

# TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS FÍSICAS

## INFORME DE AVANCE

**Evelyn G. Coronel**  
Maestrando

**Dra. Silvia Mollerach**  
Director

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

19 de Junio de 2020

Partículas y Campos – Centro Atómico Bariloche

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



# Índice de contenidos

Índice de contenidos	ii
Índice de figuras	iv
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Acerca de la tesis de licenciatura . . . . .	1
1.2. Acerca del archivo con todos los disparos . . . . .	1
1.3. Acerca de los eventos . . . . .	2
<b>2. Métodos</b>	<b>3</b>
2.1. Cálculo de los coeficientes de Fourier para el análisis de anisotropía en ascensión recta	3
2.1.1. Variaciones relativas de los hexágonos . . . . .	3
2.1.2. Cálculo de Rayleigh para una frecuencia dada . . . . .	5
<b>3. Modulación del clima para todos los disparos (2014-2020)</b>	<b>7</b>
<b>4. Dipolo en el bin 1 EeV - 2 EeV</b>	<b>8</b>
4.1. Características del conjunto de datos . . . . .	8
4.2. Pesos de los eventos para frecuencias de referencia . . . . .	8
4.2.1. Gráficos de los ajustes . . . . .	9
4.2.2. Tabla comparando los ajustes: . . . . .	9
4.3. Gráfico de la anisotropía . . . . .	10
<b>Bibliografía</b>	<b>12</b>



# Índice de figuras

2.1. Valores de $\Delta N_{cell,k}$ en el rango 2004-2017 para distintas frecuencias obtenidas en el trabajo [5]. . . . .	4
2.2. Valores de $\Delta N_{cell,k}$ en el rango 2004-2017 para distintas frecuencias utilizando el código escrito en este trabajo. . . . .	5
2.3. Comparación entre los análisis de anisotropía hechos para el mismo conjunto de datos, con el código de [4] y con el código escrito para este trabajo. . . . .	6
4.1. Ajuste de los pesos de los eventos para varias frecuencias a primer orden en ascensión recta . . . . .	9
4.2. Anisotropía en función de la frecuencia, se comparan los análisis sin los pesos y con los pesos de los hexágonos . . . . .	10
4.3. Distribución de la cantidad relativa de eventos en función de la ascensión recta. . . . .	11



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Acerca de la tesis de licenciatura

En el trabajo de tesis de licenciatura se analizaron los efectos de las variaciones de los parámetros del clima sobre el desarrollo en la atmósfera de las lluvias atmosféricas. Se analizaron datos del arreglo de detectores espaciados 1500 m entre sí, conocido como *arreglo principal*, del Observatorio Pierre Auger en el periodo 2005-2018, extendiendo así los periodos de tiempo estudiados anteriormente en los siguientes trabajos [1], [2] y [3]. Se emuló los resultados de la corrección de la modulación del clima sobre el periodo 2005-2015 de la colaboración Pierre Auger [3], obteniéndose resultados compatibles. Se observó que posterior a la corrección, la modulación del clima se vio disminuida. Para eventos con energía mayor a 2 EeV, esta modulación es despreciable.

En el mismo trabajo, se estudió la modulación del clima mediante el valor del  $S_{38}$  sin la corrección propuesta por trabajos anteriores. Se observó que los parámetros del clima obtenidos de estos datos son compatibles con los utilizados en la reconstrucción oficial. Se realizó una corrección de los efectos atmosféricos a la energía con estos coeficientes, observándose que la modulación era despreciable para energías mayores a 2 EeV al igual que la reconstrucción oficial.

### 1.2. Acerca del archivo con todos los disparos

El análisis anterior fue realizado sobre los eventos medidos por el arreglo principal utilizando el disparo estándar. Este disparo tiene una eficiencia completa para eventos de energía mayor a 2,5 EeV. La eficiencia del SD varía con la energía del CR. Para el disparo estandar, los eventos con energía mayor a 3 EeV y  $\theta_{max} < 60^\circ$  o por encima de 4 EeV y  $\theta_{max} < 80^\circ$ , son detectados con una eficiencia del 100 %. Por lo que el análisis de anisotropías en el rango de energía entre 1 EeV - 2 EeV, requiere factores relacionados a la eficiencia función de la energía que se obteniendo de manera fenomenológica [4]. Para todos los disparos, la eficiencia completa de alcanza por encima de 1 EeV. Por lo tanto sin trabajamos con eventos donde la eficiencia es completa y sólo puede afectar el cambio de la exposición del observatorio, y no es necesario tener en cuenta en el peso la eficiencia.

