicentro ($-97.5^\circ, 18.18^\circ$) a una profundidad de 69 km en México

La actividad geomagnética dada por el índice Dst durante el mes de junio de 1999 se muestra en la Figura 10. Se puede apreciar que no hay tormentas magnéticas y notamos además que casi todo el mes es calmado magnéticamente, en particular los días antes y después del 15. Por otro lado la actividad dada por el índice AE muestra muy poca o nula actividad magnética unas horas antes, durante, y después del sismo (Figura 11). Finalmente, usando el índice planetario K_p vemos que también corresponde a una actividad magnética baja antes del sismo, con un poco de actividad durante el periodo del 15 al 18 de junio, como se muestra en la Figura 12.

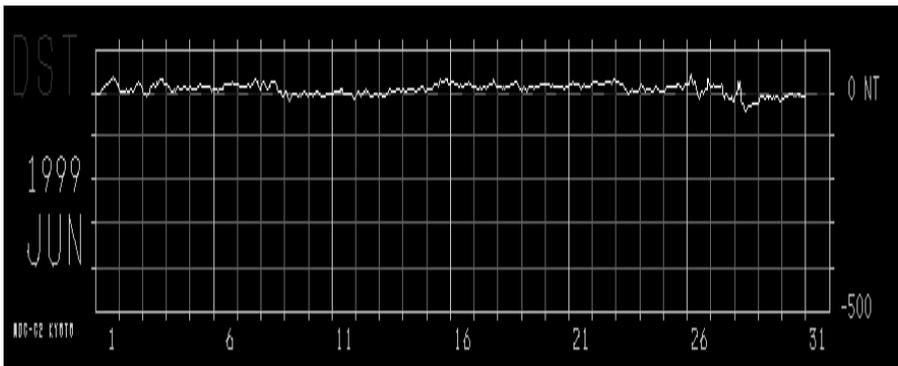


Figura 10. Actividad geomagnética dada por el índice Dst durante el mes de junio de 1999.

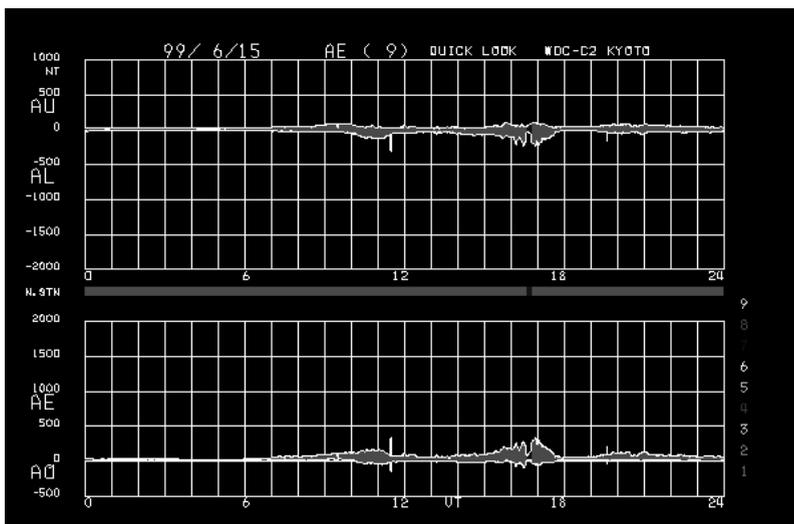


Figura 11. Actividad geomagnética dada por el índice AE mostrando muy poca o nula actividad magnética unas horas antes durante y después del sismo.

