

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA



TESIS

**DISCRIMINACIÓN GAMMA-PROTÓN UTILIZANDO LAS COMPONENTES
MUÓNICA Y ELECTROMAGNÉTICA SIMULADAS CON CORSIKA PARA
UN OBSERVATORIO DE RAYOS GAMMA EN LA LAGUNA SIBINACocha**

PRESENTADO POR:

BR. DIEGO REINER VILLA RECHARTE

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE FÍSICO**

ASESOR:

MGT. SAYRI TUPAC GARCIA ROCA

CO-ASESOR:

DR. ANDRES SANDOVAL ESPINOSA

CUSCO – PERÚ

2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada:.....

DISCRIMINACIÓN GAMMA-PROTÓN UTILIZANDO LAS COMPONENTES MUÓNICA Y ELECTROMAGNÉTICA SIMULADAS CON CORSIKA PARA UN OBSERVATORIO DE RAYOS GAMMA EN LA LAGUNA SIBINACCOCHA.

presentado por: DIEGO REINER JILLA RECHARTÉ con DNI Nro.: 72281173..... presentado

por: con DNI Nro.: para optar el título profesional/grado académico de FÍSICO.....

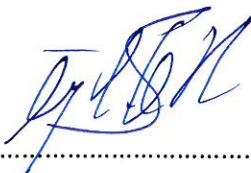
Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 7.....%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 30 de enero de 2025



Firma
Post firma Mst. Sayri Tupac García Roca.

Nro. de DNI 40402436

ORCID del Asesor 0000-0001-7248-6984

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: **oid:** 27259:424948767

Diego Reiner Villa Recharte

Discriminación Gamma-Protón Utilizando las Componentes Muónica y Electromagnética Simuladas con CORSIKA para un...



Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:424948767

Fecha de entrega

30 ene 2025, 11:22 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

30 ene 2025, 11:36 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

Tesis-Discriminación Gamma-Protón Utilizando las Componentes Muónica y Electromagnética Si....pdf

Tamaño de archivo

7.6 MB

125 Páginas

26,911 Palabras

149,932 Caracteres

7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 6%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
59 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

*Dedicado a mi viejita querida, Irma, quien
con su inmensurable amor me impulsa a
seguir adelante.*

*A mi abuelo, quien me cuida desde el cielo y
siempre esperó grandes cosas de mí.*

*A mis padres, que con su inmenso amor son
el motor de mis logros y mi principal
soporte.*

*A mis hermanos, que son mi razón de ser y
el motivo por el que anhelo alcanzar
grandes metas.*

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer profundamente a Dios y la Virgen del Carmen por darme la fuerza suficiente y guiar mis pasos durante el proceso de mi formación profesional.

Asimismo, quiero agradecer a mi familia por todo el apoyo brindado durante todos estos años de mi etapa universitaria.

Me siento enormemente agradecido con mis asesores, el Mgt. Sayri Tupac García Roca y el Dr. Andrés Sandoval Espinosa, por compartirme sus conocimientos y por ser mis mentores en el presente trabajo de investigación.

También quiero expresar mi agradecimiento al Dr. Yúnior Pérez, por brindarme sus conocimientos y la continua capacitación en CORSIKA, que fue el pilar en este trabajo.

Agradecer a mi alma mater, la tricentenaria Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, así como al Vicerrectorado de Investigación a través del programa Yachayninchis Wiñarinanpaq por brindarme la oportunidad de ampliar mis fronteras, permitiéndome conocer el Instituto de Física de la UNAM y el observatorio HAWC.

Por último y no menos importante quiero agradecer a mis docentes y compañeros de carrera, que contribuyeron en mi formación académica y profesional. Así como agradecer a mi fan número uno, gracias por tu apoyo incondicional todo este tiempo que te conozco, sin ti no lo hubiera logrado.

ÍNDICE

ÍNDICE	iv
TABLAS	vii
FIGURAS	viii
RESUMEN	12
ABSTRACT.....	13
INTRODUCCIÓN	14
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.1. Situación Problemática	16
1.2. Formulación del Problema	17
1.2.1. Problema General	17
1.2.2. Problemas Específicos.....	17
1.3. Objetivos de la Investigación	18
1.3.1. Objetivo General	18
1.3.2. Objetivos Específicos	18
1.4. Justificación de la Investigación	19
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	21
2.1. Bases Teóricas.....	21
2.1.1. Rayos Cósmicos	21
2.1.2. Clasificación de la radiación cósmica	22
2.1.2.1. Radiación cósmica según su origen.....	22
2.1.2.2. Radiación cósmica según su interacción con la materia.....	23
2.1.3. Composición de los rayos cósmicos.....	23
2.1.4. Espectro de energía de los rayos cósmicos	25
2.1.5. Rayos Gamma	27
2.1.6. Mecanismos de producción de rayos gamma.....	29
2.1.6.1. Radiación de Sincrotrón	29
2.1.6.2. Bremsstrahlung o radiación de frenado	30
2.1.6.3. Dispersión Inversa de Compton	31
2.1.6.4. Decaimiento del pión neutro	32
2.1.6.5. Fotones producto de la aniquilación materia-antimateria.....	33
2.1.6.6. Fotones de transformaciones nucleares	34
2.1.7. Cascadas atmosféricas extensas	35
2.1.8. Tipos de cascadas	37
2.1.8.1. Cascada Electromagnética.....	38

2.1.8.2. Cascada Hadrónica	40
2.1.9. Muones atmosféricos.....	44
2.1.9.1. Mecanismo de pérdida de energía de muones	45
2.1.10. Radiación Cherenkov	46
2.1.10.1.Efecto Cherenkov en el aire	47
2.1.10.2.Efecto Cherenkov en el agua	49
2.1.11. CORSIKA	51
2.1.12. Modelos de interacción	52
2.1.12.1.Modelos de Interacciones Hadrónicas de Alta Energía.....	52
2.1.12.2.Modelos de Interacciones Hadrónicas de Baja Energía	54
2.1.13. Archivo de entrada (input file)	54
2.1.14. Archivo de salida (output file)	55
2.1.15. ROOT	57
2.1.16. Máquinas de vectores de soporte	57
2.1.16.1.Caso linealmente separable	58
2.1.16.2.Caso no linealmente separable	59
2.2. Antecedentes de la Investigación	60
2.2.1. Antecedentes Internacionales	60
2.2.2. Antecedentes Nacionales.....	64
2.3. Hipótesis.....	65
2.3.1. Hipótesis General	65
2.3.2. Hipótesis Específicas.....	65
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	66
3.1. Enfoque de investigación	66
3.2. Nivel de la investigación.....	66
3.3. Diseño de la investigación	66
3.4. Metodología de la investigación	67
3.4.1. Sitio de las simulaciones	67
3.4.2. Unidad de análisis	67
3.4.3. Técnicas de recolección de información	68
3.4.4. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos	69
3.4.5. Eficiencia en la discriminación	71
3.4.6. Pureza	71
3.4.7. Factor de Calidad (Q-factor)	72
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
4.1. Densidad de las componentes electromagnética y muónica y distribución espacial de las partículas secundarias en el nivel de observación	73

4.1.1. Rayos gammas y protones a 50 GeV y 0°	73
4.1.2. Rayos gammas y protones a 50 GeV y 30°	74
4.1.3. Rayos gammas y protones a 50 GeV y 60°	75
4.1.4. Rayos gammas y protones a 100 GeV y 0°	76
4.1.5. Rayos gammas y protones a 100 GeV y 30°	77
4.1.6. Rayos gammas y protones a 100 GeV y 60°	78
4.1.7. Rayos gammas y protones a 500 GeV y 0°	79
4.1.8. Rayos gammas y protones a 500 GeV y 30°	80
4.1.9. Rayos gammas y protones a 500 GeV y 60°	81
4.1.10. Rayos gammas y protones a 1 TeV y 0°	82
4.1.11. Rayos gammas y protones a 1 TeV y 30°	83
4.1.12. Rayos gammas y protones a 1 TeV y 60°	84
4.1.13. Rayos gammas y protones a 10 TeV y 0°	85
4.1.14. Rayos gammas y protones a 10 TeV y 30°	87
4.1.15. Rayos gammas y protones a 10 TeV y 60°	88
4.2. Distribución de las componentes muónica y electromagnética para los eventos de rayos gamma y protones	89
4.3. Clasificación de rayos gamma y protones con SVM	91
4.4. Discusión general.....	97
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	98
5.1. Conclusiones	98
5.2. Recomendaciones.....	99
BIBLIOGRAFÍA	101
ANEXOS	107
A1. Matriz de Consistencia.....	108
A2. Histogramas de las componentes muónica y electromagnética para cada caso.....	109
A3. Código en C++ para calcular y graficar la densidad de las partículas secundarias. ...	114
A4. Código en C++ para graficar la distribución espacial de las partículas secundarias. .	119
A5. Código en Python para aplicar SVM	122

TABLAS

Tabla 2.1 Bandas de los rayos gamma.....	29
Tabla 2.2 Parámetros y sub-bloques del outputfile de CORSIKA.....	56
Tabla 4.1 Promedios del número de partículas de la CM y CEM por evento	90
Tabla 4.2 Eficiencias de rayos gamma y protones, pureza y factor Q de la discriminación gamma-protón.	95

FIGURAS

Figura 2.1: Un blazar, que emite varios tipos de radiación cósmica, rayos cósmicos y rayos gamma.....	21
Figura 2.2: La abundancia elemental de los rayos cósmicos medida en la Tierra comparada con la abundancia en el sistema solar relativas al carbón = 100.....	24
Figura 2.3: Espectro de rayos cósmicos de todas las partículas a partir de observatorios	25
Figura 2.4: Rangos de energía cubiertos por algunos observatorios para rayos cósmicos y rayos gamma.....	27
Figura 2.5: Espectro electromagnético.	28
Figura 2.6: Producción de radiación sincrotrón por desviación de partículas cargadas en un campo magnético	30
Figura 2.7: Producción de la radiación de frenado por desviación de un electrón en inmediaciones de un núcleo atómico	31
Figura 2.8: Choque de un electrón energético a un fotón de baja energía, transfiriendo parte de su energía al fotón, ocasionado que el electrón se frene.	32
Figura 2.9: Producción de π^0 en interacciones de protones y desintegración de π^0 en dos fotones.....	33
Figura 2.10: Aniquilación de pares (electrón + positrón).....	34
Figura 2.11: Desintegración del núcleo padre, emitiendo un rayo gamma	34
Figura 2. 12: Diagrama de un frente de partículas de una cascada de partículas en el aire. La estrella roja representa el primer punto de interacción de la partícula primaria (núcleo).....	35
Figura 2. 13: Desarrollo longitudinal de una cascada atmosférica. Se muestra el tamaño de la cascada en función de la profundidad atmosférica X_0 (g/cm ²) para diferentes energías primarias ($E1 < E2 < E3 < E4$) , en la figura (a) se muestra su representación semilogarítmica y en (b) la lineal	37
Figura 2.14: Vista esquemática de una cascada electromagnética.	39
Figura 2.15: Cascada hadrónica.....	42
Figura 2.16: Flujo vertical de partículas con $E > 1$ GeV que componen las cascadas atmosféricas. Los puntos representan mediciones de muones negativos con $E > 1$ GeV.	44
Figura 2.17: Una partícula cargada que viaja más rápido que la luz en un medio emite luz azul al polarizar y despolarizar el medio	47
Figura 2.18: El arreglo de 5 telescopios de H.E.S.S, un observatorio de rayos gamma basado en telescopios Cherenkov	49

Figura 2. 19: Observatorio HAWC, cuenta con 300 tanques de agua para la detección de cascadas atmosféricas.	50
Figura 2. 20: Simulaciones con CORSIKA de la cascada atmosférica producida por un fotón (izquierda) y protón (derecha) a 100 GeV	51
Figura 2. 21: Margen del hiperplano de separación: (a) hiperplano de separación no óptimo, (b) hiperplano de separación óptimo y si margen de separación asociado máximo τ_{max}	58
Figura 3.1: Laguna Sibinacocha	67
Figura 3.2: Input file de CORSIKA. Cada parámetro tiene un comentario en el lado derecho que detalla el significado de cada variable con sus respectivas unidades.....	68
Figura 4.1: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 50 GeV a 0°	73
Figura 4.2: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 50 GeV a 30°	74
Figura 4.3: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 50 GeV a 60°	75
Figura 4.4: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 100 GeV a 0°	76
Figura 4.5: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 100 GeV a 30°	77
Figura 4.6: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 100 GeV a 60°	78
Figura 4.7: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 500 GeV a 0°	80
Figura 4.8: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 500 GeV a 30°	81

Figura 4.9: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 500 GeV a 60°.....	82
Figura 4.10: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 1 TeV a 0°.....	83
Figura 4.11: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 1 TeV a 30°.....	84
Figura 4.12: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 1 TeV a 60°.....	85
Figura 4.13: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 10 TeV a 0°.....	86
Figura 4.14: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 10 TeV a 30°.....	87
Figura 4.15: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 10 TeV a 60°.....	88
Figura 4.16: Componente muónica vs componente electromagnética de los 50 000 eventos simulados para rayos gamma y protones, cada uno con energías de 50 GeV, 100 GeV, 500 GeV, 1 TeV y 10 TeV y ángulos cenitales 0°, 30° y 60°.....	91
Figura 4.17: Dispersión del número de partículas de la CM vs el número de partículas de la CEM, hiperplano de separación (línea punteada) para los eventos de rayos gamma (azul) y protones (rojo) con energías de 50 GeV y 100 GeV.....	92
Figura 4.18: Dispersión del número de partículas de la CM vs el número de partículas de la CEM, hiperplano de separación (línea punteada) para los eventos de rayos gamma (azul) y protones (rojo) con energías de 500 GeV y 1 TeV.....	93
Figura 4.19: Dispersión del número de partículas de la CM vs el número de partículas de la CEM, hiperplano de separación (línea punteada) para los eventos de rayos gamma (azul) y protones (rojo) con energías de 10 TeV.....	94

Figura 4.20: Factor Q en función de las energías de las partículas primarias, para cada ángulo	
.....	96

RESUMEN

La discriminación entre rayos gamma y protones es un desafío clave en la astrofísica de altas energías, esencial para identificar fuentes cósmicas y comprender fenómenos extremos en el universo. Este trabajo evaluó la eficacia de las componentes muónica y electromagnética para separar rayos gammas de protones, utilizando simulaciones realizadas con CORSIKA para un observatorio de rayos gamma en la Laguna Sibilnacocho (4 900 m s.n.m.). Se simularon 50 000 eventos para rayos gamma y protones con energías de 50 GeV a 10 TeV, y ángulos cenitales de 0°, 30° y 60°. Los datos obtenidos fueron analizados con un modelo de Máquinas de Vectores de Soporte (SVM, por sus siglas en inglés, *Support Vector Machine*), evaluando métricas clave como eficiencia, pureza y el factor Q. Los resultados mostraron una diferencia entre las densidades de ambas componentes para cada tipo de partícula primaria, además que la eficiencia para rayos gamma superó consistentemente el 94%, alcanzando valores $\geq 99\%$ en las energías más altas. La pureza se mantuvo alta ($>85\%$) en la mayoría de las configuraciones, y el factor Q alcanzó valores óptimos, como 14.48 para 10 TeV a 60°, demostrando una discriminación efectiva. Estos hallazgos confirman que las componentes muónica y electromagnética a esta altitud son herramientas sólidas para separar rayos gamma de protones en condiciones simuladas, lo que valida la viabilidad de construir un observatorio en Sibilnacocho.

Palabras clave: Discriminación gamma-protón, Componente Muónica, Componente Electromagnética, SVM, Sibilnacocho

ABSTRACT

Discrimination between gamma rays and protons is a key challenge in high-energy astrophysics, essential for identifying cosmic sources and understanding extreme phenomena in the Universe. This work evaluated the effectiveness of the muonic and electromagnetic components to separate gamma rays from protons, using simulations performed with CORSIKA for a gamma-ray observatory at Laguna Sibinacocha (4 900 m a.s.l.). 50 000 events were simulated for gamma rays and protons with energies from 50 GeV to 10 TeV, and zenith angles of 0°, 30° and 60°. The data obtained were analyzed with a Support Vector Machine (SVM) model, evaluating key metrics such as efficiency, purity and the Q factor. The results showed a difference between the densities of both components for each type of primary particle, and the efficiency for gamma rays consistently exceeded 94%, reaching values $\geq 99\%$ at the highest energies. Purity remained high ($>85\%$) in most configurations, and the Q factor reached optimal values, such as 14.48 for 10 TeV at 60°, demonstrating effective discrimination. These findings confirm that the muonic and electromagnetic components at this altitude are robust tools to separate gamma rays from protons under simulated conditions, validating the feasibility of building an observatory at Sibinacocha.

Keywords: Gamma-proton discrimination, Muonic component, Electromagnetic component, SVM, Sibinacocha

INTRODUCCIÓN

En el universo ocurren eventos astrofísicos extremos, como los generados por núcleos galácticos activos, supernovas y agujeros negros supermasivos, que emiten enormes cantidades de energía, parte de la cual llega a la Tierra en forma de rayos cósmicos y rayos gamma. Los rayos cósmicos, formados por partículas cargadas y núcleos ionizados, se desvían durante su trayectoria debido a la influencia de los campos magnéticos galácticos y extragalácticos (Alania et al., 2009). Por otro lado, los rayos gamma se propagan sin desviaciones desde su origen, lo que los convierte en herramientas valiosas para identificar fuentes de alta energía.

Los rayos gamma de muy alta energía (100 GeV – 100 TeV) son particularmente relevantes para el estudio de los eventos no térmicos más extremos del universo (Conceição et al., 2021). Este rango de energías se puede estudiar mediante telescopios de imágenes de Cherenkov en aire y arreglos de detectores de Cherenkov en agua (Zuñiga, 2017). Un gran desafío en la detección de los rayos gamma es el fondo dominante de cascadas producidas por hadrones, comúnmente conocido como ruido hadrónico o *background*, que puede llegar a ser hasta cuatro ordenes de magnitud superior al de los rayos gammas. Además, los observatorios actuales se enfrentan a la limitación de solo poder detectar partículas con energías superiores a cierto umbral, ya que las de menor energía se absorben en la atmósfera antes de llegar a los detectores. (Conceição et al., 2021).

Los observatorios de arreglos de tanques Cherenkov discriminan las señales basándose en las diferencias de las propiedades de las cascadas atmosféricas (Zuñiga, 2017). Dado esto, es importante seguir investigando métodos para la separación gamma/hadrón, así como la construcción de nuevos observatorios en sitios de mayor altitud que los actuales. Si bien, observatorios como HAWC y LHAASO, ubicados en el hemisferio norte, tienen una visibilidad óptima del cielo extragaláctico, su capacidad de observación del centro y plano

galáctico está limitada (Doro et al., 2022). En contraste, un observatorio en la laguna Sibinacocha, ubicada en el hemisferio sur y a mayor altitud que estos observatorios, podría ofrecer ventajas significativas para la observación de la Vía Láctea y los rayos gamma. Su proximidad al desarrollo máximo de las cascadas atmosféricas permitiría obtener más datos sobre las partículas detectadas, facilitando un análisis más preciso de las fuentes primarias y mejorando la discriminación entre rayos gamma y hadrones.

Este estudio evalúa la eficacia de las componentes muónica y electromagnética en la discriminación entre rayos gamma y protones, simulados con CORSIKA, considerando variaciones en energía y ángulo cenital, para un Observatorio de Rayos Gamma en la laguna Sibinacocha. Para ello, se realizan simulaciones de rayos gamma y protones entre energías de 50 GeV a 10 TeV y ángulos cenitales de 0° , 30° y 60° , de los cuales se evalúan las componentes muónica y electromagnética, asimismo se aplica el método de Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) para discriminar entre eventos de rayos gamma y protones, utilizando la cantidad de partículas de ambas componentes. Este estudio está limitado a las simulaciones realizadas con CORSIKA y no considera observaciones experimentales en esta etapa.

El presente trabajo de investigación consta de 5 capítulos, además de anexos. En el Capítulo I se abordan los aspectos más importantes que sustentan la investigación, se plantean los problemas, los objetivos y la justificación, en el Capítulo II se expone el marco teórico, además las investigaciones que anteceden a esta, el Capítulo III explica la metodología aplicada, en el Capítulo IV se presenta el análisis, interpretación y discusión de los resultados, y el Capítulo V expone las conclusiones y recomendaciones. Finalmente, se incluyen la bibliografía y los anexos.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación Problemática

En el universo existen eventos extremos, como los generados por núcleos galácticos activos (AGN, por sus siglas en inglés, *Active Galactic Nucleus*), agujeros negros supermasivos, supernovas, colisiones de galaxias, entre otros, que son de interés para el ser humano debido a la enorme cantidad de energía que liberan al espacio y los mecanismos de aceleración de partículas a altas energías. Parte de la energía que llega a la Tierra es en forma de rayos cósmicos y rayos gamma, los cuales son herramientas esenciales para estudiar estos fenómenos. Los rayos cósmicos, compuestos por partículas cargadas y núcleos ionizados, se desvían en su trayecto hacia nuestro planeta debido a la influencia de los campos magnéticos galácticos y extragalácticos (Alania et al., 2009). En cambio, los rayos gamma viajan en línea recta desde su origen y permiten localizar con precisión las fuentes de partículas de alta energía, lo que hace que su detección sea de suma importancia.