Para superar esta dificultad, a partir del año 2013 se implementó otros protocolos de disparo en el arreglo principal, llamados Mops y ToTs. Con esta mejora, la eficiencia completa se alcanza para una energía mayor a 1 EeV. De esta manera se aumenta la cantidad de eventos a estudiar en el rango 1 EeV - 2 EeV y no son necesarios factores relacionados a la eficiencia. La desventaja es que el disparo estándar tiene una mayor cantidad de datos ya que se adquieren datos desde el año 2004 con ese protocolo.

### 1.3. Acerca de los eventos

Para poder prescindir de los factores de corrección a los datos de los eventos, se aplican cortes a los datos para asegurar la eficiencia completa de los detectores. Por eso se implementan límites en ángulo cenital, en la cantidad de vecinos al tanque de mayor señal, además de restringirse a los datos fueron medidos en condiciones normales, es decir cuando los sistemas de comunicación del Observatorio funciona sin inconvenientes.

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. Ángulo cenital  $\theta < 60^\circ$
2.  $ib = 1$  *Bad period flag*. Un valor de 1 indica un buen periodo en el cual los datos son recopilados sin inconvenientes.
3. Buena reconstrucción de la lluvia atmosférica asociada al evento
4. La cantidad de vecinos alrededor del tanque con mayor señal sea de 6 tanques.



# Capítulo 2

## Métodos

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

#### 2.1.1. Variaciones relativas de los hexágonos

Los pesos de los eventos son importantes para el cálculo de anisotropías, ya que las mismas son pequeñas y eliminar todo factor espúreo en el análisis es importante. Si consideramos la variación en el número de tanques activos del observatorio durante un rango de tiempo entre  $t_i$  y  $t_f$ , debido al crecimiento del arreglo, por caída en la comunicación o por otros motivos, esta variación modula el número de eventos en función del tiempo.

Para una representación fiel entre los registros de los hexágonos y los pesos de los eventos, se optó por utilizar 288 segmentos ya que si consideramos para 24 hrs del día, cada segmento tiene un ancho de 5 min. Esto es conveniente ya que la actualización tanto del clima como de los hexágonos se realiza una vez cada 5 min.

1. Se establecen una frecuencia a estudiar  $f$  y el rango de tiempo de análisis, por ejemplo la frecuencia solar  $f_{Solar} = 365,25$  ciclos en un año entre los años 2013 y 2019. Existe un registro del Observatorio de los hexágonos 6T5 que se actualiza cada 5 min. Cada dato tomado durante el rango seleccionado, se clasifica según la cantidad de horas  $t$  desde un momento de referencia  $t_0$ . Esta referencia  $t_0$  es el 1 de Enero del 2004 a las 00 : 00 : 00 GMT, o 21 hrs del 31 de Diciembre del 2003, según la hora local de Malargüe.

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

$$h = t \times \frac{60}{24} \times \frac{f}{f_{Solar}} + h_0 \quad (2.1)$$

El factor  $f/f_{Solar}$  sirve para hacer un escaleo de las horas entre diferentes frecuencias. Se usa como referencia la  $f_{Solar}$  dado que las horas (solares) se basan en esta frecuencia, y el valor de  $h_0 = 31,4971$  representa la ascensión recta del cenit en el momento utilizado como referencia.

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

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

Esto te da bien la fase para la frecuencia siderea. Para tener la fase bien en solar tendrias que usar  $h_0=21$  hs

donde la función *mod* representa la función módulo. Luego con el valor de  $h'$  se asigna al dato con el segmento  $k$  correspondiente.

