



Universidad Nacional Autónoma de México

Maestría en ciencias físicas

Proyecto final

Nieto Castellanos Jaime Fabián

Núñez Trigueros Daniel

Rave Franco Geovanny Alexander

Laboratorio avanzado de radiación cósmica

17 de Noviembre 2021

Resumen

En este trabajo se hace una breve introducción del observatorio HAWC, del proceso de adquisición de datos del observatorio, de cómo se reconstruyen cascadas atmosféricas con base en estos datos y finalmente cómo se crean mapas lunares. Después, utilizando información de diferentes reconstrucciones energéticas de las cascadas atmosféricas, se muestra el comportamiento de la significancia para diferentes rangos energéticos, clasificados en *bines*, y se hace la comparación de los resultados entre un estimador de energía usado para reconstruir cascadas producidas por protones (*protonlhe*) y un estimador de red neuronal (*nn*). Se encuentra que para *protonlhe* el mayor déficit de significancia es -78.022σ , mientras que para *nn* es -88.315σ . Posteriormente, se muestra la metodología para realizar un mapa lunar y caracterizar la sombra de la Luna. Se presentan diversos mapas creados con datos del estimador de energía reconstruida con cascadas de protones, al cual también se le aplican varios cortes de selección (*protonlhe_combined*). Las energías están en el rango [0.1, 100.0] TeV. En los mapas lunares se encuentra que a bajas energías el centro de la sombra de la Luna está desplazado a $\alpha \simeq -1^\circ$, pero para energías altas el centro se acomoda en el origen del sistema de coordenadas lunares, que es lo esperado por la deflexión de las partículas cargadas debido al campo magnético de la Tierra. Así mismo, la significancia fluctúa notablemente para altas energías.

keywords: Cascadas atmosféricas, rayos cósmicos, HAWC, mapas lunares.

1. Introducción

fotomultiplicadores.

1.1. Sobre el observatorio HAWC

El Observatorio Cherenkov de Agua a Gran Altitud, HAWC por sus siglas en Inglés, está ubicado en la República Mexicana al interior del Parque Nacional Pico de Orizaba el cual abarca una región de $150 \times 150 \text{ m}^2$ y se encuentra arriba de los 4000 m al nivel del mar [1]. El observatorio cuenta con 300 detectores de agua Cherenkov (WCD) y 345 tanques *outrigger* [2]. Cada WCD en HAWC tiene una altura de 5 m y un diámetro de 7.2 m que contiene aproximadamente 200 mil litros de agua ultra purificada, los cuales alcanzan una altura de 4.5 m en el tanque [2, 3]. La capa externa de cada detector es de acero y en el interior se encuentra un cámara de plástico que contiene el agua, y en cuya parte inferior contiene 4 fotomultiplicadores (PMT's). Una representación gráfica de un WCD se muestra en la figura 1. El funcionamiento de cada WCD se basa en el efecto Cherenkov, el cual aparece cuando una partícula cargada viaja en un medio dieléctrico más rápido que la velocidad de la luz en el mismo medio, lo que da como resultado un cono luz que se detecta en los

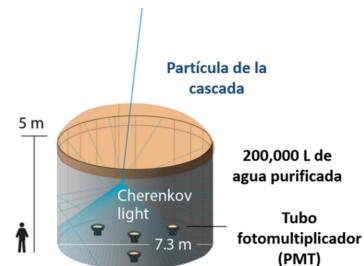


Figura 1: Representación gráfica de un detector de agua Cherenkov, recuperado de [2].

Por otro lado, cada detector *Outrigger* consiste de un cilindro con diámetro de 1.55 m y una altura de 1.65 m. Estos detectores están separados entre sí por una distancia de entre 12 y 18 metros. Cada uno de estos detectores contiene un fotomultiplicador en su interior, cuyo propósito es incremen-

tar el área efectiva del detector, estimar con mejor precisión el núcleo de las cascadas [3] y se involucran en el sistema de activación de datos (*trigger*) [2, 3].

El propósito del observatorio es la detección y estudio de cascadas atmosféricas ocasionadas por rayos γ y rayos cósmicos, aunque también logra detectar cascadas de hadrones [2, 3].

1.2. Adquisición de datos

La señal de los fotomultiplicadores se envía a través de un conjunto de cables coaxiales, que pasan a través de un SHV (*Safe High Voltage*) el cual es un conector de cable coaxial diseñado para manejar altos voltajes, evitar descargas eléctricas en la conexión en caso de interrupciones y también ayuda a prevenir que altos voltajes lleguen a zonas de bajo voltaje [4], y que se conectan a un módulo de protección, terminando finalmente en un panel electrónico *Front-End-Board* (FEB) [2]. Después de esto, la señal pasa por una caja desacopladora y un conjunto de FEB's analógicas que separan la señal de la línea de voltaje alto y la pasan por una resistencia hacia dos amplificadores que comparan la señal respecto a los umbrales de voltajes altos y bajos [2]. Luego, la señal se pasa a un conjunto de FEB's digitales que combinan las señales que pasan por cada umbral, alto y bajo, en una sola onda que se procesa en un canal convertidor de tiempo a digital *Time-to-Digital Converter*, TDC por sus siglas en Inglés. Con ayuda de los TDC y un sistema GTC (*GPS Timing Control*) se mide el tiempo en que la señal cruza tanto el umbral alto como el bajo, el cual queda caracterizado como el tiempo sobre umbral, *Time over Threshold* o ToT. Una vez caracterizado el tiempo sobre cada umbral se determina la carga depositada en cada PMT [2]. Finalmente, la carga y el tiempo obtenido por el TDC de cada PMT se archiva en formato XCDF (*The Explicitly Compacted Data Format*).

