

## FUNCIÓN EMPÍRICA DE DISTRIBUCIÓN LATERAL MUÓNICA EMPIRICAL FUNCTION OF THE LATERAL MUONIC DISTRIBUTION

R. BUSTOS<sup>†</sup>, A. HERRERA R.<sup>‡</sup>, Y. TSUNESADA<sup>\*</sup>, & J. POMA<sup>\*\*</sup>

Universidad Mayor de San Andrés

La Paz – Bolivia

(Recibido agosto de 2010; aceptado septiembre de 2010)

### RESUMEN

Se estudió la componente muónica de los Chubascos Atmosféricos Extendidos (EAS) comprendidos entre los rangos de  $10^{14}$  y  $10^{16}$  eV con los datos del arreglo BASJE (*Bolivian Air Shower Joint Experiment*) ubicado en el Monte Chacaltaya, Bolivia. Mediante el análisis de los datos de esta componente se logró obtener una función de distribución lateral muónica y su dependencia con los rangos de energía que tiene dicho arreglo. El empleo de simulaciones AIRES y su modelo *QGSJET01c* ha servido para comparar nuestros resultados, encontrándose interesantes coincidencias así como discrepancias. La simulación hecha con CORSIKA y su modelo *PLOTHS2* sirvió únicamente para ilustrar cualitativamente el comportamiento acumulativo muónico del chubasco hacia el centro de su eje. Los resultados del experimento Tien-Shan corroboran los resultados del experimento BASJE, haciendo de la función de distribución lateral muónica del BASJE una buena candidata para el estudio del cosmos a través de los EAS detectados en el observatorio de Chacaltaya. Finalmente se realizó una aplicación rápida con la función empírica obtenida.

*Descriptor:* chubascos atmosféricos extensivos — rayos cósmicos

Código(s) PACS: 96.50.sd, 96.50.S\_

### ABSTRACT

We have studied the muon component of the Extensive Air Showers (EAS) falling between the ranges of  $10^{14}$  and  $10^{16}$  eV according to data from BASJE (*Bolivian Air Shower Joint Experiment*) arrangement at Mt. Chacaltaya, Bolivia. By analyzing data from this component we achieved a muon lateral distribution function and its dependence on the ranges of energy of this arrangement. AIRES simulations and *QGSJET01c* model have been used to compare our results, finding interesting coincidences as well as discrepancies. The simulation with CORSIKA and *PLOTHS2* model was used only to illustrate the qualitative behavior of the cumulative shower muon toward the center of its axis. The results of the Tien-Shan experiment corroborated those found with the BASJE experiment; thus, the muon lateral distribution function of BASJE becomes a good candidate to study the cosmos through the EAS detected at Chacaltaya Observatory. Finally, a quick application with the empirical function obtained was made.

*Subject headings:* extensive air shower — cosmic rays

### 1. INTRODUCCIÓN

El descubrimiento de la radiación extraterrestre hecha por Hess en 1912 ha revolucionado el estudio del Universo a través de la radiación cósmica, estableciéndose a partir de este hecho una serie de investigaciones que han establecido que, del 100% de las partículas que llegan a la atmósfera terrestre, el 92% son protones, el 7% son partículas alfa y el restante 1% contiene núcleos pesados, electrones, positrones y *radiación Gamma*. Esta última despierta su interés, pues al estar constituida de fotones de alta energía poseen una información sumamente valiosa y pura de su origen al no ser afectados por los campos magnéticos ni eléctricos por los que atraviesa al llegar a la Tierra (ver por ejemplo, Bustos 1997).

El rango de energías que el presente trabajo toma en cuenta está entre los  $10^{14}$  eV y  $10^{16}$  eV, estos rangos sólo son posibles de ser investigados desde la superficie terrestre y no así a través de observaciones espaciales, esto debido al poco flujo de radiación que se tiene para estas energías y a esas alturas satelitales.

Las investigaciones de la *radiación Gamma* establecen que los

chubascos originados por este tipo de radiación pueden ser estudiados mediante la determinación del número de *muones* presentes en el chubasco originado por la partícula primaria, y para que dicha partícula corresponda a una *partícula Gamma* el contenido muónico presente en el chubasco debe ser mucho menor al 5% que el contenido muónico de un chubasco originado por un protón (Sokolsky 1989).

Los electrones son las partículas más abundantes en un chubasco; sin embargo, también hay muones debido al decaimiento de kaones y piones cargados. Dado que los muones no sufren una interacción fuerte, estos pierden su energía solamente por la ionización y luego desaparecen al decaer; el número total de muones en el chubasco atmosférico refleja, consecuentemente, la naturaleza de la interacción de las partículas. Es por ello que, la partícula primaria *gamma* o *rayo gamma* es la que produce principalmente cascadas electromagnéticas, y estas cascadas contienen muy pocos muones que aquellos chubascos generados por interacciones nucleares, o partículas primarias que sean nucleones (Fig. 1).

El número total de muones en un chubasco atmosférico depende de la naturaleza de la partícula primaria. Es por eso que el número de muones con energías mayores a una cierta  $E_\mu$  puede escribirse como: (Tsunesada 2002)

<sup>†</sup>Docente Investigador IIF - FCPN - UMSA

<sup>‡</sup>Universidad Mayor de San Andrés

<sup>\*</sup>Department of Physics, Tokyo Institut of Technology, Japón

<sup>\*\*</sup>Ayudante de Investigación - BASJE - UMSA

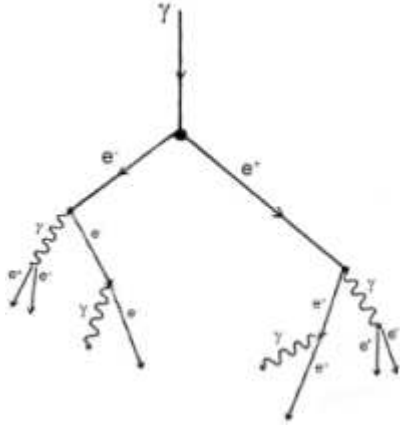


FIG. 1.— Esquema gráfico de un Chubasco Admosférico generado por radiación Gamma

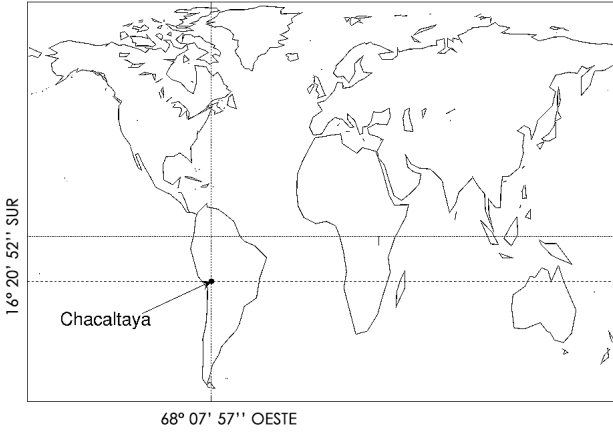


FIG. 2.— Localización geográfica de Chacaltaya

$$N_{\mu}(> E_{\mu}) \propto N_e^{\alpha} \quad (1)$$

Donde  $N_{\mu}$  es el tamaño de la componente electrónica y el exponente  $\alpha$  es de  $\sim 0.9$  para  $E_{\mu} \sim 1 \text{ GeV}$ , y de  $\sim 0.7$  para  $E_{\mu} \sim 200 \text{ GeV}$ . La función de distribución lateral para un chubasco muónico puede expresarse previamente según la siguiente ecuación:

$$\rho_{\mu} = CN_{\mu} r^{-0.75} \left(1 + \frac{r}{R}\right)^{-2.5} \quad (2)$$

Donde,  $N_{\mu}$  es el tamaño del chubasco muónico, y  $C$  es la constante de normalización.

## 2. EL EXPERIMENTO

El experimento BASJE-MAS (Bolivian Air Shower Joint Experiment - Minimum Air Shower) está instalado en el Observatorio de Rayos Cósmicos de Chacaltaya en Bolivia, a  $16^{\circ}20'52''$  de latitud Sur y  $68^{\circ}07'57''$  de longitud Oeste (Fig. 2). Los experimentos de Chubascos Atmosféricos en el monte de Chacaltaya se iniciaron en 1962 con la colaboración de investigadores bolivianos, japoneses y estadounidenses. El observatorio está situado a una altura de 5200 m *snm* y con una profundidad atmosférica de  $550 \text{ g/cm}^2$  (Fig. 3); además, posee una resolución angular de 1.7 grados y la energía umbral es de  $6 \text{ TeV}$ , estas condiciones son buenas para, por ejemplo, estudiar el centro de la Galaxia.