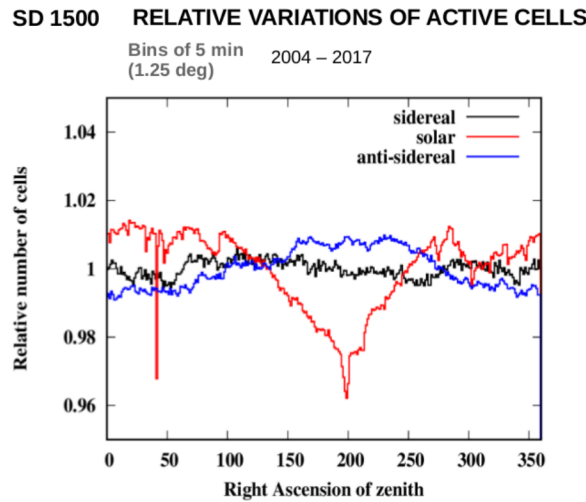
$$k = \left\lceil \frac{h'}{360} \times L \right\rceil \quad (2.3)$$

done  $[a]$  representa la función techo <sup>1</sup>. Por ejemplo, si optamos por  $L = 24$  y un registro en particular resulta con  $h = 395^\circ$ , esto implica que  $h' = 35$  **hr** y  $k = [2,3] = 3$ , por lo tanto, este registro corresponde al segmento en la 3ª posición. **grados**

4. Una vez clasificado todos los datos del registro de hexágonos, se calcula la suma  $N_{hex,j}$  de los registros de hexágonos que cayeron un segmento  $j$  dado. Para definir la variación relativa de hexágonos  $\Delta N_{cell,k}$  de un segmento  $k$  en particular, se necesita la media de hexágonos por segmento:

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

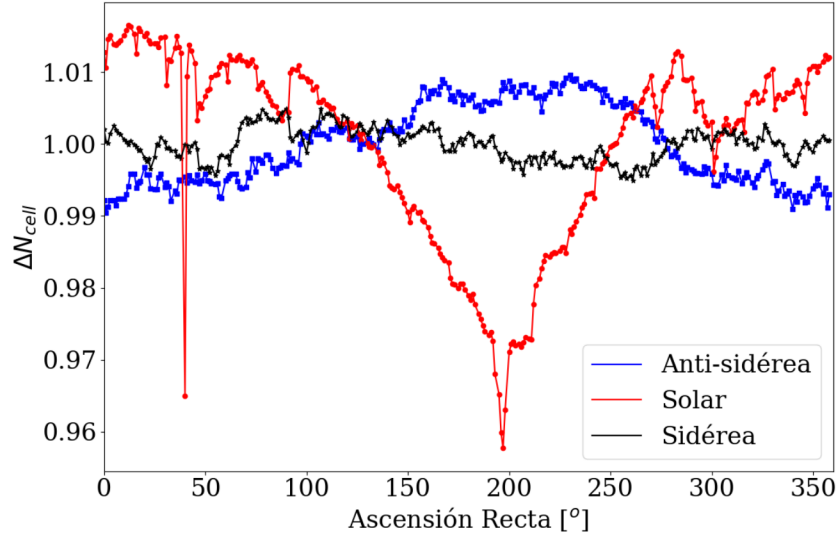
En la Fig.2.1 se muestran las variaciones relativas de los hexágonos en función de la ascensión recta del cenit del observatorio para las frecuencias sidérea, solar y antisidérea. Este análisis fue realizado en el marco del trabajo [5] en el periodo 2004-2017.



**Figura 2.1:** Valores de  $\Delta N_{cell,k}$  en el rango 2004-2017 para distintas frecuencias obtenidas en el trabajo [5].

En la Fig.2.2 se observa valores obtenidos de  $\Delta N_{cell,k}$  en función de la ascensión recta del cenit para  $L = 288$  segmentos con el programa escrito para este informe, utilizando el mismo conjunto de datos que el utilizado para obtener los resultados la Fig.2.1 desde el 1 de Enero del 2004 a las 00 : 00 : 00 hrs GMT hasta el 1 de Enero del 2017 a las 00 : 00 : 00 hrs 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 2.2:** Valores de  $\Delta N_{cell,k}$  en el rango 2004-2017 para distintas frecuencias utilizando el código escrito en este trabajo.

