



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

CENTRO DE GEOCIENCIAS

Monitoreo multi-método de fenómenos electromagnéticos relacionados con  
actividad sísmica y volcánica en Popocatépetl

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:  
ANA GABRIELA BRAVO OSUNA

ANATOLIY KOTSARENKO  
CENTRO DE GEOCIENCIAS

Querétaro, Qro., Agosto 2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



*A José, mi compañero de todos estos años,  
por dibujar el círculo y seguir conmigo en él.*

*A la pequeña Ana Sofía, mi compañera  
en esta aventura en la que, junto a ella,  
veo el mundo con ojos nuevos,  
y me da la oportunidad de volver a sorprenderme  
y de preguntarme continuamente “¿por qué?”.*



## *Agradecimientos*

*Agradezco al Dr. Anatoliy Kotsarenko, por su tutoría, su confianza, paciencia y la oportunidad de trabajar un tema tan novedoso como interesante.*

*Agradezco al Dr. Román Pérez Enríquez su apoyo y su orientación.*

*A mis sinodales, los doctores Volodymyr Grimalsky, Denis Legrand y Vsevolod Yutsis, por sus valiosas sugerencias y correcciones que permitieron mejorar este trabajo.*

*A Marta Pereda, por todo el apoyo de principio a fin.*

*A la UNAM.*

*Al CONACYT.*

“Más sorprendido súbitamente por alguna idea contraria, corrió al timón, preguntando bruscamente que rumbo llevaba el buque.

- Este-Sureste, señor -dijo el asustado timonel.

- ¡Mientes! -dijo el capitán, dándole un puñetazo-. ¿Rumbo hacia el Este a esta hora de la mañana y con el sol a popa?

Al oírlo, todo el mundo quedó azorado, pues el fenómeno recién observado por Ahab se les había escapado, inexplicablemente, a todos los demás, producto acaso de su misma cegadora evidencia.

Metiendo casi la cabeza en la bitácora, Ahab echó una mirada a la brújula y dejó caer lentamente el brazo que tenía en alto, vacilando, aparentemente, un momento. En pie detrás de él, Starbuck miraba también y, ¡oh!, las dos agujas señalaban al Este, pero el *Pequod*, indudablemente, iba con rumbo Oeste.

Mas antes de que cundiese la alarma entre la tripulación, el viejo dejó oír una risa seca y exclamó:

- ¡Ah! ¡Ya lo tengo! Ha ocurrido otras veces, señor Starbuck; el rayo de anoche cambió nuestra aguja ..., eso es todo. ¡Supongo que ya lo habrán oído decir!

[...]

- Muchachos -dijo, volviéndose pausadamente hacia la tripulación, cuando Starbuck le entregó cuanto había pedido-: Muchachos, hijos míos, el rayo invirtió las agujas del viejo Ahab; pero con esta brizna de acero puede él hacer otra por sí mismo, la cual señalará tan segura como cualquier otra”.

*Moby Dick*

Herman Melville

## INDICE

Lista de figuras	8
Lista de tablas	14
Resumen	15
Abstract	17
<b>Capítulo I</b>	<b>19</b>
Introducción	19
Antecedentes	20
<b>Capítulo II</b>	<b>22</b>
Naturaleza del campo magnético terrestre y sus fuentes	22
2.1 Polos magnéticos y polos geomagnéticos	23
2.2 Componentes y variaciones del campo magnético	24
2.3 Fuentes del campo magnético	27
2.4 La magnetósfera terrestre y la relación Sol-Tierra	29
2.4.1 Características de la magnetósfera	30
2.4.1.1 La reconexión magnética	33
2.4.2 La ionósfera	35
2.4.3 Efectos solares	39
2.4.3.1 Viento solar	39
2.4.3.2 Manchas solares y llamaradas	39
2.4.3.3 Eyección de masa coronal	40
2.4.4 Perturbaciones magnéticas provocadas por la interacción Sol- Tierra	41
2.4.4.1 Tormentas geomagnéticas	41
2.4.4.2 Subtormentas	42
2.4.4.3 Auroras polares	43
2.4.4.4 Micropulsaciones magnéticas	43
2.4.4.5 Variaciones de campo magnético	44
2.4.4.6 Índices de campo magnético: Dst, Ap, Kp, AE	47
<b>Capítulo III</b>	<b>49</b>
El volcán Popocatépetl	49
3.1 Ubicación y características volcánicas	50
3.2 Historia eruptiva del volcán Popocatépetl	50
3.3 Manifestaciones volcánicas	51
3.3.1 Exhalaciones y explosiones	51
3.3.2 Microsismos	52
3.3.3 Tremores	52
3.3.4 Variaciones eléctricas, magnéticas y químicas	53
<b>Capítulo IV</b>	<b>57</b>
Modelo de acoplamiento Litósfera-Atmósfera-Ionósfera	57
4.1 El Circuito Eléctrico Global	57
4.2 El modelo LAIC	59
4.3 Variaciones de campo magnético asociados a sismos y a la presencia de magma	63
<b>Capítulo V</b>	<b>67</b>
Métodos de estudio	67

5.1 Inspección de series de tiempo	68
5.2 Análisis espectral	69
5.3 Análisis de fase	70
5.4 Análisis fractal de series de tiempo	73
<b>Capítulo VI</b>	<b>77</b>
Resultados	
6.1 Series de tiempo y análisis espectral	77
6.2 Análisis de fase	82
6.3 Análisis fractal	84
<b>Capítulo VII</b>	<b>101</b>
Discusión	101
<b>Capítulo VIII</b>	<b>105</b>
Conclusión	105
Referencias	107

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 El campo magnético terrestre se asemeja a un dipolo (tomado de <a href="http://material-preuniversitario.blogspot.mx">http://material-preuniversitario.blogspot.mx</a> )._____	22
Figura 2.2 Posición de los polos geográficos, magnéticos y geomagnéticos en la Tierra. _____	24
Figura 2.3 Disposición de las componentes del campo magnético. _____	25
Figura 2.4 Carta de declinación magnética (Desarrollado por NOAA/NGDC&CIRES). _____	26
Figura 2.5 Carta de inclinación magnética (Desarrollado por NOAA/NGDC&CIRES). _____	26
Figura 2.6 Estructura interna de la Tierra ( <a href="http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/geography/images/tec_001.gif">http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/geography/images/tec_001.gif</a> ). _____	27
Figura 2.7 Representación esquemática de la Tierra con su efecto de dínamo ( <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/File:Outer_core_convection_rolls.jpg">http://en.wikipedia.org/wiki/File:Outer_core_convection_rolls.jpg</a> ). _____	28
Figura 2.8 Mapa mundial de anomalías magnéticas derivado de una compilación de datos aeromagnéticos y marinos ( <a href="http://www.cps-amu.org/sf/notes/m10-1-10.htm">http://www.cps-amu.org/sf/notes/m10-1-10.htm</a> ) _____	29
Figura 2.9 Acción del viento solar sobre el campo magnético terrestre (tomado de <a href="https://www.youtube.com/watch?v=i_x3s8ODaKg">https://www.youtube.com/watch?v=i_x3s8ODaKg</a> ). _____	30
Figura 2.10 Componentes de la magnetósfera (tomado de <a href="http://www.ssc.igpp.ucla.edu/personnel/russell/papers/magsphere06.gif">http://www.ssc.igpp.ucla.edu/personnel/russell/papers/magsphere06.gif</a> ) _____	31
Figura 2.11 Componentes del ambiente geomagnético (tomado de <a href="http://phys.org/news67265032.html">http://phys.org/news67265032.html</a> ). _____	32
Figura 2.12 Campo magnético interplanetario (tomado de <a href="http://www.windows2universe.org">http://www.windows2universe.org</a> ) _____	33
Figura 2.13 Reconexión magnética. A) Las líneas magnéticas se aproximan, B) las líneas forman una X, C) la X se rompe liberándose energía. D) Las nuevas líneas se separan rápidamente (tomado de <a href="http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=36452">http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=36452</a> ). _____	34
Figura 2.14 Proceso de reconexión magnética en la cola magnetosférica: A) Las líneas magnéticas de la cola magnetosférica se aproximan, B) las líneas forman una X y la energía magnética es liberada en forma de energía cinética expulsando un chorro de plasma a alta velocidad, C) el chorro de plasma viaja hacia la Tierra. Las líneas se han reconectado, D) el plasma viaja hacia los polos y produce las subtormentas geomagnéticas (tomado de <a href="http://www.youtube.com/watch?v=BDZj1CmsJ64">http://www.youtube.com/watch?v=BDZj1CmsJ64</a> ). _____	34
Figura 2.15 Reconexión de líneas de campo en la cola magnetosférica (tomado de <a href="http://image.absoluteastronomy.com/images/encyclopediainages/m/ma/magnetosphere_simple.jpg">http://image.absoluteastronomy.com/images/encyclopediainages/m/ma/magnetosphere_simple.jpg</a> ) _____	35
Figura 2.16 a) Vectores de corrientes ionosféricas y b) vectores de corrientes inducidas para el 19	

de diciembre de 1980 a las 15:30 UT (tomado de <a href="http://home.istar.ca/~jwalker/ionosphe.html">http://home.istar.ca/~jwalker/ionosphe.html</a> )	35
Figura 2.17 Estructura de la atmósfera (tomado de <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/Ionosphere">http://en.wikipedia.org/wiki/Ionosphere</a> )	36
Figura 2.18 Óvalo auroral sobre el polo norte. El rojo en falso color indica dónde es más brillante la aurora (medianoche), y el azul indica dónde es más oscura (tomado de <a href="http://cse.ssl.berkeley.edu/artemis/mission_substorm_closeup3.html">http://cse.ssl.berkeley.edu/artemis/mission_substorm_closeup3.html</a> )	37
Figura 2.19 Corrientes alineadas al campo, de Hall y de Pedersen (tomado de <a href="http://www.physicsforums.com">http://www.physicsforums.com</a> )	38
Figura 2.20 Mancha solar gigante. Enero 10-14, 2005 (tomado de <a href="http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2005/05may_solarmyth/">http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2005/05may_solarmyth/</a> )	39
Figura 2.21 Llamada solar (tomado de <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_flare">http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_flare</a> )	39
Figura 2.22 Eyección de masa coronal (tomado de <a href="http://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/News012313-cme.html">www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/News012313-cme.html</a> )	40
Figura 2.23 Apagón de Quebec en 1989 (tomado de <a href="http://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun_darkness.html">http://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun_darkness.html</a> )	41
Figura 2.24 Fases de una tormenta magnética en el índice Dst. a) Impulso súbito, b) fase principal y c) fase de recuperación (tomado de WDC for Geomagnetism, Kyoto)	42
Figura 2.25 Aurora polar fotografiada por un satélite (tomado de <a href="http://spacemath.gsfc.nasa.gov/pEclips14.html">http://spacemath.gsfc.nasa.gov/pEclips14.html</a> )	43
Figura 2.26 Sistemas de corrientes ionosféricas que generan la variación geomagnética Sq (tomado de <a href="http://en.wikipedia.org">en.wikipedia.org</a> )	47
Figura 3.1 Volcán Popocatépetl, una de las estructuras activas más importantes del país en los últimos 18 años.	49
Figura 3.2 Ubicación del volcán Popocatépetl	50
Figura 3.3 Papel analógico mostrando un típico sismo VT (M1.8) en Popocatépetl (3 de septiembre, 1990, 07:57 GMT). Cada línea horizontal corresponde a una vuelta de 15 minutos del helicorder del sismógrafo. Las dobles líneas verticales a derecha e izquierda del registro son las marcas de minuto.	52
Figura 3.4 Tremor en la isla El Hierro. Señal del sismógrafo, espectrograma y densidad de potencia de la señal.	53
Figura 3.5 Circuito del experimento utilizado para demostrar que la corriente a través de la roca también circula a través del agua (tomado de Balk et al., 2009)	56
Figura 4.1 Diagrama básico del Circuito Eléctrico Global.	57

Figura 4.2 Radiación observada en el terreno (anomalía OLR) cerca de Colima durante diciembre 2002/Enero de 2003, previo al sismo de Tecomán del 22 de enero de 2003 (Mw7.6), tomado de Ouzounov (2007b).	61
Figura 4.3 Nube tipo tornado tomada el 9 de enero de 1995, 8 días antes del sismo de Kobe, Japón (17 de enero de 1995 (Mw7.2; tomado de K. Ongon).	61
Figura 4.4 Corriente en chorro en el hemisferio norte. Las velocidades más altas están representadas en rojo, las más bajas en azul.	62
Figura 4.5 Esquema del modelo LAIC.	63
Figura 4.6a. Columna eruptiva con relámpago en volcán japonés.	66
Figura 4.6b. Columna eruptiva con relámpago en volcán chileno.	66
Figura 5.1 Principio del magnetómetro fluxgate.	67
Figura 5.2 Ejemplo de variación diurna en días quietos para las tres componentes magnéticas. (Tomado de <a href="http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/6/external_origin_time_variations/6/regular_variations/">http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/6/external_origin_time_variations/6/regular_variations/</a> ).	68
Figura 5.3 Espectrograma de la componente BH del archivo JU206097, día 7 de abril de 2006. Se pueden apreciar dos lapsos de ruido entre las 8 y las 12 LT, correspondientes al ruido derivado de la construcción de un edificio cercano. Las frecuencias (eje vertical) entre 0.3 y 0.4 Hz se atribuyen a interferencia instrumental.	70
Figura 5.4 Curvas de Bowditch o de Lissajous (Tomado de <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/Bowditch_curve">http://en.wikipedia.org/wiki/Bowditch_curve</a> ).	71
Figura 5.5 Gráfica de fase BDBH, series de tiempo de las componentes BH (azul) y BD (verde), junto con sus espectrogramas respectivos, para el día 13 de marzo de 2005 (TLA05072). La curva inicia en 18i, que indica las 18 horas tiempo local, describe un lazo en sentido antihorario y termina en 18f.	72
Figura 5.6 Gráfica de fase BHBD, series de tiempo de las componentes BH (azul) y BD (verde) y sus espectrogramas respectivos, para el día 16 de marzo de 2005 (TLA05075). La curva inicia en 18i, que indica las 18 horas tiempo local, describe un lazo en sentido antihorario y termina en 18f.	72
Figura 5.7 Gráfica de fase BHBD, series de tiempo de las componentes BH (azul) y BD (verde) y sus espectrogramas respectivos, para el día 22 de marzo de 2005 (TLA05081). La curva inicia en 18i, que indica las 18 horas tiempo local, describe un lazo en sentido antihorario y termina en 18f.	73
Figura 5.8 Exponente de Hurst y su relación con la rugosidad de una serie. (Tomado de <a href="http://iopscience.iop.org/1742-5468/2012/01/P01002">http://iopscience.iop.org/1742-5468/2012/01/P01002</a> ).	75
Figura 6.1 Series de tiempo (arriba) y espectrograma de BH (abajo) correspondientes al periodo del 20 al 29 de julio de 2005, en Tlamacas. Nótese la variación diaria tanto en la serie de tiempo como en el espectrograma. Nótese también las perturbaciones magnéticas no periódicas.	78

Figura 6.2 Series de tiempo de 10 días (arriba), y espectrograma de BD del mismo periodo (abajo) del 20 al 29 de julio de 2005. La figura superior corresponde a las series de tiempo de la componente BD (en verde) y la inferior al espectrograma. Nótese la variación diaria en la serie de tiempo y las perturbaciones magnéticas comunes a BH, BD y BZ. \_\_\_\_\_ 78

Figura 6.3 Series de tiempo (arriba) y espectrograma de BZ (abajo) correspondiente al periodo del 20 al 29 de julio de 2005. Nótese la variación diaria evidente en la serie de tiempo (en rojo) y las perturbaciones magnéticas comunes a BH, BD y BZ. \_\_\_\_\_ 78

Figura 6.4 Series de tiempo de las tres componentes (arriba) y espectrogramas (abajo) correspondientes al día 15 de mayo de 2005, día en que ocurrió una tormenta magnética. La componente BH es la más afectada en latitudes ecuatoriales y medias. \_\_\_\_\_ 79

Figura 6.5 Interferencia de frecuencia variable (elipse en rojo) durante el 19 de febrero de 2006, en la estación Tlamacas. \_\_\_\_\_ 79

Figura 6.6 Micropulsaciones registradas en la estación Tlamacas, 1 de agosto de 2005 \_\_\_\_\_ 80

Figura 6.7 Interferencia instrumental. En el espectrograma la interferencia se observa como líneas paralelas horizontales y equidistantes. \_\_\_\_\_ 80

Figura 6.8 Interferencia en la componente BZ del campo magnético registrada en la estación de Juriquilla el 30 de abril de 2005. La frecuencia es, probablemente, de origen antropogénico \_\_\_\_ 80

Figura 6.9 Aumento en la intensidad espectral en todo el espectro de frecuencias graficado. Nótese la franja roja al inicio del espectrograma, la cual está asociada a perturbaciones magnéticas de origen litosférico. \_\_\_\_\_ 81

Figura 6.10 Ruido en componente BH del campo magnético durante el día 7 de mayo de 2005, registrado en la estación Tlamacas y atribuido a microdescargas eléctricas por escape de radón\_81

Figura 6.11 Gráfica de fase BDBH (izquierda), series de tiempo (derecha) de las componentes BH (arriba en azul) y BD (abajo en verde) del campo magnético, y sus respectivos espectrogramas (derecha), correspondientes al día 13 de marzo de 2005 (TLA05072). La curva inicia en 18i, que indica el inicio a las 18 horas tiempo local, describe un lazo en sentido antihorario y termina en 18f (final a las 18LT). \_\_\_\_\_ 82

Figura 6.12 Gráfica de fase BDBH, series de tiempo de campo magnético las componentes BH (azul, arriba) y BD (verde, abajo) y sus respectivos espectrogramas, correspondientes al día 16 de marzo de 2005 (TLA05075). La curva inicia en el punto 18i, que indica inicio a las 18 horas tiempo local (0 UT) y termina en 18f (24 UT). Las características más importantes de la figura son la trayectoria vertical durante la perturbación en BH (iniciando aproximadamente a la 1, hora local), evidente en la serie de tiempo y en el espectrograma de BH (derecha, paneles 1 y 2). La figura BDBH muestra un cambio de trayectoria a horizontal al terminar la perturbación en BH e iniciar una perturbación en BD a las 6, hora local (derecha, paneles 3 y 4). Finalizado el evento (aproximadamente a las 10 LT) la trayectoria recupera su sentido antihorario. \_\_\_\_\_ 82

Figura 6.13 Gráfica de fase BDBH (izquierda), series de tiempo de las componentes de campo



magnético (derecha) BH (azul, arriba) y BD (verde, abajo) y sus respectivos espectrogramas para el día 22 de marzo de 2005 (TLA05081). La curva inicia en 18i (inicio a las 18 LT, 0 UT) y termina en 18f (24 UT). \_\_\_\_\_ 82

Figura 6.14 Evolución del índice de Hurst de las series de tiempo de las componentes del campo magnético en la estación Tlamacas (arriba), vecina al volcán Popocatepetl, y en Juriquilla (abajo, estación de referencia) durante el periodo registrado en marzo de 2005. Los puntos en azul representan los valores de índice de Hurst estimados por el método de ondículas para la componente BH; los puntos en verde, para BD; y los rojos, para BZ. Los rectángulos sombreados indican actividad geomagnética de Kp igual o mayor a 4 y, por tanto, los puntos dentro de ellos no se consideran para este estudio. \_\_\_\_\_ 85

Figura 6.15 Evolución del índice de Hurst de las series de tiempo de las componentes del campo magnético en la estación Tlamacas (arriba), vecina al volcán Popocatepetl, y en Juriquilla (abajo, estación de referencia) durante el periodo registrado en abril de 2005. Los puntos en azul representan los valores de índice de Hurst estimados por el método de ondículas para la componente BH; los puntos en verde, para BD; y los rojos, para BZ. Los rectángulos sombreados indican actividad geomagnética de Kp igual o mayor a 4 y, por tanto, los puntos dentro de ellos no se consideran para este estudio. \_\_\_\_\_ 86

Figura 6.16 Espectrogramas de las componentes del campo magnético BH (arriba), BD (centro) y BZ (abajo) mostrando diez días, del 21 al 30 de abril de 2005. \_\_\_\_\_ 88

Figura 6.17 Evolución del índice de Hurst de las series de tiempo de las componentes del campo magnético en la estación Tlamacas (arriba), vecina al volcán Popocatepetl, y en Juriquilla (abajo, estación de referencia) durante el periodo registrado en mayo de 2005. Los puntos en azul representan los valores de índice de Hurst estimados por el método de ondículas para la componente BH; los puntos en verde, para BD; y los rojos, para BZ. Los rectángulos sombreados indican actividad geomagnética de Kp igual o mayor a 4 y, por tanto, los puntos dentro de ellos no se consideran para este estudio. \_\_\_\_\_ 88

Figura 6.18 Evolución del índice de Hurst de las series de tiempo de las componentes del campo magnético en la estación Tlamacas (arriba), vecina al volcán Popocatepetl, y en Juriquilla (abajo, estación de referencia) durante el periodo registrado en junio de 2005. Los puntos en azul representan los valores de índice de Hurst estimados por el método de ondículas para la componente BH; los puntos en verde, para BD; y los rojos, para BZ. Los rectángulos sombreados indican actividad geomagnética de Kp igual o mayor a 4 y, por tanto, los puntos dentro de ellos no se consideran para este estudio. \_\_\_\_\_ 90

Figura 6.19 Series de tiempo de campo magnético (arriba) y sus espectrogramas (abajo) para las componentes BH (izquierda), BD (centro) y BZ (derecha) correspondientes a los registros de la estación Tlamacas del día 5 de junio de 2005. Los espectrogramas muestran perturbación que afectó a la componente BH. \_\_\_\_\_ 91

Figura 6.20 Evolución del índice de Hurst de las series de tiempo de las componentes del campo magnético en la estación Tlamacas (arriba), vecina al volcán Popocatepetl, y en Juriquilla (abajo, estación de referencia) durante el periodo registrado en julio de 2005. Los puntos en azul representan los valores de índice de Hurst estimados por el método de ondículas para la componente BH; los puntos en verde, para BD; y los rojos, para BZ. Los rectángulos sombreados

indican actividad geomagnética de  $K_p$  igual o mayor a 4 y, por tanto, los puntos dentro de ellos no se consideran para este estudio. \_\_\_\_\_ 92

Figura 6.21 Evolución del índice de Hurst de las series de tiempo de las componentes del campo magnético en la estación Tlamacas (arriba), vecina al volcán Popocatepetl, y en Juriquilla (abajo, estación de referencia) durante el periodo registrado en febrero de 2006. Los puntos en azul representan los valores de índice de Hurst estimados por el método de ondículas para la componente BH; los puntos en verde, para BD; y los rojos, para BZ. Los rectángulos sombreados indican actividad geomagnética de  $K_p$  igual o mayor a 4 y, por tanto, los puntos dentro de ellos no se consideran para este estudio. \_\_\_\_\_ 93

Figura 6.22 Evolución del índice de Hurst de las series de tiempo de las componentes del campo magnético en la estación Tlamacas (arriba), vecina al volcán Popocatepetl, y en Juriquilla (abajo, estación de referencia) durante el periodo registrado en marzo de 2006. Los puntos en azul representan los valores de índice de Hurst estimados por el método de ondículas para la componente BH; los puntos en verde, para BD; y los rojos, para BZ. Los rectángulos sombreados indican actividad geomagnética de  $K_p$  igual o mayor a 4 y, por tanto, los puntos dentro de ellos no se consideran para este estudio. \_\_\_\_\_ 94

Figura 6.23 Evolución del índice de Hurst de las series de tiempo de las componentes del campo magnético en la estación Tlamacas (arriba), vecina al volcán Popocatepetl, y en Juriquilla (abajo, estación de referencia) durante el periodo registrado en abril de 2006. Los puntos en azul representan los valores de índice de Hurst estimados por el método de ondículas para la componente BH; los puntos en verde, para BD; y los rojos, para BZ. Los rectángulos sombreados indican actividad geomagnética de  $K_p$  igual o mayor a 4 y, por tanto, los puntos dentro de ellos no se consideran para este estudio. \_\_\_\_\_ 95

Figura 7.1 Resultados del análisis fractal tomando periodos de 72 horas para obtener un valor de exponente de Hurst (un punto). Las tendencias de las curvas de 72, 24 y 12 horas son similares (Figuras 7.1, 7.2 y 7.3), lo cual sugiere una invarianza al escalado para tales periodos. \_\_\_\_\_ 102

Figura 7.2 Resultados del análisis fractal tomando periodos de 24 horas para obtener un valor de exponente de Hurst (un punto). Las tendencias de las curvas de 72, 24 y 12 horas son similares (Figuras 7.1, 7.2 y 7.3), lo cual sugiere una invarianza al escalado para tales periodos. \_\_\_\_\_ 102

Figura 7.3 Resultados del análisis fractal tomando periodos de 12 horas para obtener un valor de exponente de Hurst (un punto). Las tendencias de las curvas de 72, 24 y 12 horas son similares (Figuras 7.1, 7.2 y 7.3), lo cual sugiere una invarianza al escalado para tales periodos. \_\_\_\_\_ 103

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Algunos valores del campo magnético sobre la superficie terrestre y en el espacio.	25
Tabla 2.2 Clasificación de las pulsaciones magnéticas, subdivisiones de la clasificación general y duración de sus periodos.	44
Tabla 2.3 Clasificación de las pulsaciones magnéticas, sus periodos y frecuencias	45
Tabla 2.4 Observatorios geomagnéticos a partir de los cuales se obtiene el índice Kp	48
Tabla 4.1 Parámetros del Circuito Eléctrico Global y sus valores (Harrison, 2004)	58
Tabla 4.2 Radios de áreas de preparación sísmica calculados a partir de la ecuación 4.1 para los sismos ocurridos en el volcán Popocatepetl durante los periodos estudiados de 2005 y 2006.	65
Tabla 6.1 Ocurrencia de eventos magnéticos (azul), sísmicos (amarillo) y volcánicos (rojo). Los puntos con exponente de Hurst inusual se especifican en la tabla. Las fechas corresponden al año 2005.	97
Tabla 6.2 Ocurrencia de eventos magnéticos (azul), sísmicos (amarillo) y volcánicos (rojo). Los puntos con exponente de Hurst inusual se especifican en la tabla. Las fechas corresponden al año 2006.	99

## RESUMEN

Cuando se miden las variaciones de campo magnético en las cercanías de un volcán, algunas de ellas están relacionadas con actividad magmática mientras otras tienen orígenes diferentes que pueden ser internos o externos al volcán, y contribuir al campo magnético local, regional o global. A través de técnicas fractales es posible conocer el comportamiento de los procesos dentro del volcán. Esto nos lleva a caracterizar tales procesos. El objetivo principal de este trabajo es encontrar tendencias, a través del exponente de Hurst (el cual se relaciona con la dimensión fractal), de los procesos volcánicos que ocurren en ese momento. Estas tendencias, que llamaremos "firmas fractales", y que se estiman a partir de las series de tiempo de las intensidades de las componentes del campo magnético, pueden ser características adicionales para ser monitoreadas dentro de la serie de parámetros actuales (microsismos, tremores, vapor de agua, emisiones de CO<sub>2</sub>, cambios químicos en agua, explosiones, entre otros).

En este trabajo analizamos las series de tiempo de la intensidad de las componentes del campo magnético medidas en la estación Tlamacas (en el periodo comprendido entre el 27 de febrero y el 2 de agosto de 2005; y del 18 de febrero al 2 de mayo de 2006), estación que está situada cerca del volcán Popocatepetl. Nosotros comparamos los resultados del análisis fractal con la estación de referencia en Juriquilla para encontrar las características únicas de las señales en Tlamacas.

Los análisis consistieron en una inspección visual de las series de tiempo de la intensidad de las componentes del campo magnético para encontrar anomalías. También obtuvimos los espectrogramas de estas series de tiempo, gráficas de fase de las componentes BD y BH y observamos tendencias usando los exponentes de Hurst que obtuvimos por medio de un algoritmo basado en ondículas.

Los espectrogramas nos permitieron ver la señal en términos de la frecuencia, revelando intensidades anómalas, duración de las perturbaciones y grado de perturbación del ambiente electromagnético.

El análisis de fase consistió en una gráfica con los valores de BD como horizontal y BH como vertical. Éste nos ayudó a encontrar los días con perturbaciones comunes a BH y BD, lo cual implica una fuente común que se muestra como elipses en la gráfica resultante.

El análisis fractal nos ayudó a encontrar tendencias en el comportamiento del campo magnético. Es probable que, por medio de los exponentes de Hurst de la componente BZ, hayamos encontrado las "huellas magnéticas" de los

microsisimos en Popocatépetl. El análisis fractal aplicado a cada archivo del magnetómetro, proporcionó un exponente de Hurst. Los exponentes de Hurst a lo largo del tiempo muestran tendencias que pueden estar asociadas con fenómenos físicos. A tales tendencias nosotros les llamamos "firmas fractales". Hoy en día, el análisis fractal es ampliamente utilizado en geología y geofísica para encontrar patrones de comportamiento o tendencias.

Los análisis de frecuencia y fase fueron muy útiles al proporcionar información de distribución de intensidad espectral y de relación entre componentes.

El CENAPRED registra la ocurrencia de terremotos, tremores, fumarolas, explosiones y exhalaciones del Popocatépetl. Nosotros usamos esa información y construimos una tabla que concentra la información de ocurrencia de eventos sísmicos, volcánicos, magnéticos y cambios en el valor del exponente de Hurst. Luego construimos dos tablas de eventos que nos permitieron conocer la fecha y tipo de evento.

En nuestros resultados nosotros identificamos posibles firmas fractales de microsisimos, las cuales consisten en un decaimiento de los exponentes de Hurst de uno a dos días antes del sismo.

Sin embargo, como los procesos volcánicos pueden ocurrir simultáneamente, y a veces la actividad magnética puede ser alta, resulta imposible verificar más firmas por medio del análisis fractal. Además, dos puntos (días) resultan insuficientes para afirmar que ocurre un decaimiento de exponente de Hurst en todos los casos.

Gracias al análisis espectral, nosotros encontramos un ambiente magnético más intenso en Tlamacas que en Juriquilla, a pesar de que la estación de referencia está localizada dentro de la ciudad y cerca de una zona industrial. Además, encontramos anomalías que afectaron la componente BH, consistentes en periodos con alta intensidad y duración de horas a días.

Nuestro estudio es uno de los primeros análisis fractales de campo magnético en el volcán Popocatépetl. Es una herramienta potencial para caracterizar el comportamiento del volcán y para ayudar a prevenir desastres volcánicos.

## ABSTRACT

When magnetic field variations are measured in the vicinity of a volcano some of them are related to magmatic activity while others have different origins, that could be internal or external to the volcano, and they contribute to local, regional or global magnetic field. By fractal techniques it is possible to know how processes behave inside the volcano. It leads to characterize such processes. The main aim of this work is to find trends by Hurst's exponents (which are related to fractal dimension) and are obtained from time series of magnetic field intensities related to ongoing volcanic processes. These trends, which we will call "fractal signatures" could be an additional feature to be monitored within the actual parameters (microearthquakes, tremors, water vapor, CO<sub>2</sub> emissions, chemical changes in spring water, explosions, among others).

In this work we analyzed time series of three magnetic field components intensity measured at Tlamacas station (from february 27th to august 2nd, 2005 and from february 18th to may 2nd, 2006). The station is located near Popocatépetl volcano. We compared fractal analysis results with results from Juriquilla reference station in order to find Tlamacas' unique features.

Analysis consisted in a visual inspection of these time series in order to find anomalies, we also obtained dynamic spectra from the time series, phase graphs of BH\BD components and trends of Hurst exponents obtained by means of a wavelet based algorithm.

Dynamic spectra allowed us to view the signal in terms of frequency, revealing anomalous intensities, how long perturbations were, and how perturbed the electromagnetic environment was.

Phase analysis consisted on a graph with BD as horizontal and BH as vertical values. It helped us to find days when common perturbations occurred to BH and BD. It means both components had a disturbing horizontal common source showed as ellipses in the resulting graph.

Fractal analysis helped to find trends in the behavior of geomagnetic field. By means of Hurst exponents of BZ we probably found geomagnetic signatures of microearthquakes at Popocatépetl volcano. Fractal analysis applied to every magnetometer's register gave a Hurst exponent. Hurst exponents across the time show trends that could be associated with physical phenomena. We call those trends "fractal signatures". Nowadays, fractal analysis is widely used in geology and geophysics in the search of behavior patterns or trends. Frequency and phase analysis were useful giving additional information about spectral intensity distribution and components relationships.

CENAPRED registers the occurrence of earthquakes, tremors, fumaroles, explosions and exhalations at Popocatépetl volcano. We used this information and constructed a table that concentrates occurrence information of seismic, volcanic, magnetic events. Then, we constructed two event tables that allowed us to know date and type of event.

In our results we identified a possible microearthquake signature consisting in decreasing Hurst exponents one or two days before the earthquake. However, as volcanic processes can occur simultaneously and sometimes geomagnetic activity could be high, then it is impossible to verify more signatures by a single fractal study. In addition, two points (days) are not enough to affirm that it is true in all cases.

By spectral analysis, we found higher magnetic environment intensities at Tlamacas in comparison with Juriquilla, despite of reference station is located within the city and close to an industrial zone. In addition, we also found anomalies that affected component BH, they consisted of high intensity periods from hours to days.

Our study is one of the first fractal analysis of magnetic field in Popocatépetl volcano. It could be a potential tool to characterize volcano behavior and to help prevent volcanic hazards.

## **Capítulo I**

### **Introducción**

Una de las principales metas de la vulcanología ha sido prever la ocurrencia de las erupciones volcánicas. Para realizar una adecuada previsión se requiere revisar cuidadosamente la historia geológica y eruptiva del volcán en cuestión. Las herramientas tecnológicas actuales y los nuevos métodos de análisis de datos se deben utilizar para obtener información sobre el estado de actividad de un volcán.

Entre las manifestaciones volcánicas más comunes que son objeto de vigilancia se encuentran sismos, tremores, exhalaciones, fumarolas, explosiones, deformación del edificio volcánico y variaciones químicas en exhalaciones (bióxido de azufre). Aunque es muy útil el conocimiento de gran cantidad de volcanes, no es posible diagnosticar el comportamiento, como un fenómeno repetible, de otro volcán ubicado en otra región, con origen y condiciones dinámicas diferentes.

Un comportamiento común en la mayoría de los volcanes es que antes de una erupción, hay una etapa previa durante la cual el magma en el interior del volcán asciende desde una cámara magmática hacia la superficie, abriéndose paso y formando o llenando conductos. En consecuencia, los sismos son inherentes a la formación de estos conductos. Si bien muchos microsismos son atribuibles a esta causa, pueden existir otras razones relacionadas directa o indirectamente con la actividad volcánica, como incremento en la carga topográfica, cambios en la temperatura subterránea y explosiones dentro del edificio volcánico (Decker y Decker, 1989), e incluso derrumbes.

El volcán Popocatepetl regresó a la actividad visible en 1994 ([www.cenapred.gob.mx/es/PreguntasFrecuentes/faqpopovo2.html#preg7](http://www.cenapred.gob.mx/es/PreguntasFrecuentes/faqpopovo2.html#preg7)), y a partir de ese momento se han llevado a cabo varios estudios, por ejemplo, de química del agua (Armienta et al., 2007), de deformación (Arámbula-Mendoza et al., 2010), tomografía sísmica (Berger, 2010) para entender su comportamiento. Por ejemplo, en las cercanías del volcán se ha registrado actividad magnética anómala cuyo origen se ha atribuido a procesos litosféricos como inyección de magma, acumulación de gas, enfriamiento de domo arriba del punto de Curie, por esfuerzos derivados de sismos o explosiones (Kotsarenko et al., 2007; Kotsarenko et al., 2008; Martín Del Pozzo et al., 2002). Sin embargo, hay algunas otras contribuciones al campo magnético local, como las corrientes de agua y las tormentas magnéticas, de efecto global.

El campo magnético inducido por el movimiento de rotación del material en



la cámara magmática, la remagnetización por calentamiento térmico, el piezomagnetismo de minerales cristalizados o corrientes de agua subterránea pueden ser contribuciones litosféricas al campo magnético local. Otras contribuciones al campo magnético local pueden provenir de tormentas eléctricas cercanas cuyos relámpagos son corrientes eléctricas de gran magnitud y, por tanto, de un campo magnético fuerte en un amplio rango de frecuencias que abarca desde corriente directa (DC) hasta algunos Megahertz (Tsutsumi et al., 1999; Singh et al., 2011).

La inyección de ceniza a la atmósfera durante una erupción volcánica modifica la conductividad eléctrica del aire (Pulinets et al., 1997), así como el escape de radón de las fallas (Kotsarenko et al., 2012; Pulinets y Ouzounov, 2011).

En el presente trabajo nos centramos en estudiar las variaciones de campo magnético en el volcán Popocatépetl, con el objetivo de encontrar tendencias en el comportamiento magnético, a través de los exponentes de Hurst, que revelen la evolución de los procesos volcánicos. Para ello analizamos los datos que previamente se recogieron (Kotsarenko, comunicación personal) del 28 de febrero al 2 de agosto de 2005, y del 19 de febrero al 1 de mayo de 2006, y realizamos una comparación entre las perturbaciones magnéticas medidas en las cercanías del volcán con ocurrencia de sismos, temblores, erupciones, exhalaciones, explosiones y fumarolas.

## Antecedentes

Entre las primeras observaciones de variación electromagnética se encuentran las de Van Bise y Rauscher (1994), quienes hallaron que ciertas frecuencias de campos eléctricos y magnéticos parecían estar asociadas con actividad volcánica y sísmica, y que incluso la precedían. Ellos encontraron que la emisión de ondas ELF tenía una asociación más evidente con el vulcanismo que con los sismos, hallando "firmas únicas" asociadas a las fases pre-eruptivas y post-eruptivas del Monte Santa Helena.

Hata y Yabashi (1994), también identificaron emisiones ELF provenientes del subsuelo con características especiales antes y después de la formación del décimo y decimoprimer domo en el Monte Fugen, y señales que presagiaron el colapso del decimoprimer domo.

En el Monte Etna, Currenti et al. (2004) también observaron variaciones de campo magnético antes y después de una erupción. Su fuente de radiación se atribuyó a los cambios en la propiedad magnética de las rocas de la corteza debidos a la actividad volcánica.

La reactivación del volcán Stromboli, en febrero de 2007, estuvo acompañada de fuertes variaciones en la intensidad del campo magnético.

Napoli et al. (2011) encontraron cambios en el campo magnético en forma de escalón que coincidían con la apertura de fisuras en la parte superior de la Sciara del Fuoco.

