

RELACIÓN ENTRE TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS E INCIDENCIAS EN LA RED ELÉCTRICA DEL URUGUAY

Virginia Feldman^{1,2,3} y Leda Sánchez Bettucci^{2,3}

¹ Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, Instituto de Física, Montevideo, Uruguay.

² Universidad la República, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Geológicas, Montevideo, Uruguay.

³ Observatorio Geofísico de Aiguá, Maldonado, Uruguay.

ABSTRACT

Space weather and its interaction with our geomagnetic field is an intriguing and valuable subject either because it affects us individually or as a society.

In this work, we explore the qualitative characteristics of the geomagnetic field in the South Atlantic Magnetic Anomaly, from the Geophysical Observatory of Aiguá. Very low intensity fields were put under observation. Also, we registered a particular reaction to a geomagnetic storm of $K = 5$ magnitude, and compared it with observatories afar from the center of the anomaly.

Through statistical analysis, a possible relation is detected between Uruguay's electrical network failures and the geomagnetic activity throughout the course of one solar cycle (2002-2010). We separated the imperfections arisen from transmitter lines and those that came from electrical substations.

Finally, we examined the possible effects that storms from October 2003 had over the national electrical infrastructure.

The results suggest a meaningful relation between geomagnetic storms and instabilities in Uruguay's electrical power transmission network, underlining the relevance of the country's location in the South Atlantic Magnetic Anomaly.

Keywords: Solar Activity, Geomagnetic Storms, Geomagnetic Field, South Atlantic Magnetic Anomaly, Electrical Network Failures, Uruguay

RESUMEN

El clima espacial y su interacción con el campo geomagnético es un tema de gran interés, ya que abarca numerosos fenómenos que nos afectan individualmente y como sociedad.

En este trabajo se explora de manera cualitativa las características del campo geomagnético en la Anomalía magnética del Atlántico Sur, desde el Observatorio Geofísico de Aiguá. Se observan valores de intensidad de campo muy pequeños y la particular reacción registrada frente a una tormenta geomagnética de magnitud $K = 5$, en comparación con observatorios alejados del centro de la anomalía.

Por otro lado, a través del análisis estadístico, se detecta una posible relación entre las incidencias en la red eléctrica de Uruguay, durante un ciclo solar (2002-2010), y la actividad geomagnética en el mismo período. Se destaca la diferenciación entre fallas observadas en las líneas de transmisión y desperfectos registrados en las subestaciones.

Finalmente, se examinan los posibles efectos de las tormentas de fines de octubre de 2003 sobre la infraestructura eléctrica del país.

Los resultados presentados exponen una relación significativa entre tormentas geomagnéticas e incidencias en la red eléctrica de Uruguay, y subrayan la relevancia de la ubicación del país dentro de la Anomalía Magnética del Atlántico Sur.



Palabras Clave: Actividad Solar, Tormentas Geomagnéticas, Campo Geomagnético, Anomalía Magnética del Atlántico Sur, Fallos Red Eléctrica, Uruguay.

Introducción

La interacción entre el medio interplanetario y la Tierra es uno de los objetos de estudio que ha ganado gran relevancia en las últimas décadas. Esto se debe al significativo modo en el que afecta a la sociedad contemporánea.

Entre otros fenómenos, la actividad solar da lugar a intensas fluctuaciones del campo magnético terrestre debido a la inducción de una corriente anular entorno a la Tierra. Ésta puede provocar una disminución significativa de la componente horizontal del campo geomagnético.

La generación de diferencias de potencial inducidas a nivel de la superficie terrestre, dando origen a corrientes eléctricas que cambian rápida e intensamente, causa variaciones temporales del campo geomagnético, que a su vez inducen corrientes eléctricas a través de vastas áreas del planeta. Estas corrientes pueden dañar redes eléctricas, sistemas de telecomunicación, satélites, sistemas de navegación, entre otros. Particularmente, en el caso de largas líneas de telecomunicación, los potenciales terrestres pueden causar sobrevoltaje y sobreintensidad e introducir nuevos armónicos que llevan a la saturación de transformadores y otros componentes.

La mayoría de los estudios sobre la temática se realizan en el hemisferio Norte, por lo que debe entenderse la importancia de priorizar las investigaciones de este campo en Uruguay y la región, zona principalmente marcada por la presencia de la Anomalía Magnética del Atlántico Sur (AMAS).