1.3. Reconstrucción de cascadas

Un cascada atmosférica es el resultado de las interacciones de un rayo cósmico o rayo γ con los núcleos atómicos en la atmósfera. La partícula que produce esta cascada se le llama rayo cósmico primario y a las partículas resultantes de la interacción se les llama secundarias [3]. El número de partículas secundarias depende de la energía del rayo cósmico primario, por lo que es natural esperar que un rayo cósmico primario muy energético genere un mayor número de partículas secundarias resultando en un más alto número de activaciones de PMT's o *hits*. Dado que existen rayos cósmicos que inciden de distintas direcciones, estos pueden activar a los detectores Cherenkov, por lo cual se hace uso de un *trigger* que establece cuándo se deben de registrar los datos del observatorio. El trigger consiste en recibir 28 hits en una ventana de 150 ns, de esta forma se puede limitar el número de mediciones a aquellas que sí sean de cascadas atmosféricas. Una vez se tienen los datos producidos por cada detector, se reconstruye la cascada atmosférica a través de una serie de pasos los cuales se describirán brevemente a continuación y que se describen a detalle en [5]. El primero paso es la calibración, que consiste en asociar el ToT con el número de fotoelectrones (PE's) en cada PMT, posteriormente se toma en cuenta el hecho de que las ondas provenientes de pocos PE's cruzan los umbrales más tarde que aquellos con mayor número de PE's. Además, se hace un tratamiento igualitario de los distintos PMT's, lo cual

se consigue con ayuda de una carga efectiva Q_{eff} para compensar el tamaño y la eficiencia de cada PMT. Finalmente se toma en cuenta el posible retraso de la señal debido a la longitud del cableado de cada PMT y otros posibles retrasos que varían de PMT a PMT, más una pequeña rotación en cada evento con el fin de que la nebulosa del cangrejo esté ubicada en la posición en la que debe de estar. Para la calibración se usan simulaciones para estimar cómo responden los detectores en diversas situaciones [3]. El segundo paso consiste en la selección de hits con base en distintos criterios, entre ellos, el despreciar hits que ocurran un tiempo muy corto después de un hit de mucha carga, pues se presupone que estos pueden estar contaminados de *afterpulses*, distinguiendo si se trata de señales de detección o señales por ruido [3], entre otros criterios. El tercer paso es la primera reconstrucción del core, que consiste en ajustar una distribución de fotoelectrones que decrece monótonamente con la distancia al core. La señal S_i de cada PMT se supone que obedece la siguiente forma

$$S_i = S(A, \vec{x}, \vec{x}_i) = A \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{|\vec{x} - \vec{x}_i|^2}{2\sigma^2}} + \frac{N}{(0.5 + \frac{|\vec{x} - \vec{x}_i|}{R_m})^3} \right), \quad (1)$$

en donde \vec{x} es la posición del core, \vec{x}_i la posición de cada medición, R_m el radio de Molière de la atmósfera el cual es de 124.2 m en la localización de HAWC [3], σ el ancho de la Gaussiana y N un factor de normalización. En el ajuste se elige de forma fija $\sigma = 10$ m y $N = 5 \cdot 10^{-5}$ dejando para ajustar únicamente la posición del core \vec{x} y la amplitud A . El siguiente paso es la reconstrucción de la dirección del rayo primario, lo cual se logra usando los tiempos de activación de cada PMT. La idea básica es que las partículas secundarias se separan del eje principal de la cascada, formando así un frente de cascada curvo, por lo que se hace una corrección al frente de onda al agregar un retraso a las partículas que estén fuera del núcleo. Una vez ajustado el frente de la onda y reconstruido el núcleo se obtiene la dirección de incidencia en coordenadas cenitales [3]. El cálculo del núcleo de la cascada y del frente de onda se hace de forma iterativa con el fin de obtener la mejor estimación posible de estas. Finalmente se calculan dos cantidades llamadas *compactness* y *PINCness* para poder clasificar al evento como una cascada hadrónica o electromagnética. El *compactness* se mide en fotoelectrones y consiste en el cociente del número de hits y la carga más grande registrada por un PMT que esté a más de 40 m del núcleo de la cascada. Entonces, un evento con *compactness* alto corresponde a una cascada hadrónica mientras que uno con *compactness* bajo corresponde a una cascada electromagnética [3]. Por otro lado el *PINCness* es un parámetro que ayuda a distinguir partículas, el cual se basa en la χ^2 del ajuste del core y supone que los rayos gammas son axialmente simétricos y radialmente suaves [6]. El *PINCness* está definido por la siguiente ecuación

$$P = \frac{1}{N} \sum_i \frac{(\log(q_i) - \langle \log(q_i) \rangle)^2}{(\sigma_{\log(q_i)})^2}, \quad (2)$$

en donde $\log(q_i)$ es el logaritmo de la carga detectada por el i -ésimo PMT, $\langle \log(q_i) \rangle$ el promedio del logaritmo de la carga de los PMT's activados en la detección y $\sigma_{\log(q_i)}$ la desviación estándar de la carga medida [3]. Así, si el *PINCness* es menor que cierto valor óptimo de corte, la cascada es electromagnética y hadrónica si no es menor, en donde el valor de corte depende de la fracción de PMT's activados durante

el experimento [6]. Por último, se reconstruye la energía del evento, para esto HAWC hace uso de cuatro estimadores de energía [3], el primero es un estimador sencillo el cual consiste en calcular a la energía como el número de hits sobre el número de canales disponibles. El segundo es un estimador de energía físico que se basa en una relación tipo ley de potencias entre la densidad de carga con la energía del rayo primario, logrando con este modelo estimar la energía con base en la densidad de la carga medida. El tercer estimador es a través de redes neuronales entrenadas con simulaciones. El último estimador es uno especial para protones y consiste en un ajuste basado en simulaciones usando la distribución lateral de la carga en cada PMT para así hacer una estimación de la energía del rayo primario y posteriormente comparar con la energía del protón.

