

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE CORRIENTES EQUIVALENTES SQ EN LAS ESTACIONES DE LA RED DE OBSERVATORIOS MAGNÉTICOS PERMANENTES DE LA REPÚBLICA ARGENTINA (ROMP) DURANTE 2019-2021

ANALYSIS OF THE EQUIVALENT CURRENTS SYSTEM SQ BEHAVIOUR AT THE ARGENTINIAN PERMANENT MAGNETIC OBSERVATORIES (ROMP) DURING 2019-2021

P. A. Sallago^{*1}

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

Recibido: 29/12/2021; Aceptado: 25/4/2022


Las fuentes de las variaciones geomagnéticas registradas en los días calmos Sq, son las corrientes ionosféricas que fluyen en la capa E, las corrientes magnetosféricas y las corrientes inducidas en la litósfera bajo la estación. Existen varios métodos para realizar la estimación de los valores correspondientes a las corrientes magnetosféricas, mientras que para las corrientes inducidas se suele considerar que su contribución son del orden de un tercio de la variación Sq horizontal medida. En este trabajo se procede por primera vez a producir la corrección por efectos magnetosféricos mediante el análisis de los índices para la corriente anillo SMR calculados por SuperMAG, resultando en una corrección eficiente. Posteriormente se estiman los valores de las componentes norte y este (KN y KE) de las densidades de corriente superficiales sobre las estaciones de la ROMP para los días calmos con índice Kp menor o igual a 2 en el intervalo 2019-2021. Se encuentra que para las 14 hs TL, los máximos valores de KN y KE se registran en PIL el 4.12.2020, mientras que los valores de KN y KE mínimos se registran en ORC el 19.10.19 y el 16.11.20, respectivamente.

Palabras Clave: corrientes ionosféricas, corrientes magnetosféricas, geomagnetismo.

The ionospheric currents that flow in the E layer, the magnetospheric currents and the induced currents in the lithosphere under the station are the sources of geomagnetic variations in the calm days Sq. There exist several methods for estimating the values corresponding to magnetospheric currents. The magnitude of the induced currents contribution is considered about one third of the measured horizontal variation Sq. In this work, one proceeds to produce the correction for magnetospheric effects by analyzing the ring current index SMR, getting an efficient correction. Subsequently, the values of the north and east components of the surface current densities (KN and KE) above ROMP stations are estimated for calm days with a Kp index less than or equal to 2 in the 2019-2021 interval. It is found that at 14 hs LT, the maximum KN and KE values are recorded at PIL on 12.4.2020, while the minimum KN and KE values are recorded at ORC on 10.19.19 and 11.16.20, respectively.

Keywords: ionospheric currents, magnetospheric currents, geomagnetism.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2022.33.3.77>

 ISSN 1850-1168 (online)

I. INTRODUCCIÓN

Como es bien conocido, las corrientes ionosféricas de la capa E son las fuentes de las variaciones diarias de los días calmos Sq, estas variaciones toman valores del orden de la decena de nT [1]. Además de ser estudiadas para intentar comprender el comportamiento ionosférico, las variaciones geomagnéticas de los días calmos son clave a la hora de realizar investigaciones vinculadas con disciplinas afines, por ejemplo, con la actividad de la radiación solar [2]. 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 [3]. La ley de Biot-

Savart permite calcular el campo ΔB [T] que produce una hoja de corriente de intensidad I [A/m]. Este toma la forma $\Delta B = \mu_0 I / 4\pi$. Cuando el campo magnético se da en nT, la expresión anterior puede reescribirse tomando el siguiente aspecto: $\Delta B = 2\pi K / 10$, donde K es la densidad de corriente en mA/m [1]. Para estudiar los sistemas de corrientes equivalentes superficiales ionosféricas hay que tener presente que en los registros de los días calmos se tendrán 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, como son las propuestas de Takeda [4] y de Choudhary [5]. Sin embargo, como se mostrará más adelante en este trabajo, ambos métodos presentan desventajas por no considerar la variabilidad del índice Dst.

* pato@fcaglp.unlp.edu.ar

Por otra parte, los índices para la corriente anillo SMR [6-8] obtenidos desde <https://supermag.jhuapl.edu/>, son elaborados a partir de los registros de 98 magnetómetros ubicados en latitudes medias y bajas.

Además, al momento de evaluar las corrientes superficiales equivalentes, la contribución de las corrientes corticales inducidas se consideran de un tercio de la variación S_q horizontal medida. De esta manera, las densidades superficiales de corriente equivalente norte y este, KN y KE sobre una estación [3], son :

$$KN \sim -\Delta Y, \quad (1)$$

$$KE \sim -\Delta X, \quad (2)$$

donde ΔX , ΔY se calculan restando al dato registrado y corregido, el valor de referencia nocturno. Si bien este modelo tiene sus limitaciones espaciales, algunos autores lo consideran adecuado cuando se analizan los datos en una única estación [3].