Objetivos

Objetivos generales

Con esta investigación se busca analizar la correlación entre el clima espacial severo y las fallas en infraestructuras tecnológicas en vista a futuras prevenciones, tanto a nivel nacional como regional; así como ahondar en el estudio de las características de la Anomalía Magnética del Atlántico Sur, encaminando nuevas investigaciones sobre la temática.

Objetivos específicos

Se pretende hacer un estudio cualitativo de ciertos rasgos descriptivos de la SAMA, utilizando los datos obtenidos a partir del Observatorio Geofísico de Aiguá (OGA) y datos de dos observatorios más: uno fuera de la Anomalía y otro en la periferia de ésta. De tal forma, es posible evaluar y comparar valores de intensidad de campo y características del desarrollo de una tormenta geomagnética en las ubicaciones mencionadas.

Por otro lado, se busca determinar la existencia de fallas en la red eléctrica de Uruguay ocasionadas por alta actividad geomagnética, evaluando tipos de incidencias registradas, días en los que ocurrieron y magnitud de las tormentas observadas.

Intensidad de campo y tormenta geomagnética en la Anomalía Magnética del Atlántico Sur.

Metodología

Se estudió la tormenta geomagnética registrada el 4 de febrero de 2011, desde el OGA, cuyas coordenadas son: $-34^{\circ} 20' 89''$ S/ $-54^{\circ} 42' 44.72''$ W. Este observatorio geofísico contaba en el momento del estudio con un magnetómetro protónico que mide intensidad total de campo.

Los datos registrados para la tormenta fueron comparados con los valores de intensidad de campo detectados por dos observatorios: uno de ellos es el observatorio de Cambridge Bay (coordenadas 69.123 / 254.969) en el hemisferio norte, lejos de la Anomalía Magnética del Atlántico Sur, y el Observatorio de Tristan da Cunha que se encuentra dentro de la AMAS pero no en su centro.



Resultados y Análisis

Los valores de intensidad de campo para el día 4 de febrero de 2011 según el modelo IGRF, en la región de la Anomalía Magnética del Atlántico Sur, se representan en la Figura 1.

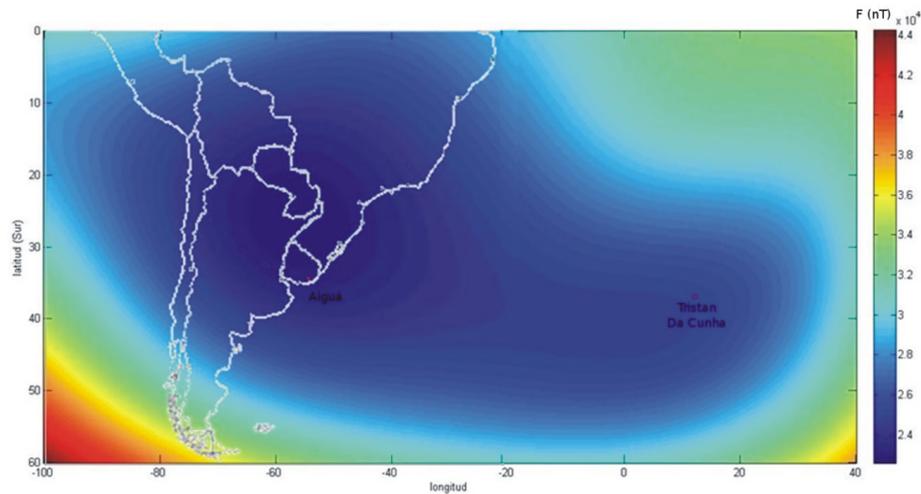


Figura 1. Intensidad de campo F (en nT) según el International Geomagnetic Reference Field, para el 4 de febrero de 2011.

De acuerdo con esta descripción matemática del campo geomagnético, Uruguay se encuentra próximo al centro de la Anomalía Magnética del Atlántico Sur, con valores de campo cercanos a los 23000 nT. Según el modelo IGRF, se predijo un valor de campo de 23025 nT para los días 3, 4 y 5 de febrero de 2011, en la ubicación del Observatorio Astronómico y Geofísico de Aiguá. Sin embargo, el valor medio de intensidad de campo registrado, durante los períodos calmos de estos días es de aproximadamente 22900 nT. Ni siquiera durante la fase principal de una tormenta geomagnética se alcanzan los 23000 nT.