La detección directa de rayos gamma sólo es posible con instrumentos colocados en satélites (Atwood et al., 2009). Sin embargo, a partir de unos cientos de GeV, el flujo de rayos gamma es muy bajo, por lo que únicamente los observatorios terrestres pueden detectarlos indirectamente mediante la medición de las cascadas atmosféricas que producen (Degrange & Fontaine, 2015). La mayoría de las cascadas son iniciadas por rayos cósmicos hadrónicos de flujo isotrópico, lo que plantea la necesidad de utilizar técnicas eficientes para poder diferenciar las cascadas inducidas por rayos gamma de las producidas por hadrones (fondo) (Hillas, 1996).

El rango de rayos gamma que va desde ~ 100 GeV hasta unos pocos cientos de TeV, conocidos como rayos gamma de muy alta energía (VHE, por sus siglas en inglés, *Very High Energy*), son particularmente relevantes para el estudio de los eventos no térmicos más

extremos que suceden en el universo (Conceição et al., 2021). Para energías de unos TeV, las cascadas de protones comienzan a tener una gran cantidad de muones que pueden alcanzar el nivel del suelo. En contraste, para la misma energía, se espera que las cascadas inducidas por rayos gamma tengan menos muones. Por lo tanto, el contenido muónico de la cascada puede explorarse para lograr una excelente discriminación gamma/hadrón (Hillas, 1996). Sin embargo, para energías más bajas ($\sim 50 \text{ GeV} - 10 \text{ TeV}$), este rechazo en los observatorios de superficie se vuelve más complejo debido a la menor discriminación entre señales de rayos gamma y el fondo hadrónico.

Este estudio tiene como objetivo evaluar la discriminación entre rayos gamma y hadrones, particularmente protones, utilizando las componentes muónica y electromagnética simuladas con CORSIKA (Heck & Pierog, 2023). Se busca analizar cómo la cantidad y distribución de fotones, electrones, positrones y principalmente muones en cascadas atmosféricas en el nivel de observación, pueden ser utilizadas para mejorar la separación entre estos dos tipos de partículas para diferentes energías y ángulos de incidencia.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿Qué tan eficaces son las componentes muónica y electromagnética simuladas con CORSIKA para discriminar rayos gamma y protones en un Observatorio de Rayos Gamma en la Laguna Sibinacocha?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cómo varía el número de partículas y su distribución espacial en las cascadas atmosféricas producidas por rayos gamma y protones a diferentes ángulos y energías?

- ¿Cómo varía la densidad superficial de las componentes muónica y electromagnética en las cascadas atmosféricas generadas por rayos gamma y protones en el nivel de observación?
- ¿Cuál es la cantidad de partículas correspondientes a las componentes muónica y electromagnética por cascada que generan los rayos gamma y protones a diferentes ángulos y energías en el nivel de observación?
- ¿Cuál es la eficiencia, pureza y Factor Q del modelo SVM aplicado a las componentes muónica y electromagnética para separar los eventos iniciados por rayos gamma de los protones, para diferentes ángulos y energías?

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo General

Evaluar la eficacia de las componentes muónica y electromagnética simuladas con CORSIKA para discriminar rayos gamma y protones en un Observatorio de Rayos Gamma en la Laguna Sibinacocha.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Analizar el número de partículas y su distribución espacial en el nivel de observación de las cascadas atmosféricas producidas por rayos gamma y protones a diferentes ángulos y energías.
- Calcular la densidad superficial de las componentes muónica y electromagnética de las cascadas atmosféricas generadas por rayos gamma y protones en el nivel de observación.

- Determinar el número de partículas correspondientes a las componentes muónica y electromagnética por cascada que generan los rayos gamma y protones a diferentes ángulos y energías en el nivel de observación.
- Calcular la eficiencia, pureza y Factor Q del modelo SVM aplicado a las componentes muónica y electromagnética para separar los eventos iniciados por rayos gamma de los protones, para diferentes ángulos y energías.

1.4. Justificación de la Investigación

El estudio de la discriminación entre rayos gamma y protones es crucial en la astrofísica de partículas, ya que los rayos gamma de muy alta energía permiten investigar eventos no térmicos extremos en el universo e incluso explorar teorías más allá del modelo estándar, abordando cuestiones fundamentales como la naturaleza de la materia oscura (Conceição et al., 2021). Las diferencias en la producción de partículas de las componentes muónica y electromagnética entre estas partículas primarias ofrece un método prometedor para mejorar dicha discriminación. Sin embargo, existe una brecha de conocimiento respecto a la eficacia de este método en entornos de alta altitud como la Laguna Sibilacocha, donde la delgada atmósfera, las condiciones atmosféricas y el campo magnético terrestre en este punto podrían afectar significativamente la detección de las partículas secundarias.

Aunque observatorios como HAWC y LHAASO, situados en el hemisferio norte, tienen una excelente visibilidad del cielo extragaláctico, su capacidad para observar el centro y plano galáctico es limitada debido a su ubicación geográfica (Doro et al., 2022). En contraste, un observatorio situado en la laguna Sibilacocha, en el hemisferio sur, podría ofrecer ventajas significativas para la observación del centro de la Vía Láctea y la detección de los rayos gamma. Además, al estar ubicada a mayor altitud que estos observatorios, se encuentra más próxima al desarrollo máximo de las cascadas atmosféricas, lo que permitiría una mayor

recopilación de datos sobre las partículas detectadas, mejorando el análisis de las fuentes primarias y la discriminación de las mismas.

Este estudio contribuirá al campo de la astrofísica al evaluar cuantitativamente la producción de partículas de las componentes muónica y electromagnética en cascadas atmosféricas inducidas por rayos gamma y protones, explorando cómo estas diferencias pueden utilizarse para desarrollar técnicas de discriminación más precisas. Además, proporcionarán una base sólida para la creación de un observatorio de rayos gamma en la Laguna Sibilacocha, estableciendo un antecedente basado en simulaciones de cascadas atmosféricas. Lo que representaría una contribución significativa para la astrofísica en América Latina, colocando a Cusco en una posición sobresaliente en el área de la investigación de física de altas energías.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1. Bases Teóricas

2.1.1. Rayos Cósmicos

Los rayos cósmicos son partículas que llegan a la atmósfera de la Tierra a un ritmo aproximado de mil por metro cuadrado por segundo, de los cuales aproximadamente un 90% son protones, un 9% son partículas alfa y el resto son núcleos más pesados, estos se caracterizan por tener altas energías y muchos de los cuales son relativistas (Gaisser et al., 2016). Fueron descubiertos en 1912 por Víctor Hess utilizando un electroscoipo en un globo, quien observó que a medida que ascendía la tasa de radiación aumentaba, un hecho contrario a lo que se pensaba en ese tiempo, pues se creía que los espectrómetros detectaban mayor radiación en la superficie terrestre debido a las fuentes radiactivas naturales. Los rayos cósmicos provienen de diversas regiones del universo (ver Figura 2.1) y se aceleran a través de mecanismos aún no completamente comprendidos, alcanzando energías que van desde 10^8 eV hasta 10^{20} eV , superando con creces las energías alcanzadas por los aceleradores de partículas más potentes.

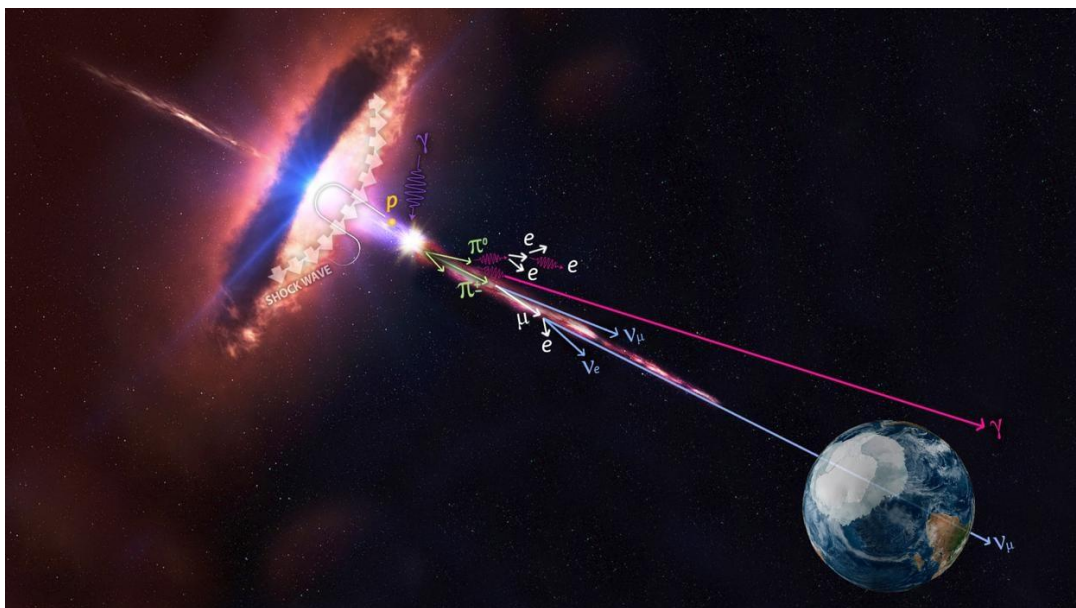


Figura 2.1: Un blazar, que emite varios tipos de radiación cósmica, rayos cósmicos y rayos gamma.
Fuente: IceCube/NASA

Los rayos cósmicos no pueden proporcionar información precisa sobre la dirección de su fuente, ya que, debido a su carga, se desvían de su trayectoria mientras interactúan con campos magnéticos a lo largo de su camino desde la fuente hasta la atmósfera terrestre (Gaisser, 2016). Por tanto, el origen de los rayos cósmicos sigue siendo una cuestión abierta en la Física de Astropartículas.

2.1.2. Clasificación de la radiación cósmica

La radiación cósmica se puede clasificar según su origen o según las interacciones que hayan tenido con la materia en el espacio exterior.

2.1.2.1. Radiación cósmica según su origen

Radiación cósmica extragaláctica

Las fuentes extragalácticas se refieren a objetos o sistemas que emiten radiación más allá de los límites de la Vía Láctea, pero a diferencia de las fuentes galácticas, tienen energías más altas. Entre ellos se encuentran los AGN, incluidos blazares, cuásares, agujeros negros estelares y no estelares, púlsares extragalácticos, cúmulos de galaxias, estallidos de rayos gamma (GRB, por sus siglas en inglés, *Gamma-Ray Burst*), entre otros (Ong, 1998).

Radiación cósmica galáctica

Las fuentes galácticas son cuerpos celestes ubicados dentro de la Vía Láctea que emiten radiación cósmica. Algunos ejemplos de estas fuentes son restos de supernova, estrellas binarias, micro-cuásares, púlsares, inclusive el centro galáctico, el cual tiene un agujero negro supermasivo, que junto con una alta concentración de estrellas masivas y otros cuerpos celestes de interés pueden ser emisores de rayos gamma (Osorio, 2019).

Radiación cósmica solar

La radiación cósmica solar está compuesta por partículas cargadas provenientes del Sol, son relativamente pocas a altas energías y principalmente son electrones, protones y núcleos de helio. Parte de esta radiación es emitida constantemente por la corona solar por lo que se conoce como viento solar. La mayoría de los rayos cósmicos galácticos y extragalácticos presentan una correlación inversa con la actividad solar, puesto que, durante los periodos de mayor actividad solar, el viento solar actúa como una barrera para estos rayos cósmicos (Gaisser et al., 2016).

2.1.2.2. Radiación cósmica según su interacción con la materia

Radiación cósmica primaria

Es la radiación cósmica que llega hasta la atmosfera terrestre, la cual proviene directamente de las fuentes astrofísicas, pese a que una parte de esta radiación (rayos cósmicos) sufre modificaciones en la trayectoria de su propagación por el espacio galáctico y extragaláctico (Gruppen, 2020).

Radiación cósmica secundaria

Es la radiación que se produce cuando los rayos cósmicos primarios interactúan con la atmósfera terrestre, dando lugar a colisiones que pueden ocurrir de dos maneras: con la estructura electrónica del átomo, produciendo ionización; o directamente con el núcleo, que implica grandes cambios de energía. Solo en las colisiones nucleares se genera un aumento significativo de partículas secundarias cargadas (Velázquez, 2017).

2.1.3. Composición de los rayos cósmicos

En la Figura 2.2 se compara las abundancias relativas de los elementos de los rayos cósmicos con las del sistema solar. Ambas muestran el patrón impar-par, donde existe mayor

cantidad de núcleos con Z par, ya que están más fuertemente ligados. Sin embargo, hay dos diferencias notables entre ambas composiciones. La primera es que los núcleos con $Z > 1$ son mucho más abundantes en los rayos cósmicos en comparación con los protones, en relación con el material del sistema solar. Aunque no se comprende completamente esta discrepancia, podría deberse a que el hidrógeno es más difícil de ionizar y ser acelerado, o quizá indique una diferencia real en la composición de la fuente. La segunda diferencia es que los dos grupos de elementos Li, Be, B y Sc, Ti, V, Cr, son mucho más abundantes en la radiación cósmica que en el material del sistema solar, a pesar de estar prácticamente ausentes en los productos de la nucleosíntesis estelar. Estos elementos aparecen en la radiación cósmica como productos de la espalación de elementos más masivos, especialmente carbono, oxígeno y hierro, a través de colisiones con el medio interestelar (Gaisse et al., 2016).

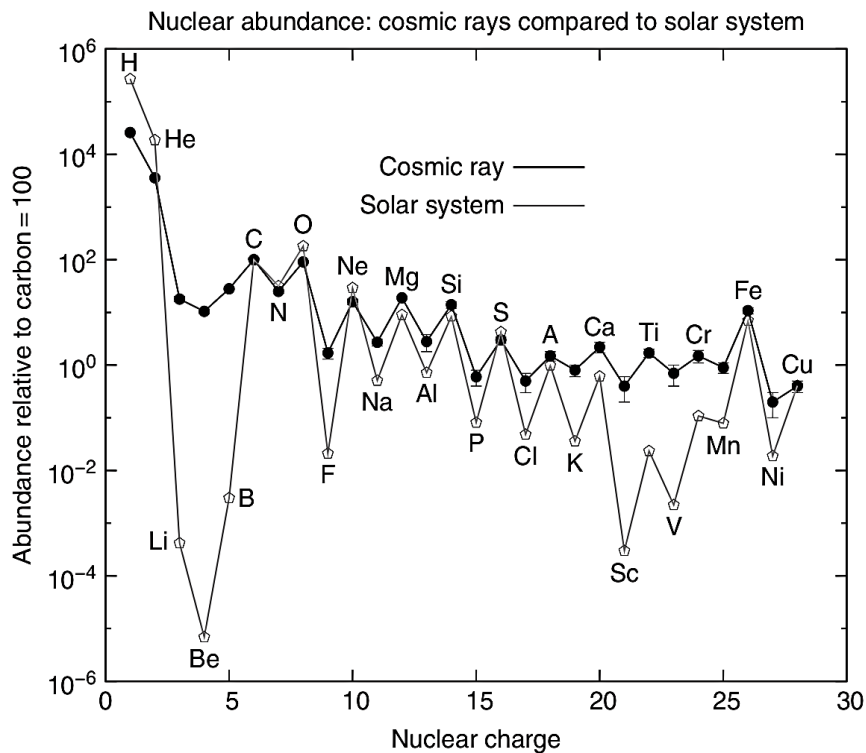


Figura 2.2: La abundancia elemental de los rayos cósmicos medida en la Tierra comparada con la abundancia en el sistema solar relativas al carbono = 100 (Gaisser et al., 2016).

2.1.4. Espectro de energía de los rayos cósmicos

Las partículas cargadas que llegan del espacio exterior pueden llegar a ser extremadamente energéticas, superando por mucho las mayores energías alcanzadas mediante aceleradores de partículas. Desde hace varios años y a través de diferentes observatorios, se viene estudiando el espectro de energía de los rayos cósmicos.

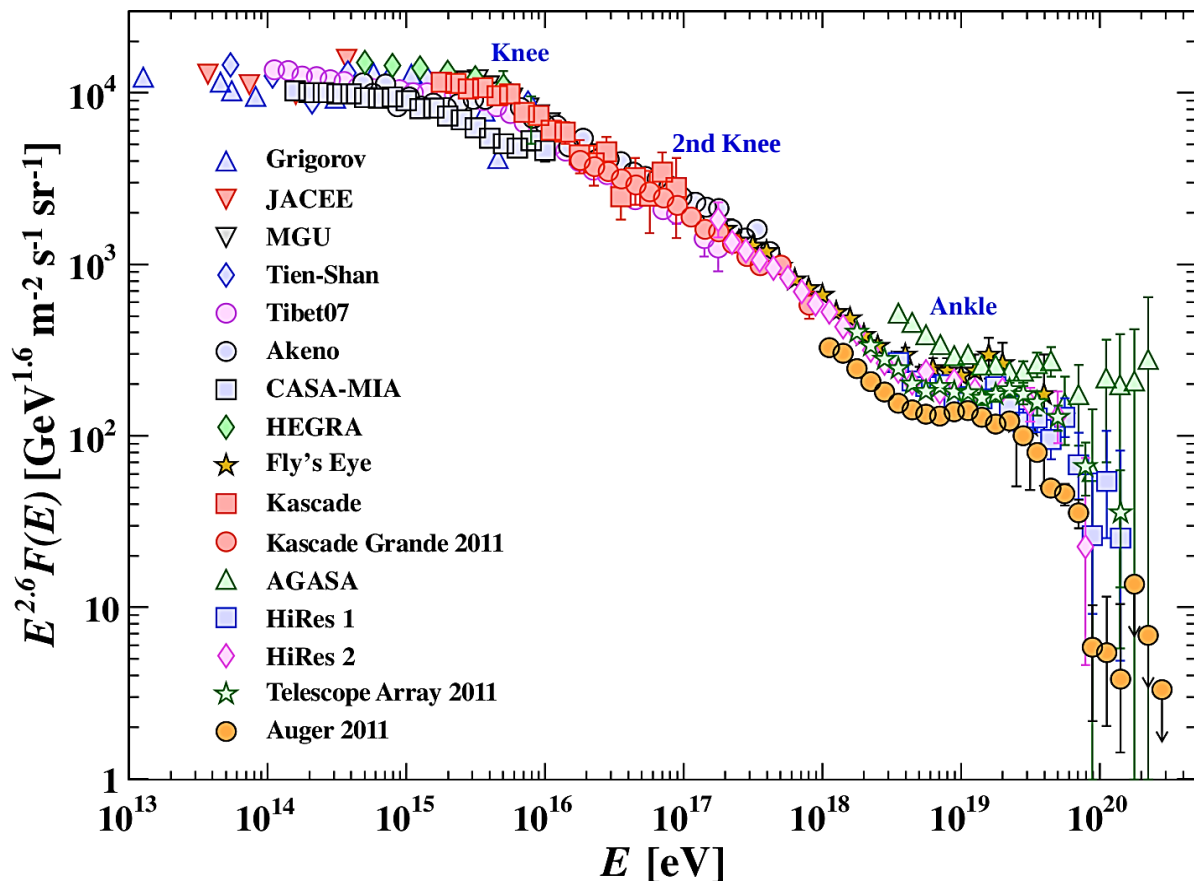


Figura 2.3: Espectro de rayos cósmicos de todas las partículas a partir de observatorios (Olive, 2014).

Este estudio del rango de energía se centra en analizar la estructura del mismo, ya que las variaciones que presenta pueden dar información sobre la dinámica de los entornos donde los rayos cósmicos son acelerados, así como las características del medio que atraviesan (Alfaro et al., 2017). Los cambios en la estructura del espectro pueden ayudar a comprender la transición entre fuentes galácticas y extragalácticas. El flujo que abarca todas las componentes

nucleares presentes en los rayos cósmicos se conoce como espectro de todas las partículas y se ha encontrado que puede ser descrito por una ley de potencias

$$N(E)dE \propto E^{-\alpha}dE \quad (2.1)$$

donde el valor del índice espectral α varía según el intervalo de energía.

Los rayos cósmicos de baja energía ($< 10^9$ eV) que presentan un índice promedio de $\alpha \sim 2.8$ (HAWC, 2024), provienen principalmente del sistema solar, ya que otras partículas cargadas que llegan de la galaxia son moduladas por el viento solar. Además, los rayos cósmicos de más baja energía son afectados por el campo geomagnético que deben atravesar para llegar a la atmósfera terrestre (Zuñiga, 2017).

Como se ve en la Figura 2.3, el primer cambio en la estructura sucede alrededor de 3×10^{15} eV en un punto denominado *knee* (rodilla) en donde el índice cambia de 2.7 a 3, próximos a la región se encuentran los rayos cósmicos de muy alta energía y el flujo es de aproximadamente una partícula por metro cuadrado al año. Este comportamiento se cree que está relacionado con los remanentes de supernova (SNR, por sus siglas en inglés, *Supernova Remnant*) dentro de nuestra galaxia y su aceleración es mediante ondas de choque (Grieder, 2010).

