

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE CORRIENTES EQUIVALENTES SQ PRODUCIDO POR LA LLEGADA DEL PRIMER FRENTE DE CHOQUE DE UNA TORMENTA GEOMAGNÉTICA G5

ANALYSIS OF THE EQUIVALENT CURRENTS SYSTEM SQ BEHAVIOUR PRODUCED BY THE FIRST SHOCK FRONT ARRIVAL FROM A G5 GEOMAGNETIC STORM

P. A. Sallago^{*1}

¹Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas – Universidad Nacional De La Plata Paseo del Bosque s/n – (1900) La Plata – Prov. Buenos Aires – Argentina

Recibido: 31/12/2024 ; Aceptado: 06/08/2025

La tormenta geomagnética que tuvo lugar entre los días 10 y 12 de mayo de 2024, compuesta por varias eyecciones de masa coronal, es una de las más intensas de este siglo, alcanzando niveles G4 a G5 en la escala de clasificación de NOAA. Debido a que las eyecciones tienen velocidades supersónicas, provocan una onda de choque. Al arribar al entorno de la Tierra éstas producen variaciones significativas en el campo geomagnético. En el presente trabajo se analiza la perturbación del sistema de corrientes ionosféricas equivalentes debido a la llegada de la primera onda de choque, utilizando los registros de diez estaciones geomagnéticas permanentes. Con el fin de proporcionar una posible interpretación de las relaciones que podrían establecerse durante la primera hora posterior a la llegada de la onda de choque, se postula un modelo de vinculación entre los diferentes sistemas de corrientes equivalentes y los diferentes índices geomagnéticos que los representan.

Palabras Clave: corrientes ionosféricas, corrientes magnetosféricas, geomagnetismo.

The geomagnetic storm that occurred between May 10 and 12, 2024, composed of several coronal mass ejections, is one of the most intense of this century, reaching levels G4 to G5 on the NOAA classification scale. Since the ejecta have supersonic speeds, they cause a shock wave. Upon reaching the terrestrial environment, it produces significant variations in the geomagnetic field. In the present paper it is analyzed the perturbation of the system of equivalent ionospheric currents due to the arrival of the first shock wave, using the records of ten permanent geomagnetic stations. In order to provide a possible interpretation of the relationships that could be established during the first hour after the arrival of the shock wave, the linking model among the different systems of equivalent currents and the different geomagnetic indices that represent them, is postulated.

Keywords: ionospheric currents, magnetospheric currents, geomagnetism.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2025.36.3.63>



ISSN - 1850-1168 (online)

I. INTRODUCCIÓN

Desde el siglo 19 se han descripto las manifestaciones del “Sol activo” que tienen impacto sobre la tecnología [1], dando lugar al desarrollo de la disciplina de la climatología espacial. Ésta se dedica a analizar y modelar los procesos que tienen lugar en el Sol, para comprender y pronosticar sus efectos en el entorno terrestre ya que pueden resultar perjudiciales para la tecnología electrónica ubicada en el espacio o en superficie. Los flares, las eyecciones de masa coronal (CMEs, por su sigla en inglés), o los streamers pueden desencadenar el desarrollo de fenómenos que afectan al entorno magnético terrestre. Los frentes de choque que anteceden al arribo de las CMEs y de las regiones rotantes (CIRs), interactuando primero con la onda de choque estacionaria terrestre, comprimiendo la magnetósfera, dan lugar a variaciones significativas del campo geomagnético. En un trabajo anterior [2] se mostró que, entre otros tipos de perturbaciones, los frentes de ondas de choque de CMEs no geoeffectivas y las discontinuidades de Alfvén son posibles fuentes de subtormentas aisladas, bajo ciertas condiciones.

Por otra parte, la compresión magnetosférica causa en los registros de la componente horizontal H un “salto” en los valores. Éstos reciben el nombre de comienzo brusco (SC). Sus efectos no deseados son las corrientes inducidas en el terreno o en conductores en la superficie (GIC), producidas por corrientes repentinas e intensas que fluyen en los plasmas [3]. Existen catálogos de SCs que pueden consultarse en <https://www.obsebre.es/en/variations/rapid>. De acuerdo con Lazzús y Salfate [4] (2024), la región solar activa Número 13664 produjo varios flares y lanzó varias CMEs el día 8 de Mayo de 2024. El primer frente de onda de choque detectado en L1, llegó a la magnetósfera a las 17:05 hs TU del 10 de Mayo, comprimiendo la magnetósfera en 5 radios terrestres aproximadamente, de acuerdo con los datos brindados por Omniweb (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/>). Este se convirtió en el comienzo de la tormenta geomagnética más intensa desde el año 2003 [5]. Se debe remarcar que los datos desplazados a la nariz de la onda de choque estacionaria de la Tierra (BSN) pueden contener errores en el tiempo de desplazamiento del orden de 20 minutos y en el cálculo de las distancias, del orden de los 600km [6].

