



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

"REGISTRO Y CORRECCION DE EFECTOS ATMOSFERICOS EN LOS DATOS DE MUONES DE C.U., D. F."

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

F I S I C O

P R E S E N T A :

ALBERTO HERNANDEZ GARCIA



DIRECTOR DE TESIS: DR. JOSE FRANCISCO VALDES GALICIA



2004

FACULTAD DE CIENCIAS
SECCION ESCOLAR



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNAM - C...
CONTEN...
NOMBRE: Alberto Hernández Isacela
FECHA: 22 Oct - 04
FIRMA: [Signature]

ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:

"Registro y corrección de efectos atmosféricos en los datos de Muones de C.U., D.F."

realizado por Alberto Hernández García

con número de cuenta 9355115-7 , quien cubrió los créditos de la carrera de: Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis

Propietario Dr. José Francisco Valdés Galicia [Signature]

Propietario Dra. Beatriz Elizabeth Fuentes Madariaga [Signature]

Propietario Dr. Efraín Chávez Lomeli [Signature]

Suplente Dr. Jorge Pérez Peraza [Signature]

Suplente Dr. Lukas Nellen Filla [Signature]

Consejo Departamental de Física

[Signature]

DRA. PATRICIA GOLDSTEIN MENACHE
Coordinadora de Licenciatura

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Agradecimientos.

Agradezco al Dr. José F. Valdés por su apoyo económico y moral, así como sus consejos. También agradezco los consejos y apoyo de los investigadores del departamento "Investigaciones Solares y Planetarias" del Instituto de Geofísica. Agradezco también a los profesores de la Facultad de Ciencias que supieron impartir sus conocimientos. A mi padre Arturo Hernández, a mis hermanos Javier, Luis, Verónica y familiares que siempre estuvieron conmigo.

...el polvo que cubrió de angustia ese salin blanco, ha permitido culicinar entre sellos de elocuencia una vaga interpretación del eterno caminar que asomé su bienestar de semblante inocuo, entendiéndose si su privada canción ha dejado huellas de primavera en el pasar de las horas de vida esencia, casi como el temprano día que resultó ser efímero ante los ojos de un palmar casi yerlo, el cual pretendía ese día comenzar a repetir su nombre; le corté una forma y esta emigró a través de esos susurros de misterio y tristeza, casi asemé ante una grieta estuana y la luz que habitó ahí, rompia a carcajadas tal vez por que el encuentro taciturno le conmovió hasta detener el encanto de una mejilla hendida. Acercábase ya en la alta aurora ese recuerdo vago que inundó la sed del campesino emigrante y que sonaja a la más sutil palidez de rostro secreto... y se movió su sombra y se encuentra en una canción atrevida, algo llana pero llena de nostalgia ante ese reprimido mito de la verdad viajera que comienza a permitir una pureza en ese aire tan híbrido de humedad y de censura. En el trastabillar del camino vi temeroso ese asemé de líquido perfume desvaneciéndose en los alrededores de una prisión aun más distraída y consolante que el estríber que un marino seduce.... ante dicha transparencia de genialidad, se fueron destizando por la fisura del tedio aquellos versos resplandecientes de verdad y energía ajena que recibían ante un sífen de pretensiones acorraladas, casi inmóvil esa desticha del rincón predilecto que a luz de vela emigra sobre tu hombro. Este metal que cambió de rumbo su mentina, es delicado y frágil como el aroma de una rosa que sonaja la mejilla de la orquídea blanca y a trasluz deja esperar a que su caso le de permiso de ser etérea. Si el alma quedó sensible y el camino es el preñil de la aventura, que entene a vez de silencio la ansia de esturir que queda inmóvil y serio; le ha de seguir una historia de sueños en los que su infancia ha mejorado ese despertar colidiano, que cubren en los rincones de calles poco atrevidas y llenas de idea y de canción, aunque se esfume la tarde, la sencillez de su foto permanecerá ahí, atrevida y extraviada y queda decir que será traviesa y el silencio de su llanto preveca amistad en partes que son una misma y que dividen sin embargo esa angustia del ser y de la vez...

Si te arrolla en su huida, tal vez comience a borbotear digna alegría que el machete confesó y ha dejado flotar en el recuerdo de su nombre; camino no te pierdas y tus piedras encontrará ante su imagen de visión algo fatua y espontánea como el aleteo de un colibrí, así de espontáneo, así de sencillo...

Índice

Pág.

I Los rayos cósmicos.

1.1.	Breve historia	1
1.2.	Espectro	4
1.3.	Composición química	7
1.4.	Radiación cósmica secundaria	9
1.5.	Muones en la radiación cósmica secundaria	11

II El Sol y los rayos cósmicos.

2.1.	El sol y el medio interestelar	13
2.2.	Actividad solar	15
2.3.	Modulación de rayos cósmicos por el sol	21
2.4.	Detectores terrestres de la radiación cósmica	24

III El telescopio de muones.

3.1.	El telescopio de muones	27
3.2.	Principios generales	28
3.3.	Telescopios de centelleo	28
3.4.	Plásticos centelladores	29
3.5.	Características físicas de los centelladores	30
3.6.	Sistemas de guía de luz	31
3.7.	Geometría del sistema y diagramas direccionales	32
3.8.	Características energéticas	35
3.9.	Principales características del sistema	38
3.10.	Electrónica asociada	39
3.11.	Circuitos electrónicos	41

IV Efectos atmosféricos en rayos cósmicos secundarios.

4.1.	Efectos atmosféricos en rayos cósmicos secundarios	43
4.2.	Análisis de las variaciones de origen atmosférico	44
4.3.	Variaciones temporales de origen atmosférico sobre la componente nucleónica	46
4.4.	Efectos atmosféricos en la intensidad de muones	47
4.5.	Efecto de presión en muones	59
4.6.	Efecto de temperatura en muones	50

V Corrección de los efectos atmosféricos en los datos de muones del telescopio de C.U.

5.1.	Introducción (coeficiente barométrico)	51
5.2.	¿Cómo son afectados los muones, por la presión y la temperatura?	52
5.2.1.	Correlación múltiple de presión y temperatura en superficie (Duperier)	53
5.2.2.	Perfiles de temperatura (Dorman)	54
5.3.	Correcciones por efectos atmosféricos	58
5.3.1.	Correlación múltiple	55
5.3.2.	Corrección por perfiles de temperatura	58
5.4.	Conclusiones	68
6.1.	Referencias	69
	Glosario	70

Capítulo I

I.- Los rayos cósmicos (Introducción)

1.1.- Breve historia.

La historia de los rayos cósmicos se inició en 1887 con los trabajos que W. Linss realizó en este campo. Linss observó que un cuerpo cargado al ser expuesto al aire, perdía la carga eléctrica; este descubrimiento importante, llevó al físico austriaco F. Exner, a diseñar una red internacional de observatorios para estudiar fenómenos eléctricos atmosféricos, usando para ello electroscopios portátiles.

Entre los años 1898 y 1900, fueron realizados dos estudios del fenómeno de la descarga de los electroscopios, el primero, se llevó a cabo en Alemania por J. Elster y H. Geitel; y el segundo, fue desarrollado por C. Wilson en Inglaterra. Ambos estudios consistieron en montar un electroscopio cargado sobre un soporte aislante, el cual estuvo conectado a una fuente eléctrica, con el mismo potencial que el electroscopio. Con este dispositivo experimental se inhibió la fuga de carga eléctrica, de tal manera que si hubiera una pérdida de la misma, esto significaría que los iones en el aire recolectados por el electroscopio, neutralizarían la carga. También se encontró que en el interior del espectroscopio, la conductividad del aire era constante a pesar de la extracción continua de iones vía la aplicación de un campo eléctrico externo, este resultado condujo a Wilson a proponer la existencia de una radiación extraña que continuamente regeneraba los iones del aire que se encontraba en el interior del dispositivo.

A finales del siglo XIX, se realizaron varios experimentos en la atmósfera para conocer el grado de ionización de los gases; para ello se utilizaron radioisótopos colocados a diferentes alturas, midiendo el grado de ionización del aire. En estos experimentos se esperaba encontrar que el grado de ionización del aire, disminuyera con la altura; una vez que se iba aumentando la altura y se realizaban las medidas, estas concordaban con lo esperado en las primeras decenas de metros sobre la superficie terrestre, sin embargo para alturas de algunos kilómetros, el grado de ionización aumentaba.

A principios del siglo pasado, T. Wulf (1910) y A. Gockel (1910,1911) midieron el grado de ionización del aire a diferentes alturas utilizando instrumentos similares. El primero tomó mediciones hasta 300 m de altura, y el segundo hasta 4500 m. Ambos investigadores encontraron que la ionización disminuye con la altura aunque las variaciones fueron menores a las esperadas.

Entre 1911 y 1913 Hess emprende una serie de diez ascensos en globo, llevando consigo varios electroscopios herméticamente cerrados y observó que a 500 m de altura, la ionización era aproximadamente 2 veces menor que el valor medido en la superficie, a los 1500 m era igual y de los 1800 m hacia arriba, el aumento era evidente. A los 3500 m el incremento era 4 veces el valor obtenido sobre superficie, y 16 veces a los 5000 m, sin encontrar diferencia alguna entre el día y la noche especulándose que el aumento de la ionización podría provenir de un tipo de radiación muy penetrante de origen atmosférico.

Poco después W. Kolhörster, en Alemania, basándose en las observaciones de Hess, confirmó que para alturas mayores, la ionización iba en aumento. C. Wilson, sugirió que esa radiación podía ser producida por tormentas eléctricas a grandes alturas en la atmósfera, mientras que otros físicos sugirieron que la atmósfera podía contener pequeñas cantidades de elementos radiactivos en estado gaseoso.

Los experimentos anteriores motivaron a R. Millikan y colaboradores para emprender una serie de nuevos experimentos en los que midieron la intensidad de la radiación tanto a grandes alturas como por debajo de la superficie del agua y concluyeron que la totalidad de esta radiación penetrante era de origen local, bajo la hipótesis de que existía una gran acumulación de material radiactivo, en la troposfera.

Años más tarde (1926), los experimentos realizados en los lagos Muir y Arrowhead a 3590 y 2060 m sobre el nivel del mar, convencieron a Millikan, de que el origen de dicha radiación era extraterrestre, bautizándola con el nombre de rayos cósmicos. Para llegar a esta conclusión, Millikan realizó mediciones utilizando la equivalencia que había entre 2 m de agua (ver figura 1.1) y la columna atmosférica para absorber la radiación.

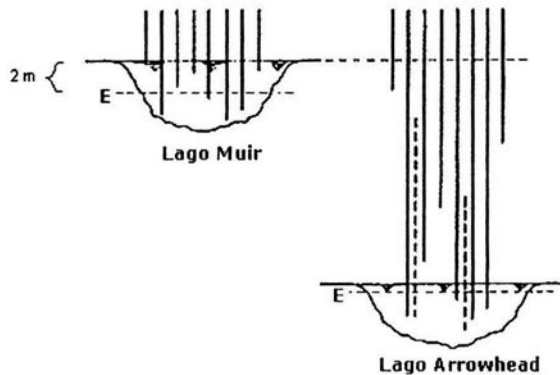


Figura 1.1 Los 2 m de agua fueron tomados con el fin de igualar la presión atmosférica en ambos lados debido a que se encontraban a diferentes altitudes.

A partir de los experimentos de Millikan, se desarrolló una serie de técnicas para medir la radiación cósmica. Una de ellas consistió en la construcción de un dispositivo experimental formado por contadores Geiger (telescopio contador), los cuales estaban conectados a un módulo de coincidencia. Esta técnica fue utilizada por Bothe y Kolhörster (1931).

Con telescopios contadores fue posible no sólo mostrar que lo que llegaba a la superficie eran partículas cargadas, sino también observar la dirección en que dichas partículas viajaban. Usando ese tipo de detectores muy pronto se mostró que esas partículas venían principalmente de la dirección vertical y que su intensidad se reducía considerablemente al inclinar el telescopio.

En nuestro país también se han llevado a cabo experimentos relacionados con los rayos cósmicos, sobresaliendo el realizado por Luis W. Álvarez discípulo de Arthur H. Compton en la azotea del Hotel Gêneve, de la Ciudad de México. Luis Álvarez colocó dos contadores Geiger sobre la tapa de una caja de madera colocada en una carretilla de albañil, fijando la posición de la tapa de tal modo que los contadores apuntaran a un cierto ángulo cenital e hizo girar la carretilla de manera que primero tomara medidas de la radiación del lado este y después del oeste. El resultado fue que la intensidad medida en el oeste fue 10% mayor que la medida en el este, indicando que la radiación cósmica primaria, es decir la radiación cósmica proveniente de fuera de la atmósfera, estaba constituida principalmente por partículas positivas, es decir, protones o núcleos atómicos pero no electrones.

Experimentos posteriores mostraron la verdadera naturaleza de la radiación incidente en la Tierra, la cual no fue realmente determinada sino hasta finales de 1940, cuando se llevaron a cabo experimentos con emulsiones fotográficas a grandes alturas, con estos experimentos se pudo determinar que la radiación primaria consiste en protones, partículas α y núcleos más pesados.

1.2.- Espectro.

Una característica que distingue a la radiación cósmica galáctica, es el espectro de energía; ⁽¹⁾ el cual se extiende sobre 14 órdenes de magnitud y puede ser dividido en 4 regiones características: (Ver figura 1.2).

- a) Por debajo de energías de 10^9 eV /nucleón, tenemos una región característica donde los procesos de modulación solar ⁽²⁾ son importantes.
- b) Para el intervalo de energías desde 10^9 eV /nucleón a 10^{16} eV /nucleón, domina una ley de potencias en esta región.
- c) Entre 10^{16} y 10^{19} eV /nucleón, el espectro sigue también una ley de potencias pero cambia su pendiente respecto a la región anterior. Aquí los rayos cósmicos son probablemente de origen galáctico, pero sus fuentes son aun desconocidas. La mayor parte de estos rayos cósmicos se origina muy probablemente en los remanentes de supernovas.
- d) Por encima de 10^{18} eV /nucleón, tenemos una región más probablemente dominada por rayos cósmicos extra-galácticos.

De esta manera en la región por debajo de 10^9 eV, las partículas con baja energía son susceptibles a las fluctuaciones del campo magnético interplanetario; es decir, que no tienen suficiente energía como para oponer resistencia y de este modo ser desviadas por el campo magnético. Debido a la energía total, el momentum, la rigidez y la modulación del Viento solar, el flujo de rayos cósmicos obtenido en esta región varía y depende de la fase del ciclo solar. El flujo mayor es obtenido durante periodos de mínima actividad solar, mientras que flujos menores son obtenidos durante periodos de máxima actividad solar.

El espectro de los rayos cósmicos muestra una región llamada "rodilla" la cual representa una variación en la razón de cambio del flujo de partículas, alrededor de 10^{16} eV; la existencia de esta región podría ser explicada suponiendo un confinamiento de esas partículas muy energéticas y esto a su vez puede indicar una transición entre mecanismos de fuente o aceleración de partículas. Por otro lado, se ha detectado además la presencia de una pequeña proporción de electrones y de fotones, poniendo de manifiesto que el flujo de rayos cósmicos disminuye muy rápidamente con la energía E, siguiendo una ley potencial $E^{-\gamma}$.

Hasta energías de 10^{16} eV, γ tiene un valor de 2.7 posteriormente, a energías mayores, la pendiente aumenta y γ se aproxima a 3, entonces tenemos una disminución mayor en el flujo. Finalmente, los pocos rayos cósmicos observados con energías comprendidas entre 10^{19} y 10^{20} eV parecen indicar que el espectro es más plano en esta zona, es decir, que esta brusca disminución del flujo cesa.

¹ El espectro de energía de la radiación cósmica primaria, nos describe cómo están distribuidas con respecto a las energías las diferentes componentes de ésta.

² Procesos por los que el flujo de radiación proveniente del Sol, se ve afectado.

Más allá de 10^{19} eV, las partículas son atribuidas a una fuente extragaláctica, debido a que con esa energía su radio de Larmor ⁽³⁾ correspondiente debido a un campo magnético galáctico de 3×10^{-6} gauss aproximadamente, es mayor al espesor del disco de la galaxia. Así como para energías más bajas, las partículas corresponderían a un origen de tipo galáctico, en el intervalo 10^7 y 10^{19} eV.

Una fuente adicional de información sobre la radiación galáctica puede ser obtenida a través de medidas de la anisotropía. ⁽⁴⁾ Debajo de 10^{16} eV, la anisotropía es casi despreciable; gradualmente se incrementa hasta los 10^{19} eV, la correlación que hay entre el espectro de energía y la amplitud de la anisotropía, ha sido interpretada como evidencia de que un confinamiento o escape de partículas cósmicas en la galaxia es responsable de la rodilla espectral.

³ Una partícula cargada, viaja en el espacio a través de una trayectoria helicoidal, debido a que el campo magnético interplanetario le obliga a tomar esa trayectoria. El radio de giro de la partícula, dependerá de la energía que transporta. Para un radio de giro grande, la partícula necesitará más energía que para un radio pequeño, debido a que si tiene más energía, se resistirá más a seguir tal trayectoria. Al radio de giro de dicha partícula se le conoce como radio de Larmor.

⁴ Cuando existen direcciones por las cuales la intensidad de radiación cósmica es mayor que en otras, decimos que hay una anisotropía.

Espectro de rayos c3smicos

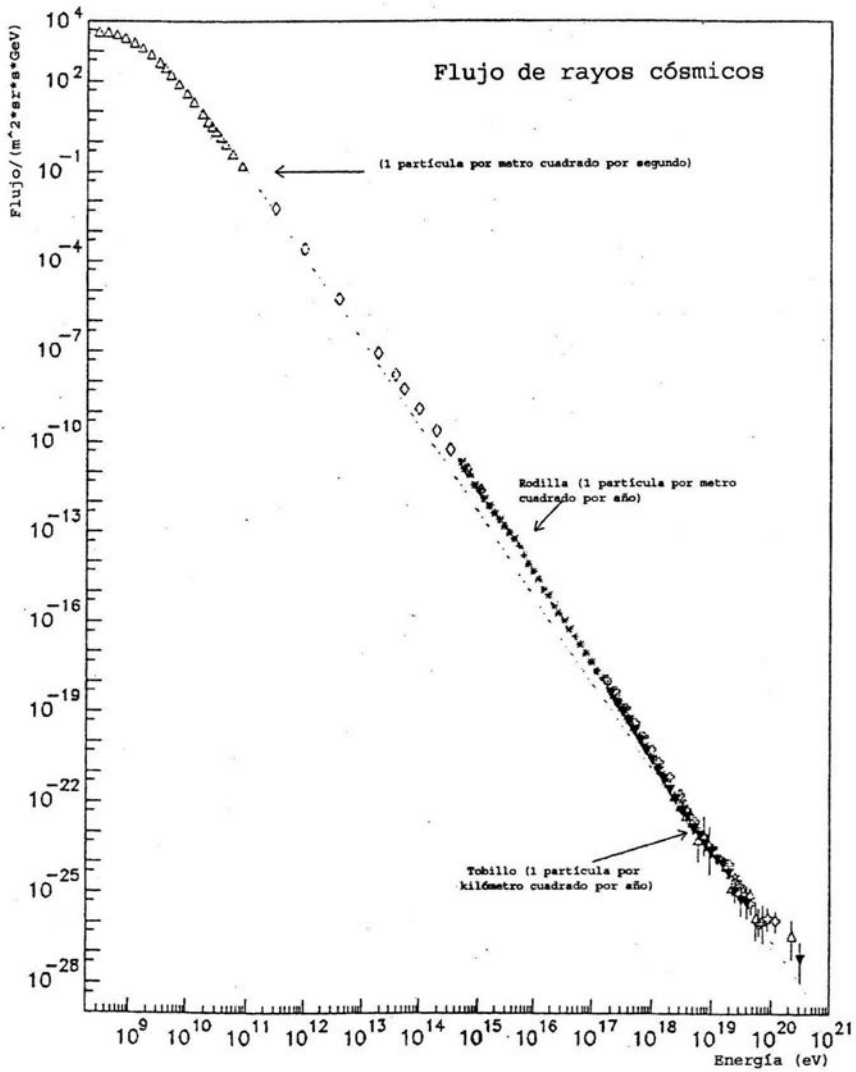


Figura 1.2 Resultados de mediciones muestran que las abundancias relativas de los elementos en rayos c3smicos, escasamente varían respecto a partículas con energías de 10 MeV/nucle3n a unos cuantos GeV/nucle3n. La lnea punteada muestra una ley de potencias E^{-3} .