Por otro lado, las mismas condiciones permiten detectar chubascos atmosféricos de temprana edad en su desarrollo longitudinal, y permiten medir tanto las energías primarias como

TABLA 1  
CARACTERÍSTICAS DE LOS DETECTORES DEL ARREGLO BASJE-MAS.

DETECTOR	NÚMERO	ÁREA[m <sup>2</sup> ]	GROSOR[cm]
G	16	1.0	5.0
N	4	0.83	7.5
F	6	0.83	7.5
NT	9	0.87	7.5
L	12	4.0	5.0
S	21	1.0	5.0
Mu	15	4.0	5.0

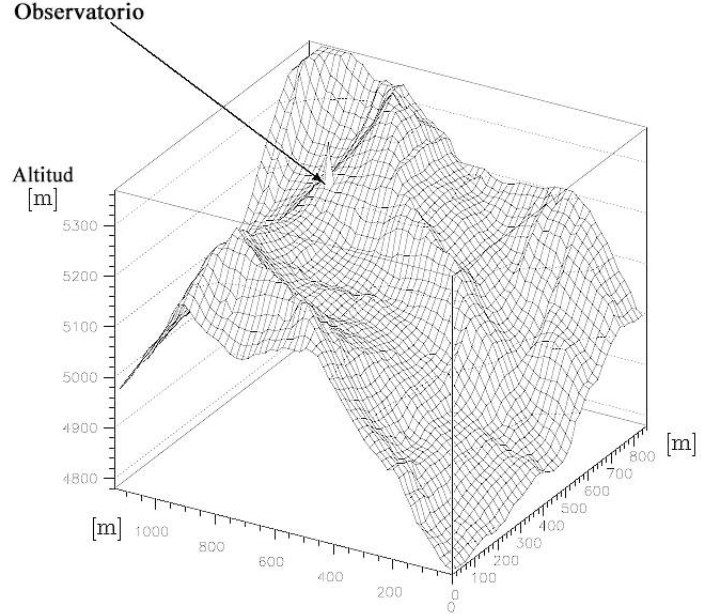


FIG. 3.— Topografía del Observatorio de Chacaltaya

las direcciones de llegada de los rayos cósmicos de un modo más exacto que las observaciones al nivel del mar; también es importante mencionar que el área de observación de nuestra Galaxia en el hemisferio Sur es mucho más extenso que en el hemisferio Norte; para citar, un detector del hemisferio Norte no podría observar el centro de la Galaxia cuya dirección de longitud galáctica es  $l=0$ . Finalmente, el arreglo del experimento está diseñado para estudiar rayos cósmicos con energías por encima de los  $6 \text{ TeV}$ .

### 2.1. El arreglo BASJE-MAS

Cada detector de chubasco de partículas está integrado por los cintiladores plásticos y uno o dos tubos fotomultiplicadores (PMT). La Fig. 4 muestra la vista esquemática de alguno de ellos, como ser los detectores del tipo G, L y S. Todos los detectores se clasifican en G, NT, L, S, N, M, y detectores de muones Mu (Tabla 1).

El número de detectores para el arreglo es de 68 (con excepción de los detectores de muones que son 15), y el número de canales para el tiempo-rápido (*fast-timing*) y la densidad local es de 58 y 68, respectivamente.

La Fig. 5 muestra la ubicación de los detectores para el arreglo BASJE-MAS en un área aproximado de  $360 \text{ m}^2$ ; sin embargo, los detectores N, F y Mu no se muestran en esta repartición pues, en especial los detectores Mu, se sobrepondrían sobre los detectores L, dado que los detectores de muones, como se verá más adelante, están ubicados justo al centro del arreglo.

### 2.2. Detector de Muones

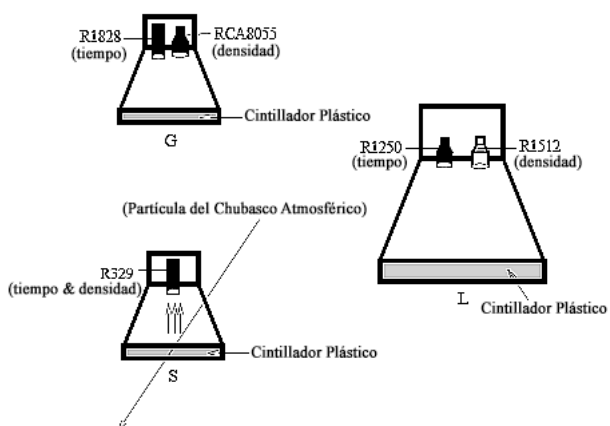
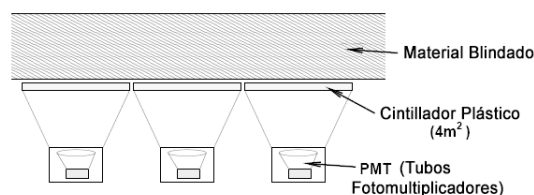


FIG. 4.— Detectores del Chubasco de Partículas



Mu3	Mu6	Mu9	Mu12	Mu15
Mu2	Mu5	Mu8	Mu11	Mu14
Mu1	Mu4	Mu7	Mu10	Mu13

FIG. 6.— Detectores de Muones y la Matriz que conforman

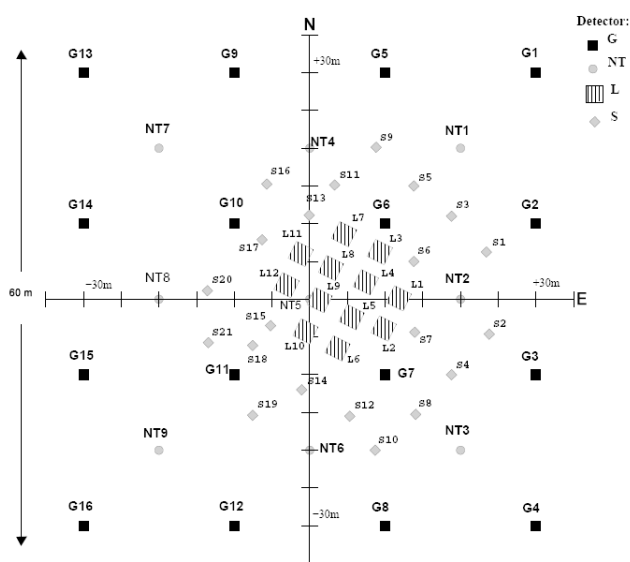


FIG. 5.— Arreglo BASJE-MAS

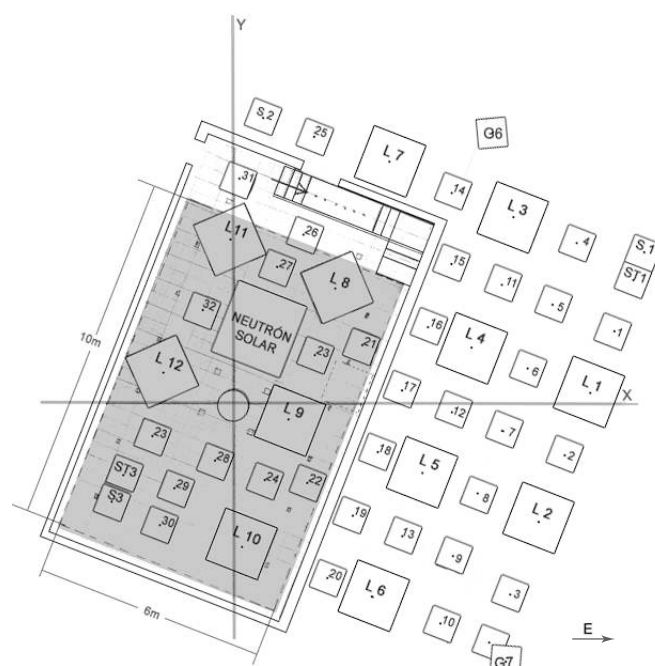


FIG. 7.— Plano del arreglo para el Detector de muones

Para el detector de muones se tienen instalados los detectores de centelleo blindado (Mu) con un área total de  $60 m^2$ , situado en el centro del arreglo de detectores. Esta es una matriz de  $3 \times 5$  con detectores de centelleo de  $4 m^2$  cada uno (Fig. 6). La densidad local de chubascos atmosféricos de muones se miden con un PM (Fotomultiplicador), y el umbral de energía de estos detectores es de  $600 MeV$  para muones incidentes verticalmente.