pato@fcaglp.unlp.edu.ar

La actividad geomagnética puede caracterizarse mediante el empleo de distintos índices. SML, SMU y SME, caracterizan a los sistemas de corrientes ionosféricas equivalentes de la zona auroral del hemisferio norte, representando los electrojets al oeste, al este y actividad auroral general, respectivamente. Dst, SYMH, ASYH, SMR son indicadores de la actividad de la corriente anillo, mientras que PCS (índice de actividad polar sur, calculado a partir de los registros de la estación Vostok, situada en el continente antártico), se asocia con contribuciones de la corriente de la cola de la magnetósfera. Los índices de actividad geomagnética SYMH, ASYH, Dst y PCS provienen de la página del ISGI (<http://isgi.unistra.fr/>). Los índices de actividad SML, SMU, SME y SMR provienen de la página de SuperMag (<https://supermag.jhuapl.edu/>). Aunque se supone que el índice Dst estaría bien correlacionado con la densidad de energía de la corriente anillo interior (durante las fases principales y de recuperación de una tormenta geomagnética) [7], varios estudios sugieren que el índice Dst contiene contribuciones de otras corrientes además de la corriente del anillo “azimutalmente simétrica” [8, 9]. Para ponderar la proporción de las contribuciones relativas de los diferentes sistemas de corrientes al índice Dst, Kalegaev et al. (2005) [10] calcularon las contribuciones de las corrientes de anillo, cola de la magnetósfera y de Chapman-Ferraro utilizando modelos. Encontraron evidencias de una contribución significativa de la corriente de la cola de la magnetósfera al índice Dst, comparable a la contribución de la corriente de anillo durante tormentas moderadas, mientras que la corriente anillo se convierte en la principal fuente de Dst durante tormentas intensas. Además, Fukushima y Kamide (1973) [11] demostraron que la contribución a la asimetría de la componente H proviene principalmente de las corrientes alineadas con el campo. Shi et al. (2008) [12] demostraron que la asimetría que se desarrolla durante el aumento de la presión dinámica del viento solar es el resultado del efecto combinado de las corrientes alineadas con el campo de las regiones 1 y 2 (zona polar y auroral), las corrientes anillo “parciales” y las corrientes de Chapman-Ferraro. Dubyagin et al (2014) [13] encontraron que los sistemas de corrientes ionosféricas contribuyen menos del 17 % para SYM-H y menos del 40 % para ASYH, siendo las contribuciones relevantes la de los sistemas de corrientes que se cierran vía la ionósfera (como son la corriente anillo parcial y las corrientes alineadas con el campo de las regiones 1 y 2). También deben tenerse en cuenta las corrientes ionosféricas interhemisféricas alineadas con el campo (IHFAC) que puede darse entre puntos conjugados. Por otra parte, se sabe que la dinámica ionosférica del “lado diurno” está controlada por la interacción el campo magnético interplanetario (IMF) y el terrestre, mientras que la dinámica del “lado nocturno” depende principalmente de la actividad de la cola de la magnetósfera. Sin embargo, la actividad de la cola de la magnetósfera produce efectos sobre la dinámica ionosférica del “lado diurno” [14]. Elhawary et al. (2023) [15] sugirieron que este vínculo se produciría vía propagación de ondas magnetohidrodinámicas como mecanismo fundamental de la comunicación de los cambios entre la magnetósfera y la ionósfera. Es importante remarcar que las posibles contri-

buciones en los contenidos de un índice por otros sistemas de corrientes ha sido estudiado por los autores anteriormente mencionados, para las fases principal y de recuperación de tormentas geomagnéticas. Debe tenerse en cuenta que así como sucede con el índice Dst, el índice SMR es susceptible de contener contribuciones debidas al sistema de corrientes de la cola de la magnetósfera, esto puede ponderarse por ejemplo, mediante el estudio de la vinculación con el índice PCS [16]. Como es bien conocido, el sistema de corrientes ionosféricas no se puede determinar a partir del análisis de datos de estaciones geomagnéticas solamente. Debido a esto se usa definir un sistema de corrientes bidimensional equivalente que fluye en una capa esférica delgada situada supuestamente a 110 km de altura. Una forma de evaluar las corrientes equivalentes es suponer una hoja de corriente horizontal en la ionósfera [17]. Se debe recordar que la suposición de la corriente horizontal para las corrientes de los días calmos (Sq) tiene un límite de validez relacionado con su extensión [18]. Para estudiar los sistemas de corrientes equivalentes superficiales ionosféricas hay que tener presente que en los registros de los días calmos se tendrán superpuestas las contribuciones magnetosféricas, ionosféricas e inducidas en la corteza por las variaciones anteriormente mencionadas. Distintos autores proponen diferentes tipos de correcciones a los datos registrados cuando analizan las variaciones Sq con el fin de eliminar las contribuciones debidas a efectos magnetosféricos.[19, 20]. En un trabajo anterior Sallago (2022) [16] propuso un método utilizando el índice de la corriente anillo SMR [21, 22]. Las variaciones registradas en las estaciones presentan contribuciones debidas a corrientes inducidas en el terreno que pueden estimarse como un tercio para las corrientes horizontales. Siguiendo el método de Stening (2005) [17], las corrientes al Norte (X) y al Este (Y) se estiman aproximadamente como:

$$KE = \frac{2}{3} \frac{10}{2\pi} \Delta X \sim \Delta X \quad (1)$$

$$KN = -\frac{2}{3} \frac{10}{2\pi} \Delta Y \sim -\Delta Y \quad (2)$$

donde KE y KN son las densidades de corriente al Este en [mA/m], respectivamente [18]. Donde ΔX , ΔY se calculan restando al dato registrado y corregido, el valor de referencia nocturno.

En el caso de un día perturbado resulta complejo intentar reproducir un sistema de corrientes de estas características utilizando observaciones pues los datos contienen los efectos de las perturbaciones de las corrientes magnetosféricas e ionosféricas. En este trabajo se busca mejorar la comprensión de las interacciones con la onda de choque y la evolución de la respuesta de los sistemas de corrientes. Se analiza el comportamiento de las corrientes equivalentes por el arribo de la primera onda de choque correspondiente a la tormenta de los días 10 y 11 de mayo de 2024 y la posible interrelación con otros sistemas de corrientes. Primero se analiza el comportamiento del sistema de corrientes ionosféricas equivalentes para un día calmo. Luego, se analiza el momento del registro de la onda de choque, el salto en nT y su duración en cada una de las estaciones. Se calcula un sistema de corrientes equivalentes perturbado,

utilizando los registros del día de la tormenta sustrayendo los valores correspondientes al comportamiento en tiempo calmo. Luego se postula un modelo de interacción con los distintos sistemas de corrientes equivalentes, mediante su relación con distintos índices geomagnéticos, con el fin de brindar una posible interpretación de las relaciones que pudieran establecer. Finalmente se concluye que en el período de interés se distinguen dos intervalos de distinto comportamiento. En todas las estaciones durante los primeros minutos se mantiene el sentido de circulación en la evolución temporal similar al día calmo y, en los últimos treinta minutos, se invierte el sentido excepto en PIL y SJG. Los efectos del SC presentan diferentes aspectos dependiendo de la ubicación de las estaciones. En los intervalos entre las 17-17:30hs TU y 17:30-18hs TU las perturbaciones resultantes “apuntan” en distintas direcciones, evidenciando contribuciones diferentes. Se las analiza proponiendo un modelo de “focos virtuales” para las perturbaciones. También se analiza la presencia de las corrientes ionosféricas IH-FAC que se dan entre PIL y SJG. Se concluye que éste es un método adecuado para explicar las perturbaciones del sistema de corrientes ionosféricas equivalentes debido al SC.

