

East-West Method Analysis over the All Triggers Dataset

E. Coronel*, S. Mollerach

March 2021

There are mainly two techniques used in the study of large-scale anisotropies over the events rate measured by the Pierre Auger Observatory: Rayleigh and East-West methods. These methods are based on studying modulations over the cosmic rays flux $I_{\alpha,\delta}$ using harmonic functions, where α and δ stand for the right ascension and declination respectively.

Given an energy range, the Rayleigh analysis uses the rate of events to estimate the amplitude and phase of an anisotropy between this range up to any order. Also, using the Rayleigh distribution, it is possible to obtain the probability of measuring the same amplitude magnitude as a fluctuation of an isotropic distribution of cosmic rays. This method has approximately a resolution of $1/n$ cycles per year where n is the period of the time to be analyzed [1], therefore this method might be sensible to weather modulation in the signal measured by the Observatory or area variations over the surface detectors array. To use this method properly, instrumental effects must be kept as low as possible because these effects induce spurious amplitudes in the analysis.

In the other hand, the East-West method consists of the harmonic function's approximation of the difference of rate of events measured by the Observatory arriving from the East and West directions recorded at a given sidereal time angle α^0 , i.e. the zenith's right ascension. The instrumental effects are removed for the analysis without any further corrections, but a downside of this method is its lower sensibility than the Rayleigh analysis [2].

Using a dipolar approximation, the East-West method estimates the modulation over the CR flux $I(\alpha^0)$ given by $I_E^{obs} - I_O^{obs}$ in the following way:

*evelyn.coronel@ib.edu.ar

1. Given N events to study, first we obtain the parameters a_{EW} and b_{EW} :

$$a_{EW} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \cos(\alpha_i^0 - \beta_i) \quad b_{EW} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \sin(\alpha_i^0 - \beta_i) \quad (1)$$

where α_i^0 is the Observatory's zenith right ascension at the moment of measurement of the i event and $\beta_i = \pi$ if the event came from the East, $\beta = 0$ otherwise.

2. Then we compute the amplitude and phase of the first order approximation r y ϕ ,

$$r_{EW} = \sqrt{a_{EW}^2 + b_{EW}^2} \quad (2) \quad \phi_{EW} = \arctan \frac{b_{EW}}{a_{EW}} \quad (4)$$

$$r = \frac{\pi}{2} \frac{\langle \cos \delta \rangle}{\langle \sin \theta \rangle} r_{EW} \quad (3) \quad \phi = \phi_{EW} + \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

where the

amplitude r_{EW} and phase ϕ_{EW} are related to r y ϕ , which are the amplitude and phase of the modulation of the first order's approximation. The values $\langle \cos \delta \rangle$ and $\langle \sin \theta \rangle$ are the mean value over all the events i .

3. To generalize this analysis to any frequency, instead of using the variable α^0 we used the variable: $\tilde{\alpha} = 2\pi f_x t_i$, where f_x stands for the frequency of interest, and t_i is the time in which the event was measured. It allows us to study the amplitude over solar frequency to verify the weather modulation over the SD signal.
4. Another variable used in this article is the component of the dipole amplitude d_{\perp} in the equatorial plane. It can be calculated using the following expression:

$$d_{\perp} = \frac{\pi}{2\langle \sin \theta \rangle} r_{EW} \quad (6)$$

In this article, we present the novel results over the All Triggers dataset. The results were calculated using the East-West method for different energy ranges and were compared with other published results obtained with the Herald dataset by the Collaboration.

1 Datasets characteristics

The following events are classified by their energy, as they were reported by the Collaboration. These events are used to report and compare several results. The All Triggers dataset includes registered events from 2014 to 2020. Meanwhile, the Herald dataset contains data gathered from 2004 to 2018. The characteristics of both datasets are presented in Table 1

Time span	All Triggers 6 years	From	January 1 st , 2014
		To	January 1 st , 2020
	Herald 14.7 years	From	January 1 st , 2004
		To	August 1 st , 2018

Energy range [EeV]		0.25 - 0.5	0.5 - 1	1 - 2
Events	All Triggers	3 967 368	3 638 226	1 081 846
	Herald	770 316	2 388 467	1 243 103
Mean Energy	All Triggers	0.38	0.69	1.32
	Herald	0.43	0.70	1.28

Table 1: Datasets characteristics for several energy ranges.

2 Results of the East-West Analysis

2.1 Results in the 0.25 EeV - 0.5 EeV energy range

En la Tabla 2 se presentan los resultados para este rango de energía en las frecuencias solar y sidérea de All Triggers. Los mismos se comparan con resultados con el Disparo Estándar que fueron reportados en [3]. Los valores de σ de All Triggers es la mitad que el valor reportado para el Disparo Estándar, esto se debe a que el primer conjunto de datos tiene registrados ~ 5 veces más eventos que el segundo.