En el presente estudio se emplean los registros de la red de estaciones magnéticas permanentes de la República Argentina (ROMP). Esta red está conformada por las estaciones de PIL (Pilar, -31.4° , 296.12°), LAS (Las Acacias, $-35.^\circ006$, $302.^\circ31$), TRW (Trelew, $-43.^\circ267$, $294.^\circ617$) y ORC (Orcadas, $-60.^\circ737$, $315.^\circ26$). La ubicación de las mismas se representa esquemáticamente en el mapa (Fig. 1). Debido a que en Las Acacias se registra solamente el módulo del campo, esta estación ha quedado excluida del presente análisis. Los datos relativos a las estaciones geomagnéticas fueron tomados de la red Intermagnet (www.intermagnet.org) en el intervalo de tiempo que abarca desde mayo de 2019 hasta mayo de 2021.

En este trabajo se procede por primera vez a producir la corrección magnetosférica mediante el empleo de los índices para la corriente anillo SMR. En la sección 1 se discute la selección de los días de estudio en el intervalo 2019-2021, en la Sec. II se realizan las correcciones magnetosféricas por los métodos de Takeda [4] y de Choudhary [5], posteriormente se discuten las desventajas que presentan ambos métodos. Se presenta la metodología de aplicación con los índices SMR y resultando en la remoción eficiente de los efectos magnetosféricos por la corriente anillo. En la Sec. III, finalmente, se calculan las corrientes ionosféricas superficiales equivalentes por el método de Stening [3] y se describen las características salientes de las componentes KE, KN, corrientes superficiales este y norte, respectivamente.

II. MÉTODOS

Elección de los días de estudio

Para este estudio se dividieron los registros en tres grupos, siguiendo a Yamazaki y Maute [1]: “verano” (noviembre-febrero), “equinoccios” (marzo-abril-septiembre-octubre) e “invierno” (mayo-agosto). De entre los cinco días internacionalmente calmos, se seleccionaron los de índice K_p menores o iguales a 2. De este modo se tomaron los días 19.10.19, 19.04.20 y 09.09.20 para el grupo “equinoccios”, 16.11.20 y 04.12.20 para el grupo “verano”, 9.05.20 y 5.05.21 para el grupo



FIG. 1: Esquema de la ubicación de las estaciones geomagnéticas permanentes de la República Argentina (ROMP). Los círculos indican las estaciones que se emplean en el presente estudio. Los colores de los círculos coinciden con el de las trazas correspondientes en las Figs. 7 a 12. Mapa realizado desde <https://www.google.com.ar/maps>.

“invierno”. Este último grupo se descartó del estudio comparativo por encontrarse incompletos los registros en PIL y TRW. Tanto los días internacionalmente calmos (QDays por su denominación en inglés) como los valores del índice K_p fueron obtenidos de la página del World Data Center C de Japón.

Correcciones magnetosféricas

Al discutir las contribuciones de las corrientes magnetosféricas se suele tener en consideración principalmente las correspondientes a la corriente anillo y al sistema de la cola de la magnetósfera. La contribución perteneciente a la corriente de Chapman-Ferraro suele despreciarse pensando en que se encuentra muy alejada del punto de observación.

Por otra parte, este análisis es válido en estaciones geomagnéticas que se encuentren fuera de las regiones aurales y del ecuador magnético, debido a que, como es bien conocido, el sistema de corrientes equivalentes en las regiones aurales tiene un comportamiento peculiar, incluyendo los aspectos transitorios de reconexión magnética con el sistema de corrientes de la cola de la magnetósfera. En contraste, las estaciones del ecuador magnético se ven afectadas por el sistema de corrientes del electrojet ecuatorial cuya dependencia del sistema de S_q se encuentra en discu-

TABLA 1: Coeficientes de correlación entre los promedios horarios de las componentes y el índice Dst.

Fecha	Componente	PIL	TRW	ORC
19.10.19	X	---	0,34	0,74
	Y	---	-0,57	-0,66
19.04.20	X	0,24	0,89	0,48
	Y	-0,45	-0,6	-0,85
09.09.20	X	0,42	---	-0,01
	Y	0,29	---	0,1
16.11.20	X	0,1	---	0,54
	Y	0,49	---	0,44
04.12.20	X	-0,74	---	0,2
	Y	0,35	---	0,2

Las comparaciones de los resultados con los distintos métodos de corrección se ejemplifican con los registros correspondientes al 04.12.20 en PIL.

sión actualmente [1].

En el presente trabajo se adoptó el criterio de realizar esta corrección solamente cuando la correlación entre el índice Dst y los promedios horarios de los datos registrados fuera alta. El intervalo que se usó para estimar el coeficiente de correlación por el método de Pearson es de 24 horas para cada día seleccionado. En la Tabla 1 se muestran los valores del coeficiente de correlación anteriormente mencionado para las fechas seleccionadas y las estaciones. Se encuentran escritas en rojo los coeficientes de las componentes que se deben corregir.