1.4. Creación de mapas

Con todo el proceso de adquisición de datos y reconstrucción de cascadas, se puede realizar un mapa de la bóveda celeste con la información necesaria para realizar los análisis [3]. Este mapa se puede realizar en distintas coordenadas, entre ellas, por ejemplo, en coordenadas locales que son la altitud, que se mide verticalmente y va desde el horizonte hasta el objeto y que se mueve en un rango de $[-90^\circ, 90^\circ]$, y el azimut que se mide desde el norte terrestre al sur en sentido horario cubriendo un rango de $[0^\circ, 360^\circ]$. Otro conjunto de coordenadas son las coordenadas ecuatoriales, que usan la ascensión recta para medir la posición respecto al ecuador, usualmente tomando como referencia el punto Aries, y usan la declinación, la cual es la distancia angular del plano ecuatorial al punto en el cielo que queremos estudiar. Finalmente tenemos las coordenadas lunares, las cuales están centradas en la Luna y que son el resultado de restar las coordenadas ecuatoriales de la Luna a cualquier mapa en esas mismas coordenadas, garantizando así que el centro de la Luna esté en $(0, 0)$, por lo cual, si α y δ son la ascensión recta y declinación de un evento en coordenadas ecuatoriales, entonces en coordenadas lunares son

$$\alpha' = \alpha - \alpha_L, \quad \delta' = \delta - \delta_L, \quad (3)$$

con α_L y δ_L la ascensión recta y declinación de la Luna. Estas coordenadas son las que se usarán en este trabajo para estudiar los mapas de la Luna. El procedimiento para la obtención de estos mapas se explica en [3] y consiste en lo siguiente: se hace uso de la paquetería “aerie-apps-make-hawc-maps”, la cual toma el archivo de datos reconstruidos y crea el mapa en las coordenadas que le pidamos. La idea básica para generar es como sigue, primero llamamos a la paquetería y con el comando `-input` le damos la dirección del archivo que queremos estudiar, posteriormente con la bandera `-p` indicamos la dirección en la que queremos guardar el archivo de salida y con `-n` indicamos el nombre del mismo. Más adelante se indican las coordenadas en las que se quiere el mapa, por ejemplo, con la bandera `-moon` indicamos que la queremos en coordenadas lunares. Luego se indica la época en la que se realiza el mapa, la cual debe coincidir con la época en la que se tomaron los datos, por ejemplo, la bandera `-useJ2000` corresponde a los datos del 1 de Enero del 2000. Con la bandera `-nside` se le especifica a la paquetería el número de píxeles con el cual realizar el mapa, en donde el número de píxeles está dado por

$N_{\text{pix}} = 12 \times N_{\text{side}}^2$ con N_{side} el parámetro que le pasamos con la bandera. Finalmente, con la bandera `-cutFile` se pasa el archivo con los cortes de calidad que se deseen implementar a la hora de la creación del mapa. En este trabajo, los cortes especificaron la creación de mapas en 10 bines, con cada uno de ellos correspondiendo a un rango de energía del rayo cósmico incidente.

Finalmente se hace un mapa de significancia, que consiste en el cálculo de la probabilidad de que la señal sea una fluctuación o una detección real. Una vez se cuenta con el mapa de significancia, se usa `healpy` en python para extraer en un archivo ascii las coordenadas de los píxeles de cada mapa lunar y poder usar `ROOT` para su análisis, lo cual se realiza en las siguientes secciones.

2. Metodología y resultados

Fueron proporcionadas tres carpetas con archivos .dat. Cada una de las carpetas depende del estimador de energía y los cortes de calidad que se hicieron. Estas carpetas contienen los datos para la creación de los mapas, siendo 10 en total por carpeta y divididos dependiendo del bin de energía. En la tabla 1 se encuentra la relación entre los rangos energéticos y el número de bin.

Bin	Energía [TeV]
0	0.1 - 1.58
1	1.58 - 2.51
2	2.51 - 3.98
3	3.98 - 6.30
4	6.30 - 10.0
5	10.0 - 15.85
6	15.85 - 25.11
7	25.11 - 39.81
8	39.81 - 63.09
9	63.09 - 100.0

Tabla 1: Relación entre los bines y la energía de los archivos .dat.

En los archivos .dat se encuentra, en coordenadas lunares, la declinación δ , la ascensión recta α y la significancia σ . Estos datos fueron obtenidos utilizando el software HEALPix. Este software se utiliza para facilitar el análisis estadístico y astrofísico de conjuntos masivos de datos del cielo completo, de una manera rápida y precisa al discretizar adecuadamente funciones en una esfera con una resolución suficientemente alta [7]. HEALPix utiliza un esquema de pixelización en el que cada píxel tiene un valor de significancia. El número de píxeles total sigue la regla

$$N_{\text{pix}} = 12(N_{\text{side}})^2, \quad (4)$$

donde N_{side} en el caso de nuestros mapas es de 256, por lo que el número de píxeles correspondiente es de $N_{\text{pix}} = 786,432$.

Utilizando los datos de los mapas con el estimador de energía protonlhe, sin cortes, se grafican los valores de la significancia para los 10 conjuntos de datos (10 bines de energía). La implementación se encuentra en el archivo P2.C y en la figura 2 se muestra el resultado.