### 2.1.2. Cálculo de Rayleigh para una frecuencia dada

Clasificando a los eventos mencionados en la sección 4.1 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*, caso contrario, se habla de análisis *con pesos* de los hexágonos.

Para realizar el análisis con pesos de los hexágonos, 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.
2. Con los eventos ya filtrados según el criterio de la sección 1.3, asigno cada evento  $i$  un valor  $h_i$ , definida en la Ec.2.1
3. 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

$$w_i = (\Delta N_{cell,k})^{-1}$$

4. Para el análisis en frecuencias, a partir del valor de  $h_i$  se asigna un ángulo  $\tilde{\alpha}_i$  como:

$$\tilde{\alpha}_i = 2\pi \frac{h}{24} + \alpha_i - \alpha_{cenit,i} \quad (2.5)$$

donde  $\alpha_i$  representa la ascensión recta del evento y  $\alpha_{cenit,i}$  la ascensión recta en el cenit del observatorio en el momento del evento. A partir de este ángulo  $\tilde{\alpha}_i$  se realiza en análisis en frecuencias.

5. Para calcular los coeficientes de Fourier del primer armónico  $a$  y  $b$ , se siguen los siguiente pasos:

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

$$a'_i = w_i \cos \tilde{\alpha}_i \quad b'_i = w_i \sin \tilde{\alpha}_i \quad (2.6)$$

- b) Una vez que se obtuvieron los valores de  $a'_i$  y  $b'_i$  para todos los eventos en el rango de tiempo estudiado, se calculan los coeficientes definidos en el trabajo [6] mediante:

$$\mathcal{N} = \sum_i^{\text{Eventos}} w_i \quad (2.7)$$

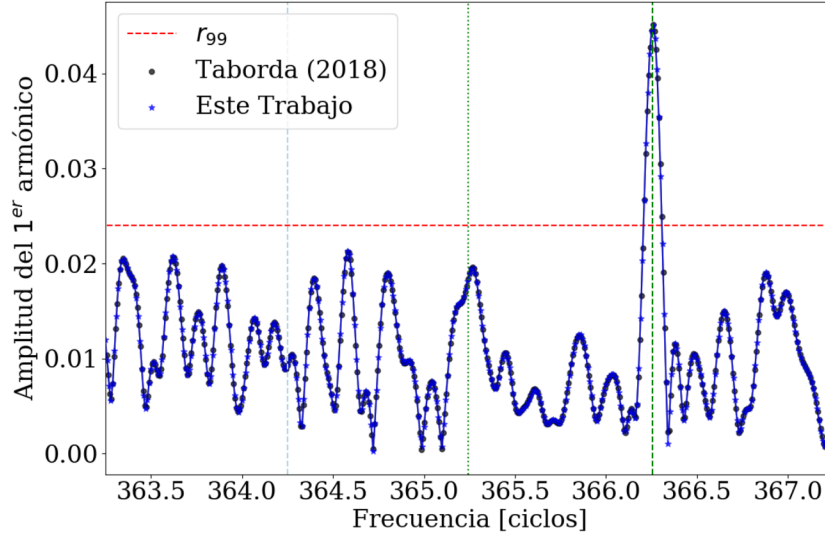
$$a = \frac{2}{\mathcal{N}} \sum_i^{\text{Eventos}} a'_i \quad b = \frac{2}{\mathcal{N}} \sum_i^{\text{Eventos}} b'_i \quad (2.8)$$

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  $r_{99}$ . Cabe resaltar que el P99 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., y el valor de amplitud  $r_{99}$  para que dicha probabilidad sea del 1 %.

$$\tilde{r} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \phi = \arctan \frac{a}{b} \quad (2.9)$$

$$P(\tilde{r}) = \exp(-\mathcal{N} \frac{\tilde{r}^2}{4}) \quad r_{99} = \sqrt{\frac{-4 \log(0,01)}{\mathcal{N}}} \quad (2.10)$$

Una forma de validar el código para el análisis de anisotropía es comparar los resultados del código con los obtenidos en otros trabajos [4]. 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 1.3. En esta figura que los resultados obtenidos en [4] 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 [4] y con el código escrito para este trabajo.

