

Estudio de la variación solar quieta para el observatorio geomagnético de Fúquene

ROSA ANGÉLICA LADINO PARRA

Posgrado Gerencia de Recursos Naturales

Facultad del Medio Ambiente - Universidad Distrital Francisco José de Caldas

YAQUELINE FIGUEREDO BÁEZ

EMNA MIREYA VALDÉS MENESES

Departamento de Geociencias - Maestría en Geofísica - Universidad Nacional de Colombia

RESUMEN

El estudio realizado comprende el cálculo y análisis de la variación solar quieta (Sq), para el Observatorio Geomagnético de Fúquene a partir de las tres (3) componentes del campo magnético terrestre (CMT): declinación (D), componente horizontal (H) y componente vertical (Z); de los cinco (5) días internacionales quietos de cada mes. El período considerado está entre octubre de 1953 y diciembre de 1994. La metodología desarrollada se basa en el análisis individual de cada día quieto mediante la aplicación de una corrección por variación no cíclica (CVNC) y su reducción a un valor medio cero, realizando el respectivo análisis armónico hasta el grado 4. Posteriormente se aplicó la corrección por achatamiento y se reagrupó la información en tres niveles de actividad solar: alta, media y baja (en función del número de manchas solares); para cada una de ellas se promediaron los armónicos por mes calendario, permitiendo un análisis de la modulación estacional fundamentada en el criterio de promediación de resultados de los meses (solsticio de verano: mayo - junio - julio - agosto; equinoccio: marzo - abril - septiembre - octubre; solsticio de invierno: noviembre - diciembre - enero - febrero). Como validación, se realizaron comparaciones con el modelo de Wallace Campbell, estableciéndose la diferencia de este modelo teórico con la modelación solar para la misma selección de días. A partir de las comparaciones realizadas entre el modelo teórico y el observado se obtuvo el máximo y mínimo valor de Sq. Los resultados obtenidos son de utilidad para el mejoramiento de los modelos globales de variaciones regulares, variación solar quieta (Sq) y modelo del campo geomagnético internacional de referencia (IGRF). Adicionalmente facilita la determinación de modelos de propagación ionosférica y propagación de señales satelitales transionosféricas para sistemas de posicionamiento G.P.S.

PALABRAS CLAVE: CAMPO MAGNÉTICO, VARIACIÓN SOLAR QUIETA, VARIACIÓN CÍCLICA, ESTACIÓN FÚQUENE

ABSTRACT

This study contains the calculation and analysis of Solar Quiet Variation (Sq), for the Geomagnetic Observatory of Fúquene in their three (3) components of Terrestrial Magnetic Field (CMT): Declination (D), Horizontal Component (H) and Vertical Component (Z); of the five (5) internationally quiet days of every month. The considered period is between October 1953 and December 1994. The developed methodology is based on the individual analysis of every day by means of the application of a Correction for non Cyclic Variation (CVNC) and its reduction to a value mean zero, carrying out the respective harmonic analysis until the degree 4. Later on the correction was applied by flattening and the information was regrouped in three levels of solar activity: high, medium and low (in function of the number of sunspots); for each one of them the harmonics were averaged per month. The analysis of the seasonal modulation is based in the approach of average of results of the months (Solstice of Summer: May - June - July - August; Equinox: March - April - September - October; Solstice of Winter: November - December - January - February). As validation, they were carried out comparisons with Wallace Campbell's pattern, settling down this theoretical model's difference with the solar modelation for the same selection of days. Starting from the comparisons carried out among the theoretical pattern and the one observed it was obtained the maximum and minimum value of Sq. This results are useful for the improvement of the global models of regular variations, Quiet Solar Variation (Sq) and International Geomagnetic Reference Field (IGRF). Additionally it facilitates the determination of models of ionospheric and transionospheric propagation for signs satelitales of position systems G.P.S.

KEY WORDS: MAGNETIC FIELD, SOLAR QUIET VARIATION, CYCLIC VARIATION, FÚQUENE'S STATION

INTRODUCCIÓN

El registro diario de las variaciones geomagnéticas sobre cualquier ubicación en el mundo muestra una serie de cambios irregulares en el campo magnético terrestre (CMT), originados por las corrientes provenientes de la atmósfera superior, la magnetosfera y la actividad del Sol. Dentro de estas variaciones se encuentra la solar quieta Sq, la cual se obtiene a partir del estudio y selección de días denominados quietos (Q) o de ac-

tividad mínima para los campos solar y terrestre. Su determinación se da mediante la observación del número de manchas solares y magnetogramas que reflejan cambios principalmente en períodos de 24, 12, 8 y 6 horas.

El estudio de la variación solar quieta para Colombia contribuye al conocimiento general de la actividad solar, permitiendo, principalmente, su uso en el estudio de la propagación de las ondas transionosféricas

para el modelo electrónico de la capa ionosférica y en la modulación del CMT con respecto al ciclo solar.

El presente artículo está basado en el proyecto de grado realizado por las estudiantes Yaqueline Figueredo Báez, Rosa Angélica Ladino Parra y Emna Mireya Valdés Meneses de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en convenio con el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, y la Universidad Nacional de la Plata Argentina. Este trabajo surge ante la necesidad de establecer el comportamiento del campo magnético terrestre local en el nivel de actividad quieto a partir del procesamiento de datos obtenidos en el único observatorio geomagnético permanente del país (Fúquene).