El uso de técnicas fractales está tomando importancia en el análisis de series de tiempo tomadas de diversos fenómenos geofísicos. Nosotros creemos que, a través del uso de estas técnicas, es posible conocer mejor las características eruptivas del volcán Popocatépetl, y puede servir de herramienta para la previsión de erupciones volcánicas.

## Capítulo II

### Naturaleza del campo magnético terrestre y sus fuentes

Comprender el origen del campo geomagnético nos lleva a conocer los fenómenos que pueden alterar sus valores locales. Las variaciones de la intensidad del campo magnético pueden tener sus orígenes en el núcleo terrestre, en la litósfera, en la ionósfera o en la magnetósfera. En este capítulo desarrollamos cómo se origina el campo geomagnético interno y cómo es afectado por campos que resultan por la interacción de la Tierra con el Sol.

El campo magnético de la Tierra se origina en su interior debido a las corrientes de convección y al efecto Coriolis debido a la rotación del planeta, creando un efecto de dínamo, el cual por su intensidad se extiende hacia el espacio, convirtiéndose en un escudo natural de la Tierra contra el viento solar<sup>1</sup>. Sin embargo, este campo tiene variaciones originadas tanto en el interior del mismo, como en el exterior. Por su comportamiento, el campo magnético se aproxima a un dipolo (Figura 2.1); la ecuación (2.1) muestra que el campo magnético en un sitio particular tiene contribuciones litosféricas locales, a las cuales se suma el magnetismo producido por corrientes en la ionósfera y magnetósfera, y cuya variación es continua. La intensidad del campo geomagnético es producto de las condiciones de formación del planeta. La corteza terrestre está compuesta por rocas que contienen cantidades variables de magnetita. Las rocas ígneas y metamórficas son, en general, altamente magnéticas. La contribución del manto superior al campo magnético es menor por la escasez de magnetita en éste.

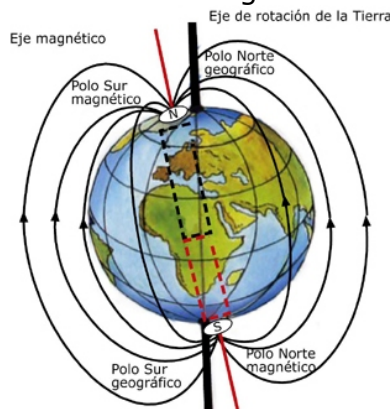


Figura 2.1. El campo magnético terrestre se asemeja a un dipolo (tomado de <http://material-preuniversitario.blogspot.mx>).

<sup>1</sup> En la corona solar la temperatura es tan alta que los átomos de hidrógeno tienen energía suficiente para superar la fuerza de gravedad y escapar a velocidades supersónicas arrastrando el campo magnético del Sol. Los iones y electrones que escapan de la corona solar constituyen un plasma llamado viento solar.

En ausencia de tormentas magnéticas, entre el 97% y 99% del campo magnético terrestre se produce en el núcleo externo, por un proceso de dínamo auto-sostenido. Éste campo se denomina principal ( $\mathbf{B}_p$ ), el cual forma parte del campo total, compuesto de la siguiente forma:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}_p(\mathbf{r}, t) + \mathbf{A}(\mathbf{r}) + \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) + \boldsymbol{\epsilon}(t) \quad (2.1)$$

donde,  $\mathbf{r}$  es un vector de posición,  $t$  es el tiempo,  $\mathbf{A}(\mathbf{r})$  es el aporte de la litósfera,  $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$  es el aporte ionosférico y magnetosférico, y  $\boldsymbol{\epsilon}(t)$  es un error de medición (Langel y Hinze, 1998).

Las aportaciones de origen externo al campo magnético se tratan en la sección 2.3.

La actividad humana también tiene aportaciones al campo magnético terrestre. Éstas pueden ser generadas por procesos que involucren corrientes muy grandes o descargas de alto voltaje. El campo magnético cerca de zonas industriales, edificios en construcción o líneas de transmisión de electricidad se suma al campo magnético local, interfiriendo las señales geomagnéticas que son de interés para nuestro estudio.

## 2.1 Polos magnéticos y polos geomagnéticos

Se sabe que los polos del campo magnético principal no coinciden con los polos geográficos (Figura 2.2). Un polo magnético es el punto sobre la superficie terrestre donde las líneas del campo son totalmente verticales. Sin embargo, su posición cambia a través de los años. Actualmente, los polos magnéticos norte y sur no son antipodales.

Los polos geomagnéticos son dos puntos definidos por el modelo de un dipolo con eje que pasa por el centro de la Tierra y, por tanto, sí son antipodales. Dado que el campo magnético terrestre no es perfectamente dipolar, los polos magnéticos y geomagnéticos no coinciden.

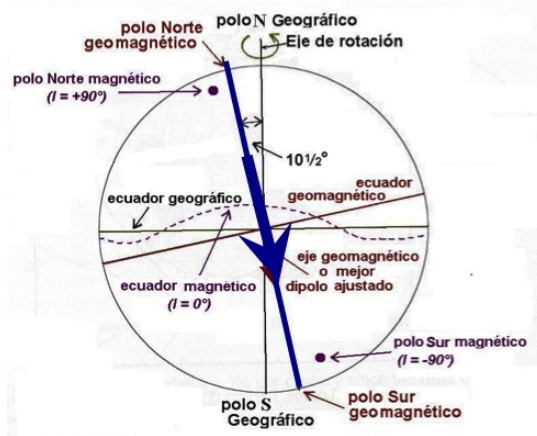


Figura 2.2. Posición de los polos geográficos, magnéticos y geomagnéticos en la Tierra.

## 2.2 Componentes y variaciones del campo magnético

Para estudiar el magnetismo terrestre, el campo magnético de la Tierra se representa como un vector, con magnitud y orientación. La intensidad de campo magnético, en un punto sobre la Tierra, se expresa generalmente por coordenadas rectangulares o por los símbolos magnéticos H, D, I, Z y F (Figura 2.3). H es la magnitud de la componente horizontal de la intensidad total del campo, y siempre se considera positiva sin importar su dirección; D es la declinación, es decir, el ángulo acimutal de la intensidad horizontal, y equivale a la diferencia en grados entre la orientación del norte verdadero y el norte magnético, es positiva a partir del norte geográfico y hacia al este; I es la inclinación magnética, y es el ángulo, en grados, del campo magnético por arriba o por debajo de la horizontal, es positivo cuando la dirección de la intensidad se inclina hacia abajo; Z es la intensidad vertical, se trata de la componente vertical de la intensidad total del campo. Finalmente, F es la intensidad total del campo no dividida en componentes. Las unidades para el campo magnético son gauss (G), gammas (g) o teslas (T) donde, en el sistema SI, la unidad para la intensidad de campo magnético es la Tesla.

$$1 \text{ tesla} = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = \frac{\text{V} \times \text{s}}{\text{m}^2} \quad (2.2)$$

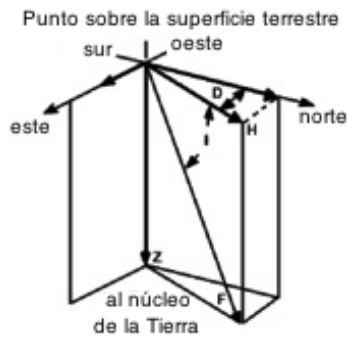


Figura 2.3. Disposición de las componentes del campo magnético.

### Valores del campo geomagnético

La intensidad del campo magnético terrestre tiene un valor promedio de alrededor de 50000 nanoteslas (0.5 Gauss<sup>2</sup>), pero varía desde 25000 nanoteslas (0.25 Gauss) en áreas como Sudamérica y Sudáfrica, mientras que alrededor de los polos, al norte de Canadá y sur de Australia, alcanza 65000 nanoteslas (0.65 Gauss). En el espacio que rodea a la Tierra, a distancias de 10 y 15 RT, las líneas de fuerza del campo geomagnético en el lado noche son paralelas y tienen intensidades de 10 a 20 nanoteslas. En la cola magnetosférica (a 16 RT) el valor se vuelve pequeño y además, la dirección del campo cambia abruptamente dirigiéndose a la Tierra por el lado noche (dirección antisolar), lo que identifica a una hoja de corriente neutra que separa las regiones del campo magnético. Los valores se resumen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Algunos valores del campo geomagnético sobre la superficie terrestre y en el espacio.

Intensidad de campo magnético en el ecuador geográfico	0.3 Gauss con variaciones a lo largo del día de 20 nanoteslas
Intensidad de campo magnético en los polos	0.7 Gauss con variaciones a lo largo del día de 50 nanoteslas
Intensidad en la región interplanetaria sobre la órbita terrestre	5 nanoteslas
Intensidad del plasma solar vecino a la magnetopausa	5 a 20 nanoteslas con fluctuaciones de tiempo cortas
En el ecuador durante una tormenta magnética	Decremento súbito por debajo de - 100 nanoteslas

El campo magnético tiene variaciones anuales que, una vez eliminadas las variaciones temporales, se representa en cartas de declinación e inclinación,

<sup>2</sup> 1 Gauss= 100000 nanoteslas.

útiles a los exploradores y navegantes para ajustar sus brújulas según la región a recorrer. Las Figuras 2.4 y 2.5 muestran una carta de declinación y una de inclinación para la época 2010.0.

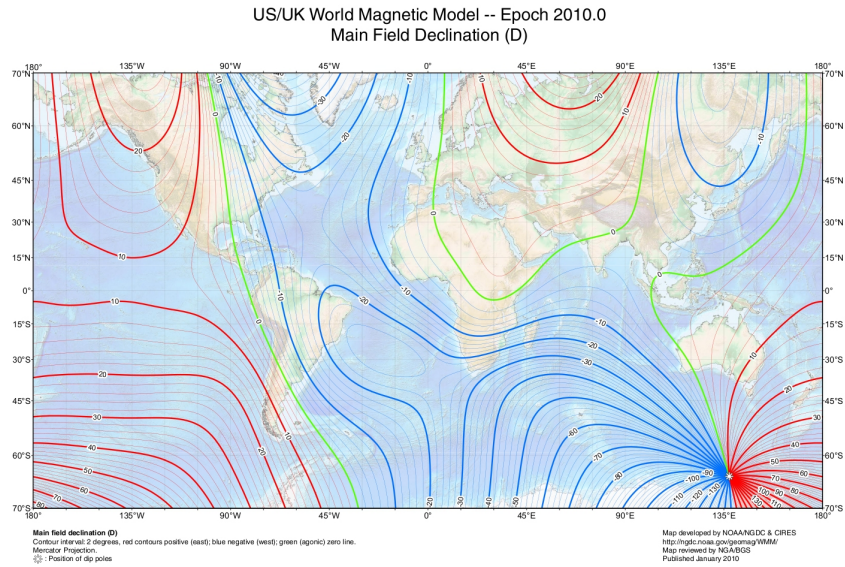


Figura 2.4. Carta de declinación magnética (Desarrollado por NOAA/NGDC&CIRES).

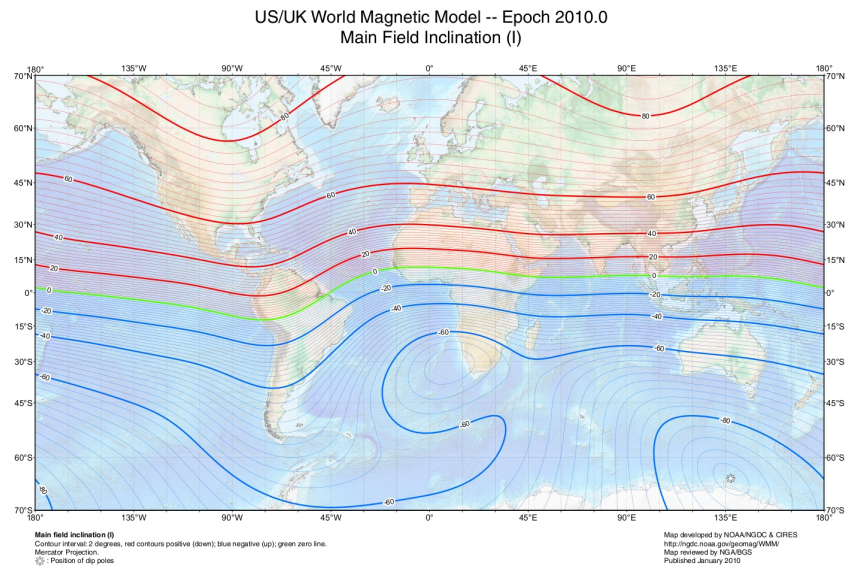


Figura 2.5. Carta de inclinación magnética (Desarrollado por NOAA/NGDC&CIRES).

## 2.3. Fuentes del campo geomagnético

La intensidad y la dirección del campo magnético de la Tierra varían constantemente porque éste es la superposición de diferentes procesos inductivos, de origen interno y externo al planeta, que interactúan uno con otro. Las fuentes más importantes de ellos son:

- a) núcleo externo fluido y conductor
- b) rocas magnetizadas en la corteza terrestre
- c) campos generados fuera de la Tierra por corrientes en la ionósfera y magnetósfera
- d) corrientes eléctricas en la corteza terrestre (inducidas por la variación de campos magnéticos externos).

### Fuerzas Internas

El campo magnético se genera en el núcleo del planeta (Figura 2.6) y se extiende atravesando el manto, la corteza y la atmósfera hasta llegar a la magnetopausa donde está limitado por el viento solar. La convección en el núcleo externo, las fuerzas de Lorentz y el efecto Coriolis, generan sistemas de corrientes que se alinean a lo largo del eje polar norte-sur. El líquido conductor del núcleo externo fluye a través del campo magnético existente, produciendo así un nuevo campo magnético que refuerza al original, y crea un dínamo auto-sostenido que mantiene el magnetismo terrestre (Figura 2.7).

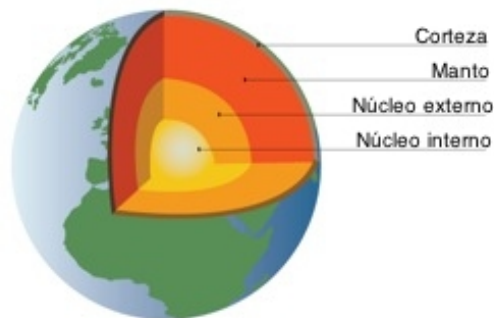


Figura 2.6. Estructura interna de la Tierra ([http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/geography/images/tec\\_001.gif](http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/geography/images/tec_001.gif)).



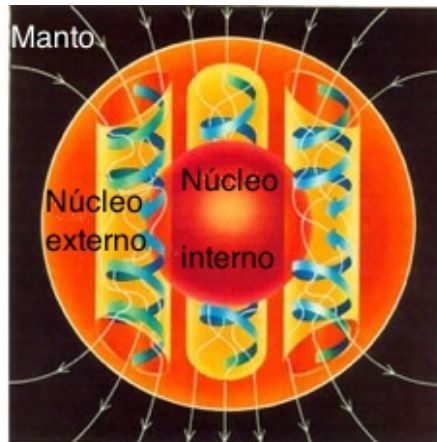


Figura 2.7. Representación esquemática de la Tierra con su efecto de dínamo ([http://en.wikipedia.org/wiki/File:Outer\\_core\\_convection\\_rolls.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Outer_core_convection_rolls.jpg)).

## Fuentes externas

La rotación de la Tierra, el calentamiento de la atmósfera, por acción del Sol, y el enfriamiento en el lado de la noche, producen vientos. Cuando éstos arrastran las partículas de la ionósfera, o plasma<sup>3</sup> ionosférico, éstas se mueven dentro de la influencia del campo magnético de origen interno. El campo geomagnético induce entonces, corrientes eléctricas en la ionósfera medibles desde la superficie de la Tierra a través de magnetómetros. A este efecto se le conoce como *dínamo ionosférico*, por la similitud con un generador de corriente eléctrica. Las corrientes generadas de este modo en el lado día (tienen como consecuencia una variación diurna, que es necesario considerar al trabajar con señales de campo magnético). Existen otras variaciones no periódicas que dependen de las condiciones del viento solar, como las producidas por tormentas magnéticas.

Las anomalías magnéticas son variaciones en el valor promedio del campo magnético terrestre para un sitio determinado. Las anomalías locales se atribuyen a la presencia de yacimientos minerales o roca magnética en la corteza terrestre. Otras anomalías también pueden darse por sedimentación de materiales magnéticos en lagos o golfos. En la Figura 2.8 se muestra el mapa de anomalías magnéticas en el mundo.

---

<sup>3</sup> El plasma consiste en un conjunto de partículas de gas ionizado cuyo número de cargas positivas y negativas es igual, de modo que la carga total del plasma es cero.

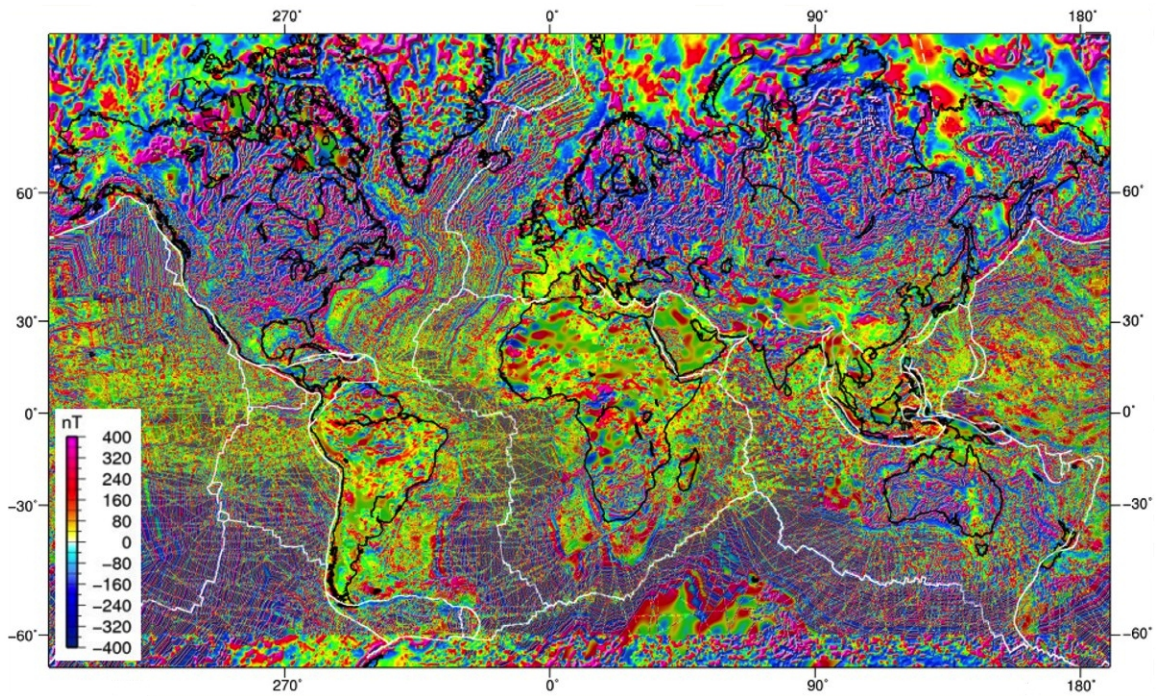


Figura 2.8. Mapa mundial de anomalías magnéticas derivado de una compilación de datos aeromagnéticos y marinos (<http://www.cps-amu.org/sf/notes/m10-1-10.htm>).

## 2.4. La magnetósfera terrestre y la relación Sol-Tierra

La energía del campo magnético terrestre es tan grande que éste funciona como coraza protectora contra las partículas contenidas en el viento solar. Estas partículas son de alta energía y escapan de la corona solar a velocidades de entre 300 y 700 km/s, arrastrando con ellas el campo magnético del Sol. Esta coraza es conocida como magnetósfera cuyo límite externo, llamado magnetopausa, es la frontera entre el campo magnético terrestre y el viento solar.

Sobre la superficie terrestre, el campo magnético se aproxima a un dipolo, pero conforme la distancia aumenta su forma se asemeja a la de un cometa que envuelve a la Tierra. Del lado del Sol su forma es casi esférica, mientras que el lado opuesto forma una cola larga (magnetocola) debido a que el viento solar "barre" el campo magnético terrestre. Esta burbuja se acerca a la superficie en los puntos donde se encuentran los polos magnéticos (Figura 2.9).

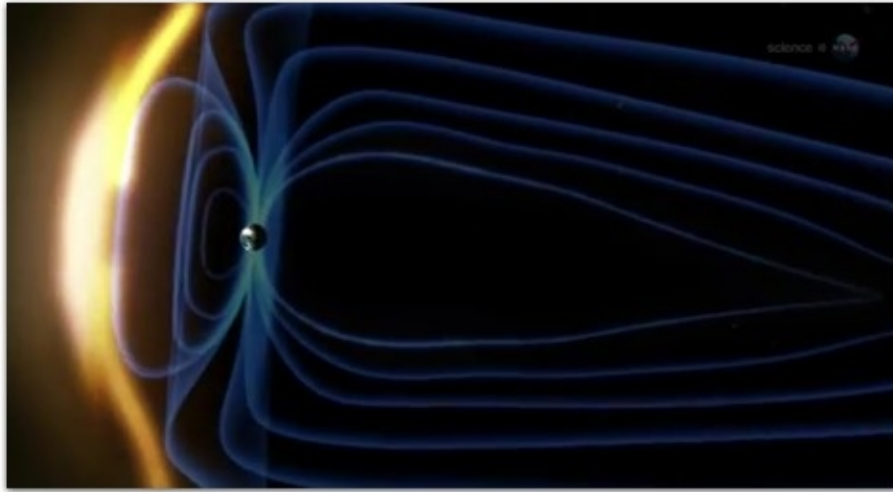


Figura 2.9. Acción del viento solar sobre el campo magnético terrestre (tomado de [https://www.youtube.com/watch?v=i\\_x3s8ODaKg](https://www.youtube.com/watch?v=i_x3s8ODaKg)).

La magnetósfera no tiene una forma fija, continuamente está cambiando al distribuir su plasma y su campo magnético como respuesta a las variaciones del viento solar. Durante esta redistribución de plasma se generan fenómenos perceptibles en la superficie terrestre, como las auroras en los polos, perturbaciones ionosféricas y actividad geomagnética medible.

### 2.4.1 Características de la magnetósfera

La magnetósfera tiene una frontera llamada magnetopausa, a unos 10 radios terrestres<sup>4</sup> (RT) de la superficie de la Tierra. Su corte transversal es muy aproximado al de un círculo. Sus medidas son sólo promedios, ya que la magnetósfera continuamente se comprime o expande conforme ocurren variaciones en la intensidad del viento solar (Figura 2.10). Cuando ocurre una eyección de masa coronal<sup>5</sup> la presión del viento solar comprime a la magnetopausa pudiendo quedar a 6.6 RT de la superficie terrestre. Por su parte, la *magnetocola* varía enormemente en longitud y puede llegar a ser hasta de 100 RT, aproximadamente.

Dos RT más allá de la magnetopausa se encuentra el frente de choque permanente producido por el encuentro de un obstáculo que se opone a las velocidades supersónicas del viento solar. En este punto, las partículas provenientes del Sol se desaceleran súbitamente convirtiendo su energía cinética en calor. Más allá de los 100 RT el viento recupera su velocidad y parte de él se infiltra en la cola magnetosférica.

<sup>4</sup> Un radio terrestre (o RT) =6371 km.

<sup>5</sup> Una eyección de masa coronal es una onda de radiación y viento solar expelida por el Sol durante su máximo de actividad.

La región interna de la magnetopausa se llama *magnetósfera interior*, ésta no incluye la región sobre los polos. Dentro de la magnetósfera interior se encuentran los anillos de radiación de Van Allen, que son regiones de forma toroidal confinadas por el campo magnético terrestre. Se encuentran sobre la superficie terrestre entre 700 y 48000 km. En ellos se encuentran confinadas partículas altamente ionizadas provenientes del viento solar, de modo que su densidad es letal. Asociada al plasma en los anillos de radiación se encuentra una corriente eléctrica que rodea a la Tierra llamada, precisamente, *corriente de anillo*, cuyas partículas se van perdiendo gradualmente o dispersando hacia órbitas dentro de la atmósfera. Este plasma se recupera con la inyección ocasional de plasma nuevo durante las tormentas magnéticas. Los cinturones de radiación inducen auroras, relámpagos y otros fenómenos eléctricos.

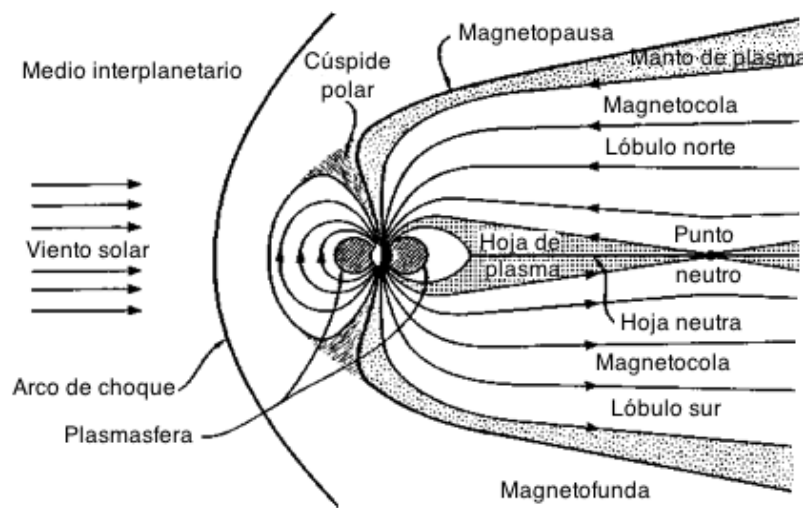


Figura 2.10. Componentes de la magnetósfera (tomado de <http://www-ssc.igpp.ucla.edu/personnel/russell/papers/magsphere/msphere06.gif>)

En el lado noche, la cola magnetosférica está dividida por una hoja de plasma que divide la cola magnetosférica por el ecuador en dos lóbulos. La hoja de plasma tiene un espesor de 3 a 7  $R_T$ , densidad de 0.3 a 0.5 iones/cm<sup>3</sup> con una energía iónica de 2 a 5 keV. En esta región el plasma fluye en diferentes direcciones. La corriente eléctrica asociada a esta región fluye a través del ecuador de la cola de este a oeste, o del amanecer al anochecer, para cerrar en la magnetopausa. El campo magnético resultante de este circuito tiende a alargar los lóbulos de la cola (Figura 2.11).

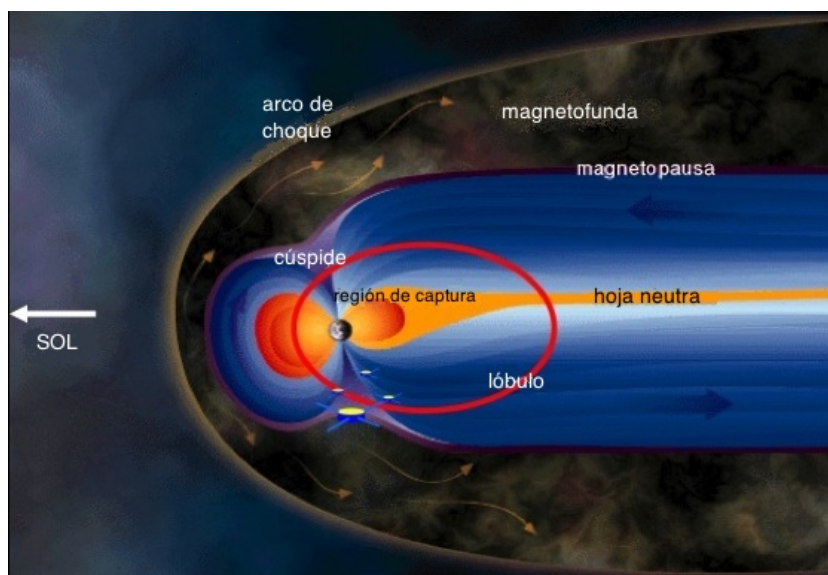


Figura 2.11. Componentes del ambiente geomagnético (tomado de <http://phys.org/news67265032.html>).

Los lóbulos de la cola, al norte y sur de la hoja de plasma tienen líneas de campo magnético casi rectas excepto sobre los polos norte y sur, donde convergen. Estas regiones se conocen como *cúspides* y en ellas el campo magnético es débil. Es ahí donde se separan las líneas de campo magnético que van hacia el Sol y hacia la cola magnetosférica, es decir, donde se cierra el circuito magnético. El campo magnético en la cola es muy fuerte y en esta región se acumula gran cantidad de energía magnética. Se cree que esta energía se libera repentinamente durante una subtormenta geomagnética.

Por otro lado, también existe un *campo magnético interplanetario* (IMF, *Interplanetary Magnetic Field*), que es el campo magnético del Sol, cuyas líneas de campo son arrastradas por el viento solar, alcanzando distancias más allá de la órbita de Plutón, por lo tanto, todos los planetas del Sistema Solar se encuentran inmersos en el campo magnético interplanetario. Tanto el campo magnético interplanetario como el viento solar tienen forma de espiral a causa de la rotación del Sol (Figura 2.12). Los iones que escapan de la corona solar viajan por las líneas de campo. Cada ion permanece en una línea a menos que las líneas de campos magnéticos de otras fuentes se entrecrucen con ella.



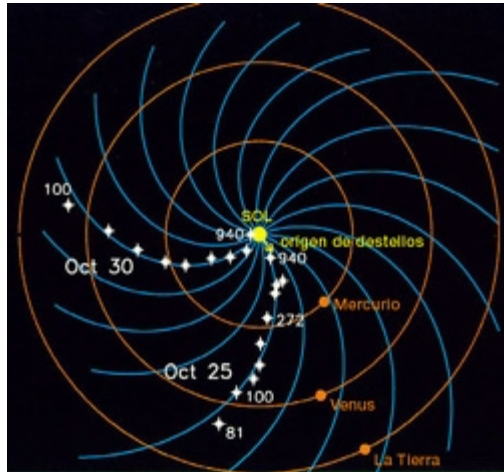


Figura 2.12. Campo magnético interplanetario (tomado de <http://www.windows2universe.org>).

El comportamiento de un plasma en presencia de un campo magnético depende de la fuerza relativa entre ambos. Si el campo es fuerte, éste domina al plasma, determinando su dirección. Por el contrario, cuando el campo magnético es débil, el plasma domina y distorsiona las líneas de campo inmersas en él. En la corona solar ocurre el primer caso: el campo magnético es muy fuerte y domina al viento solar frenándolo. Pero a medida que el viento solar se aleja del campo magnético del Sol, los iones del plasma comienzan a dominar al campo magnético controlando las líneas de campo.

### 2.4.1.1 La reconexión magnética.

Cuando dos campos magnéticos se acercan, sus líneas de campo se modifican y ocurre una reconexión magnética. Este reordenamiento de las líneas es acompañado de liberación de energía almacenada en los campos magnéticos originales. En un plasma inmerso en un campo magnético las líneas de campo de direcciones opuestas se rompen y reconectan durante la denominada *reconexión magnética*. Las líneas se aproximan (Figura 2.13 A) hasta adquirir una topología magnética en X (Figura 2.13 B). El punto donde intersecan las líneas se conoce como *punto neutro*, donde la intensidad del campo es cero. Las líneas de campo recién formadas aceleran el plasma lejos de la X, produciendo chorros de plasma a gran velocidad. De esta forma, la reconexión es un proceso en el que las partículas del plasma contenidas en diferentes líneas de campo pueden llegar a compartir la misma línea. La reconexión puede ocurrir cuando el plasma viaja a través de un punto neutro, allí la intensidad del campo magnético es cero y no tiene dirección definida. La reconexión, mecanismo postulado por James Dungey en 1961, permite explicar las teorías de transferencia de energía del viento solar a la magnetósfera, y de la liberación de energía durante las subtormentas.

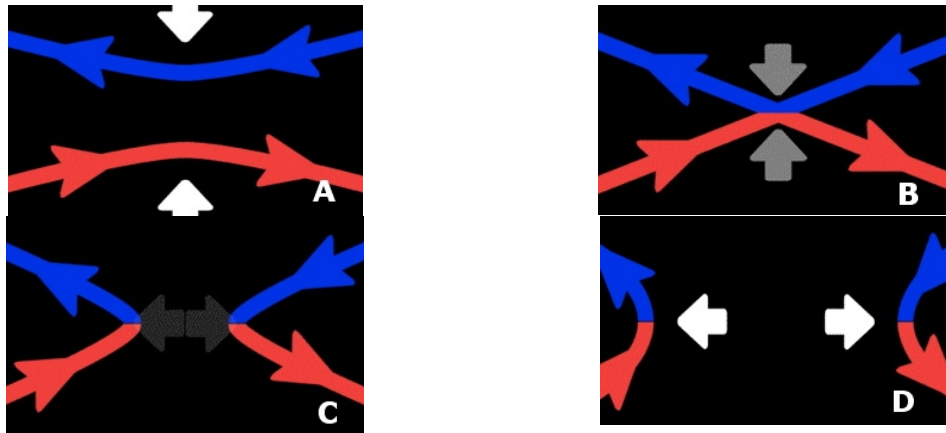


Figura 2.13. Reconexión magnética. A) Las líneas magnéticas se aproximan. B) Las líneas forman una X. C) La X se rompe liberándose energía. D) Las nuevas líneas se separan rápidamente (tomado de <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=36452>).

Durante una subtormenta magnética las líneas de campo de la cola magnetosférica se reconectan (Figuras 2.14 y 2.15), la energía magnética se convierte en energía cinética que acelera el plasma magnetosférico de manera súbita hacia la Tierra, originando subtormentas y auroras polares.

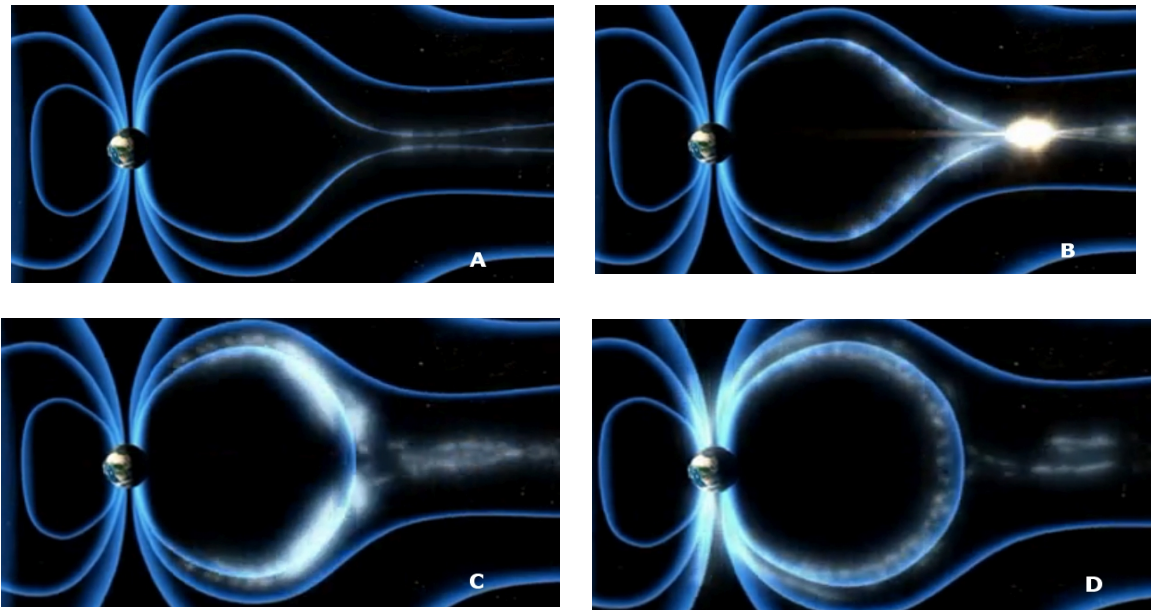


Figura 2.14. Proceso de reconexión magnética en la cola magnetosférica: A) Las líneas magnéticas de la cola magnetosférica se aproximan. B) Las líneas forman una X y la energía magnética es liberada en forma de energía cinética expulsando un chorro de plasma a alta velocidad. C) El chorro de plasma viaja hacia la Tierra. Las líneas se han reconectado. D) El plasma viaja hacia los polos y produce las subtormentas geomagnéticas (tomado de <http://www.youtube.com/watch?v=BDZj1CmsJ64>).

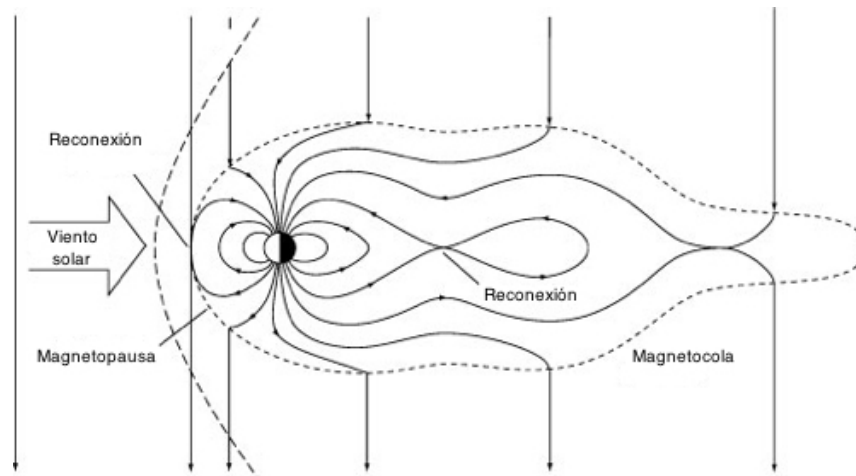


Figura 2.15. Reconexión de líneas de campo en la cola magnetosférica (Tomado de [http://image.absoluteastronomy.com/images/encyclopediainages/m/ma/magnetosphere\\_simple.jpg](http://image.absoluteastronomy.com/images/encyclopediainages/m/ma/magnetosphere_simple.jpg)).

## 2.4.2 La ionósfera

Es una capa de la atmósfera que se encuentra bajo la acción ionizante de los rayos ultravioleta provenientes del Sol, se ubica a una altitud de entre los 80 y 600 km, donde la densidad de las partículas atmosféricas es muy baja. Las moléculas de *gas ligero*<sup>6</sup> así ionizadas constituyen el plasma ionosférico.

