

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS FÍSICAS

**ANÁLISIS DE LAS DIRECCIONES DE ARRIBO DE  
RAYOS CÓSMICOS DE ULTRA-ALTA ENERGÍA EN  
EL OBSERVATORIO PIERRE AUGER**

**Evelyn G. Coronel**  
Maestrando

**Dra. Silvia Mollerach**  
Directora

**Miembros del Jurado**  
Dr. Diego Harari (Instituto Balseiro)

13 de Enero de 2021

Partículas y Campos – Centro Atómico Bariloche

Instituto Balseiro  
Universidad Nacional de Cuyo  
Comisión Nacional de Energía Atómica  
Argentina

# Índice de símbolos

CR:	Rayos cósmicos ( <i>Cosmic Rays</i> )
CMB:	Radiación Cósmica de Fondo ( <i>Cosmic Microwave Background</i> )
FD:	Detector de Fluorescencia ( <i>Fluorescence Detector</i> )
SD:	Detector de Superficie ( <i>Surface Detector</i> )
WCD:	Detector de radiación Cherenkov de agua
EAS:	Lluvia Atmosférica Extendida ( <i>Extensive Air Shower</i> )
VAOD:	Profundidad atmosférica óptica vertical ( <i>Vertical Atmospheric Optical Depth</i> )
CLF:	<i>Central Laser Facility</i>
XLf:	<i>eXtreme Laser Facility</i>
$X_{max}$ :	Profundidad atmosférica del máximo de la lluvia
LDF:	Función de Distribución Lateral ( <i>Lateral Distribution Function</i> )
S(1000):	Señal a 1000 m del núcleo de la lluvia y al nivel del suelo
$S(1000)_w$ :	Señal de S(1000) corregida por la modulación del clima.
CIC:	Corte de Intensidad Constante ( <i>Constant Intensity Cut</i> )
$S_{38}$ :	Señal a 1000 m del núcleo y al nivel del suelo si el ángulo cenital del evento fuera de $38^\circ$
$S_{38,w}$ :	Señal $S_{38}$ corregida por la modulación del clima
eV:	electrón Voltio, $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$
EeV:	$1 \text{ EeV} = 10^{18} \text{ eV}$
PMT:	Tubo fotomultiplicador ( <i>Photo-Multiplier Tube</i> )
VEM:	Muón vertical equivalente ( <i>Vertical Equivalent Muon</i> )
ICRC:	Conferencia Internacional de Rayos Cósmicos ( <i>International Cosmic Ray Conference</i> )
EW:	Método East - West

# Índice de contenidos

Índice de símbolos	i
Índice de contenidos	ii
Índice de figuras	iii
Resumen	iv
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Rayos cósmicos . . . . .	2
1.2. Espectro de energías . . . . .	2
1.3. Lluvias atmosféricas extendidas . . . . .	3
<b>2. El Observatorio Pierre Auger</b>	<b>5</b>
2.1. Introducción . . . . .	5
2.2. Detección de Rayos Cósmicos . . . . .	5
2.2.1. El detector de superficie y el detector de Fluorescencia . . . . .	6
2.2.2. Diseño híbrido . . . . .	7
2.3. Reconstrucción de eventos de los detectores de superficie . . . . .	8
2.3.1. Selección de eventos . . . . .	8
2.3.2. Reconstrucción de las lluvias . . . . .	8
2.3.3. Calibración de la energía . . . . .	10
2.3.4. Monitoreo del clima . . . . .	11
<b>3. Registro de eventos</b>	<b>12</b>
3.1. Acerca de todos los disparos del SD . . . . .	13
3.2. Acerca de los eventos . . . . .	15
3.2.1. Acerca del registro de hexágonos . . . . .	16
3.3. Acerca de la tesis de licenciatura . . . . .	16
<b>Bibliografía</b>	<b>17</b>

# Índice de figuras

1.1. Espectro de rayos cósmicos medidos mediante lluvias atmosféricas en función de la energía $E$ . Figura extraída de [1] . . . . .	4
2.1. Distribución de los tanques del SD en el área del Observatorio Pierre Auger. Se muestra la ubicación de las estaciones del clima, otros módulos instalados sobre el observatorio y la posición de los detectores de fluorescencia (FD). Figura extraída de [2] . . . . .	6
2.2. Detectores empleados por el Observatorio Pierre Auger para la detección de rayos cósmicos. . . . .	7
2.3. Ejemplo de la señal dejada por un evento de $(104 \pm 11)$ EeV de energía con un ángulo cenital de $(25,1 \pm 0,1^\circ)$ sobre el arreglo principal SD 1500 m. La flecha indica la dirección de arribo de la lluvia. Los colores de los círculo representa el tiempo de arribo de la lluvia, los primeros en amarillo y los últimos en rojo. En área de los círculo pintados es proporcional a logaritmo de la señal. Figura extraída de [2]. . . . .	9
2.4. Dependencia de la señal con la distancia del núcleo de la lluvia de un evento de $(104 \pm 11)$ EeV de energía con un ángulo cenital de $(25,1 \pm 0,1^\circ)$ . La función ajustada es la función de distribución lateral (LDF). Del ajuste se obtiene el valor de $S(1000)$ . Figura extraída de [2]. . . . .	10
2.5. Distintas calibraciones hechas para los eventos reconstruidos en el Observatorio Pierre Auger. . . . .	11
3.1. Histograma de eventos del Disparo Estándar por rango de tiempo medido por el Observatorio Pierre Auger . . . . .	13
3.2. Histograma de eventos de Todos Los Disparos por rango de tiempo medido por el Observatorio Pierre Auger . . . . .	14
3.3. La eficiencia del disparo en función de la energía para eventos con ángulo cenital $\theta$ menor a $60^\circ$ . Este figura fue extraída del trabajo [3] . . . . .	15

# Resumen

Cuando un rayo cósmico interactúa con una molécula en la parte superior de la atmósfera, se inicia un proceso en el cual se generan otras partículas secundarias. Este proceso es conocido como lluvia atmosférica extendida. Estas lluvias pueden ser detectadas sobre la superficie de la Tierra mediante varios experimentos. Este trabajo utiliza los datos recolectados por los detectores de superficie separados en 1500 m entre sí del Observatorio Pierre Auger durante los años 2005-2015. Las condiciones atmosféricas como la presión ( $P$ ), la temperatura ( $T$ ) y la densidad ( $\rho \propto P/T$ ) afectan el desarrollo de la lluvia a través de la atmósfera. A partir de un análisis de la modulación inducida en la estimación de la energía por las variaciones en las condiciones atmosféricas. Estas fueron tenidas en cuenta en la reconstrucción oficial de eventos. En este trabajo extendimos el periodo de tiempo analizado para analizar esta modulación, y se observó que los parámetros obtenidos son comparables con la reconstrucción oficial.

**Palabras clave:** RAYOS CÓSMICOS, ANÁLISIS DE DATOS, INSTITUTO BAL-SEIRO

# Capítulo 1

## Introducción

*“We can only measure what Nature sends us”*

— Jim Cronin

Desde el descubrimiento de los rayos cósmicos en 1911 por Victor Hess, numerosos experimentos han intentado caracterizarlos. A partir del 2004, el Observatorio Pierre Auger ha detectado rayos cósmicos con el objetivo de estudiar su origen. Un análisis adecuado de los eventos registrados es necesario para estudiar las posibles fuentes de rayos cósmicos, además de su composición y su espectro de energía.

Un aspecto estudiado por varios trabajos [4] [5] es la distribución de las direcciones de arribo de los rayos cósmicos. Las direcciones de arribo son prácticamente isotrópicas salvo variaciones muy pequeñas alrededor de la media. Dado que estas anisotropías son pequeñas respecto a la media, es importante tener en cuenta todos los efectos que pueden ser fuentes de modulación de los datos. Un ejemplo claro de una modulación física que no aporta información sobre las anisotropías es la modulación del clima.

Este trabajo es parte del análisis de la direcciones de arribo de los rayos cósmicos de ultra alta energía obtenidas por el Observatorio Pierre Auger. En el mismo se estudia la modulación del clima sobre la determinación de la energía de los eventos medidos por los detectores de superficie. Las lluvias atmosféricas provocadas por los rayos cósmicos que llegan a la alta atmósfera, interactúan con los constituyentes de las atmósfera. Esta interacción puede ser afectada por los cambios en las condiciones atmosféricas en el momento de la lluvia. El trabajo está dividido en distintos capítulos organizados para introducir las rayos cósmicos, mencionar brevemente características del Observatorio Pierre Auger y presentar el análisis sobre la modulación del clima de la señal medida por el Observatorio.

## 1.1. Rayos cósmicos

Los rayos cósmicos (CRs) fueron descubiertos en el 1911 por Victor Hess [6]. Los mismos son partículas que llegan a la Tierra desde el espacio como electrones, positrones, rayos gamma entre otros, además de núcleos atómicos. En 1962, John Linsley detectó un evento de CR con una energía de  $10^{20}$  EeV, y otros experimentos encontraron más eventos por encima de esta energía. A pesar de que han sido medidos y estudiados en experimentos alrededor del mundo, el origen de los CRs es incierto. Las partículas con energía por encima de  $10^{18}$  EeV se conocen como rayos cósmicos de ultra alta energía (UHECRs) y son las partículas con más energía presentes en el universo. Las direcciones de arribo de los UHECRs son casi isotrópicas [4] [5] y se cree que son de origen extra-galáctico, es decir que no fueron producidos dentro de la Vía Láctea, debido a que los campos magnéticos galácticos no pueden confinarlos y la distribución de sus direcciones de arribo es cerca a ser isotrópica, sin correlación significativa con el plano o el centro galáctico. Para estudiar a los mismos, se disponen de tres observables principales: el espectro, la composición y la anisotropía. El espectro se refiere a la distribución de energía de los rayos cósmicos detectados, la composición es la distribución de masas nucleares, es decir, que elementos y en que proporción se encuentran en los rayos cósmicos y el tercero, la anisotropía, es la distribución de las direcciones de arribo a diferentes energías.

## 1.2. Espectro de energías

Los mecanismos de interacción de protones y núcleos de origen extra-galáctico y su relevancia en la propagación fueron predichos por Greisen [7], e independientemente por Zatsepin y Kuzmin [8] tras el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo (CMB). Primeramente todas las partículas sufren una pérdida de energía debido a la expansión del universo. Este es el principal mecanismo de pérdida de energía para protones de  $E < 2 \times 10^{18}$  eV y núcleos de  $E/A < 0,5 \times 10^{18}$  eV.

En la Fig. 1.1 se presenta el espectro de los rayos cósmicos medidos por los distintos experimentos que se desarrollaron para su estudio. La figura fue extraída de [1], donde los datos fueron multiplicado por  $E^{2,6}$  para resaltar los cambios en la forma del espectro. Considerando que el espectro de energías por debajo de  $\sim 0,1 \times 10^{18}$  eV es de origen galáctico, la rodilla correspondiente al cambio de pendiente en  $\sim 3 \times 10^{15}$  EeV podría reflejar el hecho que la mayoría de los aceleradores en la galaxia han alcanzado su energía máxima para la aceleración de protones. El experimento de Cascade-Grande ha reportado una segunda rodilla cercana a  $8 \times 10^{16}$  eV, que podría corresponder al límite de aceleración de primarios más pesados [1].

Considerando el tobillo en la Fig.1.1, es posible que sea el resultado de que una

población de mayor energía esté sobrepasando a una población de menor energía, por ejemplo un flujo extra-galáctico empiece a dominar sobre un flujo galáctico [9]. Otra posibilidad es que el cambio de la forma de la curva se deba a la pérdida de energía de los protones extra-galácticos, debido por el proceso  $p\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ , conocido como foto-desintegración con el CMB [10]. Para energías aun mayores ( $E/A \geq 60 \times 10^{18}$  eV ) el proceso dominante es la producción de mesones por colisiones entre núcleos y fotones de muy altas energías.

El flujo de los rayos cósmicos en función de la energía puede aproximar una ley de potencias que tiene una forma del siguiente tipo

$$\frac{d\Phi_{CR}}{dE} \propto E^{-\gamma} \quad (1.1)$$

donde  $\gamma$  se lo denomina índice espectral, este valor varía ligeramente para distintos rangos de energía.

### 1.3. Lluvias atmosféricas extendidas

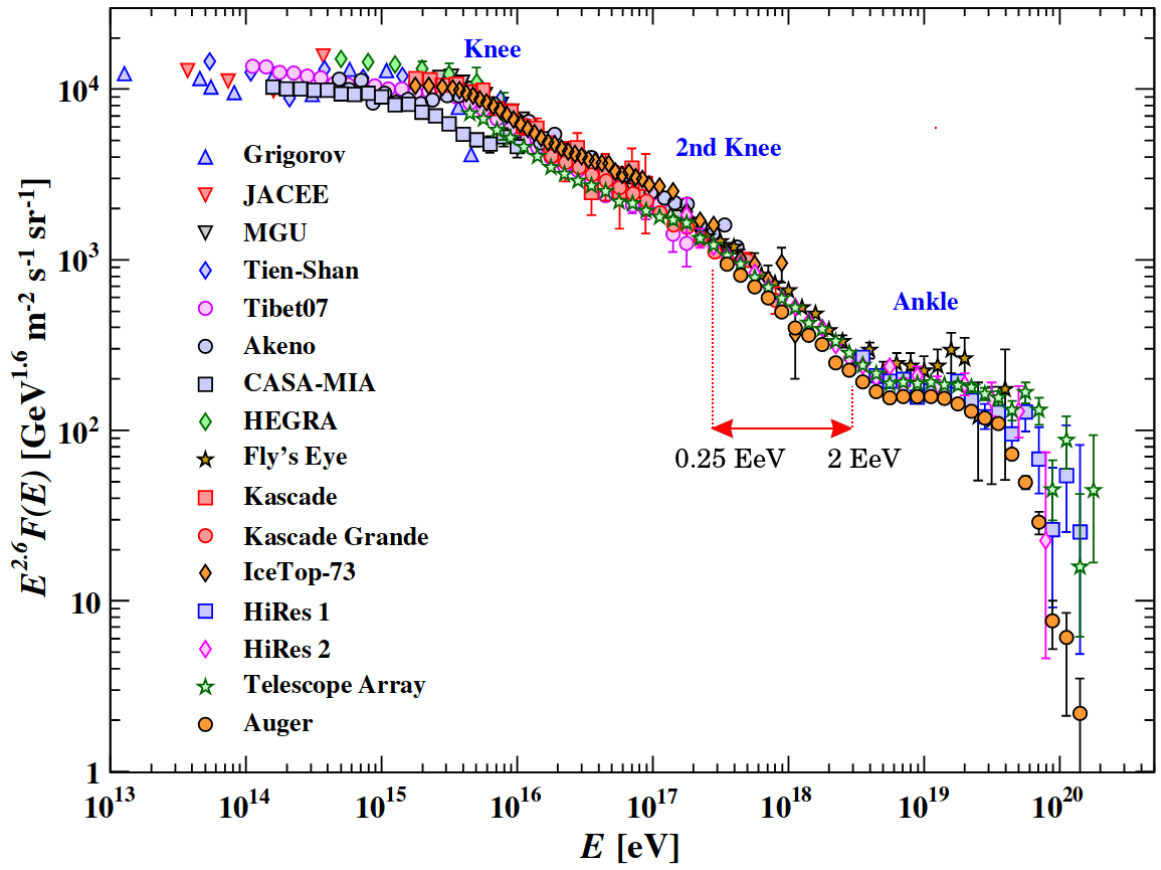
Una lluvia atmosférica extendida (EAS) es la cascada de partículas secundarias generadas por la interacción de un rayo cósmico, conocido como partícula primaria o el primario, con la atmósfera terrestre. Como se observa en la Fig. 1.1 el flujo de partículas decae rápidamente con la energía. Aunque para energías mayores a  $10^{14}$  EeV las partículas producidas en la atmósfera como secundarios pueden llegar a las montañas. Para energías mayores pueden llegar hasta el nivel del mar. El momento transversal que adquieren las partículas secundarias en el proceso de dispersión a través de la atmósfera es tal que los secundarios se dispersan sobre área de gran tamaño. Para energía mayores a 10 EeV, por ejemplo, la lluvia puede llegar a cubrir más de  $25 \text{ km}^2$ .

El desarrollo de la lluvia puede describirse mediante la profundidad atmosférica, definida como la masa de aire por unidad de área que atravesó una partícula en su dirección de propagación,

$$X(L) = \int_L^\infty dx \rho(x) \quad (1.2)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire en función de la posición.





**Figura 1.1:** Espectro de rayos cósmicos medidos mediante lluvias atmosféricas en función de la energía  $E$ . Figura extraída de [1]

# Capítulo 2

## El Observatorio Pierre Auger

### 2.1. Introducción

Para realizar un estudio con mucha estadística de los CRs hasta altas energías se diseñó el Observatorio Pierre Auger. Las propiedades medidas de los lluvias extendidas determinan la energía y la dirección de arribo de cada CR, además de proveer información sobre la distribución de la composición del CR. El Observatorio Pierre Auger en la Provincia de Mendoza, Argentina ha registrado eventos desde el año 2004 mientras se agregaban detectores hasta su terminación en el 2008.

### 2.2. Detección de Rayos Cósmicos

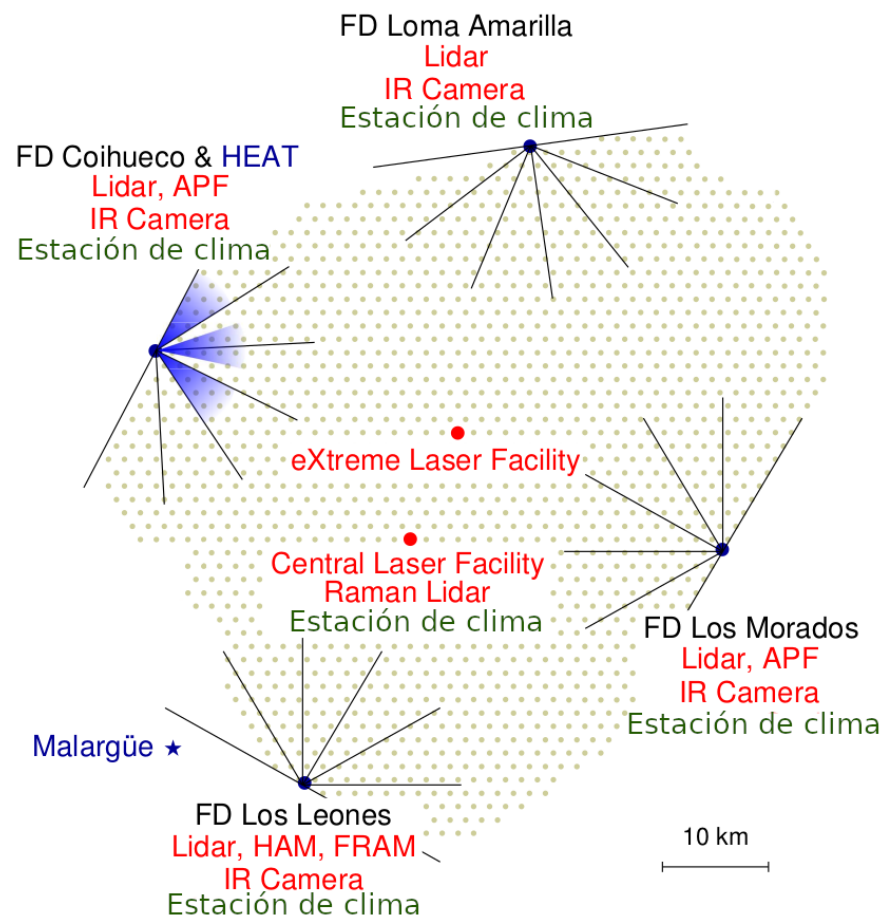
Una característica esencial del Observatorio es la capacidad de observar lluvias atmosféricas extendidas (EAS) simultáneamente mediante dos técnicas distintas, combinando los detectores de superficie (SD) y los detectores de fluorescencia (FD). Los SD son un conjunto de 1660 detectores Cherenkov con agua hiper-pura colocados en un arreglo triangular, con una distancia de 1,5 km cubriendo  $\sim 3000 \text{ km}^2$ , además de un arreglo más pequeño llamado *Infill* separados por 750 m. El arreglo principal son los detectores de superficie distanciados 1500 m, que en el presente trabajo se referencia como *SD 1500 m* se muestra en la Fig. 2.1. Los FD están colocados en cuatro edificios alrededor del arreglo de SD: Coihueco, Loma Amarilla, Los Morados y Los Leones indicados en el mapa en la Fig. 2.1. Cada edificio contiene 6 FD, donde cada uno tiene un campo de visión de  $30^\circ \times 30^\circ$ , cubriendo así cada uno  $180^\circ$  en la horizontal.

El área del observatorio es generalmente plana, la altitud de los detectores varía entre 1340 m y 1610 m, con una altitud media de  $\sim 1400$  m. Estos detectores están distribuidos entre las latitudes  $35,0^\circ \text{ S}$  y  $35,3^\circ \text{ S}$  y entre las longitudes  $69,0^\circ \text{ W}$  y  $69,4^\circ \text{ W}$ .

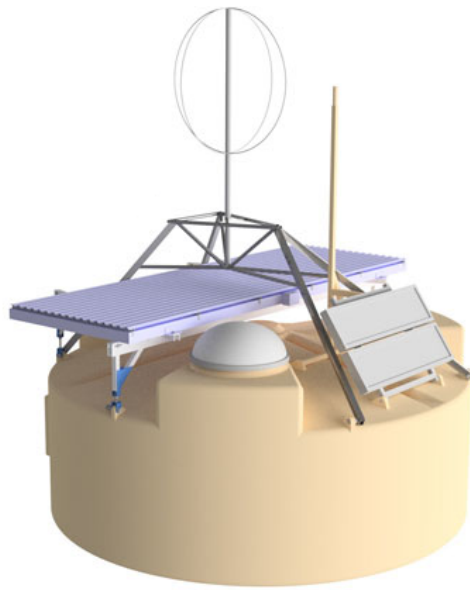
### 2.2.1. El detector de superficie y el detector de Fluorescencia

Un SD consiste en un tanque de polietileno de 3,6 m de diámetro que contiene 12 000 litros de agua hiper-pura. Su interior está recubierto por una lámina de alta reflectividad. En la parte superior se encuentran tres foto-multiplicadores (PMT) distribuidos simétricamente a 1,2 m respecto al centro del tanque. Los mismos colectan la radiación Cherenkov producida por una partícula cargada relativista que pasa por el agua del detector. La altura del tanque de 1,2 m lo hace sensible a fotones de altas energías, que pueden convertirse en pares electrón-positrón en el volumen de agua [2].

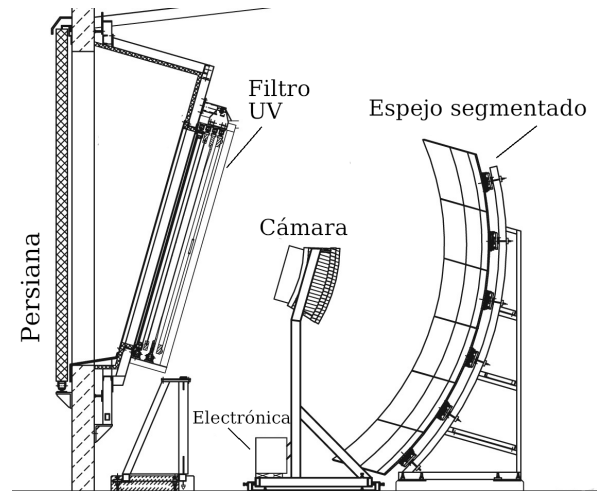
El detector de fluorescencia (FD) consiste en 24 telescopios de fluorescencia, esquematizados en la Fig.2.2b, distribuidos en 4 distintos lugares en los límites del observatorio. Cada telescopio tiene un espejo esférico segmentado de  $13\text{ m}^2$  y una cámara que consiste en 440 PMTs ordenados en una grilla de  $22 \times 20$ . Cada telescopio tiene un campo de visión de  $30^\circ \times 30^\circ$ .



**Figura 2.1:** Distribución de los tanques del SD en el área del Observatorio Pierre Auger. Se muestra la ubicación de las estaciones del clima, otros módulos instalados sobre el observatorio y la posición de los detectores de fluorescencia (FD). Figura extraída de [2]



(a) Detector de radiación Cherenkov con los elementos de la actualización para *Auger Prime*



(b) Esquema simplificado de un telescopio de fluorescencia. Extraído de [11]

**Figura 2.2:** Detectores empleados por el Observatorio Pierre Auger para la detección de rayos cósmicos.

El FD mide los fotones ultravioletas producidos por la componente electromagnética de la EAS. Mientras se produce la lluvia en la atmósfera, algunos átomos de nitrógeno se excitan y se desexcitan emitiendo fotones. El uso del FD para detectar estos fotones es solo posible en noches sin nubes y sin luna. La posible atenuación de los fotones en la atmósfera es tomada en cuenta para la estimación de energía. Ya que esta estimación se basa en la cantidad de fotones detectados. Otro factor a tener en cuenta es la presencia de aerosoles, como humo o polvo, esto se realiza midiendo la profundidad atmosférica óptica vertical *Vertical Atmospheric Optical Depth (VAOD)*. Estas mediciones son realizadas por los láseres de las instalaciones de Central Laser Facility (CLF) y de eXtreme Laser Facility (XLF), cuyas ubicaciones se muestra en la Fig.2.1.

### 2.2.2. Diseño híbrido

El SD detecta un corte de EAS que llega al nivel del suelo, los WCDs detectan la componentes electromagnética y muónica de la lluvia. Cabe resaltar que el SD funciona las 24 horas del día, por lo que detecta una mayor cantidad de eventos que el FD. Existen métodos para determinar la dirección de arribo y la energía del primario. La exposición se calcula contando la cantidad de hexágonos activos en un tiempo dado, y multiplicado la apertura de una sola celda hexagonal que vale  $4,59 \text{ km}^2 \cdot \text{sr}$  para lluvias verticales. El SD tiene la propiedad de que la calidad de sus mediciones aumenta con la energía del EAS. La exposición instantánea del SD se calcula fácilmente, especialmente para energías mayores a  $3 \text{ EeV}$ , donde la EAS detectada por cualquier parte del SD

es detectada con 100 % de eficiencia independientemente de la masa del primario que inicio la EAS.

El FD es usado para generar una imagen del desarrollo del EAS en la atmósfera. La luz de fluorescencia es emitida isotrópicamente en la parte ultravioleta del espectro, y es producida predominantemente por la componente electromagnética de la lluvia. Los períodos de observación están limitados a las noches sin luna y con buen clima, pero la ventaja del FD es la posibilidad de ver el desarrollo de la lluvia. Dado que la producción de los fotones por fotoluminiscencia es proporcional a la energía depositada en la atmósfera, se puede medir la energía del primario mediante calorimetría. Otro aspecto importante del FD es la posibilidad de medir la profundidad de la atmósfera donde la lluvia alcanza su máximo desarrollo,  $X_{max}$ , esta cantidad es uno de los más directos indicadores de la composición de masa. [5]

## 2.3. Reconstrucción de eventos de los detectores de superficie

### 2.3.1. Selección de eventos

La reconstrucción de la energía y la dirección de arribo de los CRs se realiza mediante las señales medidas por el SD. La dirección es reconstruida mediante el tiempo de llegada de las señales registradas por estaciones individuales del SD. Para garantizar la selección de eventos bien contenidos en el SD, se aplica el corte llamado  $6T5$ . Este corte considera solo a los eventos donde el tanque con mayor señal está rodeado por otros 6 tanques activos. Esta condición asegura una buena reconstrucción de la energía. Al mismo tiempo, este corte simplifica el cálculo de la exposición [12], importante para el análisis del espectro. Para estudios de dirección de arribo pueden utilizar cortes menos estrictos.

### 2.3.2. Reconstrucción de las lluvias

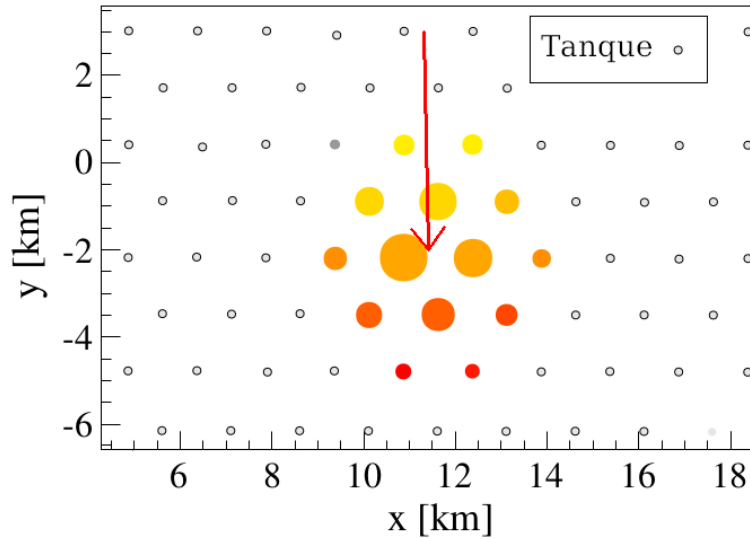
En una primera aproximación para la dirección de arribo de la lluvia se obtiene ajustando los tiempos de llegada de la señal en cada tanque. Para eventos con suficientes tanques disparados, estos tiempos de llegada pueden ser descritas como la evolución un frente de lluvia como una esfera que crece con la velocidad de la luz. Los puntos de impacto del EAS con el suelo son obtenidas mediante ajustes a las señales de los tanques. Este ajuste se realiza con una función de distribución lateral (LDF). La LDF también tiene en cuenta la probabilidad de que los tanques no sean disparados y que los tanques con mayor señal estén saturados.

Un ejemplo de la señal que deja un evento sobre el SD 1500 m se muestra en la Fig. 2.3. Este evento fue producido por un rayo cósmico de  $(104 \pm 11)$  EeV con un ángulo cenital de  $(25,1 \pm 0,1^\circ)$ . La LDF de las señales para este evento se muestra en la Fig. 2.4. La función utilizada para el ajuste de la LDF es una función  $f_{LDF}$  propuesta por Nishimura-Kamata-Greisen [5]

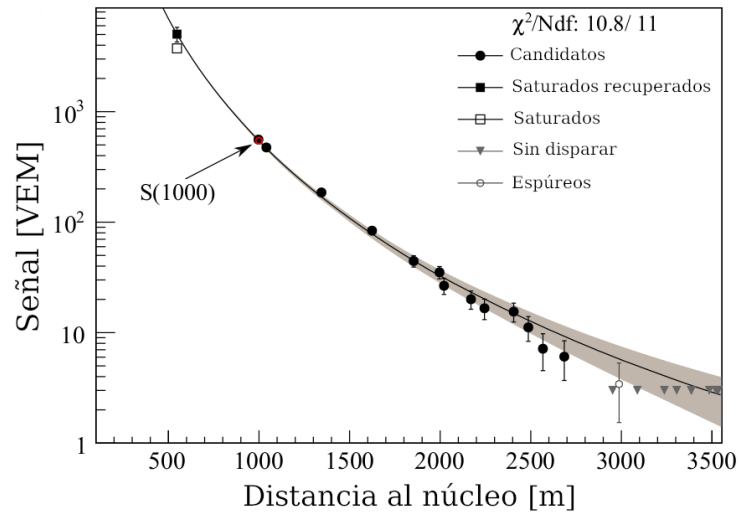
$$S(r) = S(r_{opt})f_{LDF}(r)$$

$$f_{LDF}(r) = \left(\frac{r}{r_{opt}}\right)^\beta \left(\frac{r+r_1}{r_{opt}+r_1}\right)^{\beta+\gamma}$$

donde  $f_{LDF}$  está normalizado tal que  $f_{LDF}(r_{opt}) = 1$  y  $r_{opt}$  es la distancia óptima, y  $S(r_{opt})$  es usado para estimar la energía. Para el arreglo SD 1500 m, el parámetro  $r_{opt} = 1000$  m, por lo tanto el tamaño de la lluvia o *shower size* es el valor de  $S(1000)$ . Dado que la forma de la LDF es desconocida, la forma funcional propuesta para la función  $f_{LDF}$  fue elegida empíricamente. El parámetro  $\beta$  depende del tamaño de la lluvia y del ángulo cenital. Los eventos verticales, es decir los eventos con  $\theta < 60^\circ$ , son medidas en una etapa menos desarrollada que eventos más inclinados. Los eventos con  $\theta > 60^\circ$  atraviesan un mayor cantidad de atmósfera.



**Figura 2.3:** Ejemplo de la señal dejada por un evento de  $(104 \pm 11)$  EeV de energía con un ángulo cenital de  $(25,1 \pm 0,1^\circ)$  sobre el arreglo principal SD 1500 m. La flecha indica la dirección de arribo de la lluvia. Los colores de los círculo representa el tiempo de arribo de la lluvia, los primeros en amarillo y los últimos en rojo. En área de los círculo pintados es proporcional a logaritmo de la señal. Figura extraída de [2].



**Figura 2.4:** Dependencia de la señal con la distancia del núcleo de la lluvia de un evento de  $(104 \pm 11)$  EeV de energía con un ángulo cenital de  $(25,1 \pm 0,1^\circ)$ . La función ajustada es la función de distribución lateral (LDF). Del ajuste se obtiene el valor de S(1000). Figura extraída de [2].

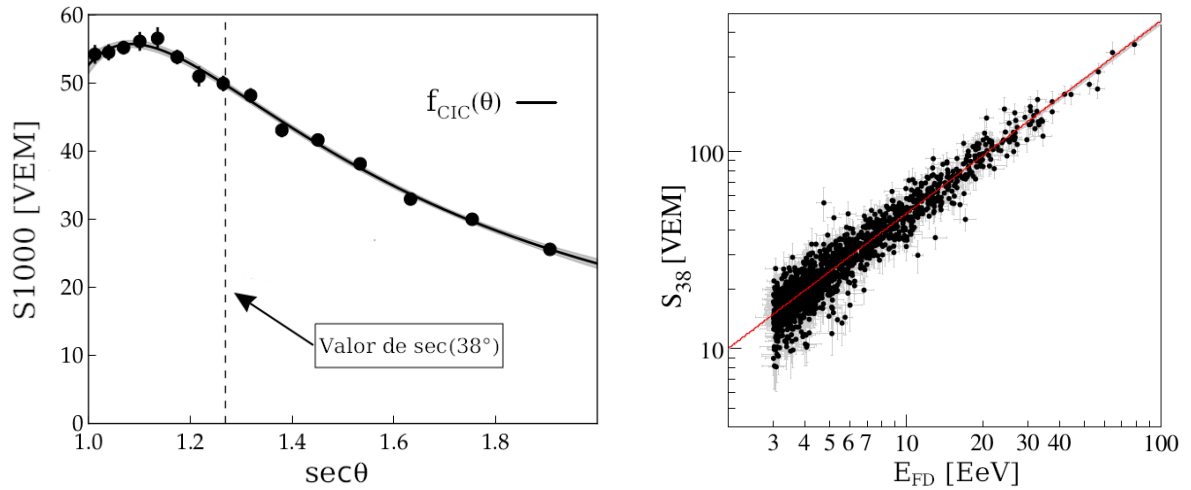
### 2.3.3. Calibración de la energía

Para una energía dada, el valor de S(1000) disminuye con  $\theta$  debido a la atenuación de las partículas de la lluvia. Asumiendo un flujo isotrópico de los CR primarios sobre la parte superior de la atmósfera, se obtiene la atenuación de los datos mostrados en la Fig. 2.5a usando el método de Corte de Intensidad Constante (CIC) [13]. La curva de atenuación  $f_{CIC}(\theta)$  fue ajustado con un polinomio de orden 3 del tipo  $f_{CIC}(\theta) = 1 + ax + bx^2 + cx^3$ , donde  $x = \cos^2(\theta) - \cos^2(38^\circ)$ . Según lo presentado por la colaboración [4], los valores son  $a = 0,980 \pm 0,004$ ,  $b = -1,68 \pm 0,01$  y  $c = -1,30 \pm 0,45$ , aunque estos coeficientes cambian ligeramente con la energía [5]. El ángulo cenital  $\theta = 38^\circ$  se toma como un punto de referencia para convertir S(1000) a  $S_{38}$  mediante  $S_{38} = S(1000)/f_{CIC}(\theta)$ . Este valor  $S_{38}$  puede considerarse como la señal S(1000) que hubiera tenido un evento que fue detectado mediante el SD con  $\theta = 38^\circ$ .

Los eventos con  $\theta < 60^\circ$  que fueron detectados por el SD y por el FD son utilizados para relacionar el tamaño de la lluvia con la energía  $E_{FD}$  medida por calorimetría por el FD. La correlación entre  $S_{38}$  y  $E_{FD}$  se calcula mediante el método de máxima verosimilitud, que considera la evolución de las incertezas con la energía. La relación entre  $S_{38}$  y  $E_{FD}$  se describe mediante un función de potencia como se muestra en la Ec. 2.1

$$E_{FD} = A (S_{38}/VEM)^B \quad (2.1)$$

donde los parámetros obtenidos son  $A = (1,86 \pm 0,03) \times 10^{17}$  eV y  $B = (1,031 \pm 0,004)$  [14]. En la Fig. 2.5b se observa el ajuste y la relación entre  $S_{38}$  y  $E_{FD}$



(a) Curva de atenuación descrita por un polinomio de orden 3. En este ejemplo se deducen los coeficientes de la dependencia del  $S(1000)$  a  $S_{38} \approx 50$  VEM que corresponde a un energía de 10,5 EeV.

(b) Correlación entre el valor  $S_{38}$  y la energía  $E_{FD}$  medida por el FD.

**Figura 2.5:** Distintas calibraciones hechas para los eventos reconstruidos en el Observatorio Pierre Auger.

### 2.3.4. Monitoreo del clima

Las condiciones atmosféricas, como la temperatura, presión y humedad, se deben tener en cuenta para estudiar el desarrollo de los EAS, así como también para estudiar la cantidad de fotones de las lluvias sobre las moléculas de  $N_2$ , emitidos por fluorescencia. Distintas estaciones monitorean las condiciones atmosféricas sobre el Observatorio Pierre Auger, cuatro cerca de los edificios donde se encuentran los FD y uno cerca del centro del SD 1500 m. Para este trabajo se utilizaron las mediciones de la presión y temperatura registradas la mayor parte del tiempo en la estación del clima cerca del CLF, la misma realiza una medición cada intervalo de 5 minutos la mayor parte del tiempo. Cuando no se cuenta con datos registrados para intervalos entre 10 minutos hasta 3 horas, en estos casos se utiliza una interpolación de los datos medidos. Si el período de tiempo es mayor a 3 horas, los eventos durante este periodo no son considerados para la determinación de los efectos del clima en la señal detectada por el SD 1500 m.



## Capítulo 3

# Registro de eventos

La parte superior de la atmósfera terrestre está siendo constantemente bombardeada con partículas provenientes del espacio, con energías de los  $10^{10}$  eV para arriba. Estas partículas son conocidas como rayos cósmicos (RC) y han sido medidas desde los años 60s [15]. Aunque el área lleva tiempo siendo estudiada, los mecanismos que producen los RCs y las zonas del espacio donde se originan los mismos siguen siendo investigadas por distintos experimentos.

Por encima de una energía de  $10^{14}$  eV, los RCs que llegan a la atmósfera pueden interactuar con las moléculas de la misma, y así producir cascadas de partículas secundarias. Dependiendo de la energía del primario, es decir el RC que generó la lluvia, estas partículas pueden ser medidas usando detectores sobre la superficie de la Tierra. Esta cascada es conocida como lluvia atmosférica extendida o *EAS* y está compuesta por una componente electromagnética, que consiste en electrones, positrones y fotones, y una componente muónica. Las partículas secundarias cargadas también pueden excitar moléculas de nitrógeno en el aire que producen fotones de fluorescencia y pueden ser observados por telescopios durante noches claras.

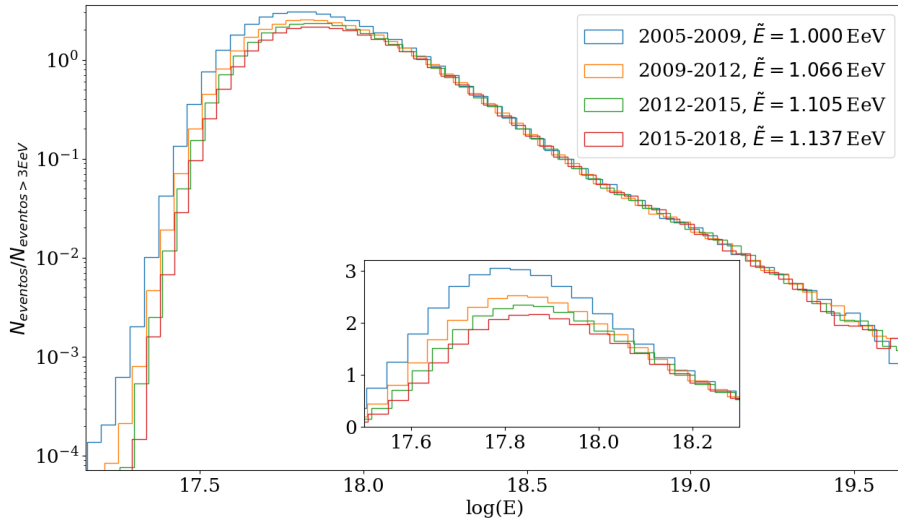
El observatorio Pierre Auger está ubicado en la ciudad de Malargüe, provincia de Mendoza. El mismo fue construido para detectar las partículas secundarias de las EASs producidas por RCs, con energía por encima de 0,1 EeV. La adquisición de datos empezó en el año 2004. El observatorio posee un sistema híbrido de detección, ya que combina un arreglo de detectores de partículas sobre la superficie y un conjunto de telescopios que detectan los fotones de fluorescencia. Cuando el observatorio registra una EAS que llega a la superficie y reconstruye la dirección de llegada del RC, se dice que se ha detectado un *evento*.

Los análisis presentados en este trabajo fueron realizados con los eventos obtenidos por  $\sim 1600$  detectores Cherenkov, dispuestos sobre de  $\sim 3000 \text{ km}^2$  a 1500 m entre sí. Un conjunto de 7 detectores adyacentes, es decir una en el medio y 6 en los lados, forman una celda hexagonal. Esta disposición de tanques se menciona como *arreglo*

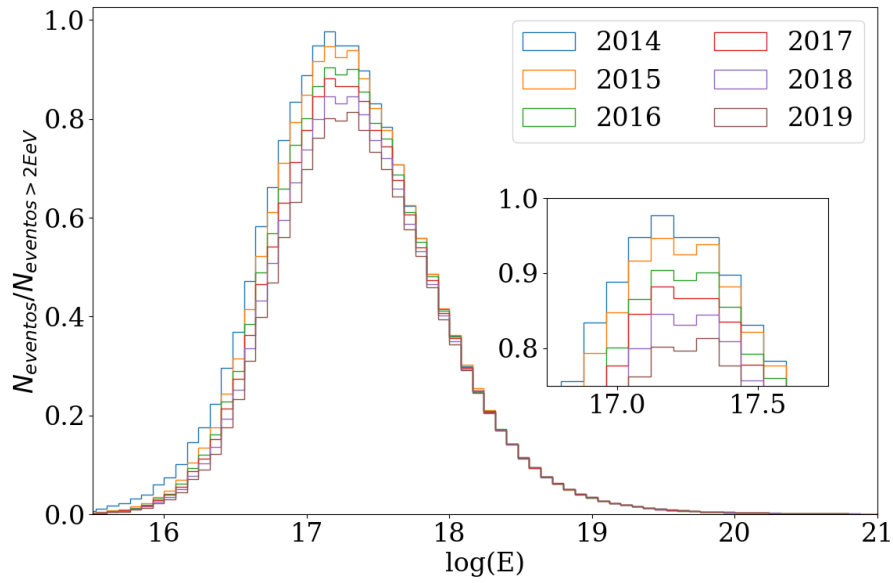
*principal.* Cada detector consiste en un tanque cilíndrico con 12 toneladas de agua ultra-pura de 1,2m de alto. En la parte superior del tanque están instalados 3 fotomultiplicadores que monitorean la radiación Cherenkov en el agua. El conjunto del tanque y la electrónica de detección se menciona durante este trabajo como *Surface Detector* o *SD*. Cada detector está midiendo constantemente los fotones en el agua. Muchos de estos fotones son producidos por ruido y otros por partículas secundarias de una EAS. Los SDs cuentan con algoritmos o reglas para discernir ruido de un evento causado por un rayo cósmico, estos son los algoritmos de disparo.

### 3.1. Acerca de todos los disparos del SD

A medida que los tanques pasan más tiempo midiendo, también van perdiendo sensibilidad a los eventos de bajas energías. Esto es una desventaja del disparo estándar en los SDs en el rango 1 EeV - 2 EeV, ya que la eficiencia completa del disparo estándar se obtiene para eventos de energía mayor a 2,5 EeV. En la Fig.3.2, para los datos presentados en el ICRC 2019, se observa como la energía media de los eventos para distintos rangos de tiempo va aumentando, además que la proporción de eventos por debajo de 3 EeV disminuye.



**Figura 3.1:** Histograma de eventos del Disparo Estándar por rango de tiempo medido por el Observatorio Pierre Auger

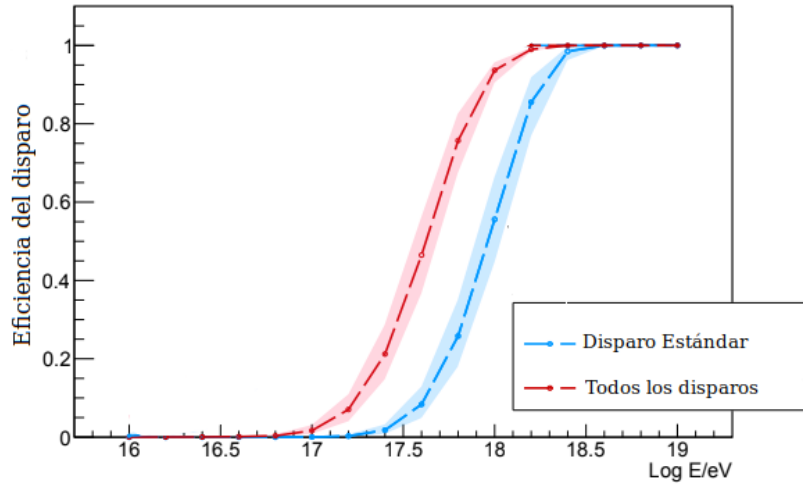


**Figura 3.2:** Histograma de eventos de Todos Los Disparos por rango de tiempo medido por el Observatorio Pierre Auger

El análisis del trabajo de licenciatura fue realizado sobre los eventos medidos utilizando el disparo estándar del arreglo principal, cuya eficiencia varía con la energía del CR. Para el disparo estándar, los eventos con energía mayor a 3 EeV y ángulo cenital  $\theta < 60^\circ$  o por encima de 4 EeV y  $\theta < 80^\circ$ , son detectados con una eficiencia del 100%. Por lo tanto, el análisis en el rango de energía entre 1 EeV - 2 EeV requiere factores relacionados con la eficiencia del disparo en función de la energía. Estos factores son obtenidos de manera fenomenológica [16].

Para superar esta dificultad y poder recuperar la sensibilidad para bajas energías, a partir del año 2013 se implementó otros algoritmos de disparo en los SDs, llamados ToTd y MoPS [17]. Estos algoritmos de disparo se mencionan en este trabajo como *todos los disparos*.

La implementación de los ToTd y MoPS fue llevada a cabo mediante una actualización de la electrónica de los SDs para bajar el umbral de disparo, en particular para las señales de la componente electromagnética de la EAS, mejorando así la reconstrucción de eventos mediante la separación fotón/hadrón para bajas energías [17]. Con esta mejora, el umbral de eficiencia completa para todos los disparos es menor que el disparo estándar, este umbral es de una energía de 1 EeV. En la Fig 3.3 se comparan las eficiencia del disparo estándar y todos los disparos en función de la energía del evento. De tal manera que, al estudiar los eventos en el rango 1 EeV - 2 EeV, no son necesarios los factores de eficiencia y sólo pueden afectar los cambios de la exposición direccional del observatorio.



**Figura 3.3:** La eficiencia del disparo en función de la energía para eventos con ángulo cenital  $\theta$  menor a  $60^\circ$ . Este figura fue extraída del trabajo [3]

Una desventaja de todos los disparos sobre el disparo estándar, es que el último tiene una mayor cantidad de años medidos, ya que se adquieren datos desde el año 2004 con este algoritmo. Esto es conveniente ya que mientras más años han sido medidos es más factible que los efectos espúreos se cancelen. En cambio, para todos los disparos, el análisis es posible desde el año 2013. Entre inicios del 2004 y finales del 2019, el conjunto de eventos del disparo estándar tiene 6 975 194 eventos sin clasificar, es decir todos los eventos registrados por el observatorio sin discriminar por energía. En cambio entre mediados del 2013 hasta fines del 2019, el archivo de eventos para todos los disparos tiene 13 739 351 eventos sin clasificar, por lo que el menor tiempo de medición se compensa con la eficiencia del disparo.

## 3.2. Acerca de los eventos

Se aplican cortes a los eventos para asegurar la eficiencia completa de los detectores. Estos cortes implican límites en ángulo cenital  $\theta$  de los eventos, en la cantidad de vecinos al tanque de mayor señal, además de restringirse a eventos medidos en condiciones normales, es decir, cuando los sistemas de comunicación del Observatorio funcionan sin inconvenientes. De esta manera, podemos prescindir de otros factores de corrección.

A partir de los registros de eventos del arreglo principal con todos los disparos, se consideran solamente los eventos que cumplan las siguientes características:

1. La calidad de la reconstrucción depende de la energía y del ángulo cenital  $\theta$  del evento. Para el disparo estándar los eventos por debajo de los 4 EeV, se consideran los eventos con  $\theta < 60^\circ$ , en cambio para eventos por encima de esta energía se consideran hasta  $\theta < 80^\circ$ . Para todos los disparos se consideran solo los eventos con  $\theta < 60^\circ$ .

2. Los datos del evento son recopilados sin inconvenientes. Este filtro se conoce como *Bad period flag* o *ib*. Un valor de 1 indica un buen periodo. Con este filtro se descartan eventos debido a probables fallas de alimentación o problemas de comunicación o adquisición que podrían inducir errores en el análisis.
3. Buena reconstrucción de la lluvia atmosférica asociada al evento.
4. El tanque de mayor señal está en el interior de un hexágono de tanques activos. Estos eventos se conocen como *eventos 6T5*.

### 3.2.1. Acerca del registro de hexágonos

La cantidad de celdas activas sobre el observatorio está relacionado con el filtro de eventos 6T5, que garantiza la calidad de la reconstrucción del evento. El observatorio lleva un registro de la cantidad de hexágonos activos cada 5 min, además de registrar las condiciones atmosféricas en distintas estaciones de clima sobre la superficie del observatorio.

## 3.3. Acerca de la tesis de licenciatura

Durante la tesis de licenciatura se analizaron los efectos de las condiciones atmosféricas durante el desarrollo de las EAS. Se analizaron los datos adquiridos durante el periodo 2005-2018 por el arreglo principal. De esta manera, se extendió los periodos estudiados anteriormente en los siguientes trabajos [18], [19] y [20].

Los efectos atmosféricos afectan principalmente a la atenuación de la componente electromagnética de la EAS, en particular depende fuertemente de la temperatura y presión. Estos efectos se caracterizan por parámetros dependientes del ángulo cenital del evento y por la presión, densidad y temperatura al momento de su detección. Los parámetros mencionados se utilizan para corregir las señales registradas por los SDs. Las correcciones del clima utilizadas por la colaboración Pierre Auger fueron implementadas a partir del trabajo [20] en el 2017.

Durante el trabajo de la licenciatura se reprodujo el análisis de la modulación del clima sobre el periodo 2005-2015 del trabajo [20], obteniéndose resultados compatibles. También se estudió la modulación del clima mediante el valor de la señal medida por los SDs,  $S_{38}$ , sin la corrección propuesta por [20], además de extender el rango de tiempo analizado hasta el 2018. Se observó que los parámetros del clima obtenidos en este análisis sobre  $S_{38}$  son compatibles con los utilizados en la reconstrucción oficial.

# Bibliografía

- [1] Olive, K. Review of particle physics. *Chinese Physics C*, **40** (10), 100001, oct 2016. URL <https://doi.org/10.1088%2F1674-1137%2F40%2F10%2F100001>.
- [2] The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **798**, 172 – 213, 2015. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900215008086>.
- [3] Justin M. Albury, B. R. D., Jose A. Bellido. Exploring the energy threshold for full trigger efficiency of the surface detector with hybrid events GAP 2018-038. *Artículo interno de la colaboración Pierre Auger*, 2018.
- [4] The Pierre Auger Collaboration. The Pierre Auger Observatory: Contributions to the 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC 2013), 2013.
- [5] The Pierre Auger Collaboration. The Pierre Auger Observatory: Contributions to the 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2019), 2019.
- [6] Hess, V. F. Über beobachtungen der durchdringenden strahlung bei sieben freiballonfahrten. *Phys. Z.*, **13**, 1084–1091, 1912.
- [7] Greisen, K. End to the cosmic-ray spectrum? *Physical Review Letters*, **16** (17), 748, 1966.
- [8] Zatsepin, G. T., Kuzmin, V. A. Upper limit of the spectrum of cosmic rays. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters)*, **4** (3), 78–80, 1966.
- [9] Bird, D., Corbato, S., Dai, H., Dawson, B., Elbert, J., Emerson, B., *et al.* The cosmic-ray energy spectrum observed by the fly’s eye. *The Astrophysical Journal*, **424**, 491–502, 1994.
- [10] Berezhinsky, V., Gazizov, A., Grigorieva, S. On astrophysical solution to ultrahigh energy cosmic rays. *Physical Review D*, **74** (4), 043005, 2006.

- [11] Imagen extraída de <https://web.ikp.kit.edu/augeroracle/lib/exe/fetch.php?media=auger:telescope> visitada el 28/11/2019.
- [12] Abraham, J., Abreu, P., Aglietta, M., Ahn, E., Allard, D., Allekotte, I., *et al.* Trigger and aperture of the surface detector array of the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **613** (1), 29 – 39, 2010. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900209021688>.
- [13] Hersil, J., Escobar, I., Scott, D., Clark, G., Olbert, S. Observations of extensive air showers near the maximum of their longitudinal development. *Phys. Rev. Lett.*, **6**, 22–23, Jan 1961. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.6.22>.
- [14] Aab, A., Abreu, P., Aglietta, M., Al Samarai, I., Albuquerque, I., Allekotte, I., *et al.* A measurement of the cosmic ray energy spectrum above  $2,5 \times 10^{18}$  eV using the Pierre Auger Observatory. *En proceso de preparación*.
- [15] Linsley, J., Scarsi, L., Rossi, B. Extremely energetic cosmic-ray event. *Phys. Rev. Lett.*, **6** (9), 485, 1961.
- [16] Taborda, O. Estudios de anisotropías a grandes escalas angulares de los rayos cósmicos de alta energía detectados por el observatorio Pierre Auger. Tesis Doctoral, Instituto Balseiro, 2018.
- [17] Pierre Auger Collaboration. Plans for a proposal to upgrade the Pierre Auger Observatory. Pierre Auger Collaboration, 2013.
- [18] Abraham, J., Abreu, P., Aglietta, M., Aguirre, C., Ahn, E., Allard, D., *et al.* Atmospheric effects on extensive air showers observed with the surface detector of the Pierre Auger Observatory. *Astroparticle Physics*, **32** (2), 89–99, 2009.
- [19] Abreu, P., Aglietta, M., Ahlers, M., Ahn, E., Albuquerque, I. F. d. M., Allard, D., *et al.* Description of atmospheric conditions at the Pierre Auger Observatory using the global data assimilation system (GDAS). *Astroparticle Physics*, **35** (9), 591–607, 2012.
- [20] Aab, A., Abreu, P., Aglietta, M., Al Samarai, I., Albuquerque, I., Allekotte, I., *et al.* Impact of atmospheric effects on the energy reconstruction of air showers observed by the surface detectors of the Pierre Auger Observatory. *Journal of Instrumentation*, **12** (02), P02006, 2017.