II. MÉTODOS

Selección de estaciones y cálculo de las corrientes para el día calmo

Las estaciones seleccionadas de la red Intermagnet (www.intermagnet.org) son Islas Argentinas (AIA), Centro Espacial Stenis (BSL), Huancayo (HUA), Isla de Pascua (IPM), Ottawa (OTT), Pilar (PIL), San Juan de Puerto Rico (SJG), Tatuoca (TTB) y Vassouras (VSS). De la red EMBra-ce se tomó Río Grande (RGA). En la Tabla 1 se muestran las coordenadas geográficas de dichas estaciones.

Ref.	estación	latitud	longitud
1	AIA	65,2 S	64,2 W
2	BSL	30,3 N	89,6 W
3	HUA	12,0 S	35,3 W
4	IPM	27,2 S	109,4 W
5	OTT	45,4 N	75,5 W
6	PIL	31,7 S	63,9 W
7	RGA	53,8 S	67,7 W
8	SJG	18,1 N	66,1 W
9	TTB	1,2 S	48,5 W
10	VSS	22,4 S	43,6 W

TABLA 1: Estaciones- código IAGA y coordenadas

Para proceder a realizar las correcciones magnetosféricas se sigue la metodología aplicada por Sallago (2022) 16 para la corrección por corrientes magnetosféricas, para conocer el comportamiento de las corrientes en un día calmo. El listado de los días internacionalmente calmos y perturbados se tomaron de la página del WDC de Japón (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>). El día calmo utilizado para realizar la corrección por corrientes magnetosféricas es el 29 de abril excepto para la estación IPM donde se usó el día 11. Se corrige por corrientes magnetosféricas las componentes que presentan coeficiente de correlación de Pear-

son (lag cero) con el índice Dst alto (ver Tabla 2). En rojo se señalan las componentes sobre las que deben realizarse las correcciones. Para esto se realiza el ajuste lineal de la componente a corregir con el índice SMR. Se resta al valor medido, el valor ajustado y se comprueba

componente	Componente R(componente, Dst)
AIAX	0,02
AIAY	0,59
BSLX	0,86
BSLY	-0,54
HUAX	0,36
HUAY	0,08
IPMX	0,7
IPMY	0,25
PILX	0,53
PILY	0,3
RGAX	0,12
RGAY	0,45
SJGX	0,58
SJGY	-0,36
TTBX	0,43
TTBY	-0,27
OTTX	0,11
OTTY	-0,52
VSSX	0,30
VSSY	-0,10

TABLA 2: Evaluación de las componentes para la corrección magnetosférica

que ha perdido la contribución por corrientes magnetosféricas (ver Tabla 3).

componente	Ajuste lineal	Coef. R (componente corregida, Dst)
AIAY	$F = 5380 + 0,67 \text{ SMR}$	0,19
BSLX	$F = 23827,8 + \text{SMR}$	0,41
BSLY	$F = -658,43 - 1,46 \text{ SMR}$	-0,21
IPMX	$F = 26606,9 + 2,28 \text{ SMR}$	-0,28
PILX	$F = 18153,2 + 0,93 \text{ SMR}$	-0,08
SJGX	$F = 26359,5 + 2,97 \text{ SMR}$	-0,28
OTTY	$F = -4224,9 - 1,84 \text{ SMR}$	-0,07

TABLA 3: Corrección de las componentes

A continuación, se procede al cálculo de los valores de las corrientes superficiales equivalentes. De acuerdo con las expresiones mostradas anteriormente (ecuaciones (1) y (2)) se calcularon las corrientes superficiales equivalentes Norte y Este. A continuación se presentan los gráficos correspondientes a estas componentes calculadas para las estaciones en la Fig. 1.

Evolución temporal de la densidad superficial del sistema de corrientes equivalentes norte KN versus este KE para el día calmo:

Siguiendo a Stening (2005) [17] se calculan para la fecha la latitud del foco norte y sur, resultando 30,4° y -40,0° aproximadamente. Se observa la evolución temporal de la

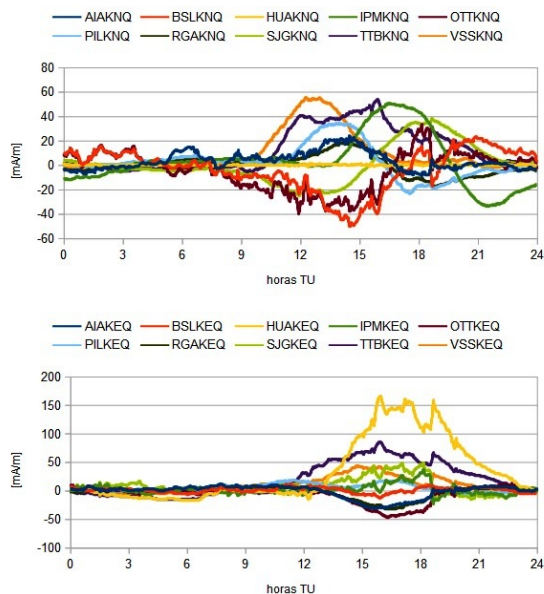


FIG. 1: Densidad superficial de corriente calculado para el día calmo Arriba/abajo se muestra la componente Norte/Este.

densidad superficial del sistema de corrientes ionosféricas equivalentes norte KN versus este KE para las estaciones en análisis. A continuación se presentan los gráficos correspondientes a la evolución temporal del sistema de corrientes equivalentes para cada estación durante el día calmo, para poder observar a simple vista, se divide el día en cuatro intervalos de 6 horas (Fig. 2). Cada intervalo es representado por un trazo de distinto color: de 0-6hs en trazo azul, de 6-12hs en trazo naranja, de 12-18hs en trazo amarillo y de 18-24hs en trazo verde. Puede verse que el giro resulta horario para OTT y BSL por encontrarse al norte del “foco Q norte” y antihorario para SJG, por encontrarse al sur. Para TTB y VSS se observa giro horario por encontrarse al norte del “foco Q sur”, mientras que para PIL e IPM la mayor parte del tiempo es horario, pasando a antihorario al “cruzar” hacia el sur. Para AIA y RGA el giro resulta antihorario por encontrarse al sur del “foco Q sur”.

III. ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DEL SC

Como se mencionó anteriormente, el primer frente de onda de choque detectado en L1, llegó a la magnetósfera a las 17:05 hs TU del 10 de Mayo. Se debe recordar que los datos desplazados a la BSN pueden contener errores en el tiempo de desplazamiento del orden de 20 minutos y en el cálculo de las distancias del orden de los 600 km. Primero se procede a analizar el momento del registro de la onda de choque con los datos del viento solar y se compara con el momento de registro del arribo de la onda de choque, el salto en nT (SC) y su duración en cada una de las estaciones. (ver Tabla 4 y Fig. 3). El arribo de la onda de choque se produce durante el día para nueve de las diez estaciones seleccionadas. Solamente en AIA se produce durante la noche.

Los valores máximos del salto se observan en HUA y TTB. Puede verse que existen discrepancias entre los valores observados para SJG con la componente X y los tabulados por el observatorio del Ebro calculados con la componente H (duración 2 minutos, salto 49,5 nT). En la Fig.

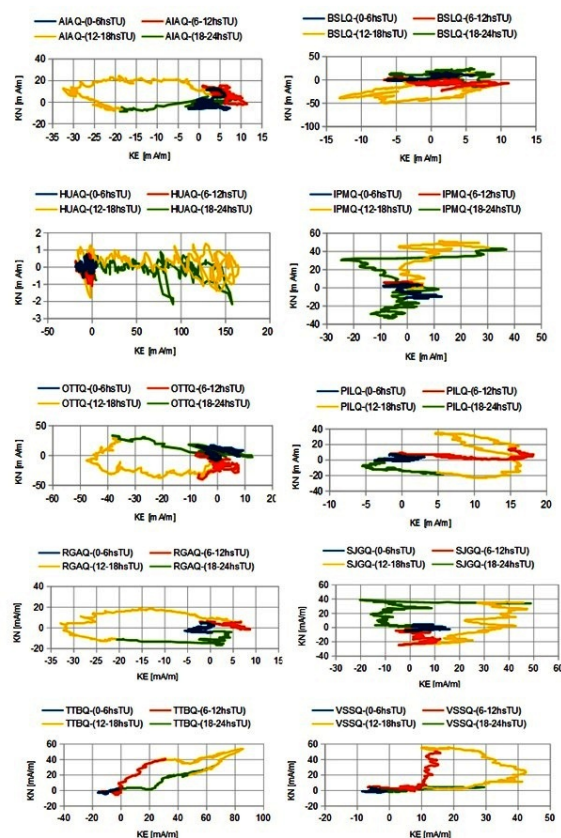


FIG. 2: Evolución temporal de la densidad superficial de corriente calculado para el día calmo en las diez estaciones.

3, la leyenda “delta” que acompaña al nombre de la estación y a la inscripción XD significa que se muestra el valor de la componente X para el día perturbado (D) al que se le ha restado el valor medido con anterioridad al registro del SC. Para estudiar la perturbación del sistema de corrientes se propone un modelo: se calcula un sistema de corrientes equivalentes perturbado utilizando los registros del día de la tormenta sustrayendo los valores correspondientes al comportamiento en tiempo calmo. A estas corrientes se las denomina KND y KED, en forma similar a las que se estudian para los días calmos. Se grafica la evolución temporal de la densidad superficial del sistema de corrientes equivalentes perturbadas. La misma se realiza tomando valores instantáneos cada diez minutos entre las 17 y las 18hs TU del 10 de Mayo. Se observa que en este período se distinguen dos intervalos de distinto comportamiento (ver Fig. 4). Tanto el comportamiento para el día calmo entre las 14 y las 18 hs como para el 10 de Mayo entre las 17 y 18hs TU se resume en la Tabla 5. La letra “a” indica giro antihorario mientras que la letra “h” indica giro horario. En todas las estaciones durante los primeros minutos se mantiene el sentido de circulación en la evolución temporal similar al día calmo, y en los últimos treinta minutos, se invierte el sentido excepto en PIL y SJG.

En lo que sigue del trabajo se analizan los datos en dos intervalos que resultan definidos por observación del comportamiento promedio en las estaciones. Los dos intervalos resultan ser: el “Intervalo 1” compuesto por los 30 minutos iniciales y el “Intervalo 2”, por los 30 minutos finales.

Estación	Tiempo de arribo TU	Duración [minutos]	Salto [nT]
IBI IMF	17:03 (17,05 h)	2	18,1
AIAX	17:05 (17,08 h)	1	23
BLSX	17:05 (17,08 h)	3	43,6
HUAX	17:06 (17,1 h)	3	217,3
IPMX	17:05 (17,08 h)	2	50,1
SIGX	17:05 (17,08 h)	3	42,3
OTTX	17:06 (17,1 h)	1	36,3
PILX	17:05 (17,08 h)	2	77,6
RGAX	17:05 (17,08 h)	1	36,8
TTBX	17:06 (17,1 h)	3	128,3
VSSX	17:06 (17,1 h)	1	87,3

TABLA 4: Comparación del tiempo de arribo del frente de choque y salto en las estaciones

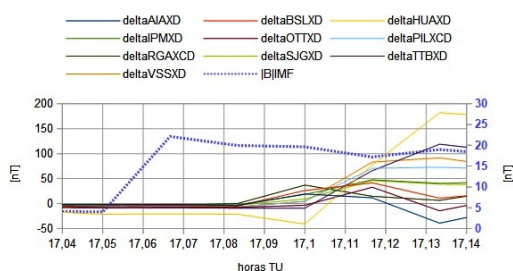


FIG. 3: Comparación temporal de la llegada del SC y su efecto en los registros de las estaciones (componente X).