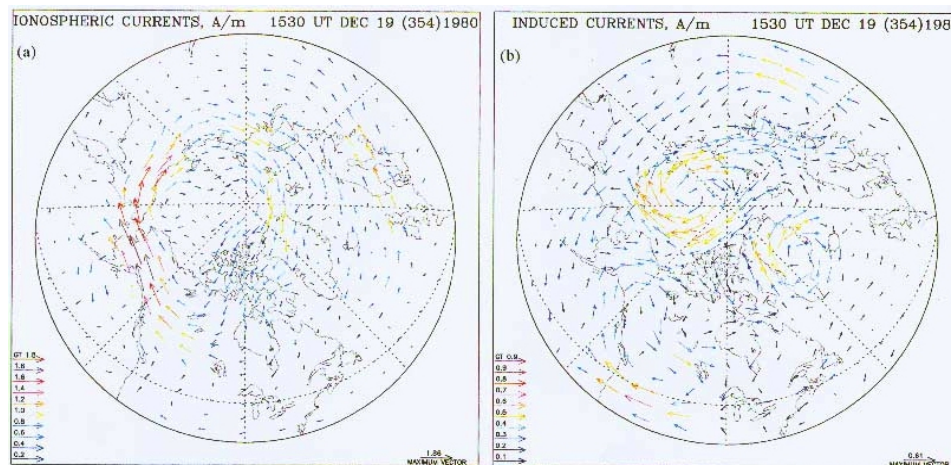


Figura 2.16. a) Vectores de corrientes ionosféricas y b) vectores de corrientes inducidas para el 19 de diciembre de 1980 a las 15:30 UT (tomado de <http://home.istar.ca/~jwalker/ionosphe.html>)

El calentamiento que produce el Sol en la atmósfera propicia la formación de vientos en el lado día. Cuando estos vientos arrastran las partículas del

<sup>6</sup> La fuerza de gravedad propicia la formación de capas en la atmósfera según la composición química del aire, con las moléculas más pesadas ( $N_2$  y  $O_2$ ) dominando la parte baja y las ligeras (He y H) en altitudes por arriba de 600 kilómetros.



plasma ionosférico a través del campo geomagnético se generan nuevos campos magnéticos medibles desde la superficie terrestre, de los cuales se pueden elaborar mapas de corrientes en la ionósfera (Figura 2.16). El tiempo que toma la recombinación<sup>7</sup> de iones con electrones en la ionósfera es mayor a la duración de la noche, por lo que la ionización se conserva a grandes altitudes. La estructura de la ionósfera depende del gradiente de densidad electrónica. Esta estructura tiene capas con picos de ionización, y se llaman D, E, F1 y F2 (Figura 2.17) y tienen las siguientes características:

**Capa D.** Se encuentra alrededor de los 60 km de altitud, aparece sólo durante el día; absorbe frecuencias inferiores a los 10MHz, por lo que protege al planeta de la radiación espacial.

**Capa E.** Se encuentra entre los 80 y 110 km.

**Capa F1.** Se encuentra entre 180 y 600 km.

**Capa F2.** Se encuentra entre los 300 y 600 km y es la capa más alta de la ionósfera.

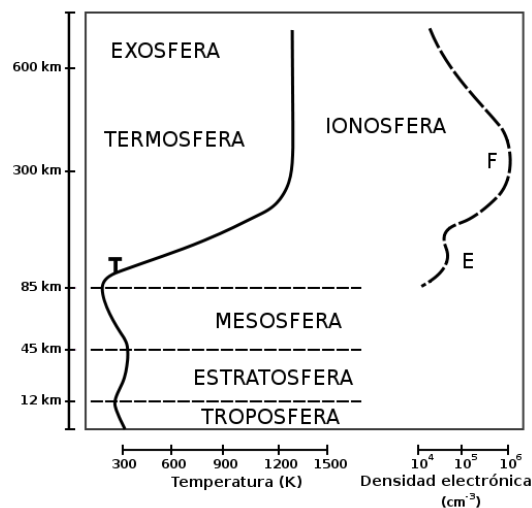


Figura 2.17. Estructura de la atmósfera (tomado de <http://en.wikipedia.org/wiki/Ionosfera>).

Las corrientes y campos eléctricos en la ionósfera dependen de su dinámica y su interacción con la atmósfera neutra y con el campo magnético terrestre. El plasma ionosférico es arrastrado por los vientos neutros de la atmósfera superior. Las cargas del plasma, al ponerse en movimiento, constituyen una corriente, que en presencia del campo geomagnético tienen el efecto de un dínamo (Kelley, 2009; Richmond et al., 1992).

Las características de los modelos de dínamo ionosférico son:

<sup>7</sup> Cuando la radiación ionizante cesa, los iones de un plasma comienzan a neutralizarse por combinarse con elementos y moléculas cercanas, o a perder energía por colisiones con partículas neutras.

1. Las líneas de campo magnético son equipotenciales, la corriente fluye entre los hemisferios a lo largo de estas líneas en todas las latitudes magnéticas fuera de los casquetes polares, cuyas fronteras se encuentran en los  $\pm 75^\circ$  de latitud.
2. La distribución del potencial eléctrico está confinado dentro de las regiones aurorales (entre  $60^\circ$  y  $75^\circ$  de latitud magnética en cada hemisferio).
3. La polarización del campo eléctrico (que tiene dirección E-W) es influido por las variaciones solares, que se manifiestan en el sistema de corrientes de variación diaria (Sq), y que dependen de las temporadas del año y de los ciclos solares.
4. La ionósfera tiene un potencial eléctrico de miles de volts con relación a la superficie terrestre. La conductividad eléctrica en la ionósfera aumenta con la altitud y la carga eléctrica se distribuye sobre el globo manteniendo un potencial casi constante (Davis, 1983).
5. En latitudes altas el campo eléctrico de la ionósfera depende de la interacción viento solar-magnetósfera, de la orientación del campo magnético interplanetario y de las variaciones de origen interno (Matsuo, 2003). Allí el campo magnético es casi vertical, por lo que las partículas de la magnetósfera se precipitan causando un incremento en la conductividad de la ionósfera en el óvalo auroral.

Las corrientes ionosféricas son controladas por la conductividad y el campo eléctrico conforme a la ley de Ohm<sup>8</sup>. La conductividad en el óvalo auroral tiene un mínimo en el sector mediodía y un máximo en el sector medianoche (Figura 2.18).

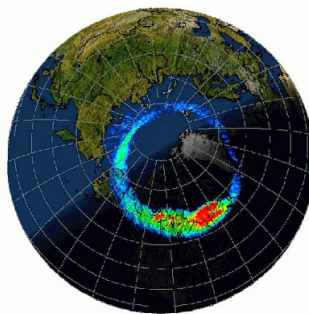


Figura 2.18. Óvalo auroral sobre polo norte. El rojo en falso color indica dónde es más brillante la aurora (medianoche), y el azul indica dónde es más oscura (tomado de [http://cse.ssl.berkeley.edu/artemis/mission\\_substorm\\_closeup3.html](http://cse.ssl.berkeley.edu/artemis/mission_substorm_closeup3.html)).

Las corrientes en la ionósfera son responsables de muchas de las variaciones

<sup>8</sup> La ley de Ohm establece que la magnitud de una corriente entre dos puntos depende de la conductividad y del campo eléctrico, de la manera siguiente:  $\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E}$ , donde  $\mathbf{J}$  es la corriente,  $\sigma$  es la conductividad y  $\mathbf{E}$  es el campo eléctrico.

del campo magnético terrestre, su magnitud depende de la conductividad eléctrica, que es anisotrópica por efecto del campo magnético, y por tanto, es un tensor compuesto por tres tipos de conductividad: *paralela*, de *Pedersen* y de *Hall* (Kivelson y Russell, 1995) cuyo valor está determinado por las probabilidades de colisión entre iones y electrones en el plasma. Estos tres tipos de conductividades permiten el paso de las corrientes eléctricas que llevan los mismos nombres.

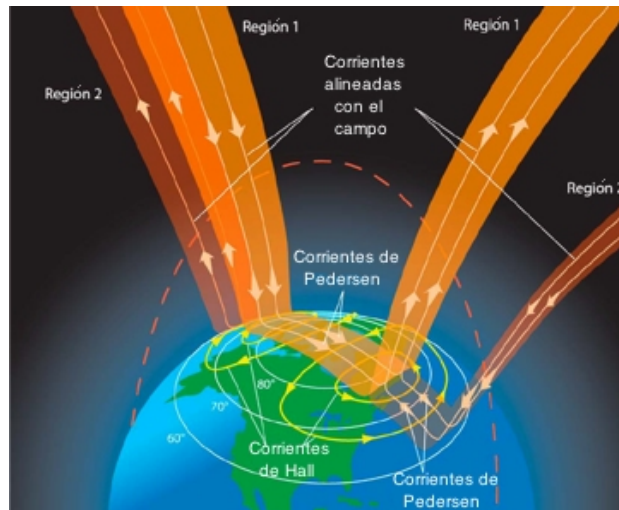


Figura 2.19. Corrientes alineadas al campo, de Hall y de Pedersen (Tomado de <http://www.physicsforums.com>).

La *conductividad paralela* coincide en orientación con el campo magnético y permite la circulación de las corrientes de Birkeland, o corrientes alineadas con el campo. La *conductividad de Pedersen* es paralela al campo eléctrico y perpendicular al campo magnético, ésta permite el paso de corrientes alineadas con la superficie terrestre dentro de la zona auroral. Finalmente, la *conductividad de Hall* es perpendicular a ambos campos, eléctrico y magnético; y permite el paso de las corrientes de Hall (Figura 2.19).

En latitudes medias el campo eléctrico es generalmente estable si se compara con latitudes ecuatoriales o altas. Sin embargo, las derivas iónicas aumentan durante la noche con relación al día. Las perturbaciones nocturnas del viento neutro que afectan al dínamo ionosférico en latitudes medias son predominantemente dirigidas hacia el oeste.

En latitudes bajas el calentamiento que produce el Sol en la ionósfera inferior provoca que el plasma ascienda, atravesando las líneas de campo magnético. A esta latitud dichas líneas son horizontales y establecen una hoja de corriente en la región E y modifican la ionización en la capa F. Se establece también una corriente hacia el Este, llamada electrojet ecuatorial, que corre dentro de los  $\pm 3^\circ$  del ecuador magnético.

### 2.4.3 Efectos solares

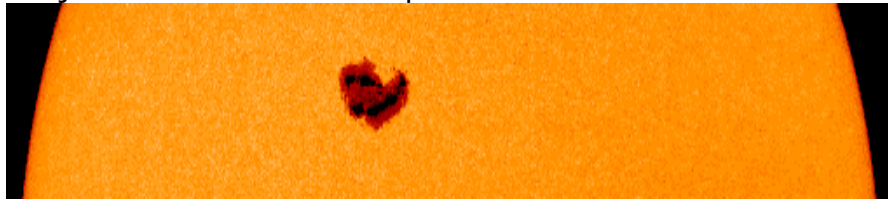
El Sol es el imán más poderoso del Sistema solar, su campo magnético se extiende más allá de la órbita de Plutón. La Tierra, al encontrarse inmersa en este campo interplanetario, tiene interacción con él.

#### 2.4.3.1 Viento solar

El plasma del viento solar, que es la fuente de energía de los procesos magnetosféricos, tiene una densidad de alrededor de 6 iones por  $\text{cm}^3$  a la altura de la órbita terrestre, y una velocidad promedio de 450 km/s en circunstancias normales, la que le permite llegar a la Tierra en 4 o 5 días, pero en ocasiones, el Sol puede tener erupciones que emiten un viento solar que puede alcanzar los 890 a más de 1000 km/s.

#### 2.4.3.2 Manchas solares y llamaradas

Un máximo en la actividad solar se presenta cada 11 años, en promedio. Éste se distingue por un incremento en el número de manchas solares (Figura 2.20) en la fotosfera. En ellas el campo magnético es muy intenso, lo que ocasiona que las líneas del campo magnético se deformen y surjan llamaradas, que son explosiones de muy alta energía (Figura 2.21) que liberan eyecciones de masa coronal que, al aproximarse a la Tierra puede poner en peligro la vida de astronautas, dañar satélites; y al penetrar en la atmósfera terrestre, exponer a viajeros aéreos a dosis de rayos X, producir auroras a bajas latitudes e interrumpir las telecomunicaciones.



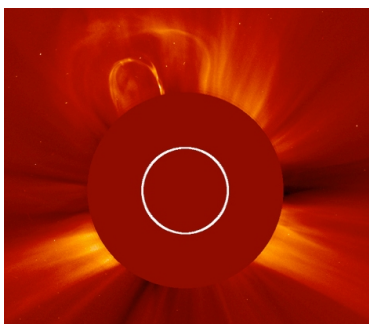
*Figura 2.20. Mancha solar gigante. Enero 10-14, 2005 (tomado de [http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2005/05may\\_solarmyth/](http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2005/05may_solarmyth/)).*



*Figura 2.21. Llamarada solar (tomado de [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_flare](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_flare)).*

### **2.4.3.3 Eyección de masa coronal**

Una eyección de masa coronal es la onda de radiación producida por una llamarada solar. Consiste en una onda de viento solar expulsada por el Sol durante su periodo de máxima actividad (Figura 2.22).



*Figura 2.22. Eyección de masa coronal (tomado de [www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/news/News012313-cme.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/News012313-cme.html)).*

El plasma de la eyección es precedido por una onda de choque que cuando alcanza la órbita terrestre modifica los sistemas de corrientes en ella provocando tormentas magnéticas con la capacidad de dañar circuitos eléctricos en satélites, interrumpir las telecomunicaciones y dañar transformadores y generadores de energía eléctrica, tal como ocurrió en el histórico apagón de Quebec en 1989 (Figura 2.23).



Figura 2.23 Apagón de Quebec en 1989. (Tomado de [http://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun\\_darkness.html](http://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun_darkness.html)).

## **2.4.4 Perturbaciones magnéticas provocadas por la interacción Sol-Tierra.**

### **2.4.4.1 Tormentas geomagnéticas**

Las perturbaciones generadas por el incremento de la corriente se pueden medir en todo el mundo. El efecto de una tormenta geomagnética alcanza su máxima intensidad en un tiempo aproximado de doce horas, a la que sigue una etapa de recuperación gradual de varios días.

Las tormentas geomagnéticas presentan tres fases, la primera de ellas ocurre cuando la onda de choque de una eyección de masa coronal incide sobre la magnetósfera y la comprime. La corriente en la magnetopausa aumenta y el campo magnético se incrementa súbitamente, en cuestión de minutos, una cantidad entre 50 y 100 nanoteslas en latitudes bajas (índice Dst). Esta primera fase se conoce como impulso súbito (*SI, Sudden impulse*), o inicio súbito de tormenta (*SSC, Sudden Storm Commencement*) dependiendo si inicia o no una tormenta magnética (Figura 2.24a).

La segunda fase es la principal y consiste en una reducción del campo magnético en la componente horizontal de 100 o más nanoteslas por debajo del nivel normal (Figura 2.24b). Ocurre cuando el plasma de la onda de choque llega a la magnetósfera y se produce una corriente eléctrica que rodea al planeta en un anillo y que fluye hacia el oeste, provocando la reducción del campo magnético, característico de esta fase. Esta inyección de iones en el anillo de corriente produce subtormentas que permiten la

formación de auroras que alcanzan bajas latitudes.

La tercera fase consiste en una etapa de recuperación de los niveles normales del campo magnético (Figura 2.24c). La duración de esta fase toma varios días y corresponde a la pérdida gradual de iones al colisionar con átomos de hidrógeno.

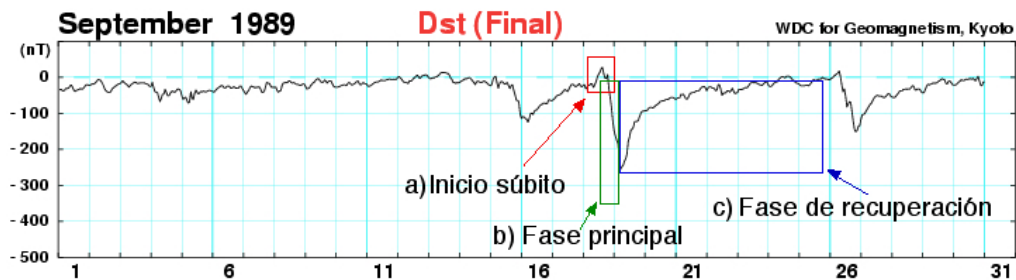


Figura 2.24. Fases de una tormenta magnética en el índice Dst. a) Impulso súbito, b) fase principal y c) fase de recuperación (tomado de WDC for Geomagnetism, Kyoto).

## Tormentas recurrentes y no recurrentes

Con la rotación del Sol, y su periodo de 27 días, ocurren tormentas llamadas recurrentes. La presión del viento solar es variable porque existen regiones con más alta presión que giran en el Sol. Este viento solar más intenso tiene un encuentro periódico con la Tierra produciéndose este tipo de tormentas.

Cerca de un máximo de actividad solar ocurren eyecciones de masa coronal con mayor frecuencia. La onda de choque generada por esta causa, al alcanzar la Tierra, produce tormentas. Ya que no es posible saber con exactitud cuándo ocurrirá un evento solar de este tipo, las tormentas producidas por esta causa se llaman tormentas no recurrentes.

### 2.4.4.2 Subtormentas

En condiciones normales, la manifestación de las subtormentas está restringida a las zonas aurorales y ocurren con mayor frecuencia que las tormentas magnéticas; visualmente se caracterizan por el despliegue de auroras intensas, y magnéticamente, como perturbaciones del campo. Su ocurrencia es debida a la liberación violenta de energía acumulada en la cola magnetosférica al variar las condiciones del viento solar. El proceso por el cual se libera la energía se explica a través del fenómeno de la reconexión magnética, por el que parte de la energía magnética se transforma a energía cinética de las partículas individuales del plasma.



### 2.4.4.3 Auroras polares

El fenómeno de las auroras polares es provocado por la precipitación de iones y electrones procedentes de la magnetósfera, éstos excitan los átomos de la atmósfera, los cuales emiten fotones al regresar a su estado normal. Las auroras se presentan en las regiones polares debido a que en ellas se concentran las líneas de campo magnético y las partículas se precipitan siguiendo las líneas. Tales regiones tienen la forma de un óvalo de tamaño variable de acuerdo a las perturbaciones que induce el viento solar (Figura 2.25), y cuyo centro está desplazado hacia el lado noche.

Cuando las perturbaciones magnéticas son muy fuertes, debido a tormentas, las auroras se vuelven más intensas, el óvalo auroral se ensancha de modo que las auroras pueden observarse a bajas latitudes.

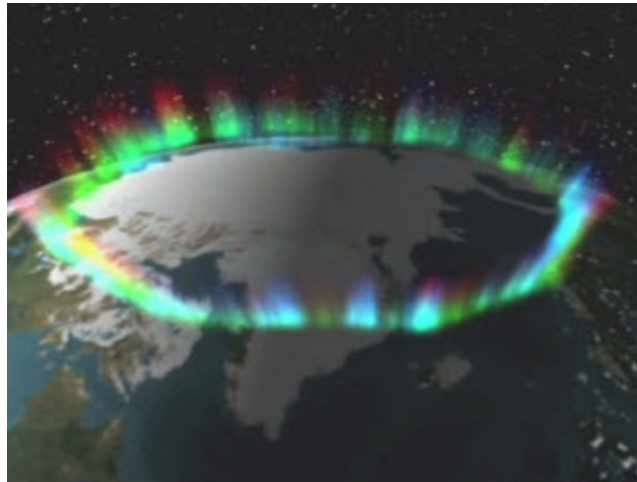


Figura 2.25. Aurora polar fotografiada por un satélite (tomado de <http://spacemath.gsfc.nasa.gov/pEclips14.html>).

### Corriente de chorro ecuatorial

Se ha visto que en la ionósfera fluyen sistemas de corrientes, uno de ellos es la corriente de *chorro ecuatorial* (*electrojet*) que fluye sobre la región ecuatorial del lado día de la ionósfera hacia el este (anochecer). Para un observatorio geomagnético situado sobre el ecuador, la componente horizontal se registra con una intensidad anormalmente más grande (80 a 100 nT) que en otros puntos del planeta (Basavaiah, 2011).



## Corriente de chorro auroral

Otro sistema de corrientes es el del *electrochorro auroral*, el cual fluye alrededor de los óvalos aurales desde el lado día hacia el oeste. Este sistema de corrientes es responsable de las perturbaciones magnéticas asociadas a subtormentas. La corriente de chorro auroral se asocia a las corrientes de Birkeland y es causada por cambios inusuales en la conductividad del plasma ionosférico. Su magnitud es medida en los observatorios geomagnéticos y determina el grado de intensidad de las subtormentas.

### 2.4.4.4 Micropulsaciones magnéticas

Micropulsación magnética corresponde a la variación de baja frecuencia del campo magnético terrestre. Su nombre proviene de las primeras observaciones con microscopio del movimiento de la aguja de una brújula. Las micropulsaciones son reflejo de los procesos electromagnéticos que resultan de la interacción Sol-Tierra, y consisten de una serie de perturbaciones magnetosféricas de ultra baja frecuencia (ULF, *Ultra Low Frequency*). A través de los registros de magnetómetros, en observatorios terrestres y en el espacio, se han observado estas micropulsaciones generadas en la ionósfera, o magnetósfera, por causas diversas entre las que se encuentran las inestabilidades de Kelvin-Helmholtz<sup>9</sup>.

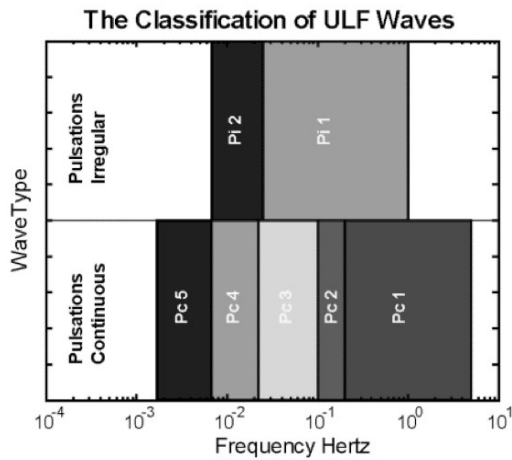
Las micropulsaciones se clasifican según su forma en pulsaciones continuas (Pc), por su forma suave y características cuasisenoidales; y pulsaciones irregulares (Pi) de forma dentada e irregular. Esta clasificación principal se subdivide a su vez en bandas de frecuencia que corresponden a distintos fenómenos (Tabla 2.2).

*Tabla 2.2 Clasificación de las pulsaciones magnéticas, subdivisiones de la clasificación general y duración de sus periodos.*

Pulsaciones irregulares		
Clase	Bajo periodo	Alto periodo
Pi1	45	1
Pi2	150	45

Pulsaciones continuas		
Clase	Bajo periodo	Alto periodo
Pc1	5	0.2
Pc2	10	5

<sup>9</sup> La inestabilidad de Kelvin-Helmholtz ocurre cuando existe una diferencia de velocidad a través de la frontera entre dos fluidos.



Pc3	45	10
Pc4	150	45
Pc5	600	150

Las pulsaciones se estudian en términos de campo magnético y eléctrico para encontrar los mecanismos que las generan (ver Tabla 2.3). Entre las características que se estudian se encuentran:

1. Las características de la frecuencia incluyendo las estructuras armónicas.
2. La distribución espacial y la posible propagación de las ondas.
3. Las características de polarización.
4. Su correlación con parámetros de viento solar.
5. Correlación con tormentas o subtormentas.
6. Correlación con datos de partículas *in situ*.

Tabla 2.3. Clasificación de las pulsaciones magnéticas, sus periodos y frecuencias.

Clases de pulsación							
	Pulsaciones continuas					Pulsaciones irregulares	
	Pc 1	Pc 2	Pc 3	Pc 4	Pc 5	Pi 1	Pi 2
T [s]	0.2-5	5-10	10-45	45-150	150-600	1-40	40-150
F	0.2-5 Hz	0.1-0.2 Hz	22-100 mHz	7-22 mHz	2-7 mHz	0.025-1 Hz	2-25 mHz

Las fuentes de las pulsaciones (u ondas ULF) pueden ser el viento solar, el frente de choque, el arco de choque y la magnetopausa. Una parte considerable de la energía de estas ondas logra atravesar la magnetopausa

propagándose dentro de la magnetósfera e interactuando con guías de onda<sup>10</sup>, cavidades y líneas de campo, creando las pulsaciones medidas por los magnetómetros. Las ondas observadas sobre la superficie terrestre, con frecuencia no son iguales a las que atravesaron la magnetósfera, ya que en ésta ocurren procesos de amplificación y transformación. Los dos procesos amplificadores se llaman *resonancia* y *resonancia de cavidad*, e interactúan entre ellos.

La propagación de las ondas ULF ocurre a lo largo o a través del campo magnético hasta alcanzar la ionósfera, donde se inducen corrientes eléctricas que irradian ondas puramente electromagnéticas a la atmósfera neutra.

Las ondas ULF medidas sobre el terreno se producen en varias regiones de la magnetósfera, los procesos físicos son muy diversos. Para comprender el tipo de onda que podría recibirse en una latitud en particular es necesario conocer por cuál región de la magnetósfera pasa la línea de campo local. Desafortunadamente la magnetósfera cambia continuamente y las proyecciones magnéticas de una región también cambian de acuerdo con el nivel de actividad magnética.

Las micropulsaciones Pc 1 y Pc 2 de alta frecuencia tienen origen en la magnetósfera ecuatorial por inestabilidad local de onda-partícula o resonancias en la cavidad magnetosférica. Algunas de las pulsaciones irregulares que son observadas sólo en la superficie terrestre son fluctuaciones de corrientes ionosféricas justo sobre el observatorio y se limitan al espacio ionosférico.

#### **2.4.4.5 Variaciones del campo magnético**

El movimiento de las partículas de aire ionizadas a través de las líneas de campo, *induce fuerzas electromotrices que, a su vez, inducen corrientes eléctricas afectando la magnitud del campo magnético registrado a nivel del suelo.*

*A la variación regular del campo magnético debido a la acción del Sol se le conoce como variación Sq (solar quiet variation). El efecto, medido sobre la superficie terrestre, es el resultado de variaciones en las corrientes ionosféricas, y puede describirse como una capa esférica flotando a cierta distancia sobre la superficie terrestre, dividida en hemisferios, cada uno con un vórtice, y un foco en latitudes medias moviéndose una hora antes del mediodía local. El sentido de rotación del sistema de corrientes es antihorario en el hemisferio norte, y horario en el sur, y se muestra en la Figura 2.26.*

---

<sup>10</sup> Una guía de onda es una estructura física que sirve para conducir ondas electromagnéticas.

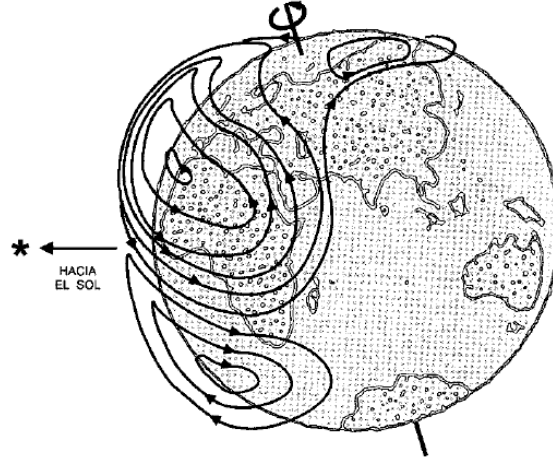


Figura 2.26. Sistemas de corrientes ionosféricas que generan la variación geomagnética Sq (tomado de en.wikipedia.org).

#### 2.4.4.6 Índices de campo magnético: Dst, Ap, Kp, AE.

De los estudios de campo magnético realizados desde 1861, hoy se sabe que a latitudes ecuatoriales y medias, la componente horizontal del campo magnético es la más afectada durante una tormenta magnética. Tales estudios han mostrado que la disminución de la componente horizontal del campo magnético se puede representar como un campo magnético paralelo al eje geomagnético dirigido hacia el sur. La magnitud de esta perturbación de campo axialmente simétrica varía según la tormenta. Se han planteado varios índices para obtener descripciones cuantitativas de las tormentas magnéticas, por ejemplo, a partir del *índice Dst* se puede estimar la severidad de una tormenta magnética.

El decremento de la componente H (horizontal) durante la fase principal y de recuperación de una tormenta magnética no tiene la misma magnitud en todo el mundo. El decremento es máximo cercano en el atardecer (tiempo local) y mínimo cerca del amanecer, ello es indicativo de la corriente parcial de anillo. Por esta razón se divide la perturbación **D** de la tormenta en dos partes:

$$\mathbf{D} = \mathbf{Dst} + \mathbf{DS}$$

donde, **Dst** se define como la parte de **D** que es simétrica con relación al eje del dipolo terrestre, y **DS** es el remanente. Durante la parte rápida de la fase de recuperación de una tormenta, **DS** declina de modo tal que **D** es casi simétrica. Una medida comunmente utilizada para la actividad de la tormenta

magnética es el índice **Dst**, que es un índice geomagnético para monitorear el nivel de tormenta magnética alrededor del mundo. Este índice es el promedio de las componentes del campo magnético de los magnetogramas de latitudes medias y ecuatoriales de todo el mundo. A medida que el *índice Dst* es más negativo, más intensa es la tormenta magnética.

### Índice K

Este índice se obtiene comparando un rango de tres horas de actividad magnética con la curva de un día quieto en un observatorio específico y es un índice cuasi-logarítmico. El valor que puede tomar este índice va de 0 a 9.

### Índice Kp

El índice Kp es un índice asignado para todo el planeta. Toma intervalos de tiempo de tres horas en tiempo universal, y se calcula por el promedio aritmético de los valores de los índices K medidos en trece observatorios específicos (ver Tabla 2.4). Cada uno de ellos asigna un índice K a cada intervalo de tres horas, basado en el rango de amplitud de los elementos de campo horizontalmente más perturbados. El rango de amplitud es la diferencia entre los valores máximo y mínimo para el elemento después de una remoción del estimado de los efectos de variación de día quieto.

*Tabla 2.4 Observatorios geomagnéticos a partir de los cuales se obtiene el índice Kp.*

Lerwick, UK	Eskdalemuir, UK
Hartland, UK	Ottawa, Canadá
Meannook, Canadá	Fredericksburg, USA
Sitka, USA	Eyrewell, Nueva Zelanda
Canberra, Australia	Lovo, Suecia
Brorfelde, Dinamarca	Wingst, Alemania
Niemegk, Alemania	

### Índice AE

Este índice se conoce como *Auroral Electrojet (AE)*, proporciona una medida global y cuantitativa de la actividad magnética en la región auroral, la cual es producida por corrientes ionosféricas que circulan en y por debajo del óvalo auroral. El índice describe el rango total de variación en un instante de tiempo en comparación con los valores de la componente H, para ello consideran los días quietos alrededor del óvalo auroral. Este índice se ha utilizado en estudio de morfología de tormentas.

## **Capítulo III**

### **El Volcán Popocatépetl**

El volcán Popocatépetl (Figura 3.1) está situado en el centro de México. Su nombre, en lengua náhuatl, significa "montaña que humea". El peligro que representa no sólo se debe a la energía que puede liberar, sino también al hecho de que se encuentra muy cerca de la cuenca de México, donde se concentra aproximadamente el 20% de la población del país (Martin Del Pozzo, 2012). Además, sobre los flancos del volcán se asientan varios pueblos vulnerables a la caída de ceniza, lahares y flujos piroclásticos, entre otros fenómenos naturales relacionados. La historia marca que, en general, sus erupciones han sido precedidas por cambios en la química tanto del gas exhalado, como en la del agua de los manantiales; del mismo modo se han presentado deformaciones, actividad sísmica y señales vulcanomagnéticas (Martin Del Pozzo, 2012). En este caso, los precursores de erupción han sido la sismicidad de largo periodo, la cual ocurre por ruptura de la roca debida a la presión del magma dentro de los conductos volcánicos. Además, las señales vulcanomagnéticas en los últimos años han tomado preponderancia porque pueden indicar si el volcán está en estado de erupción.



*Figura 3.1 Volcán Popocatépetl, una de las estructuras activas más importantes del país en los últimos 18 años.*

### 3.1 Ubicación y características volcánicas

El volcán Popocatepetl se ubica entre los estados de Puebla, Morelos y Estado de México (19.02° N, 98.62° W; Figura 3.2) y tiene una altura de 5452 m sobre el nivel del mar, y forma parte del cinturón volcánico transmexicano (Macías Vázquez y Capra Pedol, 2005). El edificio volcánico, con un área aproximada de 500 km<sup>2</sup>, es un estratovolcán de composición andesítica-dacítica con un cráter de aproximadamente 900 m de diámetro (Martin Del Pozzo et al., 2002 a; Martin Del Pozzo, 2002 b).

Los estudios paleomagnéticos del volcán indican una edad aproximada de 730 000 años (Cifuentes, 2009). Entre las manifestaciones de actividad del volcán están la sismicidad, fumarolas y manantiales termales (Martin Del Pozzo et al., 2002 a).



*Figura 3.2 Ubicación del volcán Popocatepetl.*

La amenaza potencial que representa una erupción del volcán Popocatepetl para las poblaciones a su alrededor, se debe principalmente a probables derrames de lava, flujos piroclásticos, avalanchas de escombros, caída de ceniza, derrumbe del volcán o de un sector de éste (Macías Vázquez y Capra Pedol, 2005); además existen otros peligros como consecuencia de la actividad volcánica como los lahares, sismos, efectos atmosféricos, daños a la salud y a la agricultura (Macías Vázquez y Capra Pedol, 2005).

### 3.2 Historia eruptiva del volcán Popocatepetl

El volcán Popocatepetl tiene un historial amplio de erupciones volcánicas de diferentes tipos que van de muy grandes a menores. Entre ellas se cuenta una erupción tipo Monte Santa Elena, hace alrededor de 23000 que destruyó el edificio volcánico existente en aquel momento (Martín Del Pozzo, 2012; Espinasa Pereña, 2012). Se sabe de una erupción tipo pliniana hace 14000 años en la que se produjo una lluvia de ceniza y pómez en el Valle de México (Espinasa Pereña, 2012). Le siguen varias erupciones menores y cuatro erupciones grandes tipo pliniana desde hace 14000 a 5000 años. En el periodo comprendido entre los años 3000 a.C. y 800 d.C. ocurrieron cuatro erupciones grandes, y a partir de entonces, la actividad se tornó moderada,

es decir, erupciones menores, actividad fumarólica, explosiones moderadas, emisión de ceniza y pómez (Delgado Granados et al., 2008; Espinasa Pereña, 2012). A finales del año 2000 se registró una gran cantidad de emisiones de ceniza y una erupción que motivó la evacuación de habitantes cercanos al volcán. El semáforo de alerta volcánica permaneció en amarillo fase 3<sup>11</sup> para regresar a fase 2 en agosto de 2001. En julio y diciembre de 2005 se produjeron erupciones y ese año estuvo marcado por crecimientos de domos en el cráter (Martín Del Pozzo, 2012). En 2011, la actividad del volcán se caracterizó por erupciones pequeñas (Martín Del Pozzo, 2012). El número de exhalaciones el 31 de agosto alcanzó el número de 111, y en diciembre expulsó fragmentos incandescentes y finalizó la actividad (Espinasa Pereña, 2012). En abril de 2012 se intensificó la actividad en el volcán, cambiando el semáforo volcánico de amarillo fase 2 a fase 3.

### **3.3 Manifestaciones volcánicas**

En los tiempos más recientes, el volcán Popocatepetl ha estado en un proceso eruptivo de baja intensidad desde 1994 (Martín Del Pozzo, 2012; Espinasa Pereña, 2012). Durante este tiempo sus manifestaciones, tales como exhalaciones, explosiones, sismos y temblores son monitoreadas por el Centro de Nacional de Prevención de Desastres. Sin embargo, existen otras manifestaciones de tipo químico, eléctrico y magnético que aún se encuentran bajo estudio (Armienta et al., 2008; Álvarez Ramírez et al., 2009; Martín Del Pozzo et al., 2002 a; Cifuentes, 2009; Martín Del Pozzo et al., 2002 b; Martín Del Pozzo, 2012; Kotsarenko et al., 2006; Kotsarenko et al., 2008; Kotsarenko et al., 2007).

De la Cruz-Reyna et al. (2008) realizaron un estudio de monitoreo de sismicidad vulcanotectónica (VT) durante cinco años del volcán Popocatepetl, antes la erupción de 1994. Ellos encontraron cuatro etapas de evolución de la sismicidad VT, la cual interpretaron en términos de los procesos internos que preceden una erupción después de un periodo largo de inactividad: intrusión de magma, fractura relacionada con el lento desarrollo de los conductos del magma, concentración de esfuerzo que acelera el proceso de fractura por el magma, y relajación final o redistribución de esfuerzos poco antes de la erupción inicial.

#### **3.3.1 Exhalaciones y explosiones**

El volcán Popocatepetl emite ocasionalmente vapor, gas y ceniza, a estas emisiones de duración menor a cinco minutos, se les llama exhalaciones. En general, este tipo de manifestaciones generalmente es leve, pero puede adquirir un carácter explosivo y llegar a expulsar fragmentos incandescentes

---

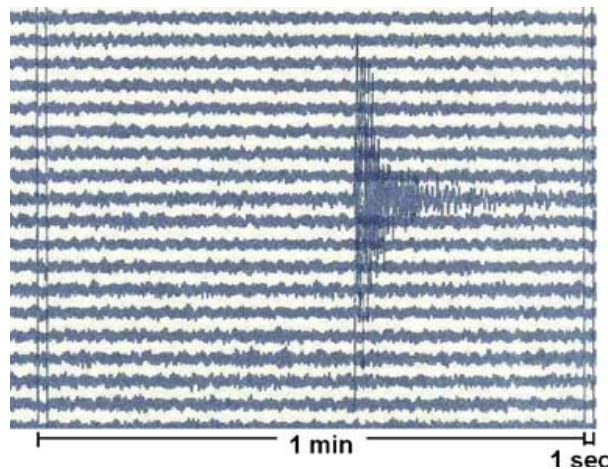
<sup>11</sup> El semáforo de alerta volcánica es un sistema de alerta para informar a la población acerca de la actividad volcánica y las medidas de prevención a seguir. El status amarillo indica permanecer atento a información oficial y estar preparado para una posible evacuación.



en la cercanía del cráter (<http://www.cenapred.unam.mx/es/PreguntasFrecuentes/faqpopo.html#preg12>).