El segundo cambio sucede alrededor de 2×10^{17} eV y se le conoce como *second knee* (segunda rodilla) en donde el índice cambia de 3 a 3.3 mientras que en 3×10^{18} eV sucede el tercer cambio denominado *ankle* (tobillo) con $\alpha \sim 2.7$ (Aguilar M. , 2011). En esta zona, el cambio de forma del espectro, se interpreta como una transición entre el origen galáctico y extragaláctico de los rayos cósmicos (Stanev, 2010). Por encima de 10^{18} eV, se consideran rayos cósmicos ultra energéticos, cuyas intensidades son extremadamente bajas con un flujo

aproximado de una partícula por kilómetro cuadrado al año (Asorey, 2012). Los AGN son los principales candidatos como fuentes para emitir esta radiación. Las mayores energías detectadas hasta ahora son del orden de 10^{20} eV y han sido muy escasos.

Los diferentes observatorios destinados a la medición de la radiación cósmica tienen una mejor precisión en ciertos rangos de energía dependiendo de sus características, como se puede apreciar en la Figura 2.4.

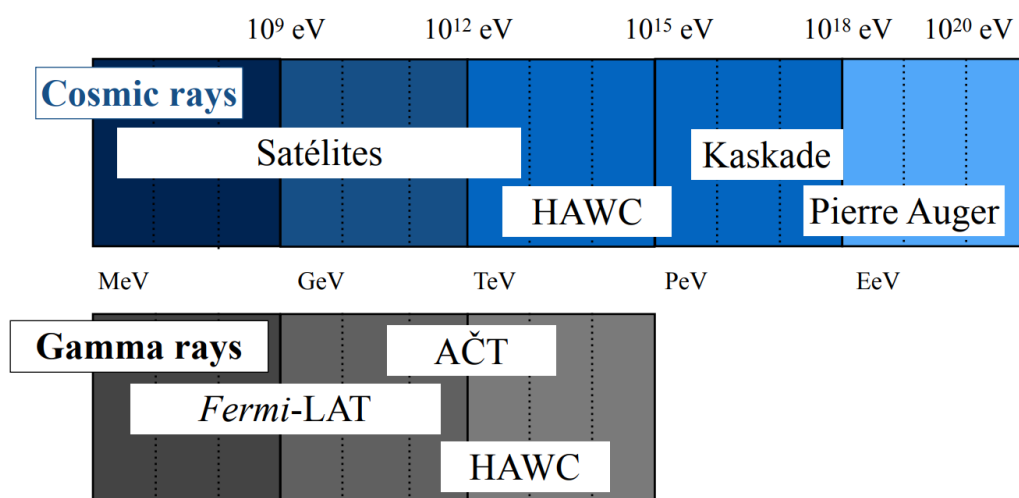


Figura 2.4: Rangos de energía cubiertos por algunos observatorios para rayos cósmicos y rayos gamma (Carramiñana, 2019).

2.1.5. Rayos Gamma

Los rayos gamma (γ) son fotones altamente energéticos que pueden alcanzar, en teoría, energías desde aproximadamente 100 keV (10^5 eV) hasta > 100 EeV (10^{20} eV) (Weekes, 2003). Sin embargo, hasta el momento el rayo gamma más energético lo registró el observatorio LHAASO en febrero del presente año, con una energía de 2.5 PeV (2.5×10^{15} eV). Los rayos gamma son emitidos principalmente desde entornos extremos en el Universo, como los SNR, AGN y GRB. Al no tener carga eléctrica, viajan en trayectorias rectas, ya que no interactúan con los campos electromagnéticos presentes entre la fuente y la atmósfera terrestre. Por lo tanto, cuando se observan, pueden proporcionar información sobre

la dirección en la que se encuentra la fuente, lo que los convierte en una herramienta esencial para la astronomía.

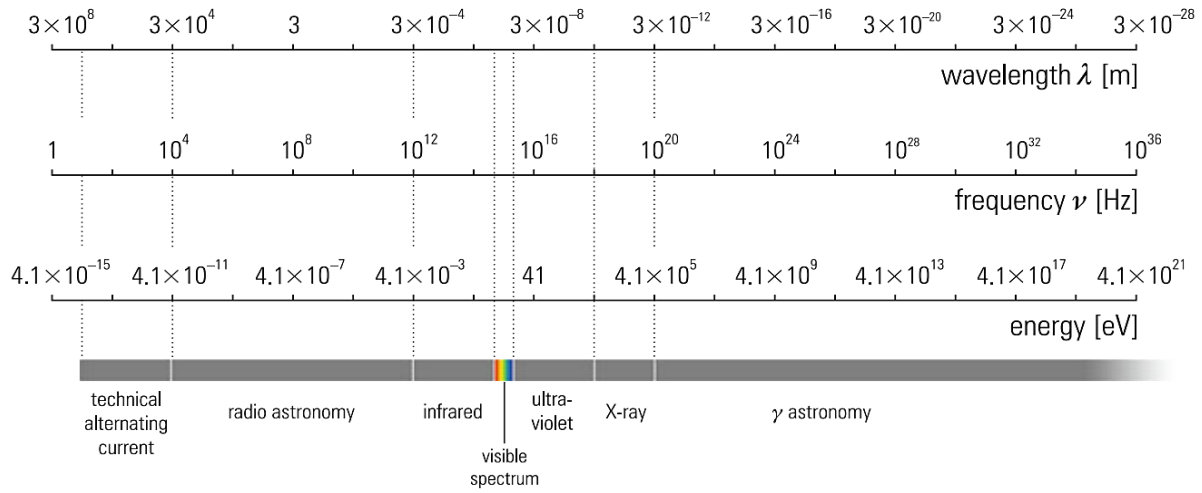


Figura 2.5: Espectro electromagnético (Gruppen, 2020).

Usualmente, en la astronomía de rayos gamma, para caracterizar la radiación gamma no se utiliza la longitud de onda (λ) o la frecuencia (ν), sino la energía (E) (ver Figura 2.5). Como estos fotones presentan una λ del orden de 10^{-11} m y más pequeña, según la relación de Planck (Ec. 2.1),

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.2)$$

donde h es la constante de Planck y c es la velocidad de la luz.

Dado que la atmósfera terrestre es opaca a los fotones de mayor energía, los rayos gamma no penetran la atmósfera de la Tierra como lo hace la luz visible y no se pueden detectar directamente desde la superficie. Para compensar este hecho, existen detectores de rayos gamma a bordo de los satélites, como el telescopio Fermi. Sin embargo, los satélites (Fig. 2.4) solo observan un rango de energía limitado de rayos gamma, de 1 GeV a 300 GeV (Gruppen, 2020). Cuando un rayo gamma interactúa en lo alto de la atmósfera, produce una cascada de

partículas relativistas secundarias, la cual puede ser detectada indirectamente mediante telescopios en la superficie terrestre (Reyes et al., 2017).

Dado que el espectro energético de los rayos gamma (Figura 2.5) es muy amplio y existen diferentes formas de detección, se clasifican según su energía en cuatro rangos diferentes como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1

Bandas de los rayos gamma.

Banda	Low/médium (Baja/Mediana)	High (Alta)	Very High (Muy Alta)	Ultra High (Ultra Alta)
Abreviatura	LE/ME	HE	VHE	UHE
Rango	0.1 – 30 MeV	30 MeV – 100 GeV	100 GeV – 100 TeV	> 100 TeV
Energía típica	keV – MeV	MeV – GeV	TeV	PeV – EeV
Detección	Espacio	Espacio	Superficie terrestre	Superficie terrestre

Nota: Adaptado de (Weekes, 2003)

2.1.6. Mecanismos de producción de rayos gamma

Los rayos gamma pueden originarse tanto de procesos completamente leptónicos como de procesos hadrónicos. Se cree que los rayos gamma de muy alta energía provienen de fuentes no térmicas, principalmente de procesos hadrónicos, ya que los protones y núcleos, al tener mayor masa, pueden ser acelerados más eficientemente que los electrones a grandes energías (Grieder, 2010). Los rayos gamma pueden producirse por diferentes mecanismos, tales como (Grupe, 2020):

2.1.6.1. Radiación de Sincrotrón

Es el fenómeno en el cual, las partículas cargadas que son desviadas por un campo magnético experimentan un movimiento acelerado y, por consiguiente, irradian ondas

electromagnéticas (Figura 2.6). En campos magnéticos cósmicos, la radiación de sincrotrón que se produce es mayormente ocasionada por electrones, y el espectro energético de los fotones es continuo. La potencia P irradiada por un electrón acelerado es

$$P = \frac{e^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \quad (2.3)$$

Donde

- e es la carga eléctrica de la partícula
- a es la aceleración de la partícula
- ϵ_0 es la permitividad eléctrica del vacío
- c es la velocidad de la luz

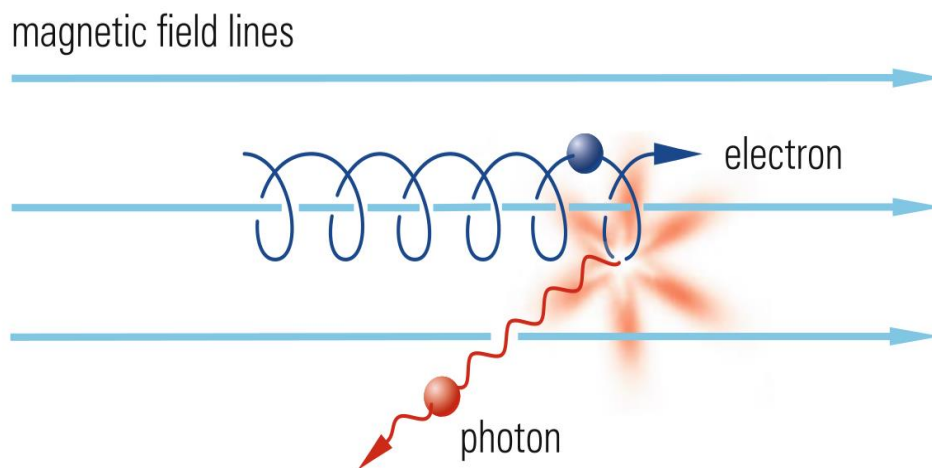


Figura 2.6: Producción de radiación sincrotrón por desviación de partículas cargadas en un campo magnético (Gruppen, 2020).

2.1.6.2. Bremsstrahlung o radiación de frenado

Una partícula cargada que se desvía y desacelera por el campo eléctrico de un núcleo atómico o electrón, emite fotones de radiación de frenado. El mecanismo es de cierta forma similar a la radiación de sincrotrón, solo que en este caso la desviación de la partícula se produce en el campo eléctrico de una carga, en lugar de un campo magnético (Figura 2.7).

La probabilidad de radiación de frenado (φ) varía dependiendo de la carga del proyectil z , energía E , masa m y carga del blanco Z , de la forma:

$$\varphi \sim z^2 Z^2 \frac{E}{m^2} \quad (2.4)$$

La radiación de frenado es generada principalmente por electrones, debido a su pequeña masa. El espectro de energía de los fotones Bremsstrahlung es continuo y disminuye en proporción $1/E_\gamma$ hasta alcanzar energías altas.

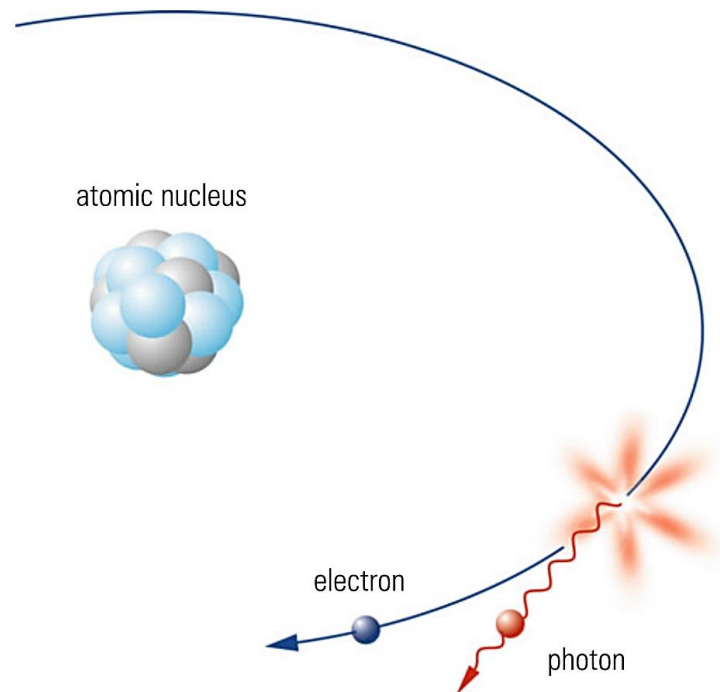


Figura 2.7: Producción de la radiación de frenado por desviación de un electrón en inmediaciones de un núcleo atómico (Gruppen, 2020).

2.1.6.3. Dispersión Inversa de Compton

El efecto Compton es el fenómeno que ocurre cuando los fotones al colisionar con electrones libres, pueden transferirles parte de su energía y volverse menos energéticos. En astrofísica, el proceso inverso juega un papel importante. Los electrones acelerados a altas energías en la fuente colisionan con los numerosos fotones de la radiación del Fondo Cósmico

de Microondas o con fotones de la luz emitida por estrellas, transfiriéndoles parte de su energía y volviéndolos más energéticos (Figura 2.8).

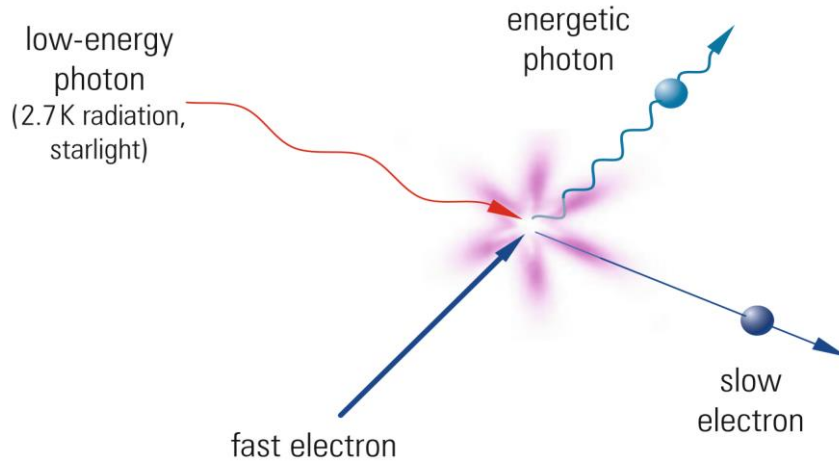
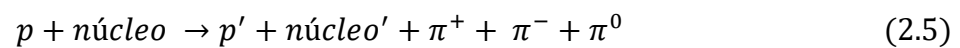


Figura 2.8: Choque de un electrón energético a un fotón de baja energía, transfiriendo parte de su energía al fotón, ocasionado que el electrón se frene (Gruppen, 2020).

2.1.6.4. Decaimiento del pión neutro

Protones acelerados en las fuentes pueden generar piones cargados ($\pi^\pm$) y piones neutros (π^0) a través de interacciones protón-protón o protón-núcleo (Figura 2.9). Un posible proceso es



Piones cargados tienen una vida media de 26 ns y se reducen en muones y neutrinos, mientras que los piones neutros se reducen rápidamente ($\tau = 8.4 \times 10^{-17}$ s) en dos rayos gamma,



Si el π^0 se reduce en reposo, ambos fotones son emitidos con la mitad de su masa como energía ($m_{\pi^0} = 135$ MeV) y en sentidos opuestos. Cuando el π^0 se encuentra en movimiento,

los fotones reciben diferentes energías dependiendo de su dirección de emisión con respecto a la dirección del π^0 .

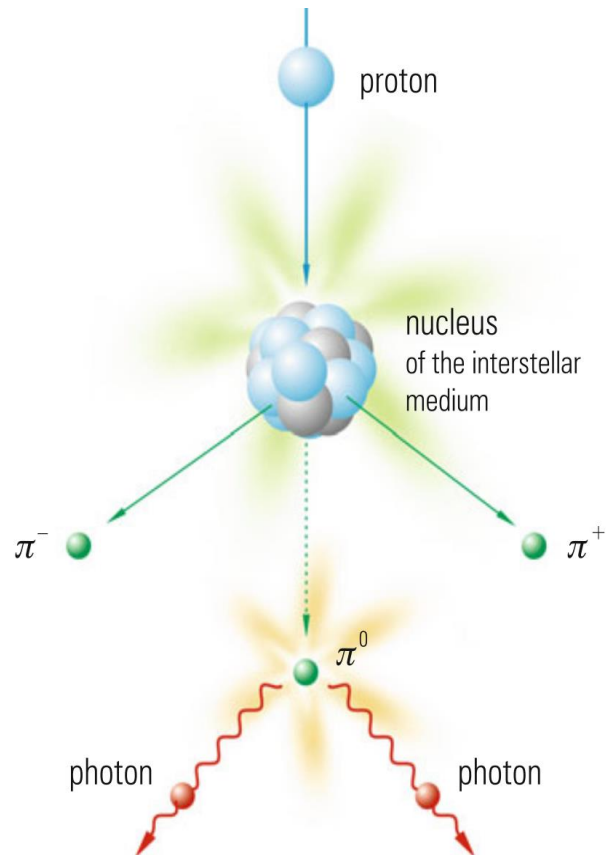


Figura 2.9: Producción de π^0 en interacciones de protones y desintegración de π^0 en dos fotones (Gruppen, 2020).

2.1.6.5. Fotones producto de la aniquilación materia-antimateria

Otra forma de originar rayos gamma es en el proceso de aniquilación de pares, en la cual una partícula cargada se llega a aniquilar con su antipartícula, emitiendo fotones. Las principales fuentes para este mecanismo de producción son las aniquilaciones electrón-positrón y protón-antiprotón. También se considera que la aniquilación de materia oscura podría generar rayos gamma (Conrad & Reimer, 2017). La conservación del momentum lineal requiere que se produzcan mínimamente dos fotones, en la aniquilación electrón-positrón en reposo, los fotones (Figura 2.10) adquieren 511 keV cada uno, lo que corresponde a su masa en reposo.

Un ejemplo de la reacción de aniquilación protón-antiprotón puede apreciarse en Ec. 2.8, donde el pión neutro posteriormente se reduce a dos fotones.

$$e^{-} + e^{+} \rightarrow \gamma + \gamma \quad (2.7)$$

$$p + \bar{p} \rightarrow \pi^{+} + \pi^{-} + \pi^{0} \quad (2.8)$$

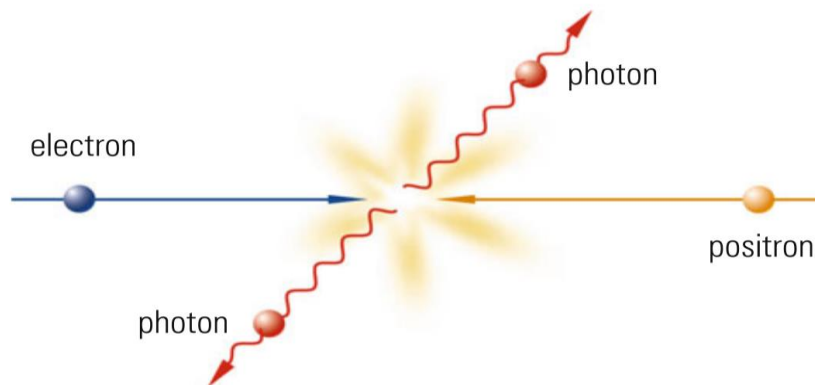


Figura 2.10: Aniquilación de pares (electrón +positrón) (Gruppen, 2020).

2.1.6.6. Fotones de transformaciones nucleares

En los procesos de supernovas, se producen no solo isótopos estables, sino también isótopos radiactivos. Los rayos gamma se generan a partir de la transición de un nucleón desde un estado excitado a uno de menor energía, así como por la desintegración de isótopos, los cuales emiten fotones en el rango de MeV.

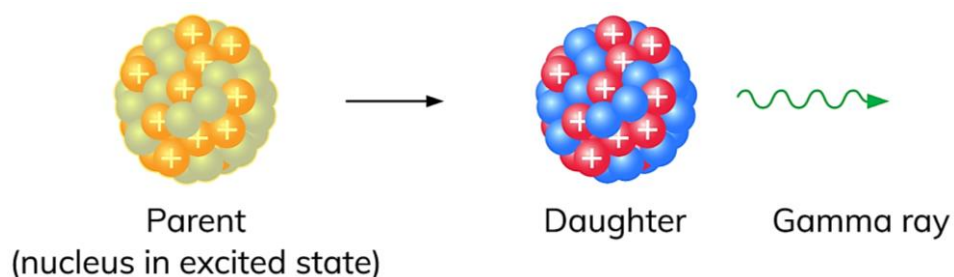


Figura 2.11: Desintegración del núcleo padre, emitiendo un rayo gamma. Fuente: <https://www.wizeprep.com/online-courses/19843/chapter/14/core/7/1>

2.1.7. Cascadas atmosféricas extensas

Las cascadas atmosféricas fueron descubiertas hace unos 85 años por el físico Pierre Auger, quien observó coincidencias al colocar dos o tres contadores (detectores) al aire libre. Estas coincidencias disminuyeron a medida que aumentaba la separación entre los contadores, sugiriendo así la existencia de un fenómeno que él denominó cascada atmosférica (Auger et al., 1939).