Método de Takeda

Distintos autores proponen distintos tipos de correcciones para la corriente anillo. Una corrección propuesta por Takeda [4] consiste en simular los efectos de la corriente anillo sobre la componente horizontal H mediante el índice Dst, resultando un ΔH por efectos magnetosféricos igual al valor del índice Dst multiplicado por el coseno de la latitud geomagnética de la estación (L), y estudiar el valor corregido utilizando

$$\Delta H = Dst \cos(L). \quad (3)$$

Se procedió al análisis de la corrección propuesta por Takeda. Para la misma se obtuvieron los valores del índice Dst desde la página Web del World Data Center C http://wdc.kugi.kyotou.ac.jp/dst_realttime/202001/index.html. Se debe recordar que el índice Dst evalúa el comportamiento global de la corriente anillo y está calculado con los datos de cuatro estaciones geomagnéticas.

El valor del coeficiente de correlación entre los datos de la componente horizontal en PIL y el índice Dst toma el valor -0,73. Pudo observarse que esta corrección no resulta eficiente en remover los efectos magnetosféricos, esta afirmación se fundamenta en el hecho de que el coeficiente de correlación entre los valores del índice Dst y los valores corregidos permanece alto, con valor -0,78. Los valores corregidos de la componente H por el método de Takeda se indican como Hmodelo1 (ver Fig. 2).

Método de Choudhary

Otro método, propuesto por Choudhary et al. [5], consiste en estimar la corrección mediante el ajuste lineal entre los promedios horarios de H y el índice Dst. En el caso de la componente horizontal en PIL la relación lineal entre ésta y Dst viene dada por

$$HPIL(Dst) = 18535.6 - 7.1 Dst. \quad (4)$$

La corrección realizada con este método remueve eficientemente la contribución de la corriente anillo, el coeficiente de correlación entre los valores del índice Dst y los valores corregidos es cercana a cero (-0,009). Los valores corregidos de la componente H por el método de Choudhary se indican como Hmodelo2 (ver Fig. 2).

Método utilizando el índice SMR

Con la intención de evitar la introducción de variaciones ficticias, se recurrió al análisis de los índices de la corriente anillo SMR [7, 8]. Los valores del índice SMR fueron obtenidos desde la red SuperMAG.

En la Fig. 3 se muestra las series de los índices SMR y Dst correspondientes al día 4.12.20. El valor del coeficiente de correlación entre la componente horizontal y SMR toma el valor -0,55. Se realiza la corrección mediante el ajuste lineal

$$HPIL(SMR) = 18557 - 7.6 SMR. \quad (5)$$

El valor del coeficiente de correlación entre los datos corregidos y el índice SMR toma el valor -0,003 en consecuencia, se produce la remoción de los efectos de la corriente anillo en forma eficiente.

A forma de comparación, se calculan los valores de la componente H corregidos mediante SMR para PIL y se indican como Hmodelo3 (ver Fig. 2).

Comparación de las correcciones

En la Fig. 2 se muestran los valores de la componente H en PIL corregida por los distintos métodos. También se grafica el modelo que contiene la corrección por el método de Takeda, teniendo en cuenta las observaciones comentadas en la subsección correspondiente. Para comparar los modelos del ajuste lineal con Dst (modelo2) y del ajuste lineal con SMR (modelo3), se agregó una corrección a los mismos por una pequeña variación no cíclica (Hmodelo2* y Hmodelo3*).

Tanto el índice Dst como el índice SMR son susceptibles de contener contribuciones debidas al sistema de corrientes de la cola de la magnetósfera [1]. En el caso del índice Dst, tres de las estaciones que contribuyen con sus datos podrían percibir la influencia de la corriente de la cola de la magnetósfera en el intervalo entre las 3 y las 9 hs TU. Si bien el análisis de esta influencia está fuera del objetivo del presente trabajo, un estudio somero arroja que el valor del coeficiente de correlación para este intervalo entre SMR y PCS (índice de actividad polar sur, calculado a partir de los registros de la estación Vostok, situada en el continente antártico) es de 0,6 mientras que entre Dst y AE (índice auroral calculado a partir de los registros de estaciones del hemisferio norte) es 0,9. Por este motivo se estima que existe