	All Triggers		Disparo Estándar
Frequency:	Solar	Sidérea	Sidérea [3]
Amplitude r [%]:	$0.17^{+0.22}_{-0.07}$	$0.12^{+0.24}_{-0.03}$	$0.5^{+0.4}_{-0.2}$ [4]
r_{99} [%]:	0.58		1.1[4]
r^{UL} [%]:	0.67	0.64	1.4[4]
σ [%]:	0.19		0.38[4]
Amplitude d_{\perp} [%]:	-	$0.16^{+0.31}_{-0.04}$	$0.6^{+0.5}_{-0.3}$
d_{99} [%]:	-	0.73	1.5 [4]
d_{\perp}^{UL} [%]	-	0.80	1.8
$\sigma_{x,y}$ [%]:	-	0.24	0.48
Probabilidad :	0.66	0.81	0.45
Phase[$^{\circ}$]:	221 ± 77	280 ± 90	225 ± 64
$\langle \cos \delta \rangle$	0.79		0.79 [4]
$\langle \sin \theta \rangle$	0.46		0.52 [4]

Table 2: Características para las frecuencias solar y sidérea con el método East-West en el primer armónico en rango de energía 0.25 EeV - 0.5 EeV.

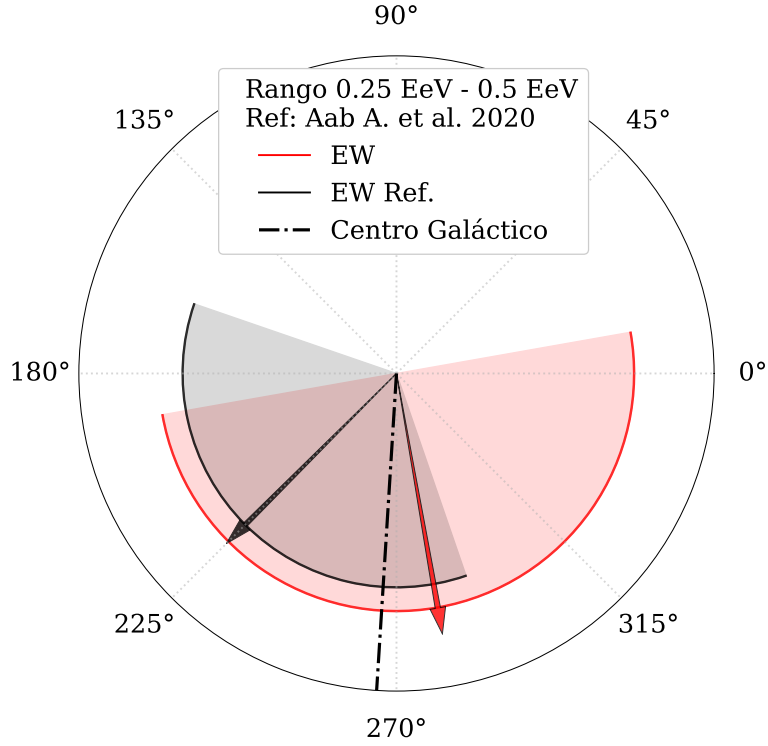


Figure 1: Valores de las fases obtenidos en este trabajo y en el trabajo Aab A. et al. (2020) [3] con sus respectivas incertidumbres para la frequency sidérea en el rango 0.25 EeV - 0.5 EeV.

En la Fig. 1 se comparan las fases en frequency sidérea obtenida en este trabajo y la reportada en [3], donde la línea punteada marca la dirección del centro galáctico. En esta figura en la tabla anterior, se observa que la incertidumbre obtenida para la phase de All Triggers es amplia, esto se debe a que la amplitud r es pequeña comparada con el valor de σ .

Realizando el barrido de frecuencias con la variable de la Ec.??, se obtiene que en este rango de energía las amplitudes se distribuyen en frequency como se muestra en la Fig.2. La línea horizontal indica el valor de r_{99} para cada frequency, además se observa que ninguna amplitud supera dicho umbral.