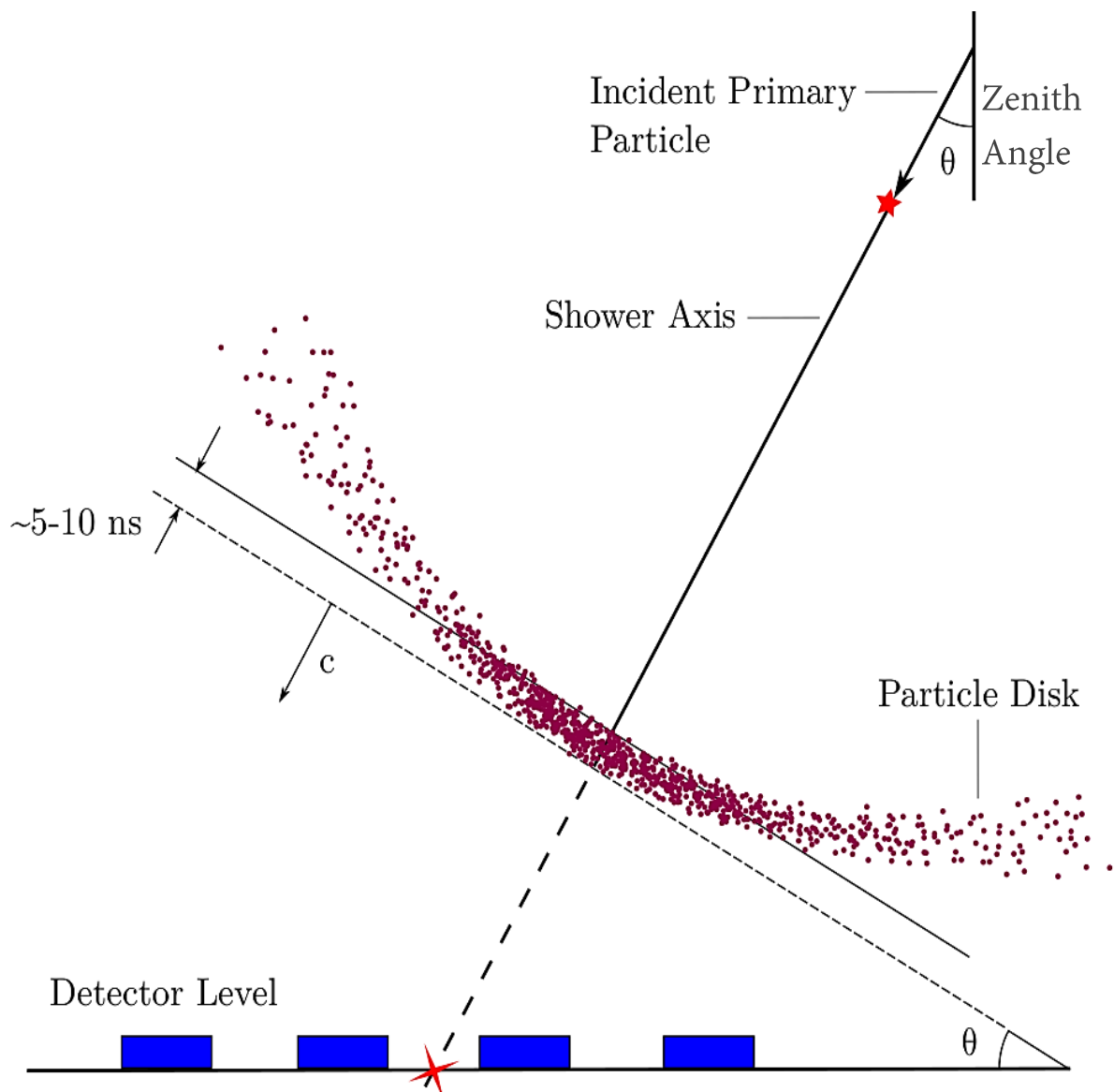


Figura 2. 12: Diagrama de un frente de partículas de una cascada de partículas en el aire. La estrella roja representa el primer punto de interacción de la partícula primaria (núcleo) (Hampel-Arias, 2017).

Las cascadas atmosféricas, también conocidas como Extensive Air Showers (EAS), son fenómenos iniciados por partículas primarias que interactúan con las moléculas del aire, produciendo nuevas partículas llamadas secundarias que a su vez son capaces de producir más partículas secundarias (Jochim, 2006). Por ello, se utilizan para detectar partículas con energías muy altas, difíciles de medir con satélites fuera de la atmósfera debido a su limitada área de recolección, dado que, a mayor energía, menor es el flujo de partículas esperado (Risse, 2004).

Las cascadas atmosféricas tienen las siguientes características que se pueden observar en la Figura 2.12:

- Frente de partículas secundarias con forma de disco delgado que se mueve a velocidades cercanas a la de la luz, el cual tiene un ancho aproximado de 1 m y es de forma curva. Cerca del núcleo, el frente de la cascada es compacto, mientras que se hace más disperso al extenderse lateralmente
- El eje de la cascada es la recta que representa la dirección de propagación del rayo primario.
- Dirección de incidencia del eje de la cascada, que está definida por el ángulo cenital y azimutal.
- Núcleo de la cascada, proyección del eje sobre el suelo.
- Contenido de partículas secundarias y la forma de la cascada (qué tan extendida es), son determinadas por el tipo de partícula primaria y su energía.

Un parámetro a tener en cuenta para describir el desarrollo de las cascadas atmosféricas es la profundidad atmosférica X (g/cm^2). Se define como la integral de la densidad atmosférica por encima del nivel de observación h :

$$X = \int_h^\infty \rho(h') dh' \cong X_0 e^{-h/h_0} \quad (2.9)$$

Esta aproximación es para una atmosfera isotérmica, donde $X_0 = 1030 \text{ g/cm}^2$ y $h_0 \cong 8.4 \text{ km}$. En la Figura 2.13 se muestra la evolución del tamaño de la cascada, asimismo se puede apreciar que la altura del desarrollo máximo de la cascada depende de la energía.

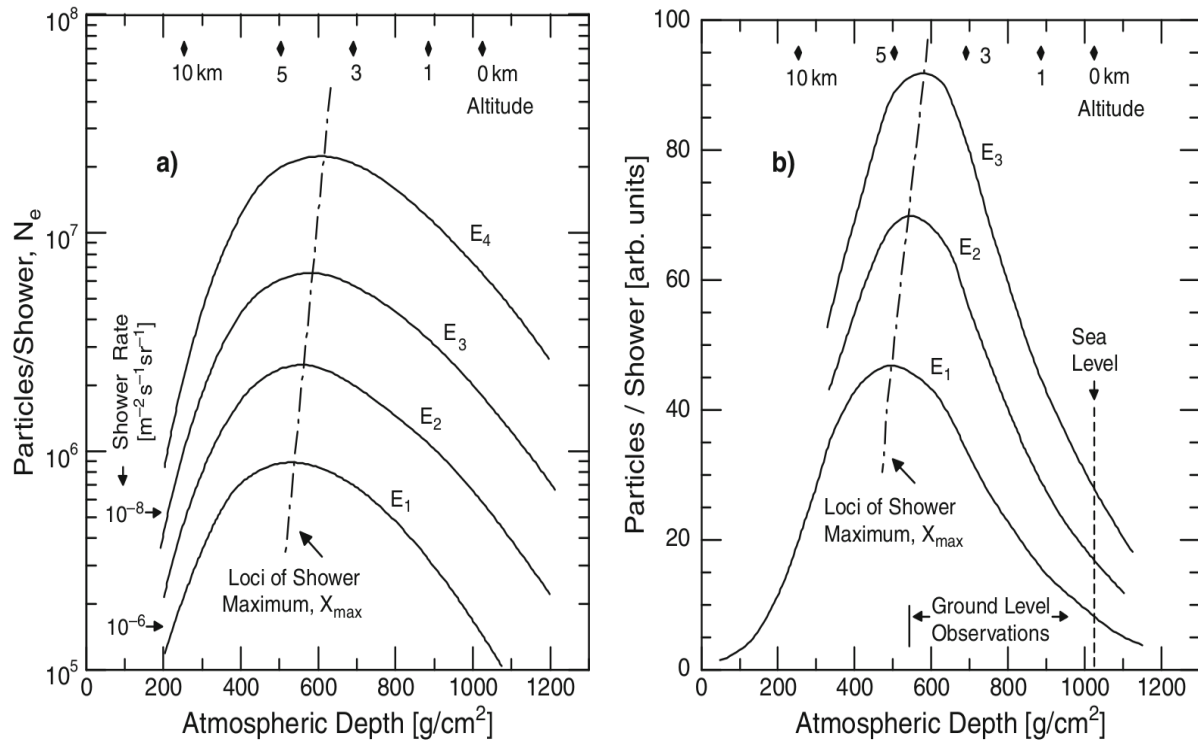


Figura 2. 13: Desarrollo longitudinal de una cascada atmosférica. Se muestra el tamaño de la cascada en función de la profundidad atmosférica X_0 (g/cm^2) para diferentes energías primarias ($E_1 < E_2 < E_3 < E_4$), en la figura (a) se muestra su representación semilogarítmica y en (b) la lineal (Grieder, 2010).

2.1.8. Tipos de cascadas

Las cascadas atmosféricas pueden clasificarse en dos tipos según la partícula primaria que las inicia: electromagnéticas o hadrónicas. A continuación, se describen las características de estas cascadas, así como su mecanismo de producción.

2.1.8.1. Cascada Electromagnética

En las cascadas electromagnéticas, la partícula primaria es electromagnética, es decir, un fotón (rayo gamma), electrón o positrón y durante el proceso se generan fotones, electrones y positrones. Sin embargo, la existencia de electrones y positrones con energía superior a 1 TeV es poco probable, ya que no logran viajar grandes distancias en el espacio sin sufrir grandes pérdidas energéticas por radiación de sincrotrón y efecto Compton inverso (Zuñiga, 2017). Las principales interacciones implicadas en la producción de partículas secundarias son la producción de pares y Bremsstrahlung.

Las partículas en una cascada electromagnética se distribuyen principalmente a lo largo de la dirección de propagación y cerca de su eje, ya que los electrones (e^-) y positrones (e^+) generados por la creación de pares, así como los fotones emitidos por el proceso de bremsstrahlung, en general, no adquieren un gran momento transversal. Por lo cual, la cascada electromagnética producida por un rayo gamma es más compacta en comparación con las cascadas hadrónicas de energía similar. Los electrones, al propagarse, están sujetos mayormente a dispersiones Coulombianas. Como resultado, las partículas en una cascada electromagnética están muy agrupadas, formando un disco delgado de partículas con un espesor de alrededor de 1 metro. Además, en términos de longitud de interacción, los eventos electromagnéticos penetran menos en la atmósfera que los hadrónicos (Zuñiga, 2017). Es posible que en la producción de pares se creen muones, pero la probabilidad de que esto suceda es muy baja (Kudryavtsev, 2002).

El modelo de Heitler (Heitler, 1954) describe el desarrollo de las cascadas electromagnéticas (ver Figura 2.14). Esta descripción comienza con un electrón o un fotón con energía E_0 . Asumiendo que la creación de nuevas partículas ocurre a intervalos de longitud de interacción λ , se tiene que la cantidad de partículas se duplica en cada λ , con la energía de la

partícula creadora distribuida equitativamente entre las dos partículas producidas. Los electrones emiten un único fotón a través de la radiación de frenado y sobreviven con la mitad de su energía inicial. Los fotones interactúan mediante la producción de pares, creando un electrón/positrón de igual energía.

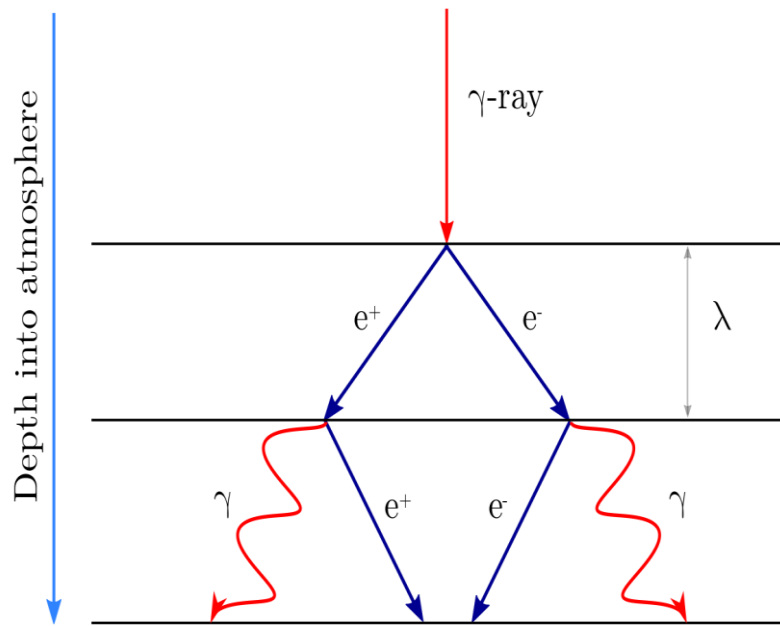


Figura 2.14: Vista esquemática de una cascada electromagnética (Hampel-Arias, 2017).

Después de la n -ésima interacción, el número de partículas es $N_n = 2^n$, cada una con energía $E_n = E_o/N_n$. La cascada sigue creciendo hasta que la energía individual de las partículas de la cascada cae por debajo de un valor crítico E_c donde la tasa de pérdida de energía de los electrones a través de la radiación de frenado es igual a la ionización. Esta energía (E_c^γ) es 85 MeV en el aire y 21 MeV en el agua (Letessier-Selvon & Stanev, 2011). A pesar de ser un modelo simple, relaciona la energía primaria con el número de partículas en un estado de desarrollo dado de la cascada electromagnética (Salazar Santiago, 2020). Este modelo muestra que el número máximo de partículas es:

$$N_{max} = \frac{E_o}{E_c^\gamma} \quad (2.10)$$

La profundidad máxima de la cascada (X_{max}), medida en g/cm^2 , crece de forma logarítmica con la energía, de modo:

$$X_{max} = X_0 + \lambda \ln N_{max} \quad (2.11)$$

donde, X_0 es el punto de inicio de la cascada. Un aspecto importante de este modelo es que las ecuaciones 2.10 y 2.11, aunque fueron desarrolladas para describir cascadas electromagnéticas, también pueden aplicarse a las cascadas hadrónicas bajo ciertas aproximaciones. El modelo de Heitler (Heitler, 1954) predice una relación de 2 electrones por fotón mientras que las simulaciones y las mediciones directas de las cascadas atmosféricas muestran una relación del orden de 1/6. Esto se debe al hecho de que durante la radiación de frenado se emiten múltiples fotones y que los electrones pierden energía mucho más rápido que los fotones (Letessier-Selvon & Stanev, 2011).

2.1.8.2. Cascada Hadrónica

Las cascadas hadrónicas (ver Figura 2.15) se desarrollan cualitativamente similar a las cascadas electromagnéticas, pero debido a las interacciones nucleares involucradas, exhiben algunas diferencias importantes (Hampel-Arias, 2017). Según Bhatnagar (2009), las cascadas hadrónicas pueden considerarse como una superposición de cascadas electromagnéticas, generadas por los decaimientos de los π^0 y alimentadas por interacciones hadrónicas. Por lo tanto, tiene sentido estudiar este tipo de cascadas utilizando un modelo de Heitler modificado, similar al empleado para las cascadas electromagnéticas (Hampel-Arias, 2017).

El proceso se inicia cuando un rayo cósmico hadrónico tiene una colisión nuclear con un núcleo de la atmósfera. En esta primera colisión, generalmente se producen más de 50 partículas secundarias, siendo en su mayoría piones cargados y neutros. A partir de esta primera

interacción, se pueden distinguir tres componentes diferentes de la cascada: la componente electromagnética, la componente muónica y la componente nucleónica (Bhatnagar, 2009).

Componente Electromagnética: Está conformada por fotones, electrones y positrones, los cuales se generan a partir de piones neutros que tienen una vida media muy corta ($[8.52 \pm 0.18] \times 10^{-17} \text{ s}$ (Tanabashi et al., 2018)), que mayoritariamente se desintegran en un par de fotones antes de poder interactuar con los núcleos en la atmósfera.

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma [98.8 \text{ \%}] \quad \pi^0 \rightarrow \gamma + e^+ + e^- [1.2 \text{ \%}]$$

Componente Muónica: Está conformada por muones y antimuones, que se generan a partir de piones cargados que son inestables al igual que los piones neutros. Sin embargo, tienen una vida media más larga ($[2.6033 \pm 0.0005] \times 10^{-8} \text{ s}$ (Tanabashi et al., 2018)), que les permite colisionar con otros núcleos antes de desintegrarse. Después de varias generaciones, los piones cargados pierden energía hasta llegar a su principal modo de decaimiento. La mayoría de los piones producidos a bajas energías, emiten fotones a energías usualmente de 70 MeV.

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) [99.9 \text{ \%}] \quad \pi^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e) [0.01 \text{ \%}]$$

$$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) [63.43 \text{ \%}] \quad K^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^0 [21.13 \text{ \%}]$$

Componente Nucleónica: Esta componente está formada por los fragmentos de las moléculas de aire, protones y neutrones. Los protones pierden energía mediante interacciones electromagnéticas, mientras que los neutrones atraviesan la atmósfera sin perder mucha energía hasta llegar al suelo.

Existe aproximadamente el doble de piones cargados que de piones neutros que se desintegran casi inmediatamente en dos fotones. Estos generan otras cascadas electromagnéticas como se describió anteriormente. Tanto las subcascadas hadrónicas como

las electromagnéticas continúan desarrollándose hasta que las partículas alcanzan los respectivos umbrales de energía, después de lo cual se detiene la producción de partículas.

El desarrollo longitudinal y lateral de la cascada dependen esencialmente de la energía del primario, así como del ángulo de incidencia θ y de X_0 . Cuanto mayor es la energía, mayor es su alcance, llegando al nivel del mar con velocidades relativistas, en cambio, si la energía de la partícula primaria es baja, el desarrollo de la cascada alcanza su máximo cuando se disipa en la atmósfera, dejando solo muones y neutrinos que logran arribar a la superficie terrestre (Aguilar, 2017).

Para este tipo de cascadas aproximadamente el 90 % son electrones, positrones y fotones de baja energía, cerca del 10 % son muones y alrededor del 1 % lo componen hadrones. Las partículas más energéticas de la cascada se encuentran generalmente en el core o núcleo y son mayormente hadrones (Grieder, 2010).

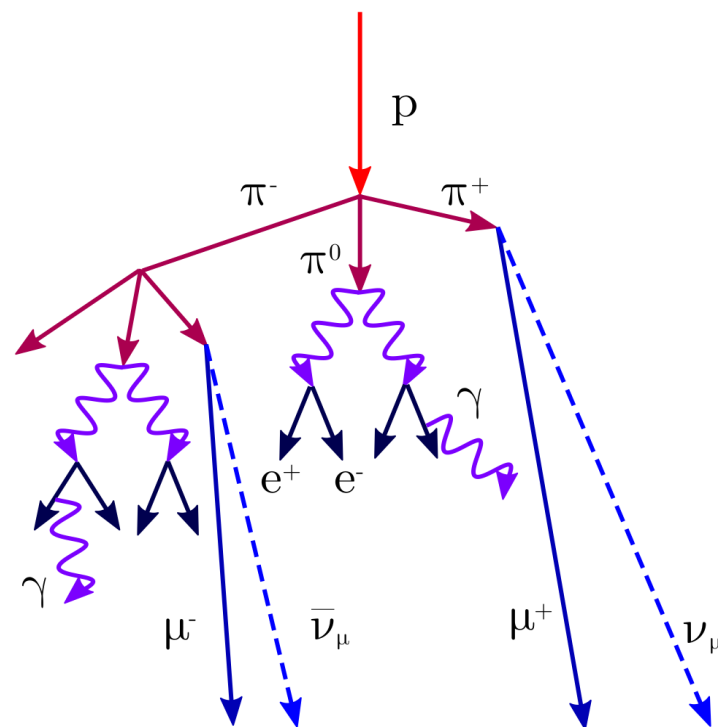


Figura 2.15: Cascada hadrónica (Hampel-Arias, 2017).

La cascada de protones comienza con un protón con energía E_0 . La longitud de división $d = \lambda \ln 2$, que se supone constante. En cada nodo, una interacción hadrónica produce N_π piones, de los cuales $\frac{2}{3}N_\pi$ son piones cargados y $\frac{1}{3}N_\pi$ son piones neutros de igual energía. Como se explica en la sección 2.1.6, los piones neutros se desintegran y extienden la cascada electromagnética. La energía crítica de los piones es $E_c = 20 \text{ GeV}$ en el aire, por debajo de la cual se desintegrarán en muones. Por lo tanto, el número de muones a esta energía es:

$$N_\mu = \left(\frac{2}{3}N_\pi\right)^{n_c} \quad (2.12)$$

donde $n_c = \frac{\ln(E_0/E_c^\pi)}{\ln N_\pi}$ es el número de pasos para los piones para tener E_c (Letessier-Selvon & Stanev, 2011).