1.3.- Composición química.

La composición química de los rayos cósmicos estudiada desde el punto de vista de abundancias relativas de los distintos núcleos, es muy similar a la del sistema solar (ver figura 1.3), de forma que la mayor parte de los rayos cósmicos son protones (núcleos de H en un 93%) y partículas α (núcleos de He en un 6%) encontrándose también núcleos de número atómico intermedio entre los que destacan los de C, N y O y elementos pesados entre los que predominan los núcleos de Fe.

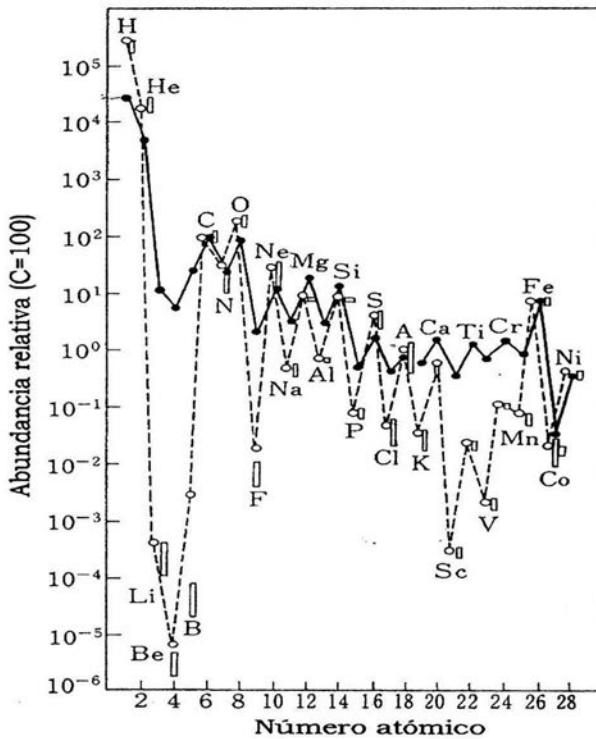


Figura 1.3 Comparación de la composición observada entre núcleos de rayos cósmicos galácticos (línea continua) y composición química de galaxias locales (línea punteada). Tomado del libro Cosmic Ray Astrophysics- M. Oda, Nishimura.

De la figura 1.3 se observa que:

1.- Los núcleos tales como litio, berilio y boro se observan en mayor abundancia en los rayos cósmicos que en los observados en la galaxia; esto es debido a que los núcleos más pesados (núcleos con peso atómico mayor al Fe), son fragmentados en su recorrido, en estos núcleos más ligeros.

2.- A partir del neón ($Z=10$), las diferencias entre las abundancias relativas de núcleos de número atómico consecutivo en el sistema solar, son grandes. Estas diferencias son más grandes en los rayos cósmicos (si comparamos las longitudes de las líneas punteadas, éstas son mayores a las longitudes de las líneas continuas).

3.- Para el hidrógeno y el helio son relativamente menos abundantes en los rayos cósmicos que en el sistema solar; la diferencia es aproximadamente un factor de 10. En contraste con esto, las sobreabundancias de núcleos pesados ($Z \leq 26$) en rayos cósmicos respecto al sistema solar, pueden ser de hasta 2 o 3 órdenes de magnitud.

Gracias al desarrollo de vehículos tales como satélites y globos sonda, se han obtenido medidas de las componentes nucleares de rayos cósmicos, para elementos con número atómico hasta el 80. La tabla 1.1 muestra las abundancias relativas de elementos en rayos cósmicos pesados.

En la siguiente tabla 1.1 ⁽⁵⁾, muestra las abundancias relativas de los elementos encontrados en la radiación cósmica primaria. Los núcleos de todos estos elementos se encuentran completamente desprovistos de electrones, ya que partículas cargadas con tan altas energías sufren un proceso de ionización inversa al atravesar pequeñas cantidades de materia.

TABLA 1.1

Grupo	Elemento	Número atómico Z	Porcentaje de abundancia de los RC	Porcentaje de abundancia cósmica AC	Razón RC / AC
Protón	H	1	93	90.7	1
Alfa	He	2	6.3	9.1	0.7
L	Li, Be, B	03-may	0.10	4×10^{-7}	3×10^5
M	C, N, O, F	06-sep	0.42	0.14	3
H	Ne - K	oct-19	0.14	0.054	10
VH	Ca - Zn	20 - 30	0.04	2×10^{-3}	20
VVH	Ga - U	31 - 92	2×10^{-6}	10-jun	2
SH	> U	110	?	?	?

TABLA 1.1 Abundancias relativas de los elementos de la radiación cósmica primaria y en el Universo. La composición de los rayos cósmicos se refiere a núcleos que tienen la misma energía por nucleón.

⁵ José F. Valdés Galicia y Javier A. Otaola. Los rayos cósmicos, 1992-Fondo De Cultura Económica.

1.4.- Radiación cósmica secundaria.

La mayoría de la radiación cósmica primaria que llega a la Tierra es de origen galáctico. Una vez que colisiona con un núcleo de nitrógeno u oxígeno atmosférico, la radiación cósmica primaria produce un chubasco de partículas: piones, electrones, muones, neutrinos, hadrones, etc, que son los llamados rayos cósmicos secundarios. De estas partículas secundarias, el 70% aproximadamente son muones; y cerca del 6% de estos muones, fueron formados por decaimiento de kaones.

Durante las primeras colisiones de la radiación cósmica, se generan gran cantidad de piones neutros (con vida media de $\tau = 10^{-16}$ s) y piones cargados (con vida media de $\tau = 10^{-12}$ s) que son partículas que decaen casi inmediatamente por tener un tiempo de vida muy corto. Dichos piones generan otras partículas (electrones, positrones, gammas, neutrinos, etc.), las cuales colisionarán nuevamente formando el chubasco de partículas mencionado. La llamada "radiación cósmica secundaria" se divide para su estudio en 3 componentes: componente electromagnética o blanda, formada por electrones, positrones y partículas gamma; la hadrónica formada por protones y neutrones; y la componente dura formada por muones.

La componente blanda es generada por piones neutros, los cuales decaen casi instantáneamente en rayos gamma, los cuales a su vez decaerán por creación de pares electrón-positrón (si son lo suficientemente energéticos). Los fotones, electrones y positrones, forman la componente electromagnética de la radiación cósmica secundaria. Para la formación de la componente dura tenemos piones cargados, los cuales decaerán en muones cargados con sus respectivos neutrinos, como se muestra en la figura 1.4. Los kaones son producidos por colisiones de piones positivos con protones, son también formadores de muones.

A 20 km sobre la superficie terrestre, las partículas más abundantes de toda la radiación secundaria son π^+ , π^- y π^0 , también existen numerosos protones y neutrones y conglomerados de estos. Si los hadrones ⁽⁶⁾ son suficientemente energéticos, ellos mismos iniciarán nuevas interacciones hadrónicas, produciendo cascadas secundarias que forman una columna que se abre en forma de cono; a dicha estructura se le llama chubasco atmosférico.

Estos piones al decaer producen muones que son leptones ⁽⁷⁾ con una masa de aproximadamente 205 veces la masa del electrón; casi no interactúan con la atmósfera por tener una sección muy pequeña, tienen un gran poder de penetración y es por eso que se les llama componente dura. El muón positivo decae en un positrón, un antineutrino del muón y un neutrino del electrón. El muón negativo de manera similar decae en un electrón, un antineutrino del electrón y un neutrino del muón.



⁶ A las partículas susceptibles a la interacción fuerte, sean bariones (partículas formadas por 3 quarks) o mesones (partículas formadas por un quark y un antiquark), son llamadas hadrones.

⁷ Los leptones son partículas que no están formadas por subpartículas, es decir, son partículas elementales.

Los neutrones y protones, producto de la desintegración de un átomo atmosférico por una partícula primaria de baja energía, son los que dan lugar a la componente nucleónica. Estos nucleones tienen suficiente energía para interactuar con nuevos núcleos atmosféricos; al llegar a capas bajas de la atmósfera, el flujo de esta componente decrece rápidamente con la profundidad atmosférica (el camino libre medio de los nucleones disminuye debido al aumento en la densidad de la atmósfera) y constituye tan solo un pequeño porcentaje del flujo total de partículas cerca del nivel del mar.

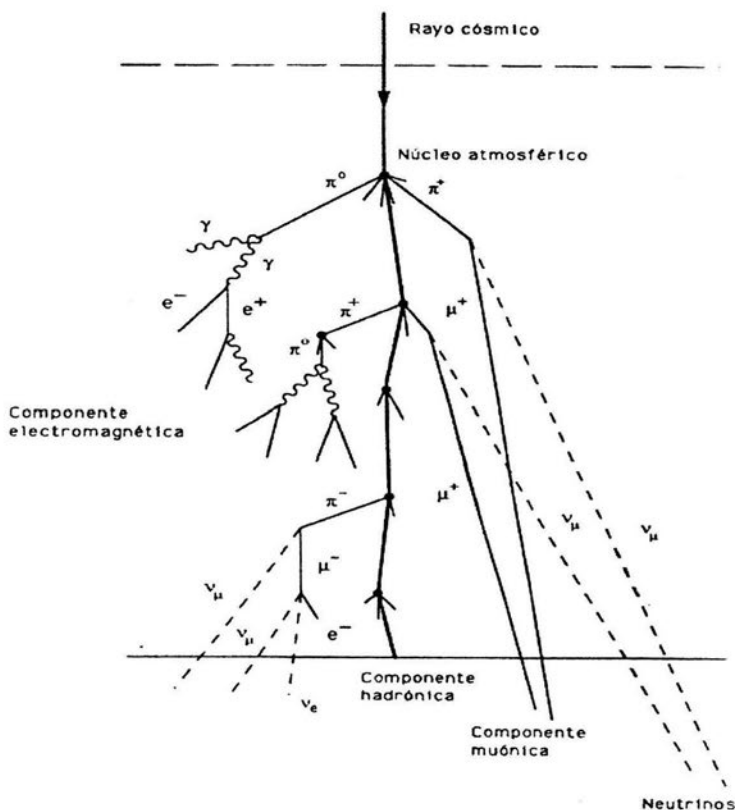


Figura 1.4 Producción de partículas secundarias, a partir de rayos cósmicos primarios en la atmósfera.

Las partículas inestables como kaones y otras que son producto de interacciones nucleares, están sujetas a decaer también. La relación entre interacción y decaimiento, depende de la vida media y energía de las partículas así como de la densidad del medio en que se propagan.

1.5.- Muones en la radiación cósmica secundaria.

Como ya se dijo, un resultado de las colisiones de rayos cósmicos primarios con los núcleos atmosféricos es la producción de algunos piones y kaones producidos por colisiones secundarias; debido a que el tiempo de vida de los piones cargados es extremadamente corto, los muones y los neutrinos son producidos a consecuencia de las interacciones fuertes y a su decaimiento en vuelo.

Los muones en los chubascos son el producto del decaimiento de piones y kaones; la producción máxima se alcanza aproximadamente entre los 7 y 10 km sobre el nivel del mar. Viajan a través de la atmósfera mientras se esparce el chubasco en el espacio; no obstante, por ser leptones relativistas y su probabilidad de interacción con otras partículas es mínima debido también a que su sección eficaz es muy pequeña.

La distribución de muones a nivel del mar está dada por la siguiente ecuación (Dorman, 1974):

$$\Delta\mu(N_e, r) = 18 \left(\frac{N_e}{10^6} \right)^{0.75} r^{-0.75} \left(1 + \frac{r}{320} \right)^{-2.5} \quad (1.5.1)$$

El número de muones es proporcional a $N_e^{0.75}$ donde N_e es el número de electrones, r es la distancia del eje central del chubasco y $\Delta\mu$ es la densidad de muones. Esta distribución muestra un rápido decrecimiento de muones con la distancia del eje central del chubasco. Puesto que los muones de alta energía están concentrados en el eje central del chubasco y tienen mayor velocidad, la probabilidad de interacción con partículas a su paso es menor, por lo que se desviarán menos del eje del chubasco, (ver figura 1.5). El poder de penetración de los muones es tal que a los más energéticos se les puede encontrar en minas debajo de la tierra.

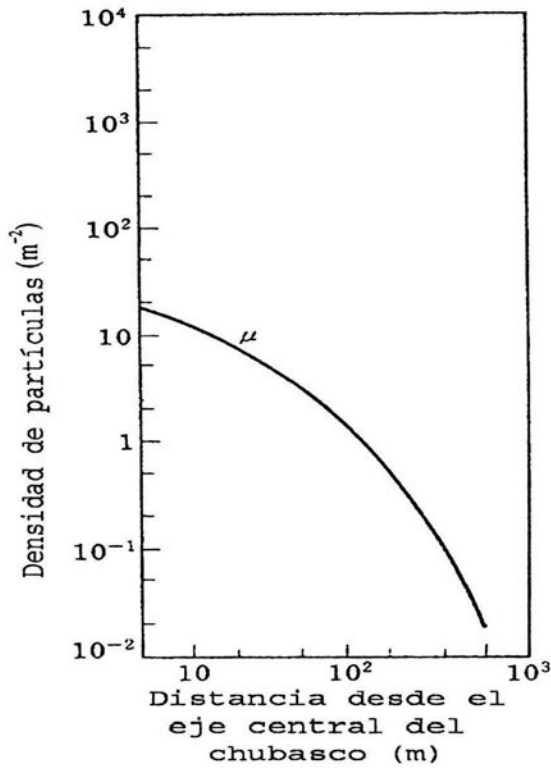


Figura 1.5 Distribución de densidad de partículas, de la componente muónica respecto al eje central del chubasco.

El tiempo de vida de los muones es $\tau = 2 \times 10^{-6} s$. Puesto que los muones son relativistas, se ven afectados considerablemente por el factor de Lorentz. En consecuencia, los muones recorren una mayor distancia que la predicha por la mecánica newtoniana, según la mecánica relativista. Debido a que la sección eficaz de los muones disminuye con la energía, pueden encontrarse muones bajo tierra que no han interactuado nunca con otras partículas.

Capítulo II

II El Sol y los rayos cósmicos

II.1.- El Sol y el medio interestelar.

El espacio que circunda a las galaxias y estrellas, conocido como medio interestelar, no está vacío, contiene una gran cantidad de material, del cual 99% es gas (gas interestelar) y un 1% es polvo (polvo interestelar).

El *polvo interestelar* está compuesto por pequeñas partículas sólidas (menos de $10^{-6} m$ de radio), reunidas en cúmulos de muy baja densidad formadas por grandes cantidades de hidrógeno, carbono y en menor cantidad, por silicatos y otros compuestos como moléculas orgánicas y agua. En cambio, el gas está constituido principalmente de hidrógeno (~90%), en su forma atómica y molecular, así como de helio (~10%) y trazas de otros elementos.

Respecto al medio interplanetario, éste contiene al plasma que proviene del Sol conocido como Viento solar. El Viento solar está formado por partículas ionizadas y se genera por la continua expansión de la atmósfera solar, la cual no puede ser retenida por el Sol debido a que las altas temperaturas de las regiones solares más externas provocan que el plasma ejerza una presión hacia afuera capaz de vencer a la fuerza gravitacional, dirigida hacia el centro del Sol. De la relación entre estas dos fuerzas, resulta un flujo de plasma que no sólo escapa del entorno solar, sino que además lo hace a velocidades superiores a las del sonido. Por tanto, el espacio interplanetario no es un espacio vacío a través del cual las partículas de rayos cósmicos puedan propagarse libremente, sino que el Viento solar “empuja” estas partículas hacia fuera del Sistema solar.

Uno de los efectos más notables que surgen del hecho de que el gas coronal⁽⁸⁾, sea un plasma con una alta conductividad eléctrica es que cuando fluye hacia afuera del Sol “arrastra” consigo las líneas del campo magnético solar (figura 2.1). Esto hace que el campo magnético del Sol sea transportado por el Viento solar hacia el medio interplanetario, estirando las líneas, que de otra manera, se cerrarían cerca del Sol hasta distancias mucho mayores que el radio del Sistema solar. Así, el Viento solar es un plasma magnetizado que fluye a enormes velocidades, estableciendo en el espacio las condiciones magnéticas del Sol.

Como el Sol gira, las líneas de campo magnético se curvan a la altura de la Tierra, en vez de que estén a lo largo de la línea que une a la Tierra con el Sol, están inclinadas unos 45° respecto a esta línea.

⁸ Está compuesto por gas ionizado de baja densidad (menor que 0.01 partículas por cm^3 y muy alta temperatura ($10^5 - 10^6$ K). Se le da el nombre de “coronal” por analogía a la corona del Sol, que es también gas ionizado, poco denso y muy caliente. El gas coronal es ionizado y calentado por la explosión de supernovas y ocupa un 50% del volumen total de la galaxia.

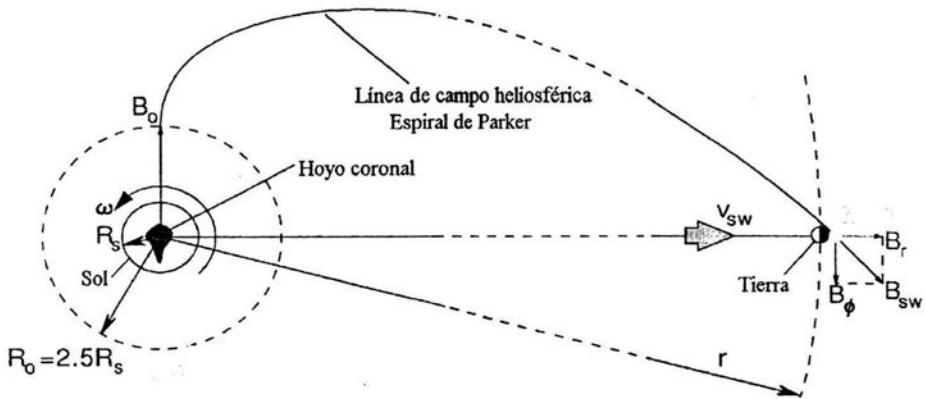


Figura 2.1 El campo magnético del Sol es arrastrado en forma de una espiral arquimediana.

El campo magnético del Sol es un campo de naturaleza dipolar que se genera en la zona convectiva (sección II.2). Este campo se invierte cada 11 años completando un ciclo cada 22 años, conocido como el ciclo solar magnético. La inversión del campo magnético se ha tratado de explicar a través del modelo del dínamo que dice que un campo puramente poloidal puede transformarse en un campo puramente toroidal. Desde el punto de vista matemático, esta inversión es expresada a través de una función potencial que describe la evolución temporal del campo magnético y que cumple con las leyes magnetohidrodinámicas.

Por otro lado, el Sol rota de forma diferencial, lo hace más rápido en el ecuador que en los polos: en el ecuador tarda aproximadamente 26 días en dar una vuelta completa, y cerca de los polos tarda más de 30 días. Esta rotación diferencial junto con la convección, juegan un papel importante en el proceso de inversión del campo magnético. Además el campo magnético solar es el responsable de todos los fenómenos activos de la superficie del Sol, así como de las emisiones de gas y del Viento solar las cuales se tratarán en la siguiente sección.

II.2.- Actividad solar.

El Sol es la estrella de nuestro Sistema solar y el objeto que contiene aproximadamente el 98% de la masa total del sistema planetario. Aprovechando su proximidad a la Tierra y como es una estrella típica, el Sol es una fuente extraordinaria para el estudio de los fenómenos estelares.

La estructura interna del Sol, con base en los modelos estelares está formada por el núcleo, la zona radiativa y la zona convectiva (ver fig. 2.2). El Sol al igual que algunos planetas del sistema Solar, también tiene atmósfera. Para su estudio, la atmósfera solar ha sido dividida en varias regiones llamadas: Fotosfera, Cromosfera y Corona. Estas regiones se describirán a continuación.