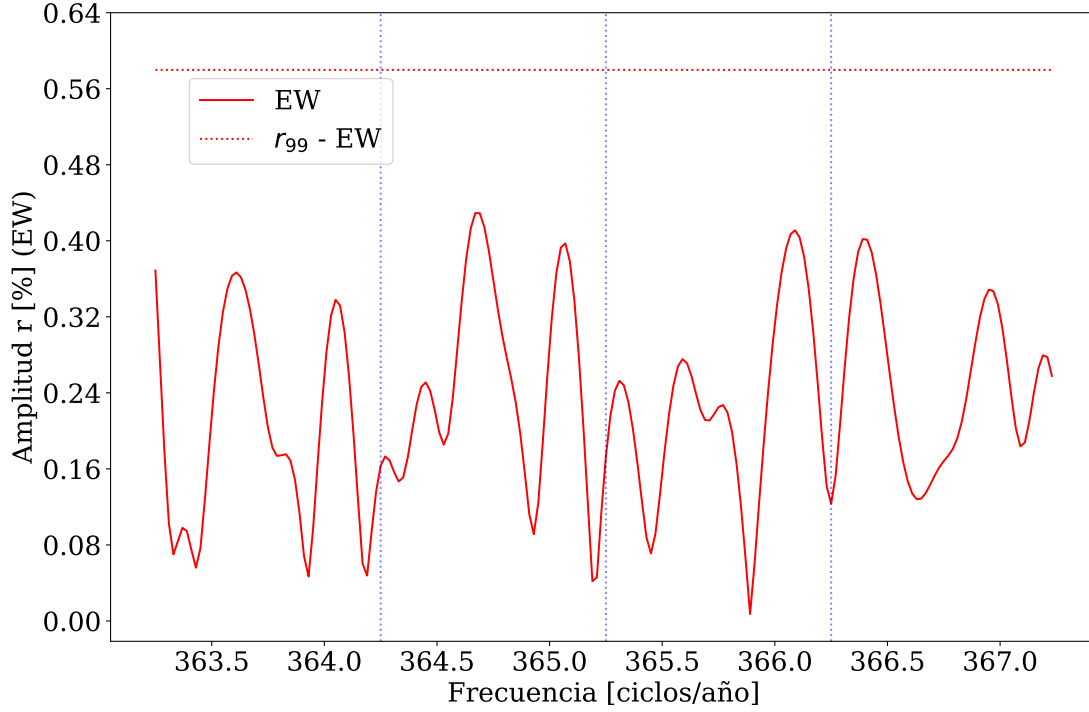


Figure 2: Barrido de frecuencias en el rango 0.25 EeV - 0.50 EeV mediante el método East-West.

2.2 Results in the 0.5 EeV - 1 EeV energy range

En la Tabla 2 se presentan los resultados para el rango 0.5 EeV - 1 EeV en las frecuencias solar y sidérea de All Triggers, además se comparan con los resultados reportados en [3].

El barrido de frecuencias con la variable de la Ec.?? para este rango de energía se observa en la Fig.3. La línea horizontal indica el valor de r_{99} para cada frequency, además se observa que ninguna frequency supera dicho umbral.

En la Fig. 4 se comparan las direcciones en las que apuntan la phase en frequency sidérea obtenida en este trabajo con la obtenida en [3]. En esta figura se observa que resultados similares entre sí en valor e incertidumbre, y apuntan a una dirección cercana al centro galáctico.

	All Triggers		Disparo Estándar
Frequency:	Solar	Sidérea	Sidérea [3]
Amplitude r [%]:	$0.43^{+0.21}_{-0.14}$	$0.44^{+0.21}_{-0.14}$	$0.38^{+0.20}_{-0.14}$ [4]
r_{99} [%]:	0.56		0.64[4]
r^{UL} [%]:	0.89	0.90	0.90 [4]
σ [%]:	0.18		0.21 [4]
Amplitude d_{\perp} [%]:	-	$0.56^{+0.27}_{-0.18}$	$0.5^{+0.3}_{-0.2}$
d_{99} [%]:	-	0.71	0.8 [4]
d_{\perp}^{UL} [%]	-	1.1	1.1
$\sigma_{x,y}$ [%]:	-	0.23	0.21
Probabilidad :	0.065	0.055	0.20
Phase[$^{\circ}$]:	205 ± 34	258 ± 34	261 ± 43
$\langle \cos \delta \rangle$	0.79		0.79 [4]
$\langle \sin \theta \rangle$	0.50		0.54[4]

Table 3: Características para las frecuencias solar y sidérea con el método East-West en el primer armónico en rango de energía 0.5 EeV - 1 EeV