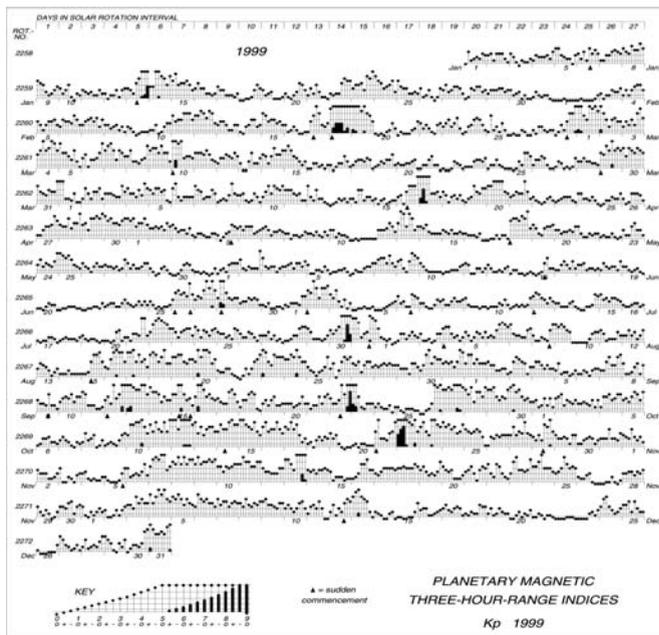


Figura 12. Comportamiento geomagnético dado por el índice planetario Kp vemos que corresponde a una actividad magnética baja antes del sismo y un poco de actividad durante el 15 al 18 de junio.

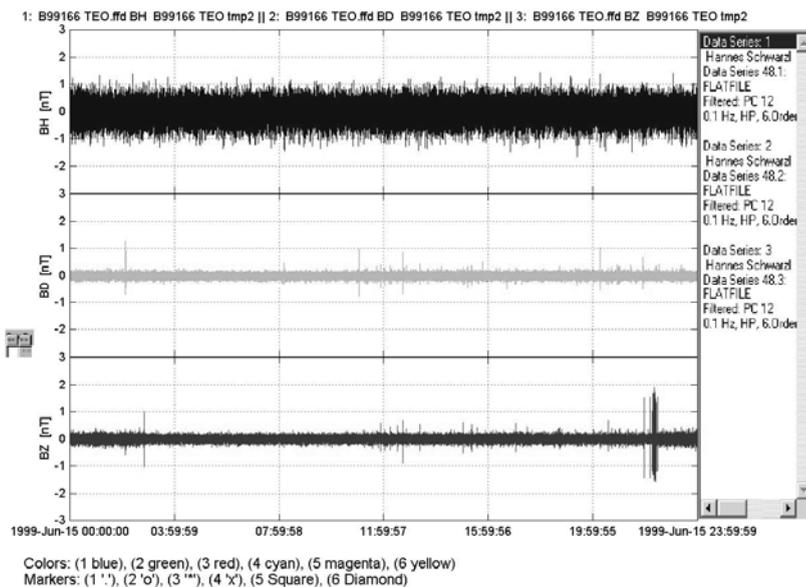


Figura 13. Ondas ULF en la banda Pc1-2.

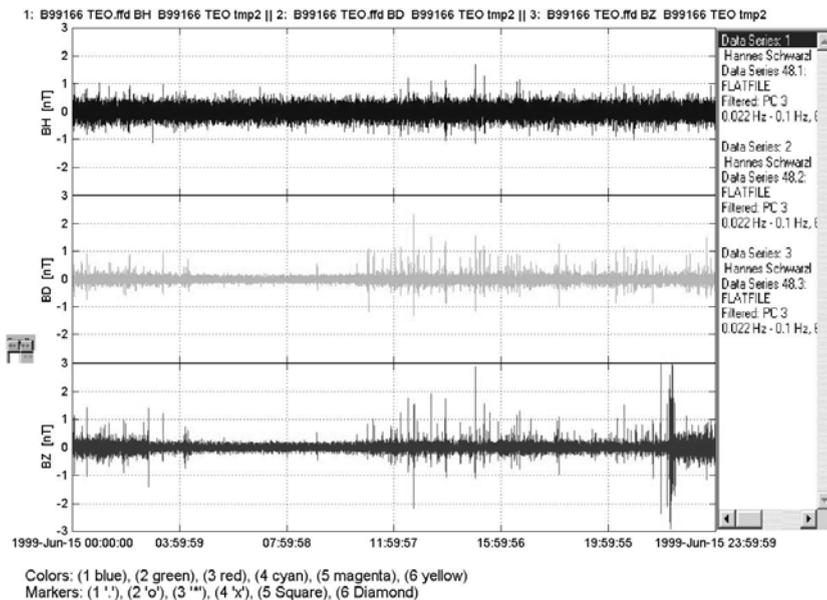


Figura 14. Ondas ULF en la banda Pc3.

