

**INFLUENCIA DE LA ANOMALÍA GEOMAGNÉTICA DEL ATLÁNTICO SUR (SAMA)
EN LAS VARIACIONES GEOMAGNÉTICAS DEBIDAS A COMPRESIONES
MAGNETOSFÉRICAS SÚBITAS POR EL VIENTO SOLAR.**

María Andrea Van Zele

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET),
Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA),
Ciudad Universitaria, 1428 Buenos Aires, Argentina
avanzele@gl.fcen.uba.ar

RESUMEN

En el viento solar existen burbujas con cambios significativos de la presión dinámica; si una de ellas con mayor velocidad y densidad, y con $B_z(IMF) > 0$ enfrenta a la magnetosfera, ésta es comprimida; la corriente en la magnetopausa, que equilibra la presión del viento solar respecto del campo geomagnético, se incrementa entonces. En observatorios de latitudes bajas, medias y subaurorales los magnetogramas registran esta compresión como un súbito crecimiento (sc) de la componente norte (X) y horizontal (H) del campo geomagnético. La región de la anomalía magnética del Atlántico Sur (SAMA) es un sumidero de las partículas cargadas que se encuentran atrapadas en el cinturón de radiación interior, tanto durante períodos quietos como perturbados. De la precipitación de estas partículas ocurrida sobre las regiones D y E de la ionosfera del SAMA durante una compresión magnetosférica resulta un mayor incremento de los sc a la noche, respecto del registrado en regiones exteriores a la SAMA. El objetivo de este trabajo es determinar si la amplitud de un súbito crecimiento (sc) del campo geomagnético en bajas latitudes de la superficie terrestre varía según la intensidad del campo magnético en ese lugar, en particular en la zona de la anomalía del Atlántico sur. Se propone entonces estudiar la respuesta geomagnética a diferentes variaciones de intensidad de la presión de viento solar que se producen a distintas horas en observatorios de bajas latitudes, siendo uno de ellos Vassouras (VSS), en el SAMA. Se encuentra que la amplitud de los sc dependen de diferentes factores: la presión y la variación de la velocidad del viento solar, la época del año, la hora local, y posiblemente el estado previo de la magnetosfera o el sentido de campo magnético interplanetario; sin embargo la amplitud de los sc registrados en VSS suele ser en general superior a la de observatorios equivalentes a él por latitud geomagnética o inclinación: i) VSS nunca tiene la variación mínima debida al comienzo súbito; ii) VSS en general alcanza la mayor amplitud de sc entre los observatorios considerados, excepto entre la medianoche y el amanecer, cuando suelen registrarse las mínimas amplitudes normalizadas según la variación de la presión dinámica del viento solar.

Palabras claves: Anomalía geomagnética del Atlántico sur; compresión magnetosférica; crecimiento súbito del campo geomagnético

ABSTRACT

The magnetosphere is compressed when a bubble of solar wind (enhancement of velocity, density and temperature) impinges on it: the current at the magnetopause, that balances this pressure over the geomagnetic field, is increased. The observatories at low, middle and subauroral latitudes record a sudden increase (sc) of the north (X) and horizontal (H) components of the geomagnetic field. The South Atlantic magnetic anomaly (SAMA) is a sink of trapped particles at the radiation belt during both quiet and disturbed periods. The precipitation of these particles on the D and E regions of the SAMA ionosphere during a magnetospheric compression give rise there to a higher enhancement of the sc at night in relation with others recorded at external regions. The goal of this paper is to determine if the sc amplitude at low latitudes depends of the geomagnetic field at the place, especially at the SAMA. Then, it was studied the geomagnetic response to different variations of the dynamic pressure of the solar wind produced at low latitudes. It is found that the amplitude of the sc's not only depends on the pressure of the solar wind, but

also on the temporal variation of the solar velocity, the epoch of the year, the local time, and possibly the previous state of the geomagnetic field perturbation or the direction of the interplanetary magnetic field. Nevertheless, the amplitude of the sc recorded at VSS observatory (at the SAMA) currently is higher to those recorded at equivalent observatories by latitude or inclination: i) VSS have not the smallest variation due to a sc; ii) VSS generally records the highest amplitude among the selected observatories that are outside the SAMA, except if it is located between the midnight and the dawn (when smallest variations are recorded).

Keywords: South Atlantic magnetic anomaly; magnetospheric compression; sudden increase of the geomagnetic field.

INTRODUCCIÓN

El campo magnético terrestre es producido principalmente por corrientes generadas en el núcleo externo de la tierra (campo principal). Su registro en la superficie del planeta muestra que es más intenso (≈ 60000 nT) en las proximidades de los polos geográficos que en la región ecuatorial (≈ 30000 nT). El desarrollo en armónicos esféricos evidencia que el 90 % de su intensidad corresponde al campo generado por un dipolo. Sin embargo tiene una notable asimetría cilíndrica pues su intensidad en el Atlántico sur es mucho menor que la que corresponde a esa latitud en otras longitudes (Tabla 1). Esa anomalía magnética del Atlántico sur (SAMA, por sus siglas en inglés) es causada también por procesos en el interior del planeta, y se superponen otras anomalías regionales.

El centro de la anomalía puede establecerse como i) el punto espejo del dipolo excéntrico en el desarrollo del campo geomagnético en armónicos esféricos; ii) el centro del mínimo local del campo geomagnético a una altura fija en la región del Atlántico sur, iii) el centro del flujo máximo de partículas en la región (Grigoryan *et al.*, 2008); según el modelo, su ubicación varía; la región de la SAMA ocupa el área entre el SE de Brasil y Sudáfrica; el mínimo registrado $B \approx 22900$ nT en 26°S , 54°O condice con el IGRF (2000). La velocidad de deriva (variación secular) de la región de la SAMA (hacia el O-NO) también depende del modelo; algunos autores (Pinto y González, 1989) sostienen que en un período de 1200 años habrá dado la vuelta al mundo; pero la variación secular se registra en la región americana-africana, no en la región pacífica (Gubbins y Gibbons, 2004). Otros autores sostienen que la subducción de la placa de Nazca limitaría esta deriva (Bloxham *et al.*, 1989).