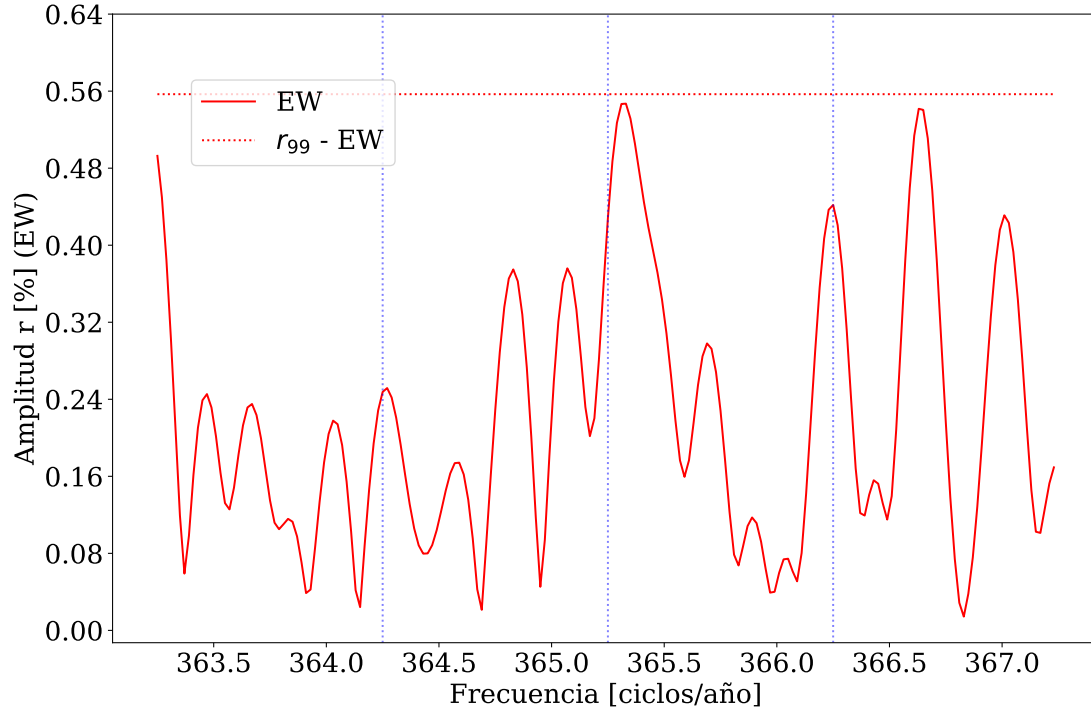


Figure 3: Barrido de frecuencias en el rango 0.5 EeV - 1.0 EeV mediante el método East-West.

2.3 Results in the 1.0 EeV - 2.0 EeV energy range

En las Tablas 4 se comparan los resultados de este trabajo para la frequency solar. Las amplitudes están por debajo de r_{99} y son compatibles entre sí.

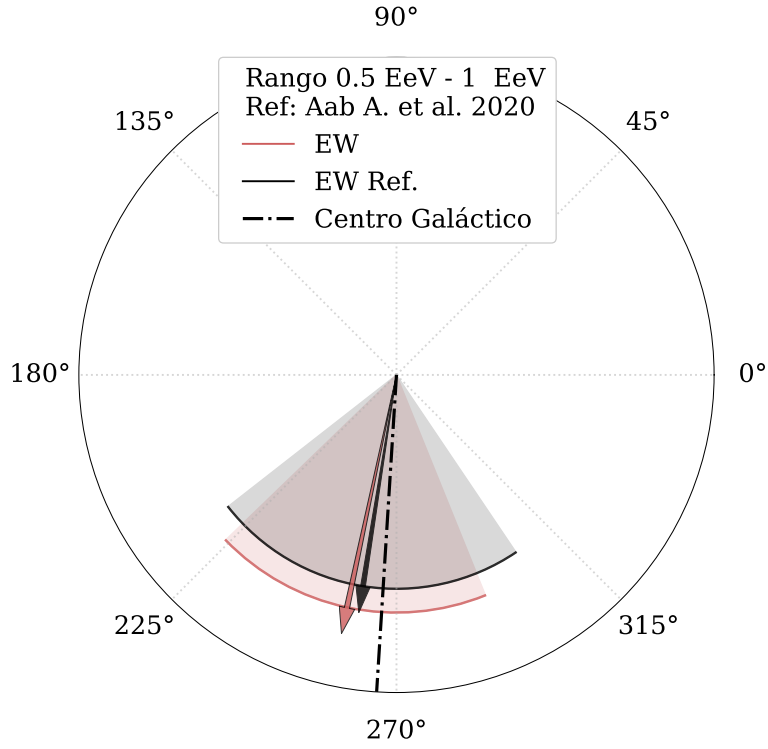


Figure 4: Valores de las fases obtenidos en este trabajo y en el trabajo Aab A. et al. (2020) [3] con sus respectivas incertidumbres para la frequency sidérea en el rango 0.5 EeV - 1.0 EeV

	All Triggers	
	Rayleigh	East - West
Frequency:	Solar	
Amplitude r [%]:	$0.24^{+0.16}_{-0.09}$	$0.28^{+0.35}_{-0.11}$
r_{99} [%]:	0.41	0.91
r_{UL} [%]:	0.58	1.1
σ :	0.14	0.30
Probabilidad:	0.22	0.65
Phase:	260 ± 48	279 ± 76

Table 4: Características para la frequency solar con los métodos de Rayleigh e East-West en el primer armónico en el rango 1 EeV - 2 EeV.