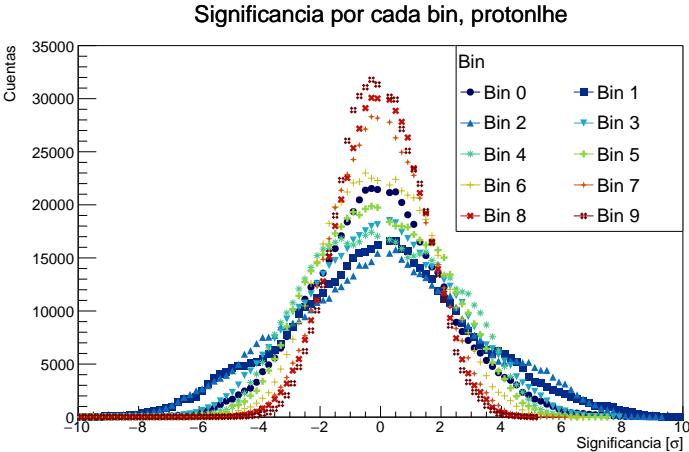


Figura 2: Histograma de la significancia para protonlhe sin cortes de selección para los distintos rangos energéticos. Se omitieron las cuentas con $\sigma = 0$ ya que corresponden a bines vacíos.

Después se obtuvieron los valores de la significancia mínima registrada en cada uno de los bines de energía y se grafican, ver figura 3. Para lograr esto se escribió el macro P3.C.

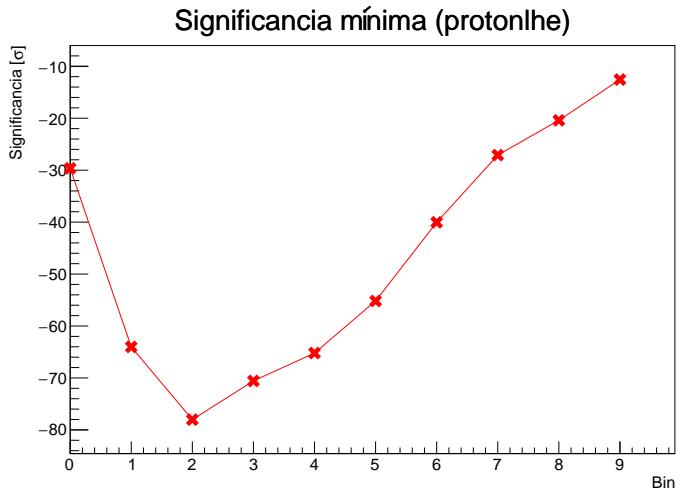


Figura 3: Gráfica en donde se muestra el valor mínimo de significancia de cada uno de los archivos .dat (bines de energía) para el caso del estimador protonlhe sin cortes.

Como se aprecia en la figura 3, la significancia mínima tomando en cuenta todos los rangos energéticos fue de -78.022σ , la cual se asocia al bin número 2 y a las coordenadas $\delta = -0.149^\circ$, $\alpha = -0.906^\circ$.

Del mismo modo, para los datos obtenidos con el estimador nn, neural network, se realizaron las mismas gráficas a través del macro P4.C, las cuales se muestran en las figuras 4 y 5.

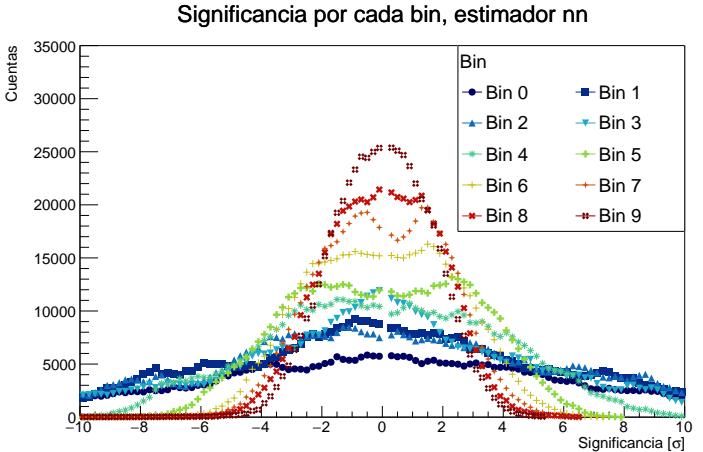


Figura 4: Histograma de la significancia para la reconstrucción con red neuronal. Se omitió $\sigma = 0$ ya que estos eran bines vacíos.

Significancia mínima (Neural Network)

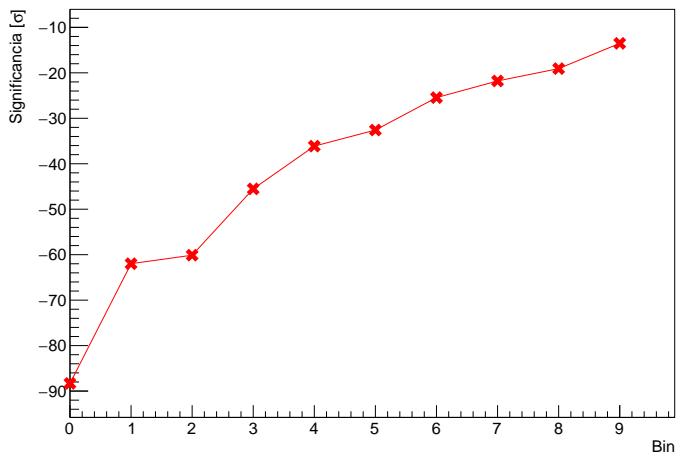


Figura 5: Gráfica donde se muestra el valor mínimo de significancia en cada uno de los archivos .dat (bines de energía) para el caso de la red neuronal.

En la figura 4 se observa que la significancia mínima fue de -88.315σ para el bin número 0 y en las coordenadas $\delta = -0.149^\circ$, $\alpha = -1.609^\circ$.