La incorporación de estos resultados a modelos internacionales hacen parte del primer aporte de esta clase realizado en Colombia.

GENERALIDADES

La Tierra se comporta como un imán gigante que, al combinarse con la influencia de la actividad solar, genera una zona de afectación directa conocida como CMT (campo magnético terrestre).

La intensidad del CMT es F (fuerza magnética) de carácter vectorial y sus componentes sobre los ejes son XYZ; la dirección de H señala el norte magnético, el ángulo que forma esta dirección con el norte geográfico es D (la declinación magnética) y el ángulo entre F y la horizontal es I (el ángulo de inclinación) (Udías y Mezcua, 1986). (véase figura 1).

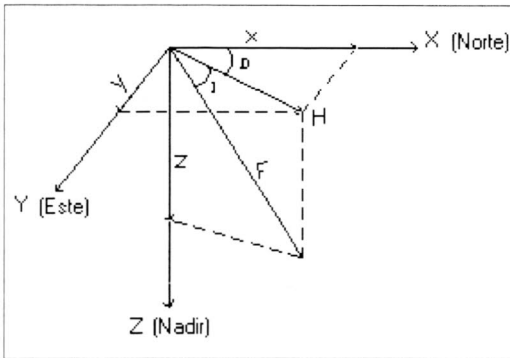


Figura 1. Componentes del CMT

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \tag{1}$$

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} \tag{2}$$

$$D = \text{Tg}^{-1} \frac{Y}{X} \tag{3}$$

$$I = \text{Tg}^{-1} \frac{Z}{H} \tag{4}$$

El CMT está compuesto por un campo magnético interno y un campo magnético externo que dependen directamente de las fuentes; un campo cortical y un campo magnético inducido (véase cuadro 1).

De igual manera, el CMT presenta variaciones de origen externo e interno, permitiendo comprobar varios fenómenos físicos del interior terrestre. Las variaciones externas se emplean para determinar la conductividad

eléctrica de la corteza y manto terrestre a través de los campos inducido e inductor, y las variaciones internas permiten describir los movimientos del flujo de convección en el núcleo, proporcionando información acerca del estado térmico del manto y su composición química (Ratcliffe, 1972).

Las mediciones del CMT y sus componentes se hacen en observatorios permanentes; sus variaciones temporales se registran en un punto fijo de la superficie terrestre, en forma absoluta a través de las componentes D,H,Z; mediante registros continuos de observaciones permanentes (véase figura 2), suministrando información más precisa para la determinación de los valores medios diarios, mensuales o anuales y la variación secular.

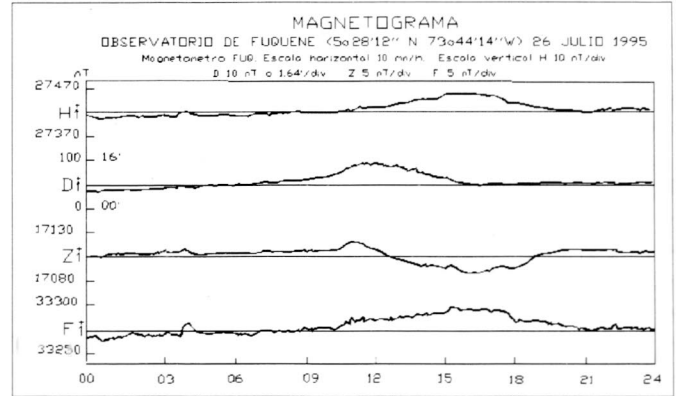


Figura 2. Magnetograma registrado en el Observatorio automático de Fúquene

Estos observatorios se clasifican en convencionales, caracterizados por realizar un registro fotográfico de las variaciones de las componentes, y en automáticos, que registran automática y digitalmente las componentes (Courtillot y Le Mouel, 1988).

En 1948 el Instituto Geográfico Agustín Codazzi se dio a la tarea de estudiar varios lugares que reunieran todos los requisitos indispensables para el establecimiento de un observatorio de esta índole, escogiendo la Isla El Santuario (sitio que actualmente ocupa). En la isla y en los alrededores de la laguna se hicieron observaciones de la declinación con magnetómetros, y se concluyó la ausencia de anomalías magnéticas locales

CUADRO 1. FUENTES QUE AFECTAN EL CMT

	Fuente	Medio	Fenómenos	Acción
Origen Externo	Sol	Atmósfera Magnetósfera	- Transitorios Pulsaciones Bahías Tormentas	Hidromagnética Térmica Ionizante Onda de choque
			- Periódicos Variación anual Ciclo undecenal Variación solar	
	Luna	Atmósfera Magnetósfera	Variación lunar	Gravitacional Hidrotérmica
Origen Interno	Tierra Núcleo exterior	Tierra	Variación secular	Dínamo

que pudieran perturbar los instrumentos (confirmado en 1995 por la Unidad de Geofísica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi).

Localización geográfica : Isla del Santuario en la laguna de Fúquene, Cundinamarca, Colombia.

Latitud	: 05°28'12.044" N	
Longitud	: 73°44'17.133" W	
Latitud geomagnética	: 16°.9 N	(1 997)
Longitud geomagnética	: 355°.1 E	(1 997)
Declinación teórica:	: 1°.0	(1 997)
Altura	: 2 543 m.s.n.m.	