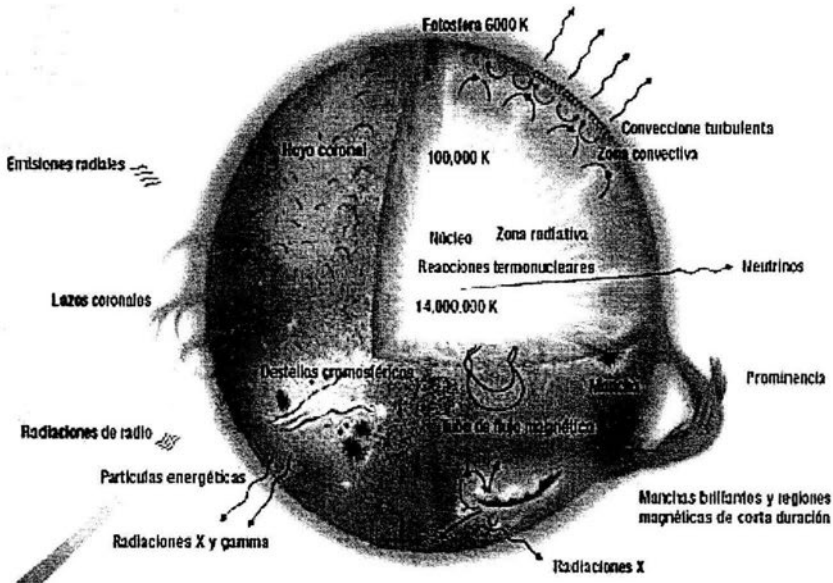


Figura 2.2 Estructura Solar donde se efectúa la actividad solar.

- a) La fotosfera es la superficie visible del Sol y constituye su atmósfera baja. Se pueden ver pruebas de la turbulencia de la zona de convección observando esta capa.
- b) La capa sobre la fotosfera es llamada cromosfera (esfera de color) debido a su color rojizo, visible durante los eclipses totales del Sol. La cromosfera se extiende varios miles de kilómetros por encima de la fotosfera y tiene una temperatura mínima de 4700 K. La cromosfera más baja absorbe algo de la luz que se emite de la fotosfera, produciendo las líneas oscuras de absorción del espectro solar.
- c) La atmósfera solar exterior es llamada corona. Todos los detalles estructurales que se observan en ella se deben al campo magnético. La mayor parte de la corona se compone de grandes arcos de plasma caliente, arcos más pequeños dentro de las regiones activas y arcos mayores entre ellas. Las formas arqueadas y a veces rizadas de estos arcos se deben al campo magnético.

Durante la evolución del ciclo solar es posible observar en la fotosfera, las famosas manchas solares (figura 2.3), que son regiones cuya temperatura oscila entre 1000 y 1500 K, más frías que la misma fotosfera.

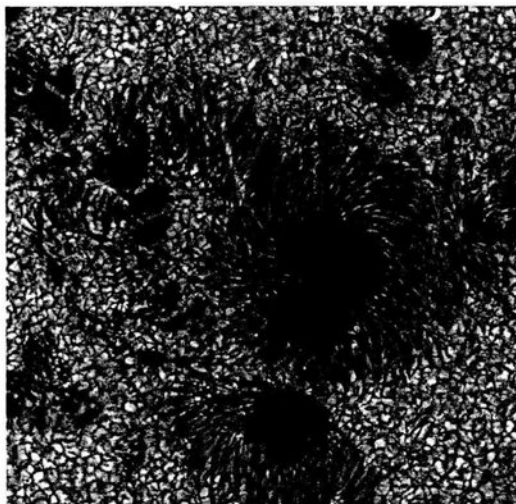


Figura 2.3 Manchas solares.

En la época de máxima actividad solar es cuando aparece un mayor número de manchas. Sus tamaños son variables y pueden tener diámetros desde unos cuantos cientos de kilómetros hasta cientos de miles de ellos, su tiempo de vida está correlacionado con su tamaño; pueden permanecer hasta un año aproximadamente sobre la superficie del Sol. En estas zonas (manchas solares), se desarrollan campos magnéticos muy intensos que pueden llegar hasta unos 0.3 Teslas. Al comienzo de cada ciclo aparecen las primeras manchas en latitudes altas (nunca más allá de 35 o 40 grados de latitud), mismas que desaparecen a medida que avanza el ciclo solar para dar lugar a otras a latitudes más bajas, cerca del ecuador. Es regla común que las manchas aparezcan en pares de polaridad magnética opuesta (manchas bipolares), aunque estos pares también pueden ser parte de grupos más grandes.

Otra manifestación de la actividad solar son las fáculas (figura 2.4), también denominadas playas (del francés *plages*), son áreas más brillantes que sus alrededores puesto que, en general, se encuentran varios cientos de grados más calientes. Son un poco más grandes que los gránulos fotosféricos y algunas de ellas pueden llegar a cubrir hasta el 10% del disco solar. Aparecen casi siempre rodeando a manchas o grupos de manchas, aun cuando sus tiempos de vida son mayores.



Figura 2.4 Fáculas o playas.

Las protuberancias y prominencias (figura 2.5), se ven como prolongaciones de la fotosfera dentro de la cromosfera y la corona, su forma y estructura es muy variable, están determinadas principalmente por los campos magnéticos locales; algunas de ellas pueden alcanzar hasta un millón de kilómetros de altura sobre la fotosfera. Son regiones más frías y densas que el material circundante, pueden moverse a velocidades de varios cientos de kilómetros por segundo. Su duración típica es de varias semanas, después de las cuales pueden desaparecer en forma repentina para reaparecer después, repitiendo este comportamiento en varias ocasiones. Otros eventos como los filamentos, espículas y fulguraciones se describen enseguida.

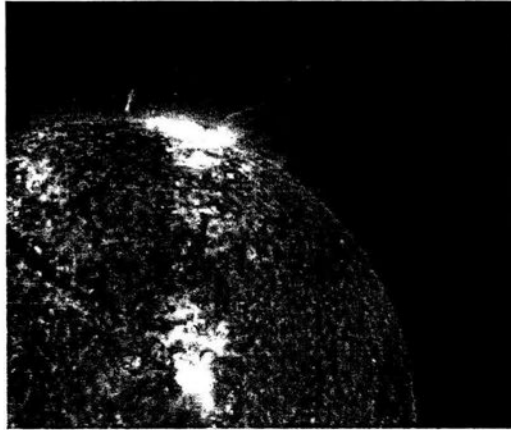


Figura 2.5 Prominencia.

Los filamentos (figura 2.6) tienen forma de agujas que son observables en ciertas longitudes de onda del espectro electromagnético, son la base de las prominencias sobre la fotosfera, vistas desde arriba son proyecciones de prominencias estables que conectan dos regiones de polaridad opuesta colgadas como si se tratase de una hamaca.



Figura 2.6 Filamentos.

Las espículas (figura 2.7) son enormes lenguas de color rojizo que le dan a la cromosfera el característico aspecto de "llano en llamas". Estas se levantan y desaparecen en periodos de entre cinco y diez minutos. Son muy delgadas pero puede haberlas hasta de unos 500 kilómetros de grosor, algunas de ellas se levantan hasta 15 000 kilómetros de altura por encima de la fotosfera a velocidades de 20 o 30 km/s.

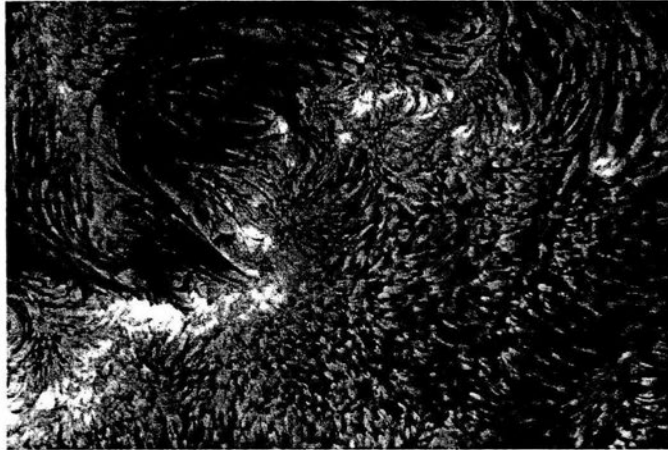


Figura 2.7 Espículas.

Las fulguraciones (figura 2.8) son tal vez el fenómeno más impresionante de la actividad del Sol; estas explosiones cromosféricas son acontecimientos catastróficos que pueden hacer sentir sus efectos en la Tierra en forma casi inmediata.

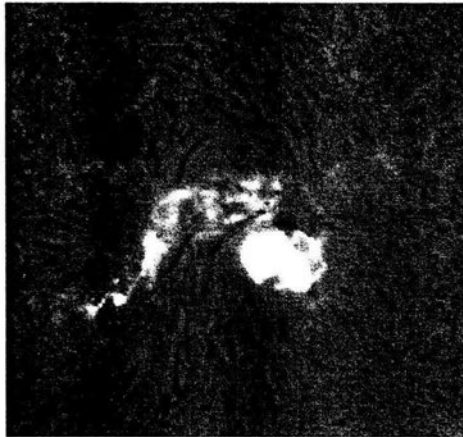


Figura 2.8 Fulguraciones o destellos en el Sol.

En general la radiación emitida por el resto de la corona se debe a que las partículas se encuentran ahí confinadas por los intensos campos magnéticos bipolares de la atmósfera solar. En el máximo de actividad solar los hoyos coronales (figura 2.9) se encuentran confinados a dos pequeñas regiones en los polos del Sol, pero a medida que la actividad disminuye, éstos crecen hasta alcanzar latitudes ecuatoriales, siendo su área máxima en el mínimo de actividad solar.

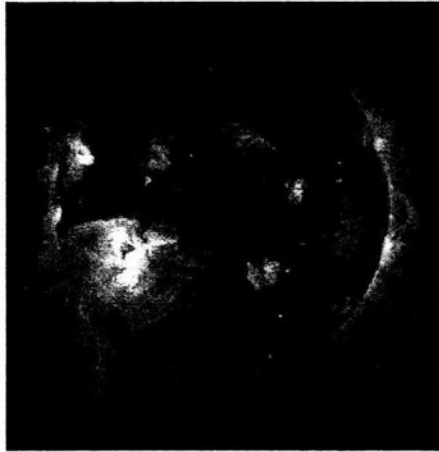


Figura 2.9 Hoyos coronales.

Además de los hoyos polares, existen también pequeños hoyos de vida efimera que aparecen comúnmente en latitudes bajas y en periodos de media o **alta** actividad solar.

Por ser regiones de campo abierto hoy se sabe que la mayor parte del Viento solar, sino es que todo, fluye a través de los hoyos coronales.

II.3.- Modulación de rayos cósmicos por el Sol.

La influencia de la actividad solar sobre la radiación cósmica que llega a la Tierra, es en esencia provocada por el choque del Viento solar con la magnetosfera terrestre, y al bombardeo de partículas de alta energía, producidas en fenómenos transitorios que se explican posteriormente. Dicha actividad provoca variaciones importantes en la intensidad de radiación cósmica.

Las variaciones más importantes, observadas en la radiación cósmica producidas por el Viento solar son:

- a) La variación diurna
- b) El efecto Forbush
- c) La variación de 11 años

La variación diurna. Dicha variación refleja una anisotropía en la distribución local interplanetaria de los rayos cósmicos, es decir, el Viento solar barre parte de esta radiación en una dirección determinada, provocando una inhomogeneidad o anisotropía. Esta variación presenta un máximo en promedio alrededor de las 18hrs, en tiempo local.

Forman y Gleason (1975) demostraron que las partículas de rayos cósmicos corrotarían con el campo magnético interplanetario (es decir, no abandonarían la línea de campo magnético sobre la cual viajan). A una unidad astronómica esto representa una velocidad del orden de 400km/s en la misma dirección que el movimiento orbital de la Tierra (30km/s). Así los rayos cósmicos “alcanzarán” la Tierra en la dirección de “18hrs tiempo local” (ver figura 2.10). La anisotropía diurna Solar es el resultado del fluj corrotatorio de las partículas más allá de la Tierra.

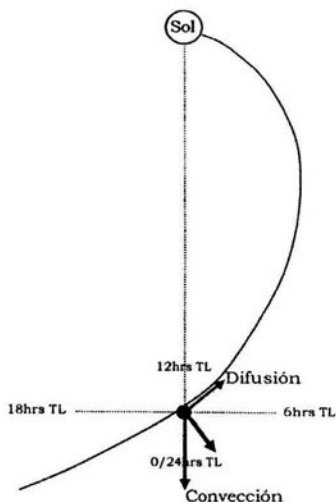


Figura 2.10 Los rayos cósmicos alcanzan la Tierra.

El efecto Forbush. Es con seguridad la variación temporal más espectacular que se conoce en la radiación cósmica. En el lapso de unas cuantas horas la intensidad registrada en una estación particular puede verse reducida hasta en un 10%, y en algunos casos 20 o 30%; después de llegar a un mínimo la intensidad empieza a recuperarse lentamente, lo cual puede durar desde unos días hasta semanas (ver figura 2.11).

Este efecto en contraste con la variación diurna, es un fenómeno en tiempo universal, esto significa que su presencia se siente en forma casi simultánea en todo el mundo, aun cuando en algunos casos, anisotropías espaciales en el Viento solar puedan producir anisotropías temporales en la Tierra.

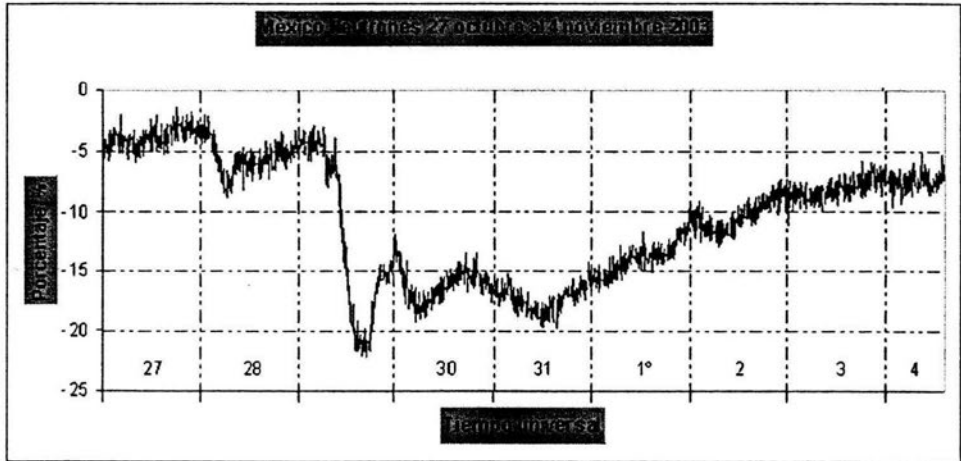


Figura 2.11 Decrecimiento Forbush para el mes de octubre-2003 México.

La variación de 11 años. Esta variación presenta una anticorrelación respecto al número de manchas solares el cual está estrictamente ligado al ciclo solar (ver figura 2.12), debido a que las condiciones magnéticas presentes en la heliosfera, cambian constantemente a medida que el ciclo Solar avanza, en dependencia con la actividad del Sol. Las irregularidades en el campo magnético interplanetario aumentan o disminuyen, provocando un cambio en la intensidad de la radiación cósmica; ésta variación ha sido observada en toda la heliosfera para partículas con energías menores a varias decenas de GeV.

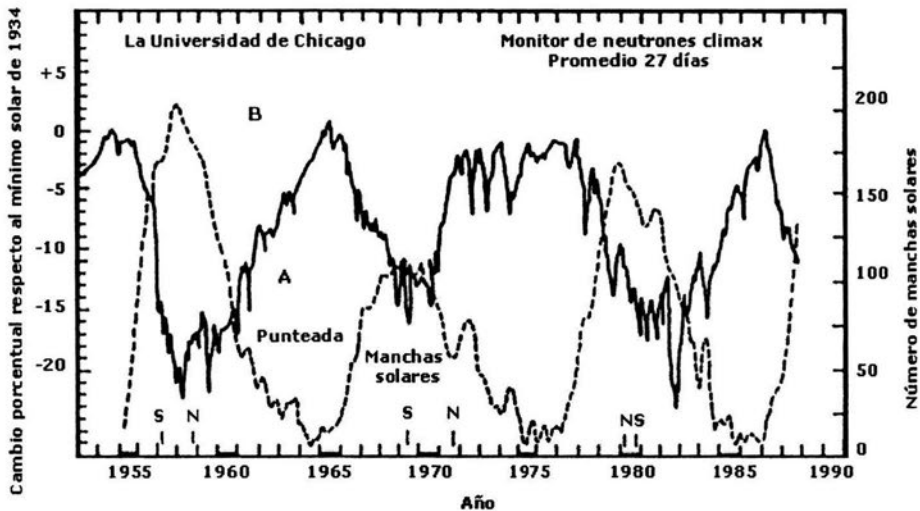


Figura 2.12 Variación de 11 y 22 años.

Adicionalmente también podemos tener variaciones que produzcan un aumento en la radiación cósmica. Algunos fenómenos transitorios de altas energías causados en el Sol por ráfagas que eyectan partículas relativistas de incluso 1 GeV, provocan un incremento en la intensidad de radiación cósmica. Otras observaciones en la intensidad también son debidas a los cambios en el umbral geomagnético así como otras variaciones observadas a nivel del mar, las cuales son ocasionales y son debidas a efectos atmosféricos causados por cambios de presión y temperatura.

II.4.- Detectores terrestres de la radiación cósmica.

Entre los detectores de radiación cósmica podemos citar a los plásticos centelladores:

-Centelladores (orgánicos e inorgánicos).

Los materiales "centelladores" tienen la propiedad de ser luminiscentes es decir, de emitir radiación electromagnética con longitud de onda visible o ultra-violeta después de absorber energía transferida al material por partículas ionizantes. La radiación emitida puede detectarse con transductores opto-electrónicos adecuados; comúnmente se utilizan los tubos foto multiplicadores (TFM), a fin de convertir las señales luminosas en eléctricas, permitiendo así su análisis y procesamiento por un sistema de instrumentación.

Al conjunto centellador-tubo foto-multiplicador se le llama genéricamente detector de centelleo. Este detector presenta algunas ventajas frente a otro tipo de detectores de radiación gamma, entre las que se encuentran:

- Mayor eficiencia de conteo (factores de 20 a 40%) .
- Es posible contar un mayor número de fotones por segundo, debido a que el tiempo de resolución es mucho menor.
- Mayor estabilidad.
- La altura del pulso es proporcional a la energía dentro de un amplio margen.
- En cuanto a las sustancias que más se usan como centelladoras, se puede mencionar a los plásticos, líquidos orgánicos, cristales orgánicos e inorgánicos.

El tubo fotomultiplicador funciona bajo el principio del efecto fotoeléctrico, en el cual, cuando la luz exterior incide sobre el cátodo, que tiene un recubrimiento semiconductor, esta libera electrones hacia el interior del tubo. Una tensión eléctrica acelera esos electrones, haciéndolos impactar contra láminas metálicas sucesivas, a las que les arranca una cascada de electrones, que a la salida del tubo son suficientes para producir un pulso eléctrico detectable.

-Monitores de neutrones.

El monitor de neutrones NM64. Este detector está integrado por contadores de trifluoruro de boro BF₃ que detectan la presencia de neutrones energéticos mediante la producción de partículas alfa resultado de la reacción de los neutrones con los núcleos de boro.