Utilizando los archivos .dat se pueden crear los mapas de la Luna graficando los valores de declinación, ascensión recta y significancia; para esto se debe escoger el número adecuado de bines de forma que exista la menor cantidad de bines vacíos sin que se sobrescriba alguno. Para ello se selecciona $\sigma = 1$ en todas las entradas y de manera manual se van variando el número de bines. En el caso del bin 1 para el estimador protonlhe sin cortes el resultado se muestra en la figura 6. Los detalles se encuentran en el archivo P5.C

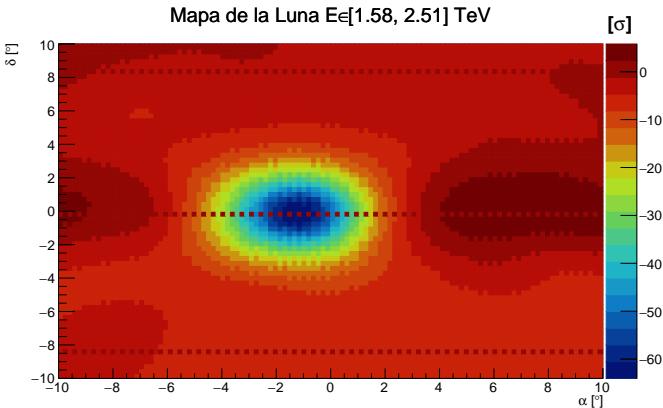


Figura 6: Mapa de la luna con el estimador protonlhe en un rango de energía [1.58, 2.51] TeV, $\delta \in [-10^\circ, 10^\circ]$ y $\alpha \in [-10^\circ, 10^\circ]$. Se usaron 68 bines para declinación y 114 para ascensión recta para disminuir los bines vacíos.

Es posible mejorar el resultado de la figura 6 aplicando un *suavizado* al histograma. Una forma de realizar esto es considerando un rectángulo o *kernel* de $n \times m$ bines¹ y calculando el promedio de aquellos bines no vacíos (bines con valor diferente a cero). Si el kernel contiene algún bin vacío, se asignará a dicho bin el resultado de promediar los bines no vacíos del kernel. Los bines no vacíos mantienen su mismo valor. Luego, se aplica esto mismo a todo el histograma, es decir, se van eligiendo conjuntos de $n \times m$ bines contiguos y se realizan los pasos anteriores. Esto puede hacerse recorriendo el kernel en columnas o en renglones a lo largo de todo el histograma de manera ordenada.

En este trabajo se optó por usar la función Smooth, implementada en ROOT, que realiza los pasos anteriores. Dicha función es un método de la clase TH2 [8], por lo que puede usarse de forma sencilla. Al método se le puede indicar la dimensión del kernel para suavizar el histograma, los detalles se muestran en el archivo P6.C de los códigos realizados. Con esto, se suavizaron diversos mapas de la Luna. En la figura 7, se muestra como ejemplo el mapa lunar mostrado previamente en la figura 6, habiendo aplicado 10 suavizados con un kernel de dimensión 5×5 .

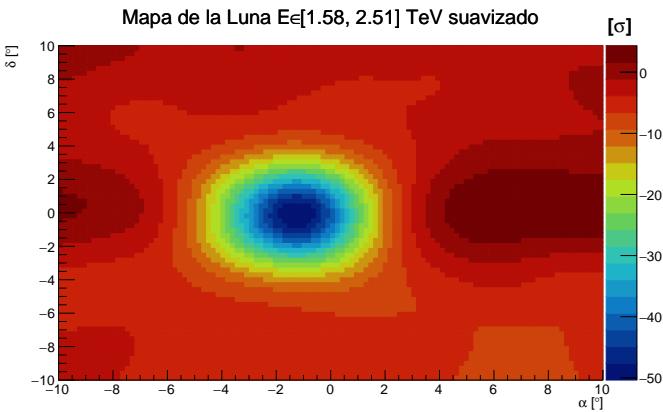


Figura 7: Mapa de la Luna con el estimador protonlhe en un rango de energía [1.58, 2.51] TeV. Se aplicó el método Smooth() de la clase TH2 de ROOT 10 veces para suavizar el mapa.

Ahora bien, con los mapas lunares suavizados es posible ajustar una distribución Gaussiana de la forma

$$S(x, y) = A_0 e^{-\left(\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right)} \quad (5)$$

a la sombra de la Luna, que es la región en donde la significancia disminuye. Este ajuste permite determinar las coordenadas de la significancia mínima, x_0 y y_0 (ascensión recta y declinación respectivamente), de una forma diferente a como se realizó con los códigos P2.C y P4.C, que corresponden a encontrar el mínimo y sus coordenadas revisando todos los datos de manera iterativa. Además, los parámetros σ_x y σ_y indican el ancho de la sombra, mientras que A_0 es el valor mínimo de la significancia.

Como prueba, se ajustó la ec. (5) al mapa lunar suavizado de la figura 7 usando el método Fit de la clase TH2 de ROOT, la implementación está en el archivo P7.C. En la figura 8, se muestra el resultado.

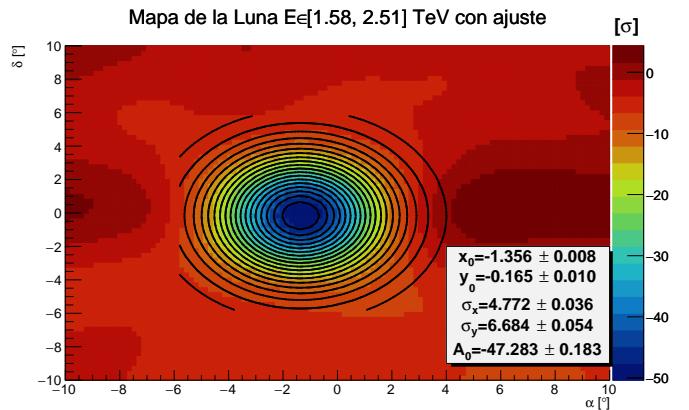


Figura 8: Mapa de la Luna con el estimador protonlhe en un rango de energía [1.58, 2.51] TeV. El mapa se suavizó 10 veces y se le ajustó la ec. (5), los parámetros del ajuste se muestran en la figura.