Tabla 1. Observatorios considerados, código IAGA, coordenadas, inclinación aproximada I, intensidad aproximada B, y tiempo local (TL) según el tiempo universal (TU)

Observatorio	Código IAGA	Lat. geog.(°)	Long. geog.(°)	Lat. geom.(°)	Incl. I (°)	B (nT)	T.L.
Vassouras	VSS	-22	-44	-17	-35	23400	TU-3h
Kakadu	KDU	-13	+132	-22	-40	46400	TU+8h48min
Kourou	KOU	+5	-53	+15	18	29600	TU-3h31min

El sol emite partículas (viento solar) que confinan el campo magnético de la tierra (magnetosfera) que adquiere una forma similar a un cometa: la nariz magnetosférica enfrenta al sol. El campo gravitatorio de la tierra mantiene una atmósfera gaseosa; el sol también emite radiación que es absorbida por estos gases, que resultan ionizados a partir de alturas superiores a los 80 km (ionosfera). Los iones y electrones ionosféricos se mueven arrastrados por los vientos de partículas neutras a alturas de la región E ionosférica (variaciones tranquilas Sq); también alrededor de las líneas del campo magnético entre los puntos espejo de los dos hemisferios (partículas atrapadas en la plasmasfera) y derivan hacia el oeste debido a la curvatura e inhomogeneidad de las líneas del campo magnético (corriente anillo).

Cuando la componente perpendicular a la eclíptica del campo magnético del viento solar ($B_z(\text{IMF})$) tiene el mismo sentido que la del campo magnético de la tierra en la nariz magnetosférica, las partículas del viento solar pueden ingresar a la magnetosfera en las proximidades de los polos (magnetosfera cerrada). Si una burbuja de viento solar (mayor velocidad, densidad y temperatura) con un cambio significativo en la presión dinámica del viento solar enfrenta la magnetosfera y $B_z(\text{IMF}) > 0$, la magnetosfera es comprimida: la corriente en la magnetopausa, que equilibra esta presión del viento solar respecto del campo geomagnético, se incrementa; circula del amanecer al atardecer del lado diurno (corrientes de Chapman-Ferraro). En un modelo sencillo (Parks, 1998) la corriente de Chapman-Ferraro depende linealmente, de la presión dinámica del viento solar y del cambio temporal de la componente de la velocidad perpendicular a la magnetopausa; cuando esa burbuja de viento solar cambia la orientación del campo magnético ($B_z(\text{IMF}) < 0$) se inicia una tormenta; durante una tormenta magnética puede producirse también una súbita compresión magnetosférica.

En observatorios de latitudes bajas, medias y subaurorales los magnetogramas registran, durante esta generalmente brusca compresión, un súbito crecimiento (sc) de la componente norte (X) y horizontal (H) del campo geomagnético; este incremento es identificado como el impulso principal (MI: main impulse) (Sastri *et al.*, 2006). Las amplitudes de los sc(H) son aproximadamente proporcionales a la raíz cuadrada del cambio en la presión dinámica del viento solar (Siscoe *et al.*, 1968; Ogilvie *et al.*, 1968). Si el sc es previo a la tormenta se denomina ssc (sudden storm commencement). En la región ecuatorial la manifestación debida a la compresión es más compleja (Sastri *et al.*, 2006).

En bajas latitudes geomagnéticas existe una corriente ionosférica diurna: el electrochorro ecuatorial en el ecuador de inclinación (inclinación $I=0$) (Duncan, 1960), hacia el este, debida al incremento de la conductividad, la cual magnifica la amplitud de un sc. La región de la anomalía magnética del Atlántico Sur es un sumidero de partículas cargadas atrapadas en el cinturón de radiación interior, tanto durante períodos quietos como perturbados (Dessler, 1969; Roederer 1970, 1972). La precipitación de estas partículas ocurrida sobre las regiones D y E de la ionosfera del SAMA durante una compresión magnetosférica da lugar al incremento de las amplitudes de los súbitos crecimientos en la componente H de las variaciones geomagnéticas allí a la noche (Trivedi *et al.*, 2005a), respecto del registrado en regiones exteriores a la SAMA. Los resultados parecen mostrar que estos incrementos del sc(H) pueden ser producidos por un incremento diferencial de ionización debido a la pérdida continua de electrones e iones de la magnetosfera hacia la región de la SAMA (Trivedi *et al.*, 2005b).

Se ha encontrado que existe asimetría en las variaciones geomagnéticas registradas durante una tormenta en latitudes medias y bajas durante las subtormentas, pues durante la fase de expansión existiría una pérdida de partículas de la plasmasfera entre la medianoche y el amanecer, y ganancia antes de la medianoche (Van Zele, 2006). El objetivo de este trabajo es determinar si la amplitud de un súbito crecimiento (sc) del campo geomagnético en bajas latitudes de la superficie terrestre varía según la intensidad del campo magnético en el lugar, en particular en la zona de la anomalía del Atlántico sur. Se propone entonces estudiar la respuesta geomagnética a diferentes intensidades del flujo de presión de viento solar que se producen a distintas horas en observatorios de bajas latitudes.

LOS DATOS

Para el estudio propuesto se utilizan las 3 componentes del campo geomagnético registradas en el observatorio Vassouras ubicado en la SAMA; en Kakadu separado unos 180° en longitud, también en el hemisferio sur; Kourou, conjugado respecto de Vassouras, en el hemisferio norte, exterior a la SAMA. Los datos (cada minuto) han sido extraídos del Centro de datos de Kyoto (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/>). Las coordenadas se indican en la Tabla 1; se muestra que ninguno de los observatorios considerados se encuentra en las vecindades del ecuador de inclinación ($\text{lat.dip} \neq 0^\circ$) de modo de que los registros no están afectados por el electrochorro ecuatorial, y que el observatorio Vassouras se encuentra próximo al mínimo de intensidad del campo magnético terrestre (SAMA).