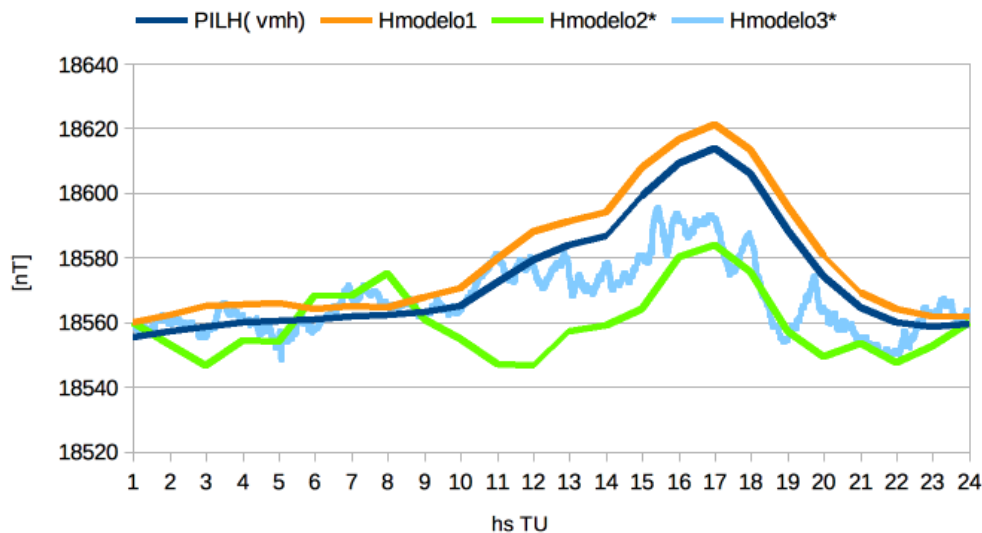


FIG. 2: Comparación de los modelos método de Takeda (modelo1), del ajuste lineal con Dst (modelo2) y del ajuste lineal con SMR (modelo3), se agregó una corrección a los mismos por una pequeña variación no cíclica (Hmodelo2* y Hmodelo3*), en el eje horizontal, las horas en TU. Por completitud se grafican los valores medios horarios de la componente horizontal sin corregir, PILH (vmh).

la posibilidad de observar una contribución no ionosférica y que la misma resultaría de mayor intensidad cuando se corrige mediante el índice Dst que cuando se emplea SMR. Los índices que se han utilizado para contrastar son diferentes (PCS, AE) debido a su discretización. Los índices PCS y AE pueden descargarse desde la página web del Servicio Internacional de índices <http://isgi.unistra.fr/>. En consecuencia, se observa que por el método de Choudhary se introduciría un aumento ficticio de las variaciones del orden de la decena de nT durante cuatro horas, entre las 5 y las 9 hs TU, con un máximo de 15 nT a las 8 hs TU. También se analizó la posibilidad de introducir variaciones ficticias mediante este procedimiento con SMR, estimando las mismas en el orden de 7 nT, entre las 5 y las 9 hs TU.

En lo que sigue de este trabajo todas las correcciones a las componentes que se indicaron en la Tabla 1 se han producido por el método del ajuste lineal con SMR.

III. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE CORRIENTES EQUIVALENTES CON LOS DATOS DE UNA ESTACIÓN

Posteriormente a la realización de las correcciones, se estimaron los valores de las componentes norte y este de las densidades de corriente superficiales ionosféricas sobre las estaciones en los días seleccionados.

Como se mencionó anteriormente, el sistema de corrientes ionosférica no se puede determinar a partir del análisis de datos de estaciones geomagnéticas solamente, se usa definir un sistema de corrientes bidimensional equivalente que fluye en una capa esférica delgada situada supuestamente a 110 km de altura, de acuerdo con Yamazaki y Maute. Una forma de evaluar las corrientes equivalentes es suponer una hoja de corriente horizontal en la ionósfera siguiendo a Steining, donde la contribución de las corrientes corticales inducidas se consideran de un tercio de la variación Sq horizontal medida. De esta manera, las densidades superficiales de corriente equivalente norte y este (KN y KE) sobre una

estación vienen dadas por las Ecs. 1 y 2.

Se realizaron las estimaciones de las densidades superficiales de las corrientes equivalentes norte y este (KN y KE) para los ejemplos de estudio sobre la estaciones geomagnéticas, de ellos surge el contenido de las Tablas 2-4.

TABLA 2: Resumen en PIL.

KNMAX	19.04.20	22 mA/m
KNMIN	09.09.20	-15 mA/m
KEMAX	04.12.20	47 mA/m
KEMIN	19.04.20	-17 mA/m

Ver las Figs. 4a y 4b.

TABLA 3: Resumen en TRW.

KNMAX	19.04.20	24 mA/m
KNMIN	19.04.20	-20 mA/m
KEMAX	19.10.19	17 mA/m
KEMIN	19.10.19	-17 mA/m

Ver las Figs. 5a y 5b.

TABLA 4: Resumen en ORC

KNMAX	16.11.20	24,5 mA/m
KNMIN	16.11.20	-20 mA/m
KEMAX	09.09.20	10 mA/m
KEMIN	16.11.20	-32 mA/m

Ver las Figs. 6a y 6b.