### 3.3.2 Microsismos

Generalmente, antes de una erupción se presentan sismos de magnitudes pequeñas, llamados microsismos cuya ocurrencia es frecuente y de corta duración (Macías-Vazquez y Capra Pedol, 2005). Éstos se originan por el movimiento de magma o fluidos ascendiendo por los conductos volcánicos. Sin embargo, no siempre se incrementa la actividad sísmica antes de una erupción. Para considerar el incremento de la frecuencia de microsismos como un precursor, ésta debe aumentar en un factor de alrededor de 100, aunque algunos científicos opinan que es más importante la cantidad de energía liberada por los microsismos que la frecuencia con la que ocurren (Decker y Decker, 1989). El tiempo que tarda el volcán en presentar una erupción a partir del inicio del incremento de sismos varía de volcán a volcán y de horas a meses.



*Figura 3.3* Papel analógico mostrando un típico sismo VT (M 1.8) en Popocatepetl (3 de septiembre, 1990, 07:57 GMT). Cada línea horizontal corresponde a una vuelta de 15 minutos del helicorder del sismógrafo. Las dobles líneas verticales a derecha e izquierda del registro son las marcas de minuto.

### 3.3.3 Tremores

El tremor volcánico es un tipo de actividad sísmica asociada a la actividad volcánica. Se trata de vibración del terreno detectable con sismógrafos, cuya frecuencia está entre 0.5 y 10 Hz (Decker and Decker, 1989) y su amplitud se mantiene constante incluso por horas, su contenido de frecuencias tiene un pico dominante y algunos subdominantes. No se identifican arribos de fases P o S en sus sismogramas (Ibáñez y Carmona, 2000). La fuente de las

vibraciones se asocia a burbujas en la turbulencia del magma. La ocurrencia de temores se asocia a un cuerpo de magma muy próximo a la superficie, aunque no siempre se presenta una erupción después de un período de temer (Decker and Decker, 1989).

De acuerdo a su contenido espectral Ibañez y Carmona clasifican los temores volcánicos en:

- Temor de alta frecuencia (mayor a 6 Hz). Se asocia con avalanchas, caída de rocas del frente de lava o desgasificación en cráteres.
- Temor de frecuencia intermedia (1 a 6 Hz). Las probables fuentes son desgasificaciones, resonancia de conductos o fluctuaciones de gas.
- Temor de baja frecuencia (menor a 0.5 Hz). Se relaciona con oscilaciones de la cámara magmática y sólo se puede detectar con sensores de banda ancha.

Los temores pueden ocurrir en cualquier momento y presentarse antes o después de una erupción. En la Figura 3.4 se observa la señal de un temor en la isla "El Hierro", su espectro de frecuencia y su densidad espectral de potencia. En el espectrograma es claro el aumento de la energía en toda la banda de frecuencias, concentrándose principalmente en las frecuencias bajas.

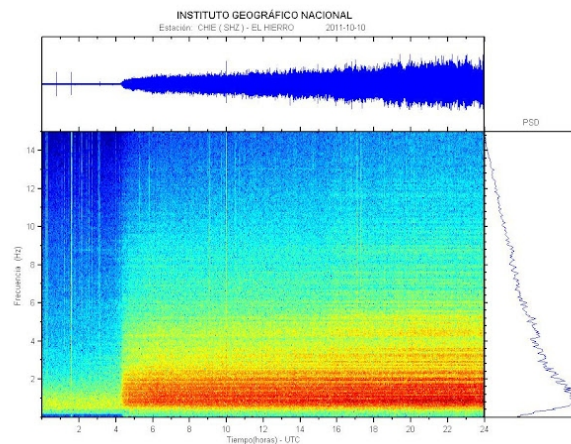


Figura 3.4. Tremor en la isla El Hierro. Señal del sismógrafo, espectrograma y densidad de potencia de la señal.

### 3.3.4 Variaciones eléctricas, magnéticas y químicas

El monitoreo del campo magnético y la detección de anomalías han sido propuestas a menudo para el monitoreo del campo de esfuerzo o estado termodinámico dentro del edificio volcánico para prever erupciones (Currenti

et al., 2005). En algunas anomalías, como ciertas emisiones de ELF, ULF, VLF y LF, se sospecha que podrían tener origen volcánico local, e incluso que pueden estar relacionadas con cambio de esfuerzos. Por ello, estas emisiones se consideran señales prometedoras en la previsión de sismos de gran magnitud y erupciones volcánicas (Bella, 1994; Bleier et al., 2009; Enomoto y Hashimoto, 1994; Fraser-Smith et al., 1990; Fujinawa et al., 1999; Gladyshev et al., 2001; Hata y Yabashi, 1994; Hayakawa et al., 1994; Hayakawa et al., 1996 a; Hayakawa et al., 1996 b; Ondoh, 1994; Rauscher y Van Bise, 1999; Surkov, 1999; Troyan et al., 1999; Van Bise y Rauscher, 1994; Zhao y Shu, 1994).

El radón es un elemento químico radiactivo que pertenece al grupo de los gases nobles y es el resultado de la desintegración del Radio (226). El isótopo más estable del Radón es el  $^{222}\text{Rn}$ , y es también el más abundante. Se le encuentra comunmente en su forma gaseosa que no tiene color, sabor ni olor, y su vida media es de 3.8 días. Emite partículas alfa, que son altamente ionizantes, y se transforma en Polonio (218). El radón emana del subsuelo utilizando como transporte otros gases más ligeros. Las variaciones en la emisión de este gas ha sido un rasgo estudiado por algunos científicos en zonas sísmicamente activas para prever sismos (Pulinets y Ouzounov, 2011). La emisión de radón modifica la conductividad del aire que lo rodea al ionizarlo, propiciando la formación de "canales", por donde puede fluir una corriente eléctrica al establecerse un circuito eléctrico. La existencia de esta corriente lleva intrínseco un campo magnético registrable por los magnetómetros cercanos.

En las proximidades del volcán Popocatepetl, en los alrededores del poblado de Tlamacas, el nivel promedio de liberación de radón que se ha medido es muy alto y tiene algunas variaciones características. A través de los estudios de radón y espectrometría de rayos gamma se ha encontró que la concentración de radón promedio es de diez a veinte veces más grande que los valores del ambiente cercano al volcán (Kotsarenko et al., 2012).

El escape de radón en una zona elevada, como Tlamacas, y la ionización que éste produce en el aire, acortan y modifican el circuito eléctrico entre tierra y nubes de tormentas, lo cual puede provocar microdescargas en el aire cerca de la superficie. La descarga de relámpagos en este sitio es favorecida por esta anomalía (Kotsarenko et al., 2012), lo cual puede explicar el ruido electromagnético de fondo tan intenso en este sitio.

Existe una gran cantidad de reportes, desde anecdóticos hasta instrumentales, de emisiones electromagnéticas asociadas con terremotos y erupciones volcánicas, como fenómenos luminosos, variaciones en la intensidad del campo magnético durante actividad sísmica, registros de radiación ULF en magnetómetros en la vecindad de un volcán, etc.

La comunidad científica ha sido escéptica para aceptar a las señales electromagnéticas como precursoras de sismos o erupciones volcánicas. Ello debido a que no hay una explicación física clara acerca de cómo puede generarse electricidad en las rocas de la corteza o manto, o cómo pueden viajar desde el foco de un terremoto sin atenuarse. En su artículo Freund et al. (1994) desarrollan una explicación de estos fenómenos a partir de la composición química de las rocas. Ellos observaron de manera experimental la liberación momentánea de cargas durante la fractura o microfractura de rocas. En su trabajo con cristales que constituyen rocas comunes, Freund et al. (1994) encontraron que éstos liberan cargas eléctricas que pueden propagarse con relativa facilidad y fluir hacia la superficie.

Algunos investigadores (Hao, 1994; Freund, 1994) creen que la fuente de electricidad para generar las descargas eléctricas y corrientes puede atribuirse a efectos de piezoelectricidad y piroelectricidad de materiales comunes y abundantes en las rocas, como el cuarzo. Por ejemplo, la dacita-riolita contiene más del 20% de fenocristales<sup>12</sup> de cuarzo, que pueden alcanzar tamaños considerables. Si éstos tienen una superficie grande, y además son delgados como una lámina, se puede generar un voltaje al someter al cristal a tensión, compresión, corte o torsión mecánica (Tomasi, 2003). Las cargas eléctricas en el cristal se separan y este movimiento constituye en sí una corriente eléctrica con un campo magnético inherente. El cuarzo es el segundo mineral más abundante de la corteza terrestre (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Las rocas intrusivas se han enfriado lentamente bajo tierra o dentro del edificio volcánico. El tiempo que les toma enfriarse permite la formación de cristales grandes y bien desarrollados (Tarbuck y Lutgens, 2005). Algunos volcanes pueden tener en su edificio, o en sus domos, cristales grandes con propiedades piezoeléctricas, que al estar bajo la presión de la roca por el nuevo magma en los conductos, podrían generar suficiente electricidad para producir descargas<sup>13</sup> o corrientes eléctricas cuyo aporte magnético queda registrado en los magnetómetros.

Hao (1994) y Freund et al. (1994), experimentaron con rocas de diferentes composiciones. Los experimentos de Hao se centran en la observación de cambios en la magnetización de rocas sometidas al esfuerzo y a alta temperatura. Hao concluye que el efecto sismomagnético parece no depender solamente del campo de esfuerzo y la temperatura, sino también del fracturamiento.

---

<sup>12</sup> Fenocristales son los cristales de tamaño considerable que crecen aislados en una masa fina. Es frecuente que tengan formas perfectas.

<sup>13</sup> Una chispa, o descarga eléctrica se da cuando la fuerza del campo eléctrico supera la fuerza dieléctrica del material aislante.

Enomoto et al. (1994) y Freund (2002) realizaron experimentos con granito, gabbro, serpentinita y mármol, y encontraron señales eléctricas después de que el esfuerzo cambiara abruptamente justo antes de la fractura. Tales señales se detectaron al experimentar con rocas portadoras de cuarzo, como el granito, pero también en rocas libres de cuarzo, como la serpentinita.

Para medir la respuesta eléctrica de algunos tipos de roca como gabbro y diorita, Freund (2002) impactó núcleos de estas rocas a velocidades de 100 m/s, logrando medir potenciales eléctricos de 400 mV, señal electromagnética y luz. Al impactar granito seco a 1.5 km/s la respuesta piezoeléctrica del cuarzo fue la generación de un potencial eléctrico en el bloque de granito. Por su parte, Balk et al. (2009) experimentaron con roca ígnea y metamórfica, y encontraron liberación de cargas electrónicas cuando la roca se encuentra bajo esfuerzo, comportándose como una batería. El experimento que realizaron se muestra en la Figura 3.5. La roca se sometió a diferentes niveles de esfuerzo mecánico. El volumen sometido a esfuerzo actúa como el ánodo de una batería desde donde fluye una corriente eléctrica (Freund et al., 2006). La roca no sometida actúa como electrolito, a través de la cual el flujo de huecos alcanza el contacto de cobre en el otro extremo de la roca no sometida. Este contacto actúa como el cátodo.

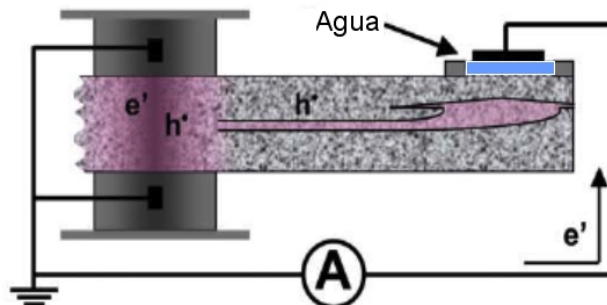


Figura 3.5. Circuito del experimento utilizado para demostrar que la corriente a través de la roca también circula a través del agua (tomado de Balk et al., 2009).

Aunque cada terreno es un caso especial de tipos de roca y ambiente, varios estudios y experimentos muestran que las rocas son capaces de conducir electricidad y de generarla cuando se encuentran bajo esfuerzo mecánico o se fracturan (Tomizawa et al., 1994; Enomoto et al., 1994; Freund et al., 1994; Guo et al., 1994).

## **Capítulo IV**

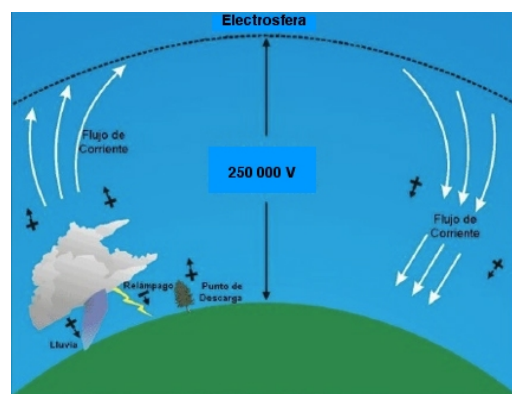
### **Modelo de acoplamiento Litósfera-Atmósfera-Ionósfera**

Cualquier señal electromagnética que no tenga una fuente litosférica representa un ruido que obstaculiza la identificación de señales eléctricas en el terreno. Una fuente de ruido la proporcionan los relámpagos de las tormentas eléctricas que evidencian la existencia de un circuito eléctrico entre ionósfera, atmósfera y litósfera cuyos parámetros eléctricos varían según los procesos modelados por el concepto de acoplamiento litósfera-atmósfera-ionósfera.

#### **4.1 El circuito eléctrico global**

El concepto de circuito eléctrico global (CEG) proporciona una explicación a la existencia del campo eléctrico vertical en la atmósfera (Williams, 2009). La principal fuente eléctrica del circuito es la actividad de las tormentas eléctricas, mientras el resto de parámetros eléctricos depende de los procesos regionales. El CEG es un sistema de corrientes que fluyen entre la baja ionósfera y la superficie terrestre, y entre las cuales se genera una diferencia de potencial entre 200 kV y 600 kV (Pulinets, 2009; Pulinets y Uzunov, 2011). El límite superior de este circuito se sitúa alrededor de los 60 kilómetros de altitud, donde la conductividad ionosférica crece exponencialmente. El circuito se cierra en áreas de la atmósfera sin tormentas denominadas zonas de retorno.

La contribución al CEG está dominada por zonas de convección tropical en Sudamérica, África central y sureste de Asia y Australia, es decir, las zonas que concentran la mayoría de las descargas eléctricas (o rayos).



*Figura 4.1. Diagrama básico del Circuito Eléctrico Global.*

El concepto clásico del CEG (Figura 4.1) fue sugerido por C.T.R. Wilson, en 1920 (Williams, 2009; Tinsley, 2008), y por el entonces reciente conocimiento de la conductividad de la ionósfera.

Los parámetros del circuito eléctrico global se han encontrado a través de relaciones empíricas, y se muestran en la tabla 4.1.

*Tabla 4.1. Parámetros del Circuito Eléctrico Global y sus valores (Harrison, 2004).*

Gradiente de potencial de superficie	$E$	120 V/m
Densidad de corriente de conducción vertical	$J_z$	3 pA/m <sup>2</sup>
Conductividad del aire	$\sigma$	20 fS/m (promedio en el nivel del mar)
Potencial ionosférico	$V_I$	250 kV
Resistencia total de la atmósfera	$R_T$	230 $\Omega$
Corriente total aire-Tierra		1800 A
Resistencia columnar	$R_C$	120 P $\Omega$ m <sup>2</sup>

Existe un modelo del CEG simplificado que describe la corriente directa (DC) de baja latitud (Harrison, 2004). En este modelo, la ionósfera recibe la energía ionizante del Sol, con lo que mantiene un potencial de aproximadamente 250 kV con relación a la Tierra. Entre ionósfera y Tierra fluye una corriente vertical  $J_z$  que se estima en 2000 A. La resistencia del circuito eléctrico global es de aproximadamente 230  $\Omega$ .

La velocidad a la que se propagan los cambios en los campos eléctrico o magnético es la de la luz  $y$ , de modo que son mucho más rápidos que las ondas acústicas, infrasónicas o gravitacionales, cuyos mecanismos de acción se propagan desde la superficie terrestre a la atmósfera superior.

Modelar la dinámica atmósfera-ionósfera no es sencillo. Para ser descrita, tiene que considerar leyes de la termodinámica, ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo y las características de gas neutro o del plasma, su energía cinética, térmica y electromagnética e inestabilidades del plasma (Rycroft, 2006).

El conjunto que forman la atmósfera, que es un aislante eléctrico, y la tierra e ionósfera que son conductores, es un capacitor eléctrico cuyo tiempo de relajación es corto y está determinado por la permitividad del espacio libre entre la conductividad (Rycroft, 2006), por lo que el tiempo de relajación es local. La cavidad ionósfera-tierra forma un capacitor esférico de capacitancia finita con una constante de tiempo  $RC$ , de aproximadamente 10 minutos. A pesar de que este tiempo de descarga es breve, el campo eléctrico atmosférico sigue existiendo, lo cual indica que los procesos de generación

eléctrica están activos continuamente.

La geometría de capacitor esférico permite la existencia de un circuito eléctrico global de corriente alterna (AC) que conforma una guía de ondas electromagnéticas resonante por donde se propagan señales de frecuencia extremadamente baja (ELF), con valores de aproximadamente 8, 14.1, 20.3, 26.4 y 32.5 Hz, conocidas como resonancias de Schumann y que resultan de la actividad global de tormentas eléctricas (Torres Sánchez, 2002).

Durante el desarrollo de un relámpago se generan señales electromagnéticas de pocos Hz a 10MHz (Rycroft, 2006), con pico en el espectro de radiofrecuencia de 5 a 10 kHz, que se observan a distancias más allá de 50 km (Rakov y Uman, 2003). Una porción, de 5 a 45 Hz, resuena en la guía de ondas Tierra-ionósfera, propagándose hasta miles de kilómetros alrededor del mundo y haciendo posible la medición de sus campos a grandes distancias de su fuente (Torres Sánchez, 2002).

#### **4.2 El modelo LAIC**

Pulinets y Ouzounov (2011) han propuesto el modelo de acoplamiento litósfera-atmósfera-ionósfera (LAIC, *lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling*), el cual ofrece una explicación a la ocurrencia de estos eventos atmosféricos y los relaciona con procesos en la corteza terrestre, atmósfera e ionósfera. El modelo LAIC relaciona procesos geoquímicos, atmosféricos e ionosféricos anómalos considerados precursores de sismos fuertes, dentro de un espacio llamado área de preparación sísmica.

Por otra parte, uno de los procesos más estudiados, en fallas sísmicamente activas, es la emisión de radón de la corteza terrestre, gas que emana del subsuelo con otros gases como metano, helio, hidrógeno, bióxido de carbono y, disuelto en agua de los manantiales.

El radón, al ionizar el aire que lo rodea, propicia la formación de núcleos de condensación de agua en ambientes no saturados de vapor. A este proceso se le conoce como hidratación de ion. Tal condensación<sup>14</sup> del vapor de agua es acompañada de la exhalación del calor latente, a la cual se atribuyen las anomalías térmicas atmosféricas (Pulinets et al., 2006).

Sobre fallas sísmicamente activas, el escape de radón propicia cambios en la conductividad del aire donde existen grupos grandes de iones (Pulinets et al., 2006). En consecuencia, también cambian los parámetros del circuito eléctrico global. Según el modelo LAIC las variaciones en la electricidad

---

<sup>14</sup> En sitios tropicales la temperatura del aire a menudo alcanza los 30° C y la humedad el 100%, conteniendo 30 g/m<sup>3</sup> de vapor de agua. La condensación de un solo gramo de vapor de agua (lo que significa una caída de humedad relativa de 6.7%) libera 2494 J de cada metro cúbico de aire. Tal cantidad de energía liberada antes de un sismo ha sido confirmada por mediciones satelitales (Pulinets y Ouzounov, 2011).



atmosférica son la causa de las anomalías atmosféricas sobre fallas sísmicamente activas.

La secuencia escape de radón-liberación de calor latente-anomalías térmicas previa a un sismo depende de la ionización de los gases atmosféricos por las partículas  $\alpha$  del radón liberado. La energía de las partículas  $\alpha$  emitidas por el radón se convierten en calor no importando condiciones atmosféricas o geofísicas. La ionización del aire a diferentes altitudes forma una columna integral para la cual es posible estimar la liberación integral de radón y el calor producido como resultado de la condensación de agua en los iones (Pulinets y Ouzounov, 2011).

Partiendo del hecho de que la liberación de radón se incrementa pocos días antes de un sismo, se utilizan sus efectos térmicos en el aire, para lo cual se pueden utilizar mapas de satélite para monitorear la actividad de radón dentro de una posible área de preparación sísmica.

De acuerdo con el modelo LAIC, las anomalías térmicas observables mediante monitoreo satelital de la alta atmósfera (10 a 12 km de altitud) se manifiestan como estructuras lineales de temperatura elevada que comienzan en la superficie terrestre, a lo largo de las fallas tectónicas dentro del área de preparación sísmica (Ouzounov et al., 2007).

La observación satelital de la radiación térmica emitida por la Tierra, en el rango espectral infrarrojo térmico (8-14  $\mu\text{m}$ ), permite la identificación de anomalías térmicas semanas a días previos a un sismo fuerte (Genzano et al, 2007; Ouzounov, 2007). El monitoreo de zonas sísmicamente activas ha demostrado ser efectivo en áreas afectadas por sismos fuertes, y su confiabilidad se basa en un nivel de referencia obtenido utilizando los datos del monitoreo satelital de infrarrojo de NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), (Pulinets y Ouzounov, 2011).

Las zonas con preparación sísmica que presentan liberación de radón también pueden observarse como anomalías desde los satélites, a través de la radiación del infrarrojo, o radiación de onda larga saliente (OLR, *Outgoing Longwave Radiation*). El modelo LAIC supone que al liberarse calor latente se forma una corriente de convección por la cual las partículas en ella ascienden hasta alcanzar las nubes. El modelo supone que la recombinación y el viento no son suficientes para disipar el flujo en ascenso. En la Figura 4.2 se muestran las anomalías de radiación infrarroja observadas vía satélite un mes previo a un terremoto, cerca de Colima, México (Ouzounov, 2007 b).

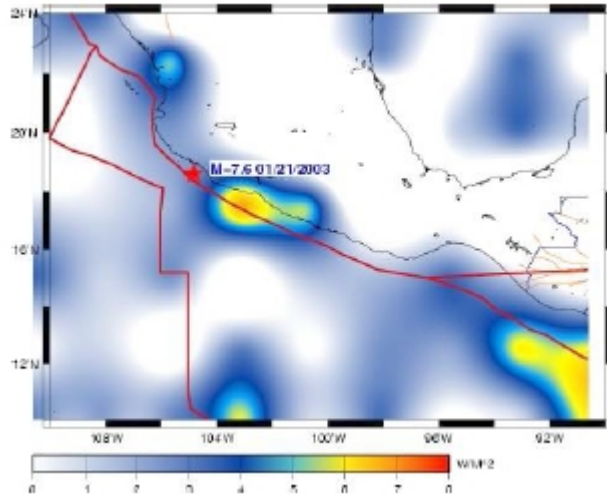


Figura 4.2. Radiación observada en el terreno (anomalía OLR) cerca de Colima durante diciembre 2002/Enero de 2003, previo al sismo de Tecoman del 22 de enero de 2003 ( $M_w 7.6$ ), tomado de Ouzounov (2007b).

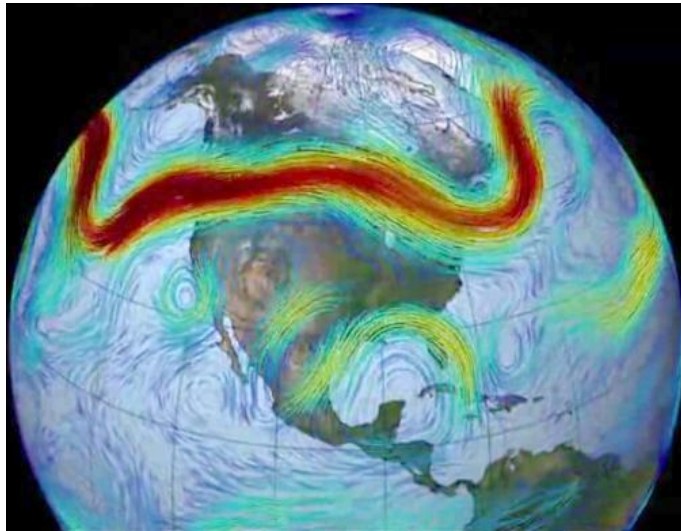
La Capa Frontera Planetaria (PBL, *Planetary Boundary Layer*) es la capa de la atmósfera que está en contacto directo con el terreno. Sobre un área con escape de radón anómala se genera un movimiento convectivo por la liberación de calor latente. Los grupos de iones hidratados generan condiciones para la separación de cargas y propician la existencia de un generador de campo eléctrico convectivo (Pulinets y Ouzounov, 2011). El campo eléctrico anómalo sobre una falla activa produce un fenómeno atmosférico controvertido conocido como “nubes de terremoto” (Figura 4.3), éstas son nubes de estructura lineal que se presentan en tres categorías: nubes lineales con cielo claro de fondo, translucidación lineal en fondo nublado y frontera lineal entre cielo claro y nublado (Pulinets y Ouzounov, 2011).



Figura 4.3. Nube tipo tornado tomada el 9 de enero de 1995, 8 días antes del sismo de Kobe, Japón (17 de enero de 1995 ( $M_w=7.2$ ); tomado de K.Ongon).

La presencia de nubes de este tipo está asociada a un campo eléctrico anómalo sobre la zona sísmica activa, donde el movimiento de iones no sólo se produce por convección térmica sino también por la deriva de las partículas por la presencia de tal campo. Experimentalmente se ha observado que los iones emitidos a la tropósfera forman nubes, mientras los iones negativos las disipan, explicando la formación de las nubes lineales por iones positivos, y de la translucidación, por iones negativos (Pulinets y Ouzounov, 2011). Estas nubes se presentan sobre fallas activas y apuntan directamente hacia el epicentro del sismo (Figura 4.3).

El modelo LAIC también incluye corrientes de chorro anómalas. Éstas, según la Organización Meteorológica Mundial, es "una fuerte y estrecha corriente de aire concentrada a lo largo de un eje casi horizontal en la alta troposfera o en la estratosfera, caracterizada por una fuerte cizalla vertical y horizontal del viento. Presentando uno o dos máximos de velocidad, la corriente en chorro discurre, normalmente, a lo largo de varios miles de kilómetros, en una franja de varios centenares de kilómetros de anchura y con un espesor de varios kilómetros" (ver Figura 4.4).



*Figura 4.4. Corriente en chorro en el hemisferio norte. Las velocidades más altas están representadas en rojo, las más bajas en azul.*

Algunas corrientes en chorro se forman por cizalla en la temperatura vertical. Sin embargo, algunas de ellas pueden formarse durante un periodo de tiempo sobre áreas de "preparación sísmica" a la vez que se observa un punto de anomalía OLR. Según el modelo LAIC el gradiente de temperatura es acompañado de un gradiente de presión que propicia la aparición de corrientes de chorro hacia la posición del punto OLR, donde cercano al epicentro el movimiento horizontal de la corriente se detiene para moverse hacia arriba o hacia abajo (Pulinets y Ouzounov, 2011). Sin embargo, el fenómeno de las corrientes de chorro no ha sido muy estudiado y la física de

éstas no es clara.

Finalmente, otro fenómeno incluido en el modelo LAIC es la propagación de ondas VLF dentro de la cavidad Tierra-ionósfera (Pulinets y Ouzounov, 2011). Las anomalías en la ionósfera propician la dispersión de ruidos VLF y la precipitación de electrones energéticos. Éstos bajan la región D de la ionósfera fomentan una propagación anómala de ondas VLF dentro de la guía de onda Tierra- ionósfera (ver Figura 4.7; Pulinets y Ouzounov, 2011).

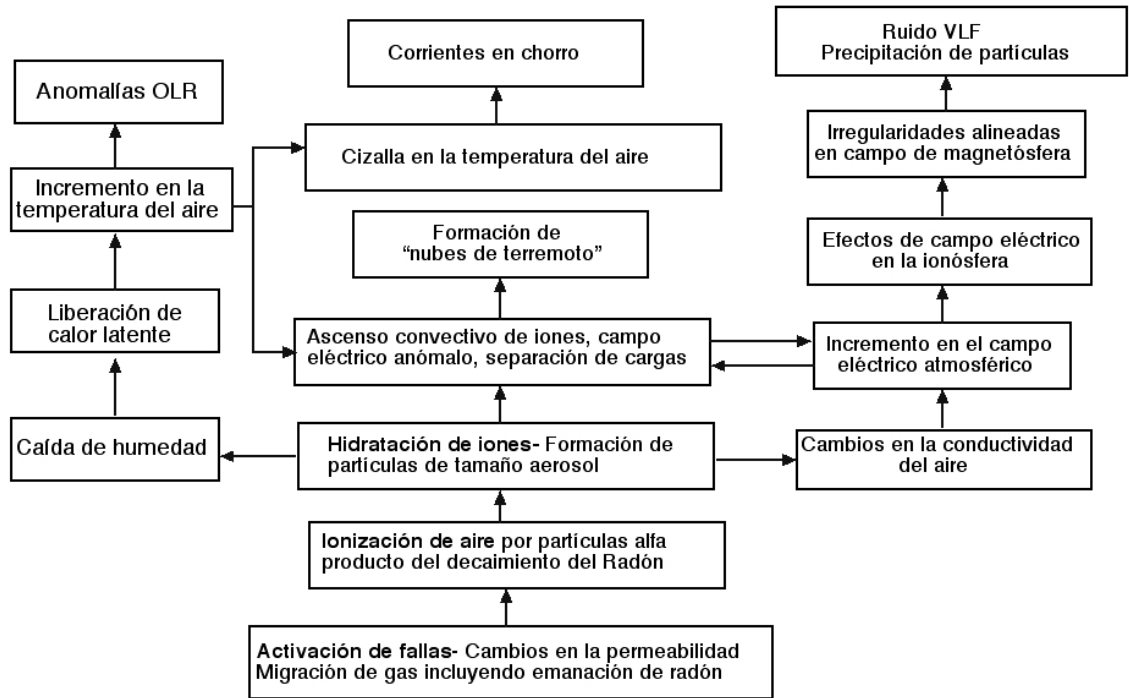


Figura 4.5. Esquema del modelo LAIC.

### 4.3.1 Variaciones de campo magnético asociados a sismos y a la presencia de magma

Un precursor de erupción (o sísmico) es un fenómeno físico que precede a un evento eruptivo (o sismo), y para que tal fenómeno adquiriera la cualidad de precursor debe cumplir algunas condiciones de espacio y tiempo, además, de un modelo verosímil que explique el proceso de su generación (Cicerone, 2009). Algunos fenómenos precursores muestran dependencia en su tiempo de aparición con la magnitud del evento principal: mientras más grande es el evento, el precursor se presenta con más tiempo de antelación. Existen otros precursores, en cambio, que son independientes de la magnitud del evento principal y cuya frecuencia se incrementa al aproximarse el momento del evento (Rikitake, 1979).

Cicerone et al. (2009) hacen una clasificación de emisiones eléctricas y

magnéticas precursoras a sismos, siendo los principales tipos emisiones de radio, variaciones de intensidad del campo magnético, de resistividad eléctrica, emisiones eléctricas, magnéticas o electromagnéticas en las bandas de ELF, ULF, VLF, LF, radio, HF, VHF, corrientes telúricas, emisiones ionosféricas y geopotencial de DC. En resumen, acerca de los precursores, se puede decir que:

1. La amplitud más alta de la anomalía precursora ocurre antes del sismo de magnitud más grande.
2. El número de anomalías precursoras tiende a aumentar conforme se aproxima la ocurrencia del sismo.
3. Las anomalías precursoras tienden a ocurrir cerca del eventual epicentro del sismo.

En general, los modelos físicos proponen que todos los fenómenos precursores están relacionados con la deformación que ocurre cerca de la falla antes del sismo principal. Mientras los modelos proveen una explicación física plausible para los precursores, aún quedan muchos parámetros libres que no han sido resueltos satisfactoriamente (Cicerone et al., 2009).

El área de preparación de un sismo es un círculo con el centro en el epicentro del sismo en preparación, y se calcula como:

$$\rho = 10^{0.43M} \text{ km} \quad (4.1)$$

donde, M es la magnitud del sismo. Los precursores sísmicos de naturaleza electromagnética deben estar dentro de este círculo (Dobrovolsky et al., 1979).

Las emisiones de ULF magnéticas se cuentan entre los precursores sísmicos clasificados. En las proximidades del epicentro inminente, la relación señal-ruido de las emisiones ULF magnéticas pueden ser muy altas llegando a ser mayores a 60 en observaciones terrestres, mientras las observaciones satelitales pueden tener una relación señal-ruido mayores a 10 (Cicerone et al., 2009).

Para explicar la generación de campos magnéticos precursores de ULF se han propuesto tres mecanismos. El primero de ellos es el efecto *magnetohidrodinámico*, por el cual el flujo de un fluido conductor de electricidad en presencia de campo magnético genera un segundo campo magnético inducido.

Un segundo mecanismo propuesto para explicar la generación de campos magnéticos precursores en ULF es el efecto piezomagnético, en el cual se induce un campo magnético secundario debido a un cambio en la magnetización de las rocas ferromagnéticas como respuesta de un esfuerzo

aplicado.

Un tercer mecanismo se ha propuesto para explicar la generación de campos magnéticos de ULF, es el *efecto electrocinético* que resulta del flujo de corrientes eléctricas en la tierra en presencia de una interface electrificada en fronteras sólido-líquidas. Estas corrientes eléctricas producen campos magnéticos que pueden medirse con magnetómetros.

Los sismos registrados en el volcán Popocatépetl durante los periodos de estudio de 2005 y de 2006, han sido de magnitudes entre 1.8 y 3 (Monitoreo del volcán Popocatépetl, CENAPRED). Los radios de la zona de preparación sísmica  $\rho$  que nosotros calculamos a partir de la ecuación (4.1) para los valores de Popocatépetl se resumen en la Tabla 4.2.

*Tabla 4.2. Radios de áreas de preparación sísmica calculados a partir de la ecuación 4.1 para los sismos ocurridos en el volcán Popocatépetl durante los periodos estudiados en 2005 y 2006.*

Magnitud	Radio del área de preparación del sismo (km)
1.8	5.94
1.9	6.56
2.0	7.24
2.1	8.00
2.2	0.83
2.3	0.74
2.4	10.76
2.5	11.88
2.6	13.12
2.7	14.48
2.8	16.00
2.9	17.66
3.0	19.50
3.1	21.52

Los volcanes son sistemas dinámicos complejos con muchos procesos cuyos efectos en el espacio vecino se hacen evidentes en una erupción. Las variaciones de intensidad del campo magnético en las cercanías de los volcanes se suponen efectos de estos procesos (Hata y Yabashi, 1994; Kotsarenko et al., 2007; Kotsarenko et al., 2008; Martín Del Pozzo, 2012; Cifuentes, 2009; Rauscher y Van Bise, 1999).

Las variaciones de intensidad de campo magnético en la proximidad de un volcán son atribuidas al serpenteo del magma dentro de los conductos del edificio volcánico en su ascenso a la superficie, resultado de la modificación de la conductividad del terreno por esfuerzo mecánico y de la electrificación por calentamiento (Hata y Yabashi, 1994).

Durante una erupción volcánica, la ceniza expulsada modifica los parámetros del circuito eléctrico local permitiendo la conducción de altas corrientes eléctricas a través de la columna eruptiva (Figuras 4.6a y 4.6b).



*Figura 4.6a Columna eruptiva con relámpago en volcán japonés.*



*Figura 4.6b Columna eruptiva con relámpagos en volcán chileno.*

#### Emisiones electromagnéticas en Popocatépetl

Kotsarenko et al. (2008) notaron variaciones del campo magnético inducidas térmicamente. Las anomalías magnéticas negativas están asociadas al inicio del ascenso de magma, y correlacionan con periodos de tremor armónico, que se consideran indicadores de avance de magma hacia la superficie, y precursores de domo. Las anomalías positivas se atribuyen al enfriamiento de domo arriba del punto de Curie (Martín Del Pozzo, 2012). En el volcán Popocatépetl se ha medido ruido electromagnético en todo el espectro de medición del magnetómetro. Kotsarenko et al. (2008) han estudiado los registros encontrando que el ambiente electromagnético es mucho más ruidoso que el de la estación de referencia Juriquilla, situada dentro de una zona con alta actividad antropogénica. Ellos atribuyen este ruido electromagnético de fondo a procesos de re-magnetización en el medio rocoso, por calentamiento térmico, autoinducción de corrientes magmáticas conductoras, además de anomalías en el escape de radón en la zona.



## Capítulo V

### Métodos de estudio

En el presente trabajo se citan algunas herramientas utilizadas para el análisis de datos y su representación. Para ello se utilizaron los registros de los magnetómetros fluxgate de la estación Tlamacas del 27 de febrero al 2 de agosto del 2005, y del 18 de febrero al 2 de mayo de 2006. Cada registro del magnetómetro consiste en un archivo que almacena información de un día completo iniciando a las 0:00:01 UT (18:00:01 hora local) y registra tres componentes BH, BD y BZ cada segundo, con 86400 valores de campo magnético para cada una de ellas.

Un magnetómetro Fluxgate es una estructura de dos bobinas (una primaria y una secundaria, figura 5.1) enrolladas alrededor de un núcleo ferromagnético que tiene una curva de histéresis muy estrecha. Una corriente alterna circula por una de las bobinas llevando al núcleo a un ciclo de saturación magnética alternante (magnetizado- desmagnetizado- inversamente magnetizado- desmagnetizado- magnetizado, y así sucesivamente). Este campo cambiante induce una corriente eléctrica en la segunda bobina, y el voltaje de salida es medido por un detector. En un ambiente magnético neutro, las corrientes de entrada y salida coinciden. Mientras en un campo magnético en el ambiente, la saturación ocurrirá con mayor facilidad en alineación con el campo y menos saturado en oposición a él. El campo magnético alternante y la corriente de salida inducida estarán desfasadas con la corriente de entrada, y el grado de desfase dependerá de la fuerza del campo magnético en el ambiente. Una ventaja del magnetómetro fluxgate es que puede realizar mediciones en intervalos de tiempo cortos.

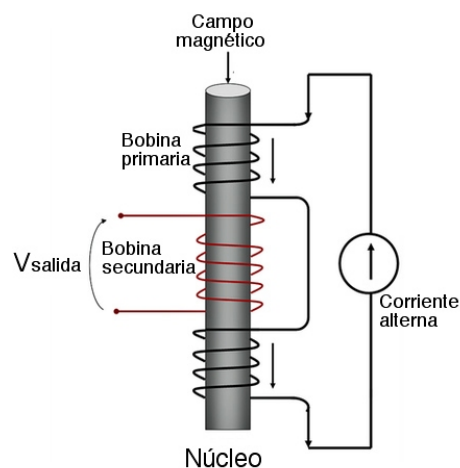


Figura 5.1. Principio del magnetómetro fluxgate.