En la Figura 2, se presenta la variación de intensidad de campo, medida desde el OGA, para los días 3, 4 y 5 de febrero de 2011.

En el registro del día 4 de febrero, en el que se produjo una tormenta geomagnética de magnitud $K = 5$, se observan claramente las principales fases de ella: la fase inicial durante la cual la intensidad de campo alcanza un valor máximo de 22942 nT, seguida de la fase principal, que se extiende durante 6 horas y en la cual F disminuye hasta alcanzar un mínimo de 22841 nT y por último, la fase de recuperación que se desarrolla por más de 6 horas y durante la cual la intensidad de campo aumenta lentamente hasta restablecer su valor promedio. Esta tormenta geomagnética dura en su totalidad cerca de un día.

Vale destacar que el campo disminuye unos 100 nT en un período de 3 horas, se trata de un gradiente de intensidad significativo para la inducción de corrientes.

Para el Observatorio de Cambridge Bay¹, se registra un valor medio de intensidad de campo próximo a los 58913 nT. Esta es una increíble y amplia diferencia de más de 36000 nT respecto a nuestro observatorio. Durante el pico de la tormenta, F tuvo un valor mínimo de aproximadamente 58700 nT. La fase principal se extiende durante 3 horas. En comparación con los datos obtenidos en Aiguá se observa una mayor disminución de campo durante un lapso menor: un mayor gradiente de intensidad de campo podría provocar

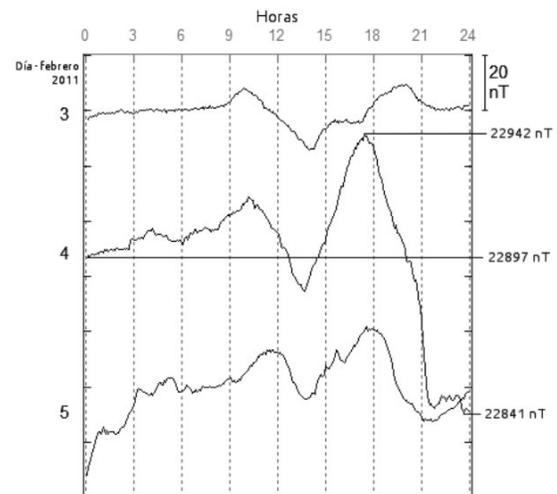


Figura 2. Intensidad de campo (en nT), medida los días 3, 4 y 5 de febrero de 2011, en el Observatorio de Aiguá.



mayores corrientes inducidas. La fase de recuperación también tiene menor duración que la observada aquí, lo cual indica que nos encontramos más vulnerables a la exposición a partículas altamente energéticas por períodos mayores, en adición a la constante vulnerabilidad debido a los bajos y habituales valores de campo. A partir de los datos correspondientes al Observatorio de Tristan da Cunha², se observa una intensidad de campo promedio de 24850 nT, 1950 nT mayor a la registrada en territorio uruguayo. Durante la fase inicial de la tormenta no se observa un aumento significativo de la intensidad de campo (no supera los 20 nT). La fase principal alcanza su pico con valores de F cercanos a los 24780 nT, por lo que la variación máxima de campo registrada no supera los 70 nT. La fase de recuperación se extiende por menos de 3 horas; en este caso también se trata de un lapso notoriamente inferior al observado desde Aiguá.

Es necesario llevar a cabo más estudios para determinar si las diferencias observadas se deben a la ubicación de los observatorios respecto a la Anomalía Magnética del Atlántico Sur o existen otros factores que juegan un rol más preponderante.

Estudio de la relación entre tormentas geomagnéticas e incidencias en la red eléctrica del país.

Metodología

Depuración de la base de datos.

Para el estudio de asociación entre actividad geomagnética e incidencias en la red eléctrica del país se utilizó una base de datos brindada por UTE (Departamento de Cables y Líneas de Transmisión), elaborada por los funcionarios del Ente.

Esta base constaba de 17753 observaciones registradas en el período comprendido entre los años 2002 y mediados del 2011. Este período abarca prácticamente un ciclo solar, lo que es de suma importancia a la hora de hacer un estudio estadístico de la muestra; si éste fuera menor, el estudio no hubiese sido posible.