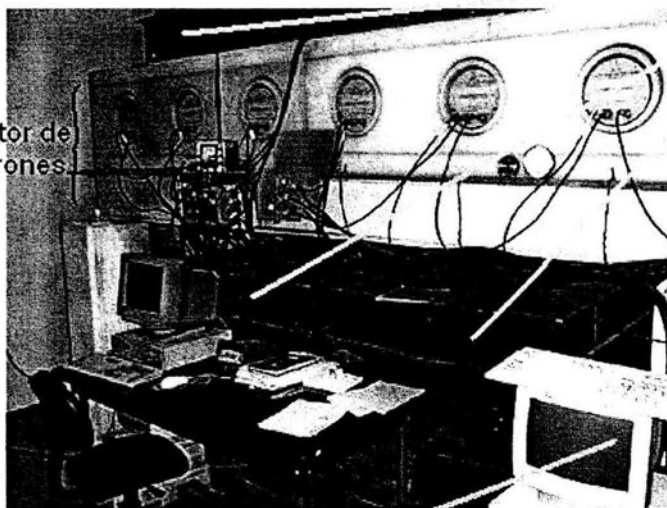
Este aparato registra la intensidad de la componente secundaria de los rayos cósmicos provenientes de partículas primarias; en particular la componente nucleónica secundaria de baja energía (neutrones). Estos neutrones tienen un intervalo de energías desde unos cientos de MeV hasta alrededor de 1 GeV. El espectro de los rayos cósmicos primarios disminuye con el aumento de la energía. Los monitores de neutrones son más sensibles en la parte baja del espectro de energías (1-20 GeV).

-Telescopios de muones.

Telescopio de muones: Comúnmente consta de plásticos centelladores con tubos foto multiplicadores colocados por encima y por debajo de algún material absorbente (ver figura 2.13).

Plásticos centelladores

Monitor de neutrones.



**Terminal adquisitora
de datos**

Figura 2.13 Telescopio de muones y monitor de neutrones (centro).

Debido a que su propósito es detectar la componente dura de la radiación secundaria, mediante circuitos de coincidencias se conectan los plásticos superiores con los inferiores a fin de eliminar la componente electromagnética que se absorbe en el plomo, material absorbente intermedio. Se registran las componentes vertical, norte, sur, este y oeste.

Por ser este aparato el que registra los datos que se usaron en esta tesis, hacemos una descripción detallada del mismo en el próximo capítulo.

Capítulo III

3.1.- El telescopio de muones.

El telescopio de muones consiste de dos o más placas de material sensible al paso de la radiación ionizante, operando en coincidencia. La geometría del telescopio define un ángulo sólido dentro del cual queda restringida la respuesta del detector, es decir, registra únicamente aquellas partículas cargadas que llegan dentro de ese ángulo sólido.

La principal ventaja del telescopio de muones es que permite cierto grado de resolución en las características direccionales. Estas propiedades direccionales pueden ser utilizadas para distinguir entre variaciones en la intensidad de la componente secundaria de la radiación cósmica introducidas por la atmósfera o el campo geomagnético, de aquellas causadas por anisotropías en el flujo de rayos cósmicos primarios.

Dado que la respuesta del telescopio es a muones positivos y negativos, producto de decaimiento de piones debido a la interacción de la atmósfera con rayos cósmicos primarios de energías medias mayores que 10^{10} eV, la respuesta del telescopio, es relativamente insensible a partículas de baja energía ⁽⁹⁾ de origen solar y las observaciones de la componente muónica en superficie nos proporcionarán información sobre la variación en el flujo primario, de rayos cósmicos galácticos. Efectos de modulación solar podrán ser observados, libres de los efectos enmascaradores del flujo de partículas solares acompañantes.

Con el desarrollo de plásticos centelladores de gran área, ha sido posible no sólo obtener tasas de cuentas muchísimo más altas, sino que se logran también tiempos de resolución de 10^{-9} s.

⁹ Debido a que la rigidez geomagnética (o resistencia que encuentran las partículas cargadas a atravesar el campo magnético terrestre), es de 8.2 GeV.

3.2.- Principios generales.

Una partícula cargada al pasar a través de un plástico centellador pierde energía por ionización, excitando y disociando moléculas en una columna alrededor de su trayectoria, hasta un punto que depende de su energía, carga y del potencial de ionización promedio del material centellador.

Parte de la energía perdida por la partícula es transferida a las moléculas del centellador, la cual será posteriormente radiada por ellas como radiación fluorescente, y la energía restante sigue acompañando al muón en su viaje. La respuesta del contador de centelleo al paso de una partícula cargada es función de:

- 1.- La energía depositada en el centellador y la fracción que es convertida a luz fluorescente.
- 2.- La transparencia del material del plástico centellador a su propia radiación.
- 3.- La reflectividad de las paredes del contenedor tomando en cuenta la fracción del área de las paredes que es cubierta por el foto cátodo.
- 4.- La eficiencia fotoeléctrica de los foto cátodos y las características eléctricas del tubo foto multiplicador y circuitos electrónicos asociados.

Desde el punto de vista electrónico el diseño del contador de centelleo tiene características tales que se obtiene un buen pulso de voltaje a la salida del ánodo, del orden de 300 mV; adecuado para la detección de muones.

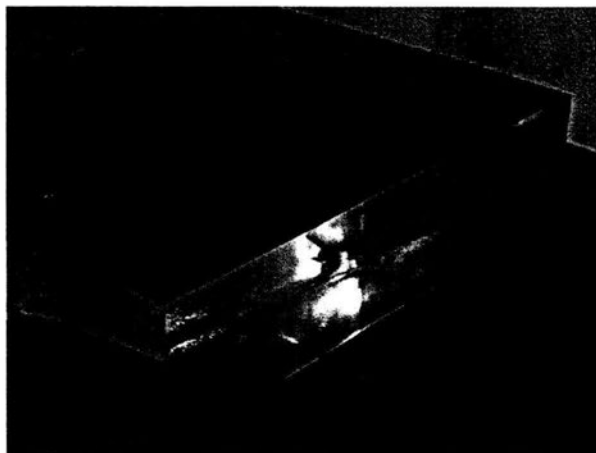
3.3.- Telescopios de centelleo.

El principio fundamental de un detector de rayos cósmicos utilizado para el estudio de variaciones temporales en la intensidad de radiación cósmica, es minimizar las fluctuaciones de origen estadístico e instrumental, requiriendo un gran número de cuentas y gran estabilidad.

3.4.- Plásticos centelladores.

Son planchas con dimensiones 50x50x5 cm., de un polímero, el polyvinyl-tolueno, en las cuales un centellador orgánico, el Terphenil, ha sido disuelto. El material ha sido tratado con POPOP ⁽¹⁰⁾; en ausencia de esta sustancia, la energía perdida por una partícula ionizante en el material, es radiada en el ultravioleta y reabsorbida por el material.

Ejemplo de un plástico centellador con dimensiones 50x50x10 cm.



¹⁰ POPOP es una sustancia que produce un corrimiento en la longitud de onda de máxima emisión del centellador, de 3800 a 4500 Å.

3.5.- Características físicas de los centelladores.

1.- Pulso de luz o eficiencia de foto conversión.	65% de la de un cristal de antraceno de la misma geometría
2.- Constante de decaimiento.	3 ns
3.- Longitud de onda de máxima emisión.	4500 Å
4.- Gravedad específica.	1.03 g/cm ³
5.- Temperatura de ablandamiento.	75 °C

Para efectos de diseño, es necesario conocer el número de fotones emitidos por el paso de una partícula cargada a través de un centellador. La energía perdida por una partícula cargada relativista, que pasa verticalmente a través del centellador, puede estimarse usando la expresión (Rossi, 1952).

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{2Cm_e c^2 Z^2}{\beta^2} \left[\text{Ln} \left(\frac{4m_e^2 c^4 \beta^4}{(1-\beta^2)^2 I^0(z)} \right) - 2\beta^2 \right] \quad (3.5.1)$$

donde $-dE/dx$ es la energía perdida por colisión; $C = r_e NZ/A$, N es el número de Avogadro, A es el número de masa efectiva del absorbente y Z es el número de carga; NZ/A es la densidad de electrones; r_e es el radio clásico del electrón; m_e es la masa del electrón; c es la velocidad de la luz en el vacío; $\beta = v/c$, $I(Z)$ es el potencial de ionización promedio. Sustituyendo valores para los siguientes parámetros:

$$m_e c^2 = 0.51 \text{ MeV}, I(Z) = 40 \text{ eV} \quad (3.5.2)$$

$$\frac{NZ}{A} = 3.4 \times 10^{23} \quad (3.5.3)$$

obtenemos, para una partícula de mínima ionización, que la energía perdida por g/cm² es del orden de 2.18 MeV. De aquí que la energía perdida por una partícula de mínima ionización en los centelladores usados sea de aproximadamente 11 MeV.

3.6.- Sistema de guía de luz.

El acoplamiento entre el tubo foto multiplicador y el centellador es un factor importante para el diseño del contador. Para maximizar la colección de luz en el foto cátodo, se escogió un acoplamiento directo tal que el foto multiplicador se colocó a 51.2 cm por arriba de los plásticos centelladores. El interior de las cajas piramidales de los contadores, ha sido tratada con pintura blanca de alta calidad y rociada posteriormente con pintura de alta reflectancia, tal que proporciona reflexiones interiores difusas (con un coeficiente de reflexión de 0.9) asegurando uniformidad de recolección de luz para el área de centelleo.

A partir del número total de fotones emitidos por paso de una partícula cargada, es posible estimar el número de fotones recolectados por el foto cátodo, para una geometría dada de la caja y un valor de la reflectancia de las paredes.

Suponiendo que los plásticos centelladores no absorben ningún fotón emitido, y que la luz se isotropiza completamente dentro de la caja después de una reflexión y suponiendo que el foto cátodo absorbe toda la luz que le llega, Dutt (1965) ha mostrado que el número de fotones recolectados por el foto cátodo está dado por:

$$N = \frac{Irn}{1 - (1 - n)r} \quad (3.6.1)$$

donde "I" es el número de fotones liberados en el plástico, "r" es el coeficiente de reflexión de la superficie difusora y n es la razón del área del foto cátodo a la superficie difusora. Tomando para nuestro caso $r = 0.9$ y $n = 5 \times 10^{-3}$ obtenemos que el número de fotones que llegan al foto cátodo, por paso vertical de una partícula cargada de mínima ionización, es del orden de 2000.

3.7.- Geometría del sistema y diagramas direccionales.

Utilizando dos o más centelladores, operando en coincidencia de manera que tengamos un pulso de salida cuando los detectores son atravesados simultáneamente por una partícula ionizante; puede obtenerse una discriminación efectiva de la radiactividad de fondo.

Para que una partícula sea contada debe llegar dentro de un cono determinado por las dimensiones de las áreas sensitivas y la separación entre ellas.

De esta manera, conectando conjuntos de dos detectores del tipo descrito a diferentes sistemas de coincidencia, podemos formar un sistema multidireccional de telescopios.

El sistema instalado en la ciudad de México, está constituido por dos capas de 4 detectores como se muestra en la (figura 3.1). La utilidad de hacer esto está en que el plomo del monitor de neutrones absorberá la radiación de fondo y solo permitirá el paso de muones.

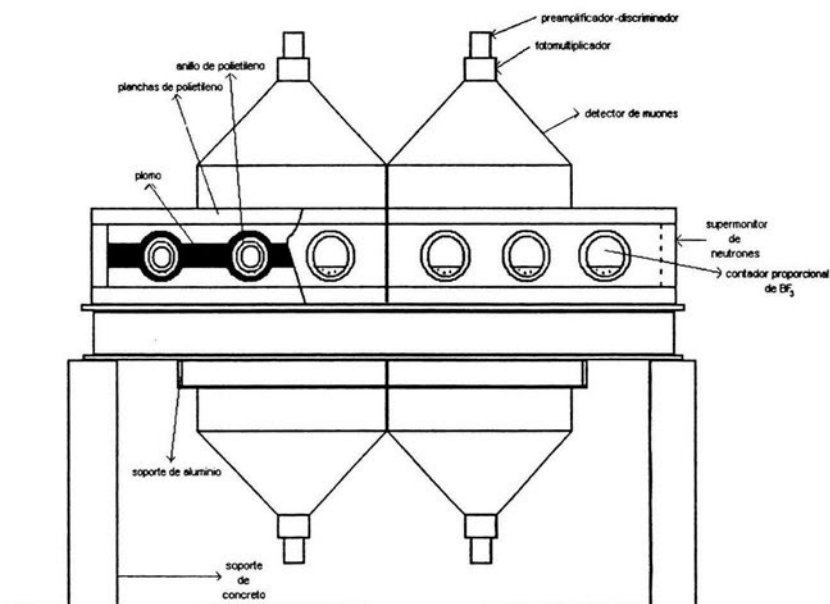


Figura 3.1 Diagrama de la instalación del sistema multidireccional de telescopios de muones en el que se utiliza el plomo del monitor de neutrones como material absorbente de la componente blanda de la radiación cósmica y de la radiación de fondo.

Los diagramas direccionales, muestran la dependencia de la intensidad de las partículas registradas por el telescopio con el ángulo cenital θ . La importancia de estos diagramas es relevante, ya que las variaciones de origen atmosférico así como las de origen extra atmosférico, dependen del ángulo de incidencia de las partículas. Como la radiación cósmica primaria es en esencia isotrópica, es posible despreciar la dependencia de la intensidad de los rayos cósmicos con el ángulo azimutal.

Por lo que el número de partículas registradas estará dado por:

$$N(\theta, \varphi) d\theta d\varphi = I(\theta) S_{\perp}(\theta, \varphi) d\omega \quad (3.7.1)$$

donde,

$$S_{\perp}(\theta, \varphi) = S(\theta, \varphi) \cos \theta \quad (3.7.2)$$

es el área efectiva perpendicular a la dirección de incidencia, θ es el ángulo cenital y φ es el ángulo azimutal; $S(\theta, \varphi)$ es el área de superficie inferior atravesada por partículas que llegan bajo ángulos θ y φ a la superficie superior; $d\omega = \sin\theta d\theta d\varphi$ es el elemento de ángulo sólido;

$$I(\theta) = I_0 \cos^2 \theta \quad (3.7.3)$$

es el número de partículas por unidad de tiempo y unidad de ángulo sólido que pasan por un área unitaria perpendicular a θ ; I_0 es la intensidad en la dirección vertical. Otaola et al. (1988) calcularon los diagramas direccionales para telescopios cúbicos y semi-cúbicos, y que se muestran en la figura 3.2.

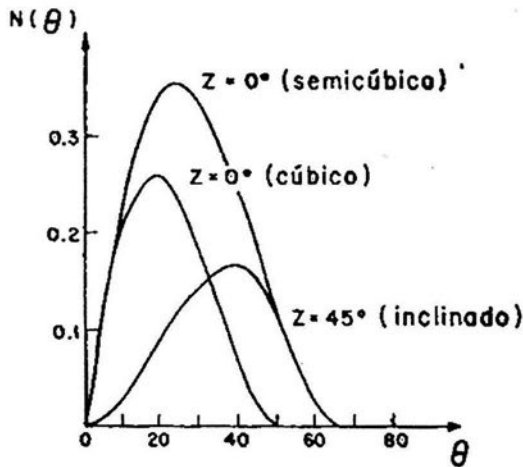


Figura 3.2 Diagramas direccionales $N(\theta)$ para un telescopio cúbico, un telescopio semicúbico y para uno inclinado 45° con la vertical.

En los diagramas direccionales (figura 3.3), para telescopios cúbicos y semicúbicos, se observa que la máxima sensibilidad de estos telescopios es de 19° y 24° con la vertical, respectivamente. Para telescopios con inclinación a 45° , la máxima sensibilidad está en los 40° .

La geometría adoptada por el conjunto de los ocho plásticos centelladores, acoplados a doce conjuntos de circuitos de dobles coincidencias, nos puede dar información sobre la intensidad de la componente muónica proveniente de las cinco componentes o direcciones: vertical, norte, sur, este y oeste, como se muestra en la figura 3.3.

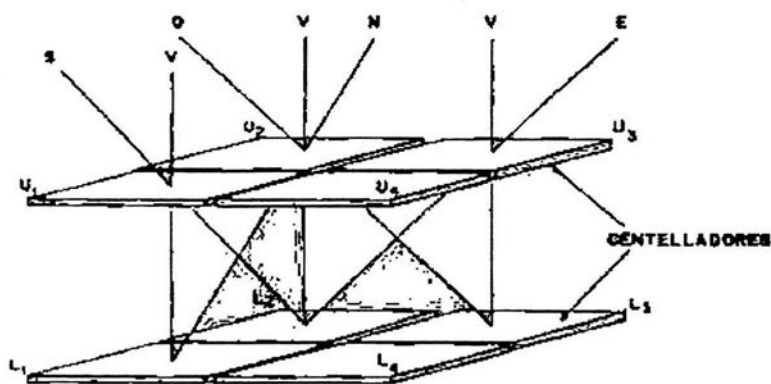


Figura 3.3 Geometría del sistema multidireccional de telescopios de muones en el cual ocho plásticos centelladores conectados mediante sistemas de dobles coincidencias, proporcionan 4 canales para la posición vertical (V) y 2 canales para cada una de las direcciones este (E), oeste (O), norte (N) y sur (S).

3.8.- Características energéticas.

Las partículas registradas por telescopios de muones son producidas en la atmósfera por partículas primarias de diferentes energías que llegan a ésta isotrópicamente; por lo que el número de partículas registradas por un telescopio de muones, puede ser utilizado para estudiar las variaciones temporales en el flujo primario de la radiación cósmica.

Dorman (1954, 1963) ha mostrado que las variaciones del flujo secundario de rayos cósmicos, con un umbral geomagnético g y una profundidad atmosférica h_0 , respecto a la variación de rayos cósmicos primarios, está dada por la siguiente expresión:

$$\frac{dN_g^i(h_0)}{N_g^i(h_0)} = \int_g^\infty \left(\frac{\delta D(\varepsilon)}{D(\varepsilon)} W_g^i(\varepsilon, h) \right) d\varepsilon \quad (3.8.1)$$

$\frac{dN_g^i(h_0)}{N_g^i(h_0)}$ representa las variaciones de la componente secundaria a latitudes en una localidad con corte geomagnético “ g ” y niveles de observación con presión h_0 . Donde $\delta D(\varepsilon)/D(\varepsilon)$ representa las variaciones en el flujo primario de rayos cósmicos (en función de la energía “ ε ”; a $D(\varepsilon)$ se le conoce como el espectro diferencial de energía), en las que han sido tomadas en cuenta, variaciones de tipo atmosférico y geomagnético. El término N_g^i representa la i -ésima componente muónica de la intensidad de radiación cósmica, restringida a una rigidez geomagnética dependiente de la latitud “ g ”.

Al término $W_g^i(\varepsilon, h)$ se le conoce como coeficiente de acoplamiento, y es una medida de la proporcionalidad entre las variaciones primarias $\delta D(\varepsilon)/D(\varepsilon)$ y las secundarias $dN_g^i(h_0)/N_g^i(h_0)$; y la curva de este en función de la energía, se denomina también función diferencial de respuesta del detector, la cual nos da la contribución que tienen partículas primarias de diferentes rangos de energías sobre la intensidad total registrada por el detector.

Las funciones diferenciales de respuesta teóricas para los telescopios de muones, vertical e inclinados (mostrados en la figura 3.4), fueron calculadas para $h_0 = 795.1 \text{ g/cm}^2$ (Ciudad de México) y $g = 8.2 \text{ GeV}$; y una inclinación de 0° y 45° por Otaola et al. (1988). Para un absorbente de densidad constante, la masa por unidad de área es igual al producto de su espesor por su densidad. La masa por unidad de área de la atmósfera en un punto de observación, es decir, sobre un nivel dado, se conoce como *profundidad atmosférica* h_0 .