Los crecimientos súbitos (sc) considerados están denunciados en los boletines mensuales del Service International des Indices Géomagnétiques (<http://www.cetp.ipsl.fr/>) o son detectados en las variaciones de la presión dinámica del viento solar por NASA (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). De entre los primeros sólo han sido considerados aquellos para los cuales existen datos de viento solar en las proximidades de la tierra, de modo que el inicio entre el incremento de la presión del viento solar (citado como Flow Pressure por NASA) y el sc sea menor que 15 minutos; se requirió además que el valor final de la presión supere los 5 nPa. Se han considerado sólo aquellas variaciones de presión cuyo incremento es súbito y el valor alcanzado se mantiene por unos minutos (un pulso único: sc1 a sc12), o, si bien decrece después del primer minuto, rápidamente recupera este valor (doble pulso: sc13 a sc16). Los 17 sc considerados se indican en la Tabla 2, junto con características del viento solar. Entre ellos Bz(IMF) es positivo o nulo, excepto para sc4 (Bz(IMF) = -8 nT) y sc7 y sc7*(Bz(IMF) ≈ -6 nT; los sc7 y 7* son sucesivos y no se consideran independientes). En las tablas 3-1 a 3-17 se muestra las amplitudes (dBi) del vector variación geomagnética registrada a partir del último minuto no alcanzado por la compresión (Xo, Yo, Zo), de modo que

$$dXi = Xi - Xo, \quad dYi = Yi - Yo, \quad dZi = Zi - Zo \quad \text{y} \quad dBi^2 = dXi^2 + dYi^2 + dZi^2.$$

Tabla 2: súbitos crecimientos (sc) seleccionados entre los declarados por el SIIG (como ssc) y asociados con un brusco incremento de presión del viento solar (dFl) si los inicios difieren en menos que 15 minutos: o detectados por un brusco incremento de la presión del viento solar (dFl); el valor final de la presión (Fl) alcanzado debe ser mayor que 5 nPa; hay 2 subconjuntos separados: de 1 pulso (sc1,...sc12), o dos pulsos (sc13...sc16). Las columnas indican: el número asignado para su identificación en este trabajo, la fecha y hora de inicio (TU) según se observa en los boletines del SIIG y/o la hora que en este trabajo se considera como inicio (entre paréntesis), la hora de inicio (TU) de la variación del flujo de presión del viento solar, el valor inicial y final (en nPa), la duración del incremento (en min), la velocidad inicial y final del viento solar en la dirección sol-tierra (v_x (IMF, en km/seg) y la duración de este incremento (en min), y la velocidad inicial y final este-oeste del viento solar (v_y (IMF), en km/seg).

No.	Fecha	h.in.sc	h.in.Fl	Fl. nPa	dt min	v_x (IMF) km/s	dt min	v_y (IMF) km/s
sc1	4-9-06	0:20 (0:19)	0:20	3→14	1	-410→-445	1	-10→-30
sc2	11-9-05	1:14	1:17	4→22	2	-760→-1030	2	-50→-150
sc3	24-8-05	6:13	6:09	3→13	1	-460→-545	1	-35→-40
sc4	4-11-03	6:25	6:24	3→15	1	-530→-750	1	≈ 60
sc5	15-9-05	9:04 (9:03)	8:55	1→11	2	-520→-580	2	-20 →-60
sc6	9-1-05	10:41 (10:40)	10:38	3→10	2	≈ -450	1	≈ -16
sc7	7-1-05	(14:09)	14:05	4→6	1	≈ -545	1	-20→0
sc7*	7-1-05	(14:53)	14:53	4→8	1	≈ -545	1	≈ -7
sc8	2-9-05	14:19	14:18	3→6	1	-445→-520	1	-42 →-75
sc9	18-12-06	16:36	16:35	2→9	2	-448→-436	2	10→-35
sc10	16-6-05	(17:35)	17:35	3→10	4	-620→-640	2	55→15

sc11	7-11-04	18:27	18:27	6→23	3	-490 → -660	1	40→0
sc12	21-1-05	(18:44)	18:44	20→65	2	-920→ -900	2	120→70
sc13	15-11-03	5:50	5:54	3→10	1	-630→ -720	1	-45→-65
sc14	6-5-05	13:07 (13:06)	13:08	2→6	1	-357→ -379	1	-26→-35
sc15	9-9-05	14:01 (14:00)	13:59	3→21	1	-350 → -480	1	-20→-85
sc16	9-11-04	(18:49)	18:56	8→26	1	-620 → -750	1	-30→-55

Los valores en negrita en las Tablas 3 indican los valores considerados como máximos debidos a la compresión súbita. No se ha realizado ninguna corrección por variación diurna dado los pocos minutos considerados.

Tabla 3-1. módulo del vector variación geomagnética respecto de los valores de cada componente (dB_i) a las 0:19 TU del 4 de setiembre de 2006 (sc1), para los 6 primeros minutos: el intervalo previo es tranquilo; la segunda columna indica el intervalo horario en tiempo local (TL) en que se produce la compresión: el valor en negrita destaca el primer máximo alcanzado. VSS registra la mayor amplitud; excepto VSS, KOU, en la pre-medianoche, registra la mayor amplitud.

Obs.	TL (sc1)	dB ₁	dB ₂	dB ₃	dB ₄	dB ₅	dB ₆
VSS	[21,22]	3	11	19	24	26	25
KDU	[9,10]	4	8	12	14	16	17
KOU	[20,21]	2	8	14	20	22	22

Tabla 3-2. ídem para la 1:13 TU del 11 de setiembre de 2005 (sc2): el intervalo previo es perturbado. Los observatorios ubicados entre la tarde y la medianoche (VSS y KOU) registran mayor amplitud que el ubicado entre el amanecer y el mediodía; VSS registra la mayor amplitud; excepto VSS, KOU, en la pre-medianoche, registra la mayor amplitud.