En la Fig. 5 pueden verse los valores de las series de datos correspondientes a los índices de actividad en el intervalo de interés. Es importante recordar que los índices PCS, SML, SMU, SME, SYM-H, ASY-H y SMR tienen intervalo de resolución de un minuto, mientras que el índice Dst tiene resolución de una hora. Se analizan los coeficientes de correlación entre los índices para los intervalos 1 y 2 (Tablas 6 y 7).

Se encuentra que en el intervalo de interés, una hora posterior al registro del SC, la corriente anillo representada por SMR, está más ligada a la parte asimétrica que a la simétrica en el intervalo 1. Los coeficientes de correlación respectivos toman los valores $R(\text{SMR}, \text{ASY-H}) = 0,8$ y $R(\text{SMR}, \text{SYM-H}) = 0,75$. En el intervalo 2, la importancia de las relaciones se invierten, los valores de los coeficientes resultan $R(\text{SMR}, \text{ASY-H}) = 0,81$ y $R(\text{SMR}, \text{SYM-H}) = 0,86$.

Por otra parte, durante el intervalo 1 SMR tiene fuer-

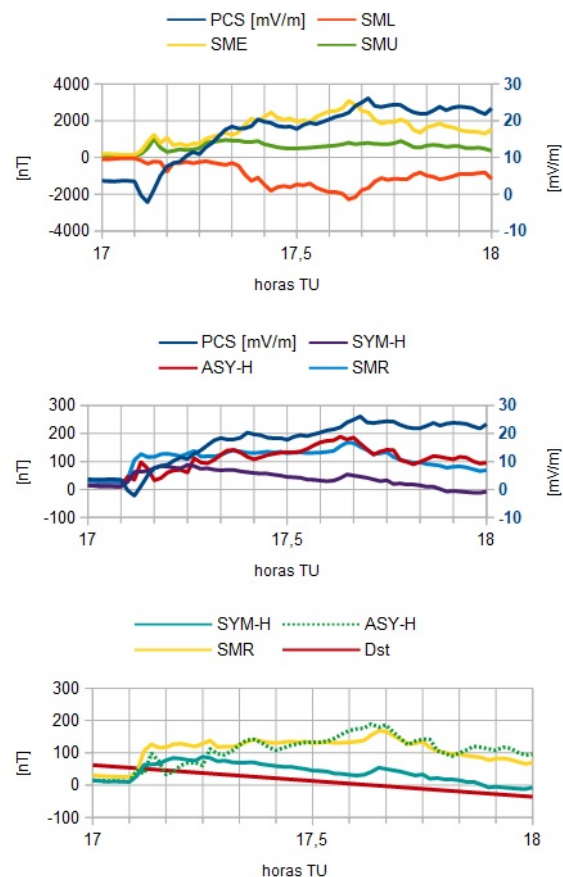


FIG. 5: Valores de los índices PCS, SML, SMU, SME, SMR, SYM-H, ASY-H y Dst entre las 17 y 18hs TU del 10 de Mayo.

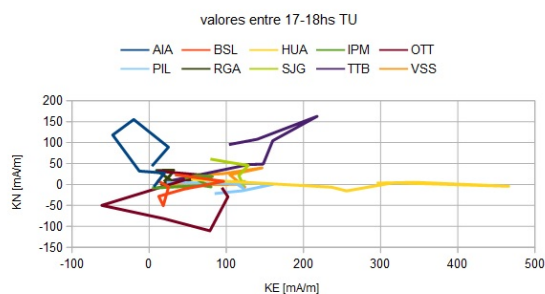


FIG. 4: Evolución temporal de la densidad superficial de corriente en el intervalo entre las 17 y 18hs TU del 10 de Mayo.

Ref	Estación	DíaQ (14-18hs TU)	DíaD (17-18hs TU)		
			Comportamiento Tipo 1	Transición	Comportamiento Tipo 2
1	AIA	a	a 10m	-	h
2	BSL	h	h 20m	-	a
3	HUA	al este	h 20m	10m	a
4	IPM	h	h 20m	10m	a
5	OTT	h	h 20m	-	a
6	PIL	h	h 20m	10m	h
7	RGA	a	a 10m	20m	h
8	SJG	a	a 10m	20m	a
9	TTB	h	h 20m	10m	a
10	VSS	h	h 20m	10m	a

TABLA 5: Comparación del comportamiento de la evolución temporal de KN y KE

Coef. R	PCS	SML	SMU	SYM-H	ASY-H	SMR
PCS		-0,84	0,65	0,46	0,86	0,81
SML	-0,84		-0,54	-0,1	-0,79	-0,56
SMU	0,65	-0,54		0,69	0,83	0,75
SYM-H	0,46	-0,1	0,69		0,54	0,75
ASY-H	0,86	-0,79	0,83	0,54		0,8
SMR	0,81	-0,56	0,78	0,75	0,8	

TABLA 6: Coeficiente de correlación entre los índices en el intervalo 1

te relación con el sistema de corrientes de la cola de la magnetósfera representado por PCS, el valor del coeficiente de correlación es el máximo de los obtenidos con todos los índices: $R(\text{SMR}, \text{PCS}) = 0,81$. En cuanto a su relación con los electrojets aurales “vistos” como en el hemisferio norte, en el intervalo 1 se encuentra más relacionada con el electrojet al este que al oeste: $R(\text{SMR}, \text{SMU}) = 0,78$ y $R(\text{SMR}, \text{SML}) = -0,56$. En el intervalo 2, la importancia de las relaciones se invierten, los valores de los coeficientes resultan $R(\text{SMR}, \text{SMU}) = 0,59$ y $R(\text{SMR}, \text{SML}) = 0,92$. Las corrientes de los electrojets aurales “vistos” como en el hemisferio norte y el sistema de corrientes de la cola de la magnetósfera se encuentran relacionados. En el intervalo 1 resulta mayor la relación con el electrojet al oeste: $R(\text{PCS}, \text{SML}) = -0,84$ y $R(\text{PCS}, \text{SMU}) = 0,65$. En el intervalo 2, solamente con el electrojet al este, $R(\text{PCS}, \text{SMU}) = 0,5$. En cuanto a la relación entre las partes simétrica y asimétrica de la corriente anillo con los electrojets aurales, pensando en que las vinculaciones se producen vía las partes horizontales de las corrientes alineadas con el campo, puede verse que:

- la parte simétrica se vincula con el electrojet al este en el intervalo 1: $R(\text{SYM-H}, \text{SMU}) = 0,69$; con el electrojet al oeste en el intervalo 2: $R(\text{SYM-H}, \text{SML}) = 0,92$ y no se relaciona con la corriente de la cola de la magnetósfera.
- para la parte asimétrica la relación es mayor con el electrojet al este en el intervalo 1, resultando $R(\text{ASY-H}, \text{SMU}) = 0,83$ y $R(\text{ASY-H}, \text{SML}) = -0,79$. Por otra parte, en el intervalo 2, la relación es mayor con el electrojet al oeste: $R(\text{ASY-H}, \text{SMU}) = 0,55$ y $R(\text{ASY-H}, \text{SML}) = 0,71$.

Coef. R	PCS	SML	SMU	SYM-H	ASY-H	SMR
PCS		-0,41	0,5	-0,21	-0,03	-0,48
SML	-0,41		0,38	0,92	0,71	0,92
SMU	0,5	0,38		0,49	0,55	0,59
SYM-H	-0,21	0,92	0,49		0,75	0,86
ASY-H	-0,03	0,71	0,55	0,75		0,81
SMR	-0,48	0,92	0,59	0,86	0,81	

TABLA 7: Coeficiente de correlación entre los índices en el intervalo 2

Posteriormente se procede al estudio las correlaciones de los distintos índices de actividad geomagnética con las componentes de las densidades superficiales de corrientes equivalentes KE y KN. Estas presentan los siguientes valores para el coeficiente de correlación Pearson en el intervalo entre las 17 y 18hs TU, se muestran en las Tablas 8 y 9 y Fig. 6.

Estación KE	PCS		SML		SMU		SMY-H		ASY-H		SMR	
	11	12	11	12	11	12	11	12	11	12	11	12
AIA	-0,65	0,62	0,77	-0,41	-0,43	0,21	0	-0,33	-0,73	-0,56	-0,44	-0,39
BSL	-0,28	0,32	0,61	0,26	0,02	0,34	0,63	0,38	-0,27	-0,14	0,24	0,23
HUA	0,83	0,56	-0,62	0,44	0,74	0,78	0,74	0,66	0,88	0,62	0,96	0,75
IPM	0,7	0,14	-0,4	0,73	0,55	0,75	0,63	0,94	0,75	0,64	-0,05	-0,39
OTT	-0,36	0,75	0,45	-0,49	-0,55	0,18	0	-0,39	-0,43	-0,43	0,98	0,96
PIL	0,69	0,37	-0,39	0,69	0,77	0,76	0,94	0,8	-0,43	0,6	0,24	0,82
RGA	-0,15	0,59	0,47	0,01	0,11	0,56	0,62	0,17	-0,14	-0,13	0,24	0,12
SJG	0,66	-0,1	-0,36	0,9	0,72	0,57	0,94	0,98	0,72	0,77	0,98	0,96
TTB	0,79	0,12	-0,56	0,78	0,79	0,69	0,81	0,92	0,87	0,83	0,99	0,97
VSS	0,64	0,09	-0,36	0,81	0,79	0,66	0,96	0,94	0,75	0,76	0,98	0,95

TABLA 8: Coeficiente de correlación entre los índices y KE

Puede verse que, en este caso, los efectos del SC lucen diferente dependiendo de la ubicación de las estaciones. En el intervalo 1, los valores de corriente en AIA se relacionan con el electrojet al oeste; con variaciones de la corriente anillo simétrica BSL, HUA, IPM, PIL, RGA y VSS. Con variaciones en la corriente anillo asimétrica, OTT y TTB. En el intervalo 2, las corrientes en las estaciones IPM, OTT y SJG estarían vinculadas con la de la cola de la magnetósfera, en PIL y RGA con el electrojet al oeste y VSS con el electrojet al este. El resto con las componentes simétrica (AIA, SJG y TTB) y asimétrica de la

corriente anillo (BSL, HUA). Es importante recordar que las corrientes magnetosféricas se vinculan con la ionósfera mediante las corrientes alineadas con el campo. En la Figura 6 se muestra un esquema con las contribuciones debido a la corriente de la cola de la magnetósfera (PCS), electrojet auroral al oeste (como es “visto” en el hemisferio norte con SML) y la corriente anillo (SMR). El tamaño de las flechas es proporcional según la magnitud del coeficiente de correlación. Las flechas azules y rojas corresponden al intervalo 1 y 2 respectivamente. Para poder comparar con el estado

Estación KN	PCS		SML		SMU		SMY-H		ASY-H		SMR	
	11	12	11	12	11	12	11	12	11	12	11	12
AIA	0,74	0,05	-0,73	0,87	0,45	0,65	0,29	0,91	0,76	0,88	0,68	0,96
BSL	-0,77	0,09	0,75	-0,73	-0,7	-0,51	-0,45	-0,78	-0,69	-0,96	-0,8	-0,9
HUA	-0,67	-0,59	0,35	-0,11	-0,82	-0,46	-0,9	-0,37	-0,65	-0,25	-0,85	-0,43
IPM	0,66	0,75	-0,56	-0,25	0,31	0,51	0,31	-0,2	0,65	-0,19	0,63	-0,16
OTT	-0,74	0,26	0,79	-0,53	-0,67	-0,24	-0,36	-0,53	-0,87	-0,86	0,73	-0,68
PIL	-0,64	-0,52	0,54	0,93	-0,67	0,29	-0,48	0,87	-0,58	0,78	-0,46	0,84
RGA	0,54	-0,27	-0,59	0,92	0,33	0,46	0,26	0,92	0,6	0,86	0,62	0,93
SJG	0,52	0,78	-0,47	-0,76	-0,07	0,06	0,07	-0,65	0,39	-0,58	0,37	-0,6
TTB	0,8	0,47	-0,7	0,5	0,59	0,79	0,48	0,68	0,85	0,78	0,82	0,81
VSS	0,64	0,09	-0,51	0,49	0,07	0,8	0,02	0,64	0,48	0,78	0,39	0,77

TABLA 9: Coeficiente de correlación entre los índices y KN

sin perturbar se realizan los mismos cálculos en el intervalo 16:30-17hs (ver Tablas 10 y 11), el mismo se indica como intervalo 0 (I0) y con flechas negras.