El valor del campo magnético se mide orientando la bobina en la dirección deseada, por esta razón se dice que el magnetómetro fluxgate es un instrumento vectorial. Con tres magnetómetros fluxgate orientados en los tres ejes cartesianos (X, norte-sur; Y, este-oeste; y Z, vertical) se pueden obtener los valores del campo geomagnético con gran precisión.

A partir de los resultados de los diferentes análisis, y con la información sísmica y volcánica publicada en los reportes de CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), nosotros generamos una tabla de datos con la información correspondiente a los periodos de los registros del magnetómetro disponibles. A dicha tabla de datos le agregamos la descripción de las principales características encontradas visualmente por medio del espectrograma de cada registro diario del magnetómetro, componente por componente. Esta tabla de datos se resume en las tablas 6.1 y 6.2.

## 5.1 Inspección de series de tiempo

Al analizar señales electromagnéticas relacionadas con actividad sísmica o volcánica es importante tener una estación de referencia para discriminar entre radiaciones locales o globales. Con este fin se comparan los resultados de la estación Tlamacas con los obtenidos en la estación de referencia de Juriquilla (longitud  $100^{\circ} 26' O$ , latitud  $20^{\circ} 42' N$ ), ubicada aproximadamente a 270 kilómetros de la estación Tlamacas.

Las señales geomagnéticas tienen una forma característica que se muestra al graficar las series de tiempo de la intensidad de las componentes del campo magnético (Figura 5.2), se trata de una variación diurna que corresponde a los cambios de campo magnético local debido a la rotación terrestre.

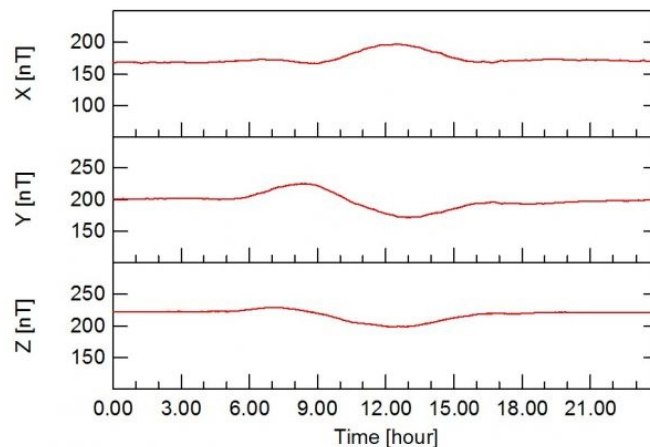


Figura 5.2. Ejemplo de variación diurna en días quietos para las tres componentes magnéticas. (Tomado de [http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/6/external\\_origin\\_time\\_variations/6/regular\\_variations](http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/6/external_origin_time_variations/6/regular_variations)).

La inspección visual de las series de tiempo de la intensidad del campo magnético, nos permitió identificar, además de las variaciones diarias, el descenso de los valores de la intensidad del campo magnético durante tormentas magnéticas o su variabilidad en presencia de señales contaminantes.

Una fuente importante de ruido electromagnético es el producido por las tormentas eléctricas (Tsutsumi et al., 1999). El grado de contaminación de este tipo de fuente de ruido electromagnético depende de 1) la intensidad de los relámpagos, 2) la distancia de la tormenta al sitio de medición, 3) si la región de tormenta eléctrica se encuentra sobre el mar o sobre continente; y 4) la distribución de las nubes de lluvia.

Tsutsumi et al. (1999) encontraron que un relámpago puede contaminar una señal con ruido electromagnético en un radio de aproximadamente 150 kilómetros tierra adentro para descargas nube-tierra, y 400 kilómetros tierra adentro para tormentas eléctricas que ocurren sobre el mar. Además, pueden darse tres casos relacionados con la descarga de relámpagos, y son:

1. Señales atribuidas a relámpagos tierra adentro, sin el desarrollo de una amplia nube de lluvia desde la región de los relámpagos al sitio de observación.
2. Las señales atribuidas a relámpagos sobre el mar, sin el desarrollo de nube de lluvia amplia, desde la región de relámpagos al sitio de observación.
3. Señales atribuidas a relámpagos nube-nube, dentro de una nube que se extiende hasta el sitio de observación.

## 5.2 Análisis espectral

El análisis espectral permite encontrar características de las señales o perturbaciones de campo magnético en el dominio de la frecuencia. Se basa en el teorema de Fourier, que establece que una señal periódica (de periodo  $T$ ) es una superposición de varias señales sinusoidales con frecuencias diferentes. El análisis espectral cuantifica las intensidades de cada frecuencia.

En términos matemáticos,  $f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} (a_i \cos(i\omega t) + b_i \text{sen}(i\omega t))$ , donde  $f(t)$  es la señal periódica,  $a_0$ ,  $a_1 \dots a_n$  y  $b_1 \dots b_i$  son los coeficientes de Fourier y se calculan del siguiente modo:

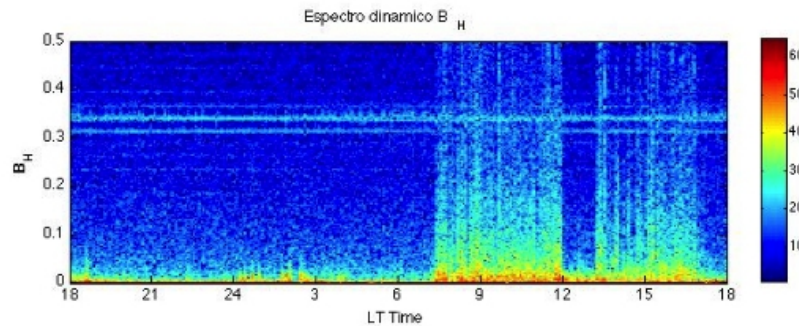
$$\frac{a_0}{2} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt,$$

$$a_i = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(i\omega t) dt$$

y

$$b_i = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \text{sen}(i\omega t) dt, \quad \text{para } i=1, 2, 3, \dots \quad (5.1)$$

Nosotros realizamos el análisis espectral a través de la función SPECGRAM de Matlab, el cual se basa en la transformada discreta de Fourier. El resultado es un espectrograma, es decir, la evolución del espectro de frecuencias a lo largo del tiempo. La Figura 5.3 muestra un espectrograma de la componente BH del archivo del día 7 de abril de 2006 medido en el observatorio de Tlamacas. La frecuencia se representa en el eje  $y$ , y el tiempo local, en el  $x$ . En este caso se registraron frecuencias entre 0.2 y 0.5 a lo largo de todo el día, mientras se registraron perturbaciones en todo el rango de frecuencias durante dos lapsos entre las 6 y las 18 hora local.



*Figura 5.3. Espectrograma de la componente BH del archivo JU206097, día 7 de abril de 2006. Se pueden apreciar dos lapsos de ruido entre las 8 y las 12 LT, y entre las 13 y las 18 LT, correspondientes al ruido derivado de la construcción de un edificio cercano. Las frecuencias (eje vertical) entre 0.3 y 0.4 Hz se atribuyen a interferencia instrumental.*

Para obtener información de cada archivo diario obtuvimos sus espectrogramas, que revelaron características en tiempo y frecuencia, como lapsos de ruido, frecuencias de interferencia, aumento de la potencia, o micropulsaciones. Algunos de los archivos tuvieron que ser descartados debido a que existen huecos en los registros por falla de la energía eléctrica en la estación, de modo que sólo seleccionamos los archivos completos de 2005 y 2006 para comparar con datos sísmicos y volcánicos.

### 5.3 Análisis de fase

La gráfica de un sistema de ecuaciones paramétricas, que corresponden a la superposición de movimientos armónicos simples (sinusoidales), en direcciones perpendiculares, genera una serie de patrones cuyas formas dependen enormemente de la diferencia que existe entre sus fases.

Cuando se trata de señales sinusoidales simples las figuras resultantes tienen patrones regulares que reflejan el grado de desfase entre sus frecuencias. Las figuras más simples son línea, círculo, parábola y elipse, pero si se hacen variar sus parámetros pueden ser más complejas. Las figuras graficadas se conocen como curvas de Bowditch o figuras de Lissajous, y algunas simples se muestran en la Figura 5.4.

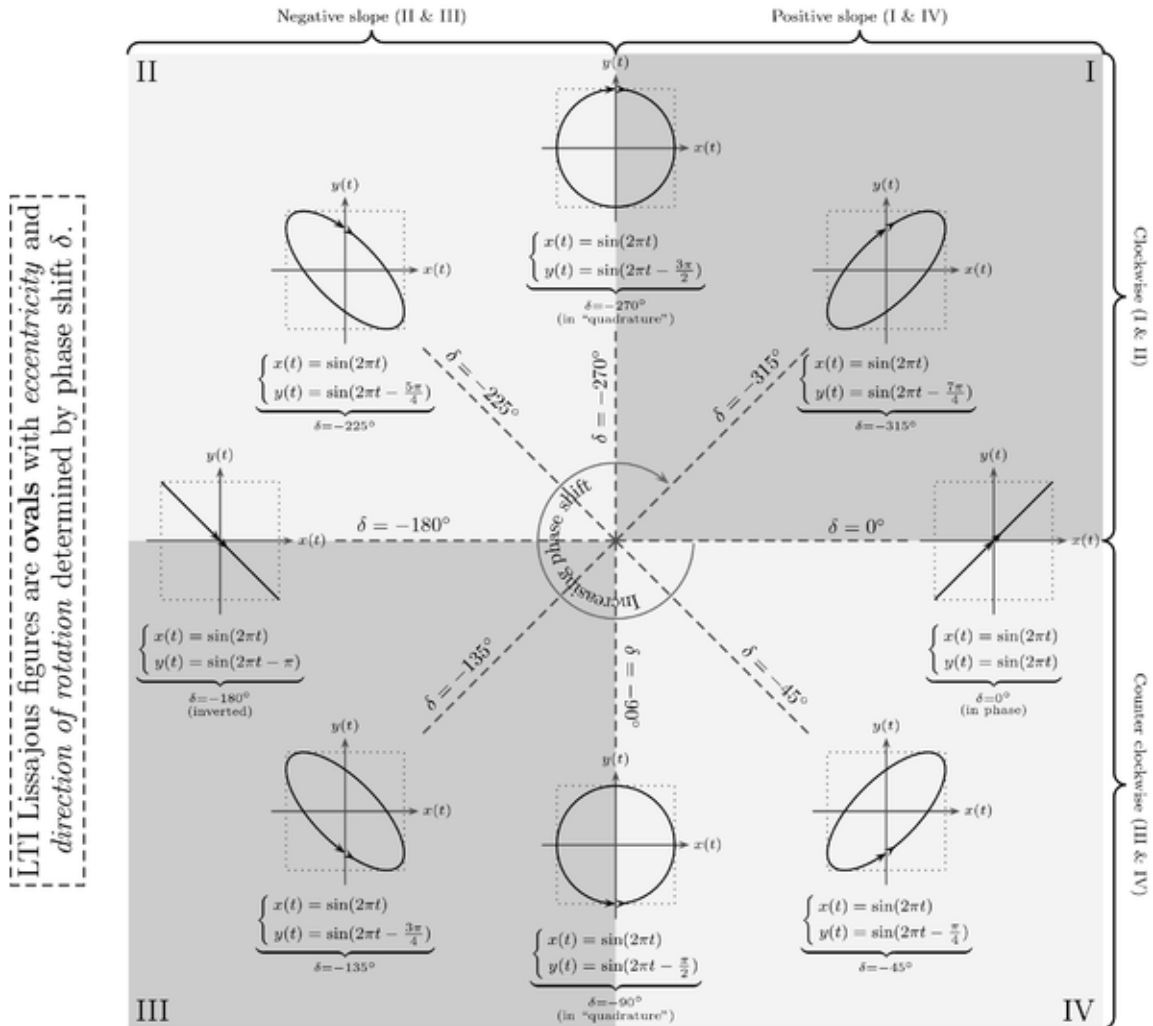


Figura 5.4. Curvas de Bowditch o de Lissajous (Tomado de [http://en.wikipedia.org/wiki/Bowditch\\_curve](http://en.wikipedia.org/wiki/Bowditch_curve)).

En el presente trabajo se encuentran graficadas las curvas que corresponden a BD (eje x) y BH (eje y) de los archivos con perturbaciones magnéticas registradas. En las gráficas Figura 5.5, se observa que, en general, en un día con poca perturbación magnética la curva BDBH describe un lazo.

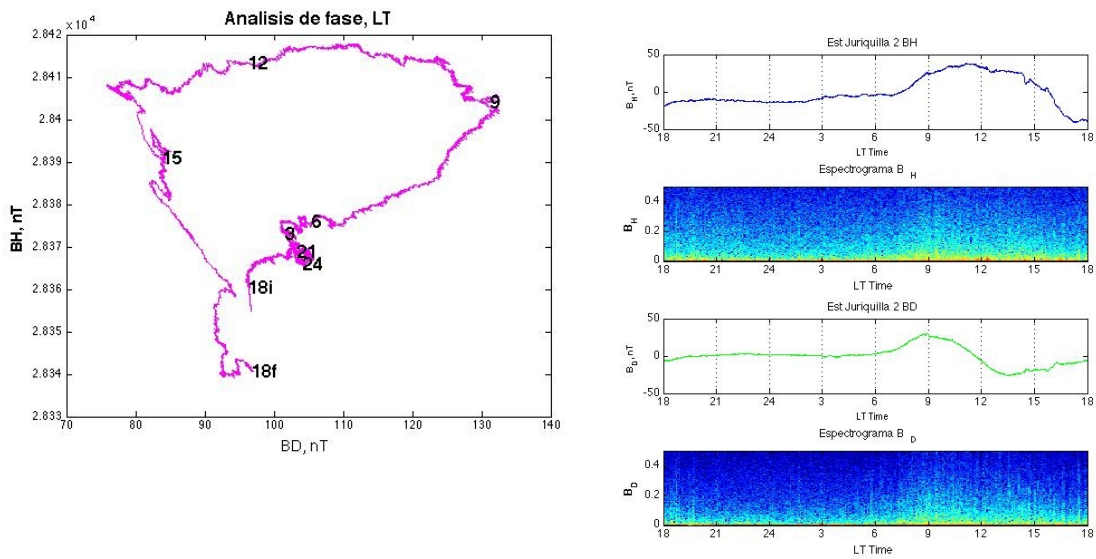


Figura 5.5. Gráfica de fase BDBH, series de tiempo de las componentes BH (azul) y BD (verde) del campo magnético, con sus espectrogramas respectivos, para el día 13 de marzo de 2005 (TLA05072). La curva inicia en 18i, que indica las 18 horas tiempo local, describe un lazo en sentido antihorario y termina en 18f.

La Figura 5.6 muestra el caso de incremento en la energía a lo ancho del espectro en sólo una de las componentes, en este caso BH.

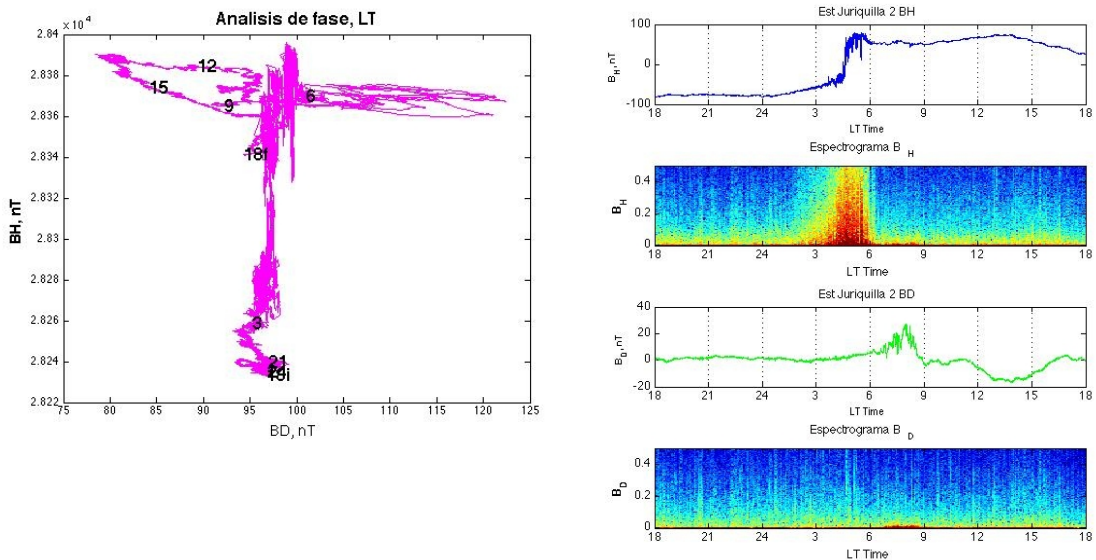


Figura 5.6. Gráfica de fase BDBH, series de tiempo de las componentes BH (azul) y BD (verde) del campo magnético, con sus espectrogramas respectivos, para el día 16 de marzo de 2005 (TLA05075). La curva inicia en 18i, que indica las 18 horas tiempo local, describe un lazo en sentido antihorario y termina en 18f.

La curva de la Figura 5.6 marca trayectorias vertical y horizontal

representando de este modo el desfase entre componentes.

Cuando existe un incremento en la energía de todo el rango de frecuencias monitoreado, el espectrograma lo muestra como un pico. Cuando este aumento en la energía ocurre en las componentes BH y BD surgen patrones regulares (elipses) en la gráfica de fase BDBH (Figura 5.7). En el espectrograma, tanto de BH como de BD, se observa un aumento de la energía en 9 ocasiones, mismas que se reflejan en forma de elipses en la gráfica de fase BDBH.

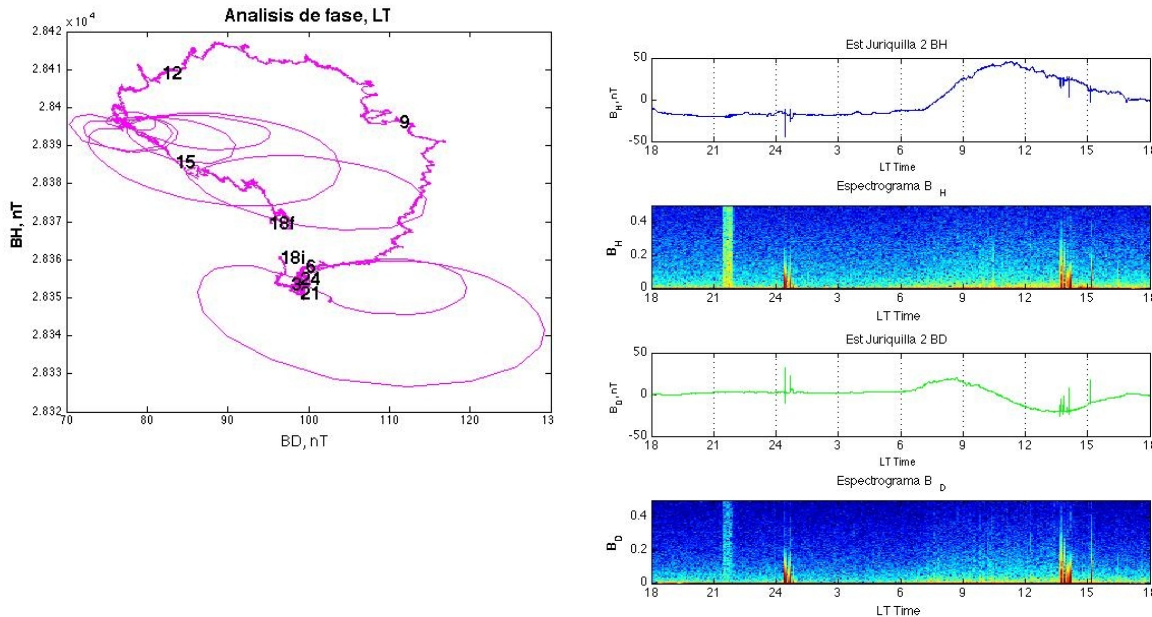


Figura 5.7. Gráfica de fase BDBH, series de tiempo de las componentes BH(azul) y BD (verde) del campo magnético y sus espectrogramas respectivos para el día 22 de marzo de 2005 (TLA05081). La curva inicia en 18i, que indica las 18 horas tiempo local(0 UT), describe un lazo en sentido antihorario y termina en 18f (24 UT).

## 5.4 Análisis fractal de series de tiempo

Un fractal es un objeto geométrico irregular que, a diferentes escalas, repite su forma. En la naturaleza se observan características fractales tanto en objetos físicos como en la dinámica de sistemas complejos.

El cálculo del exponente de Hurst a partir de la serie temporal de la intensidad del campo magnético para la investigación de la evolución de sistemas geofísicos ha conseguido modelar la dinámica de procesos complicados, como sismos y erupciones volcánicas. Algunos autores (Bak et al., 1987; Troyan et al., 1999) consideran que muchos de los procesos dinámicos de la corteza terrestre se auto-organizan alrededor de un estado

crítico (*Self-Organized Criticality*), que puede conocerse a través del uso de herramientas matemáticas.

El análisis fractal consiste en estimar la dimensión fractal, o un exponente de Hurst, de una serie de tiempo de la intensidad del campo magnético. El exponente de Hurst se relaciona con la dimensión fractal por medio de la ecuación 5.4. En nuestro análisis la dimensión fractal tiene un valor entre 1 y 2, mientras el exponente de Hurst toma valores entre 0 y 1, por tratarse de series de tiempo. El exponente de Hurst (o la dimensión fractal) obtenido depende del método utilizado (conteo de cajas, variograma, ondeletas), y la elección del método depende de las características de las series de datos y del tipo de fenómeno estudiado. El éxito de un buen modelo consiste no tanto en encontrar soluciones exactas a las ecuaciones que describen al sistema en cuestión, sino en conocer la estabilidad del sistema a largo plazo, de conocer los estados posibles que adoptará, cuánto cambiará su estado si las condiciones iniciales varían, o si existen atractores hacia los cuales el comportamiento del sistema se inclina. En esta tesis nosotros buscamos identificar patrones de comportamiento que nos indiquen el desarrollo de un sismo o erupción volcánica, y utilizamos el método de ondeletas porque las series de tiempo que estudiamos no son estacionarias.

El exponente de Hurst se basa en un método estadístico llamado análisis de rango reescalado ( $R/S$ ). Hurst utilizó esta relación adimensional  $R/S$ , donde  $R$  es el rango (diferencia entre valores máximo y mínimo, y depende del periodo de interés,  $\tau$ ), de modo que:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (5.2)$$

Hurst encontró que el rango reescalado,  $R/S$  se describe muy bien por la relación:

$$R/S = (\tau/2)^H \quad (5.3)$$

donde  $H$  es el exponente de Hurst y  $S$  es la desviación estándar.

El exponente de Hurst está relacionado con la dimensión fractal de la manera siguiente (Moreira et al., 1994):

$$H = 2 - D \quad (5.4)$$

donde  $H$  es el exponente de Hurst y  $D$  es la dimensión fractal. La dimensión fractal de series de tiempo, como las analizadas en este trabajo, tiene un valor entre 1 y 2.

Los fractales autoafines se analizan cuantitativamente con técnicas espectrales, porque para una serie de tiempo fractal, la densidad espectral de potencia ( $S$ ) tiene una dependencia de ley de potencia con la frecuencia ( $f$ ),

de modo que existe un parámetro  $\beta$  relacionado con la dimensión fractal (Turcotte, 1992):

$$S(f) \sim f^{-\beta} \quad (5.5)$$

El exponente de Hurst es una cuantificación de la tendencia relativa de los valores en las series, es decir, un índice de dependencia:

- Un exponente de Hurst menor a 0.25 indica ruido antipersistente, y mayor a 0.6 indica persistencia. Un valor de H (exponente de Hurst) entre 0.5 y 1 indica una serie de tiempo que posee autocorrelación positiva a largo plazo, por ejemplo, de que la probabilidad de que un valor alto sea seguido de otro valor alto, es alta, y que los valores a largo plazo en el futuro tienden a ser altos.
- Un H de 0.5 implica que los datos en las series de tiempo tienen una probabilidad de 50% de ser seguidos por valores altos o bajos. Esto corresponde a un movimiento browniano, y se trata de un proceso aleatorio, donde hay una independencia total del pasado y del futuro.
- Un H entre 0 y 0.5 indica una correlación negativa entre variaciones, es decir, la probabilidad de que un movimiento en un sentido sea seguido de otro movimiento en el mismo sentido es poca, es decir, existe una alta probabilidad de alternancia entre valores bajos y altos.

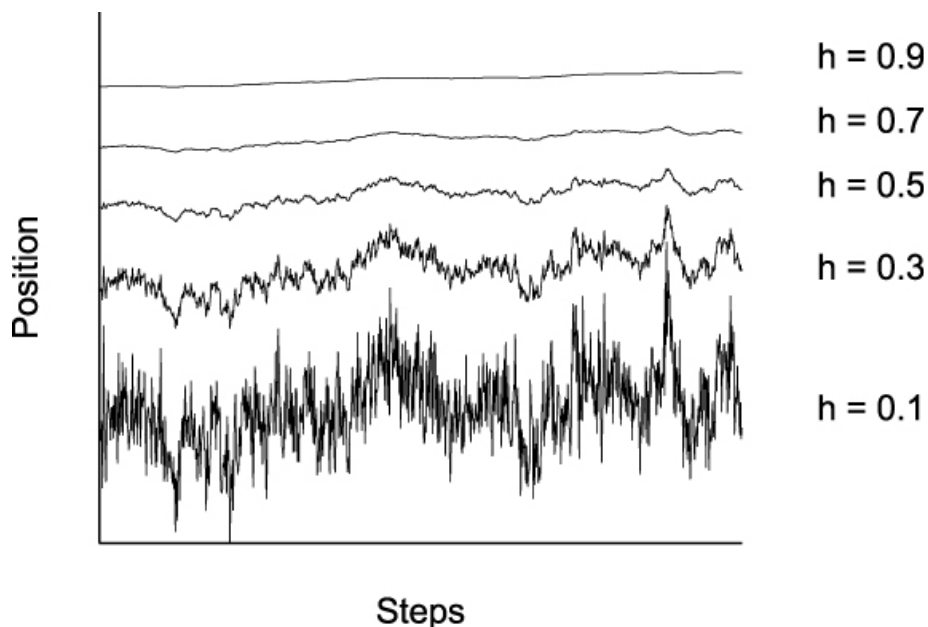


Figura 5.8. Exponente de Hurst y su relación con la rugosidad de una serie. (Tomado de <http://iopscience.iop.org/1742-5468/2012/01/P01002>).



El algoritmo elegido en este trabajo para estimar el exponente de Hurst se basa en ondículas y se puede obtener a través del software Benoit 1.3 (Seffens, 1999). Esta transformada de ondículas se basa en la transformada de Fourier, pero a diferencia de ella, la información del tiempo no se pierde al pasar al dominio de la frecuencia, de modo que es posible saber en qué momento ocurrió un evento. Se trata de una técnica que toma una ondícula madre (un filtro) a la cual se modifica su escala en tiempo, en potencias de dos, para desplazarla a lo largo de la serie de tiempo (Malamud y Turcotte, 1999) y compararla.

El algoritmo de ondículas es apropiado para analizar series de tiempo del tipo no estacionario, es decir que su varianza no permanece constante a largo del conjunto de datos. El análisis fractal que utilizamos en esta tesis se realizó con la herramienta *Wavelets* (ondículas) del programa Benoit 1.3, cuya ondícula madre es una función escalón (Oleschko et al., 2010).

Las series de tiempo de campo magnético tomadas en las cercanías de un volcán pueden exhibir un comportamiento monofractal o multifractal. Tales series de tiempo pueden tener características de un sólo fractal (monofractales), como la autosimilitud en toda la estructura (descrita por un solo exponente), mientras que las series de tiempo multifractales tienen estructuras autosimilares a intervalos locales de la estructura (descrita por un *espectro de exponentes*). Su tratamiento consiste en analizarlos localmente para obtener los exponentes locales que describan sus propiedades de escalado (Falconer, 2003). Un sistema dinámico multifractal tiene un comportamiento irregular, mucho más complejo que uno monofractal y necesita muchos exponentes para caracterizar sus propiedades de escalado, es decir, puede descomponerse en muchos subconjuntos caracterizados con diferentes exponentes de escalado.

## **Capítulo VI**

### **Resultados**

Los análisis de frecuencia, fase y fractal descritos en el capítulo V se aplicaron a los datos magnéticos de la estación Tlamacas, registrados del 27 de febrero al 2 de agosto de 2005, y del 18 de febrero al 2 de mayo de 2006. Los resultados de los análisis de los periodos de 2005 y 2006 los presentamos de acuerdo a los meses correspondientes.

#### **6.1. Series de tiempo y análisis espectral**

El objetivo del análisis espectral consiste en develar las características del espectro de frecuencias de la señal registrada y mostrar sus anomalías. A través de los espectrogramas es posible saber el momento en que un evento perturbador (de fuente ionosférica, atmosférica o litosférica) se presentó, cuáles fueron las componentes afectadas y de qué manera. Los datos analizados (Kotsarenko, comunicación personal), corresponden a la estación geomagnética de Tlamacas y sus resultados se comparan con la estación de referencia de Juriquilla.

Hemos considerado el criterio de Dobrovolsky (Ecuación 4.1) para estimar el área de influencia que podría tener un microsismo y saber si nuestra estación puede detectar las variaciones de intensidad del campo magnético resultantes de los microsismos. Dado que éstos tienen una magnitud entre 1.8 y 3, el radio resultante para estas magnitudes de entre 5.94 y 19.5 kilómetros, por lo que la estación Tlamacas está dentro de esta área.

Los análisis espectrales pusieron en evidencia algunas anomalías que, al comparar con la estación de referencia, han sido atribuidas (Kotsarenko et al., 2008) al entorno volcánico. Tales anomalías son micropulsaciones, actividad esporádica e intensa tipo ruido que afectó principalmente a la componente horizontal y que se prolongó de horas a días.

Una de las situaciones más recurrentes en nuestro análisis es que, tanto en las series de tiempo de la intensidad de campo magnético, como en los espectrogramas de cada componente se puede identificar la periodicidad de la variación diurna (Figuras 6.1, 6.2 y 6.3). Nuestras series de tiempo tienen, además de esta variación periódica, otras variaciones no periódicas que corresponden a perturbaciones magnéticas que pueden tener orígenes en la atmósfera, en la ionósfera o en la litósfera. En los espectros observamos varios periodos con actividad geomagnética fuerte similar a ruido en los que la intensidad espectral aumenta (Figura 6.1). Se muestra con colores más cálidos en el espectrograma entre 0 y 0.5 Hz durante el lapso comprendido entre las 48 y 72 h, (día 22 de julio de 2005).

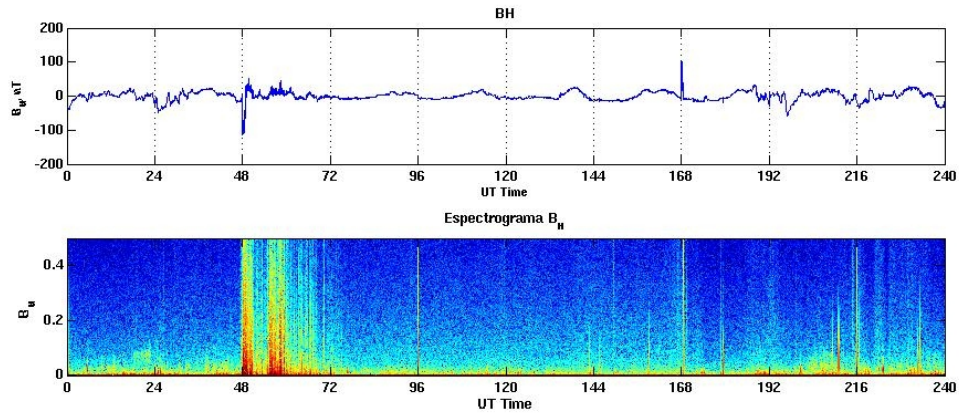


Figura 6.1. Series de tiempo de campo magnético (arriba) y espectrograma de BH (abajo) correspondientes al periodo del 20 al 29 de julio de 2005, en la estación Tlamacas. Nótese la variación diaria tanto en la serie de tiempo como en el espectrograma. Nótese también las perturbaciones magnéticas no periódicas.

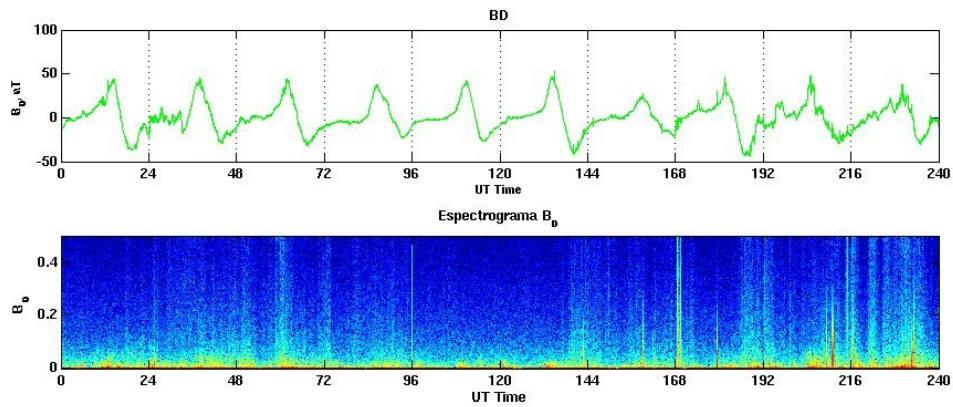


Figura 6.2. Series de tiempo de campo magnético de 10 días (arriba), y espectrograma de BD del mismo periodo (abajo) del 20 al 29 de julio de 2005. La figura superior corresponde a las series de tiempo de la componente BD (en verde) y la inferior al espectrograma. Nótese la variación diaria en la serie de tiempo y las perturbaciones magnéticas comunes a BH, BD y BZ.

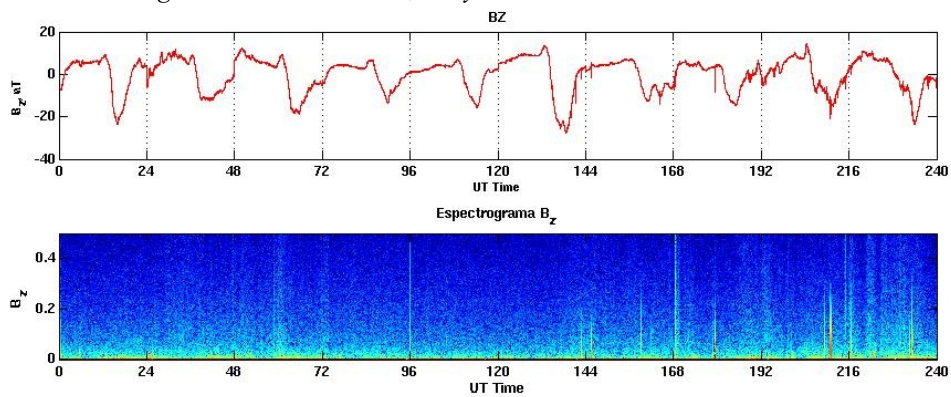


Figura 6.3. Series de tiempo de campo magnético (arriba) y espectrograma de BZ (abajo) correspondiente al periodo del 20 al 29 de julio de 2005. Nótese la variación diaria evidente en la serie de tiempo (en rojo) y las perturbaciones magnéticas comunes a BH, BD y BZ.

Durante una tormenta magnética, en latitudes medias y ecuatoriales, todas las componentes del campo magnético son alteradas siendo BH la más afectada por las tormentas magnéticas, tal como lo muestran las series de tiempo de campo magnético graficadas en la figura 6.4. Durante la tormenta del 15 de mayo de 2005 tuvo un índice Dst que alcanzó valores tan bajos como -247 nT. Los índices Kp de este día fueron (5, 5, 9, 8, 4, 4, 4, 5).

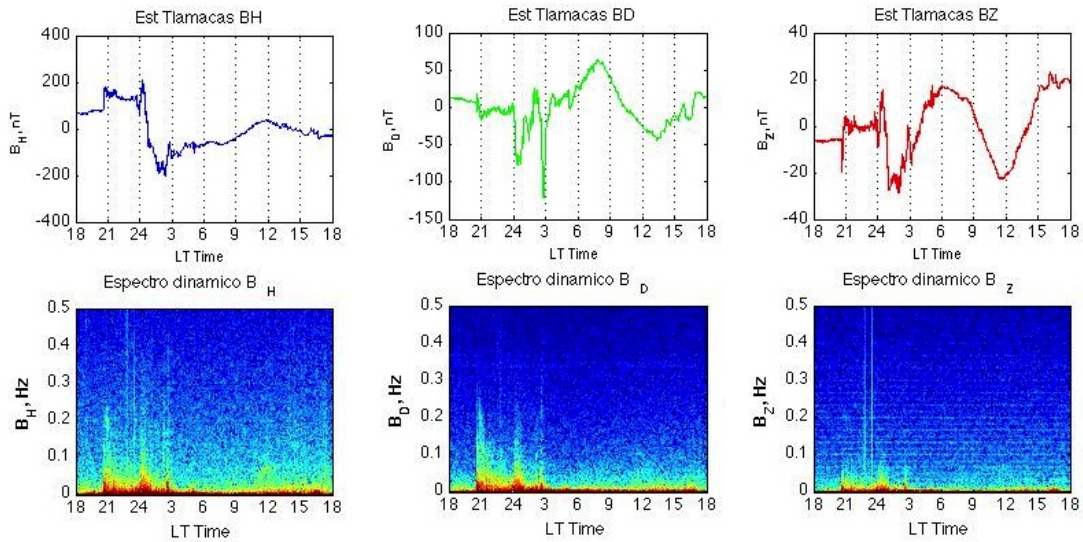


Figura 6.4. Series de tiempo de las tres componentes del campo magnético (arriba) y espectrogramas (abajo) correspondientes al día 15 de mayo de 2005, día en que ocurrió una tormenta magnética. La componente BH es la más afectada en latitudes ecuatoriales y medias.

El análisis espectral permitió distinguir algunas características transitorias en las señales, tales como interferencia de frecuencia variable (Figura 6.5), micropulsaciones (Figura 6.6), interferencia instrumental (Figura 6.7), interferencia de frecuencia fija (Figura 6.8), aumento de la intensidad espectral (Figura 6.9), y algunos lapsos con ruido de fondo (Figura 6.10).