El número de muones para una energía inicial dada depende de la masa del rayo cósmico primario. Las cascadas de primarios más pesados producen más muones (Weidenhaupt & Erdmann, 2014). Los observatorios utilizan el número de muones para estimar la composición. El máximo de la cascada de aire (X_{max}) viene dado por el máximo de la cascada electromagnética, ya que en las cascadas de aire el componente electromagnético es dominante. La posición del máximo de la cascada es más compleja en el caso de las cascadas hadrónicas porque la sección transversal más grande y la multiplicidad más grande en cada paso reducirán el valor de X_{max} , mientras que la evolución de la energía de esas cantidades modificará la tasa de cambio de X_{max} con la energía (Letessier-Selvon & Stanev, 2011).

Sin embargo, tras realizar algunas suposiciones sencillas, las cascadas de protones inducidas por núcleos con número atómico A se desarrollarán en niveles más altos de la atmósfera (Letessier-Selvon & Stanev, 2011). La diferencia con respecto a las cascadas de protones es:

$$X_{max}^A = X_{max}^p - \lambda \ln A \quad (2.13)$$

La profundidad del máximo de la cascada se utiliza como estimador de la composición para los detectores que pueden medir el desarrollo de la cascada en la atmósfera.

2.1.9. Muones atmosféricos

Los muones son partículas elementales masivas, similares a los electrones, pertenecientes a la familia de los leptones y tienen una vida media relativamente larga de $2,2 \mu s$. Debido a que poseen una pequeña sección transversal para interactuar con la materia, se les conoce como la “componente penetrante” de la radiación cósmica, pero como son partículas cargadas, son fáciles de detectar (Gruppen, 2020).

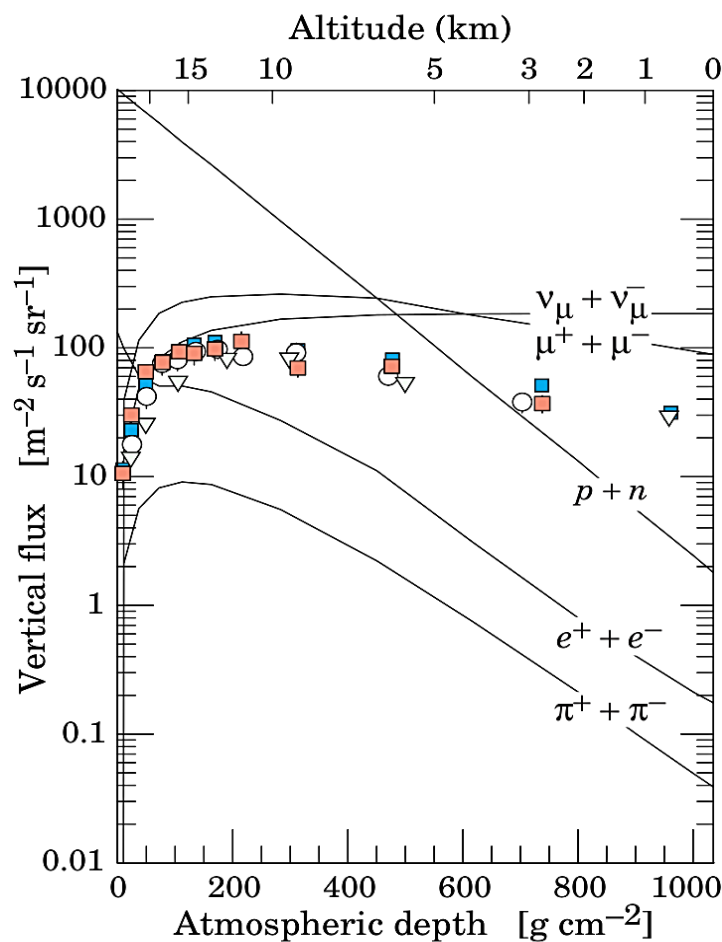


Figura 2.16: Flujo vertical de partículas con $E > 1 \text{ GeV}$ que componen las cascadas atmosféricas. Los puntos representan mediciones de muones negativos con $E > 1 \text{ GeV}$ (Tanabashi, 2018).

Como los muones tienen carga eléctrica ($\pm 1e$) están sujetos a interacciones electromagnéticas que limitan su alcance. Sin embargo, su gran masa retrasa el inicio de la radiación de frenado y otros procesos electromagnéticos en comparación con los electrones, dejando a la ionización como el principal mecanismo de pérdida de energía en un amplio rango de energías relativistas mientras se propagan a través de la atmósfera. Esto hace que los muones sean ideales para estudiar las primeras etapas del desarrollo de cascadas de partículas a grandes alturas (Grieder, 2010). En la Figura 2.16 se puede observar el flujo de las principales partículas secundarias, los muones y los neutrinos son los que tienen mayor presencia en la superficie. El descenso a partir de los 15 km es indicador que a esa altura se producen.

2.1.9.1. Mecanismo de pérdida de energía de muones

Los muones viajan distancias relativamente largas y pierden energía en diferentes procesos a una tasa aproximada de 2 MeV por g/cm². Por lo cual pierden un total aproximado de 2 GeV en su viaje a través de la atmósfera (Cecchini & Spurio, 2012). Este proceso se describe a través de la fórmula de Beth (Groom & Klein, 2000):

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi n_e r_e^2 m_e c^2 \frac{z^2}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 Q_{max}}{I^2} \right) - \beta^2 \right) + \delta(E) \quad (2.14)$$

donde, los parámetros de la ecuación para el muon son:

- I : energía promedio de excitación del material.
- $n_e = Z N_A \rho / A$: número de electrones por m^3 del material atravesado.
 - Z : número atómico, A : número másico, N_A : número de Avogadro, ρ : densidad del material atravesado
- m_e : masa del electrón
- $z=1$: carga del muon
- r_e : radio del electrón
- $\beta = \frac{v}{c}$: velocidad relativa del muon
- $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$: Factor de Lorentz del muon
- $Q_{max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1+2\gamma m_e/M+(m_e/M)^2}$: Máxima energía cinética del electrón.
- $M = m_\mu$: masa del muon
- $\delta(E)$: factor de corrección dependiente de la energía de retroceso del electrón.

Utilizando la aproximación $\gamma \frac{m_e}{m_\mu} \ll 1$, la energía cinética se reduce a $Q_{max} = 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2$. El factor de corrección puede despreciarse ya que se toma para valores grandes de energía del muon ($E_\mu > 1 \text{ TeV}$). Entonces la ecuación (2.14) se reduce a:

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi n_e r_e^2 m_e c^2 \frac{1}{\beta^2} \left(\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right) \quad (2.15)$$

2.1.10. Radiación Cherenkov

Desde su descubrimiento en 1934 por el físico soviético Pavel Cherenkov, la radiación o efecto Cherenkov ha tenido un rol importante en la detección de partículas de altas energías. Este fenómeno óptico ocurre cuando una partícula cargada, se mueve en un medio dieléctrico con un índice de refracción (n), con una velocidad (v) mayor que la velocidad de la luz en ese medio, emitiendo radiación electromagnética (Cherenkov) que abarca el espectro óptico azul (Gruppen, 2020). Cuando las partículas entran en un medio dieléctrico a esta velocidad, generan un frente cónico de ondas, que puede definir la dirección de la radiación Cherenkov (ver Figura 2.17). Este efecto tiene un umbral para la pérdida de la energía de la partícula, por lo que solo puede ocurrir cuando:

$$v \geq \frac{c}{n} \quad \text{o cuando} \quad \beta = \frac{v}{c} \geq \frac{1}{n}$$

La radiación Cherenkov se emite con un ángulo de

$$\theta_c = \arccos \frac{1}{n\beta} \quad (2.16)$$

en relación con la dirección de la velocidad de la partícula. La cantidad de fotones producidos por centímetro se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha z^2 \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} \sin^2 \theta_c \quad (2.17)$$

donde:

- α : es la constante de estructura fina (aproximadamente 1/13).
- z : es la carga de la partícula.
- λ_1 y λ_2 : son los límites inferior y superior del rango de longitud de onda de interés ($\lambda_1 = 400 \text{ nm}$ y $\lambda_2 = 700 \text{ nm}$)

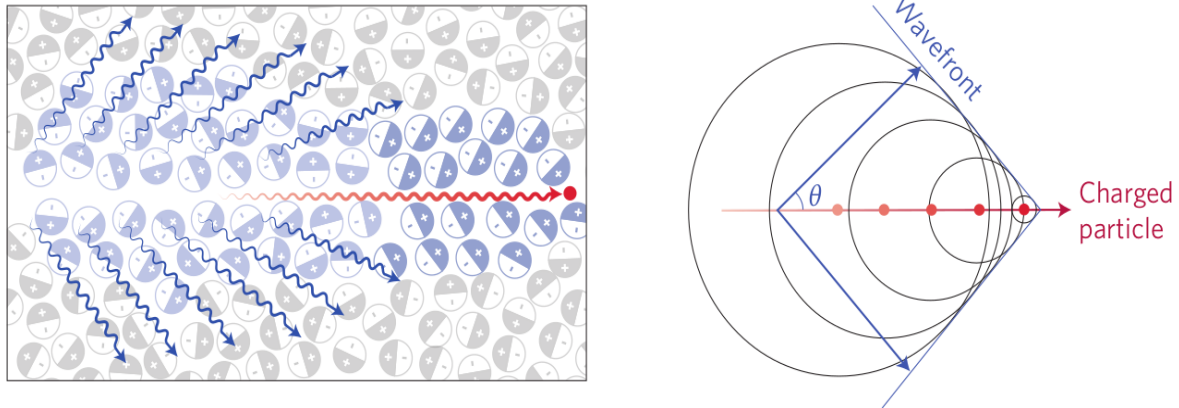


Figura 2.17: Una partícula cargada que viaja más rápido que la luz en un medio emite luz azul al polarizar y despolarizar el medio (Shaffer et al., 2017).

Para las partículas relativistas ($\beta \approx 1$), el valor del ángulo de Cherenkov en el agua es de 42° y en el aire, es de 1.4° . Asimismo, en el agua, las partículas relativistas con una sola carga producen alrededor de 220 fotones/cm, mientras que, en el aire, la cantidad correspondiente es de 30 fotones/m (Gruppen, 2020).

2.1.10.1. Efecto Cherenkov en el aire

La técnica de Cherenkov atmosférica permite identificar cascadas electromagnéticas inducidas por fotones que se desarrollan en la atmósfera y las separa de las cascadas hadrónicas, considerando que las cascadas generadas por rayos gamma en la atmósfera tienen un cono de luz que se extiende solo unos $\pm 1.4^\circ$, lo que significa que hay relativamente poco fondo de hadrones en un ángulo tan pequeño (Gruppen, 2020). Esta técnica, implica el uso de telescopios de imágenes por Cherenkov en aire (IACT, por sus siglas en inglés, *Imaging Air Cherenkov*

Telescope) que son instalaciones terrestres que apuntan al cielo, dedicadas a la detección indirecta de rayos gamma mediante la captura de los fotones Cherenkov producidos en la atmósfera. Sin embargo, con un solo telescopio, es difícil determinar con exactitud la trayectoria de la cascada. Por ello, se utilizan múltiples telescopios distribuidos en diferentes puntos (arreglo de telescopios), lo que permite observar la cascada desde varias direcciones y su reconstrucción estereoscópica. Los observatorios de rayos gamma basados en telescopios Cherenkov más relevantes en la actualidad son:

HESS (High Energy Stereoscopic System): es un sistema de telescopios Cherenkov de imágenes atmosféricas que investiga los rayos gamma cósmicos en el rango de energía de decenas de GeV a decenas de TeV (HESS, 2024). Está situado en las tierras altas de Khomas, en Namibia, a una altitud de 1 800 m s.n.m. (Figura 2.18).

VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System): es un instrumento de rayos gamma terrestre que opera en el Observatorio Fred Lawrence Whipple (FLWO) en el sur de Arizona, EE. UU. Es un conjunto de cuatro reflectores ópticos de 12 m para astronomía de rayos gamma en el rango de energía GeV - TeV (VERITAS, 2024).

MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescopes): es un sistema de dos telescopios Cherenkov de imágenes atmosféricas situado en el Observatorio del Roque de los Muchachos en La Palma, una de las Islas Canarias, a unos 2 200 m s.n.m. (MAGIC collaboration, 2011).

Los observatorios basados en telescopios Cherenkov han logrado excelentes resultados descubriendo numerosas fuentes astrofísicas gracias a su alta resolución angular, además que estos observatorios presentan un rechazo de fondo del más del 99 %. Sin embargo, estas instalaciones presentan limitaciones como su rango restringido de energía ($< 10^{12}$ eV), campo de visión reducido ($< 2^\circ$), su dependencia de las condiciones atmosféricas y funcionamiento

nocturno. Estas limitantes, han impulsado el desarrollo de otros tipos de observatorios de rayos gamma, como los basados en tanques de agua Cherenkov (HAWC, 2024).



Figura 2.18: El arreglo de 5 telescopios de H.E.S.S., un observatorio de rayos gamma basado en telescopios Cherenkov. Fuente: <https://namibian.org/news/nature-and-environment/hess-observatory-celebrates-twenty-year-anniversary>

2.1.10.2. Efecto Cherenkov en el agua

Los arreglos de detectores de Cherenkov en agua (WCD, por sus siglas en inglés, *Water Cherenkov Detector*) están contruidos en sitios de gran altitud debido a que esto les permite detectar las cascadas atmosféricas antes de que alcancen su profundidad máxima y comience a cesar la producción de partículas, además de ser sensibles a eventos transitorios y altamente variables. Un arreglo de este tipo consiste en una gran cantidad de tanques llenos de agua con fotomultiplicadores (PMTs, por sus siglas en inglés, *Photo Multiplier Tube*) ubicados en su interior. Las partículas de las cascadas atmosféricas alcanzan la superficie de los tanques y, al atravesar el agua, generan luz Cherenkov que es atrapada por los fotomultiplicadores. Los observatorios de rayos gamma basados en arreglos de tanques Cherenkov más relevantes en la actualidad, son:

HAWC (High-Altitude Water Cherenkov Observatory): es un laboratorio diseñado para detectar rayos gamma y cósmicos con energías en el rango de TeV. Ubicado a 4 100 m

s.n.m. en el volcán Sierra Negra, Puebla, México (Figura 2.19). HAWC cubre más del 15% del cielo y puede observar dos terceras partes del firmamento en cada ciclo de 24 horas. Su objetivo es realizar un estudio general en energías de 100 GeV a 100 TeV.

LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory): se encuentra a 4 410 m s.n.m. en el monte Haizi, provincia de Sichuan, China, y cubre un área de 1.36 km², tiene como objetivo principal explorar el origen de los rayos cósmicos de alta energía y realizar investigaciones científicas sobre la radiación astrofísica de alta energía (LHASSO, 2024).



Figura 2. 19: *Observatorio HAWC, cuenta con 300 tanques de agua para la detección de cascadas atmosféricas (J. Goodman, Nov. 2016).*

Estos tipos de observatorios instalados en la superficie pueden operar con cualquier condición climatológica y durante todo el día. Sin embargo, son mucho menos sensibles a cascadas de baja energía, puesto que la energía mínima requerida para que una partícula produzca efecto Cherenkov en agua ultra pura es mayor que la del aire $E_{min}(\mu) = 160.32 \text{ MeV}$ y $E_{min}(e^-) = 0.775 \text{ MeV}$, lo que los hace mucho menos eficientes para poder distinguir cascadas atmosféricas iniciadas por rayos cósmicos de aquellas iniciadas por rayos gamma (HAWC, 2024).

2.1.11. CORSIKA

CORSIKA (*COsmic Ray Simulations for KAscade*) es un avanzado programa de simulación basado en el método Monte Carlo para estudiar el desarrollo y las propiedades de las cascadas atmosféricas producidas por rayos cósmicos (Figura 2.20). Es capaz de simular interacciones y desintegraciones de núcleos, hadrones, muones, electrones y fotones en la atmósfera, abarcando energías que alcanzan hasta aproximadamente 10^{20} eV. Este programa ofrece detalles como el tipo de partículas secundarias generadas, su energía, ubicación, dirección y tiempos de llegada al atravesar un nivel de observación específico (Heck & Pierog, 2023).

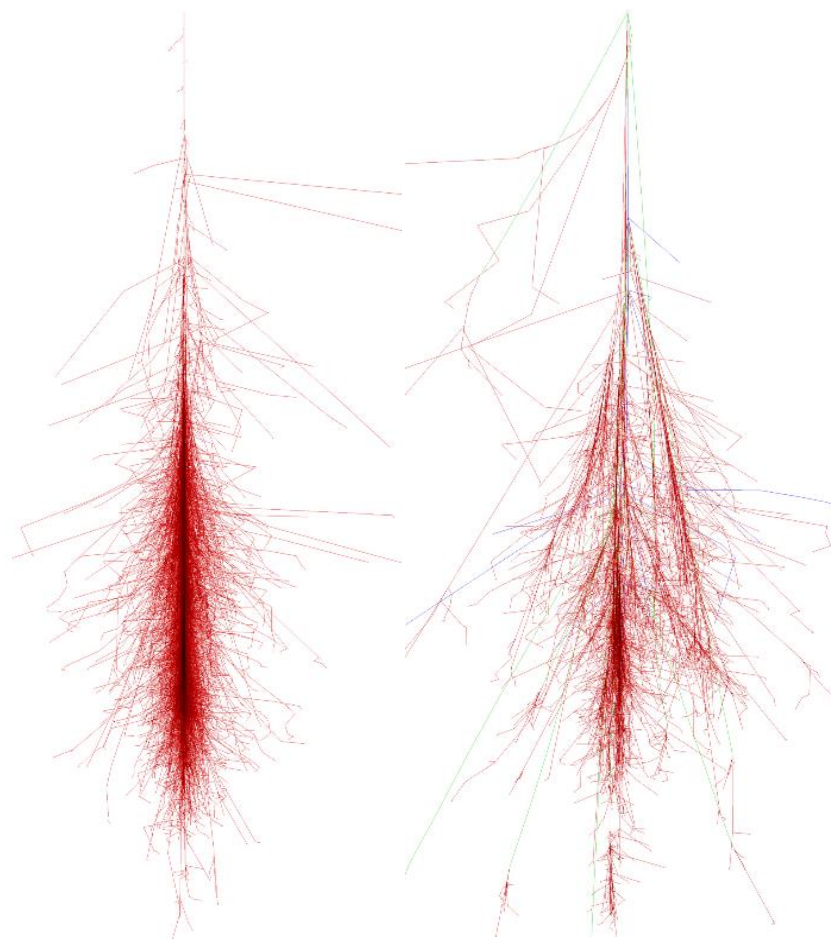


Figura 2. 20: Simulaciones con CORSIKA de la cascada atmosférica producida por un fotón (izquierda) y protón (derecha) a 100 GeV. Fuente: <https://www.iap.kit.edu/corsika/>

El programa consta básicamente de 4 partes. La primera parte controla la entrada y salida de datos, el seguimiento de partículas (teniendo en cuenta las pérdidas de energía debidas a la ionización), las desviaciones debidas a la dispersión múltiple y los efectos del campo magnético terrestre, además de descomponer partículas inestables. La segunda parte se encarga de la interacción de núcleos atómicos y hadrones con núcleos de aire a energías superiores. la interacción de hadrones a energías más bajas, mientras que la cuarta parte se centra en el transporte e interacción de electrones, positrones y fotones. CORSIKA contiene varios modelos para las últimas tres partes del programa que pueden activarse opcionalmente con precisión variable de la simulación y el consumo de tiempo de CPU. En la guía del usuario de CORSIKA (Heck & Pierog, 2023) se explica la instalación del código, todos los conjuntos de datos de entrada necesarios y la selección de parámetros de simulación. Un ejemplo del archivo de datos de entrada se puede ver en la Figura 3.1.

2.1.12. Modelos de interacción

2.1.12.1. Modelos de Interacciones Hadrónicas de Alta Energía

Los modelos de interacción de alta energía juegan un papel crucial en la simulación de cascadas de partículas generadas por rayos cósmicos de energías ultra altas. Estos modelos tratan de describir cómo las partículas de alta energía interactúan con la atmósfera, produciendo cascadas de partículas secundarias. Los modelos de interacciones hadrónicas de alta energía de la versión 77500 de CORSIKA son:

DPMJET (Dual Parton Model with JETs): está basado en el Modelo de Doble Partón (Dual Parton Model), se emplea para simular interacciones núcleo-hadrón o núcleo-núcleo, especialmente a energías altas.

EPOS (Energy conserving quantum mechanical multi-scattering approach, based o Partons, Off-shell remnants and Splitting parton ladders): es un modelo que combina características del modelo VENUS y QGSJET01, con una extensión que permite extrapolar con seguridad hasta energías extremadamente altas. La versión más reciente es EPOS LHC (v3400).

NEXUS (NEXt generation of Unified Scattering approach): Similar a EPOS, está diseñado para manejar interacciones núcleo-núcleo con un enfoque más actualizado. Optimizado para interacciones hadrónicas en colisiones de iones pesados. La versión más reciente es NEXUS 3.97.