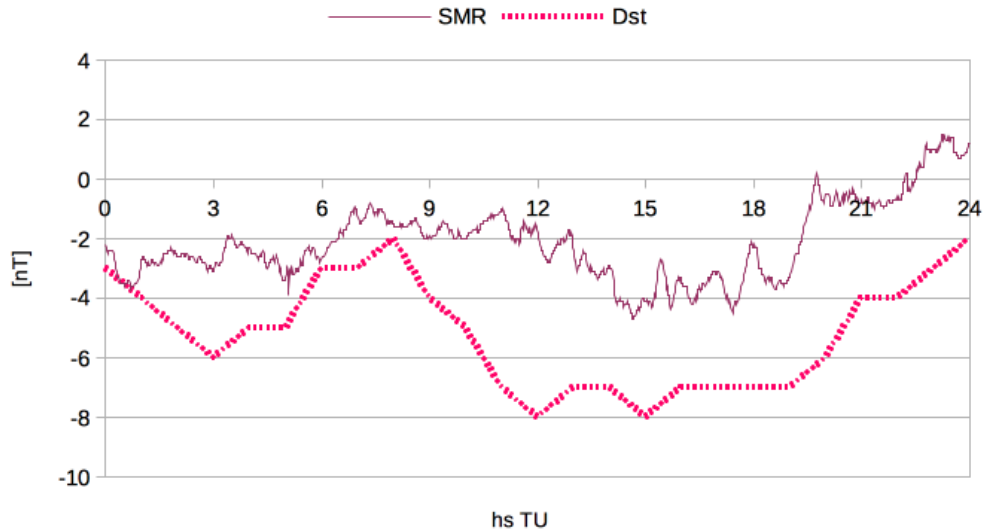


FIG. 3: Índices SMR proveniente de SuperMag (<https://supermag.jhuapl.edu/>) y el índice Dst proveniente del WDC de Japón (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/202001/index.html) para el día 4/12/2020., en el eje horizontal, las horas en TU.

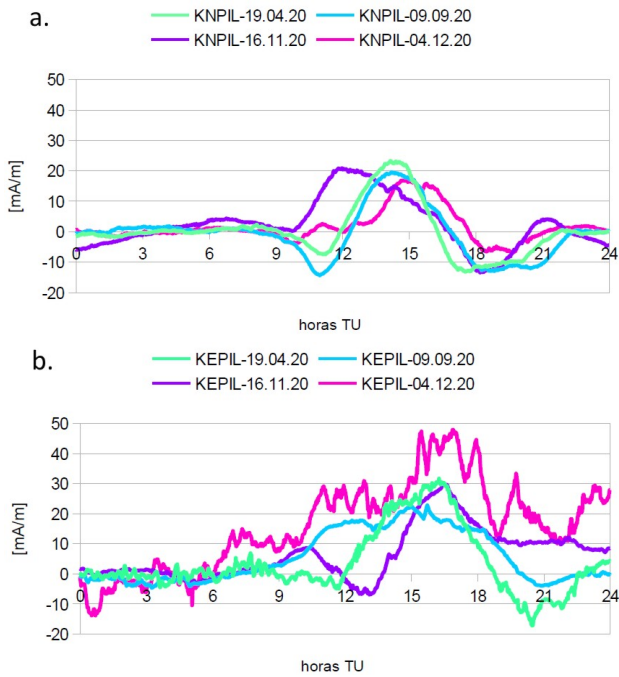
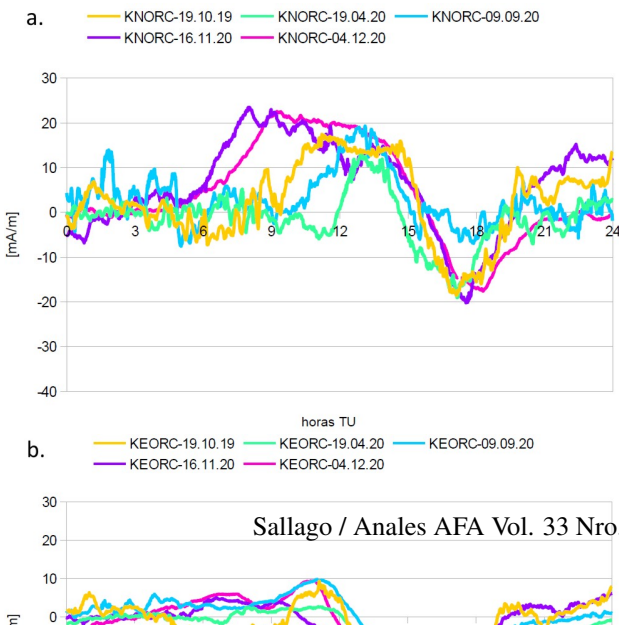


FIG. 4: Densidad superficial del sistema de corrientes equivalentes: a) norte KN en PIL, b) este KE en PIL.



FIG. 5: Densidad superficial del sistema de corrientes equivalentes: a) norte KN en TRW, b) este KE en TRW.



Por otra parte, para el horario de las 14 hs tiempo local TL, (17 hs TU), los valores máximos y mínimos de KN y KE resultaron como se muestran en la Tabla 5, como puede verse en las Figs. 4-6.

Comparaciones entre las estaciones por fecha

19.10.19: KNMAX y KEMAX tienen lugar en TRW, mientras que KNMIN y KEMIN en ORC. KNMIN de ORC se adelanta al de TRW mientras que KEMIN de TRW se adelanta al de ORC (Fig. 7a y 7b).

09.09.20: Los valores de KNMAX coinciden en magnitud. KNMIN tiene lugar en PIL, KEMAX en PIL Y KEMIN en ORC (Fig. 8a y 8b).