Obs.	TL(sc2)	ΔB ₁	ΔB ₂	ΔB ₃	ΔB ₄	ΔB ₅	ΔB ₁₆
VSS	[22,23]	11	74	77	71	76	73
KDU	[10,11]	18	8	18	20	19	23
KOU	[21,22]	11	63	65	60	64	64

Tabla 3-3. ídem para las 6:13 TU del 24 de agosto de 2005 (sc3); el intervalo previo es tranquilo. VSS (en la pos-medianoche, en invierno) registra la misma amplitud que KDU (de día, en invierno). KOU en la pos-medianoche registra la menor amplitud.

Obs.	TL(sc3)	ΔB ₁	ΔB ₂	ΔB ₃	ΔB ₄	ΔB ₅	ΔB ₆
VSS	[3,4]	4	18	25	30	29	29
KDU	[15,16]	2	19	27	31	31	32
KOU	[2,3]	3	14	21	25	26	26

Tabla 3-4. ídem para las 6:25 TU del 4 de noviembre de 2003 (sc4); el intervalo previo es tranquilo. KOU, después de la medianoche, registra la menor amplitud.

Obs.	TL(sc4)	ΔB_1	ΔB_2	ΔB_3	ΔB_4	ΔB_5	ΔB_6
VSS	[3,4]	4	41	53	52	50	48
KDU	[15,16]	3	44	64	67	67	62
KOU	[2,3]	2	6	35	43	42	42

Tabla 3-5. ídem para las 9:03 TU del 15 de setiembre de 2005 (sc5); el intervalo previo es algo perturbado. La compresión sucede próxima al equinoccio, los observatorios ubicados a la mañana o a la tarde alcanzan una amplitud similar.

Obs.	TL(sc5)	ΔB_1	ΔB_2	ΔB_3	ΔB_4	ΔB_5	ΔB_6
VSS	[6,7]	2	14	22	23	20	16
KDU	[17,18]	1	12	21	22	18	13
KOU	[5,6]	2	12	19	20	18	17

Tabla 3-6. ídem para las 10:40 TU del 9 de enero de 2005 (sc6); el intervalo previo es tranquilo. La compresión sucede próxima al solsticio de diciembre (verano austral). VSS registra la mayor amplitud.

Obs.	TL(sc6)	ΔB_1	ΔB_2	ΔB_3	ΔB_4	ΔB_5	ΔB_6
VSS	[7,8]	3	8	13	22	29	31
KDU	[19,20]	3	8	13	18	22	22
KOU	[7,8]	1	6	11	16	19	21

Tabla 3-7. ídem para las 14:09 TU del 7 de enero de 2005 (sc7); el intervalo previo es tranquilo. La compresión sucede próxima al solsticio del verano austral; en los observatorios australes (VSS y KDU) la amplitud registrada es mayor en el boreal; la compresión es mínima ($\Delta F_1 = 2$ nPa). VSS registra la mayor amplitud.

Obs.	TL(sc7)	ΔB_1	ΔB_2	ΔB_3	ΔB_4	ΔB_5	ΔB_6
VSS	[11,12]	6	11	13	12	13	11
KDU	[23,24]	3	5	7	7	7	8
KOU	[10,11]	3	6	5	4	5	4

Tabla 3-7*. ídem para las 14:53 TU del 7 de enero de 2005 (sc7*); el intervalo previo es perturbado. La compresión sucede próxima al solsticio del verano austral; las amplitudes registradas en los observatorios australes (VSS y KDU) son mayores que la del boreal. VSS registra la mayor amplitud; excepto VSS, KDU, en la pre-medianoche, registra la mayor amplitud.

Obs.	TL(sc7*)	ΔB_1	ΔB_2	ΔB_3	ΔB_4	ΔB_5	ΔB_6
VSS	[11,12]	7	17	23	27	27	22
KDU	[23,24]	3	9	15	20	20	19
KOU	[11,12]	6	11	13	13	13	13

Tabla 3-8. ídem para las 14:19 TU del 2 de setiembre de 2005 (sc8); el intervalo previo es algo perturbado. La compresión sucede próxima al equinoccio; VSS registra la mayor amplitud; excepto VSS, KOU, en la pre-medianoche, registra la mayor amplitud.

Obs.	TL(sc8)	ΔB_1	ΔB_2	ΔB_3	ΔB_4	ΔB_5	ΔB_6
VSS	[11,12]	7	7	15	22	27	31
KDU	[23,24]	3	10	16	20	23	23
KOU	[10,11]	6	7	13	18	20	23

Tabla 3-9. ídem para las 16:36 TU del 18 de diciembre de 2006 (sc9); el intervalo previo es tranquilo. VSS registra la mayor amplitud.

Obs.	TL(sc9)	ΔB_1	ΔB_2	ΔB_3	ΔB_4	ΔB_5	ΔB_6	ΔB_7
VSS	[13,14]	2	5	8	17	28	35	37
KDU	[1,2]	0	2	5	10	17	23	24
KOU	[13,14]	1	4	6	13	18	20	21

Tabla 3-10. ídem para las 17:35 TU del 16 de junio de 2005 (sc10); el intervalo previo es algo perturbado. VSS registra la mayor amplitud; KDU, en la pos-medianoche, registra la menor amplitud.

Obs.	TL(sc10)	ΔB_1	ΔB_2	ΔB_3	ΔB_4	ΔB_5	ΔB_6	ΔB_7
VSS	[14,15]	2	3	8	19	26	33	32
KDU	[2,3]	1	1	4	9	15	20	21
KOU	[14,15]	2	2	7	19	25	30	30

Tabla 3-11. ídem para las 18:27 TU del 7 de noviembre de 2004 (sc11); el intervalo previo es algo perturbado. La compresión sucede entre el equinoccio y el solsticio de verano austral. VSS registra la mayor amplitud; KDU, en la pos-medianoche, registra la menor amplitud.