Tanto la selección de la isla, de 0,3 km² de superficie, rodeada por una extensión de 30 km² de agua, como la construcción de los edificios, se hizo de tal manera que no se generan perturbaciones magnéticas artificiales.

Actualmente para el desarrollo del trabajo en el observatorio de Fúquene se cuenta con:

- Magnetómetros de tipo convencional.
- Magnetómetros de precesión de protones (PPM)
- Variómetros.
- Un observatorio magnético automático.
- Magnetómetros horizontales de cuarzo (QHM). (Notas explicativas a la carta geomagnética para la época 1 958.5, IGAC, 1958).

RELACIONES TERRESTRES SOLARES

La relación Tierra - Sol está caracterizada por la interacción de fenómenos físicos y químicos provenientes del Sol y la Tierra, y se desarrollan en la región del espacio cercana a la Tierra (entre 50 y 70 km sobre la superficie terrestre) extendiéndose a decenas de radios terrestres. Sus límites están entre la materia solar y terrestre (véase figura 3). Dichas relaciones incluyen la parte superior de la atmósfera terrestre, la parte exterior del campo geomagnético y las emisiones solares que las afectan (Hargreaves, 1992).

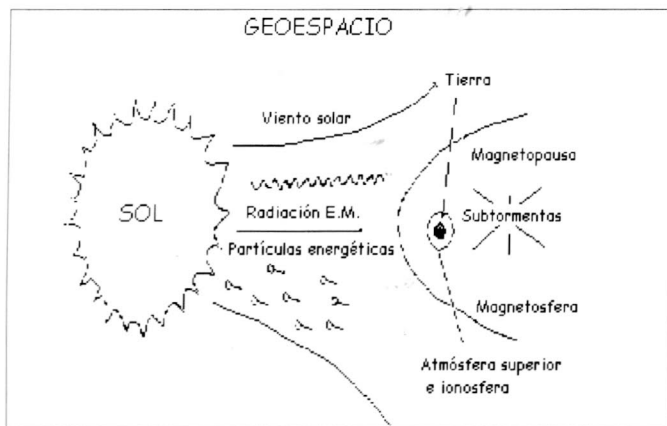


Figura 3. Relación Solar - Terrestre

La actividad solar es la principal fuente de variaciones en el CMT y, a su vez, es el indicador de la actividad magnética que puede ser analizada a partir de fenómenos que se desarrollan en la estructura de la superficie

solar como son las manchas solares. Éstas son áreas oscuras sobre la superficie del Sol, de 50 000 km de diámetro; aparecen por parejas, tanto en el hemisferio norte como en el hemisferio sur. Por la cantidad de manchas solares es posible medir el ciclo de actividad solar que se determina por el número de Wolf (R) (Hargreaves, 1992).

$$R = k (f + 10g) \quad (5)$$

f = número de manchas observadas

g = número de regiones perturbadas o grupo de manchas

k = constante dependiente del observatorio

VARIACIÓN SOLAR QUIETA S_q

La determinación de S_q es de importancia en la corrección de levantamientos magnéticos con fines prospectivos, ya sean globales, continentales, regionales o locales mediante el empleo de un modelo matemático en función de un análisis de los valores medios horarios, suministrados por los observatorios y el Centro Mundial de Datos.

S_q es el cambio mínimo de la actividad magnética observado en el tiempo y en un lugar determinado, producido por la interacción entre el Sol y la Tierra a través de la relación viento solar-CMT. La interacción se presenta en la alta atmósfera a causa del fluido de la corriente dínamo en la región E de la ionosfera, provocada por la acción térmica, ionizante y gravitatoria del Sol (Wallace y Matsushita, 1967).

Los primeros reportes de variación diaria quieta fueron hechos por Hellibrán en 1634 al observar cuidadosamente el movimiento de la punta de una aguja magnética larga. Sin embargo, la variación fue verdaderamente establecida cuando Graham (1724) hizo las primeras determinaciones (calibradas) de los cambios mínimos de la declinación S_q (D). Gauss (1841) desarrolló el método matemático para la separación de las contribuciones externas e internas del campo superficial por medio de un análisis armónico esférico.

Existen muchos aspectos de los cambios de S_q que aún no son suficientemente conocidos como para permitir una predicción de los niveles de variación del campo quieto en todas las posiciones mundiales, como por ejemplo la contribución al campo S_q de las corrientes ionosféricas en las horas nocturnas. La opción es recopilar, procesar y analizar los datos registrados por los observatorios permanentes.

Características

Las principales características de la variación solar quieta S_q son:

- Amplitudes bajas.
- Dependencia de la latitud, de los cambios estacionales y del nivel de actividad solar.
- Su comportamiento indica actividad magnética mínima.
- Sus valores mínimos se presentan en horas de la noche a causa de la disminución en la producción de electrones.
- Variación de su comportamiento en amplitud y fase a través del año, principalmente por el movimiento de rotación de la Tierra con respecto al plano de la eclíptica solar y por la cantidad de partículas que transporta el viento solar al interactuar con la magnetosfera.
- Similitud en sus valores registrados por observatorios localizados a una misma latitud; por consiguiente, para un mejor análisis de su comportamiento, la superficie terrestre se ha dividido en cuatro zonas: ecuatorial, latitudes medias, auroral y polar.