Las señales de cada detector se envían a la estación central mediante un cable coaxial y son procesadas para ser registradas. En la Fig. 7 se tiene un plano del arreglo para el detector de muones en el que la parte sombreada conforma la matriz de los 15 detectores de muones y que hacen una superficie total de  $60 m^2$ . En este plano se puede observar que en el centro de todo el arreglo BASJE-MAS está situado, también, el centro del arreglo para el detector de muones.

### 3. ANÁLISIS DE LOS DATOS

El análisis de datos tiene dos fases, la primera es la conversión de binario a ASCII de los datos registrados por el experimento BASJE que están en binario y grabados en DVD's de dos caras cada una de  $1 GB$ . Sin embargo, el proceso de la obtención de estos datos binarios también implicó un trabajo cuyo periodo fue desde el año 2000 al 2004 en el observatorio de Chacaltaya y en los denominados "dailycheck", que consistían en subidas

periódicas al laboratorio para verificar que la previa obtención de los datos estuviera marchando correctamente mediante su grabación en los DVD's, en los cuales se almacenaban archivos de 150000 eventos de chubascos atmosféricos que equivalen a unos  $52.2 MB$  de tamaño; por lo que cada DVD almacenaría alrededor de 40 archivos haciendo un total de 6 millones de eventos de chubascos atmosféricos por DVD.

La Fig. 8 muestra un diagrama de bloques del sistema que se empleó para la previa adquisición de los datos en binario por el BASJE-MAS.

#### 3.1. Conversión de los datos

El proceso de conversión de los datos registrados por el BASJE-MAS requiere del programa *mas-anl* en su versión 6.7, que fue desarrollado por el grupo de investigadores y programadores de Bolivia y Japón. Este programa posee a su vez dos archivos: el ejecutable *show-hist* y el archivo de texto editable *mas-det-info-2000*. Previamente, el programa *show-hist* sirve para mostrar los histogramas de todos los detectores por cada archivo original con los 150000 eventos, de los cuales este programa toma en cuenta los 2000 primeros.

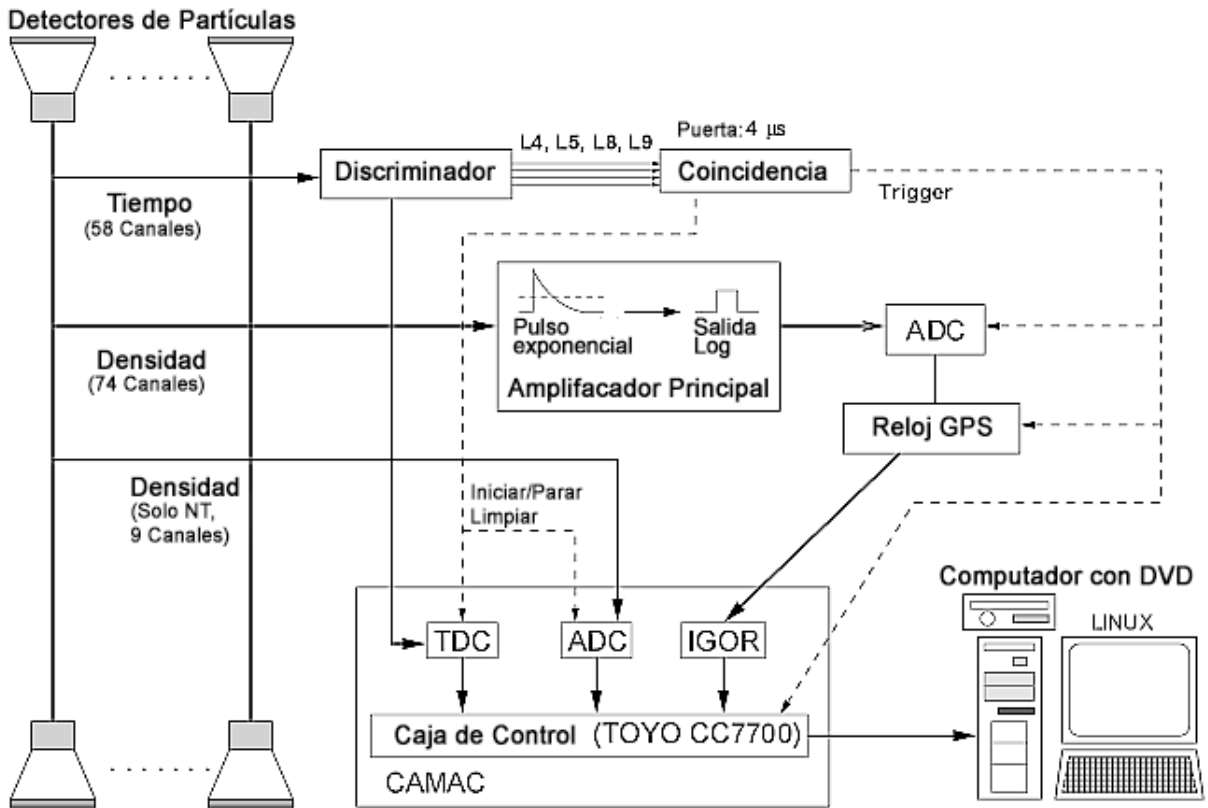


FIG. 8.— Diagrama de bloques del sistema de adquisición de los datos binarios del BASJE

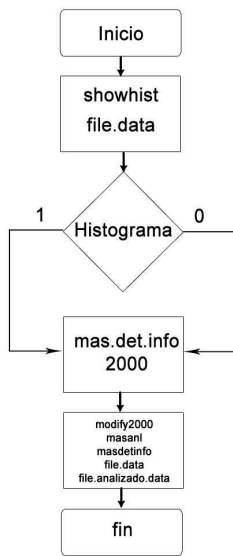


FIG. 9.— Diagrama de flujo del proceso de conversión de los datos del BASJE-MAS

Una vez que se hace la observación de los histogramas para los 2000 primeros eventos y para cada grupo de detectores del archivo original, se debe abrir el archivo de texto *mas-det-info-2000*, en cuyas líneas hay que editar colocando un "0" si la observación de la distribución del histograma generado por *showhist* de alguno de los detectores es aceptable, y "1" si dicha observación presenta picos muy elevados que implican una mala detección del correspondiente detector.

Luego de editar el *mas-det-info-2000* se lo debe grabar, pues el mismo será empleado, finalmente, por los otros ejecutables del programa que son *modify-2000* y *mas-anl 6.7* para conver-

TABLA 2  
COLUMNAS EMPLEADAS DEL ARCHIVO GENERADO POR *mas-anl 6.7*

Número de columna	Variable
3	Año
4	Mes
5	Día
6	Hora (boliviana)
10	Ángulo zenital en grados ( $\theta$ )
11	Ángulo azimutal en grados ( $\phi$ )
12	Coordenada X del arreglo en metros
13	Coordenada Y del arreglo en metros
Columnas de la 23 a la 37	Densidad de partículas ( $\mu_N$ ) para cada detector de muones
14	Tamaño del Chubasco ( $N_e$ )

tirlos en el archivo final, analizado y en ASCII, el cual tendrá las 150000 filas de eventos con las 43 columnas que representan las diferentes variables del Chubasco Atmosférico registrado (Burgoa 2002; Tokuno 2002).

Este proceso se repite para cada uno de los archivos almacenados en los *DVD's*. La Fig. 9 y muestra el diagrama de este proceso de conversión para un archivo original del BASJE-MAS.

La Tabla 2 muestra el número de las columnas de las variables que se emplean para este artículo y la presente investigación, y que el programa *mas-anl 6.7* genera con los archivos originales del BASJE-MAS.