Obs.	TL(sc11)	ΔB_1	ΔB_2	ΔB_3	ΔB_4	ΔB_5	ΔB_6
VSS	[15,16]	36	79	61	77	69	65
KDU	[3,4]	23	42	45	46	44	45
KOU	[14,15]	36	47	34	54	48	49

Tabla 3- 12. ídem para las 18:27 TU del 7 de noviembre de 2004 (sc11); el intervalo previo es algo perturbado. La compresión sucede entre el equinoccio y el solsticio de verano austral. VSS registra la mayor amplitud; KDU, en la pos-medianoche, registra la menor amplitud.

Obs.	TL(sc12)	ΔB_1	ΔB_2	ΔB_3	ΔB_4	ΔB_5	ΔB_6
VSS	[15,16]	10	38	76	92	96	94
KDU	[3,4]	7	14	39	51	53	46
KOU	[15,16]	4	43	71	76	77	69

Tabla 3-13. ídem para las 5:50 TU del 15 de noviembre de 2003 (sc13); el intervalo previo es algo perturbado. La compresión sucede entre el equinoccio y el solsticio de verano austral. VSS registra la mayor amplitud; KOU, en la pos-medianoche, registra la menor amplitud.

Obs.	TL(sc13)	ΔB_1	ΔB_2	ΔB_3	ΔB_4	ΔB_5	ΔB_6
VSS	[2,3]	6	27	39	36	32	34
KDU	[14,15]	7	21	31	33	33	32
KOU	[2,3]	1	4	18	26	25	23

Tabla 3-14. ídem para las 13:06 TU del 6 de mayo de 2005 (sc14); el intervalo previo es tranquilo. La compresión sucede entre el equinoccio y el solsticio de invierno austral. VSS registra la mayor amplitud. KDU en la pre-medianoche registra la menor amplitud

Obs.	TL(sc14)	ΔB_1	ΔB_2	ΔB_3	ΔB_4	ΔB_5	ΔB_6
VSS	[10,11]	1	7	11	14	18	20
KDU	[21,22]	1	2	5	8	10	10
KOU	[9,10]	2	6	10	13	16	17

Tabla 3-15. ídem para las 14:00 TU del 9 de setiembre de 2005(sc15); el intervalo previo es tranquilo. VSS registra la mayor amplitud.

Obs.	TL(sc15)	ΔB_1	ΔB_2	ΔB_3	ΔB_4	ΔB_5	ΔB_6
VSS	[11,12]	9	26	48	61	62	60
KDU	[22,23]	2	23	42	51	50	48
KOU	[9,10]	8	23	44	50	49	47

Tabla 3-16. ídem para las 18:49 TU del 9 de noviembre de 2004 (sc16); el intervalo previo es perturbado. VSS registra la mayor amplitud. KDU en la pos-medianoche sólo registra la menor amplitud en el primer minuto del sc.

Obs.	TL(sc16)	ΔB_1	ΔB_2	ΔB_3	ΔB_4	ΔB_5	ΔB_6
VSS	[15,16]	46	75	62	57	56	54
KDU	[3,4]	19	52	48	40	38	39
KOU	[15,16]	43	48	37	40	41	41

En la Figura 1a) se han graficado, para el intervalo [0,1] TU, variaciones del viento solar (V_x , V_y y de presión, comparar con Tabla 2) correspondientes a sc1, y en la Figura 1b) los valores de dBi calculados para los observatorios VSS, KDU y KOU (Tabla 3-1); se observa que el intervalo previo es geomagnéticamente tranquilo; en estos casos el error de dBi ≈ 1 nT; los observatorios VSS y KOU se encuentran entre el atardecer y la medianoche, KDU a la mañana; VSS registra la mayor amplitud.

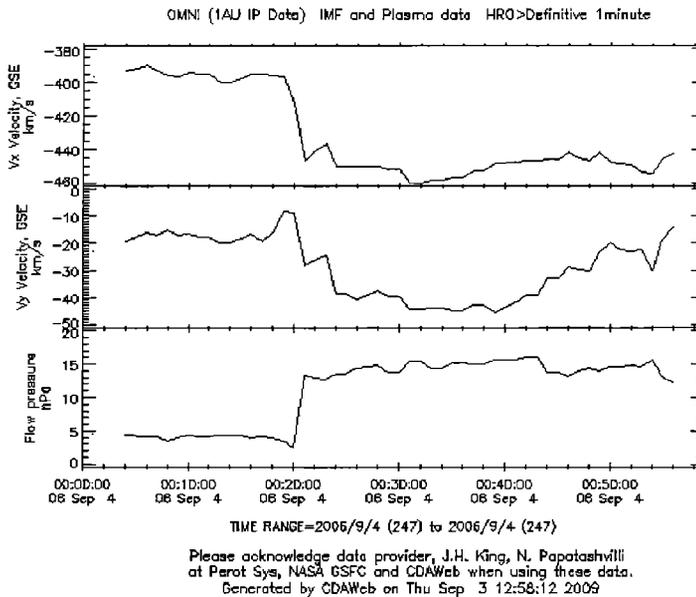


Figura 1. a) componentes de la velocidad en la dirección tierra-sol (V_x) y este-oeste (V_y), y flujo de presión del viento solar en [0,1] TU del 4 de setiembre de 2006,

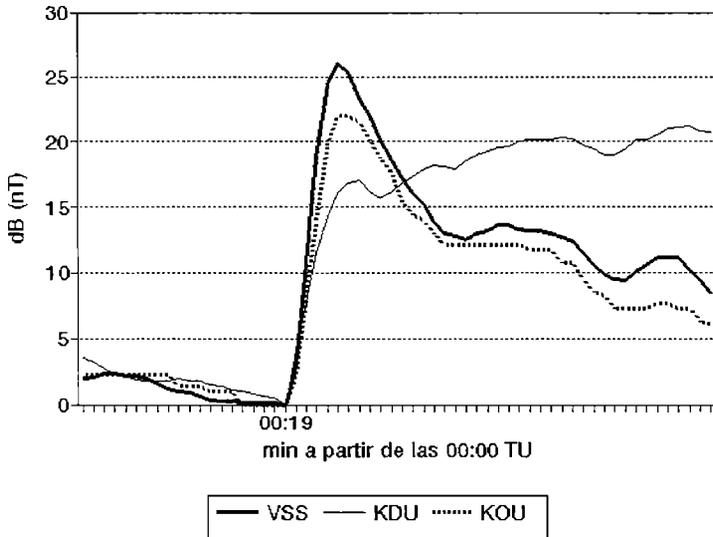


Figura 1. b) variación geomagnética dB en [0,1) TU del 4 de setiembre de 2006. La mayor amplitud corresponde a VSS en [21,22) TL.