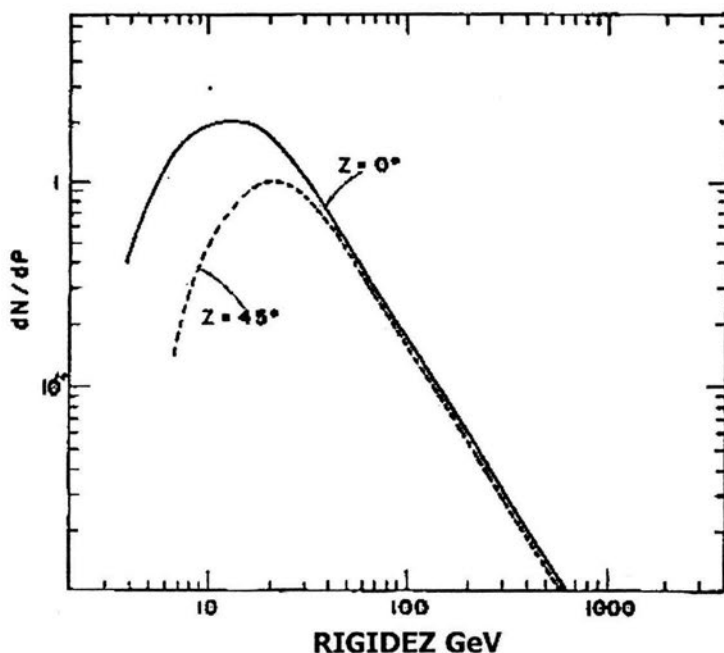


Figura 3.4 Funciones diferenciales de respuesta de un telescopio de muones vertical e inclinado (45°), en la ciudad de México (umbral geomagnético: 8.2 GeV ⁽¹¹⁾; altura sobre el nivel del mar: (2274 m). Tomada de: Revista de la Sociedad Mexicana de Instrumentación, A. C. (Sistema multidireccional de detectores de la componente mesónica de la radiación cósmica secundaria, diciembre 1988).

En la ecuación

$$R_m = \frac{\int_{R_{\min}}^{\infty} RW(R)dR}{\int_{R_{\min}}^{\infty} W(R)dR} \quad (3.8.2)$$

fue utilizado el concepto de rigidez magnética en lugar de energía, por ser la rigidez, la que fija la trayectoria de las partículas en el campo magnético interplanetario. La rigidez es una medida de la resistencia de las partículas con el efecto desviador del campo magnético ⁽¹²⁾.

¹¹ 1GeV = 10⁹ eV

¹² Tomando en cuenta que la energía total de las partículas se aproxima a pc , la ecuación de rigidez se puede escribir como $cp = cB\rho = \frac{E_{eV}}{Z}$, donde c es la velocidad de la luz, B es la intensidad de campo magnético, ρ es el radio de giro de la partícula, Z es el número atómico, p es el momento y E_{eV} es la energía de la partícula en eV.

R_m es la rigidez media, R_{\min} es la rigidez mínima, $h_0 = 795.1 \text{ g/cm}^2$ y $g = 8.2 \text{ GeV}$.

El cálculo de las rigideces medias, de respuestas teóricas para el sistema multi-direccional de telescopios de muones, se llevó a cabo integrando la ecuación anterior desde la rigidez umbral geomagnética determinada para la ciudad de México, hasta aquellas energías para las cuales la respuesta del detector es ya despreciable.

Las funciones integrales de respuesta para telescopios de muones vertical e inclinado a 45° con respecto a la dirección cenital (ver figura 3.5), han sido normalizadas mediante la condición:

$$\int_{R_{\min}}^{\infty} W(R) dR = 1 \quad (3.8.3)$$

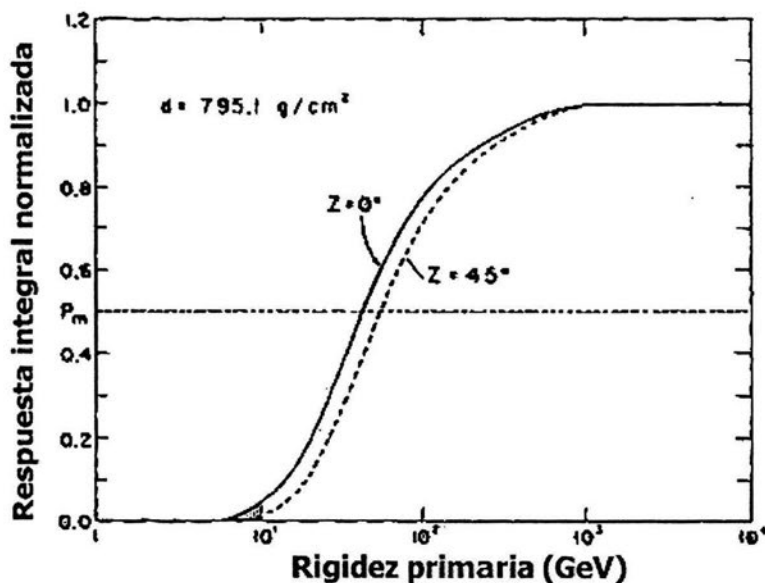


Figura 3.5 Funciones integrales de respuesta para telescopios de muones vertical e inclinado a 45° con respecto a la dirección cenital.

3.9.- Principales características del sistema.

Resultados teóricos calculados para el sistema adoptado, muestran el número de cuentas promedio esperadas, así como la rigidez media de respuesta de los telescopios; y el número de coincidencias para cada componente.

En la **tabla II** se muestran los resultados teóricos calculados para el sistema adoptado (Otaola et. al 1988), en la cual aparece el número de cuentas promedio esperadas, la rigidez media de respuesta de los telescopios, el ángulo sólido total multiplicado por el área de detección y el número de coincidencias para cada componente.

Dirección Z	Ángulo sólido total x área $s\Omega(m^2 \text{ sterad})$	Cuentas esperadas (x $10^6 / \text{hr}$)	Rigidez media de respuesta (GV)	Núm. de coincidencias dobles
Vertical	3.30	2.1	40.2	4
45° Norte	0.85	0.3	57.6	2
45° Este	0.85	0.3	57.6	2
45° Oeste	0.85	0.3	57.6	2
45° Sur	0.85	0.3	57.6	2
Total	6.70	3.3		12

Tabla II Parámetros geométricos e intensidades esperadas.

Las fluctuaciones estadísticas para las medias mensuales y anuales de los valores horarios, se dan a continuación en la **tabla III**:

FLUCTUACIONES ESTADÍSTICAS ESPERADAS		
TELESCOPIOS		
ERRORES	VERTICAL	INCLINADOS
En los valores horarios	0,069 %	0,183 %
En la media mensual	0,003 %	0,007 %
En la media anual	0,001 %	0,002 %

Tabla III

3.10.- Electrónica asociada.

3.10.1.- Requerimientos generales.

1.- Número de cuentas lo suficientemente altas que permitan obtener una adecuada resolución contra fluctuaciones estadísticas y de fondo.

2.- Una alta estabilidad instrumental.

3.- Operación ininterrumpida sobre periodos de tiempo largos.

4.- Eliminación de variaciones periódicas en la estabilidad instrumental que pudieran confundirse con variaciones en la intensidad del flujo primario de rayos cósmicos.

Respecto a estos requisitos, el número de cuentas está determinado esencialmente por el área del detector. Las dos principales fuentes de variaciones en las características operacionales, son:

- a).- Variaciones en el voltaje debidas a alteraciones en la demanda de consumo.
- b).- Cambios en las características electrónicas debidas a variaciones en la temperatura del laboratorio.

Es importante asegurarse que las variaciones del voltaje sean atenuadas y que los circuitos tengan coeficientes de temperatura despreciables.

En cuanto a la estabilidad instrumental, la principal causa de variaciones en ésta se debe a diferencias en la sensibilidad de los foto multiplicadores y a cambios en la eficiencia de los detectores de centelleo. Para minimizar dichas variaciones, se procedió como sigue:

- i. Se ajustaron los niveles de discriminación para obtener un rechazo efectivo de las cuentas individuales.
- ii. El voltaje de alta tensión de cada foto multiplicador, se ajustó mediante divisores de voltaje.
- iii. El número de cuentas para cada detector individual, y en coincidencia, se obtiene como función del alto voltaje aplicado.(Ver figura 3.6).

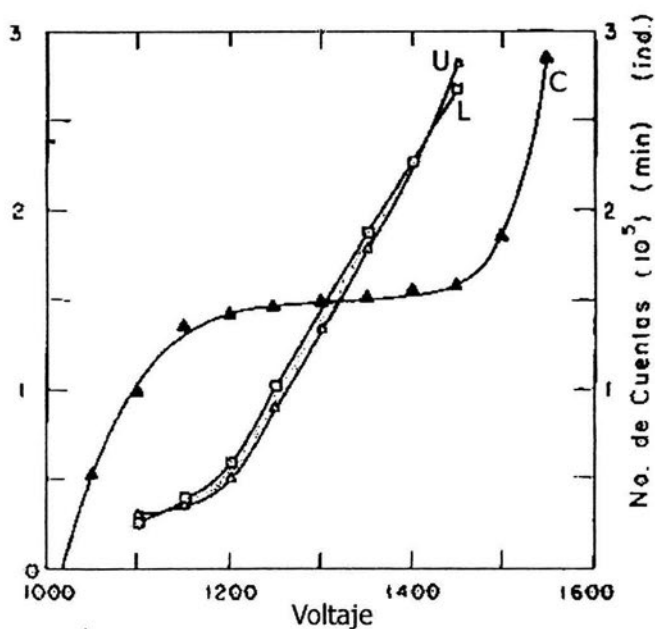


Figura 3.6 Dependencia del número de cuentas de un centellador con el voltaje aplicado. Las curvas U y L, muestran la variación del número de cuentas de cada detector en el telescopio como función del voltaje aplicado; mientras que C muestra la variación del número de coincidencias.

- iv. El voltaje de operación (1300V) se fijó en la meseta del contador (ver figura 3.6), donde la curva es prácticamente horizontal ($\sim 0.4\%/10V$).

3.11.- Circuitos electrónicos.

En la figura 3.7 se muestra un diagrama de bloques de los circuitos electrónicos asociados con el procesamiento inicial de los pulsos de los tubos foto multiplicadores. En la primera etapa, los pulsos de cada tubo foto multiplicador, son amplificados por unos circuitos, que están limitados por la altura del pulso y un discriminador.

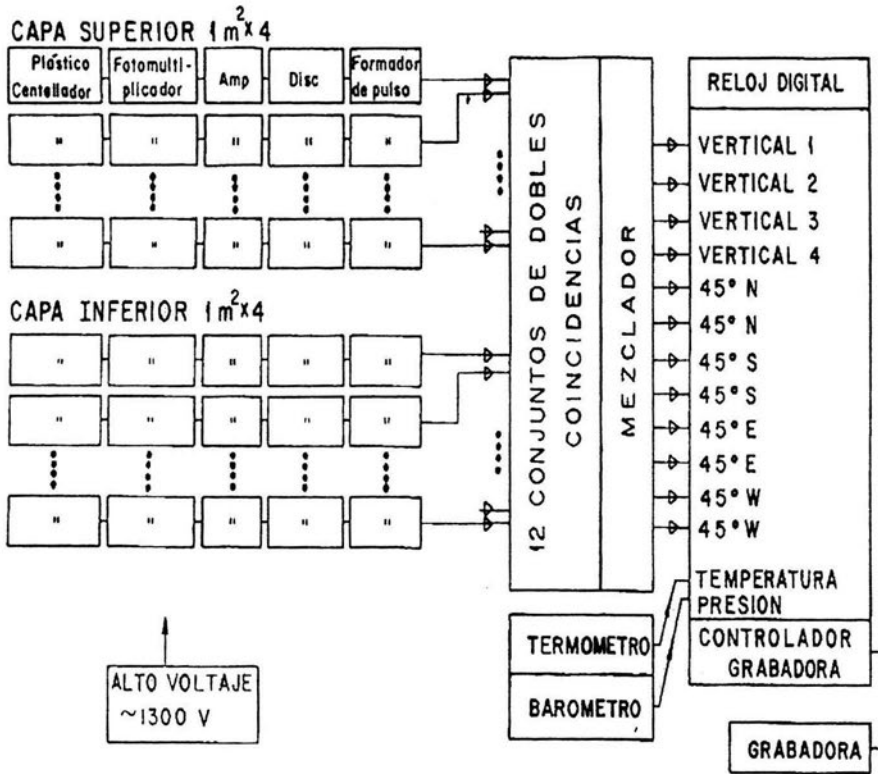


Figura 3.7 Diagrama de bloques de los circuitos electrónicos del sistema multidireccional de telescopios de muones, mostrando el camino de las señales desde los detectores hasta las salidas del sistema de registro.

Los pulsos de cada tubo foto multiplicador son amplificados por circuitos, los cuales contienen limitadores de altura de pulso y un discriminador.

Los pulsos de salida van al amplificador a través de un condensador de acoplamiento. El amplificador tiene una ganancia de aproximadamente 3 y emplea retroalimentación negativa para su estabilización contra cambios causados por variaciones de temperatura.

Los pulsos amplificados son recortados a una amplitud máxima de 350 mV por el limitador de altura. La inclusión de un discriminador a la salida del amplificador permite poder diferenciar entre aquellos pulsos producidos por la radiación cósmica de aquellos debidos a radiación de fondo. El discriminador excluye pulsos debajo de 250 mV (canal 50 en la figura 3.8).

El voltaje de cada tubo tiene que ser ajustado independientemente, con objeto de obtener niveles de discriminación similares para parejas de tubos. La distribución diferencial de alturas de pulso de un detector después de la etapa de amplificación se muestra en la figura 3.8.

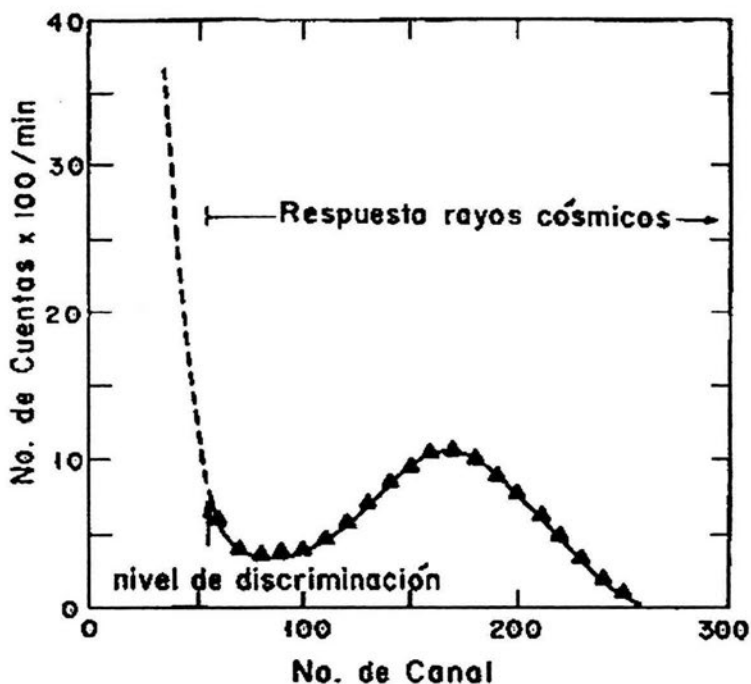


Figura 3.8 Distribución diferencial de la altura de los pulsos a la salida del amplificador. El pico del lado derecho es debido a partículas de la radiación cósmica, mientras que la subida en región de baja altura del pulso es debida principalmente a radiación y de fondo.

4.1.- Efectos atmosféricos en rayos cósmicos secundarios.

Las variaciones de origen atmosférico juegan un papel decisivo en las variaciones del día solar, y las variaciones en la intensidad de la componente muónica; éstas variaciones pueden ser calculadas con base en una distribución de presión y temperatura dadas. De hecho, el efecto de temperatura es difícil de medir, a diferencia del efecto barométrico cuyas correcciones son simples.

Los efectos atmosféricos en los rayos cósmicos, son de interés por 2 puntos de vista. En primer lugar un estudio suficiente de esos efectos, ayuda al desarrollo de un buen método para procesar correcciones atmosféricas; cuando son aplicadas a datos observables, es posible encontrar una variación de rayos cósmicos de origen atmosférico. En segundo lugar, es importante tener una información confiable de estas variaciones atmosféricas, así como las características de la cascada nuclear-muónica de los rayos cósmicos secundarios.

Dos efectos atmosféricos afectan principalmente las observaciones de rayos cósmicos: el efecto barométrico y el efecto de temperatura. La teoría de esos efectos está basada en las nociones sobre los procesos elementales y sobre cascadas nucleónicas y muónicas en la atmósfera.

La composición de la radiación cósmica secundaria varía a medida que esta atraviesa la atmósfera. Por consiguiente, si varían las condiciones atmosféricas, debe variar el registro de las partículas secundarias que llegan a los detectores de radiación cósmica en la superficie terrestre. A continuación analizaremos la influencia de las condiciones atmosféricas sobre la componente secundaria de la radiación cósmica.

4.2.- Análisis de las variaciones de origen atmosférico.

Estudiaremos las posibles variaciones de la radiación cósmica detectadas en un monitor en la superficie terrestre. Supongamos que el punto donde se encuentra dicho monitor tiene una rigidez magnética umbral R_c lo que implica que no es posible registrar partículas con una rigidez umbral menor a R_c y que la presión atmosférica es h_0 . Entonces, la intensidad de la radiación cósmica de la i -ésima componente (nucleónica, muónica o electromagnética), $N_R^i(h_0)$, se puede escribir de la siguiente forma (Dorman, 1974):

$$N_R^i(h_0) = \int_{R_c}^{\infty} D(R') m^i(R, h_0) dR' \quad (4.2.1)$$

donde $D(R)$ es el espectro diferencial de energía de la radiación primaria, $m^i(R, h_0)$ es la multiplicidad integral, que nos da el número de partículas del tipo i producidas por un rayo cósmico primario de rigidez R a una presión h_0 .

En la expresión (4.2.1), puede variar R , $D(R)$, y $m^i(R, h_0)$. Por lo tanto, las variaciones en la intensidad $\delta N_R^i(h_0)$, estarán dadas por:

$$\delta N_R^i(h_0) = -D(R) m_R^i(R, h_0) \delta R + \int_R^{\infty} D(R') \delta m_R^i(R', h_0) dR' + \int_R^{\infty} \delta D(R') m_R^i(R', h_0) dR' \quad (4.2.2)$$

Las variaciones relativas se obtienen al dividir esta expresión entre $N_R^i(h_0)$:

$$\frac{\delta N_R^i(h_0)}{N_R^i(h_0)} = -W_R^i(R, h_0) \delta R + \int_R^{\infty} W_R^i(R', h_0) \frac{\delta m^i(R', h_0)}{m^i(R', h_0)} dR' + \int_R^{\infty} W_R^i(R', h_0) \frac{\delta D(R')}{D(R')} dR' \quad (4.2.3)$$

donde,

$$W_R^i(R', h_0) = \frac{D(R') m^i(R', h_0)}{N_R^i(h_0)} \quad (4.2.4)$$

se conoce como coeficiente de acoplamiento entre las variaciones primarias y secundarias.

La fórmula principal que determina la variación de rayos cósmicos es:

$$\frac{\delta I_c^i(h_0)}{I_c^i(h_0)} = \int_{R_c}^{\infty} \frac{\delta m^i(R, h_0)}{m^i(R, h_0)} W_c^i(R, h_0) dR - \delta R_c W_c^i(R, h_0) + \int_{R_c}^{\infty} \frac{\delta D(R)}{D(R)} W_c^i(R, h_0) dR \quad (4.2.5)$$

Según (4.2.5), las variaciones en la radiación cósmica se pueden dividir en tres grupos de acuerdo con su naturaleza:

- GRUPO I. Variaciones producidas por cambios en el umbral geomagnético, como resultado de perturbaciones geomagnéticas. Dichas variaciones corresponden al primer término en la expresión (4.2.5).
- GRUPO II. Variaciones relacionadas con el cambio de la multiplicidad, como resultado de las perturbaciones en la atmósfera terrestre (variaciones en la temperatura, la presión, la densidad de masa, etc.). Este término corresponde al segundo término de la expresión (4.2.5).
- GRUPO III. Variaciones asociadas con los cambios en el espectro de energía de los rayos cósmicos primarios antes de llegar a la atmósfera de la Tierra. Estas variaciones corresponden al tercer término de la expresión (4.2.5).

En este capítulo analizaremos las variaciones correspondientes al grupo II, relacionadas con la atmósfera de la Tierra. Además, como el objetivo de este trabajo es estudiar los fenómenos asociados a la detección de muones, solamente analizaremos esa componente.

4.3.- Variaciones temporales de origen atmosférico sobre la componente nucleónica.

Los efectos atmosféricos sobre la radiación cósmica son de 5 tipos: temperatura, presión, humedad, gravitación y electricidad atmosférica.