### 3.2. Método de análisis de los Anillos Concéntricos

Una vez obtenida la nueva base de datos con los nuevos archivos generados por el programa *mas-anl 6.7*, es posible analizar éstos según los requerimientos de la investigación. Para el caso concreto, y como se indicó previamente, son 24, de las 43, las columnas que se estudian para poder obtener una Función Experimental de Densidad de Distribución Lateral Muónica. Un

TABLA 3  
CIFRAS CALCULADAS DE LA EC. 3 Y SUS ERRORES ESTIMADOS

Cifras de la Ecuación 3	Error Estimado
0.95	$\pm 0.13$
$6.70 \times 10^5$	$\pm 0.65 \times 10^5$
0.80	$\pm 0.01$
-0.75	$\pm 0.03$
10.73	$\pm 0.74$

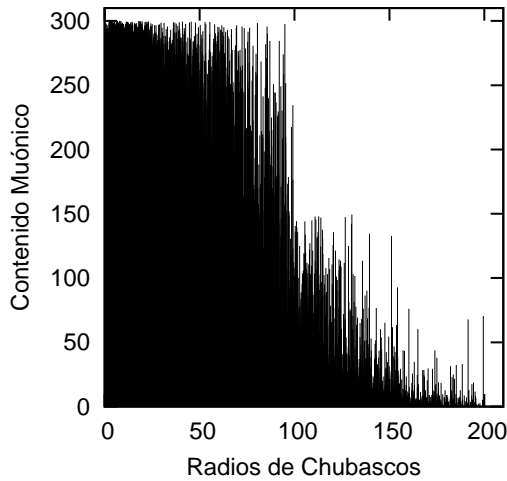


FIG. 10.— Comportamiento de la densidad de las cuentas muónicas en función de los radios al eje de los chubascos atmosféricos

primer análisis que estudie la nueva base de datos puede mostrar el comportamiento de la densidad de partículas muónicas registradas por los 15 detectores, arrojando una distribución que se caracteriza por presentar una mayor concentración de muones hacia el centro del eje del chubasco; pues, las coordenadas X y Y de las columnas 12 y 13 de la base de datos (Tabla 2) representan el centro del eje del chubasco en el arreglo BASJE-MAS; por lo tanto, es posible determinar el radio de cada eje y así encontrar el comportamiento indicado como se muestra en la Fig. 10.

Entre las condiciones iniciales que se tienen para emplear el método, está el hecho de que las cuentas muónicas no deben superar los 300 registros, los radios deben estar calculados hasta los 200 m como máximo, dado que el arreglo para el detector de muones sólo alcanza los 60 m<sup>2</sup>, y como la incidencia de los chubascos es más estable y numerosa para ángulos zenitales  $\theta < 30^\circ$ , se toma en cuenta estos ángulos zenitales para los eventos registrados.

Ahora, para poder determinar los puntos que lleguen a definir una Función de Distribución Lateral Muónica con la nueva base de datos obtenida, se ha desarrollado un método denominado *anillos concéntricos* mediante un programa en lenguaje C que posibilite la obtención de estos puntos, para lo cual se han definido anillos con un mismo radio R y con franjas de 10 metros que comiencen a partir de los 10 metros del arreglo de detectores de muones y que vayan circundando a este arreglo; anillos cuyos radios R, los cuales determinan los radios de los ejes de los chubascos, no superen los 200 metros y hagan un barrido en los cuatro cuadrantes de todo el arreglo BASJE-MAS, así como lo muestra la Fig. 11.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una vez desarrollado el programa mencionado se han podido obtener los puntos significativos que conformen la Función buscada, los mismos que mediante la estadística que promedie el contenido muónico de los *anillos concéntricos* y los divide entre

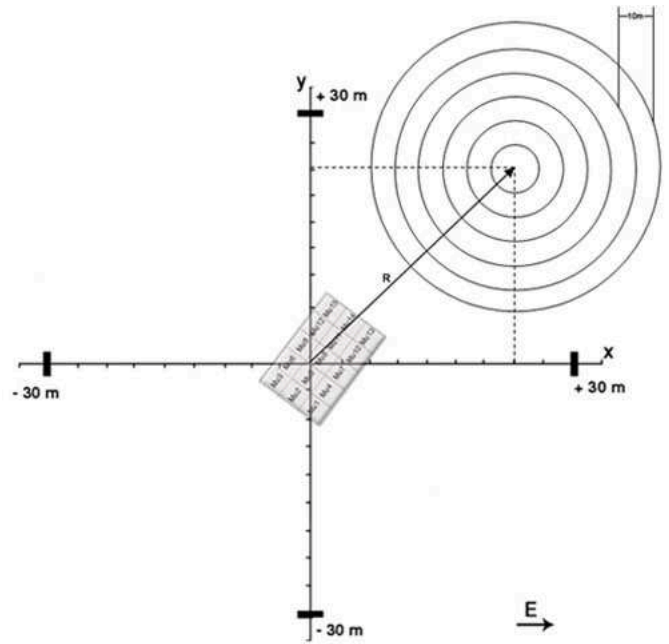


FIG. 11.— Método de los Anillos Concéntricos para la obtención de los puntos que definan la Función de Distribución Lateral Muónica

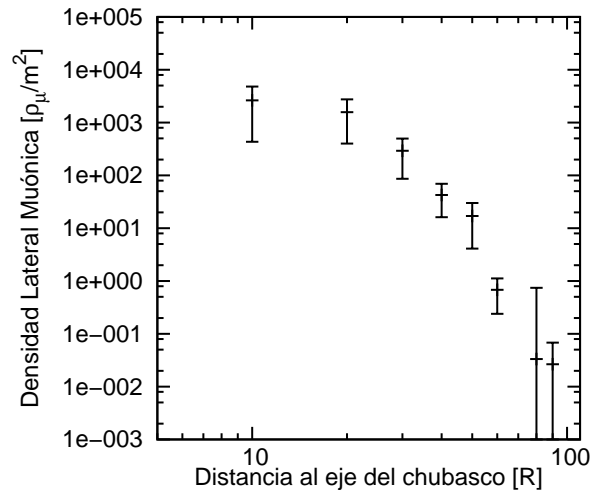


FIG. 12.— Puntos significativos de la densidad de muones registrados por el detector

la superficie total del detector de muones (60 m<sup>2</sup>).

Estos puntos llegan a conformar el comportamiento de distribución lateral de las partículas que llegan al arreglo y son registradas por el detector de muones, tal como lo muestra la Fig. 12.

4.1. Ajuste de la Función de Distribución Lateral Muónica

Un ajuste hecho por el método de *mínimos cuadrados* y aplicado a los puntos significativos encontrados, permite poder determinar la función que denota el comportamiento buscado para la distribución lateral muónica del arreglo BASJE-MAS.

Como la Fig. 13 despliega la Función mejor ajustada a nuestros puntos, esta función toma la forma de la siguiente ecuación:

$$\rho_\mu(R) = 0.95(6.70 \cdot 10^5)^{0.80} R^{-0.75} \exp\left(\frac{-R}{10.73}\right) \quad (3)$$

En la Tabla 3 se muestran los errores encontrados mediante el método de *mínimos cuadrados* para cada cifra de la Función de

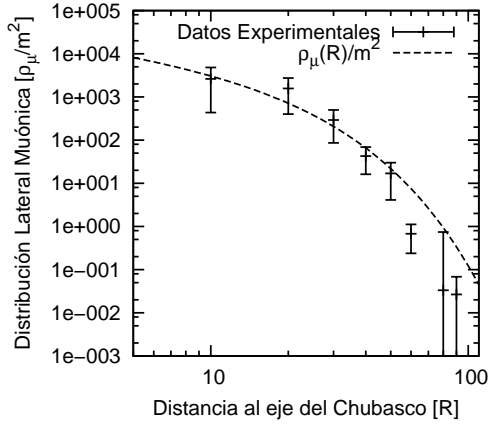


FIG. 13.— Gráfica de los puntos significativos y la Función mejor ajustada a los mismos

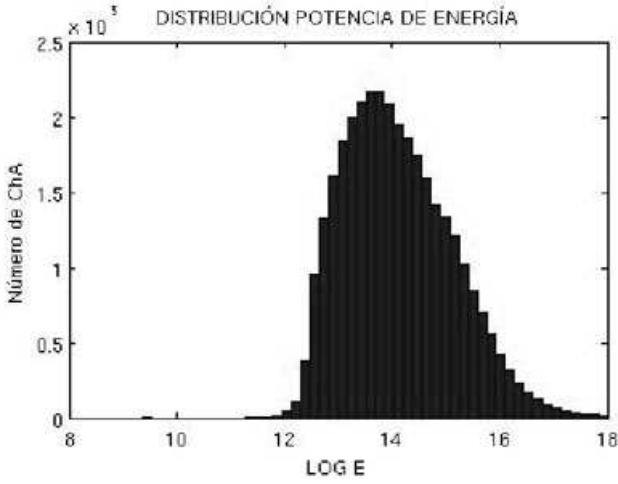


FIG. 14.— Distribución de la Energía esperada de los rayos cósmicos observados por el arreglo BASJE-MAS

Distribución Lateral Muónica encontrada con los puntos significativos hallados y que se describen mediante la Ec. 3.