La base de datos contenía las siguientes variables relevadas: “Fecha de inicio de la incidencia”, “Hora de inicio”, “Fecha de fin”, “Hora de fin”, “Número de la incidencia”, “Instalación principal de la incidencia”, “Descripción de la incidencia”, “Energía cortada”, “Obs. C.C.”, “Obs. DNC”, “Obs. Mantenimiento/Obras”, “Obs. Protecciones”, “Tipo de incidencia”.

Esta última variable se encontraba originalmente categorizada según: “Falla no programada”, “Media tensión”, “Maniobra”, “Causas ajenas” y “Reconexión”. Siguiendo el consejo del directivo de UTE, se eliminaron las observaciones relativas a “Media tensión” y “Maniobras”, recortando la base de datos a un total de 7917 incidencias.

Los datos del año 2011 no fueron utilizados, ya que no se encontraba completo.

Por último, se eliminaron datos atípicos.

Estudio exploratorio de la muestra.

A partir de la base de datos depurada, se analizó la distribución de frecuencias según año de la variable “Instalación principal de la incidencia”. Ésta se encontraba categorizada con valores nominales: “Transmisión” y “Generación”, los cuales a su vez, se hallaban subcategorizados respectivamente en: circuitos de comunicación, protección y telecontrol, subestación o línea de transmisión afectada, y generación hidráulica o térmica.

La distribución obtenida fue comparada con las distribuciones de manchas solares e índices geomagnéticos K, según año. Se utilizó el promedio anual de manchas solares observadas y se registraron los días, en el período en estudio, para los cuales se detectaron tormentas geomagnéticas equivalentes a un K4 o superior.

Los datos correspondientes a actividad solar y magnética, fueron extraídos de la página oficial de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

Por el tipo de relación hallada y las características teóricas del tema en estudio, la siguiente parte del trabajo se centró en las fallas observadas dentro de la categoría “transmisión”.



Análisis estadístico.

Como siguiente paso, se procedió a la realización de un test de bondad de ajuste con el fin de determinar si las distribuciones de frecuencias de manchas solares y días en los que se registraron tormentas geomagnéticas y la distribución de incidencias en subestaciones, según año, no diferían.

Suponiendo que el número de incidencias no relacionadas con los efectos causados por las variaciones de actividad geomagnética se distribuyen uniformemente durante el período relevante, se tomó el riesgo atribuible de la muestra, en lugar de trabajar con el número total de incidencias. Para esto se supuso que la incidencia de fallas en la red eléctrica sin encontrarse ésta expuesta al factor de riesgo (alta actividad solar y geomagnética) correspondía a los datos registrados en el mínimo de actividad solar. Por lo tanto, se realizó el test de bondad de ajuste sustrayéndosele el número de incidencias registradas durante el 2008 a todos los años analizados.

Se procedió al estudio de incidencias en los cargadores, conductores vulnerables a las corrientes inducidas y los armónicos introducidos. Dentro del número de incidencias en los cargadores, se planteó como hipótesis la existencia de una asociación entre los niveles de actividad geomagnética y una mayor ocurrencia de fallas en cargadores. Debido a los pocos datos de incidencias por año, se conformaron tres categorías anuales: 2002-2003, 2004-2005 y 2006-2010, a las cuales se les aplicó un test *chi* cuadrado de independencia.

Orientación de las líneas de transmisión y efectos de las tormentas geomagnéticas.

Para esta parte del trabajo, se conservaron sólo los datos de fallas correspondientes a días en los que se registraron tormentas geomagnéticas con un índice K6 o mayor, diferenciando claramente el valor del índice K para cada fecha. La muestra se redujo, de esta forma, a 337 observaciones. Luego, se analizaron cualitativamente los fenómenos relacionados con sobreintensidad y reconexión en las líneas de transmisión, teniendo presente su orientación (este-oeste o norte-sur). Se contó con un mapa de la red eléctrica de Uruguay, proporcionado por UTE, que facilitó la determinación de la orientación de las líneas involucradas en el estudio.

Estudio casuístico: Tormenta de Halloween de 2003.

La serie de tormentas geomagnéticas con mayor intensidad detectada en el período en estudio, sucedió en octubre y noviembre de 2003, lo que hizo relevante el estudio más detallado de estas fechas. A esto se le suma que, como ya fue indicado anteriormente, estas tormentas ocasionaron la quema de un transformador en Sudáfrica, país que se encuentra a una latitud próxima a la latitud de Uruguay.