16.11.20 y 04.12.20: KNMAX y KNMIN tienen lugar

TABLA 5: Valores máximos y mínimos a las 14 hs TL.

	PIL	TRW	ORC
KNMAX	04.12.20	19.10.19	09.09.20
KNMIN	19.04.20	19.04.20	19.10.19
KEMAX	04.12.20	19.10.19	04.12.20
KEMIN	09.09.20	19.04.20	16.11.20

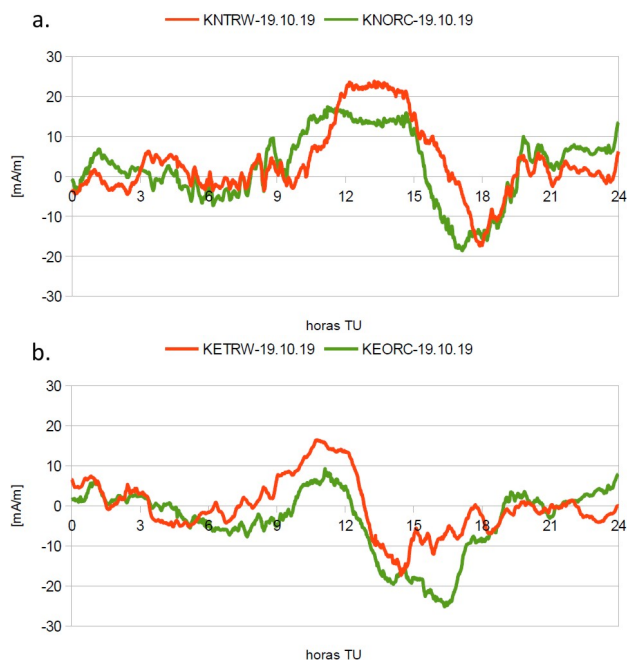


FIG. 7: Densidad superficial del sistema de corrientes equivalentes: a) norte KN en TRW y ORC 19.10.19.; b) este KE en TRW y ORC 19.10.19.

en ORC. KEMAX tiene lugar en PIL y KEMIN en ORC. KNMAX y KNMIN de ORC adelanta al de PIL. Ver las Figs. 9a y 9b para el 16.11.20 y Figs. 10a y 10b para el 04.12.20.

En un caso especial en el que pueden compararse los valores calculados para las tres estaciones, 19.04.20: KNMAX y KNMIN tienen lugar en TRW. KEMAX tiene lugar en PIL y KEMIN en ORC. Además, KNMAX ORC adelanta a KNMAX de PIL y de TRW (Figs. 11a y 11b).

Evolución del sistema de corrientes superficiales equivalentes

Puede apreciarse mayor intensidad en el intervalo de tiempo entre las 12 y las 24 hs TU. Para PIL la evolución es horaria, para ORC es antihoraria. Para TRW puede verse que de 12 - 15 hs TU sigue a ORC (evolución antihoraria) y en adelante mayoritariamente sigue a PIL (evolución horaria), ver Fig. 12. Este comportamiento podría deberse al desplazamiento relativo de TRW respecto del foco del sistema de corrientes superficiales equivalentes del hemisferio sur.

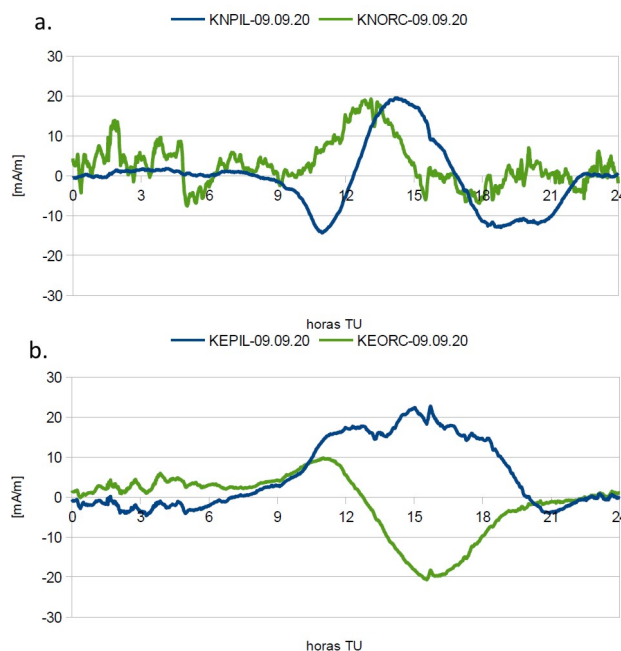


FIG. 8: Densidad superficial del sistema de corrientes equivalentes: a) norte KN en PIL y ORC 9.09.20; b) este KE en PIL y ORC 9.09.20.