#### 4.2. Parámetros de Energía de la Función

La relación entre el tamaño del chubasco  $Ne$  (Columna 14 de la Tabla 2), el ángulo zenital  $\theta$  (Columna 10 de la Tabla 2) y la Energía  $E$  de la partícula primaria viene dada por la siguiente ecuación: (Tsunesada 2002)

$$\log E = a(\theta, Ne) \log Ne + b(\theta, Ne) \quad (4)$$

Los parámetros  $a$  y  $b$  son funciones del ángulo zenital  $\theta$  y del tamaño  $Ne$  del chubasco. La Ec. 4 fue determinada mediante simulaciones en *Corsika*, al igual que los parámetros mencionados que se tienen a continuación:

$$a(\theta) = \begin{cases} 0.926 \sec \theta + 0.553 & \text{si } \log Ne < 4 \\ -0.146 \sec \theta + 1.057 & \text{si } \log Ne \geq 4 \end{cases} \quad (5)$$

$$b(\theta) = \begin{cases} -2.936 \sec \theta + 10.553 & \text{si } \log Ne < 4 \\ 1.427 \sec \theta + 8.342 & \text{si } \log Ne \geq 4 \end{cases} \quad (6)$$

Estas últimas relaciones permiten poder obtener una gráfica como el de la Fig. 14, en la cual se puede confirmar que los rangos de energía para la partícula primaria están comprendidos entre los  $10^{11.5} eV$  y  $10^{16} eV$  aproximadamente, como se había adelantado en el Acápite 2.

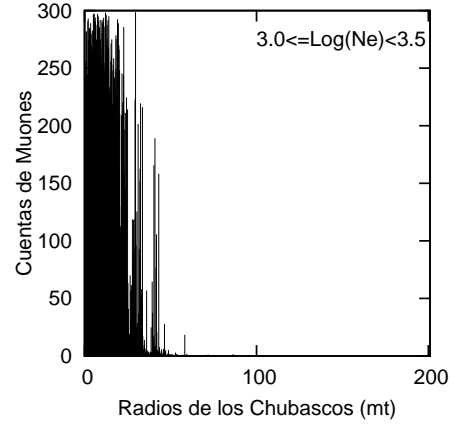


FIG. 15.— Cuentas Muónicas en función al radio del Chubasco para el intervalo  $3.0 \leq \log(Ne) < 3.5$

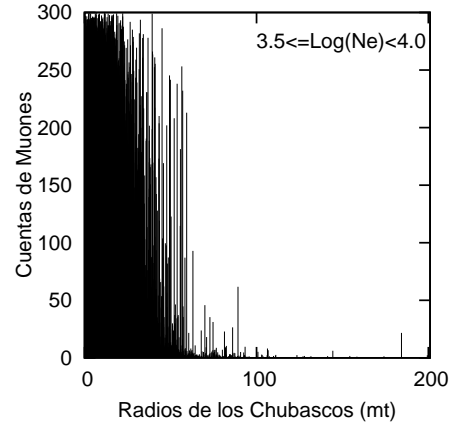


FIG. 16.— Cuentas Muónicas en función al radio del Chubasco para el intervalo  $3.5 \leq \log(Ne) < 4.0$

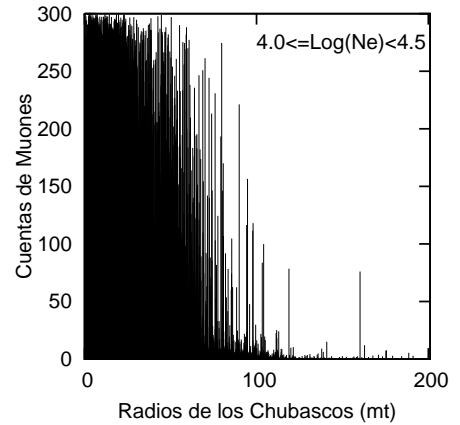


FIG. 17.— Cuentas Muónicas en función al radio del Chubasco para el intervalo  $4.0 \leq \log(Ne) < 4.5$

Los rangos de energía también se reflejan como parámetros en la detección de los muones, y una prueba de ello lo muestran las gráficas de las Fig. 15, 16, 17 y 18; las cuales se pueden obtener haciendo las discriminaciones respectivas en la base de datos para los siguientes intervalos de energía:  $3 \leq \log(Ne) < 3.5$ ,  $3.5 \leq \log(Ne) < 4.0$ ,  $4.0 \leq \log(Ne) < 4.5$  e incluso  $4.5 \leq \log(Ne) < 5.0$ .

De los datos mostrados en las Fig. de la 15 a la 18 y aplicando el método de los *anillos concéntricos*, también es posible deter-

TABLA 4  
INTERVALOS DE ENERGÍA ASIGNADOS A LAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN LATERAL MUÓNICA

FUNCIÓN	INTERVALO DE ENERGÍA
$\rho_{\mu 1}$	$3.0 \leq \log(Ne) < 3.5$
$\rho_{\mu 2}$	$3.5 \leq \log(Ne) < 4.0$
$\rho_{\mu 3}$	$4.0 \leq \log(Ne) < 4.5$
$\rho_{\mu 4}$	$4.5 \leq \log(Ne) < 5.0$

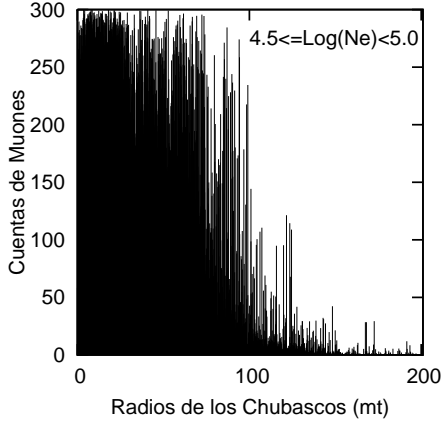


FIG. 18.— Cuentas Muónicas en función al radio del Chubasco para el intervalo  $4.5 \leq \log(Ne) < 5.0$

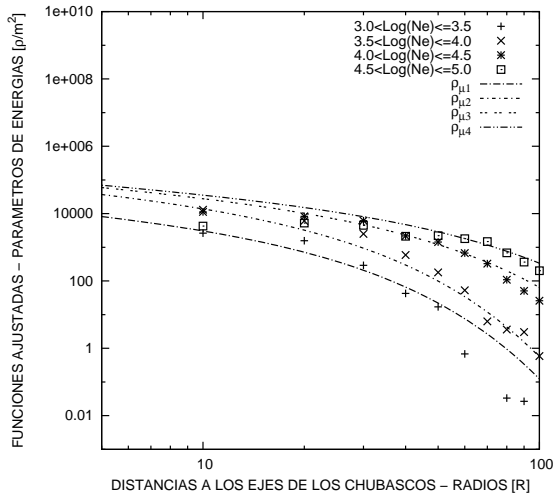


FIG. 19.— Funciones de Distribución Lateral Muónicas ajustadas a los puntos parametrizados por los rangos de Energías

minar los puntos y las funciones que definan el comportamiento de la densidad de distribución muónica para cada uno de los intervalos de energía establecidos, tal como lo muestra la Fig. 19.