Por lo tanto, se intentó determinar si las incidencias en la red ocurridas durante las tormentas de octubre y noviembre de 2003 podrían haberse debido a la fuerte actividad geomagnética registrada. Para esto se observó la cantidad y el tipo de incidencias, y sus horas de inicio.

Resultados y Análisis

A continuación, se presenta la distribución de frecuencias de incidencias según tipo de instalación y según año (fig. 3).

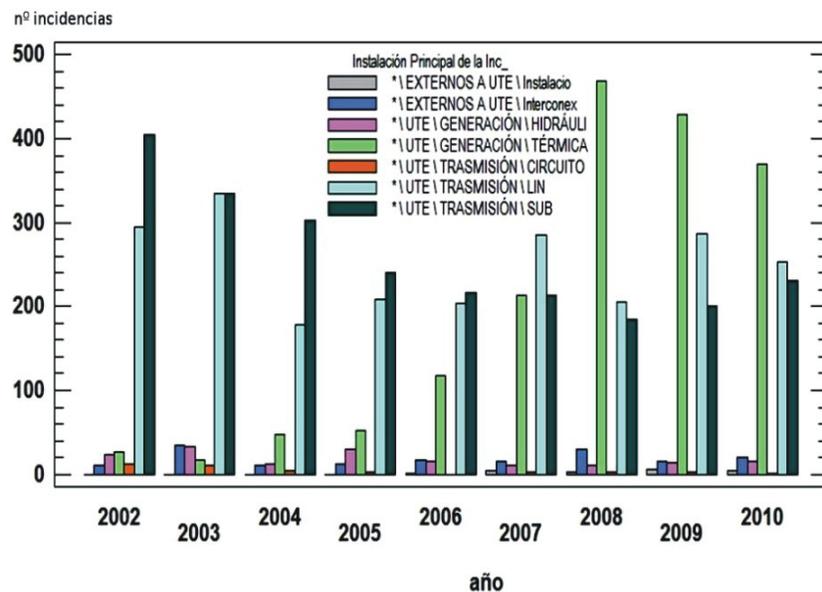


Figura 3. Incidencias registradas según año



Una comparación cualitativa con las distribuciones de frecuencias de actividad solar y tormentas geomagnéticas según año (figs. 4a y 4b), deja entrever una posible asociación entre fallas en subestaciones y actividad geomagnética. Ambas distribuciones poseen valores de frecuencia máximos en los años 2002-2003 (máximos de actividad solar y geomagnética), decreciendo hasta alcanzar sus valores mínimos en los años 2008-2009, correspondientes a los mínimos de actividad, para volver a aumentar durante el 2010.

Figura 4a. Tormentas geomagnéticas registradas según intensidad y año.