- Su comportamiento sobre la Tierra está influido por el sistema de corrientes propias de la zona; por ejemplo, los observatorios localizados en el área ecuatorial están afectados por la corriente anillo y el electrochorro ecuatorial.
- Presenta un máximo valor por el calentamiento solar durante horas de mayor iluminación.
- La línea base para determinar los cambios de Sq toma como referencia los valores registrados en la medianoche, ya que en este intervalo de tiempo el proceso de ionización es mínimo por la baja densidad de electrones, lo que hace que la corriente eléctrica se acerque a cero (Wallace y Matsushita, 1967).
- Para la determinación de Sq externo en un observatorio, las manchas solares son el elemento que determina la influencia de la actividad solar, principalmente en la capa E de la ionosfera. En la actualidad este valor puede ser estimado por observaciones satelitales (Jacobs, 1987).
- La variabilidad día a día de Sq está más influida por la cantidad de vientos generadores de la marea térmica en la región E de la ionosfera, que por los cambios que presenta el CMT (Jacobs, 1987).

Identificación de Sq

Para determinar Sq se tienen como herramienta primaria los registros (magnetogramas) diarios de las tres componentes del CMT (H, D y Z) obtenidas en los observatorios permanentes. En los magnetogramas se puede observar que hay unos días más perturbados que otros; a los menos perturbados se les denomina quietos y la variación para estos días es llamada variación solar quieta (Chapman y Lindzen, 1970).

La selección de días quietos internacionales (IQ) se efectúa a partir de tres criterios aplicados a cada día de un mes calendario en función de los índices magnéticos.

Índice magnético es un número que representa la amplitud de un parámetro o fenómeno físico en estudio, durante un intervalo de tiempo fijo acorde a las características constantes del fenómeno. Es necesario mencionar que cada valor individual no reemplaza el dato original (Menvielle y Berthelier, 1991)

Los índices magnéticos tienen por objeto suministrar información del nivel de actividad geomagnética y analizar los fenómenos presumiblemente unidos a él; por ejemplo, la estructura de la magnetosfera, la influencia del viento solar y el campo magnético interplanetario (CMI).

Los criterios para definir el día IQ son:

1. Suma de los 8 valores Kp.

$$\sum_{i=1}^8 Kp \tag{6}$$

2. Suma de los cuadrados de los 8 valores Kp.

$$\sum_{i=1}^8 Kp^2 \tag{7}$$

3. Determinación del valor máximo Kp.

$$\{Kp_i\}_i = 1, 2, \dots, \nabla \tag{8}$$

El índice Kp es el índice que permite analizar la actividad magnética para una sola estación o para la actividad solar terrestre total, con

la contribución de los valores trihorarios de los observatorios; éstos son adimensionales. Para la determinación de sus valores a amplitudes medias se asigna a cada índice un número denominado ak, para una sola estación y ap para un conjunto de observaciones (Campbell y Matsushita, 1981).

Estos criterios son asignados con igual peso. En un mes, los días con el quinto número medio más bajo son escogidos como días quietos internacionales, y aquellos con el quinto valor más alto como los cinco días perturbados internacionales. En la actualidad los días son listados de acuerdo con el valor y la escala de quietud o perturbación en un orden cronológicamente ascendente.

Teniendo en cuenta los tres criterios mencionados, los días de cada mes se ordenan en forma ascendente y los de Kp menor corresponden a los días quietos. Es necesario mencionar que el índice Kp es adimensional. Para determinar su valor se hace uso del índice ap, el cual es dimensional con rango de conversión a nT; cada unidad de éste equivale a 2 nT.

Para elegir los cinco días internacionales más quietos se debe cumplir, la siguiente relación:

$$\left[\sum_{i=1}^8 \frac{ap_i}{8} \right] = Ap \tag{9}$$

Si su promedio es menor o igual a 6, se tiene con exactitud un día quieto.

Después de seleccionar los días Q, se organizan en una lista conformada por cinco días calmados internacionales para cada mes. Estas listas son publicadas por la IAGA. Su importancia radica en que los usuarios en diferentes observatorios los emplean para analizar los datos y para comparar los resultados en estos días predeterminados. A partir de estos datos se estima la variación solar quieta en diferentes escalas de tiempo (mensual, semianual, anual y modulación estacional) según los requerimientos del estudio, para uno o varios observatorios, logrando así concluir su respectiva representación.

Representación de Sq

La variación Sq se representa mediante expansión en armónicos esféricos de los 24 valores medios horarios de cada día quieto registrados en el observatorio. En el análisis es necesario tener un conocimiento tanto de las características generales de Sq, como de la minimización de errores de los coeficientes en la serie de Fourier, con el propósito de establecer los armónicos más representativos del fenómeno.

El análisis armónico esférico se caracteriza por:

1. Requerir medidas espaciadas del campo de la Tierra sobre la superficie total de la esfera analizada.
2. Representar con las series una separación de la función del potencial magnético terrestre entre la composición externa (superficie ionosférica) e interna (inducida). El proceso no sólo permite la construcción del sistema de corrientes de la dínamo atmosférica, sino también del campo inducido de información de la conductibilidad terrestre (Chapman y Bartels, 1970).

El proceso de representar una función en la forma de ondas seno se

denomina análisis armónico, y los factores a_n y b_n se denominan coeficientes armónicos. La representación es única y para cada función le corresponde un solo conjunto de amplitudes c_n y fases (n). (Chapman y Bartels, 1970).