Posteriormente se realizaron ajustes a todos los archivos de datos de la carpeta protonlhe_combined, que se seleccionaron aplicando varios cortes de calidad. Para cada uno de los diez bines se suavizaron los mapas y se ajustó la función de la ec. (5). Del bin 0 al 8 se restringió el ajuste al conjunto $[-6^\circ, 6^\circ] \times [-6^\circ, 6^\circ]$, debido a que se observó que la sombra de la Luna se encuentra, en general, acotada en esa región. Por otro lado, para el bin 9 se restringió la Gaussiana al conjunto $[-2^\circ, 2^\circ] \times [-3^\circ, 3^\circ]$, ya que en ese rango de energías la significancia fluctúa de manera muy notable, ver figura 10 (i), y realizar el ajuste es complicado considerando regiones angulares grandes. En la figura 9 se muestra el resultado final para el bin 0 y en el Apéndice A se encuentran los mapas para el resto de los bines.

¹Uno tiene la libertad de elegir n y m , pero es recomendable hacer varias pruebas con distintos valores para que el resultado final sea adecuado.

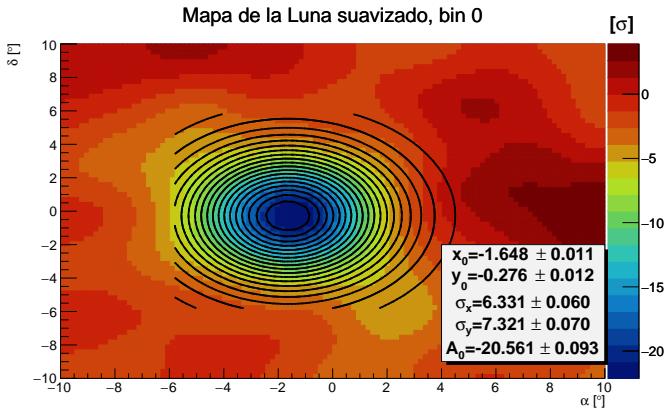


Figura 9: Mapa de la Luna generado con cortes combinados para el bin 0, que abarca el rango [0.1, 1.58] TeV. Se aplicaron 10 suavizados con un kernel de 5×5 bines y se ajustó la ec. (5). El ajuste, mostrado en el mapa con curvas negras, se restringió al conjunto $[-6^\circ, 6^\circ] \times [-6^\circ, 6^\circ]$ para evitar considerar regiones afuera de la sombra de la Luna. Por esto mismo, las líneas exteriores aparecen cortadas, pues se salen del rango. Sin embargo, no son relevantes para identificar la sombra.

3. Análisis y conclusiones

El valor de significancia en los datos representa la probabilidad de que la señal se trate de una fluctuación o de una detección real, entre mayor sea el número de σ 's, la probabilidad de que se trate de una fuente es mayor. Si la significancia está en el intervalo de $[-5\sigma, 5\sigma]$ se considera como ruido de fondo.

En las figuras 2 y 4 se observa que ambas gráficas presentan comportamientos similares, siendo la que no lleva cortes (protonlhe) la que tiene un mayor número de cuentas en cada valor de significancia ya que no se descartan eventos en ese caso, a diferencia del estimador de energía con la red neuronal. A pesar de que las gráficas son parecidas, tienen ciertas diferencias que es importante notar. En la gráfica para protonlhe, figura 2, vemos que en el rango de 2.51 a 100 TeV (del bin 2 al 9) hay una relación entre la energía y la significancia, aumentando para los bines con significancias pequeñas conforme la energía es mayor. En el caso del estimador de red neuronal esto se cumple, a grandes rasgos, para todos los niveles de energía. Esto es consistente con el espectro de rayos cósmicos, ya que la estadística de los eventos a energías altas debe ser menor que los que ocurren a energías bajas. De ambas gráficas podemos ver que los eventos en el rango de 25.11 a 100 TeV (del bin 7 al 9) son muy escasos. Lo que nos falta es analizar el rango de energías de 0.1-2.51 TeV para protonlhe. En este rango podemos argumentar que al igual que en los rangos altos de energía, la estadística de que estos eventos tengan procedencia de rayos cósmicos es menor y eso hace que en la gráfica se encuentren más cuentas en significancias cercanas a 0.

De las figuras 3 y 5 se puede hacer un análisis similar comparando ambas gráficas. En el rango de energías de 1.58 a 100 TeV se observa que la significancia mínima del estimador protonlhe sin cortes se encuentra por debajo de la obtenida con la red neuronal. Esto es consistente con que se descartan even-

tos para red neuronal como ya se explicó anteriormente. Del mismo modo, ambas presentan comportamientos ascendentes a partir de 2.51 TeV ya que conforme aumenta la energía es más probable que se trate de una fluctuación. Para el rango de energías de 0.1 a 2.51 TeV pasa lo contrario para protonlhe, ya que el flujo de rayos cósmicos para este rango de energías es mayor que el número de partículas en los otros rangos de energía. El valor mínimo encontrado, como se mencionó en la metodología fue de -78.022σ , en el bin número 2 y sus coordenadas fueron $\delta = -0.149^\circ$, $\alpha = -0.906^\circ$. Esto será consistente con el centro en los mapas lunares que se mostrarán en el apéndice A y es debido a que en ese rango de energías no se presentan tantas fluctuaciones como en los otros. Por otro lado, para el caso de red neuronal en 0.1-2.51 TeV se ve el mismo comportamiento ascendente, esto puede deberse a que el algoritmo implementado para la obtención de los datos no es capaz de reconstruir todas las cascadas pertenecientes a este rango de energía.