El efecto de humedad atmosférica es un efecto de absorción de la radiación cósmica relacionada con la cantidad de agua que contiene la atmósfera terrestre. Dicho efecto produce variaciones en la intensidad en un orden de magnitud más pequeño que las producidas por efecto de temperatura (Dorman, 1957). Sin embargo, el efecto de humedad puede ser importante en los lugares fríos, ya que en latitudes altas, en invierno puede acumularse gran cantidad de nieve por encima del detector, lo que produce una absorción adicional de partículas y en consecuencia una variación en la intensidad de la radiación cósmica del orden del 0.1 %. Este fenómeno lleva a un efecto estacional.

El efecto gravitacional también es muy pequeño. Dorman (1957), mostró que a nivel del mar existe una variación del 0.08 % por cada cm/s^2 de variación de la aceleración de la gravedad terrestre. Como el valor de la gravedad varía muy poco, es de esperar que los cambios que ella produce en la absorción de partículas cósmicas sean despreciables.

El efecto de electricidad atmosférica consiste en aceleraciones y desaceleraciones en la componente secundaria cargada, producidas por el campo eléctrico de la atmósfera, que puede alcanzar intensidades de hasta 20 KV/m (Dorman, 1957). Las variaciones que se producen son de periodo corto (de 8 a 16 min), con una intensidad del orden de 0.3 % (Alexeyenko y col., 1985) para muones de energías entre 20 y 90 MeV . Para efectos del estudio que nos ocupa estas fluctuaciones también pueden despreciarse. Un estudio dedicado a analizar estos efectos utilizando el monitor de neutrones de la ciudad de México, fue reportado por González-Méndez (2003).

Hasta finales de los años cincuenta se creía que el efecto de presión (denominado efecto barométrico) consistía en una absorción pura. Sin embargo, Dorman (1957) mostró que este efecto es más complicado y que está formado por tres subefectos:

- a).- El de absorción, debido a que un incremento en la masa de aire que tienen que atravesar las partículas cósmicas (como consecuencia de un aumento en la presión atmosférica) provoca un decremento en su intensidad.
- b).- El de decaimiento, ya que con el aumento de la presión atmosférica la capa donde se producen los piones y muones está más distante del nivel de observación.
- c).- El de generación, debido a la generación adicional de partículas secundarias con el aumento de la presión.

Los dos primeros efectos son negativos, mientras el tercero es positivo. Observaciones realizadas a nivel del mar muestran que el efecto de generación es despreciable (Dorman, 1987), y así el efecto barométrico total es negativo. Para los neutrones es solamente importante el de absorción.

4.4.- Efectos atmosféricos en la intensidad de muones.

La producción y propagación de muones en la atmósfera, es determinada por una mezcla de procesos diferente a la componente nucleónica. El flujo de muones responde de manera diferente al cambio de parámetros atmosféricos.

Los cambios en la presión atmosférica tienen una tendencia menos pronunciada en el flujo de muones, que en la componente nucleónica debido a que la propagación de muones está sujeta principalmente a la pérdida de ionización.

Como ya dijimos cuando la altitud en la capa de producción principal cambia, además de haber una diferencia en el decaimiento de muones, existe una variación adicional de la intensidad. Si la altitud aumenta, la longitud de camino de los muones a nivel del mar se alarga y la probabilidad de decaimiento aumenta.

Un tercer efecto es debido a la competición entre la interacción y decaimiento de piones cargados. La probabilidad de ambos procesos depende de la densidad atmosférica en la localización del pión. Cuando la temperatura en la capa principal de producción de piones aumenta entre 100mb y 200mb), la densidad disminuye y es insignificamente favorecido el decaimiento de piones que la interacción pión-nucleón.

$$\begin{cases} n + \pi^+ \rightarrow p + \pi^0 \\ \pi^- + p \rightarrow n + \pi^0 \end{cases}$$

Las variaciones en las intensidades obtenidas de muones, pueden deberse a variaciones de los siguientes factores físicos: condiciones atmosféricas, cambio en la intensidad del flujo primario, cambio de un punto con una aceleración gravitacional diferente, pequeñas variaciones en el espesor de la capa atmosférica.

La forma general de representar las variaciones en la intensidad de muones (4.4.1), consta de una ecuación que considera un primer término correspondiente al efecto negativo de absorción, parte del cual es causado por el cambio de presión en el nivel de observación, contribuyendo al efecto barométrico. Otra parte del efecto barométrico es incluido en el segundo término el cual consiste de una contribución negativa que surge de la inestabilidad de los muones, (el efecto de decaimiento); y otra positiva que surge de la variación del número de piones cuando comienzan a generarse. Las contribuciones faltantes son importantes, para grandes alturas, donde son creados muchos piones para alturas cercanas a nivel del mar, pueden ser despreciados. El cuarto término da la variación de la intensidad de muones debido a la variación del flujo primario. Mientras que el quinto y sexto términos, representan los efectos de densidad, causados por las inestabilidades de piones y muones. El séptimo término da la variación en la intensidad de muones, debida a la variación en el flujo primario.

$$\begin{aligned}
\delta N_{\mu}(h_0, \Delta \varepsilon, x) = & -\delta \varepsilon_{\min} \int_0^{h_0} dh_2 \int_0^{h_2} dh_1 F(\varepsilon_{\min}, h_1, h_2, h_0, x) + \\
& + \delta h_0 \int_{\varepsilon_{\min}}^{\infty} d\varepsilon \left\{ -\frac{m_{\mu} c}{\tau_{\mu} \rho(h_0)} \int_0^{h_0} dh_2 \int_0^{h_2} dh_1 \frac{F(\varepsilon, h_1, h_2, h_0, x)}{\alpha \varepsilon x - a(h_0 - h_2)} + \int_0^{h_0} dh_1 F(\varepsilon, h_1, h_2, h_0, x) \right\} - \\
& - \int_{\varepsilon_{\min}}^{\infty} d\varepsilon \int_0^{h_0} \frac{dh_2 \delta \rho(h_2)}{\rho(h_2)} \int_0^{h_2} dh_1 F(\varepsilon, h_1, h_2, h_0, x) + \tag{4.4.1} \\
& + \int_{\varepsilon_{\min}}^{\infty} d\varepsilon \int_0^{h_0} dh_2 \int_0^{h_2} dh_1 F(\varepsilon, h_1, h_2, h_0, x) \left\{ \frac{m_{\mu} c}{\tau_{\mu} \varepsilon x} \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh \delta \rho(h)}{\rho^2(h)} + \frac{m_{\mu} c}{\tau_{\mu}} \int_{h_2}^{h_0} \frac{dh}{\rho^2(h)} \frac{\delta \rho(h)}{\alpha \varepsilon x - a(h - h_2)} \right\} + \\
& + \int_{\varepsilon_{\min}}^{\infty} d\varepsilon \int_0^{h_0} dh_2 \int_0^{h_2} dh_1 \frac{\delta f_{\pi}(\varepsilon, h_1, x)}{f_{\pi}(\varepsilon, h_1, x)} \times F(\varepsilon, h_1, h_2, h_0, x)
\end{aligned}$$

4.5.- Efectos atmosféricos de muones suaves.

En el pasado, diversos autores han hecho estudios del coeficiente barométrico para la componente muónica. Las principales conclusiones de estos estudios son (Dorman, 1974):

- 1.- Dentro de los errores experimentales, no se encontraron variaciones estacionales en el coeficiente barométrico.
- 2.- El coeficiente barométrico no depende del ciclo solar.
- 3.- El coeficiente barométrico depende ligeramente de la latitud geomagnética.

4.6.- El efecto de temperatura en los muones.

El coeficiente de temperatura en los muones, es más difícil de medir que el coeficiente barométrico.

El coeficiente barométrico se determina por un sólo parámetro. El coeficiente de temperatura requiere el conocimiento del estado de la atmósfera desde el punto de generación hasta el nivel de detección. La determinación del perfil de temperatura atmosférica, requiere sondeos atmosféricos en globos o bien mediciones hechas vía satélite, debido a que la densidad atmosférica cambia con la altura; también la temperatura es diferente en distintas capas atmosféricas.

Un cambio notable de temperatura (por ejemplo un aumento de 3°C), en alguna parte de la atmosférica (por ejemplo a 10km sobre el nivel del mar), provocará una expansión en ella y esto da como efecto que los muones se generen más arriba (ver figura 4.1), debido a que los piones generadores de muones han interactuado antes con los núcleos atmosféricos, por lo que la medición en el número de cuentas de muones cambiará.

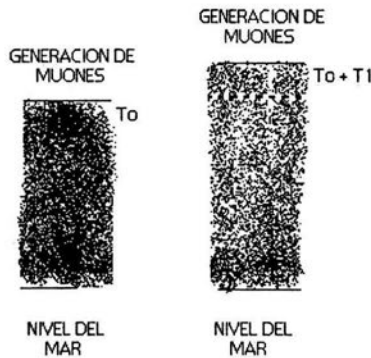


Figura 4.1 T_0 es una temperatura cualquiera, $T_0 + T_1$ es una temperatura mayor a T_0 . Al expandirse la atmósfera la generación de muones se da más arriba.

5.- Corrección de los efectos atmosféricos en los datos de muones del telescopio de C.U.

5.1.- Introducción (coeficiente barométrico).

El coeficiente barométrico se obtiene a partir de la correlación entre la intensidad de muones registrada, y la presión atmosférica. Con el fin de eliminar perturbaciones de tipo geomagnético en los datos se consideraron solamente días geomagnéticamente tranquilos; aquellos para los cuales el coeficiente Kp⁽¹³⁾ tiene un valor menor a 20.

Para la componente muónica (a bajas rigideces geomagnéticas), prevalece el efecto de temperatura sobre otros efectos como el geomagnético, barométrico, efecto de humedad y electrostático.

La intensidad I de alguna componente de rayos cósmicos secundaria, varía con un pequeño cambio de presión h₀ al nivel de observación como

$$dI = -\mu I dh_0 \quad (5.1.1)$$

donde μ es el coeficiente de absorción de la componente dada. De este modo, si I_{h₀} es la intensidad para una presión h₀, entonces para $\mu = cte$, tenemos que:

$$I = I_{h_0} e^{-\mu(h-h_0)} \quad (5.1.2)$$

Frecuentemente se usa la aproximación lineal, desarrollando la ecuación (5.2.1) en serie de Taylor para pequeñas variaciones de la presión alrededor del valor h₀.

Comúnmente el cambio en la intensidad de radiación cósmica es expresado en % de una cantidad I₀, de modo que:

$$\Delta I_{h_0} = \Delta I - \beta(h - h_0) \quad (5.1.3)$$

donde ΔI es la desviación media de la intensidad (en %), y β es el coeficiente barométrico (%/mb).

¹³ La variación de campo geomagnético se mide mediante una serie de índices correspondientes a diferentes parámetros relacionados con el estado del campo magnético. Uno de los índices más usados es el Kp de carácter planetario, el cual intenta expresar el grado de "actividad geomagnética" o perturbación de todo el planeta.

5.2.- ¿Cómo son afectados los muones por la presión y la temperatura?

Con el objeto de determinar un método idóneo para la corrección y conocer la importancia del efecto integral de los efectos atmosféricos, se emplearon dos técnicas:

5.2.1.- Correlación múltiple de presión y temperatura en superficie (Duperier).

Para estudiar las variaciones de origen atmosférico Duperier (1948), describe los cambios en la intensidad de la radiación cósmica secundaria a través de la siguiente ecuación de regresión:

$$\frac{\delta I}{I} = \beta_h \delta h + \beta_T \delta T \quad (5.2.1)$$

donde β_h y β_T se denominan coeficiente de presión y temperatura respectivamente; δh y δT corresponden a las variaciones en la presión y en la temperatura.

La relación que existe entre la presión atmosférica y la variación en la intensidad de la radiación cósmica, es representada mediante un número al cual se le llama coeficiente barométrico; dicho coeficiente es indispensable para la determinación del efecto barométrico.

Con los datos obtenidos por el telescopio de muones de C.U., se buscó una correlación entre la intensidad de rayos cósmicos, la temperatura y la presión, mediante un proceso de regresión multilínea en el cual la temperatura y la presión juegan el papel de variables independientes, mientras que la intensidad es la variable dependiente. Integrando la fórmula (5.2.1), podemos realizar la corrección que estará dada mediante la fórmula:

$$I = I_0 e^{-[\alpha(\Delta p) + \beta(\Delta T)]} \quad (5.2.2)$$

donde α es el coeficiente de presión y β es el coeficiente de temperatura; ΔP es la diferencia entre un valor promedio de presión, y el dato correspondiente, de igual manera para ΔT . I_0 es el dato de intensidad de radiación cósmica en tanto por ciento, a corregir.

5.2.2.- Perfiles de temperatura (Dorman).

El efecto de temperatura en el flujo de rayos cósmicos, es más difícil de medir que el efecto barométrico, ya que éste es determinado por un parámetro (como se había dicho en 4.7), la presión a nivel del mar, mientras que la determinación del perfil de temperatura en la atmósfera requiere de sondas aerológicas o datos de satélites. La importancia de utilizar perfiles de temperatura para corregir los datos de la componente total en la intensidad cósmica, se debe a que los muones son sensibles a la temperatura.

Las correcciones por temperatura son importantes para el estudio de variaciones tales como: la diurna, la de 27 días y la anual. La fórmula básica para determinar el efecto de temperatura (Dorman, 1974), es:

$$\left(\frac{\delta I}{I}\right)_{temp} = \int_0^{h_0} W_T(h) \delta T(h) dh \quad (5.2.3)$$

donde el coeficiente de temperatura $W_T(h)$ y la variación en esta $\delta T(h)$ pueden ser conocidos. Las funciones $W_T(h)$ se calculan teóricamente para alguna componente de rayos cósmicos considerando los procesos de formación y paso a través de la atmósfera de dicha componente.

Las fluctuaciones de temperatura están tomadas de datos de radiosondas en medio de cada capa en las superficies isobáricas estándar como son: 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150 y 100 mb, las cuales son multiplicadas por un respectivo coeficiente constante k_i , que se obtiene de las correlaciones entre I y la temperatura respectiva.

En esta forma, si T_i es la temperatura observada, la contribución de la i -ésima capa a la corrección de temperatura $(\delta I/I)_{temp}$ es:

$$\Delta W_i = -k_i (T_i - T_i^0) \quad (5.2.4)$$

donde $(T_i - T_i^0)$ es la desviación de T_i de un valor promedio de temperatura para una capa atmosférica dada T_i^0 . Para esos valores estándar de T_i^0 podemos tomar los valores de las temperaturas en las isobaras estándar, en el primer día de toma de datos o los valores que ocurren más frecuentemente para el perfil durante una época determinada.

El modelo de Dorman contempla las capas 900, 800, 700, 600, 500, 400, 300, 200, 100, y 50mb. Las capas 900 y 800 no se tomaron en cuenta debido a que la ciudad de México está a 2274m sobre el nivel del mar lo cual implica una presión media de 780 mb. Para conocer las temperaturas en los distintos niveles de presión, se utilizaron datos de satélites proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), correspondientes al año 2000. Los datos reflejan perfiles de temperatura muy similares a lo largo del año, pero con diferencias significativas entre el día y la noche, razón por la cual se utilizaron dos perfiles que fueran representativos: uno para las 0 hrs y otro para las 12 hrs, ambos en tiempo local.

La integral indicada en (5.2.3), puede aproximarse como:

$$\left(\frac{\delta I}{I}\right)_{temp} = 0.01 \sum_{i=0}^7 \Delta W_i \quad (5.2.4)$$

5.3.- Correlaciones por efectos atmosféricos.

(donde se ha agregado el factor 0.01 a fin de obtener la corrección en tanto por ciento).

Con el objeto de trabajar con un conjunto de datos que no están afectados por perturbaciones geomagnéticas o de origen interplanetario, se eliminaron del conjunto original los días con índice geomagnético $K_p \geq 20$. Tampoco se tomaron en cuenta en este trabajo los días en los cuales ocurrieron decrecimientos Forbush, pues durante estos, el medio interplanetario se encuentra altamente perturbado.

5.3.1.- Correlación múltiple.

Se utilizaron datos horarios correspondientes a los meses marzo a diciembre del año 2000. A fin de hacer el número de datos manejables, se calcularon los coeficientes respectivos para periodos mensuales. Los resultados de la correlación multilíneal se muestran en la tabla IV.

Excepto por los meses de marzo, abril y julio en el caso del coeficiente de presión los resultados son bastante homogéneos. No se observa una variación estacional de los coeficientes.

Los coeficientes de correlación con la temperatura superficial correspondientes a los meses de marzo, abril y julio, resultaron ser negativos contrariamente a lo esperado. Adicionalmente, el coeficiente de presión del mes de junio resultó ser positivo en contradicción con el resto de los meses. Cuando se revisaron los datos respectivos, se encontró ausencia de datos del orden de un 10%. En las bitácoras del detector, se refieren fallas en el suministro de corriente eléctrica. Adicionalmente se encontraron variaciones anómalas en presión y temperatura (datos muy bajos respecto a la presión y cambios del orden de más de 5 grados en la temperatura). Por las razones expuestas, los datos de los meses señalados no fueron considerados en este análisis. (Dichos meses son marcados con un *).

TABLA IV

	coef. Presión	coef. Temp.			
max. intensidad	%/mi	%/°C	prom. Presión	prom. Temp.	
ENERO					
FEBRERO					
MARZO	1363100	-0,0040	-0,00118*	583,6	23,7
ABRIL	1355500	-0,0028	-0,00017*	583,2	20,5
MAYO	1342400	-0,0012	0,00030	582,6	18,3
JUNIO	1329700	0,0007	0,00066*	583,0	16,4
JULIO	1345500	-0,0051	-0,00031*	583,6	17,2
AGOSTO	1336100	-0,0017	0,00032	583,7	19,6
SEPTIEMBRE	1338100	-0,0009	0,00042	582,3	17,2
OCTUBRE	1355700	-0,0009	0,00047	583,5	16,1
NOVIEMBRE	1339200	-0,0013	0,00013	582,8	15,3
DICIEMBRE	1353600	-0,0033	0,00011	584,0	12,3
coef. Prom. De presión		-0,00143		P.prom. Total	T. Prom. Total
coef. Prom. De temperat.		0,00029		582,9	17,2

Tabla IV. Esta tabla contiene datos de la máxima intensidad para cada mes, los cuales se utilizarán para normalizar y representar en % la intensidad de radiación cósmica. En la columnas 3 y 4 se obtuvieron los coeficientes mensuales respectivos. Las últimas dos columnas representan los promedios mensuales de presión y temperatura.

En las figuras (5.1 y 5.2), se muestra claramente una tendencia negativa entre intensidad y presión para los meses mayo y agosto del año 2000 (datos horarios).

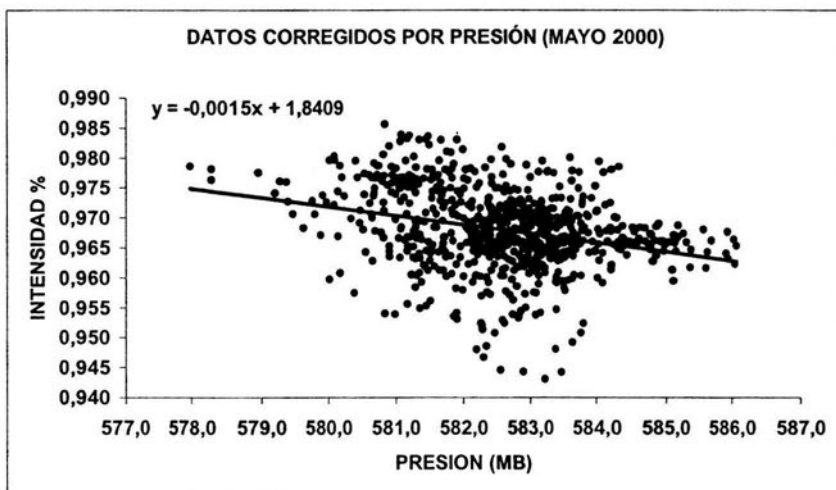


Figura 5.1 Gráfica de intensidad de muones (datos corregidos) contra presión para el mes de mayo del 2000.