QGSJET y QGSII (Quark Gluon String model with JETs): Modelos basados en el modelo de cuerdas quark-gluón, describe las interacciones hadrónicas mediante el intercambio de pomerones, una entidad matemática usada para modelar la dispersión a altas energías. Ideal para simular interacciones en cascadas atmosféricas de rayos cósmicos, pero no tan detallado en la producción de partículas raras o efectos de estado final. La versión más reciente es QGSJET-II-04.

SIBYLL: Un modelo que está basado en el modelo de mini-jets de cromodinámica cuántica (QCD, por sus siglas en inglés, Quantum Chromodynamics), que permite la producción de mini-jets a energías muy altas. La nueva versión tiene una mejora en la producción de pares barión-antibarión, así mismo, un modelo fenomenológico para la producción de partículas encantadas (charm particles) que es importante para la producción de muones y neutrinos de alta energía. La versión actual es SIBYLL 2.3d.

VENUS (Very Energetic NUClear Scattering): es un modelo desarrollado para simular las interacciones entre iones pesados ultra-relativistas. La versión actual es VENUS 4.12.

2.1.12.2. Modelos de Interacciones Hadrónicas de Baja Energía

Los modelos de interacción hadrónica de baja energía son esenciales para simular el comportamiento de partículas hadrónicas en el rango de energía de hasta 100 GeV en el desarrollo de la cascada. Estos modelos son:

FLUKA (FLUctuating KAscade): es un paquete especializado para calcular las secciones transversales inelásticas de los hadrones con los componentes del aire y para realizar su interacción y producción de partículas secundarias, incluidos muchos detalles de la desexcitación del núcleo objetivo.

GHEISHA (Gamma Hadron Electron Interaction SHower code): es un paquete de simulación ampliamente utilizado en programas de Monte Carlo como GEANT, diseñado para modelar las interacciones de partículas. GHEISHA juega un papel crucial en la simulación de interacciones hadrónicas de baja energía, especialmente para hadrones con energías por debajo de 80 GeV. La versión actual es gheisha 2002d.f.

UrQMD (Ultra-relativistic Quantum Molecular Dynamics): es un paquete de simulación diseñado para modelar las interacciones hadrones-núcleos a bajas energías. UrQMD 1.3 cors se utiliza específicamente para simular las interacciones de hadrones con energías por debajo de 80 GeV, al igual que GHEISHA, pero con un enfoque en la dinámica cuántica molecular a nivel relativista.

2.1.13. Archivo de entrada (input file)

El archivo de entrada ajusta los parámetros de la simulación, estos pueden modificarse para simular distintas configuraciones o situaciones. Los parámetros más destacados, que usualmente se modifican son:

- **NSHOW:** número de eventos a ser simuladas en una corrida (RUN)

- PRMPAR: identificación de la partícula primaria,

$$\gamma = 1, e^+ = 2, e^- = 3, \mu^+ = 5, \mu^- = 6, n = 13, p = 14$$

- ERANGE: rango de energía de la partícula primaria en GeV
- PHIP: rango del ángulo azimutal en grados
- THETAP: rango del ángulo cenital en grados
- MAGNET: campo magnético terrestre para el sitio terrestre de interés en microTeslas
- OBSLEV: nivel de observación sobre el nivel del mar en cm
- CSCAT: rango de la dispersión máxima de la ubicación del núcleo en cm

2.1.14. Archivo de salida (output file)

La simulación genera un archivo que proporciona información clave sobre su ejecución, incluyendo la versión del programa, el modelo de interacción, las opciones seleccionadas, las constantes físicas, el modelo atmosférico y la partícula primaria. Para cada cascada de partículas, se imprimen detalles como el estado del generador de números aleatorios, la partícula primaria, el número de partículas secundarias que alcanzan los niveles de observación, las estadísticas de interacción para diferentes partículas, información de la cascada de partículas electromagnéticas y el desarrollo longitudinal de la cascada de partículas.

El segundo archivo, el cual es de mayor importancia ya que contiene la información sobre todas las partículas que llegan al nivel de observación, recibe el nombre de archivo “*DATnnnnnn*”. Este archivo está en binario para almacenar grandes volúmenes de datos de manera eficiente. Contiene datos de las partículas generadas durante las simulaciones, como el tipo, la energía, el momento, y la dirección, también almacena detalles sobre las interacciones

que tienen lugar a lo largo del camino de las partículas, se vuelve muy grande cuando se simulan cascadas con gran detalle.

Los archivos “*DATnnnnnn*” de CORSIKA tienen una estructura binaria fija de bloques de 22932 bytes, compuesta por sub-bloques que almacenan información como encabezados de ejecución y eventos, datos de partículas y marcadores de fin de evento o simulación. Estos archivos requieren herramientas especializadas o scripts en lenguajes como Python o C para leer y procesar los datos correctamente. El archivo de salida de las partículas tiene bloques y parámetros, los principales se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2

Parámetros y sub-bloques del outputfile de CORSIKA.

Sub-bloque	Parámetro	Descripción
Encabezado de ejecución	<i>ID</i>	Identificador de la partícula primaria
	<i>E</i>	Energía in GeV
	<i>X₀</i>	Altura de inicio en g/cm^2
	<i>z</i>	Coordenada z de la primera interacción en cm
	<i>px</i>	momento lineal en la dirección <i>x</i> en GeV/c
	<i>py</i>	momento lineal en la dirección <i>y</i> en GeV/c
	<i>pz</i>	momento lineal en la dirección <i>−z</i> en GeV/c
	<i>θ</i>	Angulo cenital en radianes
Datos de partículas	<i>φ</i>	Angulo azimuthal en radianes
	<i>id</i>	Identificador de la partícula secundaria
	<i>px</i>	momento lineal en la dirección <i>x</i> en GeV/c
	<i>py</i>	momento lineal en la dirección <i>y</i> en GeV/c
	<i>pz</i>	momento lineal en la dirección <i>−z</i> en GeV/c
	<i>x</i>	Coordenada de posición en cm
	<i>y</i>	Coordenada de posición en cm
	<i>t</i>	Tiempo desde la primera interacción

Nota: Adaptado de (Heck & Pierog, 2023)

2.1.15. ROOT

ROOT es un software del CERN, que es fundamental para la investigación en física de altas energías. Cada día, numerosos físicos utilizan aplicaciones de ROOT para el análisis de datos (ROOT, 2024). Su objetivo es proporcionar un paquete de software integral para el almacenamiento, procesamiento, visualización y análisis de datos. Las principales funciones de ROOT son:

- Guardar datos: Se almacenan datos y objetos C++ en archivos ROOT en formato binario comprimido y autodescriptivo, asegurando que la información sea legible sin los archivos fuente.
- Minería de datos: proporciona potentes herramientas matemáticas y estadísticas para analizar datos, generar distribuciones y simular sistemas complejos.
- Publicación de resultados: permite visualizar resultados con histogramas y gráficos ajustables en tiempo real, y exporta figuras en formatos de alta calidad.
- Ejecución interactiva o creación de aplicaciones: se pueden realizar sesiones interactivas con Cling C++ o compilar programas para ejecutar a máxima velocidad.
- Integración con otros lenguajes: Se puede conectar ROOT con lenguajes como Python y R.

2.1.16. Máquinas de vectores de soporte

Las máquinas de vectores de soporte (SVM) son un método de clasificación lineal binaria en aprendizaje automático, que separa las clases con la brecha más grande llamada margen óptimo, entre las instancias de línea límite llamadas vectores de soporte (Chauhan et al., 2019).

El SVM transforma los puntos de entrada a un espacio de características de mayor dimensión y busca un hiperplano que separe las clases mientras maximiza el margen de separación entre ellas, como se ilustra en la Figura 2.21. Maximizar este margen se resuelve a través de su formulación dual utilizando multiplicadores de Lagrange. Sin necesidad de conocer explícitamente el mapeo, el SVM emplea funciones de núcleo (kernels) para calcular productos punto en el espacio de características. La solución del hiperplano óptimo se expresa como una combinación de un subconjunto de puntos de entrada, conocidos como vectores de soporte (Betancourt, 2005).

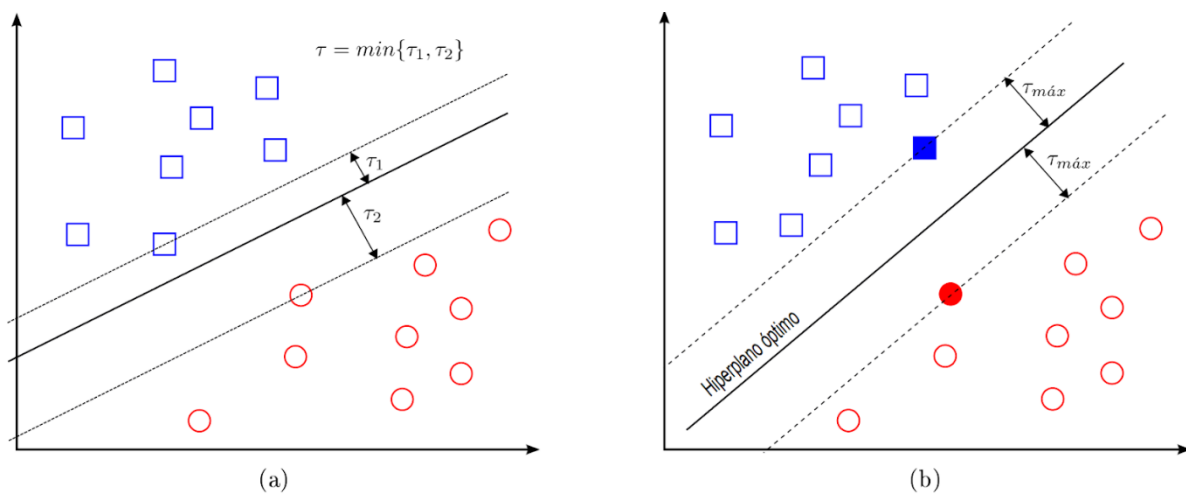


Figura 2. 21: Margen del hiperplano de separación: (a) hiperplano de separación no óptimo, (b) hiperplano de separación óptimo y si margen de separación asociado máximo $\tau_{máx}$ (Suárez, 2014)

2.1.16.1. Caso linealmente separable

Tenemos n puntos de entrenamiento $x_i \in \mathbb{R}^N$, cada uno corresponde a una de dos clases y se le etiqueta como $y_i \in \{-1, 1\}$ para $i = 1, 2, \dots, n$. En la mayor parte de casos, la búsqueda de un hiperplano óptimo en un espacio de entrada es muy difícil. Una solución es mapear los puntos del espacio de entrada a un espacio de características de mayor dimensión, donde se busca un hiperplano óptimo que pueda separar las clases, cuya ecuación es

$$w \cdot z + b = 0 \quad (2.18)$$

donde:

- $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ es el vector de pesos (normal al hiperplano).
- $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ es un punto en el espacio de características.
- b es el término de sesgo o bias.

Tal que se puede separar el punto x_i de acuerdo a la función

$$f(x_i) = \text{sign}(w \cdot z + b) = \begin{cases} 1 & y_i = 1 \\ -1 & y_i = -1 \end{cases} \quad (2.19)$$

El conjunto de los puntos se dice que es linealmente separable si existe (w, b) tales que las siguientes inecuaciones (2.20) sean válidas para todos los puntos. Estas inecuaciones garantizan que todos los puntos de una clase estén separados del hiperplano por un margen de al menos 1, y que los puntos de clase opuesta estén separados por un margen de al menos 1 en la dirección opuesta

$$\begin{cases} w \cdot z + b \geq 1 & y_i = 1 \\ w \cdot z + b \leq -1 & y_i = -1 \end{cases} \quad (2.20)$$

Como se busca maximizar el margen entre las proyecciones de los puntos, la distancia entre estos márgenes es $\frac{2}{\|w\|}$, lo cual asegura una mejor generalización del modelo.

2.1.16.2. Caso no linealmente separable

Si el conjunto de puntos no es perfectamente separable, el modelo introduce variables de holgura $\xi_i \geq 0$, que permiten que algunos puntos se ubiquen dentro del margen o incluso en el lado incorrecto del hiperplano. Estas variables miden el grado en que un punto se desvía del margen, permitiendo así ciertos errores de clasificación sin que se vea afectada la estructura general del modelo de tal modo que la inecuación (2.20) se convierte a

$$y_i(w \cdot z + b) \geq 1 - \xi_i \quad (2.21)$$

Entonces, el problema del hiperplano óptimo se redefine como la solución al problema

$$\min \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i \right\} \quad (2.22)$$

donde C es un parámetro de regularización, que controla el equilibrio entre maximizar el margen y minimizar los errores. Un valor alto de C tiende a minimizar ξ_i lo que resulta en un margen más estrecho y un modelo más complejo, pero con mayor riesgo de sobreajuste, especialmente en casos de separación perfecta. Por otro lado, un C bajo permite mayores valores de ξ_i , lo que genera un margen más amplio a cambio de tolerar casos dentro del margen o mal clasificados (Suárez, 2014).

2.2. Antecedentes de la Investigación

2.2.1. Antecedentes Internacionales

La identificación de señales de muones en cascadas de partículas atmosféricas y su potencial para distinguir eventos gamma y hadrónicos fue investigada por Zuñiga et al. (2017). Para estudiar esta posibilidad realizaron simulaciones de Monte Carlo con electrones verticales y muones dentro de un solo tanque de Cherenkov. Los electrones tenían energías entre 1 y 500 MeV, mientras que los muones abarcaron un rango de 1 a 15 GeV. Luego, se analizó la diferencia de tiempo en las señales entre el fotomultiplicador central y los periféricos. Para probar la hipótesis de que las cascadas inducidas por rayos gamma presentan una diferencia de tiempo cercana a 0 ns entre los distintos PMTs, se compararon datos simulados de cascadas gamma generados por la colaboración HAWC, con datos de cascadas de rayos reales que pasaron la condición de activación. Los resultados mostraron que las cascadas gamma tienden a concentrarse de forma circular con diferencias de tiempo cercanas a ($\Delta t = 0$ ns). En

contraste, los eventos de ruido, asociados principalmente a hadrones, exhiben una distribución elíptica, con valores más dispersos y mayores diferencias de tiempo ($\Delta t \sim 5$ ns). Estos resultados sugieren que las cascadas gamma, al tener una distribución de tiempo más concentrada y simétrica, pueden distinguirse de las cascadas hadrónicas, que tienen una mayor dispersión en los tiempos de llegada.

En el estudio de Tian et al., (2018) exploran la discriminación entre rayos gamma y protones en el rango de energía de ~ 100 TeV utilizando el experimento LHAASO, un observatorio diseñado para detectar rayos gamma VHE. Introducen un método de simulación novedoso que optimiza el análisis al enfocarse en eventos pobres en muones, reduciendo significativamente la carga computacional. Los resultados demuestran una eficiencia de discriminación para rayos gamma superior al 87% por encima de 100 TeV, con un rechazo efectivo de eventos hadrónicos. Esto resalta el potencial de LHAASO para identificar fuentes de rayos gamma asociadas a aceleradores de rayos cósmicos de PeV y avanzar en la comprensión de los espectros cósmicos de alta energía.

En la investigación de Conceição et al., (2022) presentan una nueva estrategia para mejorar la discriminación de rayos gamma de alta energía del enorme fondo de rayos cósmicos cargados en grandes conjuntos terrestres de rayos cósmicos. Esta estrategia se basa en la introducción de una nueva variable simple, $P_{\gamma h}^{\alpha}$, que combina la probabilidad de marcar muones y/o partículas muy energéticas en cada estación individual del arreglo. Se realizaron simulaciones utilizando CORSIKA (versión 7.5600), solo se utilizaron protones con energía primaria entre 40 y 63 TeV y un ángulo cenital entre 5° y 15° . Se encontró que el valor de $\alpha = 12$ maximiza la relación entre la señal y la raíz cuadrada del fondo ($S/\sqrt{B}$) para una eficiencia de señal $S = 0,6$. Lo que demuestra el poder de discriminación de esta nueva variable, particularmente importante para energías de múltiples TeV y superiores.

Un nuevo método para la discriminación entre cascadas de rayos gamma y protones es usando la forma parabólica del frente de las cascadas es propuesta por Makelvani & Bahmanabadi, (2022), que describen el uso de simulaciones de CORSIKA para estudiar las características de cascadas atmosféricas en un rango de energías entre 10^{13} y 10^{16} eV, que inciden verticalmente. Las simulaciones se realizaron a una altitud de 1200 metros sobre el nivel del mar (correspondiente a la ubicación del Observatorio de Alborz en Teherán). Este estudio se centra en ajustar una curva parabólica en el frente de la cascada atmosférica y obtener su longitud focal. Los resultados muestran que para longitudes focales de hasta 2 km, la partícula primaria de la cascada de partículas con una probabilidad del 94 % es un rayo gamma, para longitudes focales entre 3 y 4 km, con una probabilidad del 98 %, la partícula primaria es un protón y para longitudes focales entre 2 y 3 km, la probabilidad de presencia de un protón y un rayo gamma como partícula primaria es aproximadamente igual. Esta diferencia en la longitud focal permite separar los rayos gamma de los protones, lo que sugiere que esta técnica puede combinarse con otros métodos para mejorar la discriminación entre estos tipos de eventos en estudios de rayos cósmicos de alta energía.

En el estudio de Alfaro et al., (2022) describen la implementación de técnicas de separación gamma/hadrones más sofisticados, a través de métodos de Machine Learning: Boosted Decision Trees (BDT) y Neural Networks (NN) comparándolas con los cortes estándar (SC y SC1D) de HAWC. Para entrenar estos métodos de Machine Learning, se utilizó CORSIKA 7.4 para simular cascadas atmosféricas iniciadas por partículas de alta energía, con los modelos de QGSJET-II-04 y FLUKA, entre 5 GeV y 500 TeV, con un ángulo cenital de hasta 60°. Encontraron que BDT superó en rendimiento a los métodos actuales, mostrando mejoras de hasta un 19% sobre SC1D y un 10% sobre SC en la separación de hadrones. Asimismo, BDT demostró ser más robusto ante variables débiles o correlacionadas y maneja más parámetros que las NN. Esta mayor complejidad y el enfoque incremental en la selección

de variables le dieron una ventaja, generalizando mejor que las NN. Sin embargo, el aumento en la sensibilidad ofrecido por BDT no siempre justifica el costo adicional en términos de incertidumbre sistemática.

Para la discriminación gamma/hadrón en energías de PeV, Bakalová et al., (2023) proponen un enfoque novedoso basado en el análisis de la no uniformidad azimutal de las distribuciones de partículas en el suelo introduciendo una nueva variable, C_k . Al analizar la distribución de C_k en función de r_k , definieron una nueva variable discriminante entre rayos gamma y hadrones, denotada como LCm (valor del logaritmo de la distribución de C_k en un r_k dado). Se realizaron simulaciones de partículas con energías entre 1 – 2 PeV, con un ángulo cenital de 20°, el nivel de observación es 4 700 msnm. Comparando con las señales que producen los muones ($S\mu$), encontraron que LCm tiene una eficiencia del 90 % en la selección de la cascada de rayos gamma, lo que demuestran que LCm es más eficaz para identificar cascadas de rayos de fondo en comparación con $S\mu$.

La necesidad de contar con un observatorio de rayos gamma en el hemisferio sur, como los observatorios de LHAASO y HAWC, ha sido destacada por la colaboración SWGO en un artículo científico de Chiavassa et al., (2024). El objetivo de este proyecto es la construcción de un observatorio de amplio campo de visión y alto ciclo de trabajo para explorar el cielo del hemisferio sur en busca de fuentes de rayos gamma a energías superiores a 100 GeV. El diseño de SWGO se basa en el uso de detectores Cherenkov de agua para detectar un gran número de partículas en el aire y deberá discriminar aquellas originadas por fotones de las que provienen de un fondo hadrónico. El experimento debe situarse en una ubicación con una latitud entre 10° y 30° sur y a una altitud superior a 4 400 m s.n.m. Entre los sitios candidatos propuestos en Sudamérica para la construcción del observatorio, destacan lugares en Perú, como Imata en Arequipa y la Laguna Sibinacocha en Cusco, el cual es un reservorio natural de agua a gran

altitud que cumple con los criterios de volumen, profundidad y otros requerimientos para albergar la construcción del observatorio en un lago.

2.2.2. Antecedentes Nacionales

En la tesis de maestría de Rengifo Gonzáles (2017) se busca un método para resolver el problema de la identificación de señales de rayos gamma frente a un fondo dominante de hadrones a energías de TeV en diversos experimentos, utilizando simulaciones de CORSIKA. El enfoque consiste en simular eventos causados por fotones y protones, de los cuales se extraen parámetros clave de los perfiles longitudinales de las cascadas, como el máximo de cascada (X_{max}), el ancho de la cascada (FWHM, por sus siglas en inglés, *full width at half-maximum*), el parámetro de asimetría, el número máximo de partículas (N_{max}) y el comienzo de la cascada (X_{start}). Se probaron dos métodos: el primero, basado en cortes simples, se aplicó a energías simuladas de 10^2 a 10^5 GeV, encontrando que parámetros como X_{max} , FWHM, N_{max} y X_{start} dependen de la energía, asimismo que el 54% de los eventos de señal y el 12% de los de fondo fueron retenidos. El segundo método, un análisis multivariado utilizando TMVA, destacó el uso de Boosted Decision Trees (BDT), reduciendo el fondo al 0.7% para una eficiencia de señal similar. Con cortes más estrictos, se alcanzó una tasa de 1 fotón por cada 1000 protones, lo que indica una capacidad de rechazo de fondo de 10^3 , pero la viabilidad de la separación gamma/hadrón aún requiere mejoras adicionales.