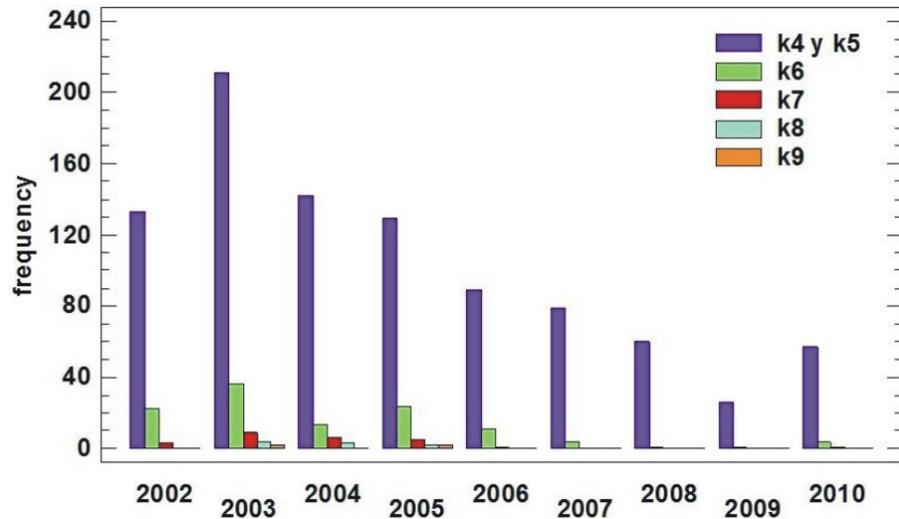
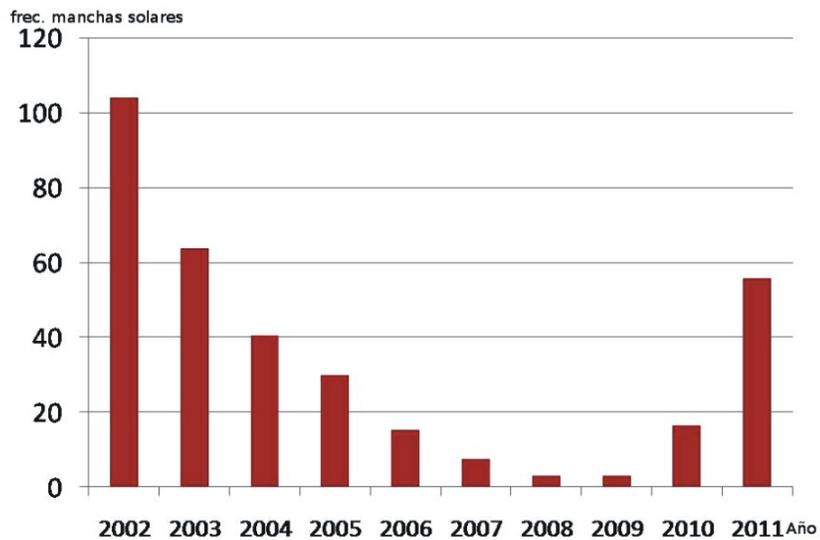


Figura 4b. Frecuencia de manchas solares según año.



Ya que los problemas causados por las corrientes inducidas en un sistema de potencia pueden provenir de la saturación de transformadores, las GIC fluyendo a través de los transformadores hacia o desde la Tierra son importantes, mientras que las GIC en las líneas de transmisión son de menor significancia práctica, aunque las GIC terrestres sean generalmente menores que las de las líneas de transmisión (Pirjola, 2005). Los transformadores se encuentran en las subestaciones, de forma que al ser éstos más vulnerables durante tormentas geomagnéticas, también lo son todos los componentes eléctricos dispuestos en ellas. Por lo tanto, se decidió centrar la siguiente parte del estudio en las fallas ocurridas en subestaciones. Su distribución de frecuencias según año se muestra en la Figura 5.

Se aplicó el test de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov para comparar fallas en subestaciones y tormentas geomagnéticas según año. El resultado obtenido indica que las dos distribuciones no difirieron significativamente, con un p-valor $p = 0.12$.

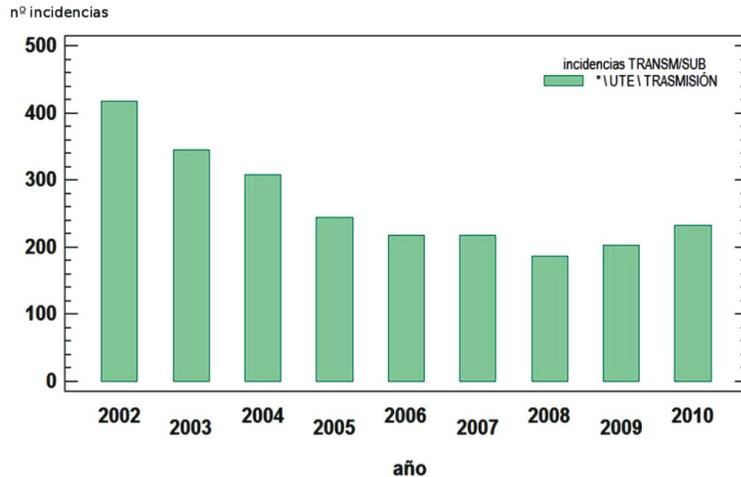


Figura 5. Fallas en subestaciones según año.

Dentro de las incidencias en subestaciones, los desperfectos en cargadores eran unos de los que ocurrían en mayor grado. Los cargadores son especialmente vulnerables a sobrecorrientes y sobrecalentamiento; teniendo en cuenta que puede tratarse de un componente eléctrico cuyas fallas estén asociadas con corrientes inducidas, se procedió a su estudio por separado.