En la Figura 2 se han graficado los máximos alcanzados por dB (Máx.dB, en nT, en negrita en las Tablas 3) en cada observatorio en función de la variación del flujo de presión de viento solar (dFI, en nPa). Puede observarse una dependencia entre ellos, que se aproxima a la esperada: $dB \approx a (dFI)^{1/2}$. Además puede suponerse que depende de la variación de velocidad del viento solar en la dirección perpendicular a la magnetopausa (como sucede con la corriente de Chapman Ferraro), de la hora del día y la estación del año. Puede observarse que los valores máximos de dB corresponden a VSS, excepto para sc4.

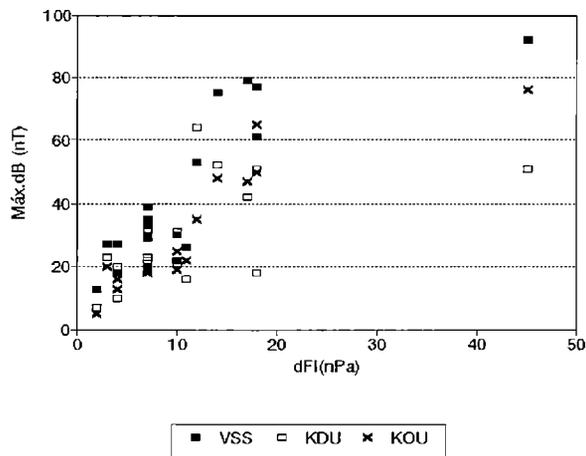


Figura 2. máximos de dB_i (nT) en cada observatorio correspondientes a los 17 sc considerados (tomados de las Tablas 3-1 a 3-17), en función de dFI (nPa) calculado a partir de los valores inicial y final del flujo (tomados de la Tabla2). En orden creciente de dFI los Máx.dB graficados son sucesivamente: sc7, 8, 14, 7*, 13, 6, 9, 10, 3, 5, 1, 4, 16, 11, 2, 15, 12.

En la Figura 3 se ha graficado la máxima variación del sc normalizada (Máx.dB, en negrita en las Tablas 3) según la intensidad de la presión del viento solar (dFl, en Tabla 2) que lo produce:

$$dBn = \text{Máx.dB}/(dFl)^{1/2}$$

para cada observatorio, según la hora (TU) en que se produce. De esta forma se busca independizar la intensidad alcanzada por el sc de la intensidad de la presión, indicando la eficiencia en la compresión en el súbito crecimiento de la variación geomagnética.

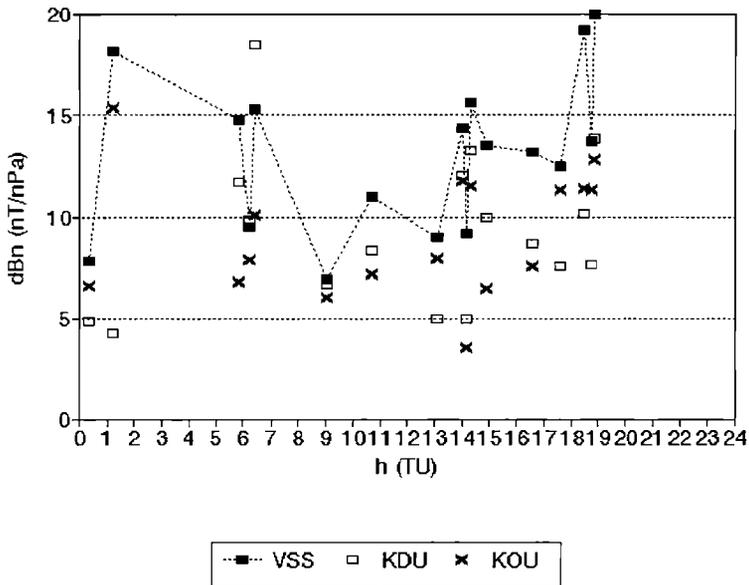


Figura 3. Máxima variación del sc normalizada (dBn), en función del tiempo universal, la sucesión está ordenada como: sc1, sc2, sc13, sc3, sc4, sc5, sc6, sc14, sc15, sc7, sc8, sc7*, sc9, sc10, sc11, sc12 y sc16. Puede observarse que el MáxdBn corresponde a VSS, excepto para sc3 (antes del amanecer, en invierno) y sc4 (antes del amanecer)

En la Fig.4 se han graficado $r(VSS/KOU) = dBn(VSS)/dBn(KOU)$ en función del día del año; resulta siempre mayor que 1, pero próximo a 1 (mínimo) en el invierno del sur y máximo en días de verano austral.