## Capítulo 3

# Modulación del clima para todos los disparos (2014-2020)

## Capítulo 4

# Dipolo en el bin 1 EeV - 2 EeV

### 4.1. Características del conjunto de datos

Además de los filtros aplicados mencionados en la sección 1.3, 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 2004 y las 12 : 00 : 00 GMT del 1 de enero de 2020. Se eligió ese rango de tiempo, ya 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 2013 a las 12 : 00 : 00 GMT.

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:1388577600 (Jueves, 1 de Enero de 2014 12:00:00 GMT)
  - Final: 1577880000 (Jueves, 1 de Enero de 2020 12:00:00 GMT)
4. Ángulo cenital  $\theta < 60^\circ$
5. 6T5
6.  $ib = 1$  Bad period flag. Un valor de 1 indica un buen periodo

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

**estaría bien empezar haciendo la figura de hexagonos equivalente a la 2.2**

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

Se toman las frecuencia anti-sidérea ( $f_a = 364,25$  ciclos), solar ( $f_{Solar} = 365,25$  ciclos) y sidérea ( $f_{sid} = 366,25$  ciclos) como referencia para obtener una aproximación a primer orden del análisis en frecuencias. A cada una de estas frecuencias, se ajusta una función del tipo  $f(x) = a \cdot \cos(\alpha - \phi) + 1$ , con el se busca aproximar la amplitud  $a$  y el desfase  $\phi$  de las curvas de los pesos en función de la ascensión recta  $\alpha$ . Los ajustes se observan en las Figs. 4.1a, 4.1b y 4.1c.