El test de chi cuadrado de independencia ($\alpha = 0.05$) entre número de incidencias en cargadores por año según actividad geomagnética (dos niveles: $k \geq 4$ y sin actividad) dio significativo, con $p = 0.02$. Esto indica que existe

una asociación entre los niveles de actividad magnética terrestre y el número de fallas registradas en los cargadores de las subestaciones.

Al hallar asociación, se calculó el coeficiente lambda asimétrico con niveles de k como variable independiente. Éste dio $\lambda = 0.33$, lo cual señala que el error cometido en la predicción de una incidencia de cargador disminuiría un 33% si se tuviera en cuenta las tormentas geomagnéticas.

Por otra parte, se calculó el *odds ratio*, dando un valor puntual de $OR = 3.18$ con un intervalo de confianza $IC(0.95) = [1.70 - 5.92]$. El riesgo de que se produzca una incidencia durante los periodos de alta actividad solar es aproximadamente tres veces mayor a la ocurrencia de incidencias cuando la actividad geomagnética es mínima. Al observar el riesgo de acuerdo al intervalo, se puede remarcar que los niveles correspondientes a índices de $k4$ o mayores representan un riesgo real de incidencia en cargadores, entre 2 y 6 veces más. La existencia de asociación entre tormentas magnéticas y fallas en cargadores deja implícita una posible relación entre tormentas y desperfectos en otros componentes eléctricos como lo son transformadores, relés, condensadores, celdas, etc. Además, se debe tener en cuenta que los efectos de sobrecalentamiento de componentes eléctricos pueden ser cumulativos, y por lo tanto no necesariamente vistos durante o inmediatamente luego de una perturbación geomagnética (Pirjola, 1989).

Si bien, como se dijo antes, en la práctica los efectos de las tormentas magnéticas terrestres se detectan más claramente en desperfectos de los componentes de las subestaciones, las corrientes geomagnéticamente inducidas también pueden generar fallas en las líneas de transmisión. Este tipo de incidencias deberían detectarse en el lapso en que se desarrolla la tormenta, por lo que se analizaron las incidencias de tipo sobreintensidad o reconexión en las líneas durante los días de alta actividad geomagnética.

Dentro de las fallas que pueden deberse a variaciones bruscas del campo magnético a nivel terrestre (fallas debidas a sobrecarga o sobrecorriente) se está estudiando la existencia de asociación estadísticamente significativa entre dichos desperfectos y la ocurrencia de tormentas geomagnéticas.

Por otro lado, se estudió cualitativamente la relación entre orientación de las líneas de transmisión y tormentas geomagnéticas intensas.

De la distribución de líneas se puede resaltar que no hay una mayor proporción de líneas con una componente marcada con dirección este-oeste, sin embargo se observa un mayor número de fallas en las líneas con orientación este-oeste durante las fechas correspondientes a tormentas con $k4$ o superior. Además, es de destacar que prácticamente no se registraron incidencias en las líneas dentro de la zona del Gran Montevideo;



estos tramos son demasiado pequeños como para que se originen grandes diferencias de potencial inducida. Finalmente, volcando la atención en el período comprendido entre el 19 de octubre y el 2 de noviembre de 2003, se destacan 22 incidencias que podrían deberse a corrientes inducidas. Más precisamente, sobresalen las siguientes: falla en la línea de 150 kV Paysandú-Curtina el 29 de octubre, falla de un cargador 48 Vcc en la subestación Artigas, falla en relé en la subestación Colonia, nueva incidencia en la línea Paysandú-Curtina, estas tres registradas el 30 de octubre y falla en la vía de comunicación de una subestación de Montevideo el 31 de octubre. Estas fechas corresponden a días en los que ocurrieron numerosas y sucesivas tormentas que llegaron a alcanzar un índice K9.

La distribución de fallas en este lapso es de gran interés. Entre el 19 y 20 de octubre, inicio de la serie de tormentas, se observan 6 incidencias relevantes, luego no se detecta ninguna incidencia hasta el 24 de octubre, día en el que aparecen 4 fallas de interés. Los días 25 y 26 no hay fallas, mientras que durante el período comprendido entre el 28 y 31 de octubre aparecen 11 fallas que están potencialmente relacionadas con sobrecorrientes inducidas. Por último, en los 9 días siguientes sólo se detectaron 2 incidencias de interés. Los valores de K registrados para este período son y se distribuyen de la siguiente forma: la sucesión de tormentas comienza los días 19 y 20 de octubre con valores de $K = 5$, seguidos de dos días sin tormentas hasta 24 de octubre, fecha en la que se registran tormentas geomagnéticas de intensidad $K = 5$, $K = 6$ y $K = 7$. Luego, transcurren 3 días con tormentas de intensidad $K=5$, hasta llegar a los días 29, 30 y 31 de octubre, en los que se alcanza el paroxismo de esta cadena de eventos.