En el estudio de Luzquiños Saavedra (2024) propone una nueva variable de separación gamma/hadrón basada en la distribución del tiempo de llegada de las partículas secundarias en SWGO. Utilizando simulaciones de CORSIKA para modelar las cascadas atmosféricas, bajo condiciones geomagnéticas del sitio de Imata, Perú, se simuló fotones y protones con una trayectoria vertical en el centro del arreglo en el rango de energía de 1 a 100 TeV. Se encontró que el parámetro de separación gamma/hadrón óptimo es el tiempo de llegada dentro de un

anillo de 100 a 150 m, para el percentil del 15% de las partículas. Este análisis, mostró una eficiencia de $\geq 88\%$ para la señal y un rechazo de fondo de $\geq 90\%$.

2.3. Hipótesis

2.3.1. Hipótesis General

- Las componentes muónica y electromagnética permiten una discriminación eficaz entre los rayos gamma y protones simulados con CORSIKA en la Laguna Sibinacocha.

2.3.2. Hipótesis Específicas

- El número de partículas y su distribución espacial en las cascadas atmosféricas varían significativamente entre rayos gamma y protones a diferentes ángulos y energías en el nivel de observación.
- La densidad superficial de las componentes muónica y electromagnética en el nivel de observación presenta diferencias entre las cascadas atmosféricas de rayos gamma y protones.
- El número de partículas correspondientes a las componentes muónica y electromagnética por cascada en el nivel de observación es significativamente diferente entre rayos gamma y protones.
- La eficiencia, pureza y factor Q del modelo SVM aplicado a las componentes muónica y electromagnética para la discriminación entre rayos gamma y protones son altos y dependen de los diferentes ángulos y energías.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Enfoque de investigación

La investigación sigue un enfoque cuantitativo porque evaluó de manera objetiva la eficiencia de las componentes muónica y electromagnética para la discriminación entre rayos gamma y protones. Según Hernández-Sampieri & Mendoza (2020), este enfoque se caracteriza por planteamientos específicos y claramente delimitados desde el inicio. La recolección de datos se realiza para probar hipótesis mediante mediciones numéricas y análisis estadísticos, lo cual facilita la obtención de resultados objetivos y replicables. Además, emplea procedimientos estadísticos rigurosos para analizar las variables, lo que permite establecer patrones de comportamiento y validar teorías.

3.2. Nivel de la investigación

La presente investigación tiene un nivel descriptivo, ya que se enfocó en caracterizar las propiedades de las cascadas atmosféricas inducidas por rayos gamma y protones, con especial atención en las componentes muónica y electromagnética. Esto coincide con lo señalado por Hernández-Sampieri & Mendoza (2020), quienes sostienen que este tipo de investigación busca especificar propiedades, características y rasgos importantes del fenómeno en estudio, describiendo tendencias en un grupo o población. Por ello, mediante simulaciones en CORSIKA, se analizó la cantidad de partículas de ambas componentes y su distribución espacial en función del tipo de partícula primaria, la energía y el ángulo cenital.

3.3. Diseño de la investigación

El diseño de esta investigación es no experimental, de tipo transversal, puesto que se centró en describir las propiedades de las cascadas atmosféricas inducidas por rayos gamma y protones, sin manipular directamente las variables y en una única vez.

3.4.3. Técnicas de recolección de información

Las simulaciones se realizaron con el software de CORSIKA, versión 77500, en el clúster del Instituto de Ciencias Nucleares (ICN) de la UNAM. Se aplicaron los modelos de interacciones hadrónicas de alta y baja energía, SYBILL 2.3d y GHEISHA, respectivamente. Se ejecutaron 50 000 eventos para cada combinación de energía, ángulo cenital y partícula primaria (protones y rayos gamma), abarcando energías de 50 GeV, 100 GeV, 500 GeV, 1 TeV y 10 TeV, y a tres ángulos de incidencia: 0°, 30° y 60°.

```
! Se coloca el número de eventos que se quieren simular
RUNNR 100 run number
EVTNR 1 number of first shower event
NSHOW 500 number of showers to be generated in one run

!En esta parte van las semillas (seed) que son generadas aleatoriamente
SEED 24539 0 0 seed for hadronic part
SEED 29023 0 0 seed for EGS4 part
SEED 10000 0 0 seed for Cherenkov part
SEED 17421 0 0 seed for 4. random number sequence
SEED 394 0 0 seed for 5. random number sequence

!Se define el nombre del directorio donde se guardaran los archivos
DIRECT /home/icn/diegovire/simulaciones_corsika/poster/corsika_gamma_1000GeV_0deg_4900m/output/output_10
0/ defines name of output directory
DATDIR ./ defines name of input directory

! Se establecen los parametros iniciales del rayo primario
PRMPAR 1 primary particle code: 1 = photon, 3 = e-, 14 = p+
FIXCHI 0 starting altitude of primary particle?
TSTART T taken from IACT option (start emission at border of atmosphere)
ERANGE 1000 1000 energy range of primary particle in GeV
ESLOPE -1.5 slope of energy spectrum
PHIP 0. 360.0 range of azimuth angle in deg
THETAP 0.0 0.0 range of zenith angle in deg
*VIEWCONE 0.0 0.0 range of viewcone in deg

!Parametros de los detectores(si existen)
TRAFLG F TRAJECTORY option
CWAVALG 250. 700. simulation range of wavelength band for cherenkov radiation in nm
CWAVRANG 250. 700 input range for all three CERQEFF files
CERSIZ 1 maximal bunch size of CHphotons treated together
CERQEF F T F quantum efficiency of PMT, atmospheric absorption of Cherenkov photons,
mirror reflectivity of telescope

!Condiciones del sitio de observación
MAGNET 23.174 -2.710 set the Earth magnetic field: Sibinacocha
OBSLEV 4900E2 observation level above sea level in cm
*ATMOSPHERE 7 T atmospheric parametrisation, here: US STD atm parametrised by Keilhauer

!Telescopios IACT (si existen)
*TELESCOPE 5.0000e2 -7.5000e2 0 26 1
*TELESCOPE -32.5000e2 1.0000e2 0 26 2

! Área de impacto de los núcleos de las cascadas
CSCAT 1 1500 1500 number of uses of each Cherenkov event, maximum scattering of core locati
on in cm
DATBAS T write header data in human redable form (ideal to fill that into our database)
USER DiegoV
*THIN 0 0.1 0 turn off thinning
```

Figura 3.2: Input file de CORSIKA. Cada parámetro tiene un comentario en el lado derecho que detalla el significado de cada variable con sus respectivas unidades. Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros del archivo de entrada, se muestra en la Figura 3.1, los valores asignados a los principales parámetros fueron:

NSHOW: 500

PRMPAR: $\gamma = 1, p = 14$

ERANGE: 50 , 100 , 500 , 1 000 y 10 000 GeV

PHIP: 0° , 30° y 60°

THETAP: 0.0° , 360.0°

MAGNET: 23.174 $- 2.710 \mu\text{T}$

OBSLEV: 4900E2 cm

Todas las simulaciones se guardaron en archivos de salida binarios “*DATnnnnnn*” para su posterior análisis.

3.4.4. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos

Los archivos de salida “*DATnnnnnn*”, se convirtieron a archivos con extensión *.root* utilizando el script *corsika2root*, para poder hacer el tratamiento y análisis de datos, ya que, como se menciona en la sección 2.1.15, ROOT es un marco de software optimizado que ofrece herramientas poderosas para este propósito.

Luego, estos archivos fueron procesados para elaborar la estadística de las partículas secundarias que llegan al nivel de observación y poder analizar los datos. El análisis incluyó la elaboración de histogramas 2D con paleta de colores, los cuales describen la distribución espacial de las partículas secundarias y permiten identificar patrones según su posición.

Además, se calculó la densidad superficial (en partículas/m²) de las componentes muónica y electromagnética en función del radio para analizar su comportamiento.

Por otro lado, con ROOT se determinó el número de fotones, electrones y positrones, cuya suma define la componente electromagnética, así como el número de muones y antimuones que conforman la componente muónica de cada evento para cada caso. Estos datos se procesaron posteriormente en Python, donde se calcularon las medidas de tendencia central y dispersión del número de partículas de ambas componentes. Además, se generaron histogramas y diagramas de dispersión de las componentes muónica (CM) frente a la electromagnética (CEM).

El método SVM se aplicó a estos datos usando la librería *sklearn.svm* de Python, para clasificar los eventos en dos categorías: aquellos iniciados por rayos gamma y por protones. Para ello, se emplearon las componentes muónica y electromagnética como variables de entrada al modelo. El modelo fue validado mediante un esquema de validación cruzada de 5 iteraciones (5-fold cross-validation), dividiendo los datos en 5 conjuntos iguales. En cada iteración, 4 conjuntos se utilizaron como datos de entrenamiento (40 000 datos) y el conjunto restante como datos de prueba (10 000 datos), rotando sucesivamente hasta cubrir todas las combinaciones. Este enfoque permitió garantizar una evaluación robusta del desempeño del modelo, evitando el sobreajuste.

Como los datos no eran linealmente separables, se empleó el parámetro de regularización $C = 0.1$. Además, se determinó la ecuación del hiperplano de separación generado por el SVM, representada en el espacio CM-CEM como una línea de decisión. Finalmente, los resultados del modelo fueron analizados para cada combinación de energía y ángulo cenital de los eventos simulados, evaluando cómo el rendimiento del SVM varía en diferentes condiciones.

3.4.5. Eficiencia en la discriminación

Las eficiencias de la correcta selección entre eventos iniciados por rayos gamma y protones, respectivamente se definen como:

$$\epsilon_{\gamma} = \frac{N_{\gamma}^{correctos}}{N_{\gamma}} \quad (3.1)$$

$$\epsilon_p = \frac{N_p^{correctos}}{N_p} \quad (3.2)$$

donde:

- N_{γ} es el número total de eventos correspondiente a rayos gamma
- N_p es el número total de eventos iniciados por protones.
- $N_{\gamma}^{correctos}$ es el número de eventos clasificados correctamente como correspondientes a rayos gamma.
- $N_p^{correctos}$ es el número de eventos clasificados correctamente como iniciados por protones.

3.4.6. Pureza

La pureza es una métrica utilizada para evaluar la proporción de eventos correctamente clasificados como rayos gamma dentro del conjunto total de eventos identificados como rayos gamma por el modelo. Se define como:

$$P_{\gamma} = \frac{N_{\gamma}^{correctos}}{N_{\gamma}^{predichos}} \quad (3.3)$$

donde, $N_{\gamma}^{predichos}$ es el número total de eventos clasificados por el modelo como rayos gamma incluidos los correctos e incorrectos.

3.4.7. Factor de Calidad (Q-factor)

Es una métrica ampliamente utilizada en experimentos de Astropartículas para cuantificar que tan óptima es la discriminación entre rayos gamma (señal) y protones (ruido) de un modelo o corte. El Q_{factor} está definido como:

$$Q_{factor} = \frac{\epsilon_{\gamma}}{\sqrt{1 - \epsilon_p}} \quad (3.4)$$

Un valor alto del Q_{factor} sugiere que el modelo tiene una buena capacidad para detectar rayos gamma mientras minimiza la contaminación de protones. Por lo tanto, maximizar este parámetro es esencial para mejorar la sensibilidad de las detecciones y asegurar que las observaciones sean confiables.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Densidad de las componentes electromagnética y muónica y distribución espacial de las partículas secundarias en el nivel de observación

4.1.1. Rayos gammas y protones a 50 GeV y 0°

En la Figura 4.1 (a), se observa que la componente electromagnética (CEM) de los rayos gamma presenta la mayor densidad en el centro de la cascada, alcanzando un máximo de 1 partícula/m² y disminuyendo hasta los 110 m. Por otra parte, la CEM de los protones muestra una densidad ligeramente menor cerca al núcleo con 4×10^{-2} partículas/m², y se reduce completamente a los 230 m. La densidad de la componente muónica (CM) muestra una clara diferencia entre protones y rayos gamma, siendo más alta para los primeros. Para el protón, presenta su máxima densidad en el centro de la cascada, con valores de 3×10^{-3} partículas/m², disminuyendo hasta los 160 m. En contraste, la densidad de la CM del rayo gamma es mucho menor, alcanzando 8×10^{-5} partículas/m² en el centro de la cascada, y disminuyendo gradualmente hasta los 80 m.

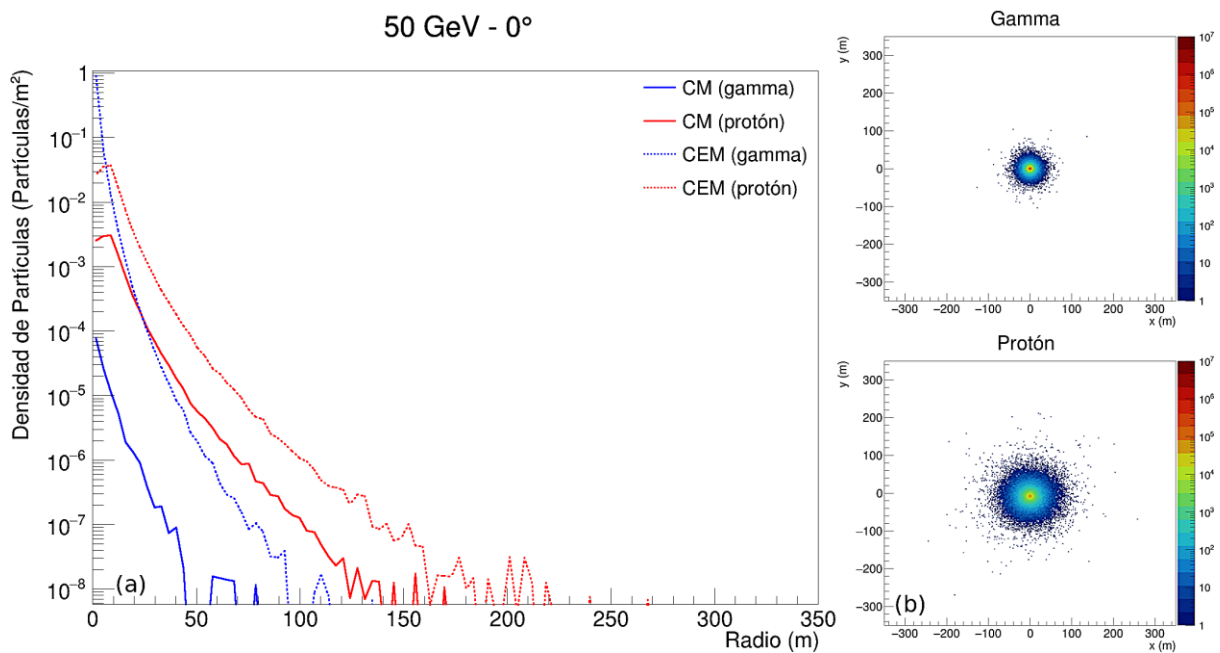


Figura 4.1: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 50 GeV a 0°.

Las cascadas producidas por los rayos gamma generaron un total de 2.34×10^6 partículas, mientras que las cascadas hadrónicas, 1.36×10^6 partículas. Como se observa en la Figura 4.1 (b), las cascadas de protones están más dispersas que las producidas por rayos gamma, con las partículas distribuyéndose dentro de un radio de 161.1 m y 381.5 m, respectivamente.

4.1.2. Rayos gammas y protones a 50 GeV y 30°

En la Figura 4.2 (a), se observa que la CEM de los rayos gamma presenta la mayor densidad en el centro de la cascada, alcanzando 3.1×10^{-1} partículas/m² y disminuye hasta los 160 m. Por otra parte, la CEM de los protones muestra una densidad máxima cerca al núcleo con 1.5×10^{-2} partículas/m², y disminuye hasta los 230 m. La densidad de la CM para los protones, claramente mayor que para los rayos gamma, presenta su máxima densidad a 10 m del centro de la cascada, con un valor de 1.5×10^{-3} partículas/m², disminuyendo hasta los 170 m. En contraste, la densidad de la CM del rayo gamma es mucho menor, alcanzando 6×10^{-5} partículas/m² en el centro de la cascada, y reduciéndose gradualmente hasta los 65 m.

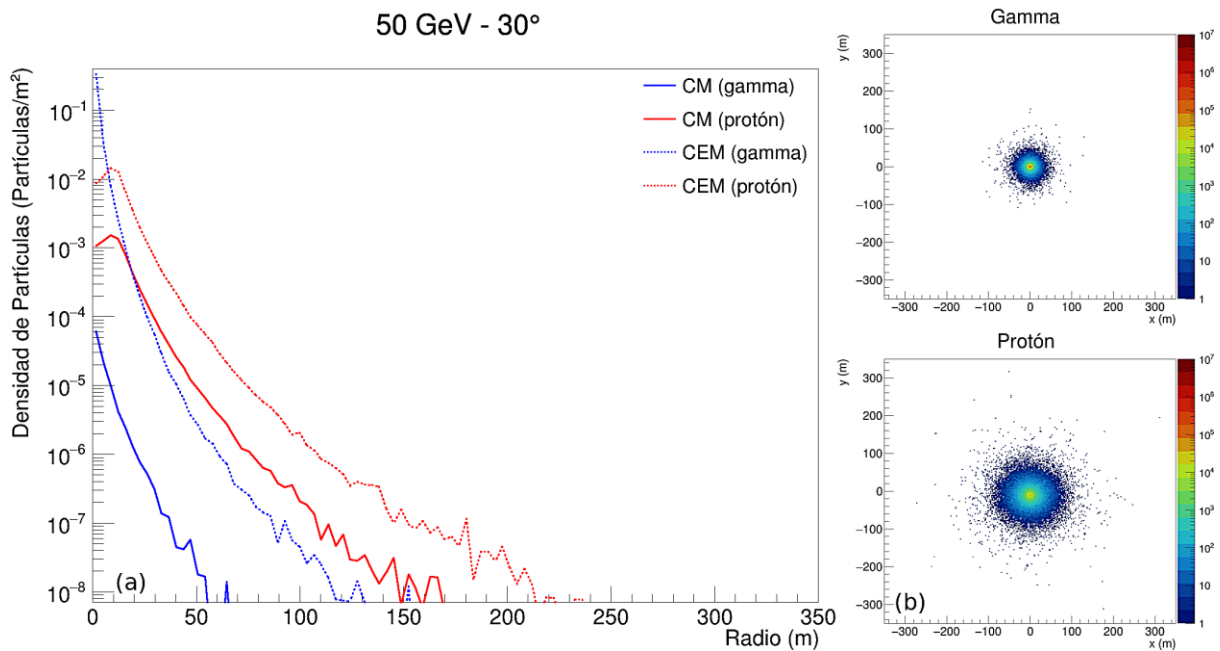


Figura 4.2: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 50 GeV a 30° .

Las cascadas producidas por los rayos gamma produjeron un total de 9.84×10^5 partículas, mientras que las cascadas hadrónicas, 8.69×10^5 partículas. Como se observa en la Figura 4.2 (b), las cascadas de protones están más dispersas que las producidas por rayos gamma, con las partículas distribuyéndose dentro de un radio de 152.5 m y 367.4 m, respectivamente.

4.1.3. Rayos gammas y protones a 50 GeV y 60°

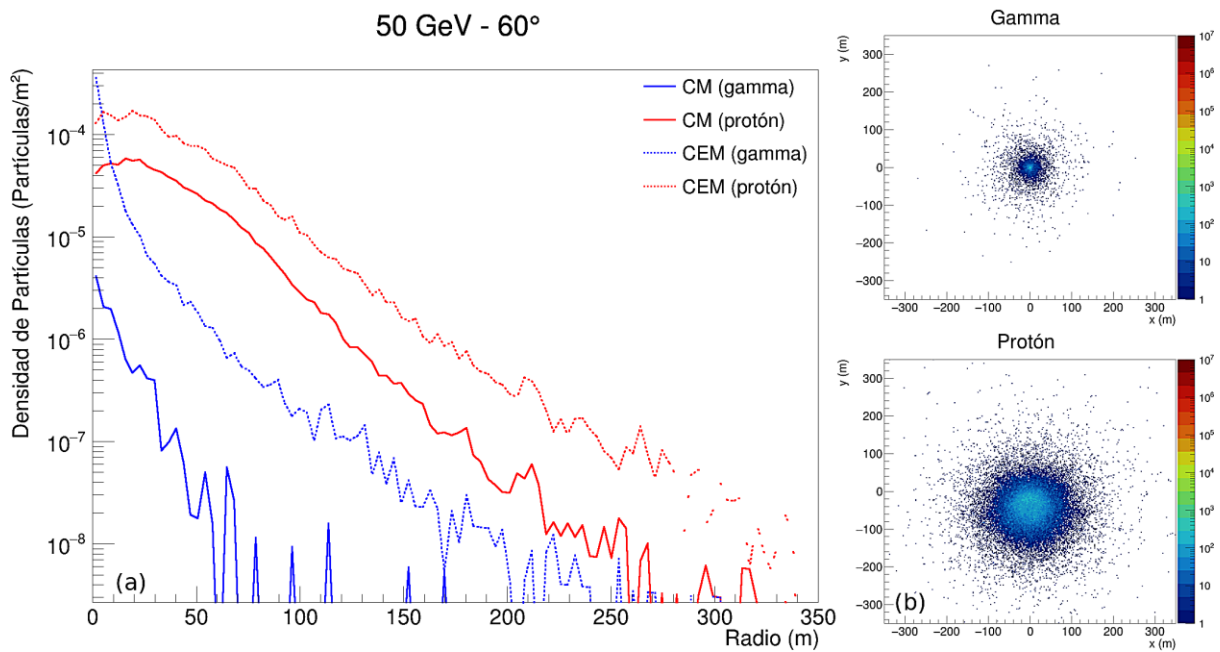


Figura 4.3: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 50 GeV a 60°.