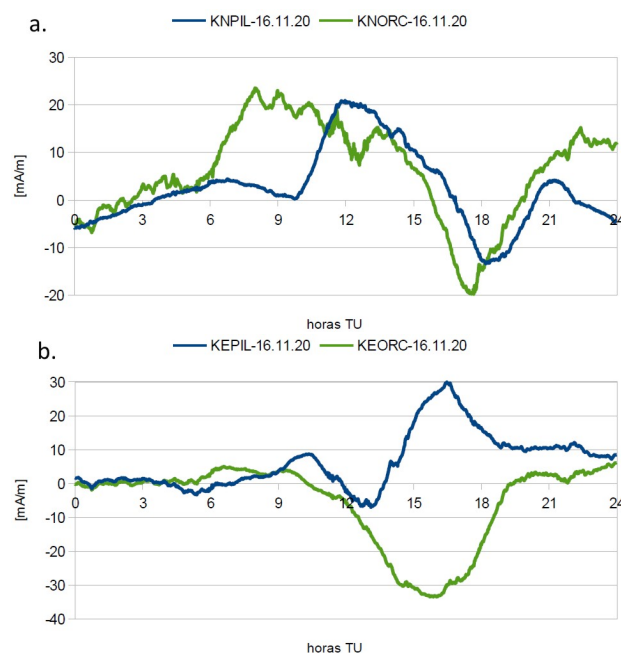


FIG. 9: Densidad superficial del sistema de corrientes equivalentes: a) norte KN en PIL y ORC 16.11.20; b) este KE en PIL y ORC 16.11.20.

Esta suposición puede confirmarse calculando la posición del foco del sistema de corrientes equivalentes, siguiendo los pasos aplicados por Torta [9]. Primero se determina el tiempo t_0 , cuando la variación de D (o Y) pasa por cero en cada observatorio que en el caso del hemisferio sur corresponde a cuando pasa de negativo a positivo (ver Stening [10]). Posteriormente se grafica el valor de la variación de H (o de X) evaluada en el tiempo t_0 en función de la latitud. La posición del foco se obtiene a partir de un ajuste por mínimos cuadrados, siendo el valor de la latitud correspondiente donde la línea cruza el cero. En este caso, aunque

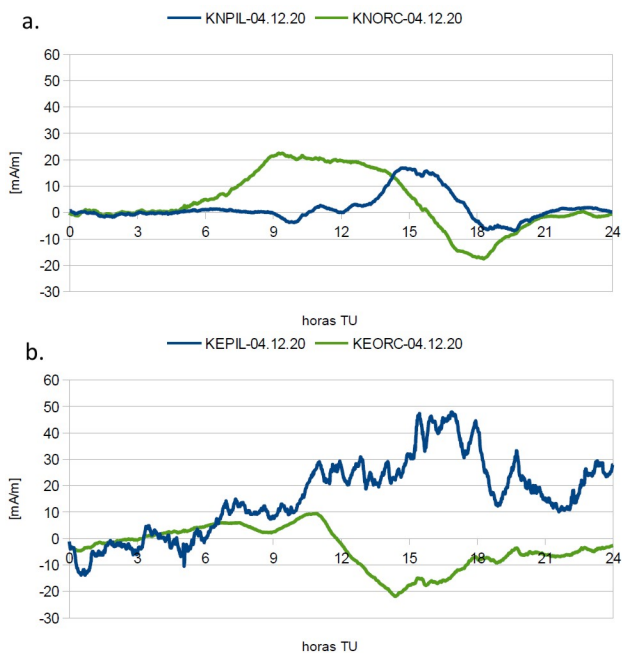


FIG. 10: Densidad superficial del sistema de corrientes equivalentes: a) norte KN en PIL y ORC 04.12.20; b) norte KN en PIL y ORC 04.12.20.

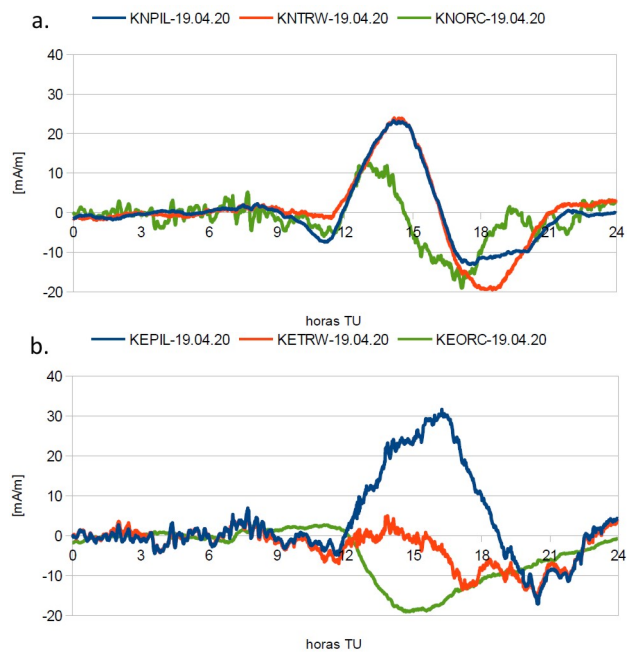


FIG. 11: Densidad superficial del sistema de corrientes equivalentes: a) norte KN en PIL, TRW y ORC 19.04.20; b) este KE en PIL, TRW y ORC 19.04.20.