En la figura 7 se muestra el mapa de la Luna para los datos sin cortes de calidad y energías de 0.1 a 1.58 TeV, como es de esperarse se observa la forma de la Luna (en este caso un óvalo por la escala utilizada), pero su centro se encuentra desplazado aproximadamente a $\alpha \simeq -1^\circ$, $\delta \simeq 0.1^\circ$, esto es debido a que las partículas cargadas que forman las cascadas atmosféricas interactúan con el campo geomagnético y son deflectadas según el signo de la carga, lo que causa que la sombra de la Luna se vea recorrida -1° en la ascensión recta.

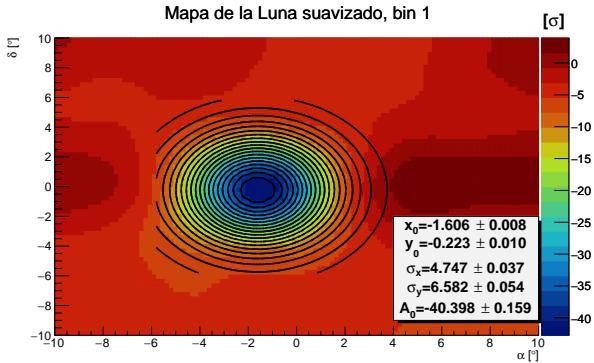
Ahora bien, para los datos obtenidos con múltiples cortes de selección, protonlhe_combined, los ajustes realizados permiten determinar la significancia mínima de cada bin de energía, así como las coordenadas del centro de la sombra de la Luna. En la figura 10, se observa que conforme aumenta la energía el centro de la sombra se va recorriendo hacia el origen y a su vez las fluctuaciones de la significancia aumentan, pues como se anticipaba, a mayor energía más fluctuaciones. Lo primero se puede ver directamente del mapa de colores, o de forma más precisa de los parámetros del ajuste, en donde se aprecia que el parámetro que ajusta la coordenada de la ascensión recta, x_0 en nuestra notación, va tiendiendo a cero para altas energías. También se observa que la significancia mínima que se obtiene con los parámetros de ajuste corresponde a $(-42.677 \pm 0.171)\sigma$ para el bin 2, que se encuentra mucho más arriba que la significancia mínima de los datos protonlhe sin cortes o de la red neuronal, que es de -78.22σ y -88.315σ respectivamente. Es decir, hay menos déficit al considerar más cortes de selección.

En este trabajo se presentó el análisis del déficit de significancia para la reconstrucción de energía usando cascadas de protones, así como una red neuronal. Se encontró que el mayor déficit de significancia para protonlhe está presente en el segundo bin y sigue una tendencia creciente para el rango energético [2.51, 100] TeV. Esto contrasta con el análisis hecho para la reconstrucción con una red neuronal, en donde la significancia mínima está en el bin 0 y el comportamiento de ésta es creciente en todo el rango energético de las cascadas. Por otro lado, la metodología seguida para la creación de mapas lunares resulta efectiva para determinar el centro de la sombra de la Luna, ya que después de suavizar el mapa se distingue claramente la sombra de la Luna, lo cual permite que el realizar un ajuste Gaussiano sea más sencillo. Princi-

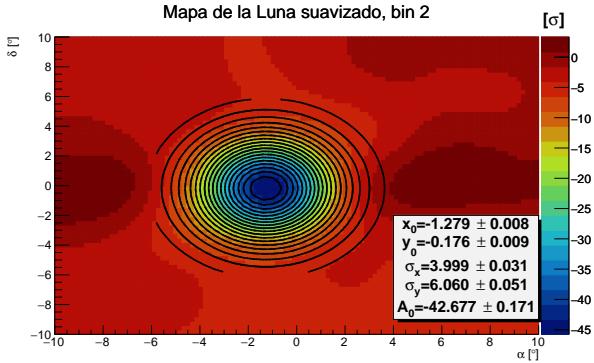
palmente, se observó que el centro de la Luna se encuentra desplazado hacia $\alpha \simeq -1^\circ$ para bajas energías, pero conforme la energía aumenta el centro se recorre al origen del conjunto de coordenadas $\alpha - \delta$. Esto es explicado por la naturaleza de los rayos cósmicos, los cuales interactúan con el campo magnético de la Tierra, lo que causa que su trayectoria sea deflectada, la magnitud de la deflexión depende de la energía y de la masa. Finalmente, se concluye que a energías más altas las fluctuaciones de la significancia incrementan y que mientras más cortes de selección se consideren, el déficit de significancia disminuye.

4. Ápendice A. Mapas de la Luna

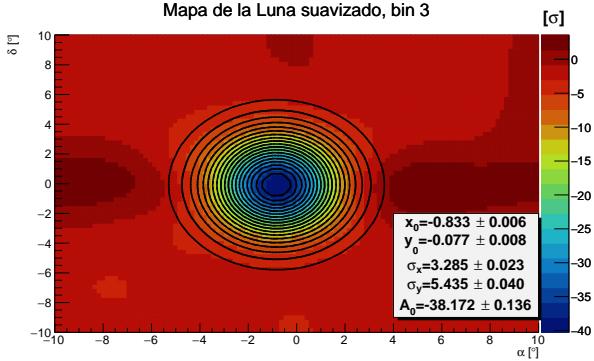
En esta sección se presentan los mapas lunares de los bins 1 al 9 que se obtienen con los datos protonlhe_combined. Para generar todo de forma automática, se escribió un script en BASH que ejecuta el código P7BS.C para cada archivo de datos. El macro P7BS.C aplica el suavizado y hace los ajustes.