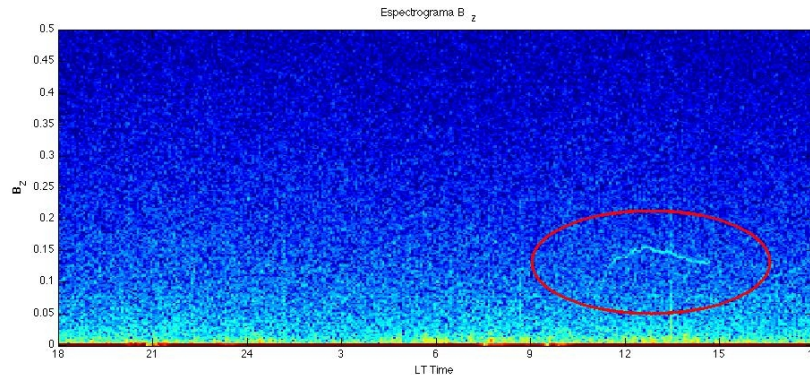


Figura 6.5. Interferencia de frecuencia variable (elipse en rojo) durante el 19 de febrero de 2006, en la estación Tlamacas.



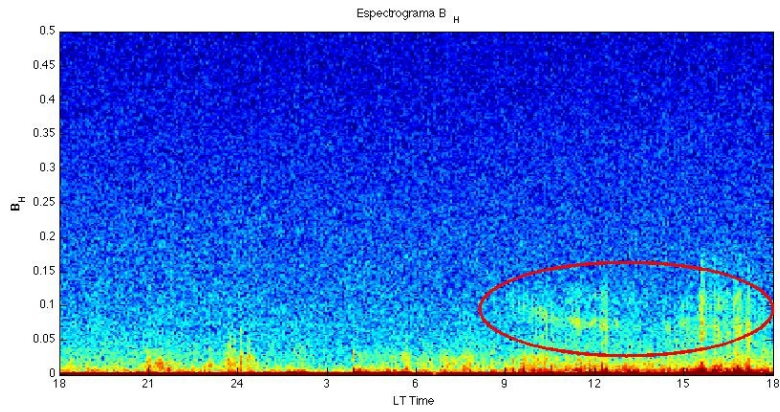


Figura 6.6. Micropulsaciones registradas en la estación Tlamacas el 1 de agosto de 2005.

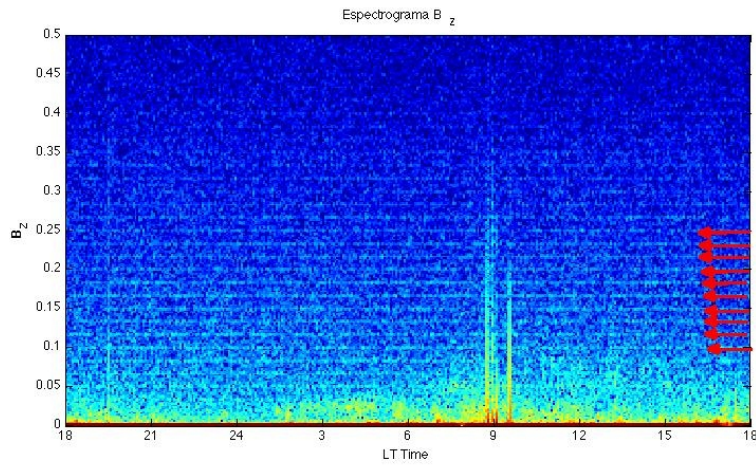


Figura 6.7. Interferencia instrumental. En el espectrograma la interferencia se observa como líneas paralelas horizontales y equidistantes.

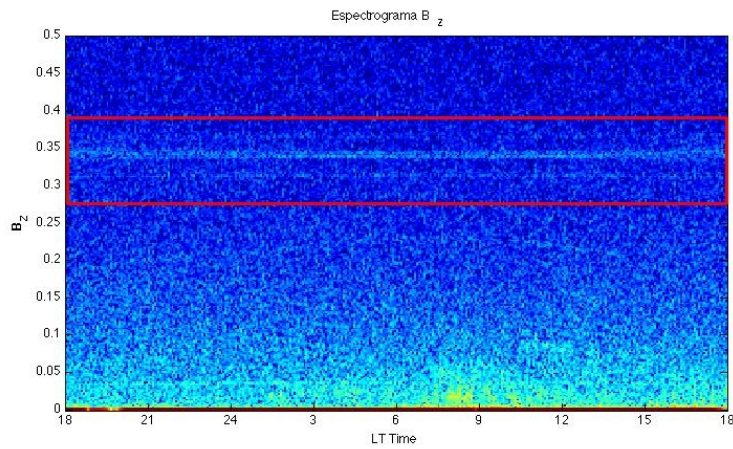
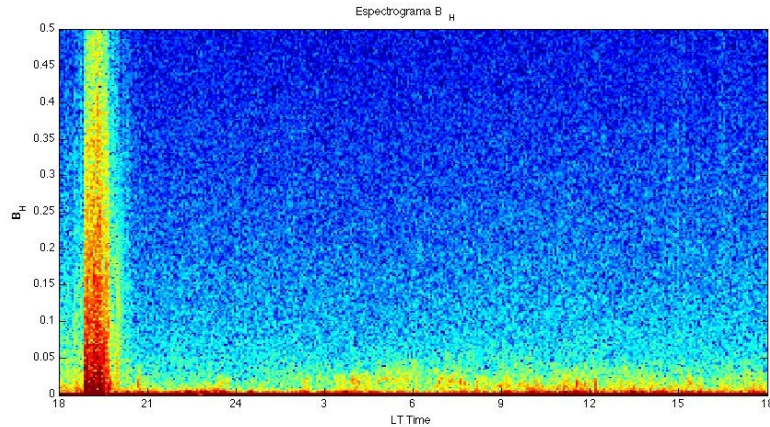


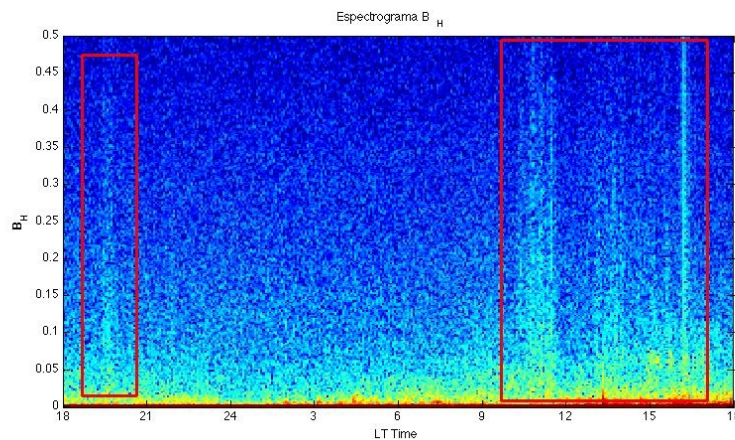
Figura 6.8. Interferencia en la componente BZ del campo magnético registrada en la estación de Juriquilla el día 30 de abril 2005. La frecuencia es, probablemente, de origen antropogénico.

El aumento de la intensidad espectral durante lapsos que se prolongaron desde varias horas a días es una de las anomalías que identificamos. La componente afectada es principalmente BH. Este fenómeno está descrito por Kotsarenko et al. (2008) quienes también lo observaron y atribuyeron su origen a procesos geodinámicos en el volcán.



*Figura 6.9. Aumento en la intensidad espectral en todo el espectro de frecuencia graficado. Nótese la franja roja al inicio del espectrograma, la cual está asociada a perturbaciones magnéticas de origen litosférico.*

Los espectrogramas, como el de la figura 6.10, revelan un ambiente ruidoso atribuido a procesos de remagnetización en el medio rocoso. Los periodos señalados en rectángulos rojos corresponden a un aumento de la intensidad espectral, probablemente debido a microdescargas eléctricas que se producen por modificación de la conductividad del aire por la ionización que produce el escape de radón.



*Figura 6.10. Ruido en componente BH del campo magnético durante el día 7 de mayo de 2005, registrado en la estación Tlamacas, y atribuido a microdescargas eléctricas por escape de radón.*

## 6.2 Análisis de fase

Este análisis consiste en encontrar una curva que gráficamente describa la relación entre las componentes horizontales. Tal curva se construye a partir de los valores de una de las componentes como abscisa, y los de otra como ordenada. Nosotros utilizamos como abscisas los valores de BD, y como ordenadas los de BH. Para un día sin perturbaciones magnéticas fuertes, la gráfica BDBH describe un lazo que inicia a las 18 (hora local) que hemos marcado como "18i". La curva, construida a partir de las componentes BD y BH, describe una trayectoria principal en sentido antihorario para finalizar en "18f", que corresponde a las 18 (hora local) y que equivale a las 24 UT (Figura 6.11).

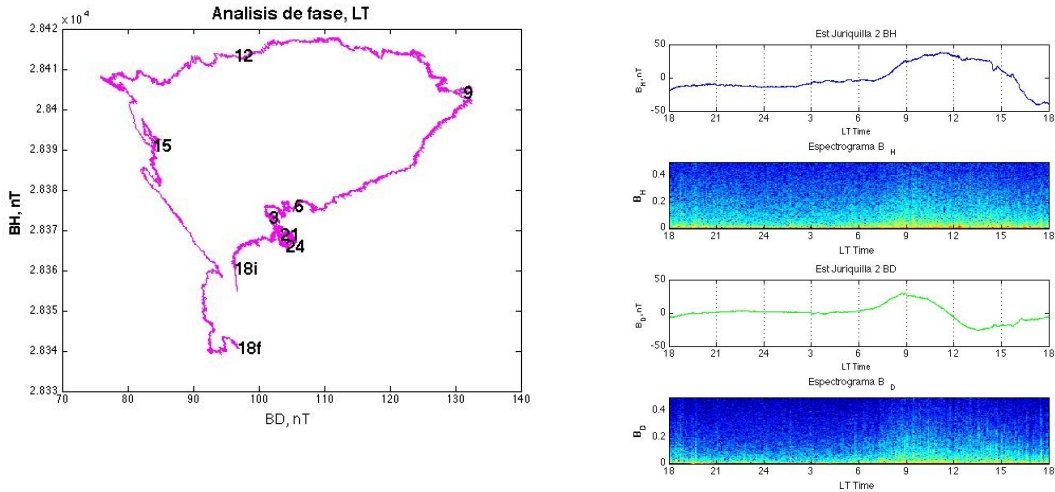


Figura 6.11. Gráfica de fase BDBH (izquierda), series de tiempo (derecha) de las componentes BH (arriba en azul) y BD (abajo en verde) del campo magnético, y sus respectivos espectrogramas (derecha), correspondientes al día 13 de marzo de 2005 (TLA05072). La curva inicia en 18i, que indica el inicio a las 18 horas tiempo local, describe un lazo en sentido antihorario y termina en 18f (final a las 18 LT).

Las perturbaciones de origen ionosférico afectan principalmente a las componentes horizontales. Las componentes BD o BH pueden tomar valores muy variables y grandes durante un evento perturbador. Entonces, en la gráfica de fase, estas variaciones de intensidad de campo magnético se muestran como trayectorias horizontales o verticales, según la componente perturbada. La trayectoria antihoraria se recupera en cuanto cesan las perturbaciones (Figura 6.12).



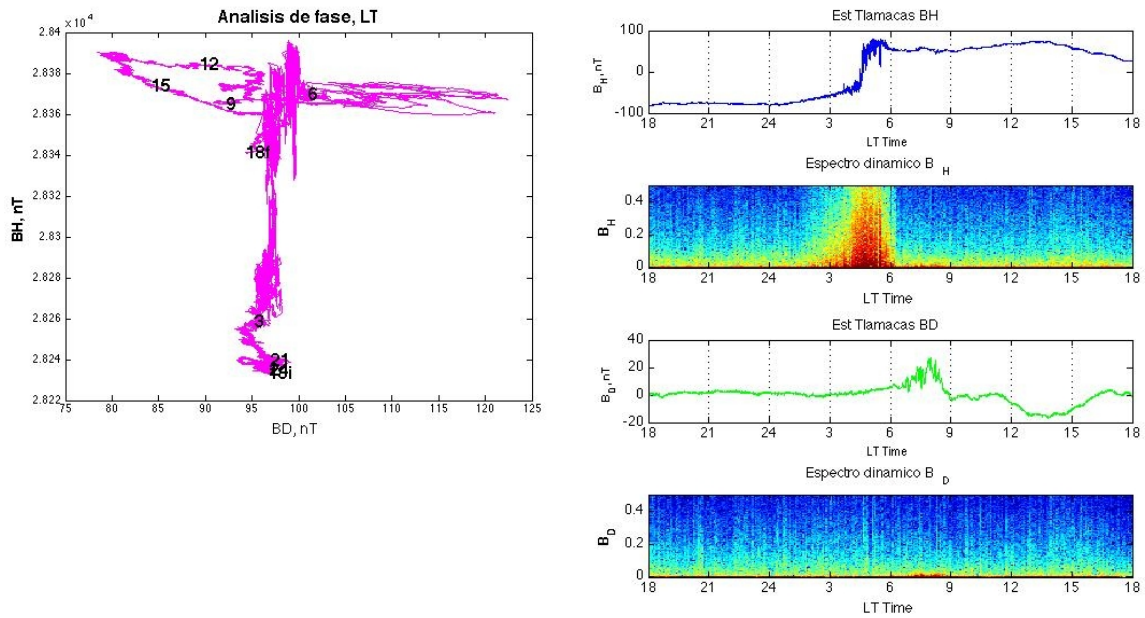


Figura 6.12. Gráfica de fase BDBH, series de tiempo de las componentes BH (azul, arriba) y BD (verde, abajo) del campo magnético, y sus respectivos espectrogramas, correspondientes al día 16 de marzo de 2005 (TLA05075). La curva inicia en el punto 18i, que indica inicio a las 18 horas tiempo local (0 UT) y termina en 18f (24 UT). Las características más importantes de la figura son la trayectoria vertical durante la perturbación en BH (iniciando aproximadamente a la 1, hora local), evidente en la serie de tiempo y en el espectrograma de BH (derecha, páneles 1 y 2). La figura BDBH muestra un cambio de trayectoria a horizontal al terminar la perturbación en BH e iniciar una perturbación en BD a las 6, hora local (derecha, páneles 3 y 4). Finalizado el evento (aproximadamente a las 10 LT) la trayectoria recupera su sentido antihorario.

Cuando ocurren variaciones en la intensidad del campo magnético, simultáneamente en las componentes BH y BD, surgen patrones regulares (elipses, que son *curvas de Lissajous*) en la gráfica de fase. La forma de las elipses depende del desfase que exista entre los valores de las componentes. En la figura 6.14, se muestran los espectrogramas, de BH y BD, del día 22 de marzo de 2005. En ellos se observan perturbaciones que se reflejan tanto en las series de tiempo de las componentes del campo magnético, como en los espectrogramas. En éstos se pueden identificar incrementos en 9 ocasiones, mismas que se reflejan en forma de elipses en la gráfica de fase (Figura 6.13).



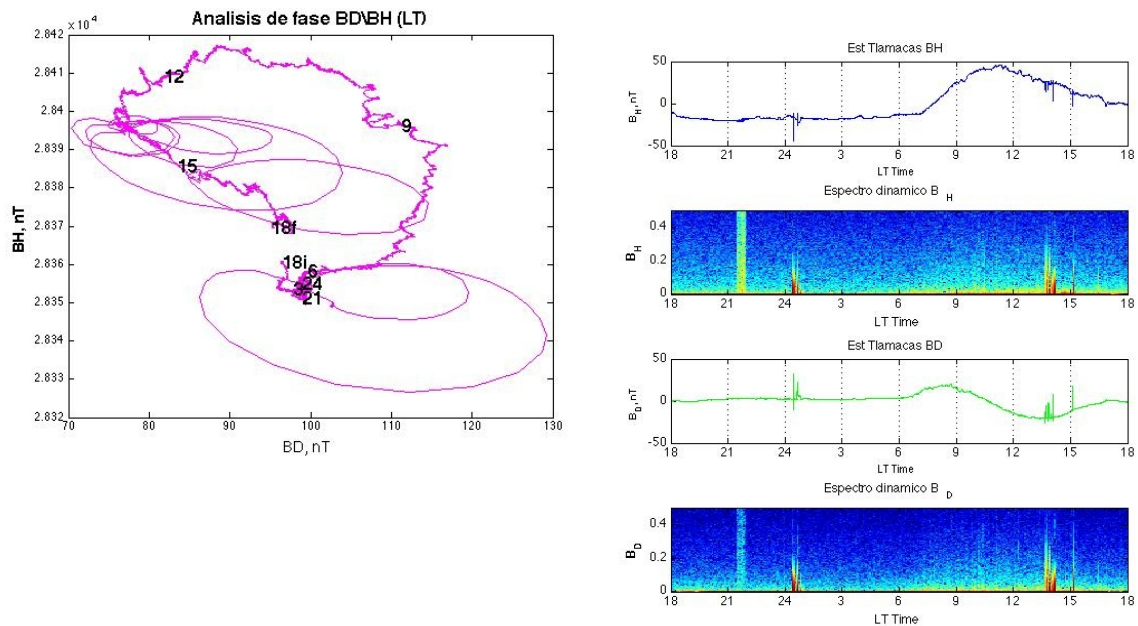


Figura 6.13. Gráfica de fase BDBH (izquierda), series de tiempo (derecha) de las componentes de campo magnético BH (azul, arriba) y BD (verde, abajo) y sus respectivos espectrogramas para el día 22 de marzo de 2005 (TLA05081). La curva inicia en 18i que indica inicio a las 18 horas tiempo local (0 UT) y termina en 18f, final a las 18 hora local (24 UT).

### 6.3 Análisis fractal

La identificación de una firma a través del análisis fractal se basa en la información de las tendencias (exponente de Hurst) que sigue el campo magnético, especialmente cuando está bajo la influencia del fenómeno físico que genera las variaciones de intensidad registradas. En el caso de nuestro estudio, estas variaciones son generadas por tormentas magnéticas, movimiento de magma, esfuerzos, y fracturamiento de roca.

Elegimos llevar a cabo el análisis fractal en la parte nocturna (18 a 6 LT, 0 a 12 UT) de los registros del campo magnético de Tlamanca y Juriquilla. Ello con el fin de obtener una mejor estimación del exponente de Hurst. El exponente de Hurst se relaciona con la dimensión fractal por medio de la ecuación 5.4. (Para el análisis de nuestra serie de tiempo, la dimensión tiene un valor entre 1 y 2, mientras el exponente de Hurst toma valores entre 0 y 1). La razón de elegir esta parte del día se debe a que la señal tiene menos variaciones por influencia solar, además de que el ruido antropogénico en la estación de referencia, disminuye. El exponente de Hurst lo estimamos a través del programa comercial Benoit 1.3 (de TruSoft), y para ello elegimos el método de ondículas (*Wavelet*).

De las Figuras 6.14 a la 6.21 están representadas las tres componentes en puntos de colores azul (BH), verde (BD) y rojo (BZ) en las estaciones Tlamacas y Juriquilla. Los periodos en rectángulos negros y sombreados simbolizan días con actividad magnética de Kp igual a 4 o mayor. Estos periodos no se consideran en este trabajo debido a que la actividad magnética domina el comportamiento del campo magnético.

Los periodos con perturbaciones magnéticas locales, identificados a través del análisis espectral, están marcados en rectángulos azules. Mientras los periodos de eventos sísmicos (sismos y tremores) están marcados en rectángulos amarillos, los de eventos volcánicos (fumarolas, explosiones y exhalaciones), en rojo. La información de microsismos, tremores y otras manifestaciones volcánicas fue tomada de los reportes del CENAPRED.

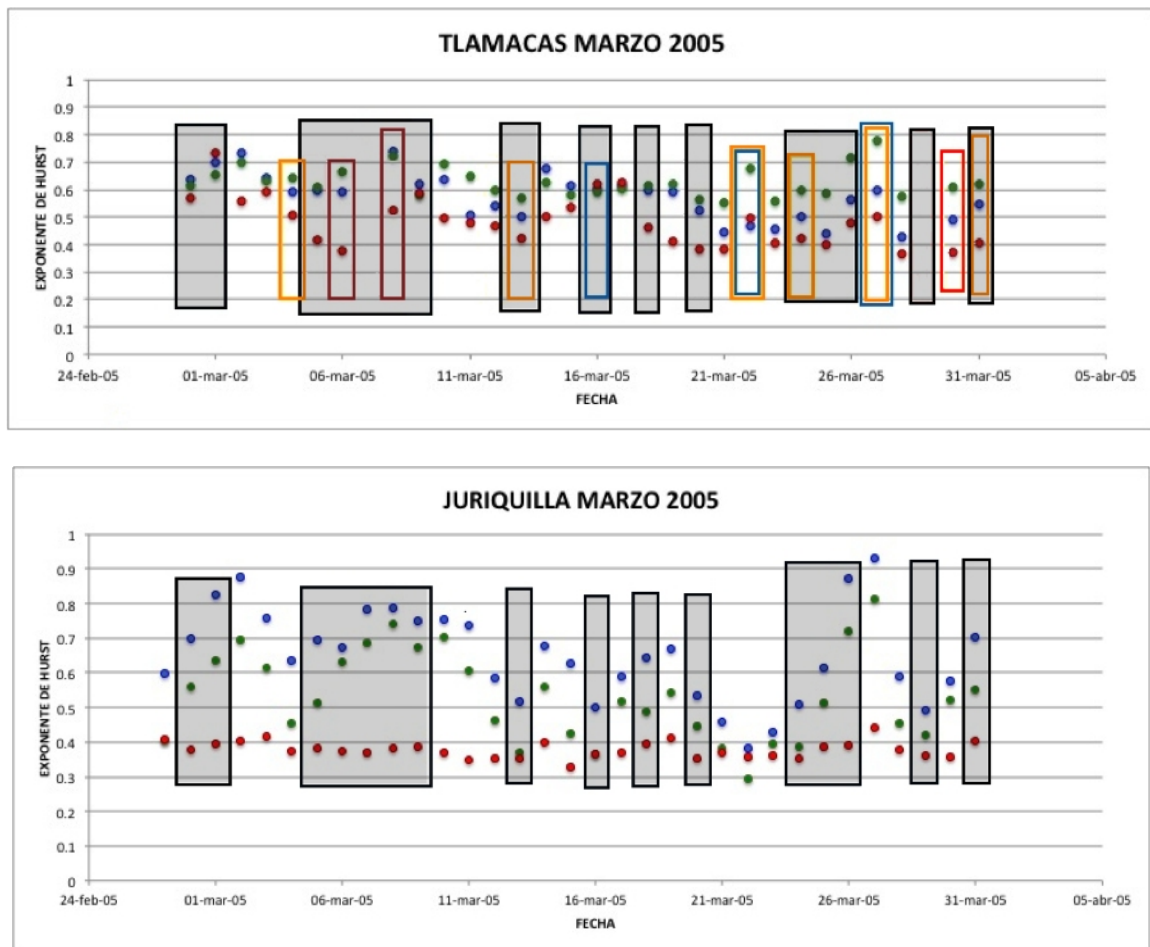


Figura 6.14. Evolución del índice de Hurst de las series de tiempo de las componentes del campo magnético en la estación Tlamacas (arriba), vecina al volcán Popocatepetl, y en Juriquilla (abajo, estación de referencia) durante el periodo registrado en marzo de 2005. Los puntos en azul representan los valores de índice de Hurst estimados por el método de ondículas para la componente BH; los puntos en verde, para BD; y los rojos, para BZ. Los rectángulos sombreados indican actividad geomagnética de Kp igual o mayor a 4 y, por tanto, los puntos dentro de ellos no se consideran para este estudio.

De los periodos sin actividad magnética en el mes de marzo de 2005, podemos observar que los días 3 y 4, el índice de Hurst de la componente BZ disminuyó de un día a otro (día 3: 0.592, día 4: 0.509) en comparación con la estación de referencia (Figura 6.14). Esta secuencia coincidió con un total de 40 minutos de tremor reportado por el CENAPRED el día 4 (no se especifica hora) y no es posible comparar con el exponente de Hurst del día 5, por la actividad magnética presente durante ese día. La secuencia de días 10, 11 y 12 de marzo corresponde a una caída del índice de Hurst en la componente BZ: día 10: 0.493, día 11: 0.476, día 12: 0.47. Esta última secuencia precedió un microsismo (M2.7) ocurrido el día 13. Sin embargo, el día 13 tuvo actividad magnética alta, por lo cual no podemos considerarlo. La caída del índice de Hurst indica un comportamiento no persistente del campo magnético registrado.

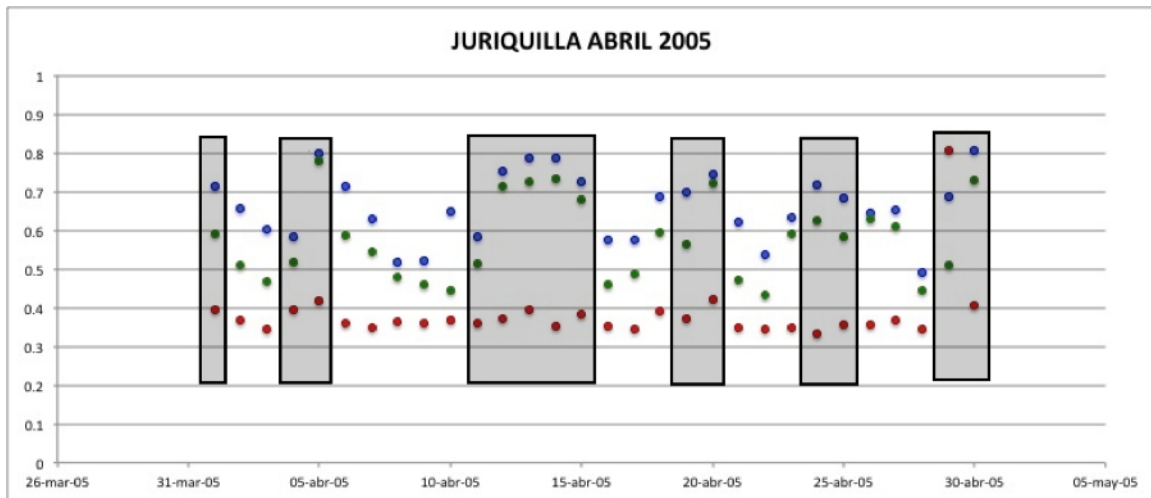
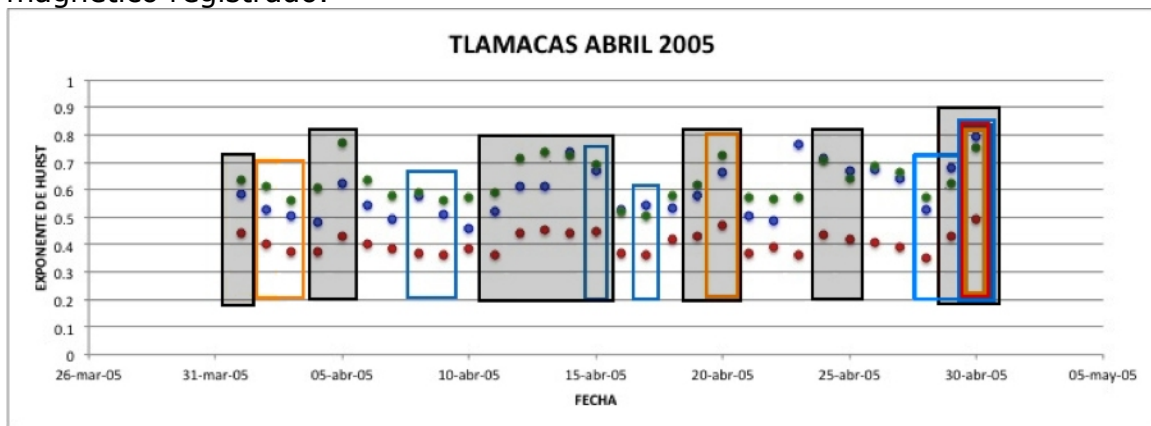


Figura 6.15. Evolución del índice de Hurst de las series de tiempo de las componentes del campo magnético en la estación Tlamacas (arriba), vecina al volcán Popocatepetl, y en Juriquilla (abajo, estación de referencia) durante el periodo registrado en abril de 2005. Los puntos en azul representan los valores de índice de Hurst estimados por el método de ondículas para la componente BH; los puntos en verde, para BD; y los rojos, para BZ. Los rectángulos sombreados indican actividad geomagnética de Kp igual o mayor a 4 y, por tanto, los puntos dentro de ellos no se consideran para este estudio.

Con relación a los sismos de los días 22, 24 y 27 no podemos comparar con los valores de días adyacentes debido a la actividad magnética alta registrada. Como se puede observar, el exponente de Hurst tiene una tendencia a aumentar durante esta secuencia que estuvo acompañada de perturbaciones magnéticas, lo que pudo afectar el valor del exponente. Los días 6 y 8 ocurrieron explosiones volcánicas, y el día 30 se observó una fumarola. No se tienen datos para estimar exponentes de Hurst los días 8 y 30, ello impide hacer interpretaciones.

En lo que respecta a la actividad magnética, el índice Kp tuvo un máximo de 5 los días 6, 8, 14, 19 y 25 de marzo; y de 6 el día 7 de marzo, y para el resto de los días señalados con rectángulos negros el índice Kp máximo fue de 4.

Tanto en Tlamacas como en la estación de referencia, la secuencia de días del 2 al 3 de abril tuvo un decremento del exponente de Hurst en las tres componentes (Figura 6.15). Los mismos días estuvieron acompañados de microsismos alrededor del volcán (M2.6 y M2.2). Los valores en Tlamacas, para BZ son los siguientes: día 1, 0.44; día 2, 0.4; día 3, 0.374. Cabe observar que las tres componentes del campo magnético tienen decremento en ambas estaciones. El día 4 fue registrada actividad magnética lo cual no hace confiable una comparación.

El día 20 de abril se registraron 15 minutos de tremor que estuvieron acompañados de actividad magnética con Kp de hasta 5.

El 30 de abril el CENAPRED reportó 30 minutos de tremor y una expulsión de ceniza. En nuestros espectrogramas encontramos perturbaciones magnéticas que consistieron en un aumento del ruido en BH desde el 28 al 30 de abril, en la estación Tlamacas (Figura 6.15). Los espectrogramas de este día mostraron lapsos con aumentos en la intensidad del campo magnético en las tres componentes (Figura 6.16). En cuanto a la secuencia de índice fractal de BZ, ésta fue en aumento hasta llegar casi a 0.5 (BZ día 28: 0.352, día 29: 0.433, día 30: 0.495). Cabe agregar que los exponentes de Hurst para BH, BD y BZ alcanzaron los máximos valores de este mes (BH: 0.795, BD: 0.754 y BZ: 0.495) y que es el único día de todos los datos de nuestro estudio en que se presentaron eventos sísmicos, volcánicos y magnéticos, además de un índice Kp de 5 y un cambio en el comportamiento fractal.

Los índices Kp más altos para este mes son de 7, el 5 de abril, de 6 el día 12 de abril, y de 5 los días 4, 13, 14, 20 y 30 de abril.

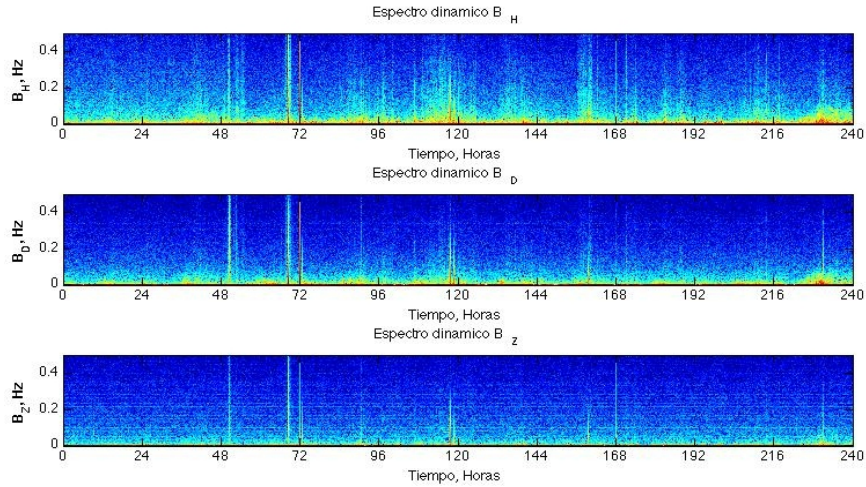


Figura 6.16. Espectrogramas de las componentes del campo magnético BH (arriba), BD (centro) y BZ (abajo) mostrando diez días, del 21 al 30 de abril.

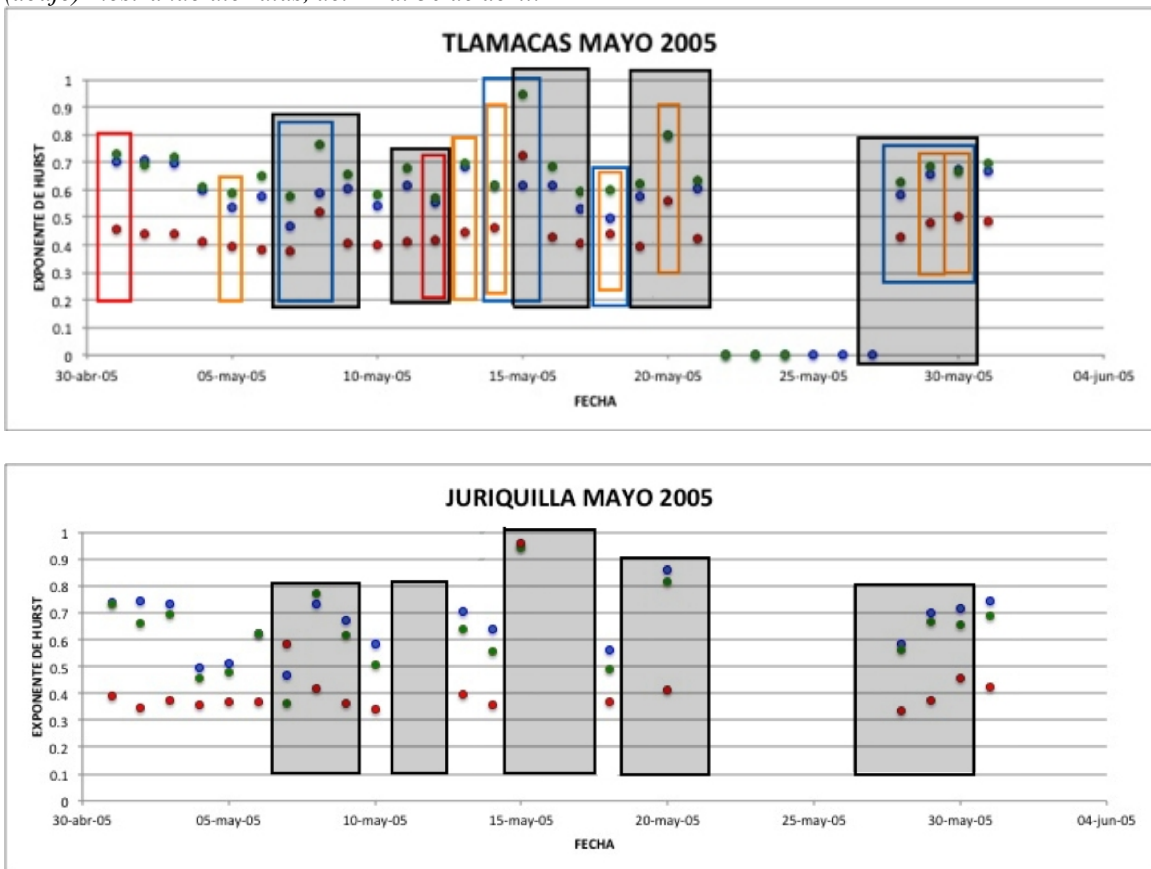


Figura 6.17. Evolución del índice de Hurst de las series de tiempo de las componentes del campo magnético en la estación Tlamacas (arriba), vecina al volcán Popocatepetl, y en Juriquilla (abajo, estación de referencia) durante el periodo registrado en mayo de 2005. Los puntos en azul representan los valores de índice de Hurst estimados por el método de ondículas para la componente BH; los puntos en verde, para BD; y los rojos, para BZ. Los rectángulos sombreados indican actividad geomagnética de  $K_p$  igual o mayor a 4 y, por tanto, los puntos dentro de ellos no se consideran para este estudio.

En la figura 6.17 se muestran los exponentes de Hurst de las tres componentes del campo magnético. El día 1 de mayo el CENAPRED reportó una fumarola, al igual que el día 30 de abril. El exponente de Hurst para el día 1 de mayo es similar al del día 30 de abril pero comienza a descender. El día 5 de mayo el CENAPRED registró un sismo de M2.4 (sin especificar la hora), el cual es precedido por un descenso del índice de Hurst de las tres componentes, de por lo menos 2 días.

Los días 7, 8 y 9 de mayo tuvieron actividad geomagnética alcanzando un índice Kp máximo de 7 el día 8 de mayo. Esta actividad la pudimos observar en los espectrogramas.

Del día 11 al día 17 la actividad magnética registrada alcanzó un índice Kp de 9 el día 15 de mayo debido a una tormenta magnética que hizo descender el índice Dst hasta -247 nT (World Data Center for Geomagnetism, Kyoto). El espectrograma para el día 15 reflejó las perturbaciones (Figura 6.4). Los sismos registrados durante el periodo del 11 al 17 de mayo de 2005 no entraron en el análisis.

No existen datos en la estación de Juriquilla los días 16, 17 y 21 en Juriquilla, ni para el lapso del 22 al 27 en ninguna de las estaciones por falla en la energía o daño de los datos.