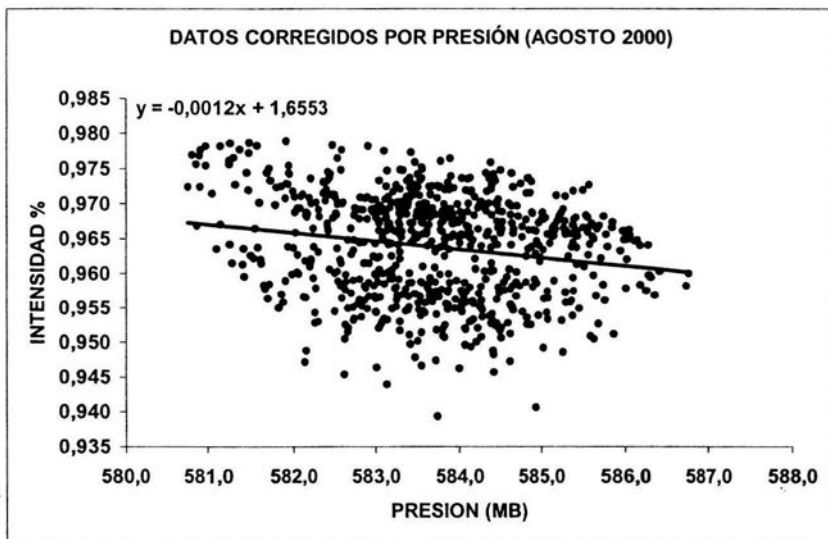


Figura 5.2 Gráfica de intensidad de muones (datos corregidos) contra presión para el mes de agosto del 2000.

En las siguientes figuras (figura 5.3 y 5.4), correspondientes a mayo y agosto del 2000, la correlación entre la intensidad cósmica y la temperatura muestran claramente una tendencia positiva.

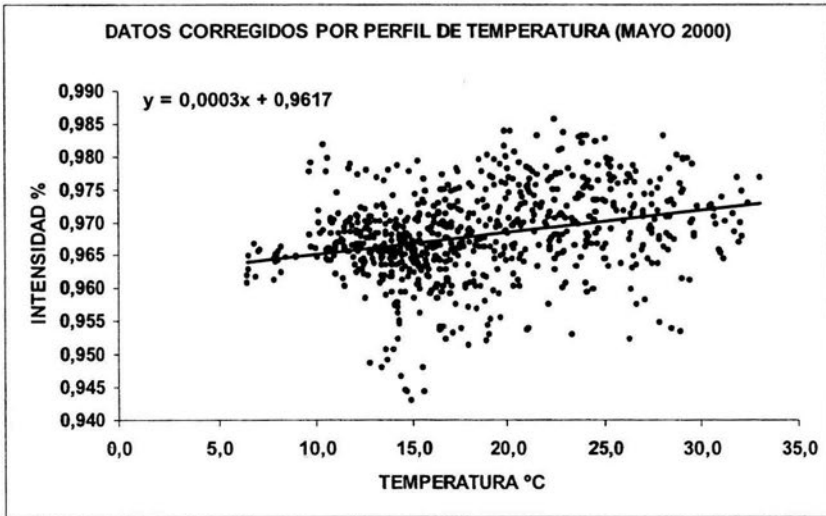


Figura 5.3 Gráfica de intensidad de muones (datos corregidos) contra temperatura para el mes de mayo del 2000.

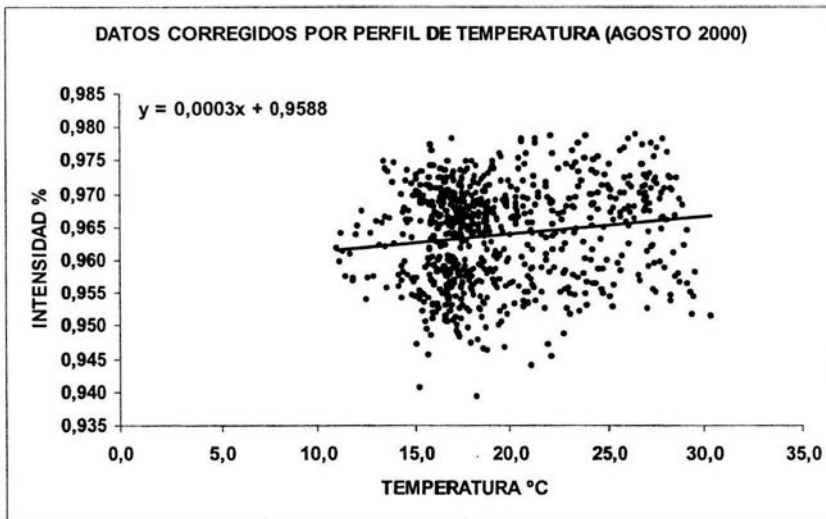


Figura 5.4 Gráfica de intensidad de muones (datos corregidos) contra temperatura para el mes de agosto del 2000.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

5.3.2.- Método de perfiles.

Se observó en las gráficas de perfiles de temperatura del día y de la noche, eran similares pero diferían en los extremos notablemente; por lo que se tomaron 2 perfiles directamente para realizar la corrección más precisa; uno a las 12:00hrs y otro a las 0:00hrs (tiempo universal) para cada mes.

Debido a que alturas o isóbaras no aparecen en la tabla de Dorman, se hizo una extrapolación de la gráfica (ver figura 5.5) con los coeficientes que si aparecían y ajustando la gráfica a un polinomio de grado 6 cuya ecuación se utilizó para obtener los coeficientes k_i faltantes.

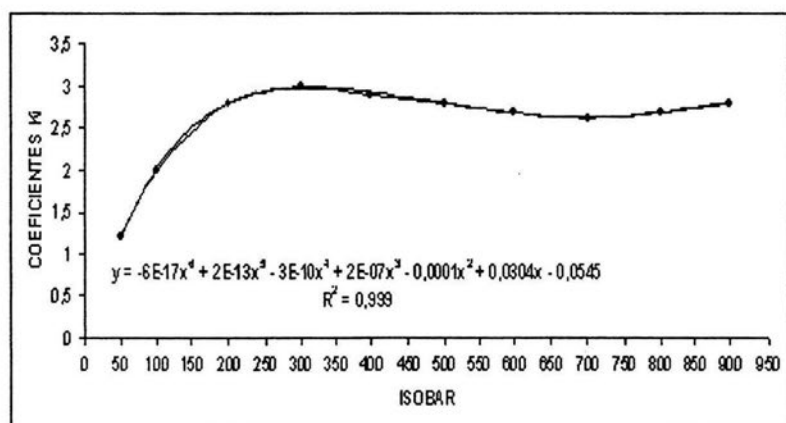


Figura 5.5 Extrapolación mediante un polinomio de grado 6.

Tabla V, de la cual fueron utilizados los valores k_i para la corrección por perfiles de temperatura. Tomados de Dorman 1974.

Resumen									
LAYER ⁽¹⁴⁾	1	2	3	4	5	6	7	8	
ISOBAR	700	500	400	300	250	200	150	100	
Ki	2,6	2,8	2,9	3	3,0	2,8	2,5	2	

Tabla V

En la tabla VI, se muestran los datos utilizados para la corrección por el método de perfil por temperatura; la altura está dada en milibarios o hectopascales⁽¹⁵⁾. Se realizó una corrección para el día y otra para la noche. Debido a que había ligeros cambios en el perfil de temperatura, las mediciones se tomaron a las 12 y 0 horas tiempo universal (6 y 18 hrs tiempo local); T_i representa la temperatura de la i -ésima capa.

TABLA VI

CAPAS ALTURA (mb) ⁽¹⁶⁾	0		1		2		3		4		5		6		7		8		
	766.4	700	500	400	300	250	200	150	100										
HRS. (T. UNIV)	12,0	0,0	12,0	0,0	12,0	0,0	12,0	0,0	12,0	0,0	12,0	0,0	12,0	0,0	12,0	0,0	12,0	0,0	
ENERO	Ti °	10,8	16,8	6,4	11,5	-7,7	-7,9	-20,4	-20,2	-36,7	-36,6	-45,9	-45,7	-54,6	-54,6	-64,1	-64,6	-76,0	-75,9
FEBRERO	Ti °	13,8	20,0	7,7	12,7	-8,8	-9,8	-22,0	-21,9	-38,6	-38,2	-48,7	-48,3	-57,2	-57,0	-62,2	-62,6	-66,2	-67,0
MAHZO	Ti °	15,6	21,0	9,5	14,1	-8,6	-9,8	-21,5	-21,6	-37,2	-37,1	-47,0	-46,8	-55,8	-56,1	-63,5	-63,3	-69,7	-73,1
ABRIL	Ti °	14,9	22,0	10,5	16,3	-7,1	-7,4	-18,9	-19,0	-35,1	-34,4	-45,4	-45,3	-56,8	-55,9	-65,6	-66,0	-73,9	-76,5
MAYO	Ti °	13,5	18,5	9,6	13,4	-8,1	-7,5	-16,9	-17,1	-32,1	-31,8	-42,1	-41,8	-54,1	-53,8	-67,8	-67,9	-75,8	-75,0
JUNIO	Ti °	12,2	16,0	8,5	11,8	-6,1	-5,8	-16,2	-15,9	-31,5	-31,0	-41,9	-41,4	-54,4	-54,1	-68,8	-68,4	-75,7	-77,1
JULIO	Ti °	12,2	16,8	8,4	12,4	-7,1	-7,2	-17,5	-17,1	-32,6	-32,3	-43,1	-42,7	-55,2	-55,0	-67,7	-67,7	-73,9	-73,8
AGOSTO	Ti °	11,5	15,5	7,8	11,3	-6,5	-7,1	-17,1	-16,6	-32,4	-31,8	-42,4	-42,0	-54,4	-54,5	-68,0	-67,6	-73,9	-74,7
SEPTIEMBRE	Ti °	12,0	17,0	8,3	12,3	-5,4	-6,1	-16,0	-15,5	-30,8	-30,5	-40,9	-40,7	-53,4	-53,3	-68,1	-67,9	-78,3	-73,3
OCTUBRE	Ti °	11,8	16,8	7,9	12,3	-6,4	-6,4	-17,0	-16,8	-32,5	-32,3	-42,7	-42,6	-54,9	-54,8	-68,9	-68,7	-77,7	-78,1
NOVIEMBRE	Ti °	13,2	17,8	9,1	13,0	-6,0	-6,8	-17,4	-17,7	-33,1	-33,1	-43,3	-43,3	-55,3	-55,1	-69,0	-69,4	-77,7	-78,2
DICIEMBRE	Ti °	9,8	14,5	6,1	10,0	-8,3	-8,7	-20,2	-19,9	-36,1	-36,0	-45,9	-46,1	-57,1	-57,1	-67,7	-67,9	-74,2	-74,6

Como se dijo anteriormente, los perfiles de temperatura comparados entre sí para un mismo mes, son semejantes aunque difieren en los extremos de éstas, por lo que se tomó un perfil mensual promedio para el día y uno para la noche. Como no se tenían los valores de temperatura en superficie, se realizó una interpolación en las gráficas (ver figuras 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9), de los perfiles ajustando un polinomio de grado seis y posteriormente aplicó a la ecuación (5.2.4).

¹⁴ Los número que aparecen aquí del 1 al 8, son una enumeración de las capas atmosféricas utilizadas, con su respectiva presión (mb) y su correspondiente coeficiente K_i .

¹⁵ Un hectopascal equivale a 100 pascales, donde un pascal es una unidad de presión la cual tiene la siguiente equivalencia:
 $1 \text{ pascal} = 1 \text{ N} / \text{m}^2$.

¹⁶ La altura está medida en unidad de presión llamada milibario o hectopascal (mb), $1 \text{ mb} = 1 \text{ hPa} = 100 \text{ pascales}$.

Ejemplos:

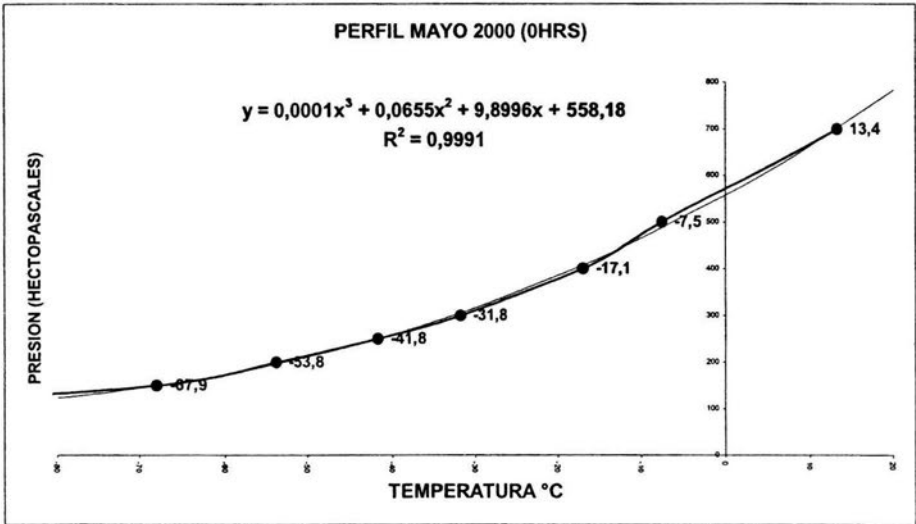


Figura 5.6 Gráfica de presión contra temperatura para el mes de mayo 2000, en la cual se tomó un dato de temperatura promedio, respecto a las 0 hrs tiempo universal.

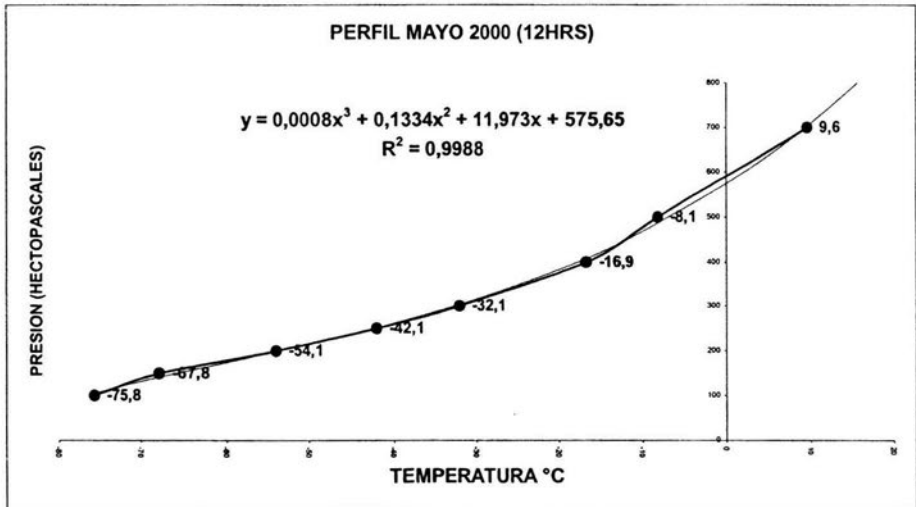


Figura 5.7 Gráfica de presión contra temperatura para el mes de mayo 2000, en la cual se tomó un dato de temperatura promedio, respecto a las 12 hrs tiempo universal.

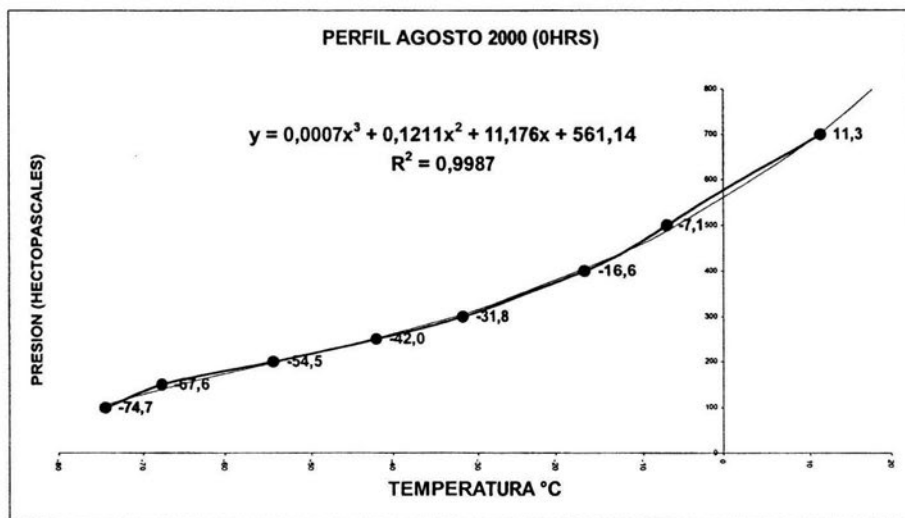


Figura 5.8 Gráfica de presión contra temperatura para el mes de agosto 2000, en la cual se tomó un dato de temperatura promedio, respecto a las 0 hrs tiempo universal.

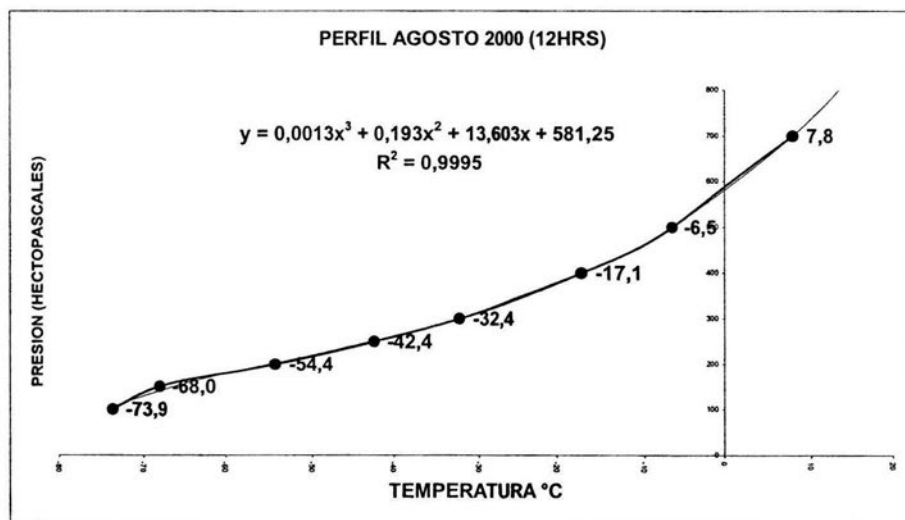


Figura 5.9 Gráfica de presión contra temperatura para el mes de agosto 2000, en la cual se tomó un dato de temperatura promedio, respecto a las 12 hrs tiempo universal.

Mediante la fórmula polinomial mostrada en cada gráfica, se calcularon los valores para T_i , mostrados en la tabla VI.

En las figuras 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14, se comparan datos de neutrones corregidos por presión (Hurtado et al, 2000); representados por una línea continua, muones corregidos mediante una regresión multilínea y muones corregidos por perfil de temperaturas para los meses de mayo, junio y octubre 2000. Las gráficas de muones corregidas por ambos métodos son tan semejantes que es imposible distinguir las en la gráfica.