Las Figuras de la 13 a la 18 muestran los datos ULF del día 15 de junio de 1999. Se puede apreciar una actividad que es a corto plazo, ya que los datos fueron escogidos tomando en cuenta una actividad geomagnética muy baja. Los datos de micropulsaciones corresponden a las bandas Pc1-2 (0.1Hz-2.0Hz), Pc3 (0.022Hz-0.1Hz), Pc4(0.007Hz-0.022Hz), Pc5(0.002Hz-0.007Hz), Pi1(0.025Hz-2.0Hz), Pi2(0.0067Hz-0.025Hz), y muestran las siguientes características:

- En la banda Pc1-2 y Pc3 no hay actividad durante el día 15 junio. Tan solo una hora y media después del sismo hay una gran amplitud de cerca de dos nanoteslas en la componente Bz que dura 30 minutos, y un evento parecido en las primeras horas de la mañana del día 14 de junio, pero durante el día 18, es decir, tres días después, no hay actividad. Hay que hacer notar que no se tuvieron datos de los días 16 y 17 de junio.
- En la banda Pc4 se tiene un poco de actividad en la componente Bz, aproximadamente siete horas antes del sismo que dura alrededor de una hora y, de manera similar a las bandas anteriores, hay actividad en Bz alrededor de hora y media después de ocurrido el sismo, así como también el día 14 a las primeras horas de la mañana. El día 18 fue calmado.
- En la banda Pc5 hay actividad en las tres componentes, ocho horas antes del sismo, que dura más de 5 horas e, igual que las bandas anteriores, hay actividad en la componente Bz después del sismo. El día 18 hay un poco de ruido en Pc5.
- En la banda Pi1 el comportamiento es similar al de las primeras tres bandas. Pero en la banda Pi2, además del mismo comportamiento que la banda Pi1, hay un poco de actividad 6 horas antes del sismo, como en la componente Bz, que dura una hora.

Discusiones y conclusiones

Es importante reconocer que a medida que avanzamos en los estudios de eventos electromagnéticos antes, durante, y después de un terremoto, nos acercamos más a la posibilidad de predicción del mismo. Es pues sólo cuestión de tiempo el que se puedan prever o mitigar daños al tener conocimiento de la posible ocurrencia de un terremoto.

Es también importante hacer notar que todas las bandas en el espectro electromagnético están involucradas en la manifestación de un terremoto por una u otra causa física. Pero para poder cuantificar los posible mecanismos físicos de la manifestación electromagnética en un terremoto es necesario contar con una red de estaciones electromagnéticas que cubran un área grande alrededor del epicentro.

Se ha visto que el método de registro de señales ULF es el más prometedor debido a que es un posible predictor de terremotos a corto plazo. Varios grupos entre ellos Japón, Rusia, Ucrania y China están poniendo todos sus esfuerzos en continuar con una investigación a fondo en el problema de la predicción de terremotos usando este método.

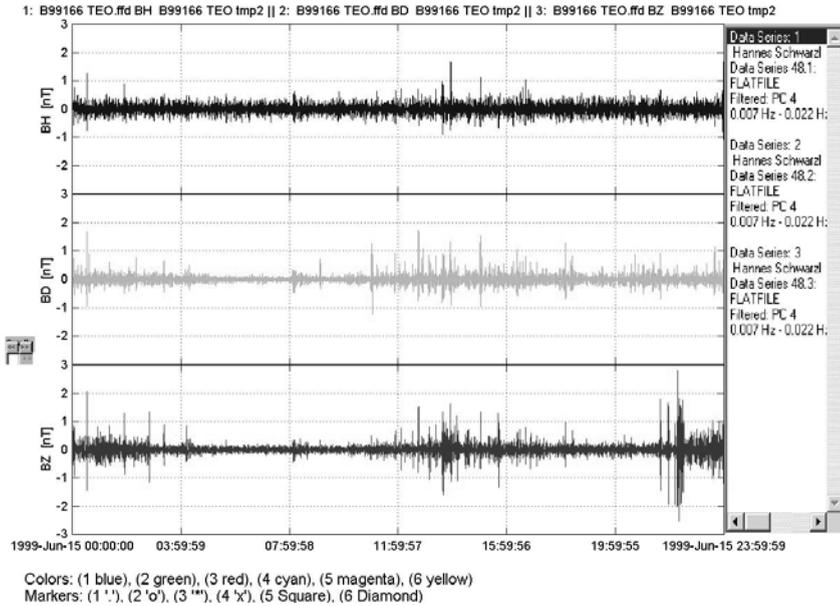


Figura 15. Ondas ULF en la banda Pc4.