Las Tablas 4 y 5 muestran los diferentes intervalos asignados a las nuevas Funciones ajustadas y sus ecuaciones, cuyas gráficas se despliegan en la Fig. 19, de estas nuevas Funciones de Distribución Lateral Muónica ajustadas en cada intervalo de energía, se aprecia que la Función  $\rho_{\mu 1}$  es la primera que se obtuvo en el presente trabajo (Ec. 3), de donde se concluye que dicha Función pertenece al intervalo energético  $3.0 \leq \log(Ne) < 3.5$ .

Para terminar con esta sección, se tiene un último análisis de la base de datos del BASJE-MAS empleando el método desarrollado. Este análisis consiste en tomar en cuenta cada uno de los 15 detectores del arreglo para el registro de las cuentas muónicas como detectores independientes, para comprobar que el método

TABLA 5  
ECUACIONES ENCONTRADAS DE LAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN LATERAL MUÓNICA

ECUACIONES DE LAS FUNCIONES
$\rho_{\mu 1}(R) = 0.95 \pm 0.13(6.70 \times 10^5 \pm 0.65 \times 10^5)^{0.80 \pm 0.01} R^{-0.75 \pm 0.03} \exp\left(\frac{-R}{10.73 \pm 0.74}\right)$
$\rho_{\mu 2}(R) = 0.95 \pm 0.08(44.2 \times 10^5 \pm 4.36 \times 10^5)^{0.80 \pm 0.005} R^{-0.75 \pm 0.03} \exp\left(\frac{-R}{11.41 \pm 0.85}\right)$
$\rho_{\mu 3}(R) = 0.95 \pm 0.08(60.3 \times 10^5 \pm 4.03 \times 10^5)^{0.80 \pm 0.01} R^{-0.75 \pm 0.07} \exp\left(\frac{-R}{20.73 \pm 1.45}\right)$
$\rho_{\mu 4}(R) = 0.95 \pm 0.04(67.0 \times 10^5 \pm 2.46 \times 10^5)^{0.80 \pm 0.02} R^{-0.75 \pm 0.14} \exp\left(\frac{-R}{30.73 \pm 0.99}\right)$

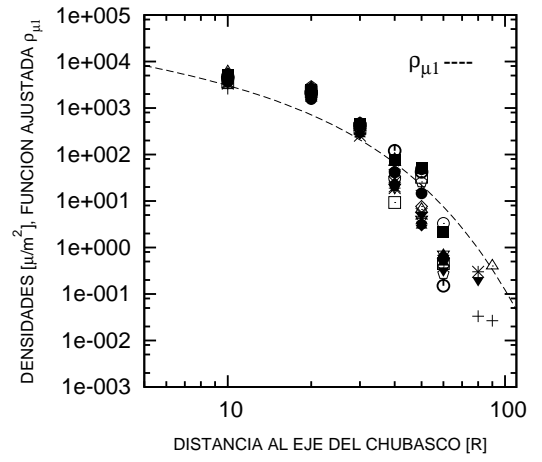


FIG. 20.— Ajuste de la Función  $\rho_{\mu 1}(R)$  a los 15 detectores de muones de manera independiente

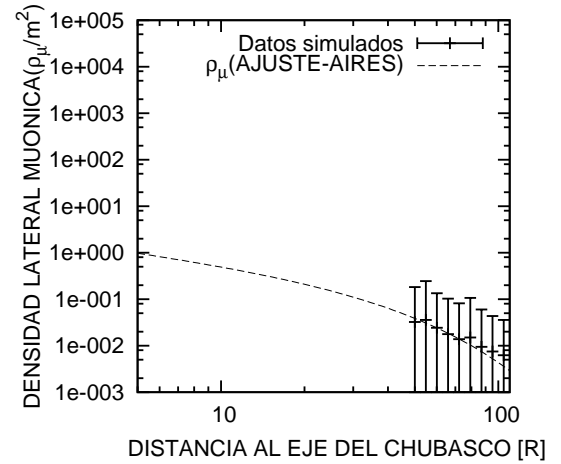


FIG. 21.— Datos simulados con AIRES y la Función de Distribución Lateral Muónica  $\rho_{\mu}(AIREs)$  a los que se ajustan

también es válido si se procede de este modo.

En efecto, la Fig. 20 refleja este hecho, pues asumiendo los detectores como independientes y aplicando nuestro método, es posible ajustar la primera Función encontrada,  $\rho_{\mu 1}(R)$ , a cada uno de los 15 detectores y poder observar que el comportamiento es similar al comportamiento de todo el arreglo, como se esperaba.

### 5. SIMULACIONES MONTECARLO

A continuación se tienen dos ejemplos de simulaciones que emplean la técnica estadística *Montecarlo* para ilustrar el fenómeno de la distribución lateral de muones que en el pre-

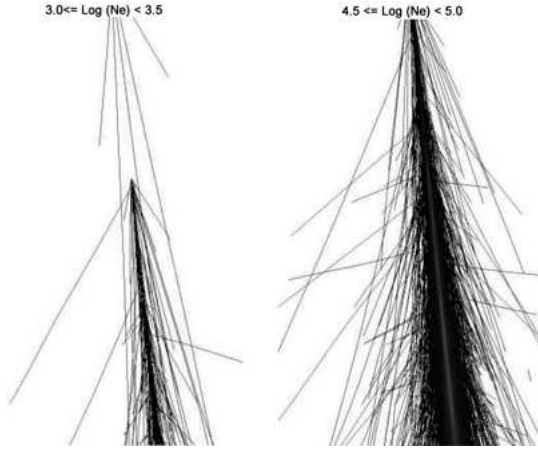


FIG. 22.— Imagen simulada con PLOTSH2 de *Corsika* empleando como parámetros los intervalos de energía comprendidos entre  $3.0 \leq \log(Ne) < 3.5$  y  $4.5 \leq \log(Ne) < 5.0$

sente trabajo se ha investigado. Estos ejemplos son ilustrativos y pueden ampliar de mejor manera las conclusiones a los resultados que se obtuvieron. (*Manuales AIRES - CORSIKA*)

### 5.1. Simulación AIRES

Para nuestro caso concreto, el archivo de entrada de la simulación en *AIRES* contiene los parámetros requeridos, tales como el modelo *QGSJET01c*, los datos referentes a la ubicación de *Chacaltaya*, así como el tipo y la energía de la partícula primaria.

Una vez insertados estos datos y haber elegido la simulación para una Distribución Lateral Muónica, se pudo obtener una colección de datos cuya gráfica y el correspondiente ajuste por mínimos cuadrados de la función  $\rho_{\mu}(AIRE)$  a los que estos datos simulados se acoplan puede observarse en la Fig. 21.

A continuación se tiene la ecuación de la función ajustada a los datos simulados con *AIRES*, en la que se puede apreciar que la misma adquiere la forma que se obtuvo para nuestra primera Función de Distribución Lateral Muónica  $\rho_{\mu 1}(R)$  en la Ec. 3.

$$\rho_{\mu AIRE}(R) = 0.95(5.73)^{0.80} R^{-0.75} \exp\left(\frac{-R}{30}\right) \quad (7)$$

### 5.2. Simulación CORSIKA

En la Fig. 22 se muestra la simulación hecha con *Corsika* y las subrutinas *PLOTSH* y *PLOTSH2*, que si bien esta simulación es únicamente ilustrativa, nos permite poder comprobar que la densidad de partículas muónicas tiende a estar más concentrada hacia el eje del Chubasco Atmosférico simulado, y que esta concentración de muones se incrementa si los rangos de energía también lo hacen, tal y como se pudo verificar con el análisis de los datos experimentales.