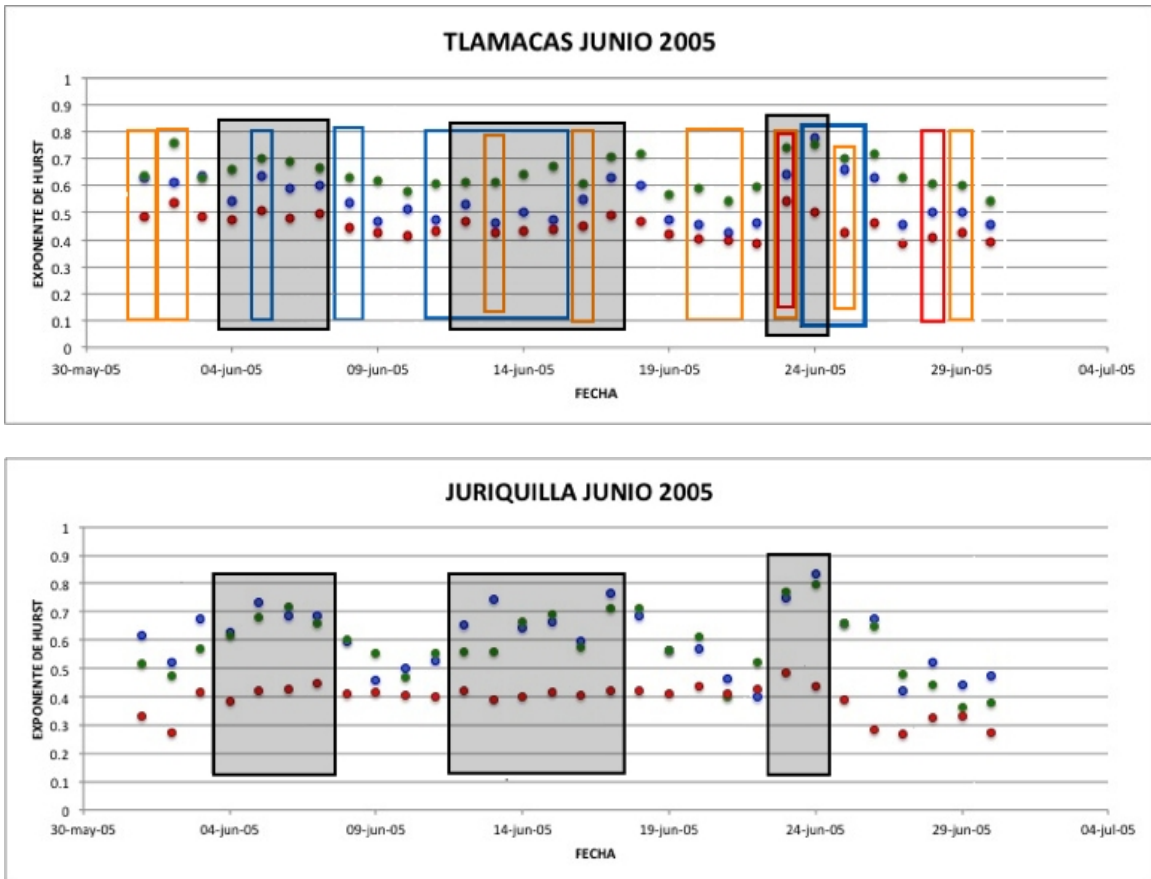


Figura 6.18. Evolución del índice de Hurst de las series de tiempo de las componentes del campo magnético en la estación Tlamacas (arriba), vecina al volcán Popocatepetl, y en Juriquilla (abajo, estación de referencia) durante el periodo registrado en junio de 2005. Los puntos en azul representan los valores de índice de Hurst estimados por el método de ondículas para la componente BH; los puntos en verde, para BD; y los rojos, para BZ. Los rectángulos sombreados indican actividad geomagnética de Kp igual o mayor a 4 y, por tanto, los puntos dentro de ellos no se consideran para este estudio.

Durante el mes de junio de 2005, el CENAPRED reportó tremor el día 1, y tremor y sismo (M2.0) el día 2, a las 14:46 LT, según reportes del CENAPRED (Figura 6.18). En esta secuencia no se observa descenso del exponente de Hurst de BZ, lo cual va en contra de nuestra hipótesis. En los espectrogramas de estos días sólo se observan breves lapsos de perturbación magnética local. A partir del día 4 (Kp máx=5) se registraron perturbaciones magnéticas que pudimos observar en los espectrogramas (Figura 6.19).

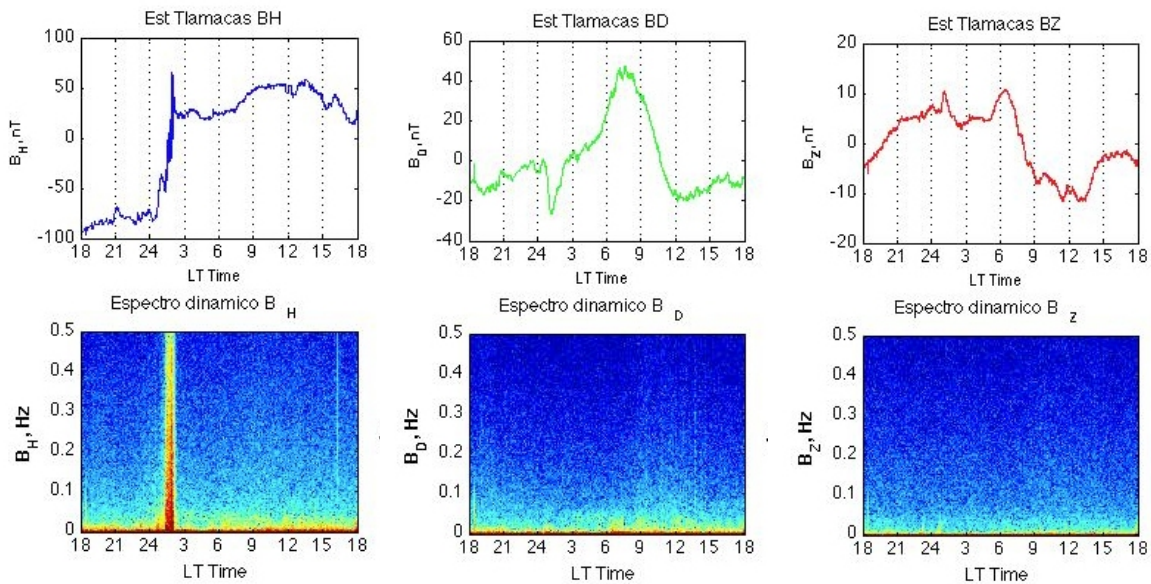


Figura 6.19 Series de tiempo de campo magnético (arriba) y sus espectrogramas (abajo) para las componentes BH (izquierda), BD (centro) y BZ (derecha) correspondientes a los registros de la estación Tlamacas el día 5 de junio de 2005. Los espectrogramas muestran perturbación que afectó principalmente a la componente BH.

Del día 11 al 17 se registraron perturbaciones locales y globales de modo que no consideraremos los resultados de estos días. La actividad geomagnética alcanzó un índice máximo de Kp de hasta 6. Dentro de este periodo se registraron dos sismos (M2.1 y M2.2) el 13 de junio, así como el día 16 (M2.1).

Los días 20 y 21 también se registraron sismos (ambos de M2.0). El exponente de Hurst de BZ inició un decremento el día 17, alcanzando su punto más bajo el día 22 (día 17: 0.49, día 18: 0.468, día 19: 0.42, día 20: 0.403, día 21: 0.396 y día 22: 0.386).

El CENAPRED registró un sismo (M2.3) y una fumarola el día 23 de junio. Durante este día el índice Kp registró un máximo de 7, en un periodo de alta actividad geomagnética global que inició el día 23 y terminó al día siguiente, y que elevó el valor del exponente de Hurst de las tres componentes del campo magnético. El día 25 se registró un sismo (M2.7) cuyo exponente de Hurst de BZ tiene un descenso precedido de valores más altos debidos quizá a la actividad magnética. El periodo comprendido entre el 23 y 25 de junio no se considera en este análisis.

El día 28 se registraron dos fumarolas, y el día 29 dos sismos (M2.9 y M2.2) sin que hubiera descenso previo del exponente de Hurst de BZ. Los espectrogramas muestran lapsos muy cortos de perturbación.



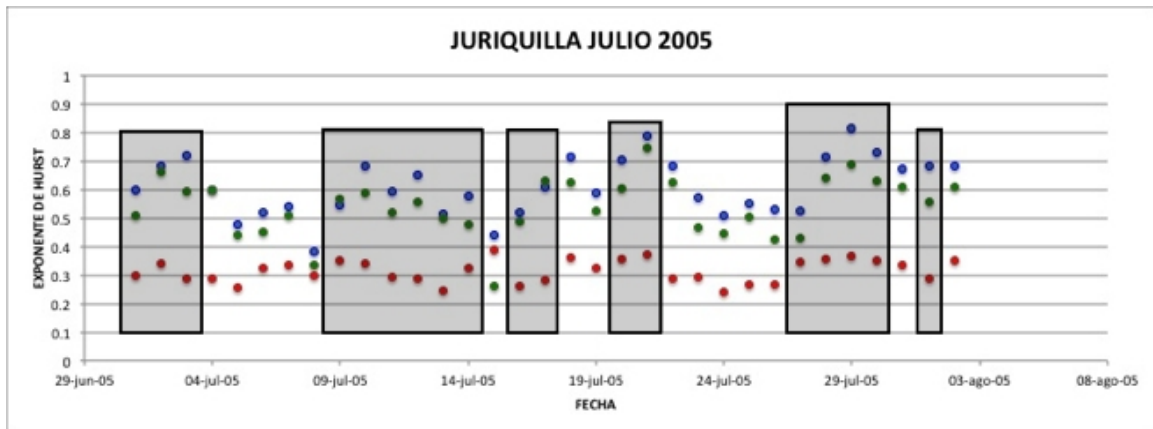
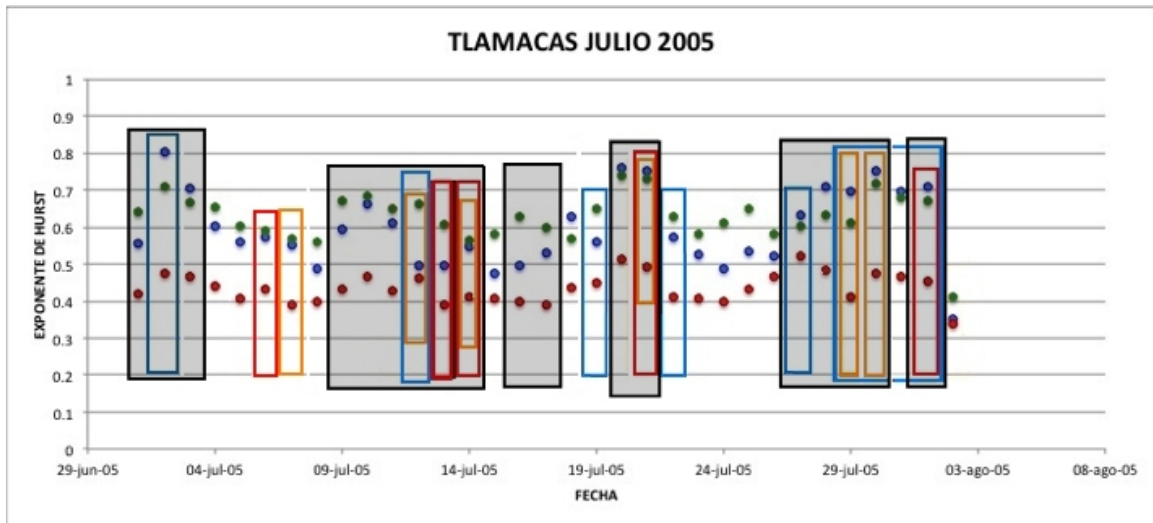


Figura 6.20. Evolución del índice de Hurst de las series de tiempo de las componentes del campo magnético en la estación Tlamacas (arriba), vecina al volcán Popocatepetl, y en Juriquilla (abajo, estación de referencia) durante el periodo registrado en julio de 2005. Los puntos en azul representan los valores de índice de Hurst estimados por el método de ondículas para la componente BH; los puntos en verde, para BD; y los rojos, para BZ. Los rectángulos sombreados indican actividad geomagnética de  $K_p$  igual o mayor a 4 y, por tanto, los puntos dentro de ellos no se consideran para este estudio.

Durante el mes de julio de 2005 se registraron varios episodios con actividad magnética global y, por lo tanto, no podemos considerarlos en nuestros estudios, siendo el único sismo a estudiar el ocurrido el 7 de julio (M2.6) cuyo exponente de Hurst es más bajo que el del día previo.

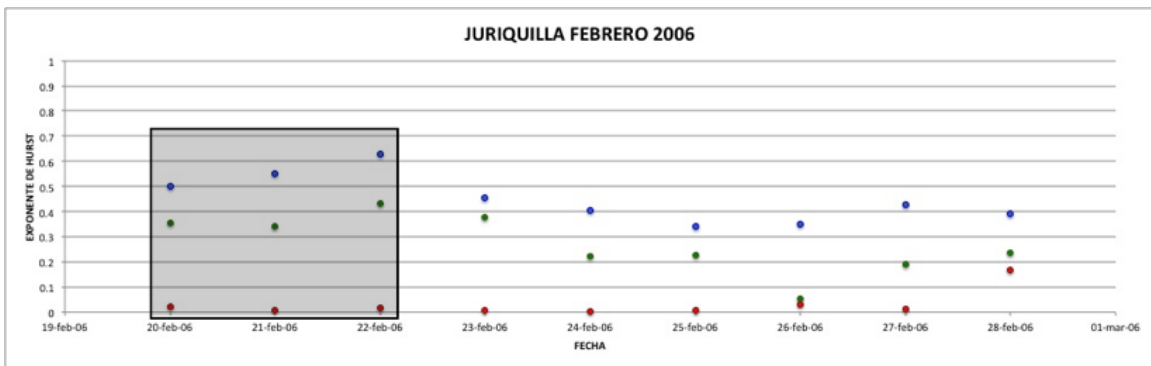
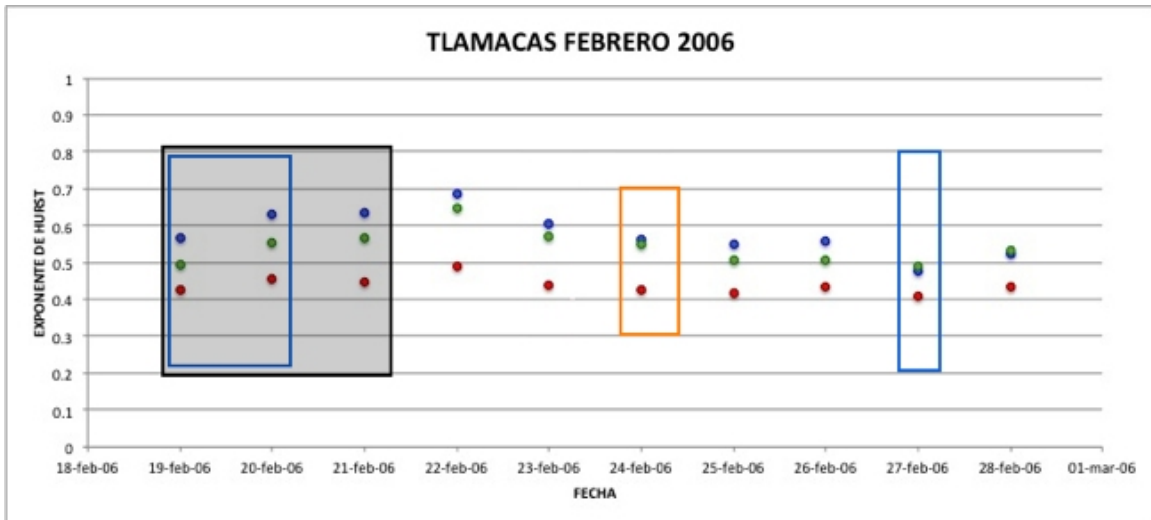


Figura 6.21. Evolución del índice de Hurst de las series de tiempo de las componentes del campo magnético en la estación Tlamacas (arriba), vecina al volcán Popocatepetl, y en Juriquilla (abajo, estación de referencia) durante el periodo registrado en febrero de 2006. Los puntos en azul representan los valores de índice de Hurst estimados por el método de ondículas para la componente BH; los puntos en verde, para BD; y los rojos, para BZ. Los rectángulos sombreados indican actividad geomagnética de  $K_p$  igual o mayor a 4 y, por tanto, los puntos dentro de ellos no se consideran para este estudio.

El día 24 de febrero se registró un sismo (M2.3). El índice de Hurst de BZ fue decreciente en Tlamacas (día 22: 0.489; día 23: 0.44) y alcanzó su valor más bajo el día 25 (0.418). Las componentes BH y BD siguen un comportamiento similar al de BZ (Figura 6.21).

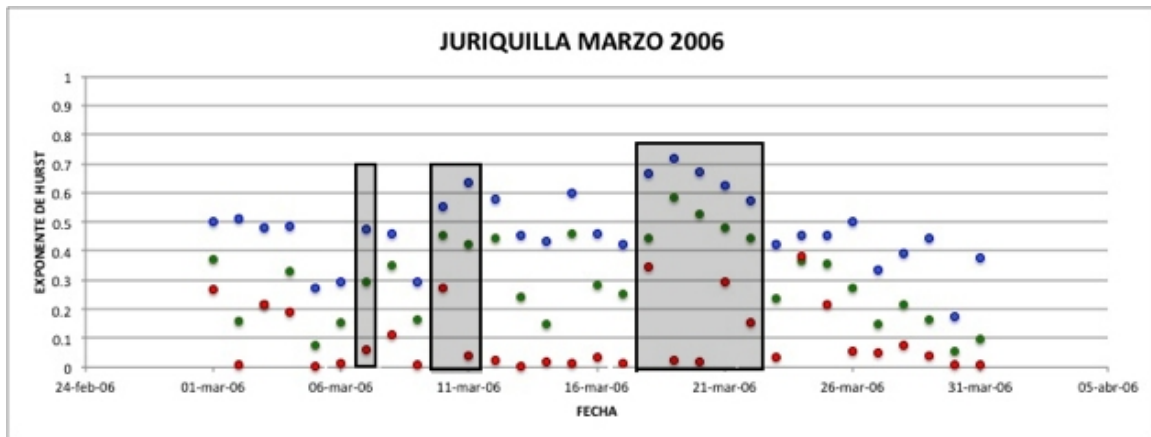
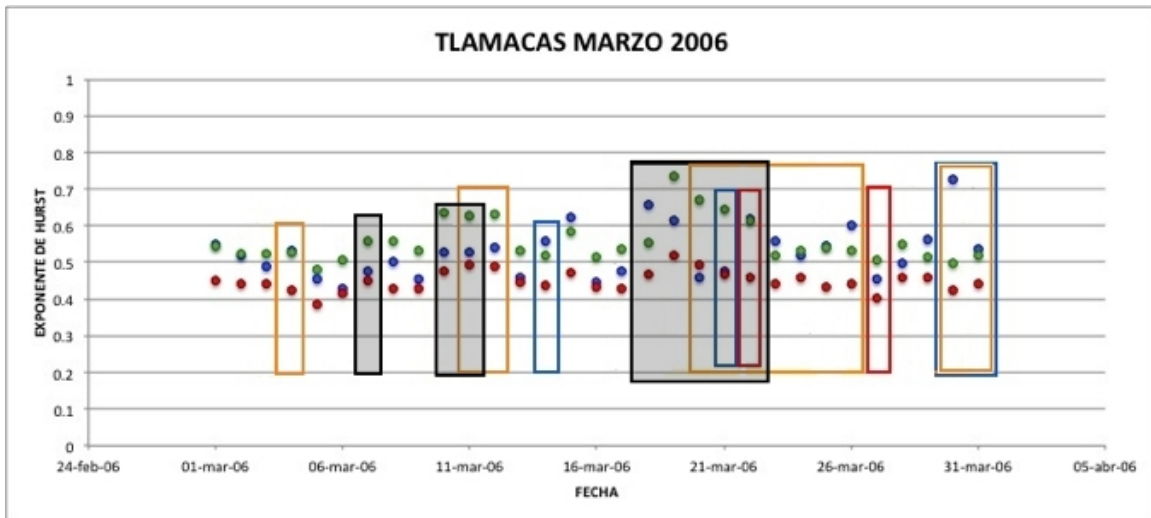


Figura 6.22. Evolución del índice de Hurst de las series de tiempo de las componentes del campo magnético en la estación Tlamacas (arriba), vecina al volcán Popocatepetl, y en Juriquilla (abajo, estación de referencia) durante el periodo registrado en marzo de 2006. Los puntos en azul representan los valores de índice de Hurst estimados por el método de ondículas para la componente BH; los puntos en verde, para BD; y los rojos, para BZ. Los rectángulos sombreados indican actividad geomagnética de  $K_p$  igual o mayor a 4 y, por tanto, los puntos dentro de ellos no se consideran para este estudio.

El día 4 de marzo el CENAPRED reportó dos sismos (ambos de M2.1). El exponente de Hurst de BZ disminuyó gradualmente del día 3 al 5. El día 3 el CENAPRED registró dos sismos (a las 21:18 y 23:18 LT) que se muestran en la Figura 6.22 el día 4 de marzo por la traslación a la hora universal.

La secuencia de sismos de los días 10 y 11 de marzo cae dentro de un periodo con actividad geomagnética con  $K_p$  máximo de 4, y por lo tanto, no lo consideramos en nuestro estudio.

El CENAPRED registró sismos los días 20, 21 y 22, periodo que tuvo actividad magnética alta con  $K_p$ 's máximos de 6, 5 y 4. En los días 23, 24 y 26 se

registraron tremores, y el día 25 un sismo, con el índice de Hurst más bajo de este periodo de sismos y tremores. Durante este mes de marzo, la estación de referencia tuvo altas fluctuaciones en los valores de BZ.

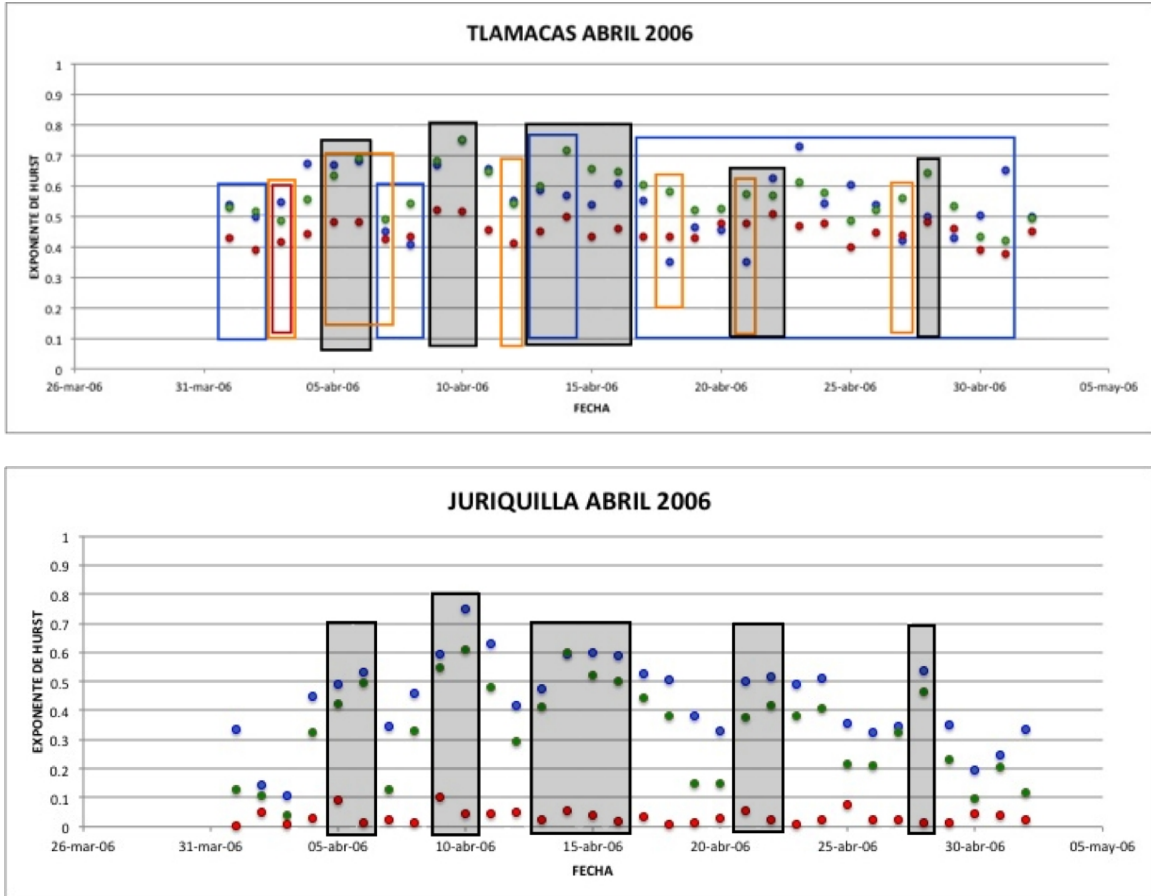


Figura 6.23. Evolución del índice de Hurst de las series de tiempo de las componentes del campo magnético en la estación Tlamacas (arriba), vecina al volcán Popocatepetl, y en Juriquilla (abajo, estación de referencia) durante el periodo registrado en abril de 2006. Los puntos en azul representan los valores de índice de Hurst estimados por el método de ondículas para la componente BH; los puntos en verde, para BD; y los rojos, para BZ. Los rectángulos sombreados indican actividad geomagnética de Kp igual o mayor a 4 y, por tanto, los puntos dentro de ellos no se consideran para este estudio.

El día 3 de abril de 2006 el CENAPRED reportó una exhalación de vapor de agua y gas, un sismo de M2.2 y 50 minutos de tremor. Sin embargo, el día anterior nosotros observamos perturbaciones magnéticas locales, de manera que no es posible hacer comparaciones con valores de días previos.

El periodo comprendido entre el 5 y el 7 de abril tiene cuatro sismos (día 4: M2.3 y M2.4; día 5: M2.3 y día 6: M1.9). Estos días estuvieron acompañados de actividad magnética global y local, y no podemos tomarlos en cuenta.

Del día 11 al 12 de abril podemos observar que el índice de Hurst de BZ

decrece (de 0.457 a 0.411) de un día sin sismos a otro con microsismo de M2.8, pero no podemos compararlo con el día 13 debido a que se presentó actividad magnética cuyo valor Kp máximo fue de 4. La tendencia del índice de Hurst contrasta con los resultados de la estación de referencia en la que no se identifica tal comportamiento (Figura 6.23).

El día 18 de abril el CENAPRED reportó un sismo de M2.6. Los exponentes de Hurst de BZ para los días 16 y 17, previos al sismo, son 0.46 y 0.35, respectivamente. Mientras tanto, para el tremor del día 21, la secuencia de exponentes de Hurst es ascendente (día 21: 0.476, día 22: 0.505). Durante estos dos días el índice Kp tuvo máximos de 4, por lo que no consideramos estos días en nuestro estudio.

El día 27 de abril se presentó un sismo de M2.2 y un tremor sin que se haya observado un descenso marcado del exponente de Hurst de BZ. A través de los espectrogramas observamos perturbaciones durante el periodo comprendido entre el día 17 de abril al 1 de mayo, por lo cual no tomamos en cuenta este periodo.

El índice Kp tuvo un máximo de 7 el día 14 de abril, seguido de un Kp de 6 el día 9; y de valor 5 los días 5, 10, 15 y 28. El resto de los días marcados con rectángulos sombreados tienen valor Kp máximo de 4.

A partir de la información que obtuvimos en la página del monitoreo volcánico de CENAPRED (<http://www.cenapred.unam.mx/cgi-bin/popoi/reportes/consultai.cgi>) construimos la Tabla 6.1, que reúne diferentes tipos de manifestaciones volcánicas diarias, éstas son: número de tremores, magnitud de los sismos, número de exhalaciones y su intensidad, número de fumarolas, número de explosiones y su intensidad, y la fase volcánica según el semáforo de alerta volcánica. A esta tabla le agregamos una descripción cualitativa del espectrograma si hubo periodos que destacaron por un alto nivel de ruido, interferencias, aumento en la intensidad espectral, y micropulsaciones.

Las Tablas 6.1 y 6.2 concentran información sobre los eventos, la fecha de ocurrencia y el tipo de éstos: volcánicos (XP-explisión) y fumarola (F), en rojo; sísmico (S) y tremor (T) en amarillo; magnético (P) en azul, para aumento en la potencia (Figura 6.9), micropulsaciones (C), (Figura 6.6), ruido (R), y para lapsos de ruido (B), (ver Figura 6.10). Además, hay una breve descripción de resultados fractales que destacan por valores de exponente de Hurst diferentes al comportamiento usual de las componentes. Hasta ahora no se tiene una relación clara y directa de los resultados de los análisis de fase con la ocurrencia de los sismos, tremores, explosiones, fumarolas o comportamiento fractal, sin embargo, las características resultantes, como las elipses, sí corresponden con características observadas en el dominio de la frecuencia a través de los espectrogramas de BH y BD.

Tabla 6.1. Ocurrencia de eventos magnéticos (azul), sísmicos (amarillo), volcánicos (rojo). Los puntos con exponente de Hurst inusual se especifican en la tabla. Las fechas corresponden al año 2005.

2005							
	1Mzo	2Mzo	4 Mzo	6 Mzo	8 Mzo	9Mzo	13 Mzo
M							
S							S
V				XP	XP		
F	BZ>0.7	BH>BD				BH>BZ>BD	
	16 Mzo	17Mzo	22 Mzo	24 Mzo	27 Mzo	30 Mzo	31 Mzo
M	P		P		P+C		
S			S	2S	S		S
V						F	
F	BZ>BD	BZ>BD	BD>BZ>BH				
	2Ab	3Ab	5Ab	8Ab	9Ab	12Ab	13Ab
M				P	R		
S	S	S					
V							
F			BD>0.7	BD≈BH		BD>0.7	BD>0.7
	14Ab	15Ab	16Ab	17Ab	20Ab	23Ab	24Ab
M		P+B		P+R			
S					T		
V							
F	BD>0.7	BD≈BH	BD≈BH	BH>BD	BH>0.7	BH>0.7	BH, BD>0.7
	25Ab	28Ab	29Ab	30Ab			
M		P	C	C+P+R			
S				T			
V				F			
F	BH>BD		BH>BD	BH>BD>0.7			
	13My	14My	15My	18My	20My	28My	29My
M		P+B	C+P+R	C+P+B		P+C	C+B
S	T	S		S+T	S		S
V							
F			BD>0.9, BZ>0.7		BD≈0.8, BZ>0.5		BD>0.6
	30My	31My					
M	P						
S	S						
V							
F	BD>0.6	BD>0.7					
	1Jn	2Jn	3Jn	4Jn	5Jn	6Jn	7Jn
M					P+B		
S	T	S+T					
V							
F	BD>0.6	BD>0.7	BD>0.6	BD>0.6	BD=0.7	BD>0.6	BD>0.7
	8Jn	9Jn	11Jn	12Jn	13Jn	14Jn	15Jn
M	P		P+C	P+C	P+C	P+C	P+C
S					2S		
V							
F		BD>0.6	BD=0.7	BD>0.6	BD>0.7	BD>0.6	BD>0.6

	16Jn	17Jn	18Jn	20Jn	21Jn	23Jn	24Jn
M							C+P+B
S	S			S	S	S	
V						2F	
F	BD=0.7	BD>0.7	BD>0.7			BD>0.7, BZ>0.5	BD>0.7, BZ>0.5

	25Jn	26Jn	27Jn	28 Jn	29Jn
M	P				
S	S				2S
V				2F	
F	BD>0.7, BZ>0.5	BD>0.7	BD>0.6		

	1Jl	2Jl	3Jl	4Jl	5Jl	6Jl	7 Jl
M		P					
S							S
V						F	
F	BD>0.6	BH>0.7	BH>0.7	BD>0.7	BD>0.7		

	9Jl	10Jl	11Jl	12Jl	13Jl	14Jl	16Jl
M				C+B+R			
S				S		T	
V					F	F	
F	BD>0.6	BD>0.6	BD>0.6	BD>0.6	BD>0.6		BD>0.6

	18Jl	19Jl	20Jl	21Jl	22Jl	24Jl	25Jl
M		C+P+B			R+P+B		
S				S			
V				F			
F	BH>0.6	BD>0.6	BH>0.6, BZ>0.5	BH>0.6	BD>0.6	BD>0.6	BD>0.6

	27Jl	28Jl	29Jl	30Jl	31Jl	1Ag	2Ag
M	P		C+P+B	C+P+B	P+C	C	
S			T	T			
V						F	
F	BH>0.6, BZ>0.5	BH>0.7	BH>0.6	BH>0.7	BH>0.6	BH>0.7	BH, BZ<0.5

Tabla 6.2 Ocurrencia de eventos magnéticos (azul), sísmicos (amarillo), volcánicos (rojo). Los puntos con exponente de Hurst inusual se especifican en la tabla. Las fechas corresponden al año 2006.

2006							
	19Fb	20Fb	21Fb	22Fb	24Fb	27Fb	
M	C	C				R	
S					S		
V							
F		BH>0.6	BH>0.6	BH>0.6			
	4Mzo	10Mzo	11Mzo	12Mzo	14Mzo	15Mzo	18Mzo
M					C+P+B		
S	2S		S	2S			
V							
F		BD>0.6	BD>0.6	BD>0.6	BH>BD	BH>0.6	BH>0.6
	19Mzo	20Mzo	21Mzo	22Mzo	23Mzo	24Mzo	25Mzo
M			R+P+C				
S		S	S	S+T	T	T	S
V				F			
F	BD>0.7, BZ>0.5	BD>0.6, BZ>BH	BD>0.6	BD>0.6	BH>BD		
	26Mzo	28Mzo	30Mzo	31Mzo			
M			R+P+C	C+P+B			
S	T		S	2S			
V		F					
F	BH>BD		BH>0.7				
	1Ab	2Ab	3Ab	4Ab	5Ab	6Ab	7Ab
M	P+B	P+C					P+C
S			S+T		2S	S	S
V			F				
F				BH>BD	BH, BD>0.6	BH, BD>0.6	
	8Ab	9Ab	10Ab	12Ab	13Ab	14Ab	15Ab
M	P+C				P+C	P+C	
S				S+T			
V							
F		BH, BD>0.6	BH, BD>0.7			BD>0.7	BD>0.6
	16Ab	17Ab	18Ab	19Ab	20Ab	21Ab	22Ab
M		P+B+R	R+P+C	P+R	R+C	R+P+C	P+C
S			S			T	
V							
F	BD>0.6	BD>0.6	BZ>BH		BZ>BH		



	23Ab	24Ab	25Ab	26Ab	27Ab	28Ab	29Ab
M	P+B	R+P+C	P+B	R+P+C	P+R	P+R	R+C
S					S+T		
V							
F	BH>0.7		BH>BD	BH>BD	BZ>BH	BD>0.6	BZ>BH

	30Ab	1My	2My
M	R+P+C+B	R+P+B	
S			T
V			
F	BH>BD	BH>0.6	

## **Capítulo VII**

### **Discusión**

A través de los análisis de frecuencia de los datos de las estaciones de Juriquilla y Tlamacas observamos que las componentes horizontales (BH y BD) del campo magnético tienen variaciones similares que difieren, en cambio, con la componente vertical (BZ). Hata y Yabashi (1994) también observaron estas diferencias en el Monte Fugen con sus series de tiempo. Al igual que nosotros encontramos que las variaciones verticales y horizontales no tienen la misma ocurrencia.

Las componentes horizontales (BD y BH) son susceptibles a las perturbaciones de fuentes locales o globales provenientes de la atmósfera o ionósfera, como tormentas magnéticas o descargas eléctricas. Las variaciones comunes a BH y BD son evidentes en las elipses de las gráficas de fase, lo que para nosotros sugiere una fuente con polarización horizontal.

En nuestros espectrogramas observamos que, en la mayoría de los casos, la componente BZ se limita a la variación diaria. Sin embargo, también se observan perturbaciones que en ocasiones no se correlacionan con las otras componentes, como la interferencia instrumental o ruido en cierta porción del espectro, lo que sugiere una polarización vertical de la fuente perturbadora. En otros casos, el espectrograma muestra aumento en la intensidad del campo magnético, al igual que en las componentes horizontales. Al realizar el análisis fractal descubrimos que, por lo general, los exponentes de Hurst de BZ corresponden a un comportamiento antipersistente, a diferencia de las otras componentes. Sin embargo, en ocasiones este comportamiento se torna persistente.

Los espectrogramas nos permitieron identificar que el ambiente en Tlamacas es electromagnéticamente más ruidoso que el de la estación de referencia de Juriquilla, pese a que este último sitio se encuentra rodeado de fuentes antropogénicas, caracterizadas por diversas fuentes de ruido electromagnético. Kotsarenko et al. (2005) ya habían reportado este fenómeno. Kotsarenko et al. (2012) atribuyen este ruido a una anomalía en el escape de gas radón en esta zona que, según el modelo LAIC acorta el circuito eléctrico tierra-nubes de tormenta y provoca microdescargas en el aire cercano al terreno (en tiempo sin tormenta), y que, además, propicia la formación de relámpagos durante las tempestades.

Por otro lado, los estudios de la dimensión fractal de secuencias eruptivas en el volcán Etna han mostrado un comportamiento escalable en el tiempo (Telesca et al., 2002). Para verificar si en el caso del volcán Popocatépetl el comportamiento fractal del campo magnético posee la característica

invarianza al escalado nosotros encontramos exponentes de Hurst, a través del método de ondículas, de las series de tiempo de la intensidad de las componentes del campo magnético. Para tal fin analizamos los datos de la estación Tlamacas tomando un periodo de 72 horas (Figura 7.1), otro de 24 horas (Figura 7.2) y un segmento nocturno de 12 horas (Figura 7.3). Encontramos que los puntos críticos destacan en el análisis de los periodos de 12, 24 y 72 horas. Las curvas de 12 y 24 horas son muy similares porque cada punto corresponde a un día, mientras que en la curva de la figura 7.1 cada punto representa 72 horas. Esta comparación muestra una invarianza al escalado para los periodos analizados, lo cual es una de las características de un fractal.

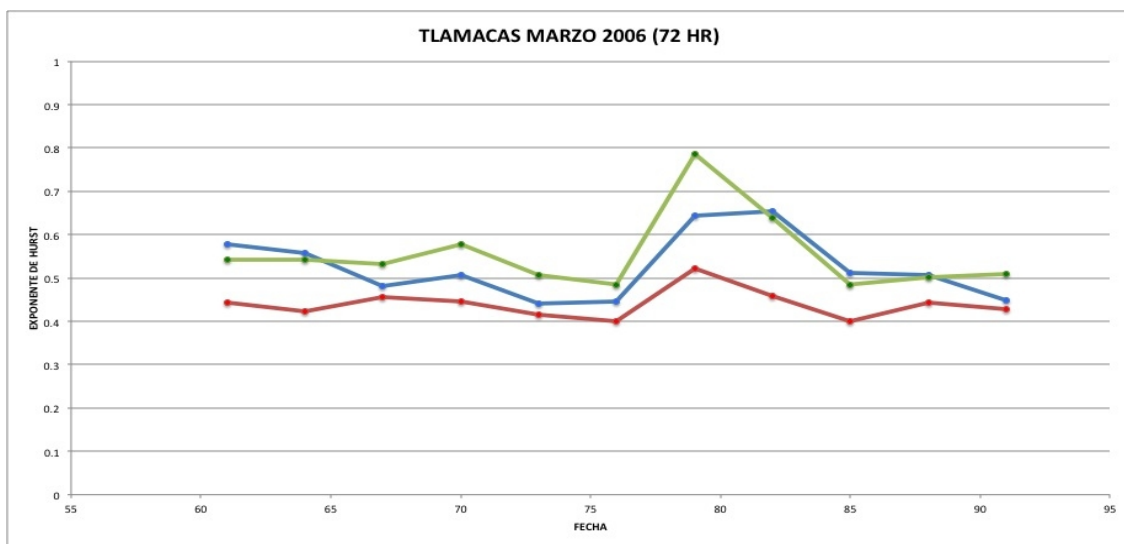


Figura 7.1. Resultados del análisis fractal tomando periodos de 72 horas para obtener un valor de exponente de Hurst (un punto). Las tendencias de las curvas de 72, 24 y 12 horas son similares (Figuras 7.1, 7.2 y 7.3), lo cual sugiere una invarianza al escalado para tales periodos.