Los términos de amplitudes (c_n) y fase (n) de los coeficientes, se representan de la forma:

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (10)$$

$$\varepsilon_n = \arctg \frac{b_n}{a_n} \quad (11)$$

Se representan gráficamente mediante el dial armónico (véase figura 4), donde a_n es medido ascendentemente y b_n a la derecha en un sistema de coordenadas. Cada componente periódica es asociada con un punto P y con las coordenadas a_n , b_n . El vector desde el origen al punto tiene la longitud (amplitud), (n), con valores para a_n , b_n de:

$$\begin{aligned} a_n &= C_n * \text{sen} \phi_n \\ b_n &= C_n * \text{cos} \phi_n \end{aligned} \quad (12)$$

El análisis de las componentes de Fourier proporciona el valor de las variaciones anual y semianual, originados por el calentamiento terrestre; la ionización durante la trayectoria anual alrededor del Sol; la interacción de la magnetosfera terrestre con el viento solar, y efectos asociados con el viento solar y ciclo solar de 11 años (Chapman y Bartels, 1970).

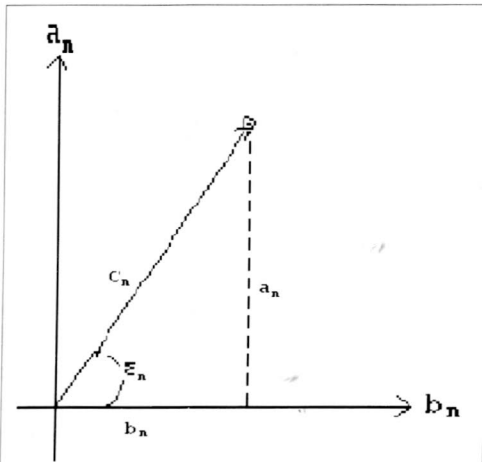


Figura 4. Propiedades de un dial armónico para la onda seno, $a_n \cos nt + b_n \text{seno } nt = c_n \text{seno } (nt + n)$.

METODOLOGÍA

RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

El Observatorio Geomagnético de Fúquene registra los valores horarios de las componentes del CMT H, D y Z, que son recolectados por la Unidad de Geofísica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, presentados en archivos físicos.

ELABORACIÓN DE LA BASE DE DATOS

Se introdujeron los 25 valores medios horarios en tiempo universal (TU)

de cada día quieto (Q), suministrado por el World Data Center y el primer valor medio horario del día siguiente.

CORRECCIÓN DE LOS VALORES MEDIOS HORARIOS POR EL EFECTO NO CÍCLICO (CVNC)

Debido a que el CMT varía al finalizar cada día, se hace necesario corregir la señal por esta variación, mediante el empleo de la siguiente fórmula:

$$CVNC(j) = \left[\frac{Ed25 - Ed1}{24} \right] * j \quad (13)$$

$j =$ Cada una de las 24 horas 1, 2, ..., 24

Ed25= Valor medio horario de la hora 0-1 del día siguiente

Ed1 = Valor medio horario de la hora 0-1 del día Q

El valor medio obtenido se reparte a los 24 valores medios horarios del día Q.

$$Ec_j = Ed_j - CVNC_j, \quad j=1, 2, \dots, 24 \quad (14)$$

$Ec_j =$ Valor medio horario corregido por el efecto de variación no cíclica.

CENTRAR LOS VALORES MEDIOS HORARIOS A UN NIVEL CERO

Se centran los valores medios horarios a un nivel cero para que los datos puedan ser comparados con los datos obtenidos por el modelos de Wallace Campbell. Centrar los valores al nivel cero permitirá un mejor manejo de éstos y su correspondiente análisis.

$$\hat{E}_p = \sum_{i=1}^{24} \frac{Ec(j)}{24} \quad (15)$$

$$\hat{E}_j^0 = Ec_j - \hat{E}_p \quad (16)$$

$\hat{E}_p =$ Promedio de los 24 valores medios horarios del día Q

$\hat{E}_j^0 =$ Valor medio horario centrado en ceros

CLASIFICACIÓN DE NIVELES DE ACTIVIDAD MAGNÉTICA

Se determinaron tres niveles de actividad (alta, media y baja) basados en el número de manchas solares (R) o número de Wolf calculado y suministrado por el World Data Center así:

- Nivel de actividad baja 0 (R (40
- Nivel de actividad alta R (100
- Nivel de actividad media 40 (R (100

Los archivos de cada componente fueron fragmentados de acuerdo con el número de manchas solares.

MÉTODO DE ANÁLISIS ARMÓNICO DIARIO

Se realizó el análisis armónico clásico del día Q corregido por variación no cíclica, determinándose los componentes armónicos hasta el orden $n = 4$.

$$a_n = \frac{1}{12} * \sum_{t=1}^{24} Ec(t) \cos(\omega_n * t)$$

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{24}$$
(17)

$$b_n = \frac{1}{12} * \sum_{t=1}^{24} Ec(t) \text{sen}(\omega_n * t)$$
(18)

Fue necesario emplear un programa de análisis armónico que se aplicó a cada día Q en particular elaborado en QBASIC denominado ARMONICO.BAS, obteniendo para cada día cuatro (4) coeficientes armónicos an y cuatro (4) coeficientes bn.

Se promediaron los coeficientes armónicos en cada nivel de actividad solar en función del mes y quedando en archivo de 12 filas (por cada mes) y 8 columnas que representan los 8 coeficientes. Cada coeficiente an y bn se corrigió por el efecto achatamiento (Véase cuadro 2).