4.2.1. Gráficos de los ajustes

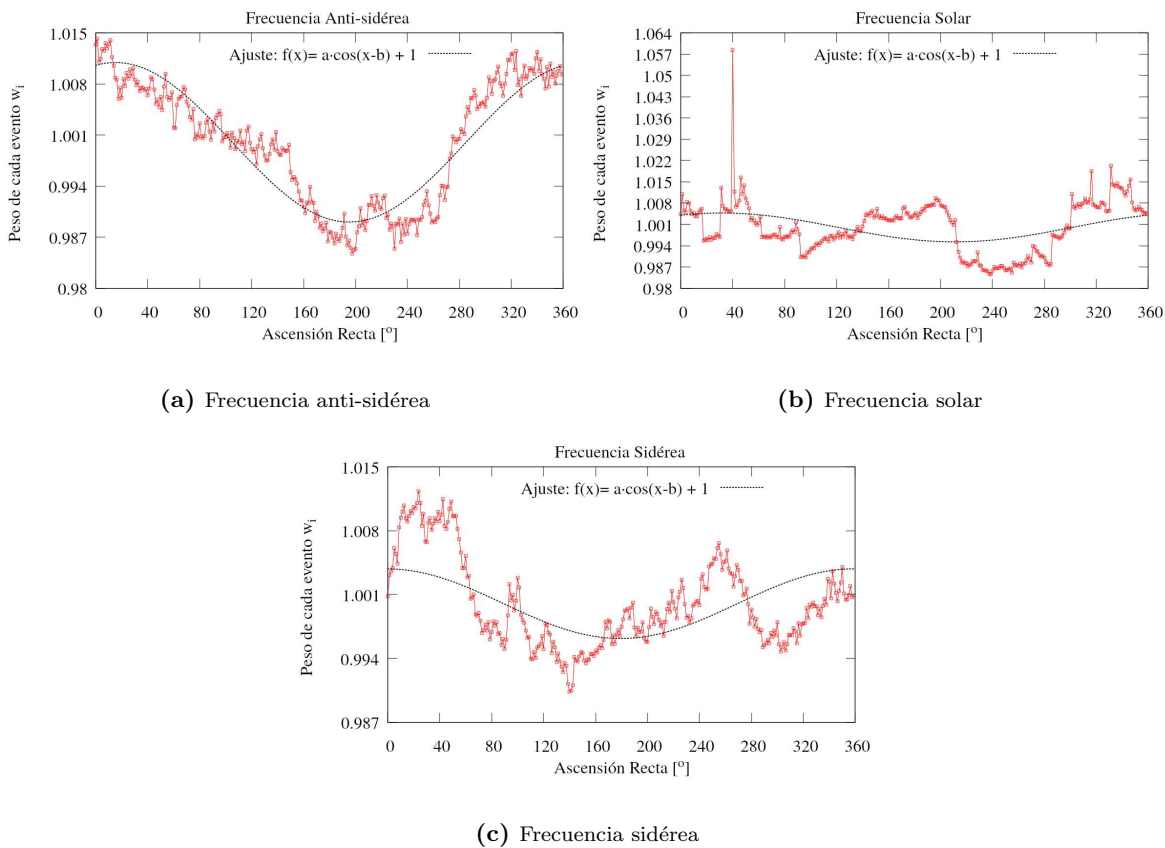


Figura 4.1: Ajuste de los pesos de los eventos para varias frecuencias a primer orden en ascensión recta

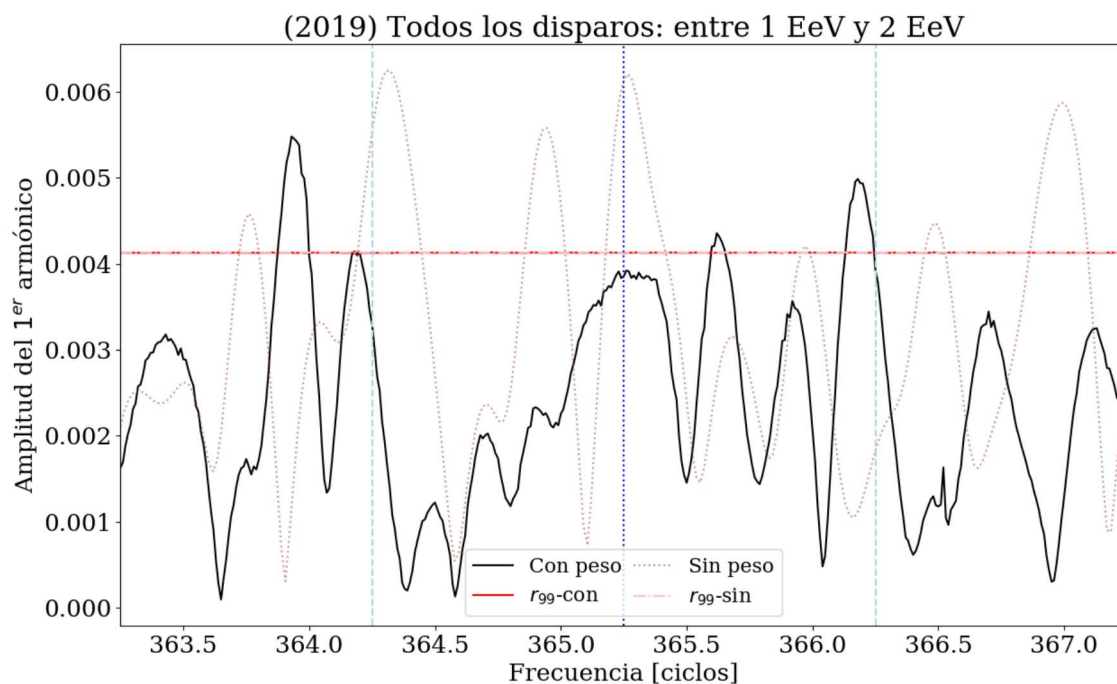
4.2.2. Tabla comparando los ajustes:

	Anti-sidérea	Solar	Sidérea
Fase $\phi$	$0,0109 \pm 0,0003$	$0,0038 \pm 0,0003$	$0,0047 \pm 0,0007$
Amplitud $a$	$15 \pm 1$	$360 \pm 5$	$31 \pm 8$

Tabla 4.1: Parámetros obtenidos del ajuste a primer orden en  $\alpha$  sobre los pesos.