En estas fechas, se producen numerosas y sucesivas tormentas con intensidades de $K = 6$, $K = 7$, $K = 8$ y $K = 9$. Desde el 1 de noviembre al 9 del mismo mes, sólo se producen dos tormentas de intensidad $K = 5$, los días 2 y 3.

Conclusiones

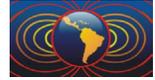
En el presente trabajo, por un lado, se destaca la especial localización de Uruguay en lo que respecta a las características del campo geomagnético. La región en la que nos situamos posee valores de intensidad de campo de los más bajos a nivel global, incluso menores que los predichos por el modelo matemático actualmente utilizado. Esto nos hace sumamente vulnerables a los cambios en la actividad geomagnética y solar, y pone en primer plano la necesidad de una toma de conciencia sobre la importancia de esta temática.

Cualitativamente, las observaciones registradas muestran claras diferencias en los efectos de una tormenta geomagnética sobre el campo a nivel terrestre, en el país con respecto a otros observatorios alejados del centro de la anomalía. Si bien con los datos recabados hasta el momento no es posible teorizar sobre las razones de estas observaciones, es necesario continuar con estos estudios para determinar los orígenes de las diferencias, su relación con la SAMA y cuantificar sus efectos.

Por otro lado, se deja también visible la existencia de posibles asociaciones entre clima espacial extremo y desperfectos en los sistemas tecnológicos del país y del mundo. Tanto las líneas de transmisión eléctrica como los componentes de la red del país parecen verse afectados ante tormentas geomagnéticas aisladas y la persistencia de ellas. Esto no sólo implica grandes pérdidas económicas sino que también interfiere en el funcionamiento diario de la sociedad.

Los resultados presentados aumentan el interés en la temática discutida y generan nuevas interrogantes, por ejemplo relacionadas con los posibles efectos del clima espacial en otras tecnologías, como es la satelital, e incluso en otras áreas como ser la salud y el medio ambiente. Por lo que aquí se expone la importancia de abrir la puerta a nuevas líneas de investigación interdisciplinaria.

A su vez, los resultados obtenidos también podrían ser de utilidad para la creación de políticas para la mitigación de estos efectos. Queda en primer plano la necesidad de establecer protocolos para el monitoreo, manejo y procesamiento de la información, por sus implicancias económicas, sociales y científicas. De esta forma, es posible ahondar en la prevención de potenciales gastos monetarios e inestabilidades en el



funcionamiento de las infraestructuras tecnológicas del país debido a fallas causadas por la interacción con el clima espacial.

Un monitoreo constante del campo magnético terrestre, así como de las condiciones del clima espacial, son la única forma de minimizar los problemas debidos a fuertes tormentas geomagnéticas y de intervenir a nivel tecnológico para fortalecer las infraestructuras amenazadas.

Agradecimientos

Se agradece muy especialmente al Ing. Gabriel Sardi, Asesor del Parque de Vacaciones de UTE-ANTEL, por generar el contacto dentro de UTE y al Ing. Pablo Bergalli, Jefe Departamento de Cables y Líneas - Trasmisión Montevideo, UTE, por proporcionar cordialmente los datos de incidencias en la red eléctrica del país utilizados en el presente trabajo. Este trabajo fue parcialmente financiado con beca ANII de iniciación a la investigación.

Referencias

- TromsØ, Geophysical Observatory Faculty of Science and Technology, University of TromsØ, Norway.
(<http://flux.phys.uit.no/geomag.html>)
Observatorio de Cambridge Bay (www.intermagnet.org)
Pirjola R., 2005. Averages of geomagnetically induced currents (GIC) in the Finnish 400 kV electric power transmission system and the effect of neutral point reactors on GIC. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 67, 701-708.
Pirjola R., 1989. Geomagnetically induced currents in the Finnish 400 kV power transmission system. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 53, 214-220.