En la Tabla 5 se comparan los resultados de este trabajo y los obtenidos en el trabajo [3] para la frequency sidérea. Para All Triggers se comparan los métodos de Rayleigh y East-West, en el primer método se obtiene que la probabilidad que la amplitud obtenida se deba al ruido es de 6.3% mientras que en segundo método 26%. Esta diferencia entre probabilidades no puede deberse a la cantidad de eventos, porque es el mismo conjunto de datos. En la Fig.5 se observan en una figura en coordenadas polares mostrando las fases del trabajo [3] y este trabajo para la frequency sidérea.

El barrido de frecuencias con la variable de la Ec.?? para este rango de energía se observa en la Fig.6. La línea horizontal indica el valor de r_{99} para cada frequency y se observa que ninguna frequency supera dicho umbral. En la frequency solar no se observa ningún pico, esto se debe a que el método East - West es robusto con respecto a las modulación del clima. Se observa un pico en sidérea pero el mismo no es significativo con respecto al r_{99} .

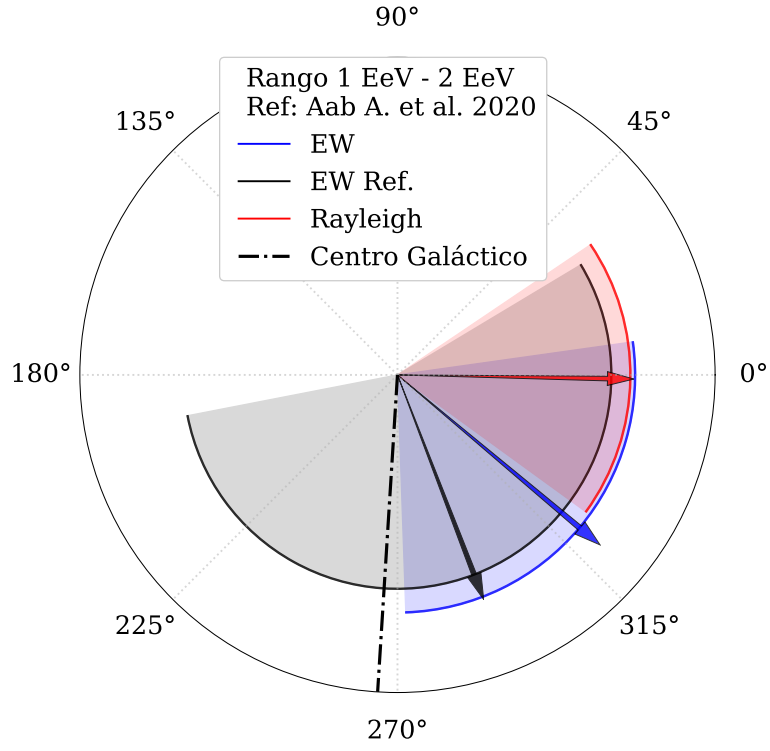


Figure 5: Valores de las fases obtenidos en este trabajo y en el trabajo Aab A. et al. (2020) [3] con sus respectivas incertidumbres para la frequency sidérea en el rango 1.0 EeV - 2.0 EeV

	All Triggers			Disparo Estándar
	Rayleigh		East - West	East - West[3]
Frequency:	Sidérea			Sidérea
Amplitude r [%]:	$0.32^{+0.16}_{-0.10}$		$0.5^{+0.3}_{-0.2}$	$0.14^{+0.37}_{-0.02}[4]$
$r_{99}[\%]:$	0.41		0.91	0.84[4]
$r^{UL}[\%]$	0.66		1.3	0.89 [4]
$\sigma[\%]:$	0.14		0.30	0.28 [4]
Amplitude d_{\perp} [%]:	$0.41^{+0.20}_{-0.13}$		$0.6^{+0.4}_{-0.3}$	$0.18^{+0.47}_{-0.02}$
$d_{99}[\%]:$	0.53		1.1	1.1[4]
$d_{\perp}^{UL}[\%]$	0.84		1.6	1.1
$\sigma_{x,y}[\%]:$	0.17		0.38	0.35
Probabilidad:	0.063		0.26	0.87
Phase[°]:	357 ± 35		320 ± 48	291 ± 100
$\langle \cos \delta \rangle$	0.78		0.78	0.78
$\langle \sin \theta \rangle$	0.55		0.55	0.57

Table 5: Características para la frequency sidérea con los métodos de Rayleigh e East-West en el primer armónico en el rango 1 EeV - 2 EeV.