se cuenta con poca cantidad de estaciones [9], la latitud del foco resulta $-41^{\circ}55' 26.4''$. De esta manera puede interpretarse que mientras desde el punto de vista de TRW para el mes de abril, mientras el foco se encuentra al noreste, TRW presenta un comportamiento similar a ORC. Luego, cuando el foco se encuentra al suroeste de TRW, presenta un comportamiento similar al de PIL.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudia el sistema de corrientes superficiales equivalentes sobre las estaciones de la red ROMP (PIL, TRW y ORC) entre 2019 y 2021. Se remueve la contribución correspondiente a la corriente anillo mediante el ajuste lineal entre el índice SMR y los datos registrados en la estación. Se estiman los valores de las densidades superficiales de corrientes equivalentes componentes este y norte sobre cada estación siguiendo el método de Stening. Se encuentra que para las 14 hs tiempo local los valores de KNMAX y KEMAX tienen lugar en PIL para el 04.12.20, mientras que los de KNMIN y KEMIN tienen lugar en ORC, el 19.10.19 y el 16.11.20 respectivamente.

Por otra parte, los máximos y mínimos absolutos se producen así: KNMAX y KNMIN en TRW el 19.04.20, mientras que KEMAX tiene lugar en PIL y KEMIN en ORC, el 04.12.20 y 16.11.20 respectivamente.

En relación con la evolución, queda en evidencia el desplazamiento relativo de TRW y el foco del sistema de corrientes superficiales equivalentes del hemisferio sur.

V. AGRADECIMIENTOS

Los resultados presentados en este trabajo se basan en datos recopilados en observatorios magnéticos. Se agradece a los institutos nacionales que los apoyan y a Intermagnet por promover altos estándares en las prácticas de los observatorios magnéticos (www.intermagnet.org).

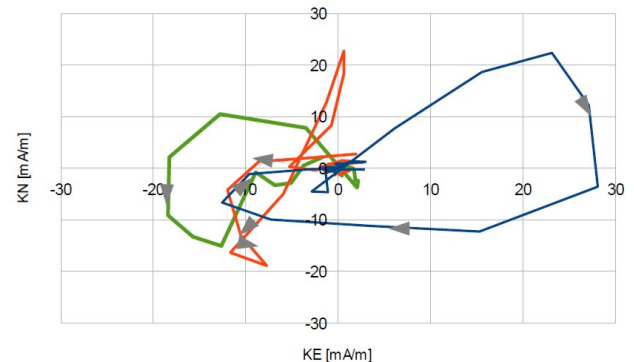


FIG. 12: Evolución temporal de la densidad superficial del sistema de corrientes equivalentes norte KN versus este KE en PIL (trazo azul), TRW (trazo naranja) y ORC (trazo verde) 19.04.20.

Se agradece a los colaboradores del World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, Japón (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) y a los colaboradores del ISGI - International Service of Geomagnetic Indices (unistra.fr).

Se reconoce con gratitud a los colaboradores de SuperMAG (<https://supermag.jhuapl.edu/info/page=acknowledgement>).

REFERENCIAS

- [1] Y. Yamazaki y A. Maute. Sq and EEJ—A Review on the Daily Variation of the Geomagnetic Field Caused by Ionospheric Dynamo Currents. *Space Sci. Rev.* **206**, 299-405 (2016).
- [2] L. Svalgaard. Reconstruction of Solar Extreme Ultraviolet Flux 1740–2015. *Sol. Phys.* **291**, 2981-3010 (2016).
- [3] 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. *J. Geophys. Res: Space Phys.* **110** (2005).

- [4] M. Takeda. The correlation between the variation in ionospheric conductivity and that of the geomagnetic Sq field. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **64**, 1617-1621 (2002).
- [5] R. K. Choudhary, J.-P. St.-Maurice, K. M. Ambili, S. Sunda y B. M. Pathan. The impact of the January 15, 2010, annular solar eclipse on the equatorial and low latitude ionospheric densities. *J. Geophys. Res: Space Phys.* **116**, n/a-n/a (2011).
- [6] J. W. Gjerloev. A Global Ground-Based Magnetometer Initiative. *EOS* **90**, 230 (2009).
- [7] J. W. Gjerloev. The SuperMAG data processing technique. *J. Geophys. Res: Space Phys.* **117**, n/a-n/a (2012).
- [8] P. T. Newell y J. W. Gjerloev. SuperMAG-based partial ring current indices. *J. Geophys. Res: Space Phys.* **117** (2012).
- [9] J. M. Torta, S. Marsal, J. J. Curto y L. R. Gaya-Piqué. Behaviour of the quiet-day geomagnetic variation at Livingston Island and variability of the Sq focus position in the South American-Antarctic Peninsula region. *EPS* **62**, 297-307 (2010).
- [10] R. Stening, T. Reztsova y L. H. Minh. Day-to-day changes in the latitudes of the foci of the Sq current system and their relation to equatorial electrojet strength. *J. Geophys. Res.* **110** (2005).