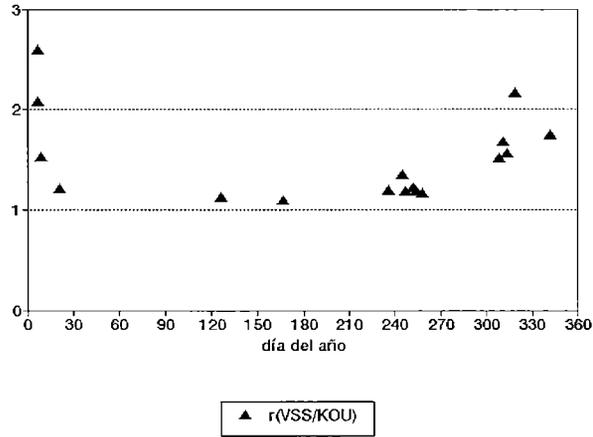


Figura 4. razón $r(VSS/KOU) = dBn(VSS)/dBn(KOU)$ (observatorios de longitud semejante), en función del día del año (contados de 1 a 365). La sucesión es: sc7, sc7*, sc6, sc12, sc14, sc10, sc3, sc8, sc1, sc15, sc2, sc5, sc4, sc11, sc16, sc13 y sc9. Nótese que $r(VSS/KOU) > 1$, es decir que la amplitud dBn en VSS (en la SAMA) supera siempre la de KOU, pero esta razón se incrementa en los meses correspondientes al verano (para los sc 13, 7 y 7* $r(VSS/KOU) > 2$).

En la Fig.5 se ha graficado la máxima amplitud normalizada por intensidad de presión del viento solar (dBn) para cada observatorio en función de la aceleración media del viento solar en la dirección sol-tierra (dVx/dt).

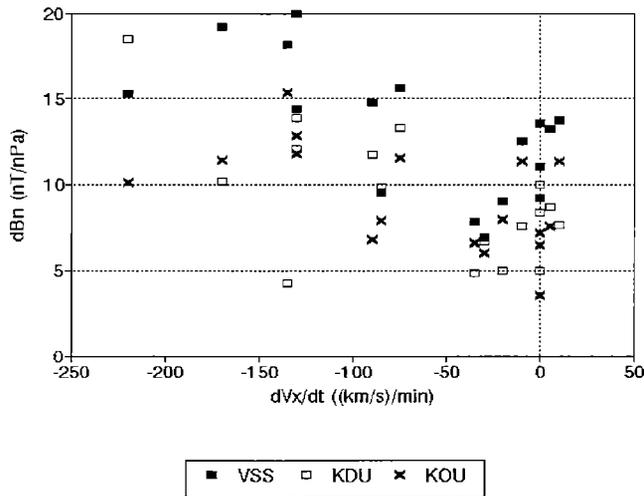


Figura 5. amplitud normalizada por intensidad de variación de flujo (dBn) para cada observatorio en función de la variación de la aceleración media del viento solar en la dirección sol-tierra. Los sc, por orden creciente de aceleración son: sc4, sc11, sc2, sc16, sc15, sc13, sc3, sc8, sc1, sc5, sc14, sc10, sc6, sc7, sc7*, sc9, sc12. Los sc11 y sc16 (en noviembre, después de mediodía y con $dVx < 0$) presentan los dBn más grandes. sc4 muestra mayor amplitud normalizada (dBn) en KDU que es un observatorio que se encuentran del lado diurno.

DISCUSIÓN

i) de la Figura 2 y de la Tabla 3 se desprende que la intensidad de variación de campo magnético resultante de una compresión depende de la intensidad de la variación del flujo de presión de viento solar sobre la magnetosfera;

ii) de la Figura 3 se desprende que, los observatorios registran mínimos de dBn después de medianoche y antes del amanecer, y máximos de dBn antes de la medianoche, aunque ello no es notable en VSS. Los valores de dBn son máximos para VSS, excepto para sc4 para el que $\text{dBn(KDU)} > \text{dBn(VSS)}$ (VSS en [3, 4] TL y con intenso decremento de $V_y < 0$). En sc2, en setiembre, $\text{dBn(VSS)} \gg \text{dBn(KDU)}$, cuando VSS se encuentra antes de la medianoche y KDU antes de mediodía, debido a la fuerte variación de $V_y \ll 0$. En todos los casos $\text{dBn(VSS)} > \text{dBn(KOU)}$. En [3, 4] TU es medianoche en KOU; puede observarse que antes de la medianoche $\text{dBn(KOU)} > \text{dBn(KDU)}$ y después de la medianoche (en [4, 7] TU) la relación se invierte. Análogamente, en [15, 16] TU es medianoche en KDU, antes de la medianoche $\text{dBn(KDU)} > \text{dBn(KOU)}$, mientras que después de la medianoche la relación se invierte.

iii) de la Figura 4 se desprende que dBn(VSS) (en la SAMA) supera siempre a dBn(KOU) , pero esta razón se incrementa en los meses del verano austral.

iv) en la Figura 5 se comparan tres sc que suceden en el después de mediodía: sc12 (enero, $d\text{Fl} = 45$ nPa, $\text{dB(VSS)} = 92$ nT, $dV_x/dt = 10$ (km/s)/min) con $\text{dBn(VSS)} = 14$ nT/nPa; sc11 (noviembre, $d\text{Fl} = 17$ nPa, $\text{dB(VSS)} = 79$ nT, $dV_x/dt = -170$ (km/s)/min) con $\text{dBn(VSS)} = 19$ nT/nPa; y sc16 (noviembre, $d\text{Fl} = 14$ nPa, $\text{dB(VSS)} = 75$ nT, $dV_x/dt = -130$ (km/s)/min) con $\text{dB(VSS)} = 20$ nT/nPa. Los 2 últimos son comparables; sc12 presenta en VSS la menor amplitud de dBn debido, posiblemente, a la mínima variación de la velocidad del viento solar (V_x). Si se comparan análogamente sc1 y sc2 la diferencia puede asignarse también a la diferencia de velocidad del viento solar.

v) no se observan en estos casos estudiados una dependencia del sentido de $B_z(\text{IMF})$, ni del grado de perturbación previo de la magnetosfera

vi) no hay una relación evidente entre el tiempo en que se produce la variación de presión del viento solar y el tiempo que demora el sc en alcanzar el Máx.dB

CONCLUSIONES

Una compresión magnetosférica registrada por observatorios en bajas latitudes entre la medianoche y el amanecer ([3, 4] TL), da lugar al decremento de las amplitudes de los súbitos crecimientos de las variaciones geomagnéticas (dBn). Sin embargo, en la SAMA, tal relación no se observa claramente. Entre los observatorios considerados, equivalentes en latitud o inclinación, i) VSS nunca tiene la variación mínima debida al comienzo súbito; ii) VSS en general alcanza la máxima amplitud de sc, excepto entre la medianoche y el amanecer, cuando suelen registrarse las mínimas amplitudes normalizadas dBn.