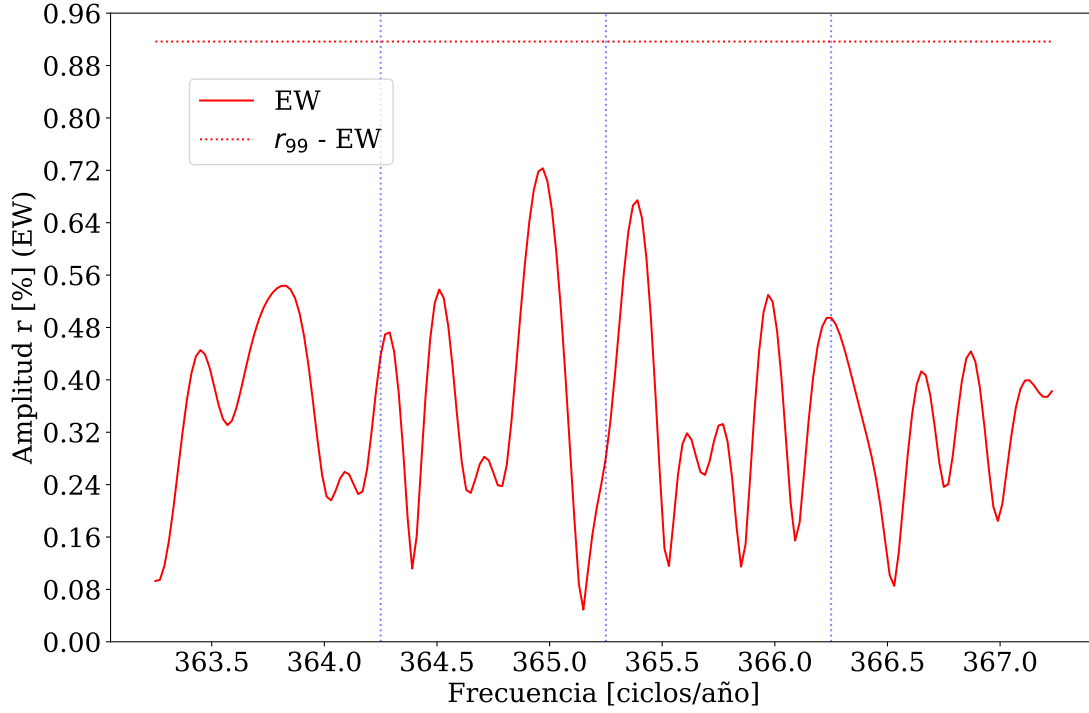


Figure 6: Barrido de frecuencias en el rango 1 EeV - 2 EeV mediante el método East-West.

3 Análisis de los resultados

El barrido de frecuencias para el conjunto de datos de All Triggers contiene datos de 6 años. Este rango de tiempo permite tener una resolución de $\sim 1/6$ ciclos/año [1]. Los picos obtenidos en los barridos presentados en las Figs.2, 3 y 6 están distanciados en promedio $1/5$ ciclos/año entre sí por lo que están dentro de la resolución posible del análisis.

Una forma para poder comparar los resultados de d_{\perp} calculados de distintos conjuntos de datos entre sí, es dividir estos valores con sus respectivos $\sigma_{x,y}$. De esta manera, podemos comparar cuan apartados están con respecto $\sigma_{x,y}$. De esta manera se obtiene la Fig.7, donde podemos decir que en los rangos entre 0.5 EeV - 1.0 EeV y 1.0 EeV - 2.0 EeV, la amplitud obtenida en este trabajo utilizando los eventos de All Triggers es más significativa que los resultados obtenidos por el trabajo [3] con el Disparo Estándar. Estos resultados difieren

de trabajo [3] por $\sim 1\sigma_{x,y}$ y $\sim 2\sigma_{x,y}$ respectivamente. Para comparar los resultados en el rango 0.25 EeV - 0.5 EeV, tenemos que tener en cuenta que el Disparo Estándar tiene una sensibilidad menor que el All Triggers. Esto se ve claramente en la Tabla 1, donde el primero tiene 7 veces menos eventos para analizar que el segundo. Por lo tanto, la discrepancia entre este trabajo y los resultados presentados en [3] puede deberse a la diferencia de eventos a estudiar causada por la sensibilidad del disparo.