CUADRO 2. CONSTANTES APLICABLES A LA CORRECCIÓN POR EFECTO DE ACHATAMIENTO

Armónica No.	Periodo(horas)	Kn (radianes)
1	24	1.002862
2	12	1.011515
3	8	1.026172
4	6	1.047198

$$K_n = \frac{\left(\frac{\pi n}{24}\right)}{\text{Sen}\left(\frac{\pi n}{24}\right)}$$
(19)

$$a_n^* = a_n \cdot K_n$$

$$b_n^* = b_n \cdot K_n$$

Coeficientes corregidos

A partir de los coeficientes an* y bn* corregidos por el efecto achatamiento, se determina su amplitud y fase:

$$C_n = \sqrt{a_n^{*2} + b_n^{*2}} \text{ Amplitud}$$

$$\phi_n = \text{arctg} \frac{b_n^*}{a_n^*} \text{ Fase}$$
(20)

Éstos se graficaron en los diales armónicos para su respectivo análisis en función del nivel de actividad solar.

Se utilizaron coeficientes Fourier de grado 1, 2, 3 y 4 porque representan adecuadamente la variación diaria quieta de forma real; éstos se ajustan mejor debido a que las principales características de Sq se observan en el período diurno reflejado en el primer armónico.

SÍNTESIS ARMÓNICA DEL DÍA Q

A partir de los 8 valores promedio en cada nivel de actividad, se realizó el cálculo de la variación solar quieta, Sq, empleando el programa SÍNTESIS.BAS, elaborado en QBASIC, suministrado por la Universidad Nacional de La Plata, empleando la formula:

$$SqE(t) = \sum_{n=1}^4 a_n^* \cos \frac{2\pi n}{24} t + b_n^* \text{sen} \frac{2\pi n}{24} t$$

$$t = 1, 2, \dots, 24$$
(21)

E(t) = Para la declinación, componente vertical o horizontal, obteniendo así la Sq observada para cada mes y nivel de actividad solar.

CÁLCULO DE LA VARIACIÓN SOLAR QUIETA SQ TEÓRICA EMPLEANDO EL MÉTODO DE WALLACE CAMPBELL

Para calcular la Sq teórica se empleó un modelo definido por Wallace Campbell que tuvo como punto de referencia los tres años de mínima actividad magnética (1961, 1962 y 1963). Éste consiste en un modelo idealizado calculado a partir de un análisis armónico de grado 4 en función de la latitud, longitud, altura de la estación, y de una correlación con el IGRF y las amplitudes de los armónicos.

Se utilizó el programa WDCA-SQ2.EXE elaborado en FORTRAN (Síntesis del campo del modelo global Fourier con el modelo de superficie magnética WDCA-CAMPBELL para condiciones extremadamente quietas) proporcionado por el World Data Center y modificado por el Departamento de Magnetismo Terrestre de la

Universidad Nacional de La Plata (Argentina), cuyos datos de entrada al programa (véase cuadro 3) son las coordenadas de la estación y las fechas en que se desea calcular la Sq teórica. Este modelo se caracteriza por no tener incorporada la actividad solar en cada uno de los resultados, convirtiéndose así en el mejor parámetro de comparación con el modelo calculado (Sq observada) a partir de los datos registrados en el Observatorio Magnético de Fúquene.

CUADRO 3. ESQUEMA DE ENTRADA DE DATOS AL PROGRAMA

nombre componente	HB	
Latitud - longitud	5.2812044	286.558286
tiempo universal	2	
intervalo 30 minutos	30	
	Día	mes
	1	1
	2	1
	9	1
	26	1
	28	1
		año
		1976
		1976
		1976
		1976
		1976

El programa genera el valor de la Sq para las componentes (H, D, Z, X, Y) en Gammas; la Sq observada en la componente D se obtuvo en minutos, por lo cual se hizo necesario convertir la Sq teórica en la componente D a minutos, mediante la formula:

$$D = \operatorname{tg}^{-1} \frac{Y}{X} \quad (22)$$

La Sq teórica es un modelo de resultados generado por el programa WDCA-SQ2.EXE después de una selección de datos requeridos y ordenados de tal forma que permitan una fácil manipulación.

CORRELACIÓN DE RESULTADOS

Se procedió al correspondiente análisis mediante comparación de los resultados obtenidos a partir de los datos observados y de los resultados generados por el programa WDCA - SQ2.EXE (WALLACE CAMPBELL). Esta comparación se realizó sobre las bases de datos y gráficas generadas.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos se generaron teniendo en cuenta:

1. El análisis de la variación solar quieta Sq observada y la variación solar quieta Sq teórica en los tres niveles de actividad solar (alta, media, baja) de los períodos mensuales para las tres componentes del CMT (H, D, Z).
2. El análisis de la modulación estacional de Sq (equinoccio, solsticio de invierno, solsticio de verano).
3. El análisis de la variación Sq resultante de la diferencia entre la Sq teórica y la Sq observada.
4. El dial armónico, las amplitudes y fases de los armónicos generadores de Sq, dando lugar a las siguientes conclusiones:

La obtención de la variación solar quieta Sq para Fúquene así como para otros observatorios magnéticos en el mundo no representa un verdadero nivel quieto, porque ante todo la Tierra siempre está afectada por perturbaciones (internas y externas), así como por su constante movimiento, impidiendo que se obtenga un verdadero modelo de quietud. Aunque Fúquene se caracteriza por estar ubicado en una zona aislada de anomalías locales, por el rigor en la toma de datos y por su permanencia en el tiempo.