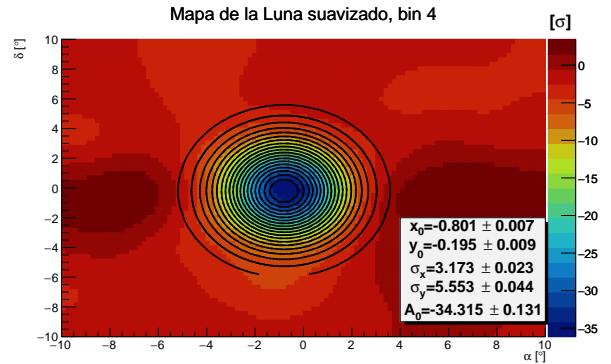
(a)



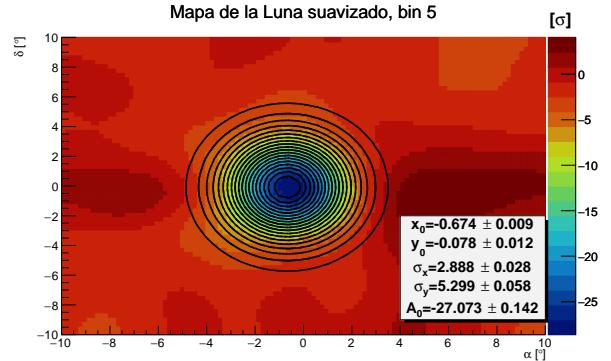
(b)



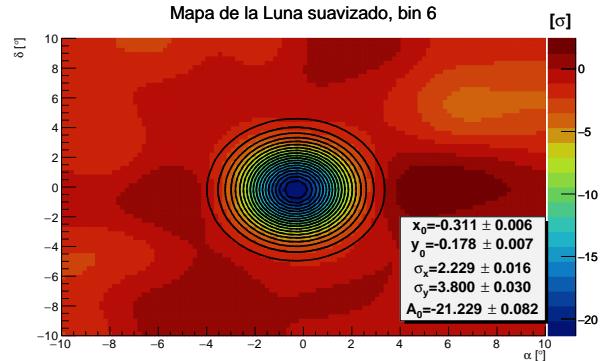
(c)



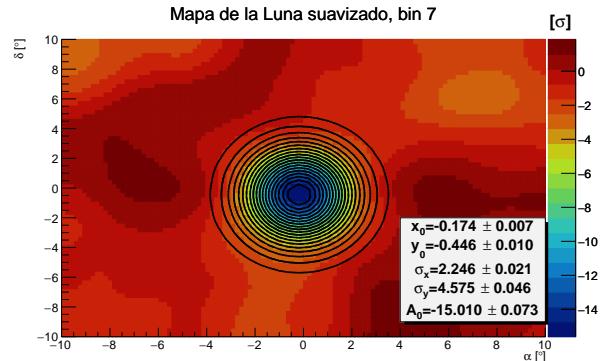
(d)



(e)



(f)



(g)

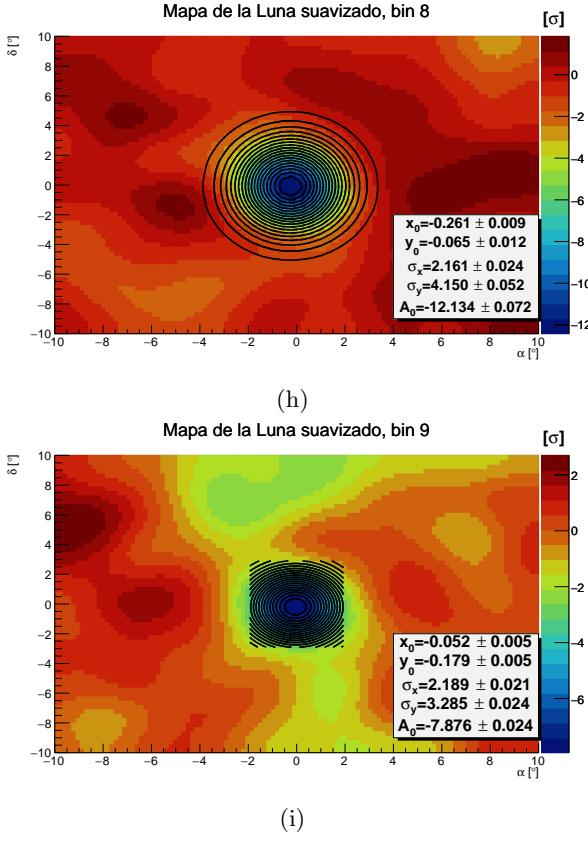


Figura 10: Mapas lunares obtenidos de datos con cortes de selección combinados y el estimador protonlhe (protonlhe_combined). Se muestra del bin 1 al bin 9.

Referencias

- [1] J. Nava A. Carramiña, E. Mendoza and L. Vázquez. The HAWC experiment at the Parque Nacional Pico de Orizaba: A feasibility study for the HAWC Collaboration. Technical report, HAWC Collaboration, 2007.
- [2] J. R. Ángeles Camacho. Desarrollo de algoritmos de identificación de trayectorias de muones en el observatorio HAWC con redes neuronales. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2021.
- [3] D. García Aguilar. Medición del cociente protón - anti protón a energías de TeV con HAWC. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2021.
- [4] A. U. Abeysekara et al. The HAWC Gamma-Ray Observatory: Design, Calibration, and Operation. HAWC Collaboration, 2013.
- [5] A. U. Abeysekara et al. Observation of the Crab Nebula with the HAWC Gamma-Ray Observatory. *Astrophys. J.*, 843:39, 2017. doi: 10.3847/1538-4357/aa7555.
- [6] T. Capistrán, I. Torres, and E. Moreno. Gamma/hadron separation in HAWC using neural networks. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 9908:990845, 2016. doi: 10.1117/12.2232041.
- [7] E. Hivon F. K. Hansen K. M. Górska, B. D. Wandelt and A. J. Banday. The HEALPix Primer. <https://healpix.sourceforge.io/pdf/intro.pdf>, 2021. Revisado: 09/11/21.
- [8] D. McKee and R. Brun. TH2 Class Reference Smooth(). <https://root.cern.ch/doc/master/classTH2.html#a91aad17b096461ea2a869809592efd5a>, 2021. Revisado: 12/11/21.