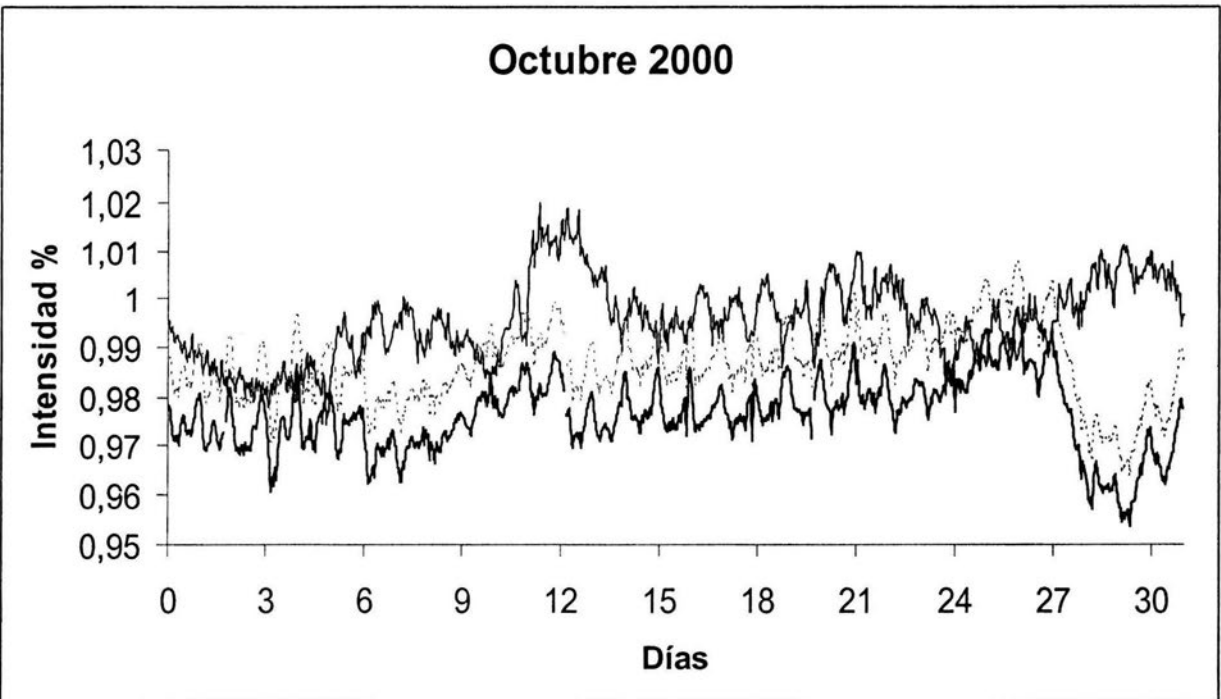


Figura 5.10 En esta gráfica se muestra en línea continua gruesa los datos de neutrones corregidos, la línea Continua delgada representa los datos de munes corregidos por regresión y la línea punteada representa los datos de munes corregidos por perfil de temperatura, respecto al mes de octubre del 2000.

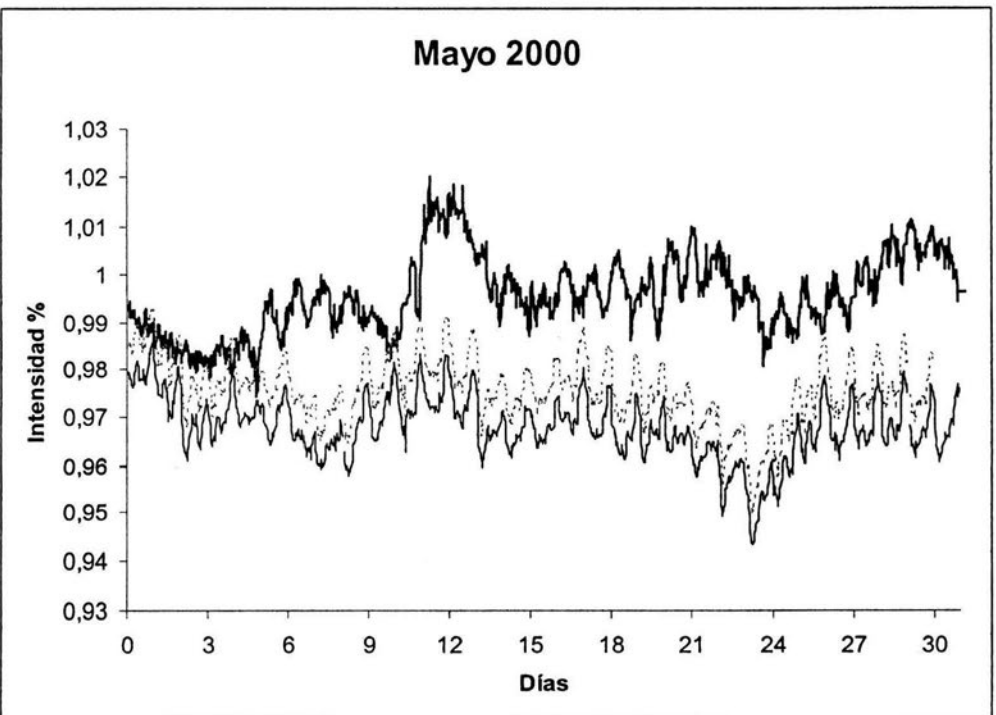


Figura 5.11 En esta gráfica se muestra en línea continua gruesa los datos de neutrones corregidos, la línea Continua delgada representa los datos de muones corregidos por regresión y la línea punteada representa los datos de muones corregidos por perfil de temperatura, respecto al mes de mayo del 2000.

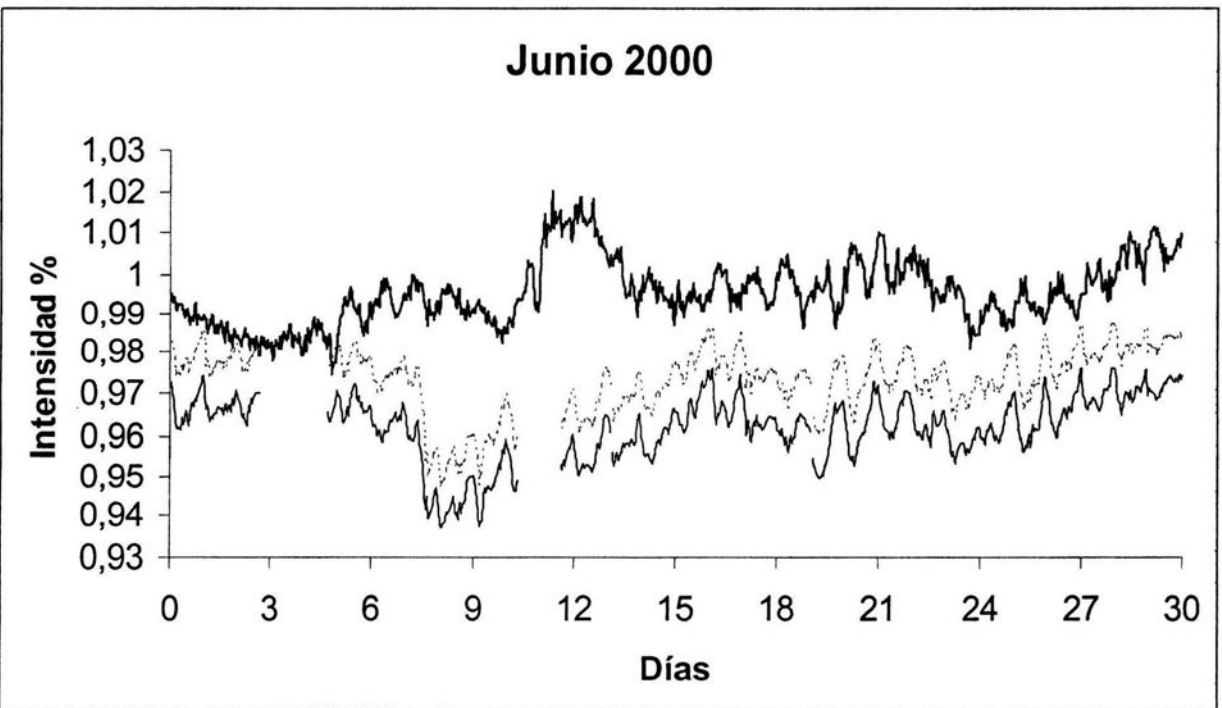


Figura 5.14 En esta gráfica se muestra en línea continua gruesa los datos de neutrones corregidos, la línea continua delgada representa los datos de muones corregidos por regresión y la línea punteada representa los datos de muones corregidos por perfil de temperatura, respecto al mes de junio del 2000.

En el mes de octubre los datos de muones siguen a los de neutrones casi idénticamente. Se observa hacia el final del mes un decrecimiento Forbush que alcanza la misma profundidad porcentual en ambos detectores, lo cual indica que el acontecimiento produjo un evento duro puesto que la rigidez media de respuesta del monitor de neutrones (25 GeV) es menor que la del telescopio de muones (42 GeV).

Durante el mes de mayo, muones y neutrones se siguen próximamente hasta el día 19 donde ocurre un decrecimiento Forbush. El decrecimiento es más importante en el monitor de neutrones lo cual implica un espectro más blando para este evento. Aún cuando la variación diurna permanece similar en ambos detectores, el nivel de intensidad de neutrones ya no se recupera hasta los niveles porcentuales de los muones. En junio ocurrió un nuevo decrecimiento Forbush que separa aún más las intensidades de muones y neutrones. Nótese que la variación diurna sigue siendo igual.

5.4.- Conclusiones.

- **En este trabajo se implementaron y probaron dos métodos para corregir los datos del Telescopio de Muones de Ciudad Universitaria, D. F. por efectos atmosféricos.**
- **Los resultados obtenidos indican que las correcciones son acertadas pues la intensidad de muones corregida es muy similar a la intensidad correspondiente al monitor de neutrones ubicado en el mismo sitio.**
- **Las correcciones por los dos métodos utilizados en esta tesis, arrojan resultados indistinguibles por lo que hace innecesaria una corrección por perfiles de temperatura para la intensidad de muones de la ciudad de México, lo cual puede deberse a dos factores:**
 1. **La alta rigidez umbral de la ciudad de México hace que los muones posean energías grandes y sean poco afectados por los cambios en el perfil de temperatura atmosférica.**
 2. **La ciudad de México, se encuentra a 2280 m sobre el nivel del mar, lo cual hace que el gradiente de temperatura atmosférica sea menor que para estaciones a nivel del mar.**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Francis Halzen y Alan D. Martin. Quarks and leptons, 1984.
- George L. Trigg. Enciclopedia of Applied Physics Vol. XIII, 1995.
- H. Carmichael. Instruction manual No. 7 COSMIC RAYS, 1964.
- J. A. Otaola. Detección de la componente mesónica, 1979.
- J. A. Otaola, O. Musalem y J. M. Moreno. Paper (Sistema Multidireccional de Detectores de la Componente Mesónica de la Radiación Cósmica Secundaria), 1988.
- Joaquín Gómez Camacho. Partículas elementales, 2001.
- José F. Valdés Galicia y Javier A. Otaola. Los Rayos Cósmicos, 1992.
- L. I. Dorman. Cosmic rays, 1974.
- M. L. Duldig. Paper (Muon Observations), 1999.
- M. Oda, J. Nishimura y K. Sakurai. Cosmic Ray Astrophysics, 1983.
- Maurice M. Shapiro y John P. Wefel. Genesis and Propagation of Cosmic Rays, 1988.
- Miguel M. Rodríguez Rojas. Tesis (Análisis de variaciones en la intensidad de la radiación cósmica observadas en la cd. De México durante 1990), 1996.
- Peter K. F. Grieder. Cosmic rays at earth, 2001.
- Ranabir Dutt. (Physical Review; Calcutta University), 1965.
- Rogelio A. Caballero López. Tesis (Estudio de las fluctuaciones de la radiación cósmica detectadas en la superficie terrestre durante los ciclos Solares 22 y 23), 2001.
- Roger Clay y Bruce Dawson. Cosmic Bullets, 1997.
- Sergio Petrer. Paper (Cosmic Ray Spectrum and Composition), 1996.
- Tania Reyes Zúñiga. Tesis (Respuesta luminosa de centelladores plásticos en el ASM), 2003.
- Rossi. Cosmic Rays, 1964.

GLOSARIO

Amplificador operacional Es un amplificador diferencial con una ganancia muy alta, con una elevada impedancia de entrada y una impedancia de salida baja. Los usos más típicos del amplificador operacional son proporcionar cambios de amplitud de voltaje (amplitud y polaridad), osciladores, circuitos de filtros y muchos otros tipos de circuitos de instrumentación.

Antiprotón Antipartícula del protón. Protón con carga negativa. En una ínfima fracción de segundo después de su creación, la partícula desaparece, arrastrada por algún núcleo normal cargado positivamente. Entonces se aniquilan entre sí el antiprotón y un protón del núcleo, que se transforman en energía y partículas menores. En ocasiones, el protón y el antiprotón sólo se rozan ligeramente en vez de llegar al choque directo. Cuando ocurre esto, ambos neutralizan mutuamente sus respectivas cargas. El protón se convierte en neutrón.

Chubascos atmosféricos Para comprender el fenómeno de los chubascos hay que tener en cuenta que cuando chocan dos o más partículas, pueden formarse otras nuevas a expensas de la energía de las originales. La cascada desencadenada cuando un rayo cósmico entra en la atmósfera contiene todo un zoológico de partículas y sus respectivas antipartículas: protones, neutrones, fotones, electrones, neutrinos, muones, piones y kaones, todos moviéndose a velocidades próximas a la de la luz. La energía promedio de las partículas que llegan a la superficie de la Tierra en un chubasco cósmico es cercana a los 100 millones de electrón-voltios. Un rayo cósmico de los de mayor energía es pues capaz de provocar un chubasco con la fabulosa cifra de 10^{12} (un millón de millones) partículas secundarias.

Fotoelectrones Así se le conoce a la emisión de electrones desde la superficie de un metal por la acción de la luz.

Fotones ultravioleta Los fotones son paquetes de energía electromagnética, absorbidos o emitidos por los átomos en cantidades discretas. La energía que lleva uno de estos fotones depende de la frecuencia de la radiación electromagnética en cuestión: a mayor frecuencia, mayor energía por fotón. Para un fotón ultravioleta, la longitud de su onda electromagnética se encuentra entre los 100 amstrong y los 4000 amstrong.

Hadrones La familia de los hadrones constituye uno de los ladrillos básicos de la estructura del universo. Los hadrones participan en las cuatro interacciones fundamentales posibles entre partículas y son los únicos que presentan las llamadas interacciones fuertes. Resulta que los hadrones, incluidos el neutrón y el protón, no son unidades fundamentales e irreducibles de materia sino que están compuestos de unidades aún más pequeñas, los quarks. Se distinguen dos tipos de hadrones: los bariones y los mesones.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Kaones Mesones. Los mesones son partículas inestables de interacción débil que carecen de la llamada carga bariónica. A este grupo pertenece los mesones pi o piones, los mesones K o kaones y el mesón eta. A diferencia de los leptones, los mesones poseen no sólo interacción débil (y electromagnética, si están cargados), sino también fuerte, la que se manifiesta durante la interacción de éstos entre sí y también con los bariones para formar hadrones. El espín de todos los mesones es igual a cero, de manera que todos ellos son bosones, que contrariamente a los fermiones, pueden acumularse en un estado. Fueron detectados por primera vez en 1952 por dos físicos polacos, Manan Danysz y Jerzy Pniewski. Son unos 970 veces más masivos que un electrón y, por tanto, poseen casi la mitad de la masa de un protón o neutrón. El kaón se presenta en dos variedades, un kaón positivo y un kaón sin carga, y cada uno de ellos posee una antipartícula asociada con el mismo. Naturalmente; son inestables y se desintegran en piones en más o menos un microsegundo.

Leptones Recibieron su nombre de la palabra griega leptos, que significa ligeros. A estos pertenecen las partículas que no poseen interacción fuerte: los muones, los electrones, los neutrinos electrónicos, y las correspondientes antipartículas para cada una de estas partículas. Todos los leptones tienen un espín igual a 1/2 y por consiguiente, son fermiones (partículas de espín semientero que no pueden encontrarse en el mismo estado con los mismos números cuánticos) y poseen interacción débil. Aquellos que tienen carga eléctrica (o sea, los muones y los electrones) poseen también interacción electromagnética.

Muones Los rayos cósmicos que provienen del espacio exterior inciden sobre las capas altas de la atmósfera produciendo partículas elementales llamadas muones. Los muones son inestables. En el laboratorio se comprueba que muones no relativistas decaen con una vida media $t = 2,2 \cdot 10^{-6}$ s, es decir que el número de muones de una muestra decrece como $N(t) = N(t=0) e^{-t/t}$. El muón negativo, que tiene 206,77 veces más masa que el electrón (y, por tanto, una novena parte del protón) es la partícula; el muón positivo es la antipartícula. El muón negativo y el muón positivo corresponden, respectivamente, al electrón y al positrón. Por cierto que en 1960 se hizo evidente que el muón negativo era idéntico al electrón en todos los aspectos, excepto en la masa. Era, pues, un "electrón pesado". Asimismo, el muón positivo era un "positrón pesado". Los muones positivos y negativos se aniquilarán entre sí, y tal vez giren antes brevemente en torno a un centro común de fuerza: lo mismo cabe decir de los electrones positivos y negativos. Sin embargo, en 1960 el físico americano Vernon Willard Hughes descubrió una situación mucho más interesante. Detectó un sistema en que el electrón giraba alrededor de un muón positivo; lo denominó "muonio" (el positrón que gira alrededor de un muón negativo sería el "antimuonio").

Neutrino Tan pronto como se propuso la posibilidad de su existencia, los físicos creyeron en ella. Y esta certeza se intensificó al descubrirse el neutrón y al saberse que se desintegraba en un protón y se liberaba un electrón, que, como en el decaimiento beta, portaba insuficientes cantidades de energía. Enrico Fermi dio a esta partícula putativa el nombre de "neutrino", palabra italiana que significa "pequeño neutro". Sin embargo, los neutrinos no mantienen virtualmente interacción con la materia. Se ha calculado que el neutrino corriente podría atravesar 100 años luz de plomo sólido sin que sus probabilidades de resultar absorbido superaran el 50 %. Cualquier neutrino lanzado en nuestra dirección, nos atravesará sin afectarnos en forma alguna.

Piones En 1947, se descubrió un tipo de mesón en las fotografías de los rayos cósmicos. Era un poco más masivo que el muón con 273 veces más masa que un electrón. El nuevo mesón fue llamado mesón pi o pión. El pión se observó que reaccionaba fuertemente con los núcleos y que se trataba precisamente de la partícula predicha por Yukawa. Asimismo, existía un pión positivo que actuaba como una fuerza de intercambio entre protones y neutrones, y aparecía también la correspondiente antipartícula, el pión negativo, que llevaba a cabo un servicio similar para los antiprotones y antineutrones. Ambos son de vida más corta que los muones; tras una vida media de un 1/40 de microsegundo, se desintegran en muones, más neutrinos de la variedad muón. (Y, naturalmente, el muón se desintegra ulteriormente para dar electrones y neutrinos adicionales.) Existe también un pión sin carga, que es su propia antipartícula. (Es decir, en otras palabras, sólo existe una variedad de esa partícula.) Es en extremo inestable, y se desintegra en menos de una cuatrillonésima de segundo para formar un par de rayos gamma. A pesar del hecho de que un pión "pertenece" al interior del núcleo, rodeará fugazmente un núcleo antes de interactuar con el mismo, algunas veces, para formar un átomo piónico, como se detectó en 1951. Asimismo, cualquier par de partículas negativa y positiva o sistemas de partículas puede lograrse que giren unas en torno de otras. En los años 1960, los físicos estudiaron cierto número de "átomos exóticos" evanescentes a fin de conseguir alguna noción acerca de los detalles de la estructura de la partícula.

Positrón Idéntico al electrón, salvo por su carga, que sería positiva, el positrón es tan estable como el electrón. Se mueve en un universo repleto de electrones; apenas inicia su veloz carrera (cuya duración ronda la millonésima de segundo), se encuentra ya con uno.

Fulguración Una fulguración es una de las manifestaciones más energéticas que se dan en la atmósfera del Sol, cuyo efecto se deja sentir en todo el Sistema Solar; se trata de la transformación de grandes cantidades de energía magnética en calor y en energía cinética de las nubes de partículas cargadas que son lanzadas al espacio interplanetario a gran velocidad. La energía liberada por la ráfaga se expandió a través del Sol en forma de una onda de choque alcanzando una velocidad supersónica de casi 450 km/seg.

Rayos gamma Los rayos gamma son un tipo de radiación electromagnética cuya altísima energía viaja y se esparce. Los materiales radiactivos (algunos naturales y otros hechos por el hombre en plantas nucleares) son fuentes de emisión de rayos gamma. La mayoría de los rayos gamma caen en el extremo inferior de su gama y son emitidos como elementos de desintegración radiactiva o cuando los electrones interactúan con otra materia. Pero una fracción pertenece al extremo alto del espectro: cuanto más alta la energía, más raro el fotón. La mayor parte de estos fotones parecen ser el producto secundario de colisiones entre rayos cósmicos y otras partículas.