### 4.3. Gráfico de la anisotropía

Análisis de anisotropías en ascensión recta



**Figura 4.2:** Anisotropía en función de la frecuencia, se comparan los análisis sin los pesos y con los pesos de los hexágonos

	Solar (sin peso)	Solar (con peso)	Sidérea (sin peso)	Sidérea (con peso)
Fase $\phi$	251	288	289	335
Amplitud $r$	0.0061	0.0038	0.0041	0.0039

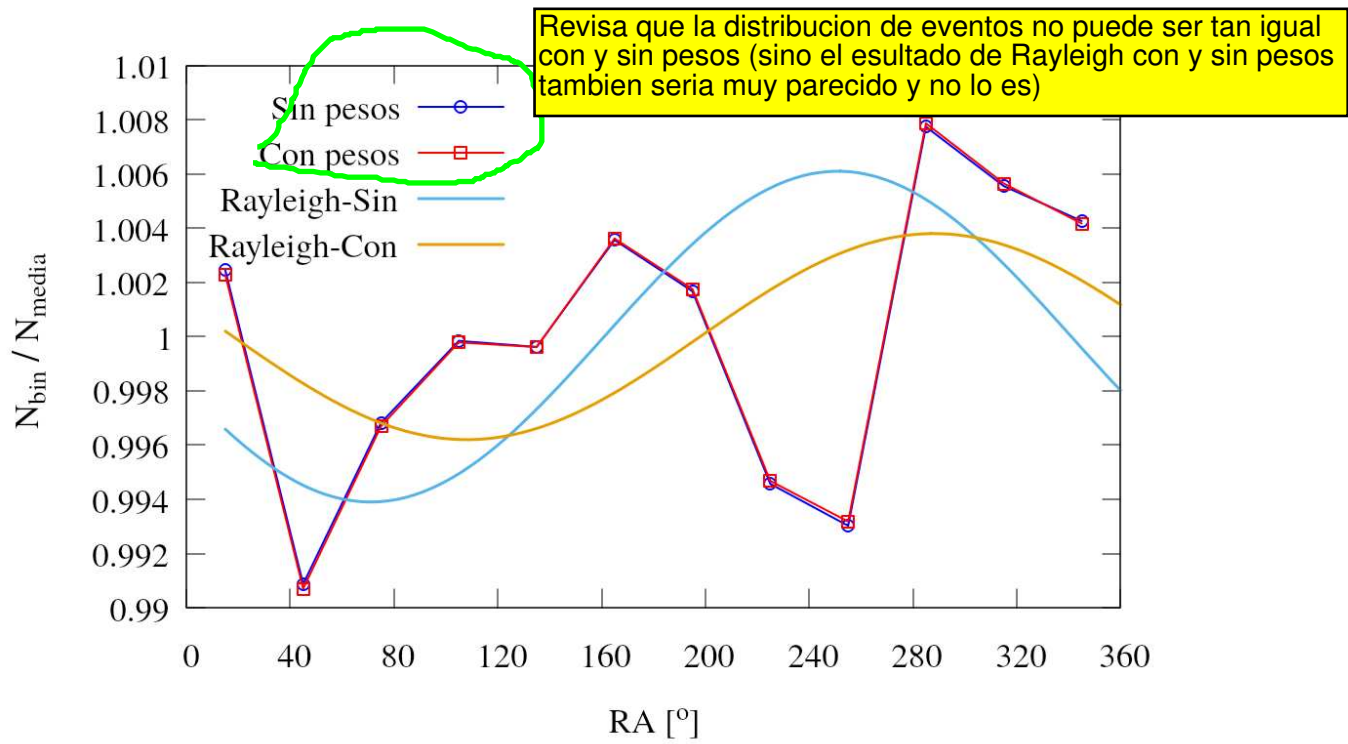
**Tabla 4.2:** Comparación de los parámetros de fase y amplitud de las frecuencias sidérea y solar, analizando sin pesos y con los pesos de los hexágonos con el análisis de Rayle

revisar

### Bineado de eventos

Considerando que estamos trabajando con la frecuencia solar al hacer el análisis con pesos, se obtiene la siguiente distribución de eventos en función de su ascensión recta.





**Figura 4.3:** Distribución de la cantidad relativa de eventos en función de la ascensión recta.



# Bibliografía

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Taborda, O. Estudios de anisotropías a grandes escalas angulares de los rayos cósmicos de alta energía detectados por el observatorio Pierre Auger, 2017.
- [5] 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>.
- [6] 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>.