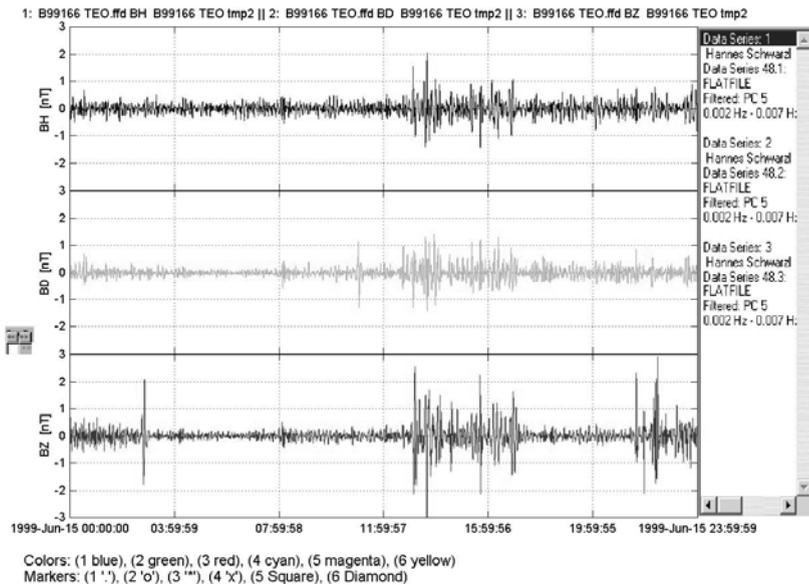


Figura 16. Ondas ULF en la banda Pc5.

Se han obtenido resultados convincentes en los terremoto de Kagoshima, Iwate, Izu y Matsushiro, de la presencia de anomalías magnéticas en la banda ULF pre-sísmicas. Esto es:

- Un incremento en la polarización (la razón de la intensidad entre las componentes vertical y horizontal) pocas semanas antes del choque principal.
- Parece haber una tendencia hacia un incremento de las componentes horizontales justo antes del terremoto.
- Parece existir una persistencia de la componente Bz incrementarse.

Es importante buscar la limpieza de los datos, tales como el ruido y los efectos globales, como son las pulsaciones geomagnéticas de origen magnetosférico. En estos casos es importante usar datos de referencia como, por ejemplo, el índice Dst de subtormentas magnetosféricas en las zonas aurorales, el índice AE en puntos conjugados, así como el índice de actividad geomagnética global o planetaria, Kp, que nos dan indicaciones de la ocurrencia de tormentas geomagnéticas, que son, a final de cuentas, los fenómenos causantes de la mayoría de las pulsaciones geomagnéticas.

Un gran número de investigadores señalan que es importante encontrar una correlación de las firmas magnéticas de las ondas ULF con otras señales eléctricas, y con emisiones acústicas relativas al terremoto, para clarificar el origen de las ondas ULF. Así pues, para poder investigar la fuente y los mecanismos de transmisión, es importante la estimación de la dirección de llegada de las señales ULF.

Es importante también considerar el uso de tratamientos de señales para la reducción efectiva del ruido, como es el caso de los métodos de análisis espectral, wavelt o de fractales. Así como un análisis magneto telúrico en detalle.

Finalmente, el sismo de junio 15 de 1999 ocurrido en México, es un buen ejemplo para correlacionar con las onda ULF, ya que se presenta en un momento de baja actividad magnétosférica, que nos muestra cierta amplitudes en todas las bandas en la componente Bz, el día anterior al sismo, en las primeras horas de la mañana y hora y media después del sismo. Por otro lado, en la banda Pi2, en la componente Bz, así como la banda Pc5, en las tres componentes, muestran actividad durante varias horas antes del sismo, indicando la presencia de un posible precursor en las más bajas frecuencias, horas antes del sismo.