La obtención de la variación solar quieta Sq mediante el método de análisis armónico esférico para el Observatorio Geomagnético de Fúquene permitió llegar a un valor exento de una serie de perturbaciones y efectos planetarios globales, ya que se empleó una sola latitud en el análisis ($5^{\circ}28'44''$) para reducirlo a un valor afectado por perturbaciones características de la región como el electrochorro ecuatorial y la corriente anillo.

Los valores medios horarios observados en las tres componentes del campo magnético terrestre se ven afectados por variaciones reflejadas en las diferencias de valor en los intervalos 0-1 y 23-24 de un mismo día, indicando el efecto de corrientes de la zona y variación del CMT; al emplear la CVNC se redujo a su mínimo valor el efecto de la corriente anillo en Sq, en la componente H.

Se determinó la Sq mensual y estacional porque son períodos representativos de la actividad solar, a fin de obtener un comportamiento general y no particular, debido a que este último limita el análisis a la obtención de un valor.

En la componente Z, la Sq obtenida se ve alterada debido a la presencia de corrientes inducidas del campo interno, siendo proba-

blemente la principal fuente de error en el análisis (manto superior y características geológicas).

El mínimo rango de la corriente Sq se presentó en diciembre y enero para los niveles de actividad alta y baja.

El máximo valor de la variación solar quieta se da en horas de la tarde, indicando que en este intervalo la actividad solar tiene su mayor efecto.

Fúquene presenta su máxima variación estacional durante el equinoccio, con un valor máximo de 38 gammas y mínimo de 2 gammas para las componentes H y Z. Excepto la componente Z, en el nivel de actividad bajo, tiene su máxima variación en el solsticio de invierno con una amplitud de 2.7 gammas.

Al emplear el análisis Fourier se logró obtener la variación anual y semianual de Sq representada en los coeficientes (a1,b1) y (a2,b2), así como los cambios en amplitud y fase para los meses por separado en el Observatorio Geomagnético de Fúquene en las tres componentes (H, D, Z) del campo magnético terrestre.

Al final aparece la representación gráfica del comportamiento de la variación solar quieta Sq, para las componentes magnéticas H, D y Z en los niveles de actividad alta, media y baja para el Observatorio Geomagnético de Fúquene (véanse figuras 5, 6 y 7).

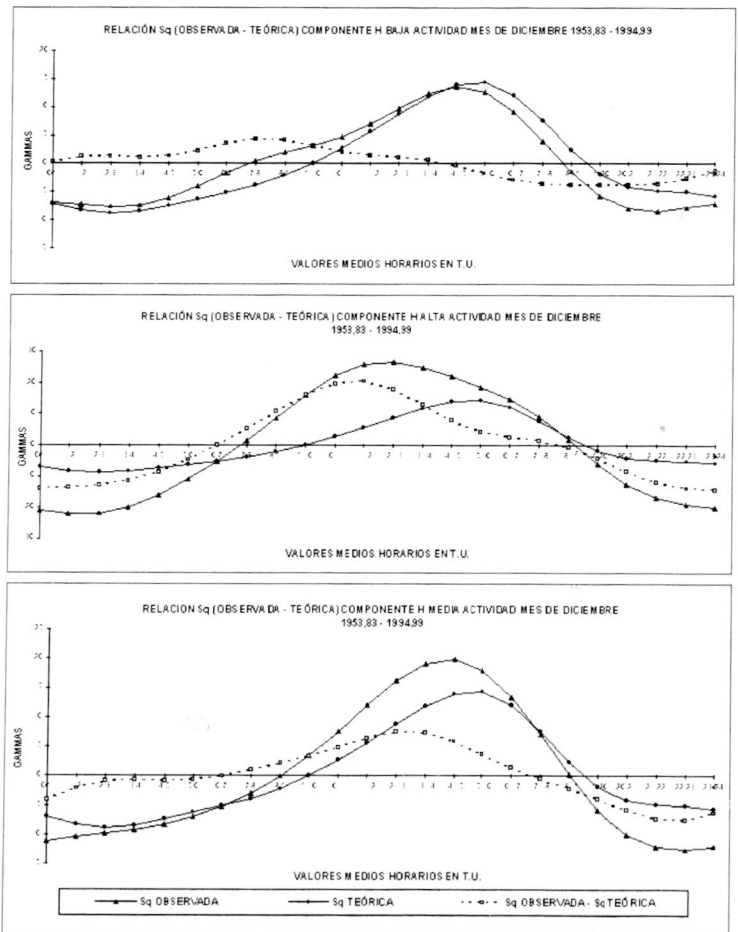


Figura 5. Gráficos de la variación solar quieta Sq para la componente magnética H en los niveles de actividad alta, media y baja para el Observatorio Geomagnético de Fúquene