Excluyendo VSS, i) los observatorios suelen alcanzar valores máximos de dBn en la pre-medianoche (sc1, sc2, sc7*, sc8); ii) los mínimos en la pos-medianoche (sc3, sc4, sc10, sc11, sc12, sc13). Por otra parte, sc14 muestra el mínimo en KDU en [21, 22] TL (mayo), sc15 no muestra un máximo en KDU en [22, 23] TL (setiembre), y sc16 registra un mínimo dB(KDU) en [3,4]TL (noviembre) sólo en el primer minuto; estas 3 excepciones corresponden a compresiones de 2 pulsos pero de ello no puede inferirse que existe un comportamiento diferente si el sc es el resultado de 1 o 2 pulsos de compresión magnetosférica. Parece apreciarse para los sc una asimetría en la variación diaria similar a la hallada durante la fase de expansión de subtormentas en las tormentas magnéticas: pérdida de partículas plasmáticas (e ionosféricas) en la pos-medianoche e incremento antes de la medianoche.

La amplitud de los sc dependen de diferentes factores: de la presión y la variación de velocidad del viento solar, de la época del año, la hora local, y posiblemente el estado previo de la magnetosfera; sin

embargo la amplitud de los sc registrados en VSS (en la SAMA) suele ser en general superior a la de observatorios equivalentes a él por latitud geomagnética o inclinación. Ello pone en evidencia que la respuesta del campo magnético de la tierra a la compresión del viento solar está también sujeta a procesos que ocurren en el interior de la tierra.

Agradecimientos. La autora agradece al Centro de Datos Geomagnéticos de Kyoto (Japón), al Goddard Space Flight Center de NASA (EEUU) y al Service International des indices géomagnétiques (Francia); al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, y al Dto. de Cs Geológicas de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (Argentina).

REFERENCIAS

- Bloxham J., D.Gubbins and A.Jackson, 1989. Geomagnetic Secular Variation. *Phil. Trans. of the Roy. Soc. of London, series A, Mathemat. And Phys. Sc.*, 39 (1606): 415-502.
- Dabas R.S., Lakha Sing, S.C.Garg, Rupesh M.Das, K.Sharma, V.K.Vohra, 2006. Growth and decay of a post-sunset equatorial anomaly at low latitudes: Control of ExB, neutral winds and daytime electrojet strength. *Jour. Atmosph. Solar Terr. Phys.*, 68: 1622-1632.
- Dessler A.J., 1969. Effect of magnetic anomaly on particle radiation trapped in geomagnetic field. *Jour.Geoph.Res.*, 64: 713-719.
- Duncan R.A., 1960. The equatorial F-region of the ionosphere. *Jour. Atmos.Terr. Phys.*, 18: 89-100.
- Grigoryan O.R., V.V.Romashova and A.N.Petrov; 2008. SAA drift: Experimental results. *Advances in space Research*, 41: 76-80.
- Gubbins D. y S.J.Gibbons, 2004. Low Pacific secular variation, en *Timescales of the paleomagnetic field*, ed. por J.E.T.Channell, D.V.Kent, W.Lowrie y G.G.Meert. *Geoph.Monog. Series*, 145, 279-286.
- Ogilvie K.W., L.F.Burlaga, T.D.Wilkinson, 1968. Plasma observations on explorer 34. *Jour. Geoph. Res.*, 73: 6809-6815.
- Parks, G.K., 1998. *Physics of space plasma, an introduction*. Addison-Wesley Publishing Co., USA. pp 538.
- Pinto jr, O. and W.D.González, 1989. South Atlantic magnetic anomaly – SAMA; for how long?, *EOS* 70 (January 10).
- Roederer J.G., 1970. *Dynamics of geomagnetically trapped radiation*. Springer-Verlag, New York.
- Roederer J.G., 1972. Geomagnetic field distortions and their effects on radiation belt particles. *Rev.Geoph.*, 10: 599-630.
- Sastri J.H., K.Yumoto, J.V.S.V.Rao and R.Rubbiah, 2006. On the nature of response of dayside equatorial geomagnetic H-field to sudden magnetospheric compressions. *Jour. Atmosph. Solar Terr. Phys.*, 69: 1642-1652.
- Siscoe G.L., V.Formisano, A.J.Lazarus, 1968. A calibration of the magnetopause. *Jour. Geoph.Res.*, 73: 4869-4875.
- Su Y.Z., G.J.Bailey, K.I.Oyama, N.Balan, 1997. A modeling study of the longitudinal variations in the north-south asymmetries of the ionospheric equatorial anomaly. *Jour. Atmos.Solar Terres.Phy.*, 59 (11): 1299-1310.
- Trivedi N.B., B.M.Pahan, N.J.Schuch, M.Barreto and L.G.Dutra, 2005a. Geomagnetic phenomena in the South Atlantic anomaly region in Brazil. *Advances in Space Research*, 36: 2021-2024.
- Trivedi N.B., M.A.Abdu, B.M.Pathan, S.L.G.Dutra, N.J.Schuch, J.C.Santos and L.M.Barreto, 2005b. *Journal of Atmosph. and Solar Terr. Phy.*, 67: 1751-1760.
- Van Zele M.A., 2006. La asimetría de las variaciones geomagnéticas de tormenta registradas en latitudes bajas y medias. *GEOACTA*, 31: 141-152.