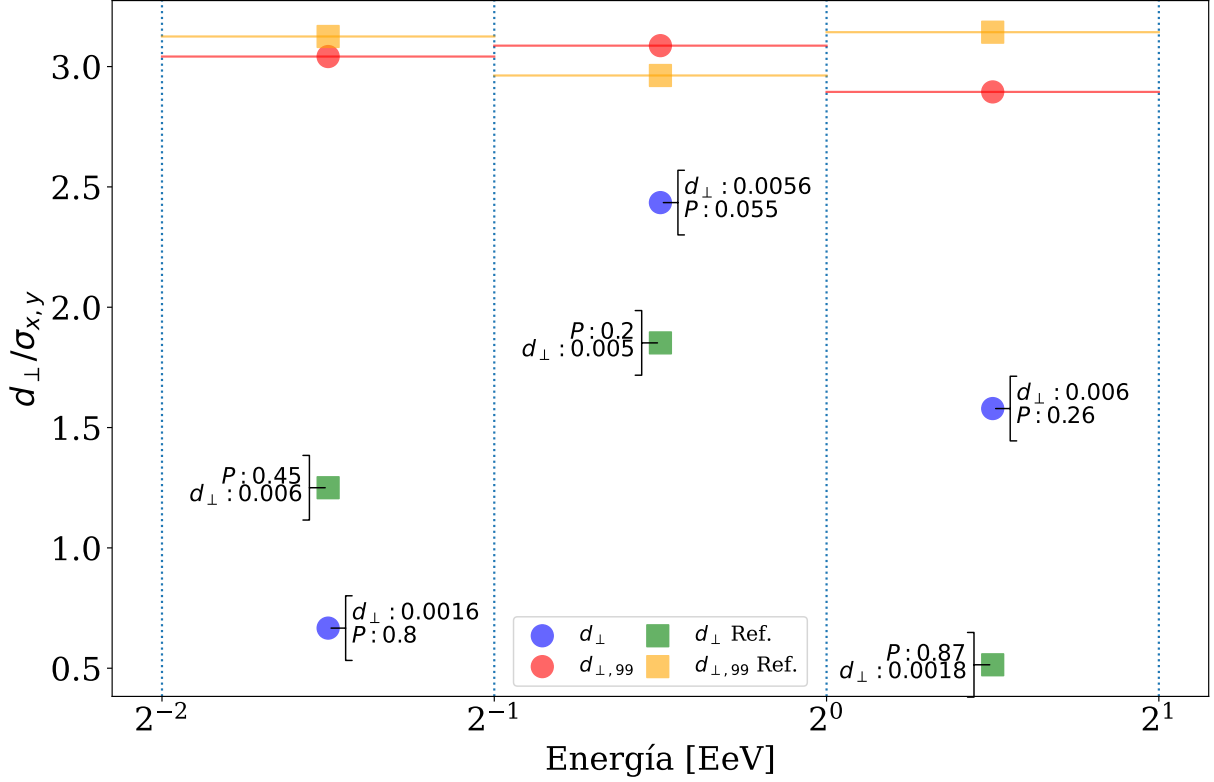


Figure 7: Variaciones de la amplitud d_{\perp} con respecto a $\sigma_{x,y}$ comparados con $d_{\perp,99}$ para distintos rangos de energía. Estos valores son obtenidos con el método East-West.

Considerando los valores de $\sigma_{x,y}$ y d_{\perp} obtenidos para cada rango de energía y con los métodos Rayleigh y East-West, es posible comparar las direcciones, valores e incertidumbres en la Fig.8. Las líneas punteadas están centradas en los valores reportados en cada rango

de energía por el trabajo [3], obtenido con el Disparo Estándar. El radio de cada círculo punteado igual al $\sigma_{x,y}$ de cada rango de energía. Los círculos sombreados indican el rango de incertidumbre a $1\sigma_{x,y}$ de los valores obtenidos en este trabajo utilizando All Triggers. Cada flecha dentro de estos círculos sombreados indica a dirección y valor de d_{\perp} . El punto asociado al método Rayleigh corregido con la modulación del clima de All Triggers en el rango 1-2 EeV se denota con *Ray,mod*.

En los rangos de energía 0.25 EeV - 0.5 EeV y 0.5 EeV - 1.0 EeV, los valores obtenidos con All Triggers y el Disparo Estándar son compatibles entre sí dentro de la incertidumbre, además de contener la dirección al centro galáctico dentro de sus incertidumbres. Esto es interesante de resaltar ya que es esos rangos de energía, se espera que los rayos cósmicos sean galácticos.

En el rango 1.0 EeV - 2.0 EeV, se comparan resultados para el método de Rayleigh (*Ray*) y el método East-West (*EW*) obtenidos con All Triggers, y el valor obtenido por la Colaboración en el trabajo [3] mediante el método Rayleigh con el Disparo Estándar. Todos estos resultados son compatibles entre sí dentro de $1\sigma_{x,y}$ de incertidumbre.