Referencias

Afonin, V.V., Molchanov, O.A., Kodama, T., Hayakawa, M. and Akentieva, O.A., 1999. Statistical Study of Ionospheric Plasma Response to Seismic Activity: Search for Realiabe Results from Satellite Observations, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*, 597-617.

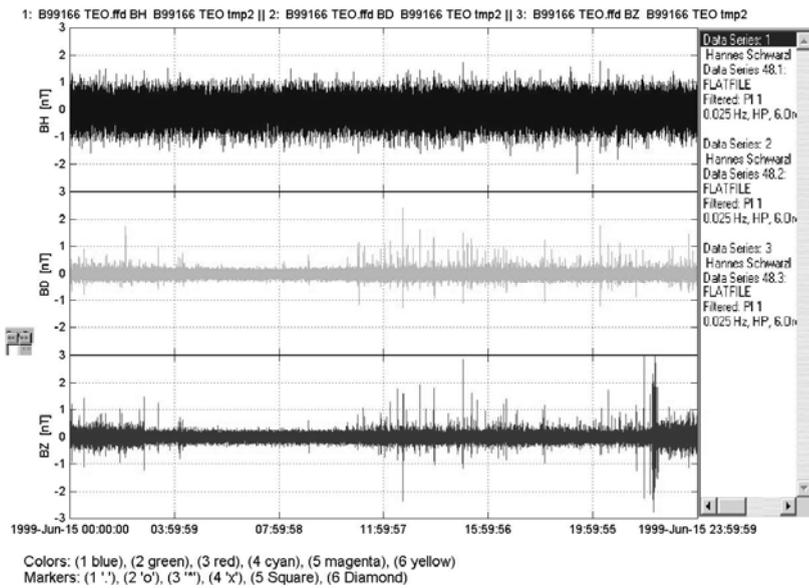


Figura 17. Ondas ULF en la banda Pi1.

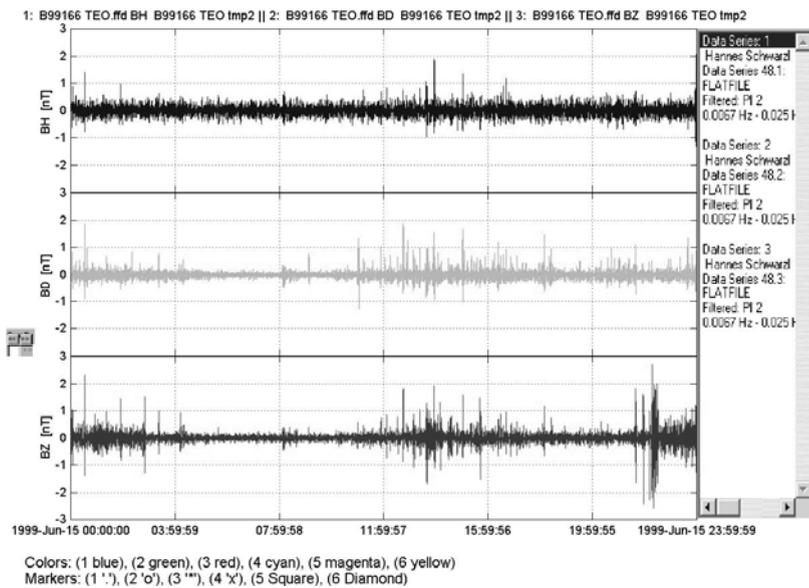


Figura 18. Ondas ULF en la banda Pi2.

