

**INFLUENCIA DE LOS AEROSOLES EN LA RECONSTRUCCIÓN DE
EVENTOS DE LLUVIAS DE RAYOS CÓSMICOS CON DATOS DE
FLUORESCENCIA DEL OBSERVATORIO AUGER.**

**INFLUENCE OF THE AEROSOLS IN THE RECONSTRUCTION OF
COSMIC RAY SHOWERS EVENTS WITH FLUORESCENCE DATA OF
THE AUGER OBSERVATORY.**

M.I. Micheletti^{a,b*}, D.G. Melo^a, And A. Etchegoyen^{a,b}

^a Lab Tandar - CNEA. Av. Gral Paz 1499, San Martín - Prov. Bs. As – Argentina

^b CONICET, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.

e-mail: michelet@tandar.cnea.gov.ar

Se reconstruyeron eventos de lluvias de rayos cósmicos detectados con telescopios del detector de fluorescencia del Observatorio Pierre Auger, utilizando, al evaluar la transmitancia de la luz de fluorescencia en la atmósfera, aerosoles medidos en el lugar, en un caso, y un perfil paramétrico de aerosoles, en otro caso. La diferencia relativa porcentual, en valor medio, en la energía reconstruida en ambos casos, resultó ser menor que el 1%, con un RMS de 9.5%. Por su parte, la diferencia en la profundidad atmosférica donde la lluvia alcanza su máximo desarrollo, $X_{\text{máx}}$, es, en valor medio, de 11 g/cm², con un RMS de 11 g/cm². Una correcta evaluación de la energía de la partícula incidente es necesaria para obtener el espectro de energía de los rayos cósmicos. Asimismo, una correcta determinación del $X_{\text{máx}}$ es importante en estudios de composición, ya que, en combinación con la energía, dicho parámetro juega un rol importante en la determinación del tipo de partícula incidente.

Palabras clave: aerosoles atmosféricos, reconstrucción lluvias rayos cósmicos

Cosmic ray shower events detected with telescopes of the fluorescence detector of the Pierre Auger Observatory have been reconstructed using, for the evaluation of the transmittance of fluorescence light in the atmosphere, aerosols measured in the field, in one case, and a parametric aerosols profile, in another case. The mean percent relative difference in the reconstructed energy for each of the mentioned cases turned to be less than 1%, with a RMS of 9.5%. The mean difference in the atmospheric depth where the shower reaches its maximum development, $X_{\text{máx}}$, is of 11 g/cm², with a RMS of 11 g/cm². A correct evaluation of the energy of the incident particle is necessary for obtaining the cosmic rays energy spectrum. At the same time, a correct determination of $X_{\text{máx}}$ is important in composition studies, as this parameter, in combination with the energy, plays an important role in the determination of the type of the incident particle.

Keywords: atmospheric aerosols, reconstruction cosmic ray showers

* Autor a quién debe dirigirse la correspondencia.

I. INTRODUCCIÓN

El Observatorio Pierre Auger (www.auger.org.ar) está diseñado para medir las señales producidas por rayos cósmicos ultraenergéticos, que penetran en la atmósfera originando cascadas o “lluvias” de partículas secundarias. Cuando las partículas cargadas de la lluvia interactúan con el nitrógeno molecular atmosférico, se emite luz en el rango ultravioleta, llamada luz de fluorescencia, la cual es captada por los telescopios que constituyen el detector de fluorescencia (DF) (el cual consta de cuatro estaciones u “ojos”, con seis telescopios cada una) ⁽¹⁾. La luz que viaja desde la lluvia hasta el detector, es atenuada por la atmósfera que atraviesa, siendo los aerosoles (partículas en suspensión) presentes en ésta uno de los parámetros a ser tenidos en cuenta. Los aerosoles pueden fluctuar apreciablemente respecto de los valores medios estándar utilizados, por lo cual, utilizar un modelo estándar para los mismos puede dar lugar a diferencias en las reconstrucciones de los eventos de rayos cósmicos. La atmósfera puede ser considerada como una mezcla de moléculas de aire y aerosoles ⁽²⁾. Este trabajo se concentra en el análisis de los aerosoles, los cuales producen scattering Mie, el cual varía con el contenido de aerosoles, que debe ser constantemente monitoreado. Las moléculas de aire, por su parte, producen scattering Rayleigh, el cual está bien comprendido. Los perfiles moleculares de la atmósfera utilizados en las reconstrucciones de lluvias de rayos cósmicos corresponden a los sistematizados mediante valores de medias mensuales obtenidas a partir de mediciones realizadas en el sitio del Observatorio Auger ^(3,4).

En este trabajo se analizaron las diferencias, obtenidas a partir de las reconstrucciones de eventos, en la energía E del rayo cósmico primario y en la profundidad atmosférica $X_{\text{máx}}$ (en g/cm^2), usando un perfil estándar de aerosoles (a saber, el dado por la ecuación (1), con los valores allí indicados para los parámetros de la misma) y los datos de aerosoles de la base de datos (BD) del Observatorio Auger. Estos últimos provienen del procesamiento de los datos de disparos verticales ascendentes de haces de láser del CLF (Central Laser Facility, posicionado cerca del centro del arreglo del Observatorio Auger) ⁽⁵⁾. A partir del análisis de estos eventos de láser se obtiene una distribución en altura –es decir en capas ascendentes de la atmósfera, de un determinado espesor– del espesor óptico de aerosoles, cada hora ⁽⁶⁾. La profundidad atmosférica $X_{\text{máx}}$ corresponde al máximo desarrollo longitudinal de la lluvia (es decir, donde el número de partículas cargadas alcanza su valor máximo). Se utilizaron datos correspondientes al período estival diciembre de 2005 – marzo de 2006, para el ojo del DF ubicado en el Cerro Los Leones. Se eligió el ojo de Los Leones (1416 m s.n.m.) para analizar los eventos reconstruidos, ya que en éste la influencia de los aerosoles es mayor al ser mayor el contenido de los mismos, por estar dicho ojo ubicado esencialmente a la misma altura de la planicie que contiene los detectores de superficie (DS), mientras que el ojo de Coihueco (1690 m s.n.m.) está elevado sobre un monte.

II. MÉTODOS

El trabajo incluyó los siguientes pasos, que se enumeran a continuación.

1) Se comenzó reconstruyendo, con el programa Offline ⁽⁷⁾ de la colaboración Auger, todos los eventos de lluvias de rayos cósmicos detectados por el DF de los Los Leones durante el verano correspondiente a diciembre 2005 – marzo 2006. Para modelizar los aerosoles, se utilizó el perfil paramétrico de Mie ⁽⁸⁾. Según esta parametrización, la componente debida a aerosoles del espesor óptico oblicuo entre los puntos 1 y 2 (de alturas z_1 y z_2) viene dado por:

$$\tau_{\text{aer}_{1,2}} = \frac{h_M}{l_M \cos\theta} \left| e^{-\frac{z_2}{h_M}} - e^{-\frac{z_1}{h_M}} \right| \quad (1)$$

donde θ es el ángulo entre la vertical y la línea que une los puntos 1 y 2, l_M es la longitud horizontal de atenuación y h_M es la altura escala (para la cual la componente de aerosoles del espesor óptico, representada por un decaimiento exponencial en función de la altura como se indica en (1), llega a ser igual a $1/e$ de su valor en tierra, indicando de este modo cuán rápido decaen los aerosoles en función de la altura). Este modelo asume la hipótesis de homogeneidad horizontal en la distribución de aerosoles. De este modo los perfiles de Mie de atenuación por aerosoles vienen definidos en función de dos parámetros: l_M y h_M . En el presente trabajo se realizaron los cálculos con $l_M = 12$ km y $h_M = 1$ km, que son los valores que vienen dados por defecto en el código Offline.

La componente debida a aerosoles del espesor óptico vertical entre los puntos 1 y 2, es simplemente:

$$\tau_{\text{aer}_{v,1,2}} = \tau_{\text{aer}_{1,2}} \cos\theta \quad (2)$$

Finalmente, la componente debida a aerosoles de la transmitancia atmosférica (entre z_1 y z_2) se define como:

$$T_{\text{aer}} = e^{-\tau_{\text{aer}_{1,2}}} \quad (3)$$

Si el scattering múltiple (es decir, el fenómeno por el cual la luz sufre scattering con más de una partícula atmosférica) no es importante, el espesor óptico total entre los puntos 1 y 2, es igual a la suma de las componentes de espesor óptico debidas a los aerosoles y debidas a las moléculas de aire, es decir:

$$\tau_{\text{tot}} = \tau_{\text{Rayl}} + \tau_{\text{aer}} \quad (4)$$

La transmitancia total (incluyendo las contribuciones del scattering Rayleigh por moléculas de aire y del scattering Mie por aerosoles) resulta entonces:

$$T_{\text{tot}} = e^{-\tau_{\text{tot}}} = T_{\text{Rayl}} T_{\text{aer}} \quad (5)$$

2) A las reconstrucciones realizadas con el perfil paramétrico de aerosoles se les impusieron cortes de calidad. Los más relevantes utilizados son los siguientes:

- Longitud angular de la traza de la lluvia ≥ 16 grados.
- Ángulo cenital de la lluvia ≤ 68 grados.
- Contaminación Cherenkov ≤ 30 %.
- Longitud del perfil longitudinal ≥ 250 g/cm².
- $X_{\text{máx}}$ dentro del campo de visión del DF, según la siguiente condición:

$$X_{\text{inic}} + \varepsilon(X_{\text{máx}}) \leq X_{\text{máx}} \leq X_{\text{final}} - \varepsilon(X_{\text{máx}}),$$

donde X_{inic} y X_{final} son las profundidades atmosféricas mínima (inicial) y máxima (final) del correspondiente perfil longitudinal.

- Error en $X_{\text{máx}}$, $\varepsilon(X_{\text{máx}}) \leq 30$ g/cm².
- Error en E, $\varepsilon(E) \leq 20$ %.

3) Se identificó para qué eventos, dentro del conjunto de los que pasan los cortes de calidad en las reconstrucciones, existen en la BD datos de aerosoles medidos. Para alturas mayores que 12 km no hay datos de aerosoles medidos, por lo cual, como aproximación, los aerosoles son fijados a cero por encima de dicha altura. Como se verá en la sección Discusión de los resultados, esta aproximación no introduce un error apreciable en los resultados.

4) Los eventos que satisfacen los criterios de selección, luego de la aplicación de los tres pasos mencionados, se volvieron a reconstruir pero con los valores medidos de espesor óptico vertical de la BD, como opción elegida dentro del programa Offline.

5) Por último, se compararon los valores de E y $X_{\text{máx}}$ obtenidos con ambas reconstrucciones.

III. RESULTADOS

La figura 1 presenta el histograma de la diferencia relativa porcentual de la energía del primario, $100 \times (\Delta E / E)$, donde ΔE es la diferencia, para cada evento, entre la energía (de la partícula primaria) reconstruida con aerosoles de la BD y la energía reconstruida con perfil paramétrico de Mie. De todos los eventos registrados durante el período Diciembre 2005 – Marzo 2006 por el ojo de fluorescencia ubicado en Los Leones, sólo 131 han satisfecho los criterios aplicados mediante los pasos del 1) al 3) detallados anteriormente. Vale mencionar que el ciclo útil de los DF es de un 10%, ya que sólo toman datos durante las noches despejadas (de baja nubosidad) y con un bajo nivel de luz de luna. Por lo tanto es importante hacer un buen análisis de la influencia de los aerosoles en las noches en las que se dispone de datos, de modo de aprovechar al máximo dichas mediciones y poder obtener valores confiables en las reconstrucciones de las lluvias.

La figura 1 muestra que la diferencia relativa porcentual de la energía reconstruida con aerosoles de la BD y la reconstruida con perfil paramétrico de Mie, da,

en valor medio, un corrimiento negativo menor que el 1%, mientras que el RMS es de un 9%. Estos resultados, en especial la diferencia hallada en el ancho de la distribución de la energía, deben ser tenidos en cuenta al estudiar el espectro de energía de los rayos cósmicos incidentes. La evaluación correcta del flujo de rayos cósmicos obliga a considerar eventos donde la energía está bien reconstruida, para lo cual es necesario conocer cómo es la componente de atenuación debida a los aerosoles presentes en la atmósfera, tal como ha sido sugerido y efectuado en el experimento HIRES⁽⁹⁾.

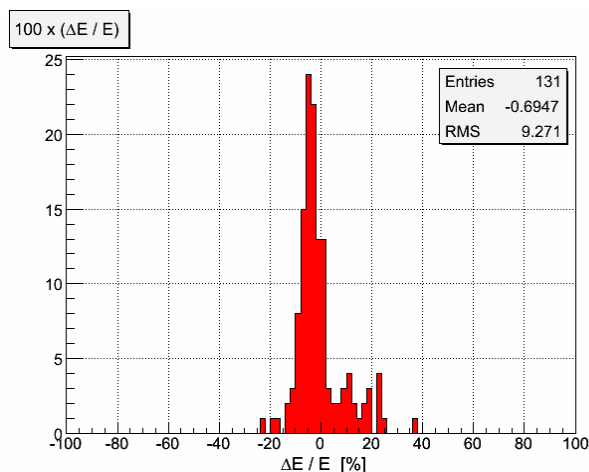


Figura 1. Histograma de la diferencia relativa porcentual en la energía reconstruida con aerosoles medidos y con perfil paramétrico, para eventos registrados en el período Diciembre 2005 – Marzo 2006, en Los Leones. $\Delta E = E(\text{DB}) - E(\text{par})$.

En la figura 2 se observa que la variación en el $X_{\text{máx}}$ reconstruido, usando aerosoles medidos en el sitio del Observatorio Auger y perfil paramétrico, es de -11 g/cm² en valor medio, con un RMS de 11 g/cm².

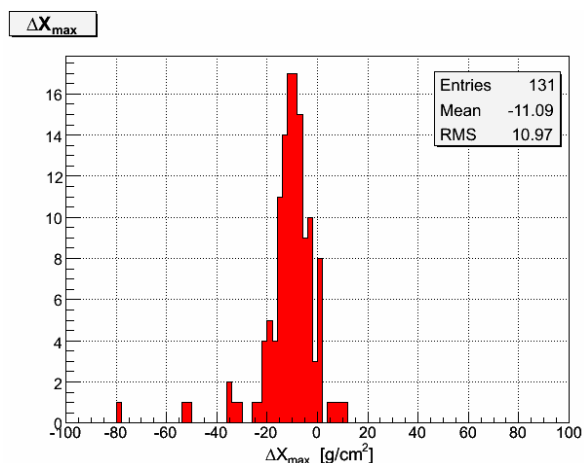


Figura 2. Histograma de la diferencia absoluta en el $X_{\text{máx}}$ reconstruido con aerosoles medidos y con perfil paramétrico, para eventos registrados en el período Diciembre 2005 – Marzo 2006, en Los Leones. $\Delta X_{\text{máx}} = X_{\text{máx}}(\text{DB}) - X_{\text{máx}}(\text{par})$.

Las figuras 3 (a) y (b) presentan ejemplos de perfiles de aerosoles de la BD. Corresponden a los valores del coeficiente de extinción de aerosoles, α , en función de la altura, donde α es el diferencial del espesor óptico vertical de aerosoles. Es decir,

$$\tau_{\text{aer},v,1,2} = \int_{z_1}^{z_2} \alpha(z) dz \quad (6)$$

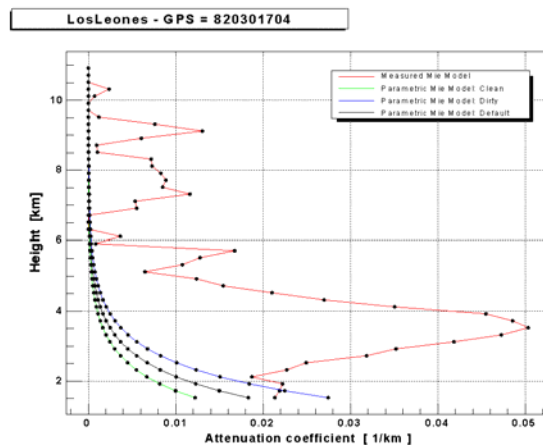
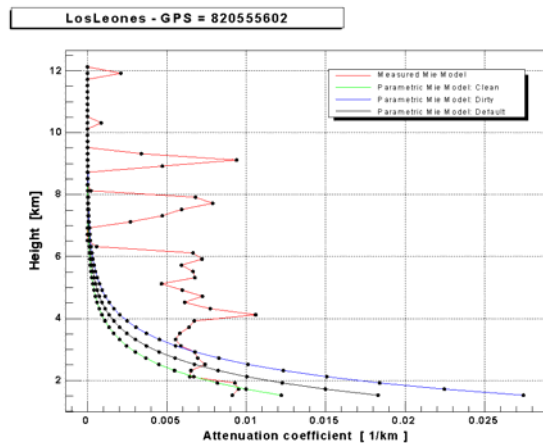


Figura 3. Perfiles de aerosoles de la BD, comparados con perfiles paramétricos dados por la fórmula (1), con $h_M = 1$ km en todos los casos y $l_M = 12$ km (valor por default en las reconstrucciones), $l_M = 18$ km (atmósfera limpia) y $l_M = 8$ km (atmósfera sucia). (a) muestra el perfil correspondiente a un día de atmósfera limpia en los últimos kilómetros de la atmósfera, mientras que (b) muestra el perfil de un día de atmósfera muy sucia en los mismos. Ambos corresponden al mes de enero de 2006.

Los perfiles mostrados corresponden al mes de enero del 2006. En las mismas gráficas se presenta el perfil estándar utilizado en las reconstrucciones, correspondiente a la fórmula (1) con $l_M = 12$ km y $h_M = 1$ km, y perfiles dados también por (1), con idéntico h_M ,

pero con valores extremos de l_M , de modo de representar los casos de atmósfera limpia ($l_M = 18$ km, curva inferior) y atmósfera sucia ($l_M = 8$ km, curva superior). Los perfiles contienen datos hasta la altura del suelo de Malargüe (1.4 km).

El perfil de la BD de la figura 3 (a) presenta, por debajo de los 2.5 km de altura, valores más bajos del coeficiente de extinción que el perfil paramétrico utilizado por default en las reconstrucciones (curva estándar media) y, cerca del nivel del suelo, prácticamente coincide con el perfil estándar elegido para el caso de atmósfera limpia. Por su parte, el perfil de la BD de la figura 3 (b) presenta valores muy por encima del perfil estándar para el caso de atmósfera sucia.

Se han examinado numerosos perfiles de distribución en altura del espesor óptico de aerosoles, correspondientes al periodo de verano elegido para este análisis y se ha concluido que, al menos para este periodo del año, éstos presentan grandes fluctuaciones en el transcurso de pocos días y difieren apreciablemente, tanto en sus valores del coeficiente de extinción como en la distribución del mismo en función de la altura, que determina la forma del perfil, del perfil estándar representado mediante la ecuación (1).

Las figuras 4 (a), (b), (c) y (d) muestran la variación entre el α de los perfiles de la BD y el α correspondiente al perfil estándar (con los valores por default de h_M y l_M), en función de la altura, para todos los perfiles analizados correspondientes a los meses de diciembre de 2005, enero, febrero y marzo de 2006, respectivamente. Puede observarse que las mayores variaciones en α ocurren hasta los 6 km de altura, aproximadamente, que es justamente el rango de altura de mayor interés en las reconstrucciones de lluvias, dado que en él la mayor parte de éstas presentan su máximo desarrollo longitudinal, produciendo la máxima emisión de luz UV de fluorescencia al interactuar las partículas cargadas con el nitrógeno del aire. (Ver figura 6 y su explicación en la sección Discusión de los resultados).

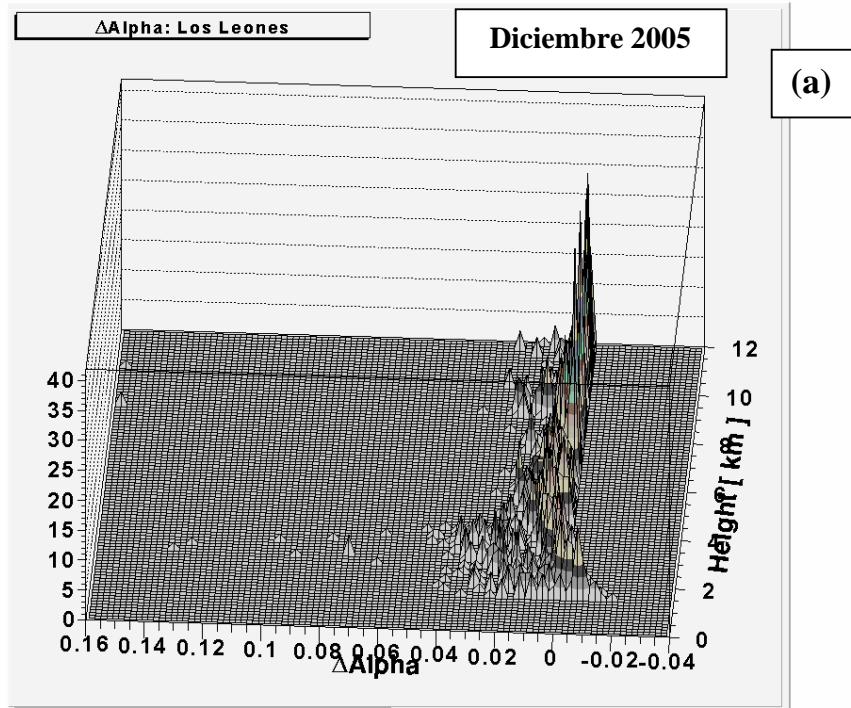
La variación de α oscila entre 0.05 ó 0.04 y -0.02 para los meses de enero a marzo de 2006, mientras que presenta una dispersión mucho mayor para diciembre de 2005, llegando incluso hasta valores de $\Delta\alpha$ de aproximadamente 0.14 en los últimos kilómetros de la atmósfera (los de mayor interés en la transferencia de la luz de fluorescencia). Esto indicaría que la atmósfera en los alrededores del cerro Los Leones se presentó mucho más turbia durante diciembre que durante el resto del verano.

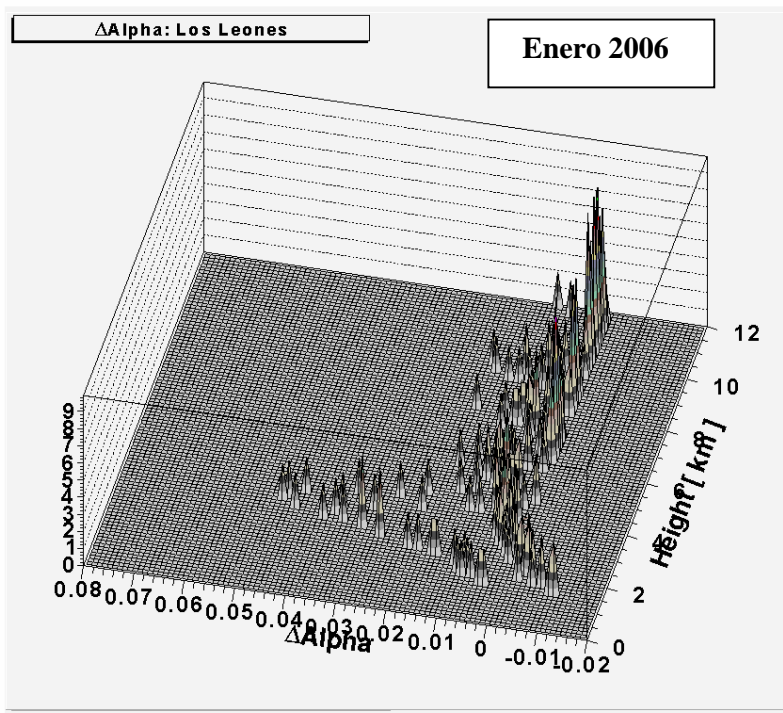
La figura 5 muestra un histograma bidimensional análogo a los de la figura 4, pero para la totalidad del periodo considerado (de diciembre a marzo). Acorde a lo visto en la figura 4, la mayor dispersión en α viene dada por la contribución del mes de diciembre. En los primeros 6 km se observa la mayor dispersión en los valores de α . La dispersión observada alrededor de los 8 y 10 km se atribuye a la presencia de nubosidad a dicha altura, ya que entre los perfiles estudiados es frecuente encontrar la presencia de picos pronunciados en la distribución del parámetro α a dichas alturas. En las

capas más bajas de la atmósfera (hasta los 2 ó 3 km) la tendencia que prima es la de tener valores negativos de $\Delta\alpha$, indicando que los perfiles medidos de aerosoles corresponden a atmósferas más limpias que las representadas por la estándar, para dichas alturas.

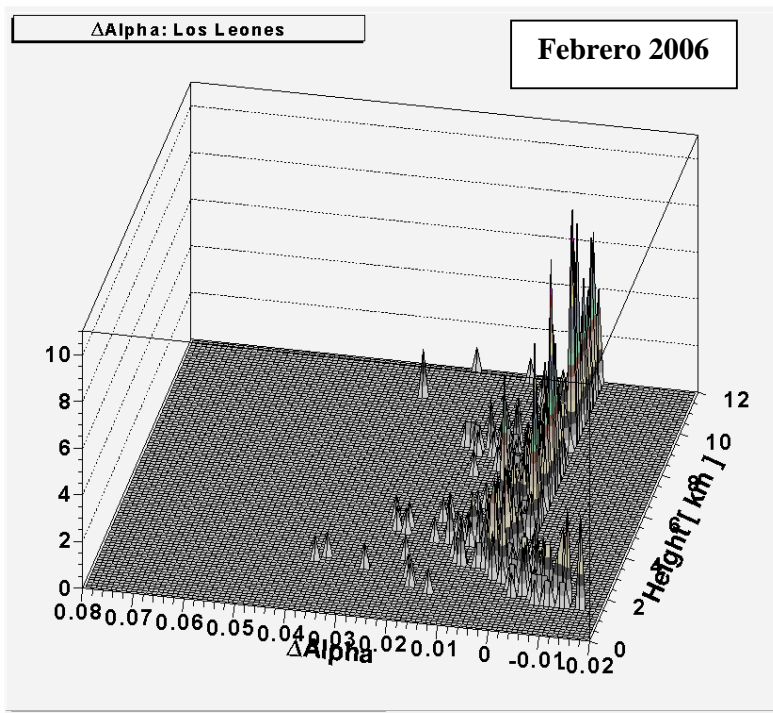
Sin embargo, la presencia de altas concentraciones de aerosoles, especialmente a bajas alturas, para varios casos de los perfiles estudiados y la gran fluctuación observada entre los distintos perfiles, sumada a su diferencia, tanto en valor como en forma (distribución en altura) respecto del perfil estándar, justifica el

estudio de los mismos y su incorporación en las reconstrucciones de eventos reales. En las figuras 1 y 2 se observa que si bien la variación en energía y $X_{\text{máx}}$ no es muy pronunciada en valor medio, sin embargo su RMS es considerable. Más aún, los valores de la cola de la distribución muestran valores alarmantes. En particular, el $\Delta X_{\text{máx}}$ llega a tomar el valor extremo de 80 g/cm^2 , valor de separación entre las rectas correspondientes a núcleos de hierro y a protones, como partículas primarias, en estudios de composición basados en el elongation rate ($X_{\text{máx}}$ vs $\log_{10}(E)$)^(9,10).





(b)



(c)

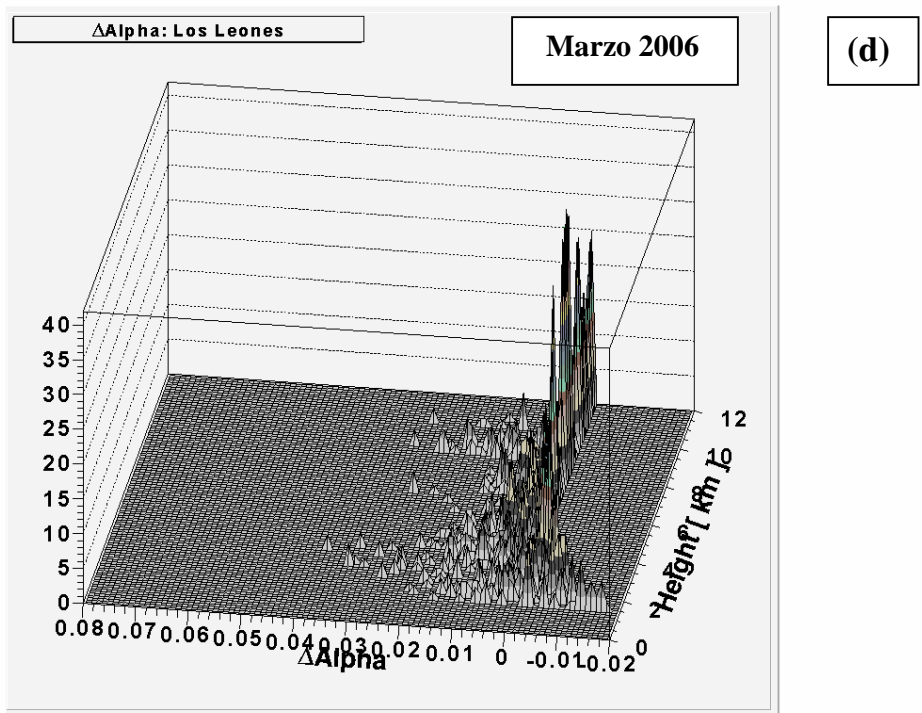


Figura 4. Variación, en función de la altura, entre los coeficientes de extinción α de los perfiles de la BD y los correspondientes al perfil estándar utilizado por default (curva de color negro de la figura 3), para las lluvias que satisfacen los criterios de selección impuestos en la sección Métodos, para los meses de: (a) diciembre de 2005, (b) enero, (c) febrero y (d) marzo, de 2006.

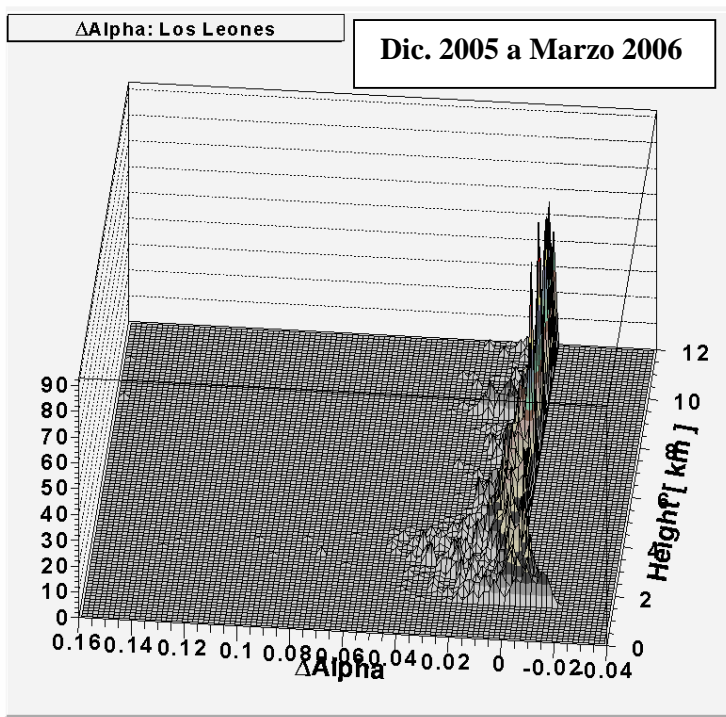


Figura 5. Variación, en función de la altura, entre los coeficientes de extinción α de los perfiles de la BD y los correspondientes al perfil estándar utilizado por default (curva de color negro de la figura 3), para todas las lluvias del período diciembre 2005 a marzo 2006 que satisfacen los criterios de selección impuestos en la sección Métodos.

IV. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

– Rango de alturas donde ocurre el máximo desarrollo longitudinal de la lluvia. Validez del rango de alturas de los perfiles de la BD.

El rango de alturas dentro del cual los perfiles de aerosoles obtenidos de la BD presentan su mayor dispersión en los valores del coeficiente de extinción α , coincide con el rango de alturas en el que se produce el máximo desarrollo para la mayoría de las lluvias en el rango de energías detectado por el Observatorio Auger. Para analizar este hecho se generaron 1000 lluvias, a partir de un modelo Monte Carlo, con las siguientes distribuciones:

- 1) $\sin(\theta_{ll}) \times \cos(\theta_{ll})$, $0^\circ \leq \theta_{ll} \leq 60^\circ$, con θ_{ll} el ángulo cenital de la lluvia;
- 2) uniforme en φ_{ll} , $0^\circ \leq \varphi_{ll} \leq 360^\circ$, con φ_{ll} el ángulo acimutal de la lluvia;
- 3) punto de impacto de las lluvias distribuido uniformemente dentro de una circunferencia de 3 km de radio posicionada a 7 km del ojo del DF.
- 4) distribución en $X_{m\acute{a}x}$ según ⁽¹¹⁾ (la cual es dependiente de la energía y el tipo de primario).

La figura 6 muestra la distribución de alturas a las que ocurren los máximos desarrollos de las lluvias simuladas, es decir, la distribución en altura del $X_{m\acute{a}x}$. La figura (a) corresponde a lluvias originadas por primarios de hierro, mientras que en el caso de la figura (b) los primarios son protones. En ambos casos, las partículas primarias tienen una energía de $10^{17.5}$ eV. La altura de $X_{m\acute{a}x}$ viene expresada en función de la distancia al ojo, porque los puntos de impacto de las lluvias fueron distribuidos dentro de una circunferencia que está delante del campo de visión del ojo, a 7 km de distancia del mismo. Las líneas en negro indican los límites del campo de visión del ojo (el cual tiene un ángulo de elevación de 30°).

En esta figura se observa que el $X_{m\acute{a}x}$ ocurre básicamente para alturas que van hasta los 8 km desde el suelo. Puede verse entonces que el hecho de suponer la ausencia de aerosoles por encima de los 12 km de altura, debido a la carencia de mediciones en la BD por encima de dicha altura, no introduce un error apreciable en los resultados, ya que las lluvias detectadas en el Observatorio Auger se desarrollan más abajo. Hay que notar que las lluvias de energías más altas presentan su $X_{m\acute{a}x}$ a alturas menores, por lo cual, la figura 6, para primarios de $10^{17.5}$ eV, representaría la situación más desfavorable al respecto, siendo las lluvias de energías más altas aun menos afectadas por la aproximación de aerosoles nulos por encima de los 12 km.

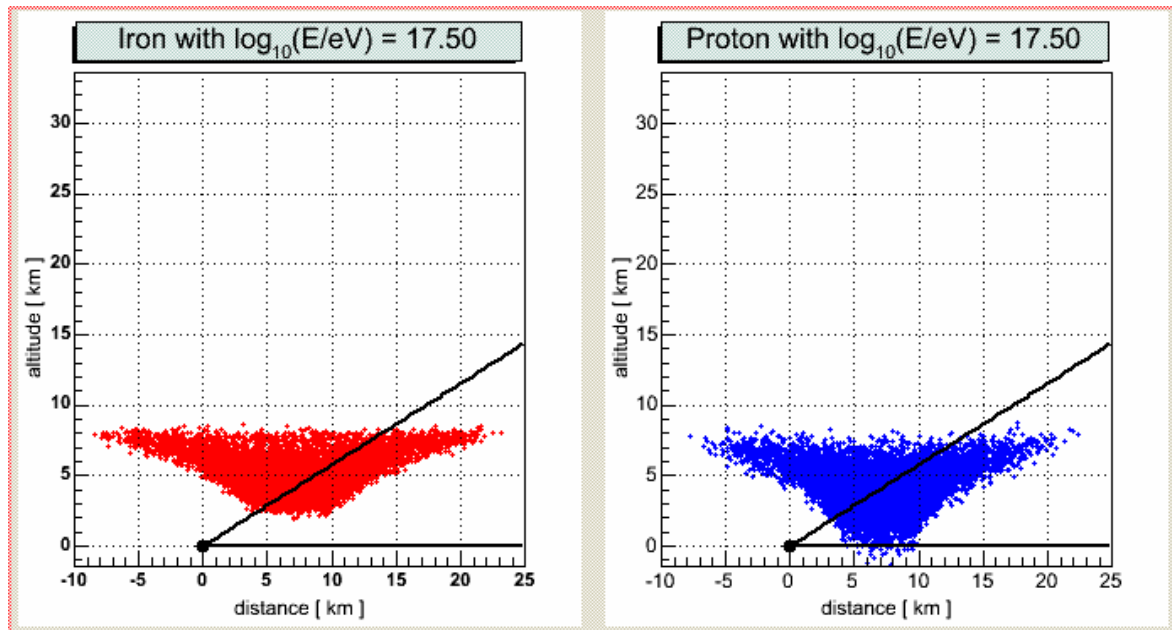


Figura 6. Distribución en altura del $X_{m\acute{a}x}$ para 1000 lluvias generadas mediante un Monte Carlo, distribuidas según lo consignado en los puntos del 1) al 4) de la presente sección, para los casos de primario igual a (izquierda) hierro y (derecha) protón, ambos con energías de $10^{17.5}$ eV. Las líneas en negro indican los límites del campo de visión del ojo (30°).

– Proyección del análisis de la influencia de los aerosoles a estudios de composición.

Los parámetros $X_{\text{máx}}$ y E definen el elongation rate: $X_{\text{máx}}$ vs $\log_{10}(E)$. Éste es de fundamental importancia en estudios de composición, ya que a distintos primarios corresponden distintas curvas de elongation rate.

En el estudio en el que hicimos, hemos obtenido histogramas (figuras 1 y 2) que presentan un desplazamiento entre los valores medios de las reconstrucciones con perfil paramétrico de aerosoles dado por default en el código de reconstrucciones Offline y los correspondientes a las reconstrucciones con perfiles de la BD de Auger, para el caso de $X_{\text{máx}}$ y de E . En las distribuciones representadas mediante los histogramas se indican también los correspondientes RMS.

Como el estudio de composición basado en el elongation rate es de tipo estadístico, la influencia de los resultados encontrados en dichos estudios dependerá de la cantidad de eventos medidos para las distintas energías del espectro de rayos cósmicos.

En el hipotético caso de que la variación en el $X_{\text{máx}}$ debida a aerosoles fuera independiente de la energía y de que se contara con una estadística suficientemente grande de eventos, la cual eliminaría el efecto del RMS, entonces sólo la diferencia en el valor medio del $X_{\text{máx}}$ entraría en juego, produciendo una translación rígida de los puntos de la curva de elongation rate. De acuerdo con la figura 1, se tendría una translación negativa de unos 11 g/cm², sobre los aproximadamente 80 g/cm² que separan a los protones de los hierros en las curvas de elongation rate obtenidas a partir de simulaciones de lluvias con distinto primario e idéntico modelo hadrónico^(9,10). Esta translación no es despreciable. Su contribución proviene fundamentalmente de la variación en $X_{\text{máx}}$, ya que la parte correspondiente a E viene dada como su logaritmo en la curva del elongation rate.

En el caso mencionado de un gran número de eventos, el corrimiento paralelo en el elongation rate indica una diferencia en el porcentaje liviano/pesado en las partículas incidentes, pero no en el lugar donde ocurre la transición (si la hubiera).

En el caso de baja estadística, como sucede para las más altas energías, se agranda el error en los puntos del elongation rate de acuerdo al RMS de las distribuciones (básicamente la de $\Delta X_{\text{máx}}$).

V. CONCLUSIONES

- La diferencia relativa porcentual entre la energía reconstruida con aerosoles medidos y con perfil paramétrico (con los parámetros incluidos como opción por defecto en el programa de reconstrucción de lluvias de rayos cósmicos Offline), resultó ser menor que el 1%, con un RMS de 9.4%.
- La diferencia en la profundidad atmosférica donde la lluvia alcanza su máximo desarrollo, $X_{\text{máx}}$, es de -11 g/cm² (es decir, dicho máximo estaría desarrollándose más arriba en la atmósfera), con un RMS de 11 g/cm².

- Estos resultados deben ser tenidos en cuenta a la hora de evaluar es espectro de energía de rayos cósmicos, así como también en estudios de composición, a través del elongation rate. Cuando la estadística es grande, sólo el valor de la diferencia en los valores medios influye en dichos estudios, mientras que para baja estadística de eventos, como ocurre a altas energías, el valor del RMS resulta importante.
- Este análisis fue hecho para un período estival. En un próximo trabajo se extenderá de manera de considerar todas las estaciones del año. A la vez, se buscará contar con una mayor estadística analizando distintos años.
- También se extenderá el trabajo, evaluando la diferencia en energía y en $X_{\text{máx}}$ como función de la distancia desde la lluvia hasta el DF. La influencia de los aerosoles crece con la distancia atravesada por la luz de fluorescencia, ya que el espesor óptico de aerosoles (así como el espesor óptico total) crece con dicha distancia (ver ecuación (1), en donde la distancia entre los dos puntos allí mencionados está determinada por los valores de las alturas z_1 y z_2 y por el valor del $\cos\theta$). Es interesante evaluar cómo influye la distancia en la atenuación por aerosoles en el caso realista, es decir, considerando los perfiles de la BD.

Referencias

1. The Pierre Auger Observatory Design Report, The Auger Collaboration, March 14, 1997.
2. MacCartney, E., "Optics of the Atmosphere, Scattering by Molecules and Particles", J. Wiley & Sons, Ed., New York, 1976.
3. Keilhauer, B., Blümer, J., Engel, R., Klages, H.O. and Risse, M., "Impact of varying atmospheric profiles on extensive air shower observation: atmospheric density and primary mass reconstruction", *Astroparticle Physics* 22, 2004.
4. Blümer, J., Engel, R., Gora, D., Homola, P., Keilhauer, B., Klages, H., Pekala, J., Risse, M., Unger, M., Wilczynska, B., Wilczynski, H., for the Pierre Auger Collaboration, "Atmospheric Profiles at the Southern Pierre Auger Observatory and their Relevance to Air Shower Measurement", *Proc. 29th ICRC, Pune, 2005*.
5. Fick, B., Malek, M., Matthews, L.A.J., Matthews, J., Meyhandan, R., Mostafa, M., Roberts, M., Sommers, P. and Wiencke, L., "The Central Laser Facility at the Pierre Auger Observatory", *Journal of Instrumentation* 1, 2006.
6. Cester, R. *et al.*, "Atmospheric aerosol monitoring at the Pierre Auger Observatory", *Proc. 29th ICRC, Pune, 2005*.
7. Argiro, S. *et al.* for the Auger Collaboration, "The Offline Software Framework of the Pierre

- Auger Observatory”, Proc. 29th ICRC (Pune), 2005.
8. Sokolsky, P., “Introduction to Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics”, Addison-Wesley, Redwood City, 1989.
 9. Abbasi, R. U. *et al.*, for the HIRES Collaboration, “A Study of the Composition of Ultra High Energy Cosmic Rays Using the High Resolution Fly’s Eye”, Astroparticle Physics 0407622 v3, 2004.
 10. Dawson, B. R., Meyhandan, R. and Simpson, K. M., “A comparison of cosmic ray composition measurements at the highest energies”, Astroparticle Physics 9, 1998.
 11. Perrone, L., Petrera, S. and Salamida, F., “Gaisser-Hillas Profiles and FD Simulation”, Auger Internal Note GAP 087, 2005.