## 6. CONCLUSIONES

El análisis de los datos registrados por el detector de muones del BASJE-MAS nos ha posibilitado encontrar una Función Empírica de Distribución Lateral Muónica que, si bien no toma la forma de la Ec. 2, la cual sigue el formato de la típica Función NKG (Nishimura-Kamata-Greisen), podemos afirmar que la Función encontrada posee sus propias características, tomando en cuenta el arreglo para el detector de muones del BASJE y las condiciones geográficas del observatorio de *Chacaltaya*. No obstante, dicha función tampoco se sale de ciertos estándares que ya fueron determinados para funciones de distribución lateral muónica y que fueron encontradas según las condiciones y propiedades de los observatorios en otras latitudes geográficas al rededor del Planeta. Si se hace una comparación entre la función

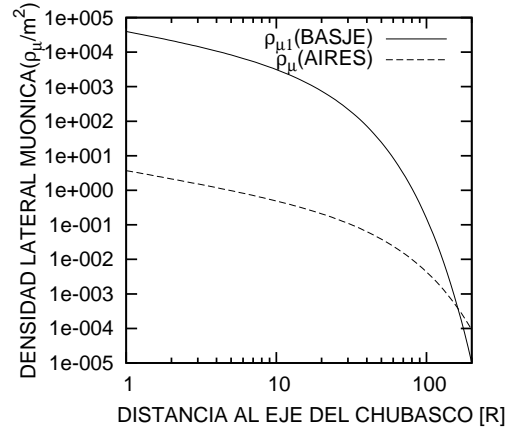


FIG. 23.— Función empírica con los datos del BASJE y función simulada con *AIRES*

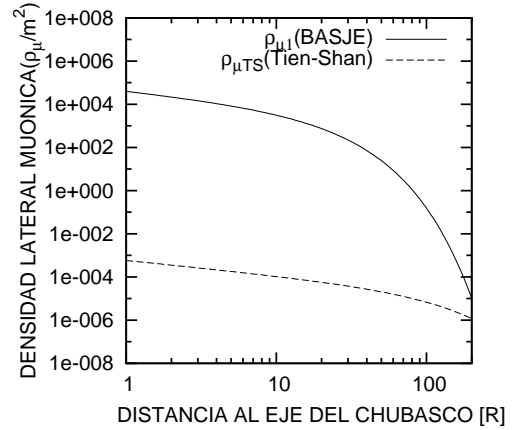


FIG. 24.— Función empírica con los datos del BASJE y función *TIENSHAN*

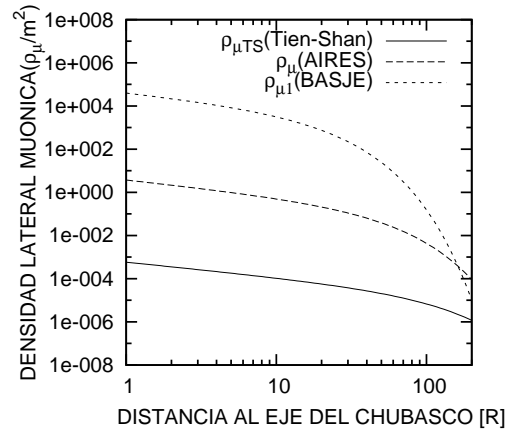


FIG. 25.— Función empírica con los datos del BASJE, la función *TIENSHAN* y la simulada con *AIRES*

ajustada mediante la simulación con *AIRES* y la primera función ajustada con los datos del BASJE, se puede encontrar una discrepancia en un factor de  $10^3$  cuya explicación es debida a una diferencia de densidad lateral muónica, y, al estar la función de distribución lateral muónica en directa proporción con la energía del chubasco, entonces, la simulación hecha con *AIRES* fue mucho menos energética que los *EAS* detectados por el arreglo BASJE. La Fig. 23 puede detallar de mejor manera la mencionada discrepancia energética entre la simulación hecha con *AIRES* y la primera función empírica de distribución lateral muónica, y



TABLA 6  
NUMERACIÓN DE LAS VENTANAS O CAJAS EN CUYOS CENTROS SE  
ENCUENTRAN FUENTES BINARIAS DE RADIACIÓN  $\gamma$  YA CONOCIDAS

Número de Ventana	Fuente $\gamma$ Binaria	$\alpha(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$
1	<i>VelX</i> - 1	135.53	-40.56
2	<i>ScoX</i> - 1	244.25	-15.5
3	SS433	287.34	4.9
4	X1822 - 371	275.59	-37.1
5	X1700 - 377	255.00	-37.7
6	X1907 + 097	286.75	9.7
7	V1223SGR	282.95	-31.23
8	<i>AEAgr.</i>	306.89	-1.049
9	<i>C.G.</i>	266.4	-28.9

por ende, la correspondiente al menor intervalo de energías, que se obtuvo con los datos del BASJE y que se corresponde con las ecuaciones 8 y 9.

$$\rho_{\mu AIREs}(R) = 0.95(5.73)^{0.80}R^{-0.75}\exp\left(\frac{-R}{30}\right) \quad (8)$$

$$\rho_{\mu BASJE}(R) = 0.95(6.70 * 10^5)^{0.80}R^{-0.75}\exp\left(\frac{-R}{10.73}\right) \quad (9)$$

Por este motivo, la Función o las funciones encontrada asumen su propia identidad y están sujeta a ser empleadas en una de sus más interesantes aplicaciones que es la de poder encontrar fuentes de radiación  $\gamma$ . Los siguientes acápite del artículo y la última sección amplían de mejor manera nuestras conclusiones.

### 6.1. La Función TIEN-SHAN

En el arreglo del observatorio de rayos cósmicos de Tien Shan (3340 *m.s.n.m.*), ubicado en Asia Central, en la región fronteriza entre Kazajistán, Kirguistán y la Regin Autónoma Uigur de Xinjiang en China occidental, también se hicieron investigaciones experimentales acerca del flujo de densidad de partículas muónicas con energías iguales a  $E_{\mu} = 5 \text{ GeV}$ , distancias radiales para los chubascos atmosféricos desde los 10 metros hasta los 200 metros, con intervalos de energía o tamaño de los chubascos igual a  $2 \times 10^5 \leq Ne < 5 \times 10^6$  y para ángulos zenitales  $\theta \leq 30^{\circ}$ . Estas investigaciones arrojaron como resultado datos que conforman la llamada Función de distribución Lateral Muónica Tien-Shan, cuya ecuación es la siguiente: (Sten'kin 1980)

$$\rho_{\mu TS}(R) = 5.9 \times 10^{-4} \times R^{-0.7} \times \exp\left(\frac{-R}{80}\right) \quad (10)$$

Si comparamos esta última ecuación con la que obtuvimos con los datos del BASJE-MAS (Ec. 3), podemos inferir las semejanzas en cuanto a la forma que poseen ambas, con la diferencia de algunos parámetros que se deben necesariamente a las condiciones iniciales de los detectores que se emplearon para obtenerlas y las diferentes situaciones geográficas de los observatorios. La Fig. 24 despliega las gráficas para la función Tien Shan y la primera función obtenida con los datos del BASJE. Las discrepancias que se observan son del mismo tipo que para el caso de la función ajustada con los datos simulados de AIREs, es decir, los rangos energéticos para la función *TienShan* son menores que para la función AIREs, y mucho menores que para la función BASJE. Este hecho se lo puede comprobar en la Fig. 25, en la que se despliegan las tres funciones mencionadas.

### 6.2. Mejoras para la Función encontrada

La Función que encontramos posee la forma de la que ya se obtuvo en otros observatorios, lo que nos garantiza que hemos

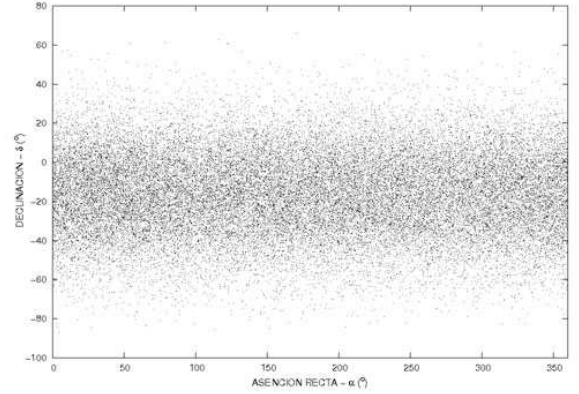


FIG. 26.— Chubascos candidatos a ser fuentes de radiación  $\gamma$  obtenidos con la Función  $\rho_{\mu 1}(R)$

efectuado un aceptable análisis con los datos del detector de muones del BASJE; sin embargo, la base de datos que hasta el momento se tiene de todos los datos convertidos tan sólo abarcan 500 ( $\sim 35\%$ ) días de registros buenos, los restantes 960, que completan los 4 años de funcionamiento del detector de muones, poseen fallas o errores debidos a tormentas eléctricas, desperfectos electrónicos, etc. Ahora, de esta base de datos con 500 días con eventos aceptables, se ha hecho el análisis de un 80% de los mismos; entonces, para hacer mejoras en la Función encontrada se puede completar el restante 20% que falta para afinar nuestros resultados.