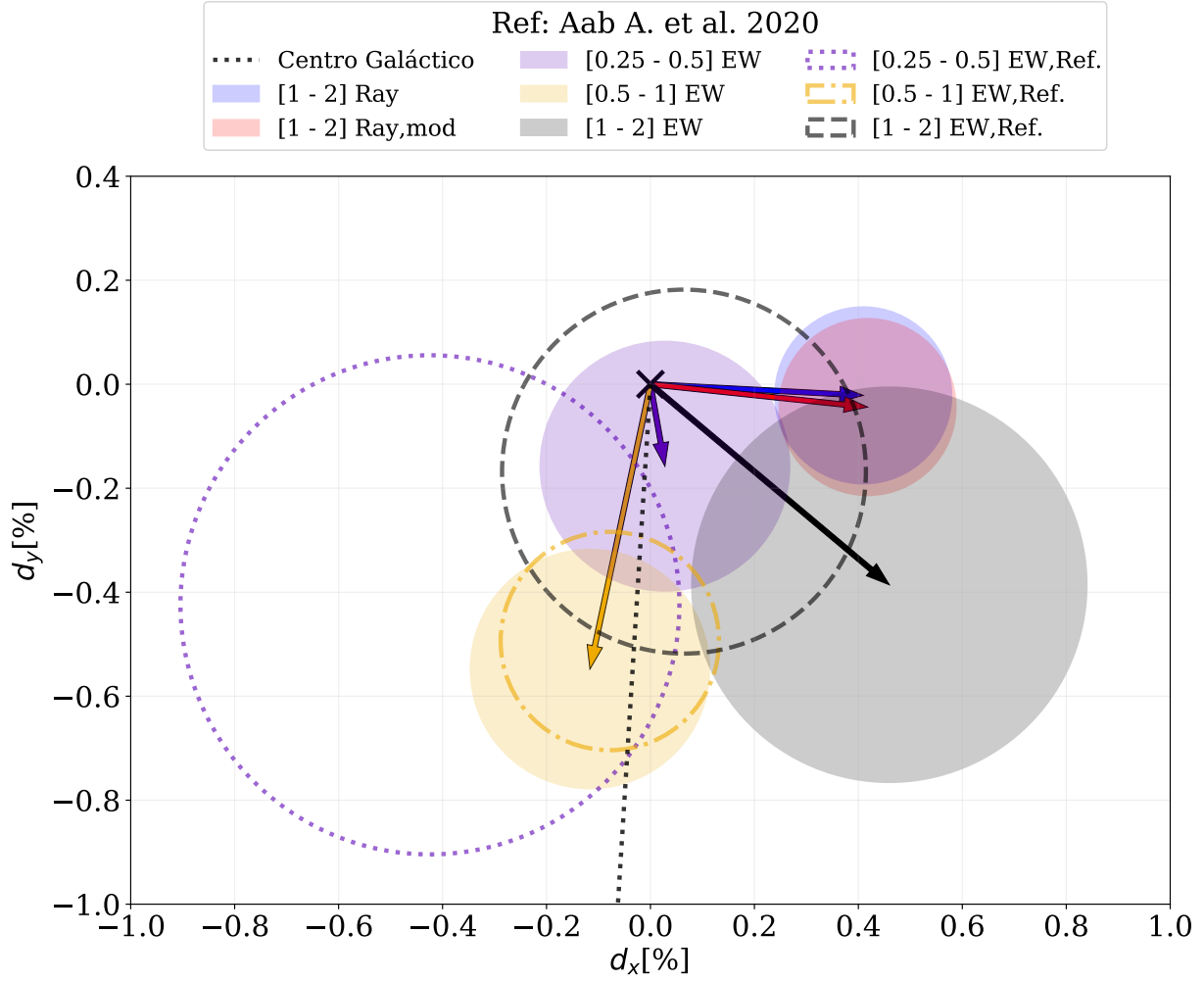


Figure 8: Amplitudes with uncertainty, pointing in the direction of the phase. The dotted circles show the values of the work Aab A. et al. (2020) [3] with their respective uncertainties and the dotted line in black marks the direction of the Galactic center.

References

- [1] Abreu, P., Aglietta, M., Ahn, E., Albuquerque, I., Allard, D., Allekotte, I., *et al.* Search for first harmonic modulation in the right ascension distribution of cosmic rays detected

at the pierre auger observatory. *Astroparticle Physics*, **34** (8), 627 – 639, 2011.

- [2] Taborda, O. Estudios de anisotropías a grandes escalas angulares de los rayos cósmicos de alta energía detectados por el observatorio Pierre Auger. PhD thesis, Instituto Balseiro, 2018.
- [3] Aab A. et al.,Cosmic-Ray Anisotropies in Right Ascension Measured by the Pierre Auger Observatory. *The Astrophysical Journal*, **891** (2), 142, 2020. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab7236>.
- [4] Code used in [3].