Estación	PCS	SML	SMU	SMY-H	ASY-H	SMR
KE						
AIA	0,43	0,05	0,18	0,63	-0,44	0,52
BSL	0,28	0,12	0,04	0,88	-0,66	0,8
HUA	0,26	0,44	0,21	0,9	-0,74	0,89
IPM	-0,11	0,31	0,13	0,93	-0,55	0,94
OTT	0,15	0,24	0,09	0,49	-0,47	0,48
PIL	0,13	0,34	0,13	0,97	-0,72	0,96
RGA	0,28	0,37	0,3	0,82	-0,62	0,78
SJG	-0,44	0,2	-0,04	0,52	-0,25	0,62
TTB	0,03	0,54	0,2	0,91	-0,72	0,95
VSS	0,15	0,33	0,12	0,98	-0,73	0,95

TABLA 10: Coeficiente de correlación entre los índices y KE en I0

Estación KE	PCS	SML	SMU	SMY-H	ASY-H	SMR
AIA	0,11	0,18	-0,23	0,58	-0,65	0,59
BSL	0,42	-0,77	-0,34	-0,5	0,36	-0,63
HUA	0,32	-0,5	-0,41	0,16	-0,18	0,01
IPM	0,73	-0,3	-0,23	0,54	-0,57	0,38
OTT	0,36	-0,56	-0,25	-0,52	0,3	-0,6
PIL	-0,34	-0,27	-0,49	-0,31	0,14	-0,27
RGA	-0,25	0,17	-0,24	0,49	-0,44	0,53
SJG	0,52	-0,01	-0,02	0,83	-0,69	0,7
TTB	-0,04	0,68	-0,33	0,68	-0,59	0,78
VSS	-0,43	0,26	-0,18	0,64	-0,46	0,72

TABLA 11: Coeficiente de correlación entre los índices y KN en I0

Para analizar las IH-FAC entre las estaciones conjugadas PIL y SJG, se calculan los coeficientes de correlación entre

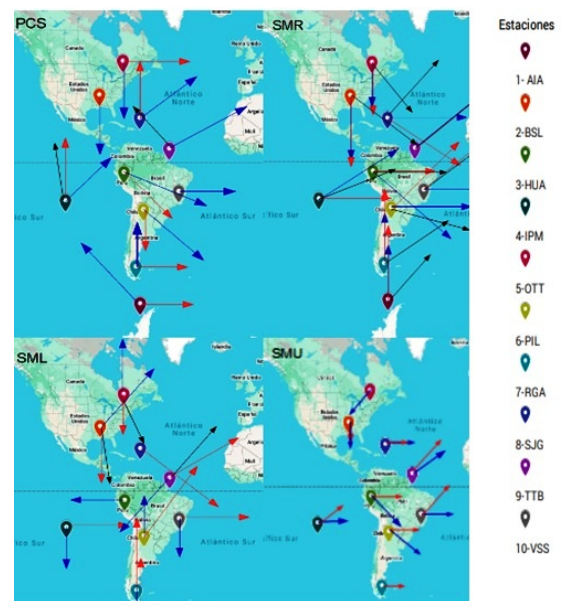


FIG. 6: Contribuciones de los distintos sistemas de corrientes a la perturbación del sistema de corrientes Sq. En negro se indican las contribuciones correspondientes a I0, en azul a I1, en rojo a I2. Mapa realizado desde <https://www.google.com.ar/maps>.

las componentes de las corrientes KN y KE, ver Tabla 12.

	SJGKN			SJGKE			PILN			PILKE		
	I0	I1	I2	I0	I1	I2	I0	I1	I2	I0	I1	I2
SJGKN							-0,42	0,18	-0,88	0,84	0,29	-0,88
SJGKE							-0,12	-0,48	0,81	0,51	0,99	0,85
PILKN	-0,42	0,18	-0,88	-0,12	-0,48	0,81						
PILKE	0,84	0,29	-0,88	0,51	0,99	0,85						

TABLA 12: COEFICIENTE DE CORRELACIÓN ENTRE KN Y KE EN PIL Y SGJ



FIG. 7: Resultantes de las perturbaciones de las contribuciones de los sistemas de corrientes en las estaciones. En negro se indican las contribuciones correspondientes a I0, en azul a I1, en rojo a I2. Mapa realizado desde <https://www.google.com.ar/maps>.