## 7. APÉNDICE

Para finalizar nuestra investigación vamos a hacer una rápida aplicación de la Función Empírica de Distribución Lateral Muónica obtenida, y la llamamos *rápida* pues no vamos a utilizar estadísticas específicas en su aplicación, debido a que ello amerita un nuevo estudio e investigación que rebasaría los límites de la presente.

### 7.1. Aplicación rápida de la Función

Para hacer una selección de los chubascos candidatos a fuentes de radiación  $\gamma$  mediante el empleo de la Función obtenida, primeramente tenemos que seleccionar la densidad de todos los chubascos en un anillo determinado de nuestro método de los *anillos concéntricos*.

A esta variable de densidad observada la denominamos  $\Delta_{Observada}^n$ , y representa los eventos registrados por los detectores del BASJE-MAS. A su vez, de la Función de Distribución Lateral Muónica encontrada se tiene los valores esperados de densidad muónica para cada anillo concéntrico, variable a la que llamamos  $\Delta_{Esperada}^n$ .

La razón  $R$  de estas dos variables se define como: (Bustos 1997)

$$R_n = \frac{\Delta_{Observada}^n}{\Delta_{Esperada}^n}; n = 1, 2, 3 \dots i \quad (11)$$

De esta última relación se puede hacer una estimación del número de muones presentes en un chubasco y que viene dado por:

$$R_{\mu} = \langle R_n \rangle = \frac{1}{i} \sum_1^i R_n \quad (12)$$

Se considera la media aritmética debido al poco número de anillos concéntricos que en general activan todos los detectores de muones.

De este modo, en porcentaje se tiene:

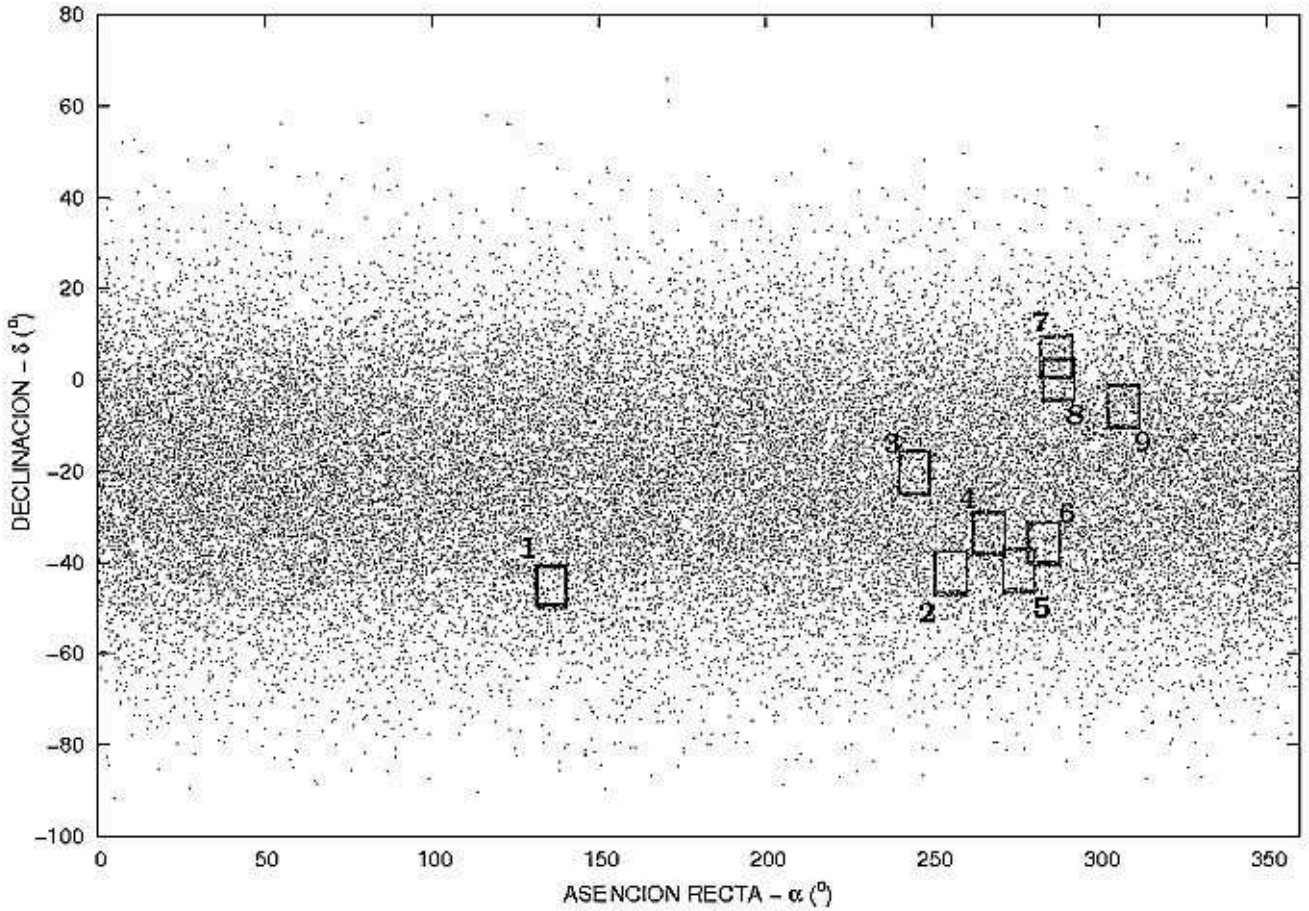


FIG. 27.— Determinación de las regiones ( $10^\circ \times 10^\circ$ ) de fuentes de radiación *gamma* ya establecidas

$$R_\mu(\%) = R_\mu \times 100 \quad (13)$$

De dónde, para la selección de los chubascos candidatos se eligieron aquellos con contenidos muónicos por debajo del 5%.

La Fig. 26 nos muestra la selección de estos chubascos y su orientación en coordenadas ecuatoriales.

Finalmente, de la nueva base de datos de chubascos candidatos y en coordenadas ecuatoriales de ascensión recta ( $\alpha$ ) $^\circ$  y declinación ( $\delta$ ) $^\circ$ , podemos adelantar que uno de los métodos para determinar las fuentes *gamma* consiste en la selección de re-

giones ya localizadas y conocidas de fuentes en esta última base de datos, y que para verificarlas se hace uso de la localización de ventanas o cajas de  $10^\circ \times 10^\circ$  en torno a las fuentes ya conocidas y aplicar estadísticas que puedan comprobar que los centros de estas ventanas, en efecto, corresponden a fuentes reales de radiación *gamma*.

La Fig. 27 nos muestra la localización de algunas fuentes *gamma* ya conocidas y que están enmarcadas mediante las ventanas o cajas mencionadas, y en la Tabla 6 se enumeran éstas y la fuentes que deberían encontrarse en sus centros.

#### REFERENCIAS

- Aseikin, V. S. 1980, Electron and Muon Density Distributions of EAS at the Mountain Altitude
- Burgoa, O. 2002, Basje Data Analysis Program v. 6.7
- Bustos, R. 1997, Búsqueda de Radiación Gamma de Alta Energía de Sistemas Binarios Utilizando el Detector de Hadrones. Tesis de Licenciatura en Física, Carrera de Física, UMSA. La Paz, Bolivia
- Hayashi, Y. 2005, A Study on the Lateral Structure of Muons in Extensive Air Showers with the GRAPES Array at Ooty
- Luczak, P. 2009, Lateral distribution of EAS muons measured with the KASCADE-Grande Muon Tracking Detector
- Sokol'sky, P. 1989, Introduction to Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics, Frontiers in physics, vol. 76, 210
- Sten'kin, Y. V. 1980, On the Muon Lateral Distribution Function in Eas
- Tokuno, H. 2002, How to Analyze Mas Array Data
- Tsunesada, Y. 2002, Study on Cosmic Ray Anisotropy with the Air Shower Experiment at Mount Chacaltaya. A Dissertation Submitted for the Degree of Doctor of Science, Department of Physics, Tokyo Institute of Technology