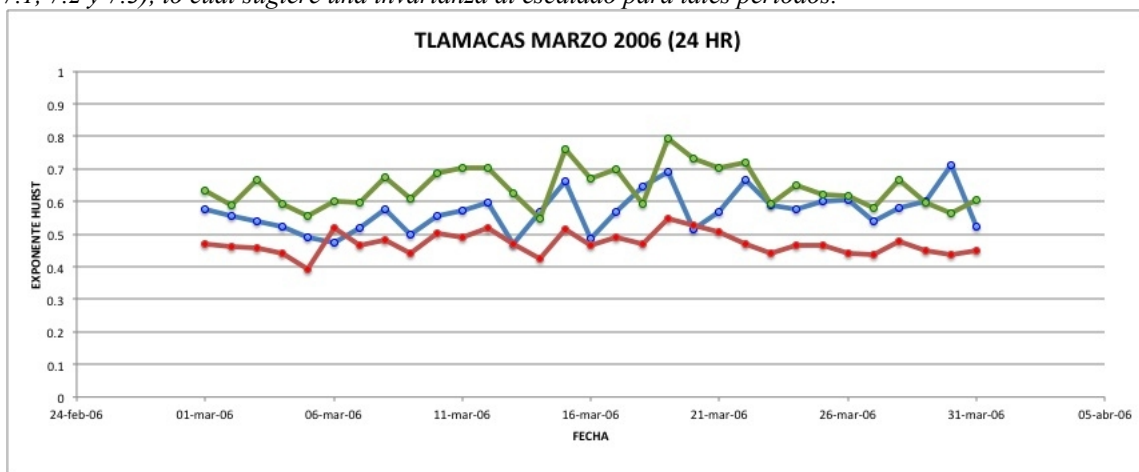


Figura 7.2. Resultados del análisis fractal tomando periodos de 24 horas para obtener un valor de exponente de Hurst (un punto). Las tendencias de las curvas de 72, 24 y 12 horas son similares (Figuras 7.1, 7.2 y 7.3), lo cual sugiere una invarianza al escalado para tales periodos.

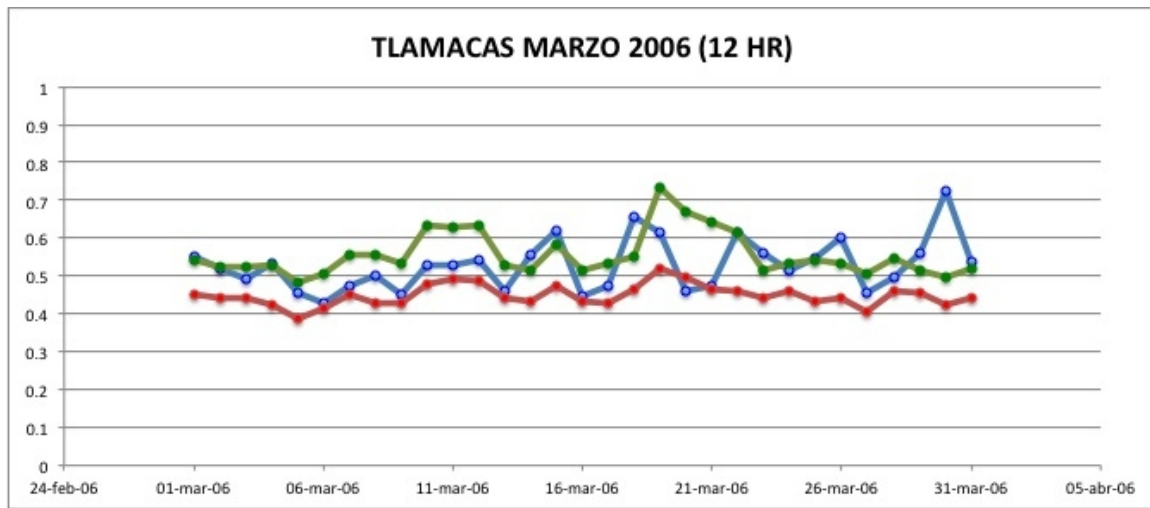


Figura 7.3. Resultados del análisis fractal tomando periodos de 12 horas para obtener un valor de exponente de Hurst (un punto). Las tendencias de las curvas de 72, 24 y 12 horas son similares (Figuras 7.1, 7.2 y 7.3), lo cual sugiere una invarianza al escalado para tales periodos.

Cuando no se presentan tormentas magnéticas o perturbaciones globales, observamos que el índice de Hurst de la componente BZ, a lo largo del tiempo, decrece de uno a dos días antes de un sismo en el volcán. Sin embargo, existen dos casos dentro de nuestro estudio en que no ocurre un descenso de exponente de Hurst previo a un microsismo (1-2 de junio y 28-29 de junio de 2005), de modo que no podemos aseverar este comportamiento, y creemos que es necesario analizar muchos más datos, ello porque se dan varias situaciones que deben tomarse en cuenta:

1. los periodos analizados no necesariamente son lo suficientemente representativos de una erupción (corresponden al estado amarillo fase 1 y 2 de la alerta volcánica establecida por el CENAPRED),
2. el exponente de Hurst es un valor estimado que obtuvimos a partir de mediciones del campo magnético, el cual a su vez es el resultado de la superposición de diferentes procesos de diferentes orígenes,
3. no se trata de un fenómeno único y aislado, y por tanto se debe analizar por métodos multifractales. Así lo han hecho Currenti et al. (2005), quienes observaron que el grado de multifractalidad aumenta antes de una erupción,
4. según estos autores, ello evidencia una gran cantidad de procesos volcánicos en marcha. Una vez que finaliza la erupción, algunos procesos se detienen y, por lo tanto, decrece el grado de multifractalidad.

Si bien este estudio es un uno de los primeros esfuerzos para correlacionar comportamiento fractal con sismos, explosiones, fumarolas o exhalaciones en el volcán Popocatepetl, aún se requiere analizar datos de otras estaciones, de periodos con actividad magnética alta y baja, con diferentes estados del

volcán y conocer mejor la contribución de otros fenómenos, como las tormentas eléctricas, las microdescargas y las corrientes de agua subterráneas que tienen un aporte magnético o electromagnético.

## **Capítulo VIII**

### **Conclusión**

El estudio de las variaciones del campo magnético para la prevención de un evento volcánico es un reto que de cumplirse puede beneficiar en mucho a la sociedad. En la búsqueda de los parámetros más adecuados hemos estudiado las características de frecuencia y fractalidad de las series de tiempo de la intensidad de campo magnético, con el fin de proponer nuevos parámetros a vigilar en conjunto con los parámetros del monitoreo volcánico actual. El esfuerzo realizado en este trabajo busca identificar y conocer bien los mecanismos que producen las variaciones, si bien sabemos que son muchas, su caracterización ayudaría a comprender mejor los procesos que ocurren dentro del volcán.

En varios casos de nuestro análisis fractal observamos, uno o dos días antes de un sismo volcánico, una disminución del exponente de Hurst de la componente BZ. De acuerdo al comportamiento observado, la firma fractal de dichos sismos podría ser una curva con pendiente negativa, la cual estaría descrita por los exponentes de Hurst de BZ en disminución. Sin embargo, no en todos los casos se observó dicha firma, o no estaba bien definida. Es evidente que otros procesos influyen en el comportamiento de las variaciones, tales como perturbaciones globales, locales de origen litosférico y atmosférico.

En general, a partir del comportamiento fractal observado en las estaciones podemos concluir que:

- 1) El exponente de Hurst en Tlamacas, para cualquiera de las componentes, suele aproximarse a 0.5, ésto debido al ruido en todo el rango del espectro medido (un índice de Hurst de 0.5 indica ruido aleatorio). La presencia de este ruido se debe a microdescargas por escape de radón, como lo han señalado algunos estudios.
- 2) El exponente de Hurst para la componente BZ tiene una variación menor en Tlamacas que en Juriquilla. Sus rangos de variación son 0.3 a 0.6 en Tlamacas y de casi cero a 0.4 en Juriquilla, aunque en ocasiones rebasa el 0.6.
- 3) Mientras en Juriquilla, el índice de Hurst para BH es, generalmente el que alcanza los valores más altos, en Tlamacas es BD el que tiene los índices de Hurst más altos.
- 5) La firma fractal de un sismo podría ser similar a una curva con pendiente negativa del índice de Hurst en la componente BZ. Este comportamiento con tendencia antipersistente puede ser el resultado de variaciones del campo

magnético asociadas a varios procesos litosféricos simultáneos, como remagnetización o fractura de roca.

6) No es posible verificar una pendiente negativa de los índices de Hurst de BZ durante la actividad magnética alta o durante tormentas magnéticas, que en ocasiones tienen una influencia dominante sobre las componentes del campo magnético.

7) Los análisis fractales realizados tomando escalas de 72, 24 horas y 12 horas mostraron invarianza al escalado en los puntos críticos, lo cual es una característica importante de los fractales. Por tanto, nuestros datos poseen esta característica fractal.

A partir de esta información podemos concluir que:

1. En cuanto a la metodología, para que los periodos estudiados sean representativos de una erupción se requiere el análisis de una mayor cantidad de ellos, incluso de otras fases de alerta volcánica, ya que los datos analizados corresponden a las fases 1 y 2 del semáforo amarillo. Por el momento, los resultados obtenidos pueden funcionar como un referente al compararlos con periodos volcánicos con mayor actividad, como los ocurridos en abril de 2012.
2. El campo magnético local de Tlamacas es afectado por eventos electromagnéticos de origen externo al volcán, como las tormentas magnéticas y eléctricas. Sin embargo, durante periodos de calma, en los que sólo domina un tipo de fenómeno, se puede estudiar la evolución del comportamiento fractal de tal fenómeno.
3. Encontrar la firma fractal de un sismo o erupción volcánica requiere de más estudios de campo magnético y de su origen. Aunque en la mayoría de los casos que estudiamos observamos descenso de exponente de Hurst previo a un sismo, en dos ocasiones no ocurrió así. Por lo tanto, no podemos aseverar que exista la firma fractal de un sismo.
4. Se requiere contar con datos de más estaciones, así como de periodos con mayor actividad sísmica y volcánica.
5. En las cercanías del volcán ocurren muchos procesos, y las señales magnéticas registradas son la superposición de todos ellos, lo cual dificulta encontrar una firma fractal específica utilizando un solo índice, lo más adecuado es utilizar métodos multifractales.

## Referencias

- Aki, K., P.G. Richards (1980) *Quantitative Seismology. Theory and Methods Vol. 1*. W.H. Freeman and Company, United States of America.
- Alfven, H., C.G. Fälthammar (1963) *Cosmical Electrodynamics. Fundamental principles*. Oxford University Press, Great Britain.
- Álvarez Ramírez, J., E. Sosa, E. Rodríguez (2009) *Assessing temporal-dependent correlations in the 2000–2008 Popocatepetl exhalation sequence by using detrended fluctuation analysis*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **186**, 426-431.
- Arámbula-Mendoza, R., C. Valdés-González, A. Martínez-Bringas (2010) *Temporal and spatial variation of the stress state of Popocatépetl Volcano, México*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **196** (3), 156-168.
- Armienta, M.A., S. De la Cruz Reyna, A. Gómez, E. Ramos, N. Cenicerros, O. Cruz, A. Aguayo, A. Martínez (2008) *Hydrogeochemical indicators of the Popocatepetl volcano activity*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **170**, 35-50.
- Bak, P., C. Tang, K. Wiesenfeld (1987) *Self-organized criticality: An explanation of the 1/f noise*. *Phys. Rev. Lett.* **59**, 381-384.
- Basavaiah, N. (2011) *Geomagnetism: Solid Earth and Upper Atmosphere Perspectives*. Capital Publishing Company, India.
- Bella, F., P.F Biagi, M. Caputo, G. Della Monica, A. Ermini, W. Plastino and V. Sgrigna (1994) *Electromagnetic Background and Preseismic Anomalies Recorded in the Amare Cave (Central Italy) en Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*. *Terra Scientific Publishing Company, Tokyo*. 181-192.
- Berger, P., J.L. Got, C.Valdés González, V. Montellier (2011) *Seismic tomography at Popocatépetl volcano, México*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **200**, 234-244.
- Bleier, T., C. Dunson, M. Maniscalco, N. Bryant, R. Bamberg, F. Freund (2009) *Investigation of ULF magnetic pulsations, air conductivity changes, and infra red signatures associated with the 30 October Alum Rock M5.4 earthquake*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **9**, 585-603.



- Blelly, P. L., D. Alcayd  (2007) *Ionosphere. Handbook of the Solar-Terrestrial Environment, Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 189-220.
- Bolt, B. (1981) *Terremotos*. Revert , España.
- Braun, E. (1986) *Un movimiento en zigzag*. Fondo de Cultura Econ mica, México.
- Cicerone, R.D., J.E. Ebel, J. Britton (2009) *A systematic compilation of earthquake precursors. Tectonophysics*, **476**, 371-396.
- Cifuentes Nava, Gerardo. (2009) "*Monitoreo geomagnético del volcán Popocatépetl*". Tesis de Maestría, México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Currenti, G., C. Del Negro, V. Lapenna y L. Telesca (2005a) *Multifractality in local geomagnetic field at Etna volcano, Sicily (southern Italy). Natural Hazards and Earth System Sciences*, **5**, 555-559.
- Currenti, G., C. Del Negro, V. Lapenna y L. Telesca (2005b) *Scaling characteristics of local geomagnetic field and seismicity at Etna volcano and their dynamics in relation to the eruptive activity. Earth and Planetary Science Letters*, **235**, 96-106.
- Davies, B. (2004) *Exploring chaos. Theory and experiment*. Westview Press, United States of America.
- Davis, M. H., M. Brook, H. Christian, B.G. Heikes, R.E. Orville, C.G. Park, R.G. Roble, B. Vonnegut. (1983) *Some scientific objectives of a Satellite-borne Lightning Mapper. Bulletin American Meteorology Society*, **64**, 114-119.
- Decker, R., B. Decker (1989) *Volcanoes. Revised and updated edition*. W.H. Freeman and Company, United States of America.
- De la Cruz-Reyna, S., I. Yokoyama, A. Martínez-Bringas, E. Ramos (2008) *Precursory seismicity of the 1994 eruption of Popocatépetl Volcano, Central Mexico. Bulletin of Volcanology*, **70**, 753-767.
- Delgado Granados, H., S. De la Cruz Reyna, R.I. Tilling (2008) *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **170**, 1-4.
- Dobrovolsky, I.P., S.I. Zubkov and V.I. Miachkin (1979) *Estimation of the size of earthquake preparation zones. Pure and Applied Geophysics*, **117**, 5, 1025-1044.
- Enomoto, Y., H. Hashimoto (1994) *Anomalous Electric Signals Detected*

*before Recent Earthquakes in Japan near Tsukuba in Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 261-269.

Enomoto, Y., T. Shimamoto (1994) A. Tsutsumi and H. Hashimoto (1994) *Transient Electric Signals Prior to Rock Fracturing: Potential Use as an Intermediate Earthquake Precursor* in *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*. TERRAPUB, Tokyo.

Espinasa Pereña, R. (2012) *Historia de la Actividad del Volcán Popocatepetl. 17 años de erupciones*. CENAPRED/SEGOB.

Evison, F.F., D.A. Rhoades (1994) *On the Testing of Earthquake Precursors*. In *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 1-11.

Fälthammar, C. G. (1986). *The Earth's magnetosphere as a sample of the plasma universe*. Invited keynote lecture at NASA-OAST Workshop Space Technology Plasma Issues in 2001 JPL, Pasadena, 24-26.

Fraser-Smith, A.C., A. Bernardi, P.R. McGill, M.E. Ladd, R.A. Helliwell, O.G. Villard Jr. (1990) *Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms7.1 Loma Prieta earthquake*. *Geophysical Research Letters*, **19**, 1465-1468.

Fregoso-Becerra, E., J.G. Abdeslem (2011) *A possible seismomagnetic precursor of the El MayorCucapah earthquake (Mw 7.2), Baja California, México*. *Geofísica Internacional*, **502**, 211-225.

Freund, Friedemann., E-J. Whang and J. Lee (1994) *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 271-292.

Freund, Friedemann (2002) *Charge generation and propagation in igneous rocks*. *Journal of Geodynamics*, **33**, 543-570.

Freund, F., A. Takeuchi, B.W.S. Lau (2006) *Electric currents streaming out of stressed igneous rocks –A step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions*. *Physics and Chemistry of the Earth*, **31**, 389-396.

Freund, F., E.J. Whang and J. Lee (1994) *Highly Mobile Hole Charge Carriers in Minerals: Key to the Enigmatic Electrical Earthquake Phenomena?* in *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*. TERRAPUB, Tokyo.

Fujinawa, Y., K. Takahashi, T. Matsumoto and N. Kawakami (1999) *Sources of Earthquake-Related VLF Electromagnetic Signals* in *Atmospheric and*

Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes.  
Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 405-415.

Gaillard, F., G. Iacono Marziano (2005) *Electrical conductivity of magma in the course of crystallization controlled by their residual liquid composition*. Journal of Geophysical Research, **110**, B06204, 12.

Genzano, N., C. Aliano, C. Filizzola, N. Pergola, V. Tramutoli (2007) *A robust satellite technique for monitoring seismically active areas: The case of Bhuj-Gujarat earthquake*. Tectonophysics, **431**, 197-210.

Gladychev, V., L. Baransky, A. Schekotov, E. Fedorov, O. Pokhotelov, S. Andreevsky, A. Rozhnoi, Y. Khabazin, G. Belyaev, A. Gorbatikov, E. Gordeev, V. Chebrov, V. Sinitsin, A. Lutikov, S. Yunga, G. Kosarev, V. Surkov, O. Molchanov, M. Hayakawa, S. Uyeda, K. Hattori and Y. Noda (2001) *Study of electromagnetic emissions associated with seismic activity in Kamchatka region*. Natural Hazards and Earth System Sciences, **1**, 127-136.

Gokhberg, M.B., Nekrasov, A.K., Shalimov, S.L. (1994) *A New Approach to the Problem of the Lithosphere-Ionosphere Coupling before the Earthquakes*, in Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction, Terrapub.

Gorbatikov, A. V., Molchanov, O.A., Hayakawa, M., Uyeda, S., Hattori, K., Nagao, T., Nikolaev, A.V., Maltsev, P. (2002) *Acoustic emission, microseismicity and ULF magnetic field perturbation related to seismic shocks at Matsushiro station*, in: Seismo.Electromagnetics (Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling), Terrapub, 1-10.

Gotoh, K., Hayakawa, M., Smirnova, N.A., Hattori, K. (2004) *Fractal analysis of seismogenic ULF emissions*. Physics and Chemistry of the Earth, **29**, 419-424.

Guo, Z., B. Liu, Y. Wang. (1994) *Mechanisms of Electromagnetic Emissions Associated with Microscopic and Macroscopic Cracking of Rocks* in Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction. TERRAPUB, Tokyo.

Hall, W. (2001) *Earth Magnetism. A guided tour through magnetic fields*. Hartcourt Academic Press, United States of America.

Hao, J. (1994) *The Complexity of Seismomagnetic Effects Suggested by Rock Experiments* in: Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 331-335.

Harrison, R. G. (2004) *The global atmospheric electrical circuit and climate*,

*Surveys in Geophysics*, **25**, 441–484.

Harrison, R.G, K.L. Aplin, M.J. Rycroft (2010) *Atmospheric electricity coupling between earthquake regions and the ionosphere*. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, **72**, 376-381.

Hata, M., S. Yabashi (1994) *Observation of ELF Radiation Related to Volcanic and Earthquake Activities* in: *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*, Terrapub, 159-174.

Hayakawa, M., Y. Fujinawa, F.F. Evison, V.A. Shapiro, P. Varotsos, A.C. Fraser-Smith, O.A. Molchanov, O.A. Pokhotelov, Y. Enomoto and H.H. Schloessin (1994) *What is the Future Direction of Investigation on Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction?* In: *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*. TERRAPUB, Tokyo, 667-677.

Hayakawa, M., Kawate, R., Molchanov, O.A. (1996 a) *Ultra Low Frequency Signatures of the Guam Earthquake on 8 August 1993 and Their Implication*, *Journal of Atmospheric Electricity*, **16**, No.3, 193-198.

Hayakawa, M., R. Kawate, O.A. Molchanov, K. Yumoto (1996 b) *Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August, 1993*, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 241-244.

Hayakawa, M., K. Hattori, A.P. Nickolaenko, L.M. Rabinowicz (2004) *Relation between the energy of earthquake swarm and the Hurst exponent of random variations of the geomagnetic field*. *Physics and Chemistry of the Earth*, **29**, 379-387.

Ibañez, J.M., E. Carmona. *Sismicidad volcánica*. Instituto Andaluz de Geofísica. Universidad de Granada. Disponible en internet: [http://www.uclm.es/profesorado/egcardenas/SISMICIDAD\\_VOLCANICA%5B1%5D.pdf](http://www.uclm.es/profesorado/egcardenas/SISMICIDAD_VOLCANICA%5B1%5D.pdf)

Kanamori, H., D.L. Anderson, (1975) *Theoretical basis of some empirical relations in seismology*. *Seis. Soc. At. Bull.* **65**, 1073-1096.

Kapiris, P., J. Polygiannakis, A. Peratzakis, K. Nomicos and K. Eftaxias (2002) *VHF-electromagnetic evidence of the underlying pre-seismic critical stage*. *Earth Planets Space*, **54**, 1237-1246.

Kelley, M. C. (2009). *The Earth's Ionosphere. Plasma Physics and Electrodynamics*. Elsevier.

Kopytenko, Y.A., T.G. Matiashvili, P.M. Voronov, E.A. Kopytenko (1994) *Observation of electromagnetic ultra-low frequency lithospheric*

*emissions in the Caucasian seismically active zone and their connection with earthquakes*, in "Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction", Terra Sci. Pub. Company, Tokyo, 175-180.

- Kotsarenko, A., V. Grimalsky, R. Pérez Enríquez, C. Valdés González, S. Koshevaya, J.A. López Cruz Abeyro, V. Yutsis (2007) *Volcano Popocatepetl, Mexico: ULF geomagnetic anomalies observed at Tlamacas station during March-July, 2005*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **7**, 103-107.
- Kotsarenko, A., V. Grimalsky, H.R. PérezEnríquez, V. Yutsis, S. Koshevaya, J.A. López Cruz-Abeyro, C. Valdés González, and R.A. Villegas Cerón (2008) *Geomagnetic anomalies observed at volcano Popocatepetl, Mexico*. *Adv. Geosciences*, **14**, 21-24,
- Kotsarenko, A., O. Molchanov, M. Hayakawa, S. Koshevaya, V. Grimalsky, R. Pérez Enríquez and J.A. López Cruz Abeyro (2005) *Investigation of ULF magnetic anomaly during Izu earthquake swarm and Miyakejima volcano eruption at summer 2000, Japan*. *Natural Hazards and Earth Sciences*, **5**, 63-69.
- Kotsarenko, A., V. Grimalsky, V. Yutsis, A.G. Bravo Osuna, S. Koshevaya, H.R. Pérez Enríquez, G. Urquiza Beltrán, J.A. López Cruz Abeyro, C. Valdés González (2012) *Experimental studies of anomalous radon activity in the Tlamacas Mountain, Popocatepetl Volcano area, México: new tools to study lithosphere-atmosphere coupling for forecasting volcanic and seismic events*, *Annals of Geophysics*, **55**, 1, 109-118.
- Kraus, E. H., W. F. Hunt , L. S. Ramsdell (1965). *Mineralogía*. Ediciones del Castillo, S.A., España.
- Langel, R.A., W.J. Hinze (1998) *The magnetic field of the Earth's lithosphere: the satellite perspective*. Cambridge University Press, Estados Unidos de América.
- Longwell, C. R., Flint, R. (1978) *Geología Física*. Editorial Limusa, México.
- Macías Vázquez, J.L., L. Capra Pedol (2005) *Los volcanes y sus amenazas*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Martin del Pozzo, A.L., F. Aceves, R. Espinasa, A. Aguayo, S. Inguaggiato, P. Morales, E. Cienfuegos (2002 a) *Influence of volcanic activity on spring water chemistry at Popocatepetl Volcano, Mexico*. *Chemical Geology*, **190**, 207 – 229.
- Martin Del Pozzo, A.L., G. Cifuentes-Nava, E. Cabral-Cano, G. Sánchez-Rubio, M. Reyes, A. Martínez-Bringas, E. García,

- C. Arango-Galván (2002 b) *Volcanomagnetic signals during the recent Popocatepetl (Mexico) eruptions and their relation to eruptive activity*, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **113** , 415-428.
- Martin Del Pozzo (2012) *Precursors to eruptions of Popocatépetl Volcano, Mexico*, *Geofísica Internacional*, **51-1**, 87-107.
- Matsuo, T. (2003) *Abstract of the dissertation Effects of High Latitude Ionospheric Electric Field Variability on the Estimation of Global Thermospheric Joule Heating*. State University of New York at Stony Brook.
- Melgarejo, J.C. (2003) *Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada*. Ediciones UB, España.
- Molchanov, O.A., M. Hayakawa (1995). *Generation of ULF electromagnetic emissions by microfracturing*. *Geophys. Res. Lett.* **22**, 3091-3094.
- Molchanov O.A., M. Hayakawa (1994) *Generation of ULF Seismogenic Electromagnetic Emission: A Natural Consequence of Microfracturing Process in Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*. TERRAPUB, Tokyo.
- Molchanov, O., A. Schekotov, M. Solovieva, E. Fodorov, V. Gladyshev, E. Gordeev, V. Chebrov, D. Saltikov, V.I. Sinitsin, K. Hattori, M. Hayakawa (2005) *Near-seismic effects in ULF fields and seismo-acoustic emission: statistics and explanation*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. **5**, 1-10.
- Molchanov, O. (2009) *Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling due to Seismicity* in "Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes", 255-279.
- Moreira, J.G., J.K.L Da Silva, S.O. Kamphorst. (1994) *On the fractal dimensión of self-affine profiles*. *J. Phys. A: Math. Gen.*, **27**, 8079.
- Morgunov, V.A., M.N. Lubashevsky, V.Z. Fubrizius, and Z.E. Fubrizius (1991) *Geoacoustic precursor of Spitak earthquake*, *Volcanology and Seismology*, **4**, 104-107.
- Muniz Barreto, L. (1997) *El geomagnetismo*. Plaza y Valdés S.A. de C.V., México.
- Napoli, R., G. Currenti, C. Del Negro, A. Di Stefano, F. Greco, E. Boschi (2011) *Magnetic features of the magmatic intrusion that occurred in the 2007 eruption at Stromboli Island (Italy)*, *Bull. Volcanol*, **73**,1311-1322.

- Oleschko, K., G. Korvin, L. Flores, F. Brambila, C. Gaona, J.F. Parrot, G. Ronquillo, S. Zamora (2010) *Probability density function: A tool for simultaneous monitoring of pore/solid roughness and moisture content*, *Geoderma*, **160**, 93-104.
- Ondoh, T (1994) *Observation of LF Atmospheric Phenomena Associated with Great Eruptions of the Izu-Oshima Volcano, Japan in November, 1986* in "Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction". Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 149-157.
- Ondoh, T. (2009) *Investigation of precursory phenomena in the ionosphere, atmosphere and groundwater before large earthquakes of  $M > 6.5$* . *Advances in Space Research*, **43**, 214-223.
- Otaola, J., B. Mendoza, R. Pérez (2000) *El Sol y la Tierra. Una relación tormentosa*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Ouzounov, D., D. Liu, K. Chunli, G. Cervone, M. Kafatos, P. Taylor. (2007) *Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes*. *Tectonophysics*, **431**, 211-220.
- Pulinets, S.A., V.A. Alekseev, A.D. Legen'ka, V.V. Khagai. (1997) *Radon and metallic aerosols emanation before strong earthquakes and their role in atmosphere and ionosphere modification*. *Adv. Space Res.*, **20**, 11, 2173-2176.
- Pulinets, S.A., D. Ouzounov, A.V. Karelin, K.A. Boyarchuk, L.A. Pokhmelnikh. (2006) *The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes*. *Physics and Chemistry of the Earth*, **31**, 143-153.
- Pulinets, S.A (2009) *Physical mechanism of the vertical electric field generation over active tectonic faults*. *Advances in Space Research*, **44**, 767-773.
- Pulinets, S.A., D. Ouzounov (2011) *Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model – An unified concept for earthquake precursors validation*. *Journal of Asian Earth Sciences*, **41**, 371-382.
- Rakov, V., M. Uman. (2003) *Lightning. Physics and effects*. Cambridge University Press. New York.
- Rauscher, E. A., W.L. Van Bise (1999) *The Relationship of Extremely Low Frequency Electromagnetic and Magnetic Fields Associated with Seismic and Volcanic Natural Activity and Artificial Ionospheric Disturbances in "Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes"*, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 459-487.

- Richmond, A. D., E.C. Ridley, R.G. Roble. (1992) *A thermosphere/ionosphere general circulation model with coupled electrodynamics*. *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 601-604.
- Rikitake, T. (1979) *Classification of earthquake precursors*. *Tectonophysics*, **54**, 293-309.
- Rycroft, M.J. (2006) *Electrical processes coupling the atmosphere and ionosphere: An overview*. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **68**, 445-456.
- Saito, A., T. Iyemori, M. Sugiura, N.C. Maynard, T.L. Aggson, L.H. Brace, M. Takeda, M. Yamamoto (1995) *Conjugate occurrence of the electric field fluctuations in the nighttime midlatitude ionosphere*. *Journal of Geophys. Res.*, **100**, 21, 439-451.
- Schifter, I. (2000) *La ciencia del caos*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Schmincke, H.U. (2004) *Volcanism*. Springer.
- Seffens, W. (1999) *Order From Chaos*, *Science Magazine*, **285**, 5431, p1228.
- Stein, S., M. Wyssession (2003) *An introduction to seismology, earthquakes and earth structure*. Blackwell Publishing, United Kingdom.
- Surkov, V.(1999) *ULF Electromagnetic Perturbations Resulting from the Fracture and Dilatancy in the Earthquake Preparation Zone in "Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Associated with Earthquakes"*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 371-382.
- Tar buck, E.J., F.K. Lutgens y D. Tasa (2005) *Ciencias de la Tierra*. Pearson Education S.A., Madrid.
- Telesca, L., V. Cuomo, V. Lapenna, M. Macchiato (2002) *Time-clustering analysis of volcanic occurrence sequences*. *Phys. Earth Planet. Int.*, **131**, 47-62.
- Tinsley, B.A. (2008) *The global atmospheric electric circuit and its effects on cloud microphysics*, *Reports on Progress in Physics*, **71**, 1-31.
- Toh, H., T. Minami (2012) *Electromagnetic View of the Seismogenic Zones Beneath Island Arcs*, in: "Earthquake Research and Analysis. Seismology, Seismotectonic and Earthquake Geology". Edited by Sebastiano D'Amico. InTech, Croatia.
- Tomasi, W. (2003) *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson



Education, México.

- Tomizawa, I., M. Hayakawa, T. Yoshino, K. Ohta, T. Okada and H. Sakai (1994) *Observation of ELF/VLF Electromagnetic Variations Associated with a Seismic Experimental Explosion* in: "Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction". Edited by M. Hayakawa and Y. Fijinawa. Terra Scientific Publishing Company. Tokyo, 337-347.
- Torres Sánchez, H. (2002) *El rayo: Mitos, Leyendas, Ciencia y Tecnología*. Unibiblos, Colombia.
- Troyan, V.N., N.A. Smirnova, Yu. A. Kopytenko, Th. Peterson and M. Hayakawa (1999) *Development of a Complex Approach for Searching and Investigation of Electromagnetic Precursors of Earthquakes: Organization of Experiments and Analysis Procedures* in: "Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes". Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 147-170.
- Tsutsumi, A., Y. Enomoto, H. Hashimoto (1999) *Relationships between Geo-Electric Charge Signals and Meteorological Lightning* in: "Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes". Terra Scientific Publishing Company. Tokyo, 577-590.
- Turcotte, D.L. (1992) *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge University Press, Great Britain.
- Tyrrell, G.W. (1981) *Principios de petrología. Introducción al estudio de las ciencias de las rocas*. Compañía Editorial Continental, S.A., México.
- Uyeda, S., T. Nagao, K. Hattori (2002) *Japanese-Russian monitoring of phenomena connected with seismic activity* in: "Seismo-Electromagnetics (Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling)", Terrapub, 413-420.
- Uyeda, S., T. Nagao, M. Kamogawa (2009) *Short-term earthquake prediction: Current status of seismo-electromagnetics, Tectonophysics*, **470**, 205-213.
- Valdés, J. F. (1988) *Nuestro hogar en el espacio*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Van Bise, W.L. and E.A. Rauscher (1994) *Ambient Electromagnetic Fields as Possible Seismic and Volcanic Precursors*, TERRAPUB, Tokyo, 221-242.
- Viñas, J. M. (2010) *Corrientes en chorro*. *Revista Avión & piloto*, **15**, Key Publishing Spain, pp. 37-39.
- Williams, E.R. (2009) *The global electric circuit: A review*. *Atmospheric*

Research, **91**, 140-152.

Zhang, D., F. Liu, N. Zhang, S. Wang, S. Liu and J. Yu (1994) *Seismic Electromagnetic Emissions as a Precursor of Earthquakes –A Method for Short-Term and Imminent Earthquake Prediction in: "Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction"*, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 213-220..

Zhao, Z., X. Shu (1994) *Earthquake Precursory Mechanisms: A Study Based on Field Observations in: " Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction"*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 71-83.

Zheludev, V.A., L.S. Alperovich (1999) *Wavelet Analysis as a Tool for Revealing Geomagnetic Precursors of a n Earthquake in: "Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes"*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 255-269.

Zumberge, J. H. (1982) *Geología Elemental*. Compañía Editorial Continental, S.A., México.

### **Fuentes electrónicas:**

Ouzounov, D., S. Habib, F. Policeli, P. Taylor. (2007b) *Learning new methodologies to deal with large disasters:Multisensor approach of analyzing atmospheric signals and search for possible earthquake precursors*. NASA. Disponible en internet:<http://www.gwu.edu/~spi/assets/docs/Ouzounov%20-%20Learning%20new%20methodologies%20to%20deal%20with%20large%20disasters%20Multisensor%20approach%20of%20analyzing%20atmospheric%20signals%20and%20search%20for%20possible%20earthq.pdf>

Valecillos, B. J. Ramírez. (2006) *Evaluation of Lightning Impulse Test by Frequency Response Analysis*, IEEE. Disponible en internet: [http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/2347/1/TD06\\_321.pdf](http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/2347/1/TD06_321.pdf)

<http://arxiv.org/ftp/physics/papers/0506/0506077.pdf>

[http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/108/htm/sec\\_8.htm](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/108/htm/sec_8.htm)

[http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/114/htm/sec\\_7.htm](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/114/htm/sec_7.htm)

[http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/126/htm/sec\\_6.htm](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/126/htm/sec_6.htm)

[http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2008/15dec\\_solarflaresurprise/](http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2008/15dec_solarflaresurprise/)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Earth's\\_magnetic\\_field](http://en.wikipedia.org/wiki/Earth's_magnetic_field)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s\\_magnetic\\_field](http://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s_magnetic_field)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Van\\_Allen\\_radiation\\_belt](http://en.wikipedia.org/wiki/Van_Allen_radiation_belt)

[http://es.wikipedia.org/wiki/Campo\\_magnético\\_terrestre](http://es.wikipedia.org/wiki/Campo_magnético_terrestre)

[http://es.wikipedia.org/wiki/Cinturones\\_de\\_Van\\_Allen](http://es.wikipedia.org/wiki/Cinturones_de_Van_Allen)

[http://es.wikipedia.org/wiki/Curva\\_de\\_Lissajous](http://es.wikipedia.org/wiki/Curva_de_Lissajous)

[http://es.wikipedia.org/wiki/Viento\\_solar](http://es.wikipedia.org/wiki/Viento_solar)

<http://geomag.cr.usgs.gov/intro.php>

<http://magbase.rssi.ru/REFMAN/SPPHTEXT/ssc.html>

<http://magbase.rssi.ru/REFMAN/SPPHTEXT/ulf.html>

[http://pluto.space.swri.edu/image/glossary/geomagnetic\\_storm.html](http://pluto.space.swri.edu/image/glossary/geomagnetic_storm.html)

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/dst2/onDstindex.html>

<http://www.agu.org/pubs/crossref/1974/JA079i013p02002.shtml>

[http://www.bearcave.com/misl/misl\\_tech/wavelets/hurst/index.html#Why](http://www.bearcave.com/misl/misl_tech/wavelets/hurst/index.html#Why)

<http://www.igepn.edu.ec/index.php/nuestro-blog/item/163-tremor-volcánico.html>

<http://www-istp.gsfc.nasa.gov/Education/Mmpause.html>

<http://www-istp.gsfc.nasa.gov/Education/Mms2.html>

<http://www-istp.gsfc.nasa.gov/Education/Mradbelt.html>

<http://www.lasi.utoledo.edu/projects/talgua/t2.htm>

<http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/java/lissajous/index.html>

[http://www.nationalatlas.gov/articles/geology/a\\_geomag.html](http://www.nationalatlas.gov/articles/geology/a_geomag.html)

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/oscilaciones/lissajous/lissajous.htm>

<http://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/wmpause.html>

<http://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/wms2.html>

<http://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/wcurrent.html>

[http://www.uclm.es/profesorado/egcardenas/SISMICIDAD\\_VOLCANICA%5B1%5D.pdf](http://www.uclm.es/profesorado/egcardenas/SISMICIDAD_VOLCANICA%5B1%5D.pdf)

<http://www.ulpgc.es/hege/almacen/download/16/16818/trangeo.pdf>

<http://www.upv.es/satelite/trabajos/pracGrupo7/glosario.htm>

<http://wwwuser.gwdg.de/~rhennin/ssc.html>