- EGS (European Geophysical Society), 2002. *Scientific Programme*, Nice.
- Fraser-Smith, A., Bernardi, C. A., McGill, P.R., Ladd, M.E., Hellowell, R.A. and Villard, Jr., O.G., 1990. Low-frequencies magnetic field measurements near the epicenter of the Ms7.1 Loma Prieta earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 1465-1468.
- Fujinawa, Y., and Takahashi, K., 1995. Characteristics of Electric Field Variations in Boreholes before and after the Kobe earthquake, *The Earth Monthly (Gekkan Chikyu)*, 13, 175-184.
- Geller, ed., 1996, *Geophys Res. Letters*, Vol. 23, No.11.
- Gokhberg, M.B., Morgounov, V. A., Yoshino, T. and Tomizawa, I., 1982. Experimental measurement of electromagnetic emissions possible related to earthquake in Japan, *J. Geophys. Res.*, 87, 7824-7828.
- Hayakawa, M., Kawate, R., Molchanov, O.A. and Yumoto, K., 1996. Results of ultra- low- frequencies magnetic field measurements during Guam earthquake of 8 August 1993, *Geophys. Res. Lett.* 23, No. 3, 241-244.
- Hayakawa, *et al.*, 1996. Anomalies in the sub-ionospheric VLF signals for the 1995 Hyogo- ken Nanbu Earthquake, *J. Phys. Earth*, 44, 413-417.
- Kopytenko, Yu. A., Matishvili, T. G., Moronov, P.M., Kopytenko, E.A. and Molchanov, O.A., 1993. Detection of ultra-low-frequencies emissions connected with the Spitak earthquake and its aftershock activity, based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardzia observatories, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 77, 85-95.
- Kushida, Y., and Kushida, R., 1997. On a possibility of earthquake forecast by radio observations in VHF band, *Riken review*, No. 19, Focused on High Performance Computing in RIKEN 1997, 152-160.
- Lighthill, Sir James, ed., 1996. Critical Review of VAN, 376 pp., World Scientific, Singapore.
- Maeda, K., 1996. Decametric radiation at the time of the Hyogo-ken Nanbu earthquake near Kobe in 1995, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 2433-2436.
- Milne J., 1886. *Earthquakes and other Earth movements*, The International Scientific Series, New York, D. Appletonand Company, 286.
- Miyakoshi, J., 1985. On some problems of the variations of self-potentials observed in an active fault, the Yamaski fault. *Disaster Prev. Res. Inst. Annu.*, 28B, 127-132.
- Okamoto T. *et al.*, 1995. Abnormal variation recognized before and after the occurrence of the 1995 southern Hyogo prefracture earthquake, *Bull. Fukui College of Technology*, No. 29, 185-192.
- Rikitake, T., 1987. Magnetic and electric signals precursory to earthquake: An analysis of Japanese data, *J. Geomag. Geoelectr.*, 39, 47-61.
- Sinelnikov V.M. and Chmyrev, V.M., 1999. The variations of Statistical Characteristics of the Amplitude and Phase Fluctuations of Radio Signals during Spitak Earthquake, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*, 641-646.

- Smirnova N., Hayakawa, M. and Itoh, T., 2000. Fractal characteristics of the ULF geomagnetic fields in seismoactive regions and their dynamics in relation to earthquakes. International Workshop on Seismo Electromagnetics, 2000 of ASDA, p. 12, September 19-22, Chofu- City, Tokyo, Japan.
- Surkov V. and Pilipenko V., 1999. The Physics of Pre-Seismic Electromagnetic ULF signal, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*, 357-370.
- Sobolev, G.A., 1975. Application of electric method to the tentative short- term forecast of Kamchatka earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, 113, 229- 235.
- Surkov V., 1999, ULF Electromagnetic Perturbations Resulting from the Fracture and Dilatancy in the Earthquake Preparation Zone, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*, 371-382.
- Warwick, J. W., Stoker, C. and Meyer, T.R., 1982. Radio emission associated with rock fracture: Possible application to the great Chilean earthquake on May 22, 1960, *J. Geophys. Es.*, 87, 2851-2859.
- Yamada T. and Oike, K., 1996. Electromagnetic radiation phenomena before and after the Hyogo-ken Nanbu earthquake, *L. Phys. Earth*, 44, 405-412.
- Yépez E., Pineda, J.G., Peralta, J.A., Porta, A.V., Pavia-Miller, C.G. and Angulo-Brown, F., 1999. Spectral Analysis of ULF Electric Signals Possibly Associated to Earthquakes, published in *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*, Ed. M. Hayakawa, 115-121, Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo.