

# TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS FÍSICAS

## INFORME DE AVANCE: 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)

28 de Junio de 2020

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> )
SD:	Detector de Superficie ( <i>Surface Detector</i> )
EAS:	Lluvia Atmosférica Extendida ( <i>Extensive Air Shower</i> )
S(1000):	Señal a 1000 m del núcleo de la lluvia y al nivel del suelo
S(1000) <sub>w</sub> :	Señal de S(1000) corregida por la modulación del clima.
S <sub>38</sub> :	Señal a 1000 m del núcleo y al nivel del suelo si el ángulo cenital del evento fuera de 38°
S <sub>38,w</sub> :	Señal S <sub>38</sub> corregida por la modulación del clima
eV:	electrón Voltio, $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
EeV:	$1 \text{ EeV} = 10^{18} \text{ eV}$
ICRC:	Conferencia Internacional de Rayos Cósmicos ( <i>International Cosmic Ray Conference</i> )



# Índice de contenidos

Índice de símbolos	ii
Índice de contenidos	v
Índice de figuras	vi
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Acerca de todos los disparos del SD . . . . .	2
1.2. Acerca de los eventos . . . . .	3
1.2.1. Acerca del registro de hexágonos . . . . .	3
1.3. Acerca de la tesis de licenciatura . . . . .	3
<b>2. Métodos</b>	<b>5</b>
2.1. Cálculo de los coeficientes de Fourier para el análisis de anisotropía en ascensión recta	5
2.1.1. Variaciones relativas de los hexágonos . . . . .	5
2.1.2. Cálculo de Rayleigh en ascensión recta para una frecuencia dada . . . . .	7
<b>3. Dipolo en el rango 1 EeV - 2 EeV</b>	<b>10</b>
3.1. Características del conjunto de datos . . . . .	10
3.1.1. Pesos de los eventos para frecuencias de referencia . . . . .	11
3.2. Análisis de anisotropías en ascensión recta para el primer armónico . . . . .	12
3.2.1. Trabajo a futuro . . . . .	14
<b>Bibliografía</b>	<b>15</b>



# Índice de figuras

1.1. Histograma de eventos por rango de tiempo medido por el Observatorio Pierre Auger .	2
2.1. Valores de $\Delta N_{cell,k}$ en el rango 2004-2017 para distintas frecuencias obtenidas en el trabajo [9]. . . . .	7
2.2. Valores de $\Delta N_{cell,k}$ en el rango 2004-2017 para distintas frecuencias utilizando el código escrito en este trabajo. . . . .	7
2.3. Comparación entre los análisis de anisotropía hechos para el mismo conjunto de datos, con el código de [2] y con el código escrito para este trabajo. . . . .	9
3.1. Tasa de eventos del conjunto más reciente de eventos con todos los disparos. Se observa un tasa baja en la segunda mitad del 2013. . . . .	10
3.2. Diferencia entre las energías de entre la reconstrucción del 2017 y del 2019 . . . . .	11
3.3. Variaciones de los hexágonos en función de la ascensión recta del observatorio para frecuencias características en rango mencionado. . . . .	11
3.4. Anisotropía en función de la frecuencia para el rango de energía 1 EeV - 2 EeV. Se comparan los análisis sin los pesos y con los pesos de los hexágonos entre en 1 de Enero del 2014 y el 1 de Enero del 2020 . . . . .	12
3.5. Distribución de la cantidad relativa de eventos en función de la ascensión recta a primer orden, en el rango de energía 1 EeV - 2 EeV. . . . .	13
3.6. Distribución de la cantidad relativa de eventos en función de la ascensión recta a segundo orden en el rango de energía 1 EeV - 2 EeV entre en 1 de Enero del 2014 y el 1 de Enero del 2020. . . . .	13





# Capítulo 1

## Introducción

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 [1]. 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.

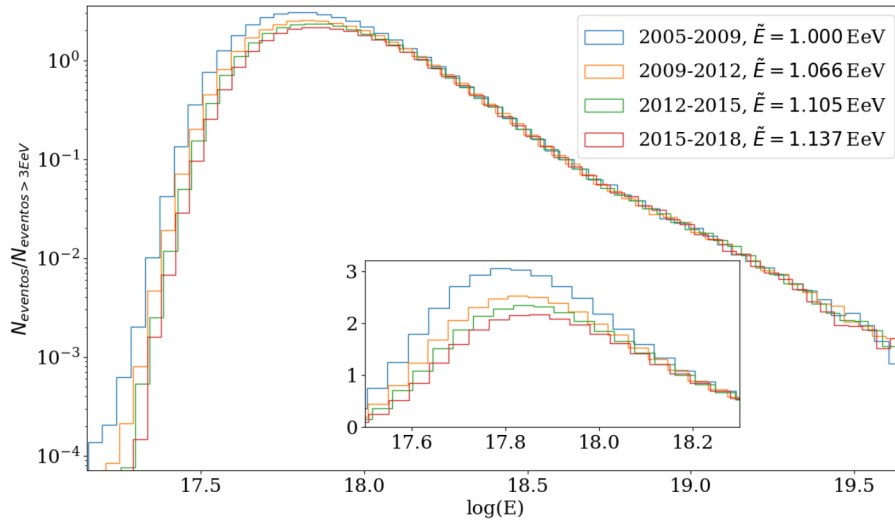
Por encima de una energía de  $10^{14}$  eV, los RCs que llegan a la atmósfera pueden interactuar con las moléculas de la misma, y así producir cascadas de partículas secundarias. Dependiendo de la energía del primario, es decir el RC que generó la lluvia, estas partículas pueden ser medidas usando detectores 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 1.2 m de alto. En la parte superior del tanque están instalados 3 foto-multiplicadores 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.

## 1.1. 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.1.1, 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 1.1:** Histograma de eventos 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  $\theta_{max} < 60^\circ$  o por encima de 4 EeV y  $\theta_{max} < 80^\circ$ , 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 [2].

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 [3]. 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 [3]. Con esta mejora, la eficiencia completa se alcanza a partir de una energía mayor a 1 EeV. 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.

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 6975194 eventos sin clasificar, es decir todos los eventos registrados por el observatorio sin discriminar por energía. En

Aca seria bueno incluir una figura de la eficiencia, te adjunto una GAP, de la que podrías sacar la fig 6, o sino la 7d, agregando los labels de la 7b

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.

## 1.2. 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 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*.

### 1.2.1. 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.

## 1.3. 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 en el periodo 2005-2018 por el arreglo principal. De esta manera, se extendió los periodos estudiados anteriormente en los siguientes trabajos [4], [5] y [6].

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 [6] 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 [6], 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 [6], 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.

# Capítulo 2

## Métodos

para obtener

La información sobre el origen de los RCs es una herramienta importante en el estudio de la distribución de las direcciones de arribo de los eventos. Las irregularidades sobre el flujo casi isotrópico de los RCs, en un rango de energía, pueden deberse a zonas del espacio donde se producen más RCs que en otras, estas irregularidades se conocen como anisotropías.

El análisis de anisotropías a grandes escalas angulares suele ser hecho sobre las irregularidades de la distribución de eventos en ascensión recta  $\alpha$ , ya que el arreglo principal tiene una exposición direccional en función de esta coordenada casi constante [7].

### 2.1. Cálculo de los coeficientes de Fourier para el análisis de anisotropía en ascensión recta

Las anisotropías son variaciones pequeñas por lo que eliminar todo factor espurio en el análisis es importante. Para obtener la amplitud de la misma en ascensión recta, se estudia la frecuencia sidérea ( $f_{sid} = 366.25$  ciclos/año) [2]. Los errores sistemáticos debido a la modulación de eventos por el clima u otros errores propios de la adquisición de datos, aparecen en la frecuencia solar ( $f_{sid} = 365.25$  ciclos/año), por lo que se debe tener en consideración el análisis de esta frecuencia. La frecuencia anti-sidérea ( $f_a = 364.25$  ciclos/año) es una frecuencia que puede indicar efectos sistemáticos en la amplitud de la anisotropía en la frecuencia sidérea [8]. La mezcla entre modulaciones diarias y anuales induce bandas laterales ubicadas a  $\pm 1$  ciclo/año con respecto a la solar [2]. Por estos motivos se toman estas frecuencias como referencia.

#### 2.1.1. Variaciones relativas de los hexágonos

Para corregir las variaciones de la exposición del observatorio, podemos definir un peso  $w_i$  por cada evento  $i$ , que corrige la variación  $\Delta N_{cell}(\alpha^0)$  en función de la ascensión recta del cenit del observatorio  $\alpha^0$  durante el rango de tiempo estudiado. Estas variaciones pueden deberse al crecimiento del arreglo a través de los años, por caídas en la comunicación del observatorio con los SDs u otros motivos.

El factor  $\Delta N_{cell}(\alpha^0)$  tiene en cuenta que la exposición direccional del observatorio no es uniforme en tiempo sidéreo. Se obtiene sumando el número de celdas durante el periodo de medición, en cada segmento de  $\alpha^0$  y luego se normaliza con el valor medio de los segmentos.

Para calcular estos pesos  $w_i$ , se sigue el algoritmo presentado a continuación:

1. Se establecen una frecuencia  $f$  y un rango de tiempo a estudiar. Por ejemplo, se desea estudiar la frecuencia solar entre el 1 de Enero del 2014 a las 12:00:00 GMT y el 1 de Enero del 2020 a

las 12:00:00 GMT.

2. Cada dato del registro de hexágonos, tomado en un momento  $t$  durante el rango seleccionado, se clasifica según la cantidad de horas desde un momento de referencia  $t_0$ . Esta referencia  $t_0$  se tomará como el 1 de Enero del 2005 a las 00:00:00 GMT, o 21 hs del 31 de Diciembre del 2004, según la hora local de Malargüe.

3. Podemos asociar una coordenada angular  $h$  a  $t$  y  $f$  utilizando la siguiente expresión:

$$h = (t - t_0) \times \frac{360^\circ}{24\text{hs}} \times \frac{f}{f_{\text{Solar}}} + h_0 \quad (2.1)$$

El factor  $f/f_{\text{Solar}}$  sirve para hacer un cambio de escala temporal entre los periodos de distintas frecuencias. Se usa como referencia la  $f_{\text{Solar}}$  dado que las horas (solares) se basan en esta frecuencia, y el valor de  $h_0 = 31.4971^\circ$  representa la ascensión recta del cenit del observatorio en el momento utilizado como referencia.

4. Para simplificar el cálculo del peso de los hexágonos, se divide los  $360^\circ$  de la ascensión recta en  $L$  segmentos de  $360/L^\circ$  cada uno. Para clasificar un dato se toma el valor  $h$  y se calcula

$$h' = h \bmod 360 \quad (2.2)$$

donde la función *mod* representa la función módulo que devuelve un número real positivo. Con el valor de  $h'$  del dato, se asigna el mismo al segmento  $k$  que le corresponde, mediante la siguiente expresión

$$k = \left\lceil \frac{h'}{360} \times L \right\rceil \quad (2.3)$$

donde  $\lceil a \rceil$  representa la función techo <sup>1</sup>. Por ejemplo, si optamos por  $L = 24$  y un dato en particular resulta con  $h = 395^\circ$ , esto implica que  $h' = 35^\circ$  y que  $k = \lceil 2.333 \rceil = 3$ , por lo tanto, este registro corresponde al segmento en la 3ª posición.

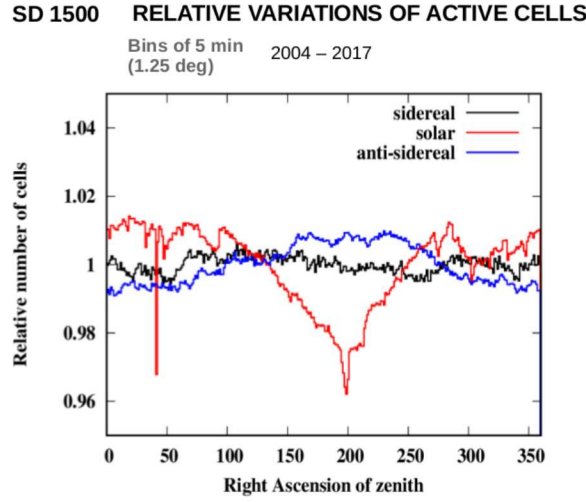
5. Una vez clasificados todos los datos del registro de hexágonos, se calcula la suma  $N_{\text{hex},j}$  de los datos que cayeron un segmento  $j$  dado. Para definir la variación relativa de hexágonos  $\Delta N_{\text{cell},k}$  de un segmento  $k$  en particular, necesitamos la media de hexágonos por segmento  $\langle N \rangle$  para normalizar las variaciones.

$$\langle N \rangle = \sum_{i=1}^L \frac{N_{\text{cell},i}}{L} \quad \Delta N_{\text{cell},k} = \frac{N_{\text{cell},k}}{\langle N \rangle} \quad (2.4)$$

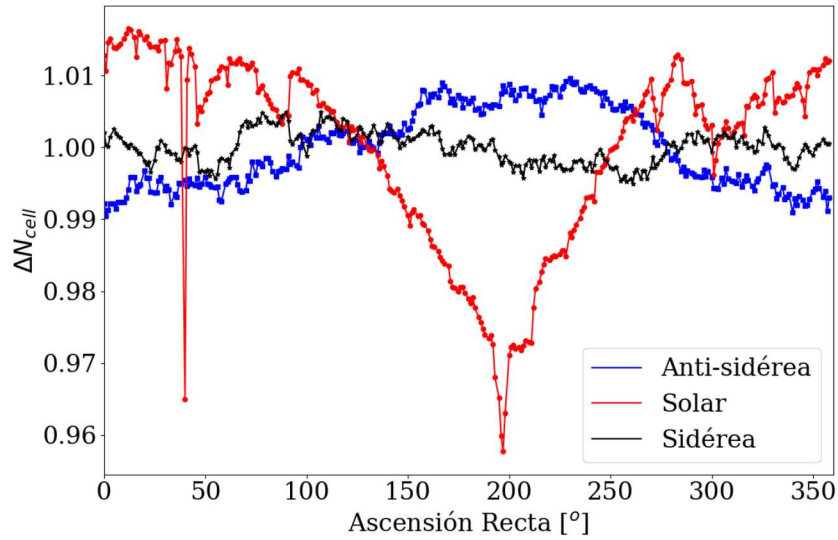
En la Fig.2.1 se muestran las variaciones relativas de los hexágonos en función de la ascensión recta del cenit del observatorio para las frecuencias mencionadas. Este análisis fue realizado en el marco del trabajo [9] con eventos del periodo 2004-2017.

En la Fig.2.2 se observan los valores obtenidos de  $\Delta N_{\text{cell},k}$  con el código escrito para este trabajo, en función de la ascensión recta del cenit para  $L = 288$  segmentos. Se analizó el conjunto de datos utilizado para obtener los resultados la Fig.2.1, con el fin de validar dicho código. Los datos se analizaron desde el 1 de Enero del 2004 a las 00:00:00 GMT hasta el 1 de Enero del 2017 a las 00:00:00 GMT. Se observa que estos los resultados obtenidos son compatibles con la Fig.2.1

<sup>1</sup>La función techo da como resultado el número entero más próximo por exceso



**Figura 2.1:** Valores de  $\Delta N_{cell,k}$  en el rango 2004-2017 para distintas frecuencias obtenidas en el trabajo [9].



**Figura 2.2:** Valores de  $\Delta N_{cell,k}$  en el rango 2004-2017 para distintas frecuencias utilizando el código escrito en este trabajo.

Para una representación fiel entre los registros de los hexágonos y los pesos de los eventos, se optó por clasificar los datos de los hexágonos en 288 segmentos, donde cada segmento tiene un ancho de  $1.25^\circ$ . Esto es conveniente ya que la actualización del registro de hexágonos se realiza una vez cada 5 min como se menciona en la sección 1.2.1. Esta tasa de actualización es equivalente a decir que la adquisición se realiza cada vez que el cenit del observatorio barre  $1.25^\circ$  en ascensión recta sobre la esfera celeste.

### 2.1.2. Cálculo de Rayleigh en ascensión recta para una frecuencia dada

Un procedimiento para estudiar anisotropías en la direcciones de arribos de los RCs es realizar un análisis de Fourier en ascensión recta  $\alpha$ . La distribución en ascensión recta  $\alpha$  del flujo de RCs  $I(\alpha)$  que llega al arreglo principal puede caracterizarse por las amplitudes  $r_k$  y fases  $\phi_k$  de su expansión en serie de Fourier al  $k$ -ésimo orden.

$$I(\alpha) = I_0 \left( 1 + \sum_{k=1}^{\infty} r_k \cos[k(\alpha - \phi_k)] \right) = I_0 \left( 1 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k\alpha + b_k \sin k\alpha \right) \quad (2.5)$$

donde  $a_k = r_k \cos k\phi_k$  y  $b_k = r_k \sin k\phi_k$ , y  $I_0$  es el flujo medio. La distribución  $I(\alpha)$  puede obtenerse a partir de la distribución de direcciones de arribo de los eventos observados. En este trabajo, suponiendo que existieron  $N$  eventos en el rango analizado, se considera que los mismos tienen una distribución en ascensión recta del tipo  $dN/d\alpha = \sum_{i=1}^N \delta(\alpha - \alpha_i)$  [2].

Como se mencionó anteriormente, los análisis en ascensión recta están asociados a la frecuencia sidérea. Para realizar el análisis de los eventos en cualquier frecuencia arbitraria, es necesario modificar  $\alpha$  por  $\tilde{\alpha}$ . Esta nueva variable tiene la forma como se utiliza en el trabajo [2]:

$$\tilde{\alpha} = 2\pi f_x t_i + \alpha_i - \alpha_i^0(t_i) \quad (2.6)$$

donde  $f_x$  es el frecuencia arbitraria a estudiar,  $t_i$  es el momento en que ocurrió el evento y  $\alpha_i^0(t_i)$  es la ascensión recta del cenit del observatorio en el momento del evento. Si la frecuencia a analizar es la sidérea, el análisis con  $\alpha$  y  $\tilde{\alpha}$  arrojan los mismos parámetros  $r_k$  y  $\phi_k$ .

Clasificando a los eventos mencionados en la sección 3.1 según el valor de la ascensión recta y considerando que todos los eventos tienen un peso uniforme de  $w_i = 1$ , se dicen que los eventos fueron analizados *sin pesos*, donde no consideramos la corrección de la exposición. En caso contrario, se habla de análisis *con pesos* de los hexágonos y estos pesos se calculan como se menciona en la sección anterior.

Para realizar el análisis de frecuencias de los eventos, en el  $k$ -ésimo orden en la expansión de Fourier, se siguen los siguientes pasos.

1. Fijando un rango de tiempo y un rango de energía en el cual se desea estudiar la anisotropía, se establece una frecuencia en particular  $f$  a analizar. Siguiendo el ejemplo de la sección anterior, se analiza la frecuencia solar entre el 1 de Enero del 2014 a las 12:00:00 GMT y 2019 hasta el 1 de Enero del 2020 a las 12:00:00 GMT.
2. Con los eventos ya filtrados según el criterio de la sección 1.2, asigno cada evento  $i$  un valor  $h_i$ , definida en la Ec.2.1
3. En caso de considerar los pesos de los hexágonos, para asignar el peso correspondiente al evento, se asocia a un segmento  $k$ , calculado en la sección 2.1.1, mediante el valor de  $h'_i$  definido en la Ec. 2.2. Luego, el peso asignado  $w_i$  al evento  $i$  es:  $w_i = (\Delta N_{cell,k})^{-1}$ , caso contrario, se toman que todos los eventos tiene  $w_i = 1$ .
4. Para el análisis en frecuencias, a partir del valor de  $h_i$  se asigna el ángulo  $\tilde{\alpha}_i$  definida en la Ec.2.6. La implementación en el código es de la siguiente manera:

$$\tilde{\alpha}_i = 2\pi \frac{h_i}{24} + \alpha_i - \alpha_i^0 \quad (2.7)$$

donde  $\alpha_i$  representa la ascensión recta del evento y  $\alpha_i^0$  la ascensión recta en el cenit del observatorio en el momento del evento. Cabe resaltar que la información de la frecuencia que se está estudiando se encuentra en el valor de  $h$ . Si la frecuencia a estudiar fuera la sidérea, el término  $2\pi \frac{h}{24}$  seguiría el cenit del observatorio, por lo que este término sería equivalente a  $\alpha_i^0$ , por lo tanto en esta frecuencia  $\tilde{\alpha}_i = \alpha_i$  como es de esperarse.

5. Para calcular los coeficientes de Fourier del  $k$ -ésimo armónico  $a_k$  y  $b_k$ , se siguen los siguiente pasos:



a) Por cada evento  $i$  se calculan los siguientes valores:

$$a'_{ik} = w_i \cos k\tilde{\alpha}_i \quad b'_{ik} = w_i \sin k\tilde{\alpha}_i \quad (2.8)$$

b) Una vez que se obtuvieron los valores de  $a'_{ik}$  y  $b'_{ik}$  para todos los eventos en el rango de tiempo estudiado, se calculan los coeficientes definidos en el trabajo [10] mediante:

$$\mathcal{N} = \sum_i^{\text{Eventos}} w_i \quad a_k = \frac{2}{\mathcal{N}} \sum_i^{\text{Eventos}} a'_{ik} \quad b_k = \frac{2}{\mathcal{N}} \sum_i^{\text{Eventos}} b'_{ik} \quad (2.9)$$

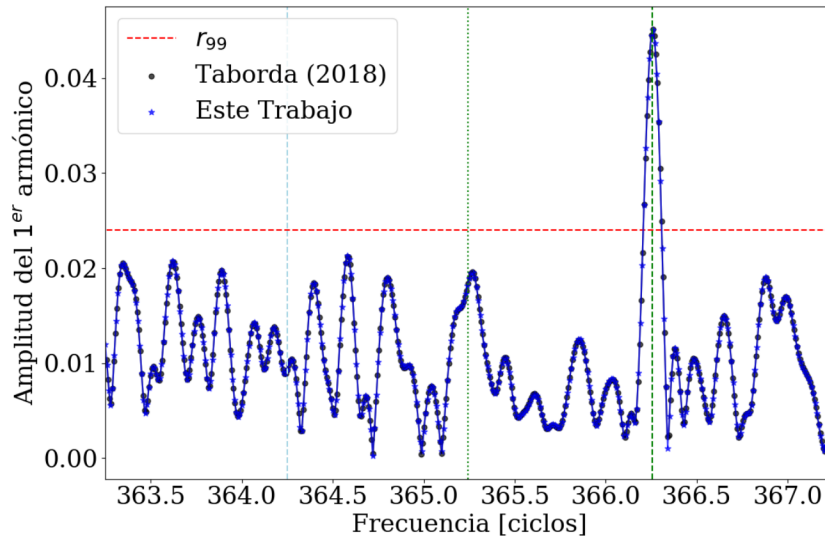
6. Con los coeficientes es posible calcular la amplitud de la frecuencia estudiada  $\tilde{r}$  y la fase  $\phi$ . Otros parámetros calculados para el análisis son la probabilidad  $P(\tilde{r})$  y  $r_{99}$ .

$$\tilde{r}_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad \phi_k = \frac{1}{k} \arctan \frac{a_k}{b_k} \quad (2.10)$$

$$P(\tilde{r}_k) = \exp(-\mathcal{N} \frac{\tilde{r}_k^2}{4}) \quad r_{99} = \sqrt{\frac{-4 \log(0.01)}{\mathcal{N}}} \quad (2.11)$$

Cabe resaltar que el  $r_{99}$  depende solamente de los pesos de los eventos que se está estudiando. La interpretación de este valor es cual es la probabilidad de tener una amplitud mayor como una fluctuación de una distribución isotrópica sea del 1 %

Una forma de validar el código para el análisis de anisotropía es comparar los resultados del código con los obtenidos en otros trabajos [2]. En la Fig.2.3 se muestra el análisis hecho sobre el mismo conjunto de eventos. Estos eventos fueron adquiridos con el disparo estándar desde el 1 de Enero del 2004 a las 00:00:00 GMT hasta el 1 de Enero del 2017 a las 00:00:00 GMT. Se consideraron los eventos por encima de 8 EeV que además cumplan las condiciones dadas en la sección 1.2. En esta figura que los resultados obtenidos en [2] y con el código utilizado por este trabajo son indistinguibles.



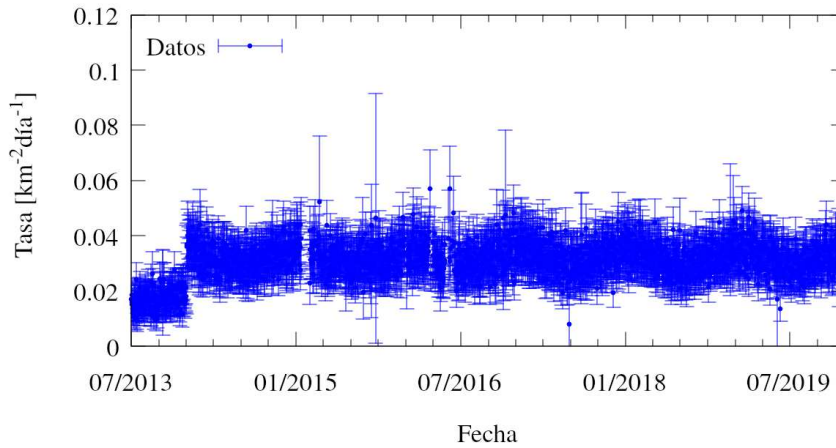
**Figura 2.3:** Comparación entre los análisis de anisotropía hechos para el mismo conjunto de datos, con el código de [2] y con el código escrito para este trabajo.

## Capítulo 3

# Dipolo en el rango 1 EeV - 2 EeV

### 3.1. Características del conjunto de datos

Además de los filtros aplicados mencionados en la sección 1.2, se aplican filtros adicionales sobre la energía y el rango de tiempo. Para estudiar los eventos en esta sección, consideramos los eventos entre 1 EeV y 2 EeV de energía y que ocurrieron entre las 12:00:00 GMT del 1 de enero de 2014 y las 12:00:00 GMT del 1 de enero de 2020. Se centró en este rango de tiempo porque entre hasta fines del año 2013, la tasa de eventos estuvo por debajo de la media de los años siguientes como se muestra en la Fig. 3.1. Además que el registro de eventos más reciente al que se tuvo para hacer este trabajo termina el 1 de Enero del 2020 a las 11:59:43 GMT, además de para estudiar una cantidad entera de años, se optó por considerar los eventos desde el 1 de Enero del 2014 a las 12:00:00 GMT.



**Figura 3.1:** Tasa de eventos del conjunto más reciente de eventos con todos los disparos. Se observa un tasa baja en la segunda mitad del 2013.

Un resumen de todos los filtros aplicados se encuentra a continuación

1. Son eventos obtenidos mediante todos los disparos.

2. Energía entre [1 EeV , 2 EeV)

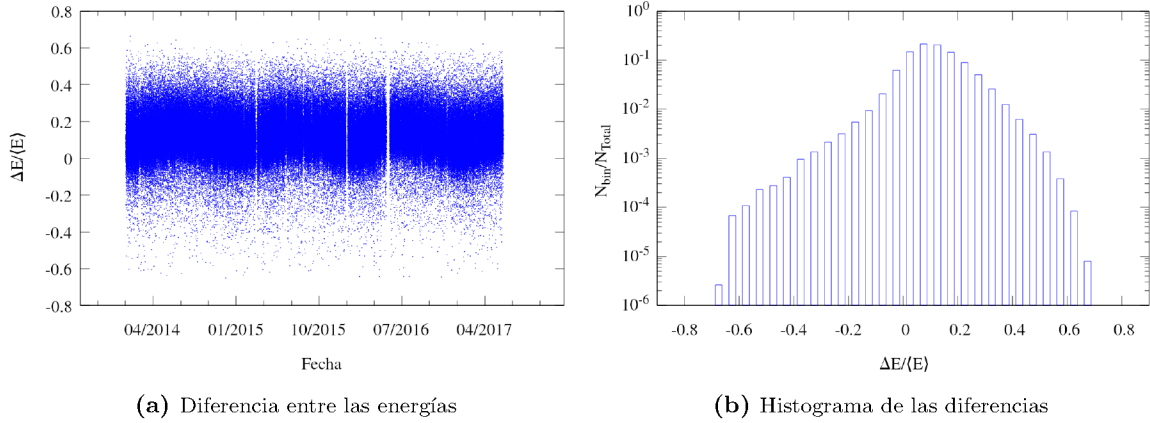
3. Rango de tiempo:

- Inicial: Jueves, 1 de Enero de 2014 12:00:00 GMT o 1388577600 UTC
- Final: Jueves, 1 de Enero de 2020 12:00:00 GMT o 1577880000 UTC

Aplicando estos filtros, se tienen 1 081 844 eventos para estudiar en este rango de energía.

Se debe tener cuenta que el archivo de evento para todos los disparos tiene diferencias con el conjunto de eventos del disparo estándar. Porque el primero es entre los años 2013 y 2019 y el segundo se adquieren usando el disparo estándar entre los años 2004 y 2018. Algo a considerar es que la colaboración cambió el algoritmo de reconstrucción de eventos en el 2019, con respecto a la versión del 2017.

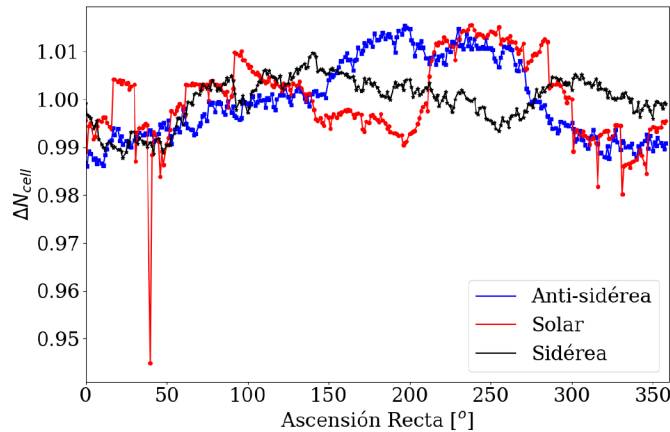
En las Figs. 3.2a y 3.2b se muestra la diferencia entre las energías de la reconstrucción del año 2017  $E_{2017}$  de archivo de todos los disparos, que sigue sin ser corregida por los parámetros del clima, y la energía de último conjunto de datos  $E_{2019}$ , que ya fue corregida la modulación del clima y reconstruida por el nuevo algoritmo. Las variables utilizadas en las figuras son  $\Delta E = E_{2019} - E_{2017}$  normalizada por la energía media  $\langle E \rangle = (E_{2019} + E_{2017})/2$  para energías entre 1 EeV y 2 EeV de los dos conjuntos de datos. Se consideran eventos coincidentes entre las reconstrucciones del año 2017 y 2019. Puede apreciarse que la diferencia no esta centrada 0 y aparenta tener una modulación del clima cuya una amplitud pequeña respecto al corrimiento con respecto al 0. Por lo tanto la diferencia entre ambos conjuntos se debe a una reconstrucción distinta de los eventos.



**Figura 3.2:** Diferencia entre las energías de entre la reconstrucción del 2017 y del 2019

### 3.1.1. Pesos de los eventos para frecuencias de referencia

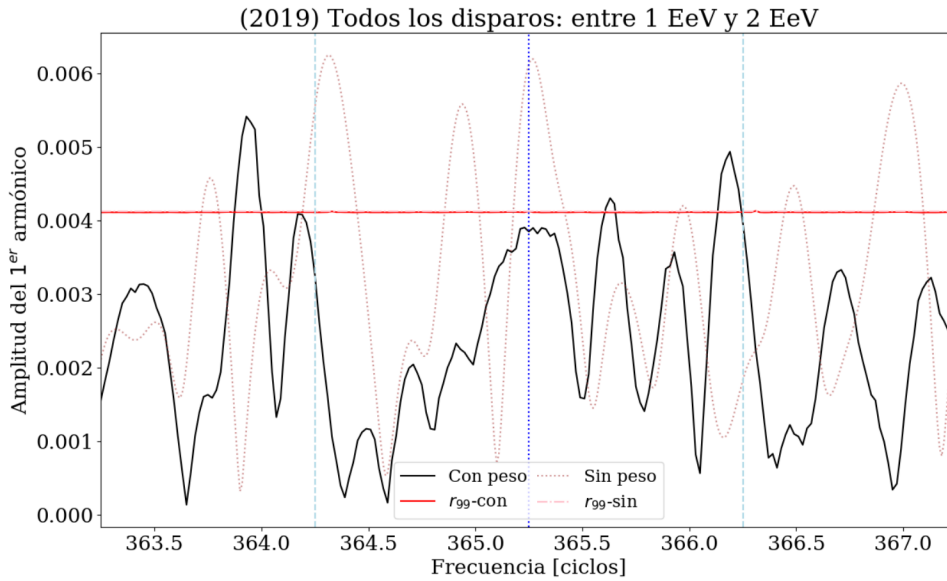
En la Fig. 3.3 se muestran los valores de  $\Delta N_{cell,k}(\alpha^0)$  en función de la ascensión recta del cenit del observatorio, en el rango mencionado en la sección anterior 3.1, para frecuencias de referencia.



**Figura 3.3:** Variaciones de los hexágonos en función de la ascensión recta del observatorio para frecuencias características en rango mencionado.

### 3.2. Análisis de anisotropías en ascensión recta para el primer armónico

En la Fig.3.4 se muestra en barrido de frecuencias para la amplitud del primer armónico de Fourier. Se marcan con líneas verticales las frecuencias de referencia mencionadas anteriormente. Se observa el barrido sin considerar las correcciones por las variaciones de los hexágonos con una línea discontinua. La amplitud en la frecuencia solar sin la corrección de los pesos es importante. Un ejemplo de errores sistemáticos puede ser que en épocas invernales el acceso a los tanques se dificulta y ponerlos en funcionamiento nuevamente tras una tormenta o para un cambio de baterías puede llevar más tiempo que durante verano.



**Figura 3.4:** Anisotropía en función de la frecuencia para el rango de energía 1 EeV - 2 EeV. Se comparan los análisis sin los pesos y con los pesos de los hexágonos entre en 1 de Enero del 2014 y el 1 de Enero del 2020

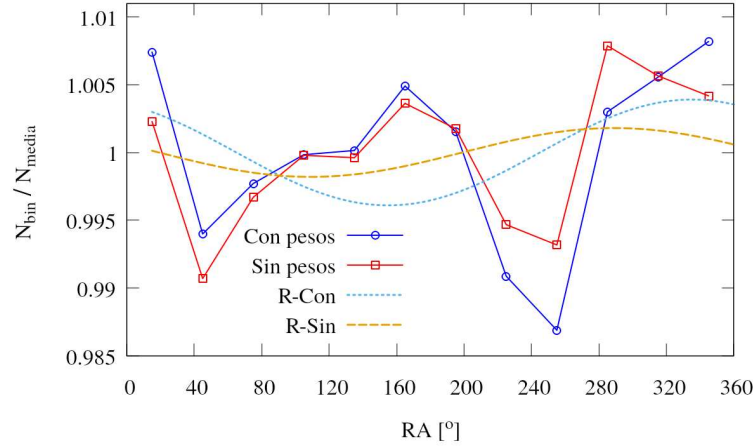
Cuando se consideran los pesos, esta amplitud disminuye y pasa a estar por debajo del umbral de  $\tilde{r}_{99}$ , y aparecen dos amplitudes por encima de este umbral: un pico es la frecuencia sidérea, donde buscamos las anisotropías en ascensión recta, y otro pico es cerca de la frecuencia anti-sidérea, que indica que existen componentes de errores sistemáticos sobre los datos que deben ser considerados. Por ejemplo, la corrección de clima que se analiza en el trabajo de licenciatura se realiza sobre el disparo estándar, se podría calcular los parámetros del clima utilizando los eventos de todos los disparos y comprobar si esto disminuye la amplitud del primer armónico de la frecuencia cercana a la anti-sidérea.

En la Tabla 3.1 se resumen las amplitudes y fases obtenidas mediante el análisis a primer orden en Fourier. Se

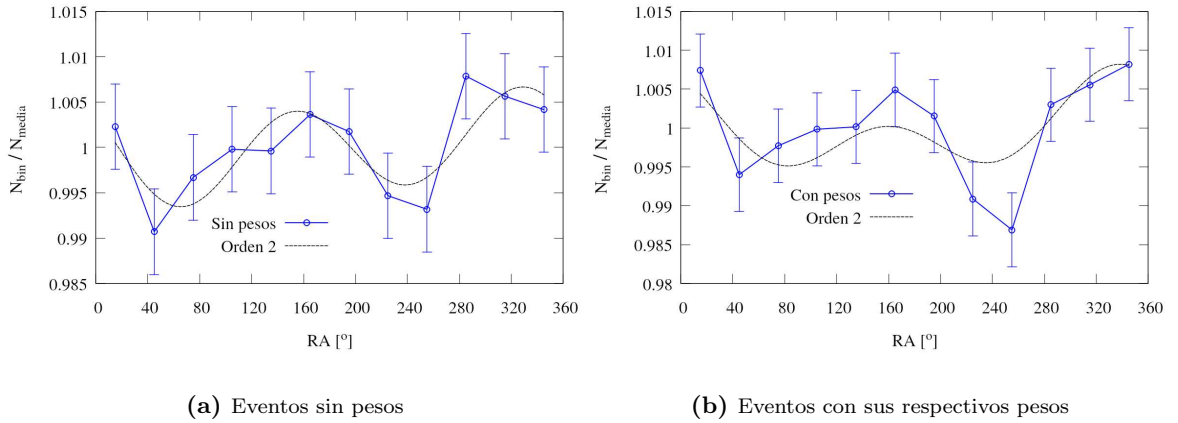
	Sin pesos		Con pesos	
Frecuencia:	Solar	Sidérea	Solar	Sidérea
Fase $\phi$ :	251	289	288	335
Amplitud $r$ :	0.0061	0.0018	0.0038	0.0039
$P(r)$ :	0.004 %	41 %	2 %	1 %

**Tabla 3.1:** Comparación de los parámetros de fase y amplitud para las frecuencias sidérea y solar, analizando sin pesos y con los pesos de los hexágonos con el análisis de Rayleigh entre en 1 de Enero del 2014 y el 1 de Enero del 2020

Las Fig. 3.5 se muestra la tasa de eventos normalizada con pesos y sin pesos para este rango de energía. Las líneas discontinuas representan los parámetros de la Tabla 3.1 para el primer armónico del análisis de Rayleigh de la frecuencia sidérea. Se observa que la modulación de los eventos con y sin pesos tiene características que la aproximación a primer orden no refleja. En las Fig. 3.6b se muestra la tasa de eventos con pesos y el ajuste hasta el segundo orden en Fourier, en el mismo se muestra que este orden refleja mejor las características de los datos. Los resultados del análisis de Rayleigh se muestran en la Tabla 3.2



**Figura 3.5:** Distribución de la cantidad relativa de eventos en función de la ascensión recta a primer orden, en el rango de energía 1 EeV - 2 EeV.



**Figura 3.6:** Distribución de la cantidad relativa de eventos en función de la ascensión recta a segundo orden en el rango de energía 1 EeV - 2 EeV entre en 1 de Enero del 2014 y el 1 de Enero del 2020.

	Sin Pesos	Con Pesos
Orden $k$ :	2	2
Fase $\phi_k$ :	332	339
Amplitud $r_k$ :	0.0053	0.0042
$P(r_k)$ :	0.03 %	1.0 %

**Tabla 3.2:** Parámetros obtenidos del ajuste a segundo orden con el análisis de Rayleigh.

### 3.2.1 Trabajo a futuro

#### La modulación del primer armónico de los eventos entre 1 y 2 EeV

para varias frecuencias

Los resultados obtenidos en este rango de energía tiene amplitudes por encima del umbral de  $r_{99}$ , por lo que no puede decirse nada concreto sobre la existencia del dipolo en ascensión recta.

Para confirmar o desmentir esto, durante el siguiente semestre trabajará en corregir la modulación del clima sobre los eventos, y verificar si el pico cercana a la frecuencia anti-sidérea que está por encima del umbral de  $r_{99}$  puede disminuir.

lo que es indicativo de la presencia de efectos espurios aun sin corregir en los datos, por lo que los resultados para las anisotropías en ascensión recta no son confiables.

Durante el próximo semestre se trabajará en tratar de mejorar la calidad de los datos, en primer lugar implementando una corrección de los efectos climáticos a partir del conjunto de datos con todos los disparos.

# Bibliografía

- [1] Linsley, J., Scarsi, L., Rossi, B. Extremely energetic cosmic-ray event. *Phys. Rev. Lett.*, **6** (9), 485, 1961.
- [2] Taborda, O. Estudios de anisotropías a grandes escalas angulares de los rayos cósmicos de alta energía detectados por el observatorio Pierre Auger. Tesis de Maestría, Instituto Balseiro, 7 2018.
- [3] Pierre Auger Collaboration. Plans for a proposal to upgrade the Pierre Auger Observatory. Pierre Auger Collaboration, 2013.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Aab, A., Abreu, P., Aglietta, M., Al Samarai, I., Albuquerque, I., Allekotte, I., *et al.* Observation of a large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays above  $8 \times 10^{18}$  eV. *Science*, **357** (6357), 1266–1270, 2017.
- [8] Farley, F., Storey, J. The sidereal correlation of extensive air showers. *Proceedings of the Physical Society. Section A*, **67** (11), 996, 1954.
- [9] Aab, A., Abreu, P., Aglietta, M., Albuquerque, I. F. M., Albury, J. M., *et al.*, I. A. Large-scale cosmic-ray anisotropies above 4 EeV measured by the pierre auger observatory. *The Astrophysical Journal*, **868** (1), 4, nov 2018. URL <https://doi.org/10.3847/2F1538-4357%2Faae689>.
- [10] Linsley, J. Fluctuation effects on directional data. *Phys. Rev. Lett.*, **34**, 1530–1533, Jun 1975. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.34.1530>.