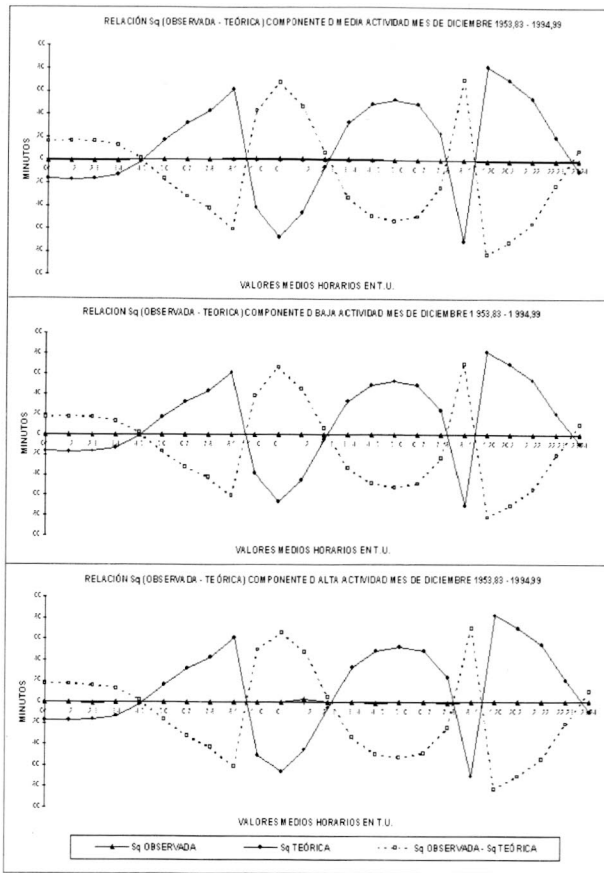


Figura 6. Gráficos de la variación solar quieta Sq para la componente magnética D en los niveles de actividad alta, media y baja para el Observatorio Geomagnético de Fúquene

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHAPMAN, S., and BARTELS, J. 1940: Geomagnetism Analysis of the Data and Physical Theories: Oxford at the Clarendon Press, 2, 545-603, 606-637, 639-668, 669-681, 684-697, 699-794.

CHAPMAN, S., and LINDZEN, R. 1970: Atmospheric Tides: Reidel Publishing Company, 1, 1-23, 24-44, 66-104, 106-171.

COURTILLOT, V., and LE MOUËL, L. 1988: Time Variations of the Earth's Magnetic Field: Reviews Earth Planet, 16, 389-473.

HARGREAVES, J. M. 1992: The Solar Terrestrial Environment an Introduction To Geospace, The Science of The Terrestrial Upper Atmosphere, Ionosphere and Magnetosphere: Cambridge University Press, 1, 1-4, 6-43, 44-96, 98-130, 132-205, 208-247, 249-310, 312-362, 364-388, 390-413.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. 1958: Notas explicativas a la carta geomagnética para la época 1958.5.

JACOBS, J. A. 1987: Geomagnetism. New York and London: Academic Press, 1, 1-527, 2, 1-571, 3, 1-623.

MENVILLE, M., and ERTHELIER, A. 1991: The K-Derived Planetary Indices: Geophysics, 3, No.3, 415-432.

RATCLIFFE, J. A. 1972: An Introduction the Ionosphere and Magnetosphere: Cambridge University Press ; 9-21, 37-99.

UDIAS, A. y MEZCUA J. 1986: Fundamentos de Geofísica. Madrid: Alambra, 223-255.

WALLACE, C., and MATSUSHITA, S. 1967: Physics of Geomagnetic Phenomena: Academia Press, 1, 67-98, 181-295, 302-622, 2, 627-900, 913-1101.

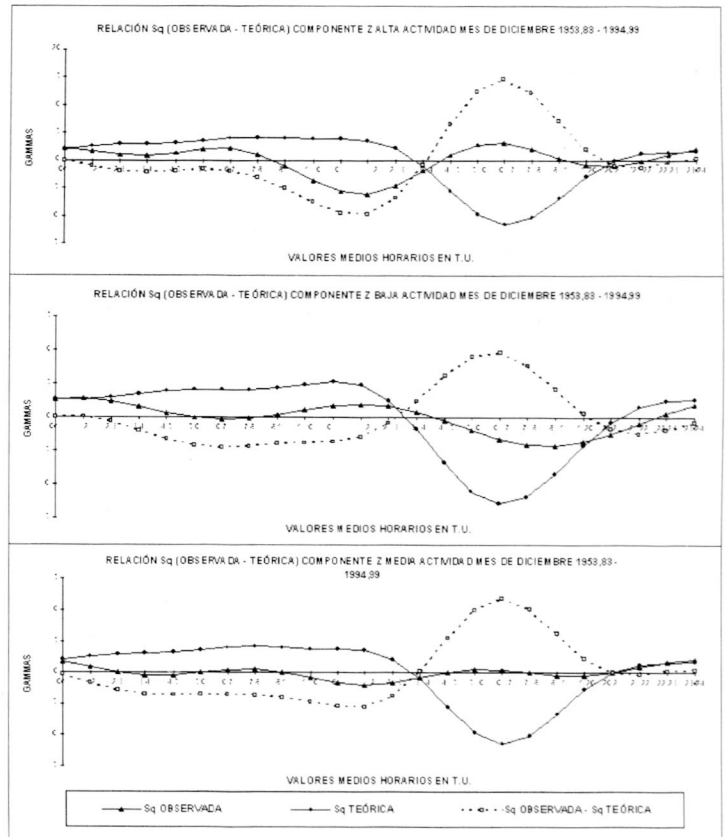


Figura 7. Gráficos de la variación solar quieta Sq para la componente magnética Z en los niveles de actividad alta, media y baja para el Observatorio Geomagnético de Fúquene