REFERENCIAS

- [1] W. B. Cade. The First Recorded Space Weather Impact? *Space Weather* **11**, 489-489 (sep. de 2013). ISSN: 1542-7390. <http://dx.doi.org/10.1002/swe.20091>.
- [2] H. Berezin, M. F. Montero, P. A. Sallago y C. M. Giordano. Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía. Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía **64** (2023). <http://www.astronomiaargentina.org.ar/b64/2023BAAA...64...11B.pdf>.
- [3] B. T. Tsurutani y R. Hajra. The Interplanetary and Magnetospheric causes of Geomagnetically Induced Currents (GICs) >10 A in the Mäntsälä Finland Pipeline: 1999 through 2019. *Journal of Space Weather and Space Climate* **11**, 23 (2021). ISSN: 2115-7251. <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2021001>.
- [4] J. Lazzús e I. Salfate. Report on the effects of the May 2024 Mother's day geomagnetic storm observed from Chile. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **261**, 106304 (ago. de 2024). ISSN: 1364-6826. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106304>.
- [5] M. Grandin, E. Bruus, V. E. Ledvina, N. Partamies, M. Barthelemy, C. Martinis, R. Dayton-Oxland, B. Gallardo-Lacourt, Y. Nishimura, K. Herlingshaw, N. Thomas, E. Karvinen, D. Lach, M. Spijkers y C. Bergstrand. The geomagnetic superstorm of 10 May 2024: Citizen science observations. (Jul. de 2024). <http://dx.doi.org/10.5194/egusphere-2024-2174>.
- [6] H. Hayakawa, Y. Ebihara, A. Mishev, S. Koldobskiy, K. Kusano, S. Bechet, S. Yashiro, K. Iwai, A. Shinbori, K. Mursula, F. Miyake, D. Shiota, M. V. D. Silveira, R. Stuart, D. M. Oliveira, S. Akiyama, K. Ohnishi, V. Ledvina e Y. Miyoshi. The Solar and Geomagnetic Storms in 2024 May: A Flash Data Report. *The Astrophysical Journal* **979**, 49 (ene. de 2025). ISSN: 1538-4357. <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ad9335>.
- [7] M. E. Greenspan y D. C. Hamilton. A test of the Dessler-Parker-Sckopke relation during magnetic storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **105**, 5419-5430 (mar. de 2000). ISSN: 0148-0227. <http://dx.doi.org/10.1029/1999JA000284>.
- [8] S. Ohtani, M. Nosé, G. Rostoker, H. Singer, A. T. Y. Lui y M. Nakamura. Storm-substorm relationship: Contribution of the tail current to Dst. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **106**, 21199-21209 (oct. de 2001). ISSN: 0148-0227. <http://dx.doi.org/10.1029/2000JA000400>.
- [9] N. Y. Ganushkina, T. I. Pulkkinen, M. V. Kubyshkina, H. J. Singer y C. T. Russell. Long-term evolution of magnetospheric current systems during storms. *Annales Geophysicae* **22**, 1317-1334 (abr. de 2004). ISSN: 1432-0576. <http://dx.doi.org/10.5194/angeo-22-1317-2004>.
- [10] V. V. Kalegaev, N. Y. Ganushkina, T. I. Pulkkinen, M. V. Kubyshkina, H. J. Singer y C. T. Russell. Relation between the ring current and the tail current during magnetic storms. *Annales Geophysicae* **23**, 523-533 (feb. de 2005). ISSN: 1432-0576. <http://dx.doi.org/10.5194/angeo-23-523-2005>.
- [11] N. Fukushima e Y. Kamide. Partial ring current models for worldwide geomagnetic disturbances. *Reviews of Geophysics* **11**, 795-853 (nov. de 1973). ISSN: 1944-9208. <http://dx.doi.org/10.1029/RG011i004p00795>.
- [12] Y. Shi, E. Zesta y L. R. Lyons. Modeling magnetospheric current response to solar wind dynamic pressure enhancements during magnetic storms: 1. Methodology and results of the 25 September 1998 peak main phase case. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **113** (oct. de 2008). ISSN: 0148-0227. <http://dx.doi.org/10.1029/2008JA013111>.
- [13] S. Dubyagin, N. Ganushkina, M. Kubyshkina y M. Lie-mohn. Contribution from different current systems to SYM and ASY midlatitude indices. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **119**, 7243-7263 (sep. de 2014). ISSN: 2169-9402. <http://dx.doi.org/10.1002/2014JA020122>.
- [14] S. Ohtani, S. Imajo, A. Nakamizo y J. W. Gjerloev. Globally Correlated Ground Magnetic Disturbances During Substorms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **126** (abr. de 2021). ISSN: 2169-9402. <http://dx.doi.org/10.1029/2020JA028599>.
- [15] R. Elhawary, K. M. Laundal, J. P. Reistad, M. Madelaine y A. Ohma. Substorm Impact on Dayside Ionospheric Currents. *Geophysical Research Letters* **50** (jul. de 2023). ISSN: 1944-8007. <http://dx.doi.org/10.1029/2023GL104800>.
- [16] P. Sallago. ANALYSIS OF THE EQUIVALENT CURRENTS SYSTEM SQ BEHAVIOUR AT THE ARGENTINIAN PERMANENT MAGNETIC OBSERVATORIES (ROMP) DURING 2019-2021. *Anales AFA* **33**, 77-84 (oct. de 2022). ISSN: 1850-1168. <http://dx.doi.org/10.3152/analesafa.2022.33.3.77>.
- [17] R. Stening, T. Reztsova, D. Ivers, J. Turner y D. Winch. A critique of methods of determining the position of the focus of the Sq current system. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **110** (abr. de 2005). ISSN: 0148-0227. <http://dx.doi.org/10.1029/2004JA010784>.
- [18] Y. Yamazaki y A. Maute. Sq and EEJ—A Review on the Daily Variation of the Geomagnetic Field Caused by Ionospheric Dynamo Currents. *Space Science Reviews* **206**, 299-405 (sep. de 2016). ISSN: 1572-9672. <http://dx.doi.org/10.1007/s11214-016-0282-z>.
- [19] M. Takeda. The correlation between the variation in ionospheric conductivity and that of the geomagnetic Sq field. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **64**, 1617-1621 (oct. de 2002). ISSN: 1364-6826. [http://dx.doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00140-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00140-2).
- [20] R. K. Choudhary, J.-P. St.-Maurice, K. M. Ambili, S. Sundu y B. M. Pathan. The impact of the January 15, 2010, annular solar eclipse on the equatorial and low latitude ionospheric densities: ECLIPSE EFFECT ON EQUATORIAL IONOSPHERE. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **116** (sep. de 2011). ISSN: 0148-0227. <http://dx.doi.org/10.1029/2011JA016504>.
- [21] J. W. Gjerloev. The SuperMAG data processing technique. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **117** (sep. de 2012). ISSN: 0148-0227. <http://dx.doi.org/10.1029/2012JA017683>.
- [22] P. T. Newell y J. W. Gjerloev. SuperMAG-based partial ring current indices. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **117** (mayo de 2012). ISSN: 0148-0227. <http://dx.doi.org/10.1029/2012JA017586>.