En la Figura 4.3 (a), se observa que la CEM de los rayos gamma presenta la mayor densidad en el centro de la cascada, alcanzando 4×10^{-4} partículas/m² y disminuye hasta los 270 m. Por otra parte, la CEM de los protones muestra una densidad máxima a 20 m del núcleo con 2×10^{-4} partículas/m², y disminuye hasta distancias mayores a 340 m. La densidad de la CM para los protones, tiene un comportamiento similar a su CEM puesto que presenta su máxima densidad a los 20 m, con un valor de 6×10^{-5} partículas/m², disminuyendo hasta los 320 m.

En contraste, la densidad de la CM del rayo gamma es mucho menor, alcanzando 3×10^{-6} partículas/m² en el centro de la cascada, y decreciendo hasta los 170 m.

Las cascadas producidas por los rayos gamma produjeron un total de 5.43×10^3 partículas, mientras que las cascadas hadrónicas, 1.31×10^5 partículas. Como se observa en la Figura 4.3 (b), las cascadas de protones están significativamente más dispersas que las producidas por rayos gamma, con las partículas distribuyéndose dentro de un radio de 416.8 m y 1091.5 m, respectivamente, además tienen una menor concentración en el núcleo, en comparación con los otros ángulos.

4.1.4. Rayos gammas y protones a 100 GeV y 0°

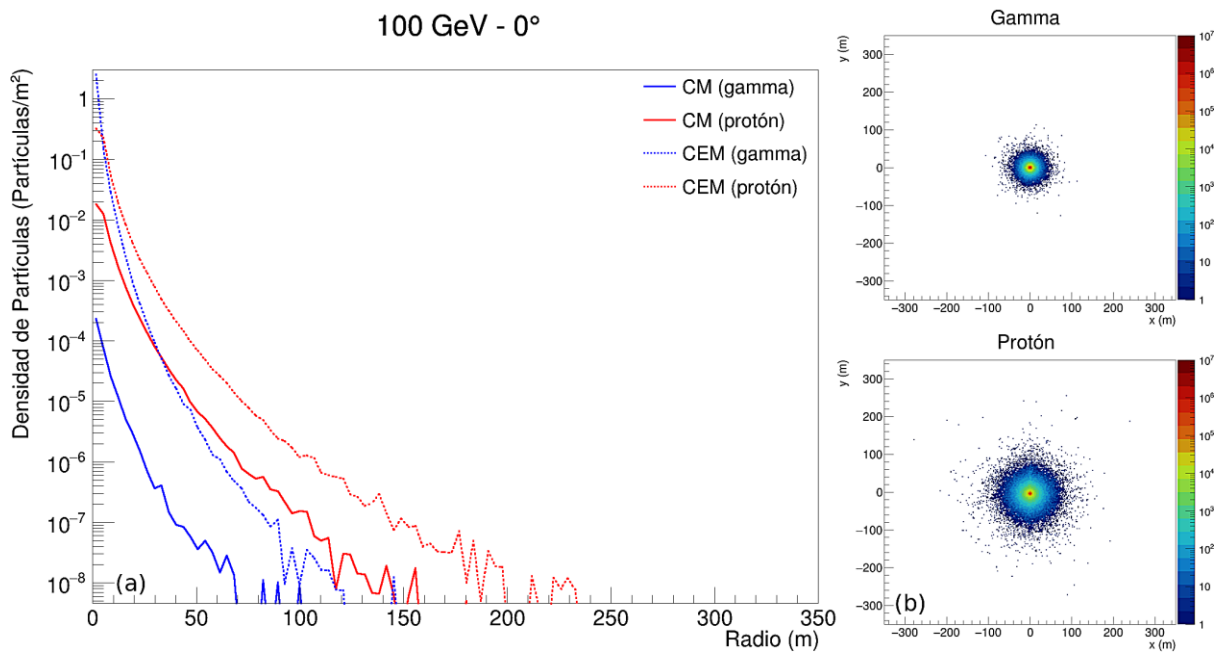


Figura 4.4: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 100 GeV a 0°.

En la Figura 4.4 (a), se observa que la CEM de los rayos gamma presenta la mayor densidad en el centro de la cascada, alcanzando 2 partículas/m² y disminuye hasta los 146 m. Por otra parte, la CEM de los protones muestra una densidad máxima cerca al núcleo con 3×10^{-1} partículas/m², y disminuye hasta los 233 m. La densidad de la CM para los protones,

claramente mayor que para los rayos gamma, presenta su máxima densidad en el centro de la cascada, con un valor de 2×10^{-2} partículas/m², disminuyendo hasta los 157 m. En contraste, la densidad de la CM del rayo gamma es menor, alcanzando 2×10^{-4} partículas/m² en el centro de la cascada, y reduciéndose gradualmente hasta los 100 m.

Las cascadas producidas por los rayos gamma produjeron un total de 6.2×10^6 partículas, mientras que las cascadas hadrónicas, 3.39×10^6 partículas. Como se observa en la Figura 4.4 (b), las cascadas de protones están más dispersas que las producidas por rayos gamma, con las partículas distribuyéndose dentro de un radio de 146.6 m y 312.6 m, respectivamente.

4.1.5. Rayos gammas y protones a 100 GeV y 30°

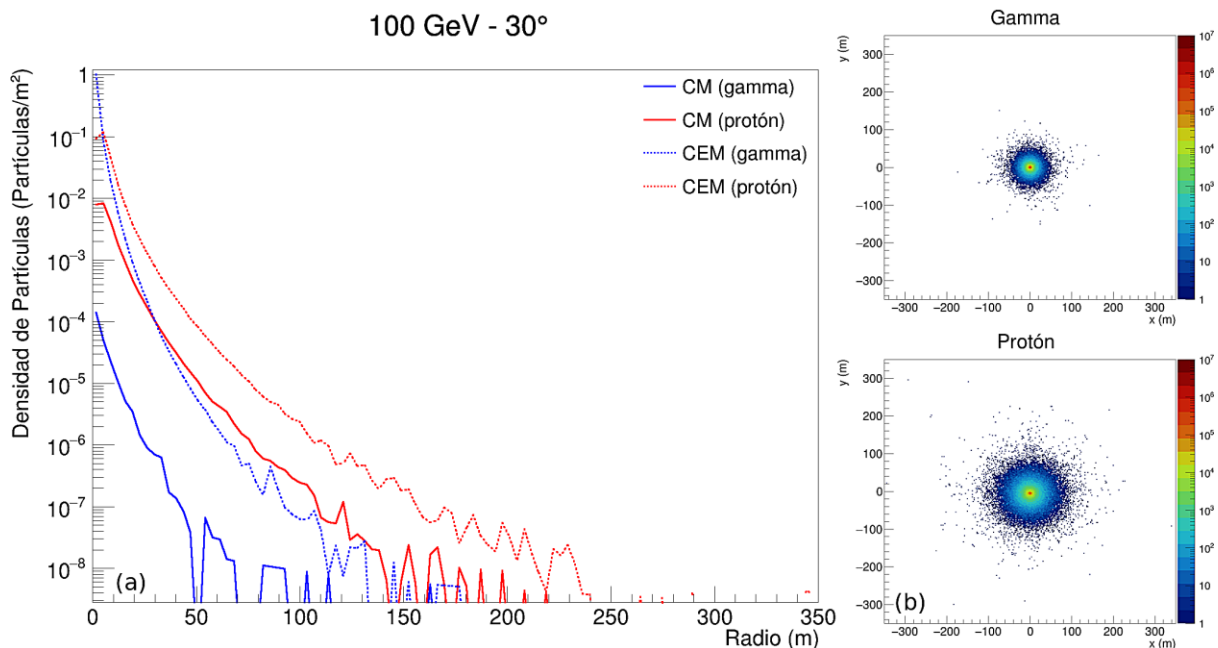


Figura 4.5: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 100 GeV a 30°.

En la Figura 4.5 (a), se observa que la CEM de los rayos gamma presenta la mayor densidad en el centro de la cascada, alcanzando 1 partícula/m² y disminuye hasta los 170 m. Por otra parte, la CEM de los protones muestra una densidad máxima en el núcleo de la cascada

con 10^{-1} partículas/m², y disminuye hasta los 240 m. La densidad de la CM para los protones, claramente mayor que para los rayos gamma, presenta su máxima densidad en el centro de la cascada, con un valor de 8×10^{-3} partículas/m², disminuyendo hasta los 220 m. En contraste, la densidad de la CM del rayo gamma es menor, alcanzando 1.5×10^{-4} partículas/m² en el centro de la cascada, y reduciéndose gradualmente hasta los 115 m.

Las cascadas producidas por los rayos gamma produjeron un total de 2.8×10^6 partículas, mientras que las cascadas hadrónicas, 2.13×10^6 partículas. Como se observa en la Figura 4.5 (b), las cascadas de protones están más dispersas que las producidas por rayos gamma, con las partículas distribuyéndose dentro de un radio de 175.1 m y 717.6 m, respectivamente.

4.1.6. Rayos gammas y protones a 100 GeV y 60°

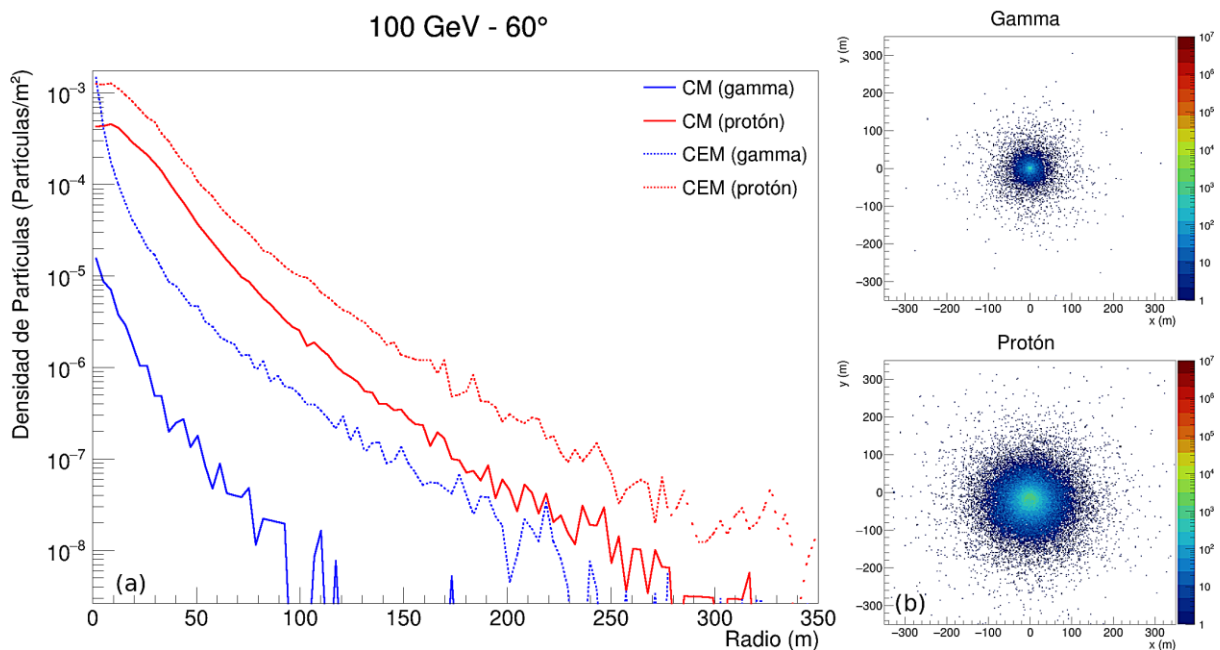


Figura 4.6: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 100 GeV a 60°.

En la Figura 4.6 (a), se observa que la CEM de los rayos gamma presenta la mayor densidad en el centro de la cascada, alcanzando 2×10^{-3} partícula/m² y disminuye hasta los

280 m. Por otra parte, la CEM de los protones muestra una densidad máxima en el núcleo de la cascada con 1.6×10^{-3} partículas/m², y disminuye a distancias mayores a 350 m. La densidad de la CM para los protones, claramente mayor que para los rayos gamma, presenta su máxima densidad en el centro de la cascada, con un valor de 5×10^{-4} partículas/m², disminuyendo hasta los 318 m. En contraste, la densidad de la CM del rayo gamma es menor, alcanzando 1.5×10^{-5} partículas/m² en el centro de la cascada, y reduciéndose gradualmente hasta los 172 m.

Las cascadas producidas por los rayos gamma produjeron un total de 1.66×10^4 partículas, mientras que las cascadas hadrónicas, 3.02×10^5 partículas. Como se observa en la Figura 4.6 (b), las cascadas de protones están más dispersas que las producidas por rayos gamma, con las partículas distribuyéndose dentro de un radio de 353.8 m y 670.9 m, respectivamente.

4.1.7. Rayos gammas y protones a 500 GeV y 0°

En la Figura 4.7 (a), se observa que la CEM de los protones presenta la mayor densidad en el centro de la cascada, alcanzando 9 partícula/m² y disminuye hasta los 290 m. Por otra parte, la CEM de los rayos gamma muestra una densidad máxima en el núcleo de la cascada con 3 partículas/m², y disminuye rápidamente hasta 160 m. La densidad de la CM para los protones, claramente mayor que para los rayos gamma, presenta su máxima densidad en el centro de la cascada, con un valor de 2×10^{-1} partículas/m², disminuyendo hasta los 200 m. En contraste, la densidad de la CM del rayo gamma es menor, alcanzando 2×10^{-3} partículas/m² en el centro de la cascada, y reduciéndose gradualmente hasta los 94 m.

Las cascadas producidas por los rayos gamma produjeron un total de 5.40×10^7 partículas, mientras que las cascadas hadrónicas, 2.56×10^7 partículas. Como se observa en la Figura 4.7 (b), las cascadas de protones están más dispersas que las producidas por rayos

gamma, con las partículas distribuyéndose dentro de un radio de 157.8 m y 324.2 m, respectivamente.

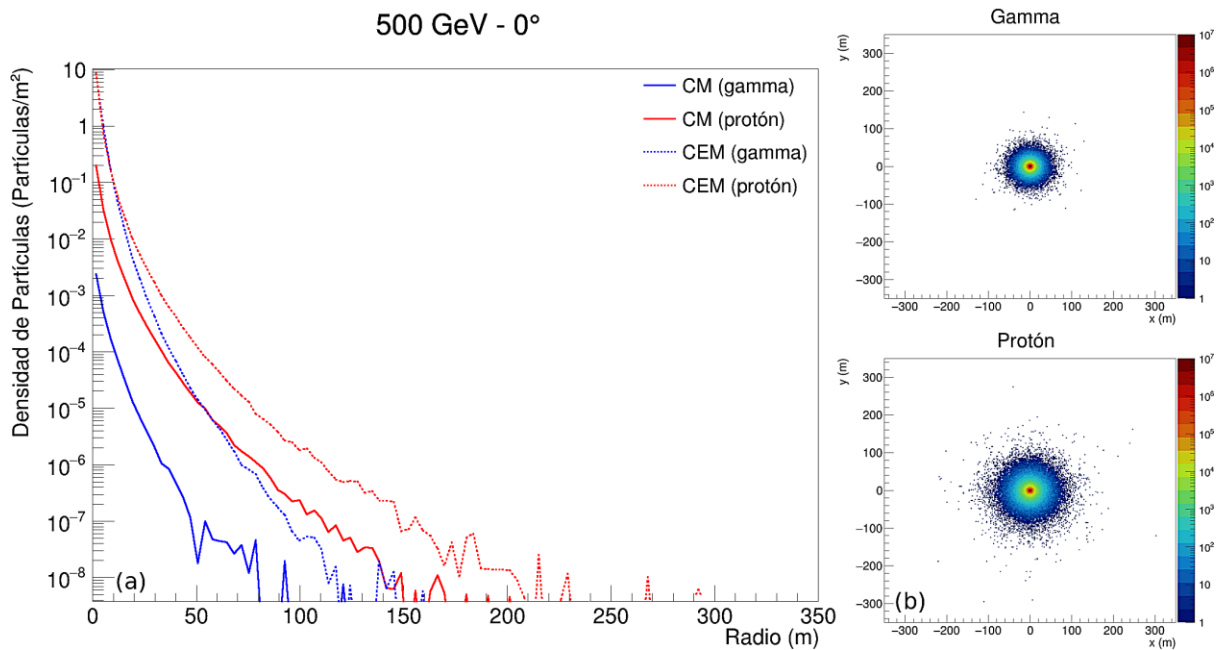


Figura 4.7: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gamma de 500 GeV a 0°.

4.1.8. Rayos gammas y protones a 500 GeV y 30°

En la Figura 4.8 (a), se observa que la CEM de los rayos gamma presenta la mayor densidad en el centro de la cascada, alcanzando 9 partícula/m² y disminuye hasta los 170 m. Por otra parte, la CEM de los protones muestra una densidad máxima en el núcleo de la cascada con 5 partículas/m², y disminuye hasta los 260 m. La densidad de la CM para los protones, claramente mayor que para los rayos gamma, presenta su máxima densidad en el centro de la cascada, con un valor de 1.5×10^{-1} partículas/m², disminuyendo hasta los 180 m. En contraste, la densidad de la CM del rayo gamma es menor, alcanzando 1.5×10^{-3} partículas/m² en el centro de la cascada, y reduciéndose gradualmente hasta los 118 m.

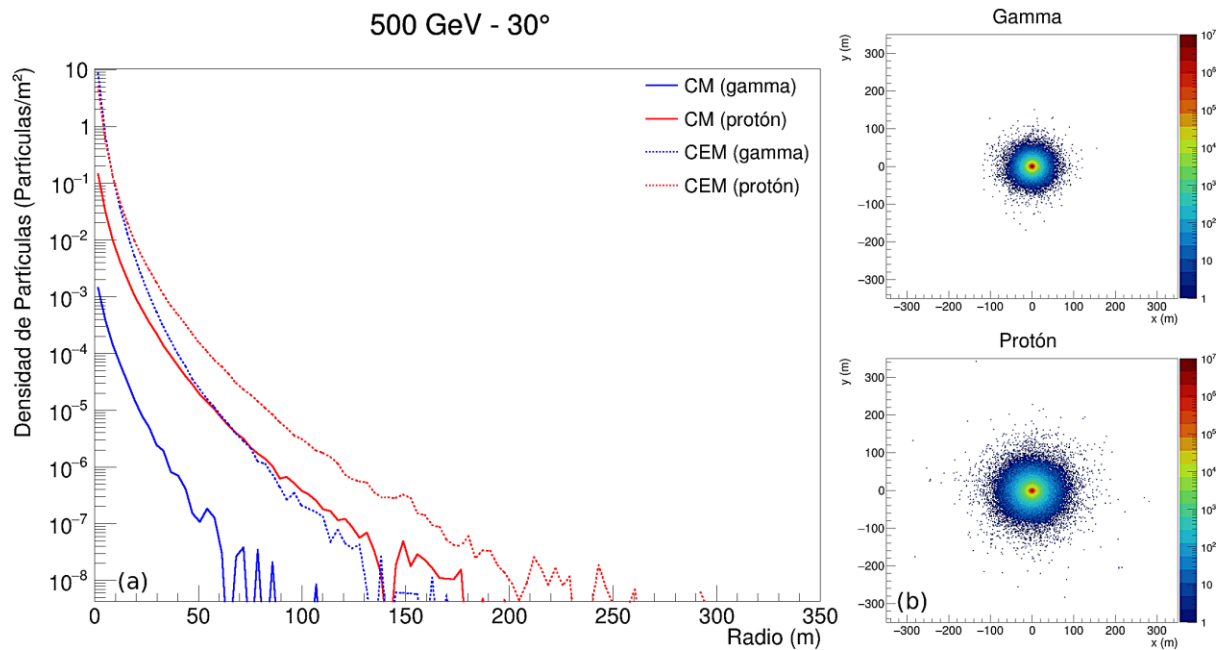


Figura 4.8: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 500 GeV a 30°.

Las cascadas producidas por los rayos gamma produjeron un total de 2.75×10^7 partículas, mientras que las cascadas hadrónicas, 1.66×10^7 partículas. Como se observa en la Figura 4.8 (b), las cascadas de protones están más dispersas que las producidas por rayos gamma, con las partículas distribuyéndose dentro de un radio de 169.6 m y 366.6 m, respectivamente.

4.1.9. Rayos gammas y protones a 500 GeV y 60°

En la Figura 4.9 (a), se observa que la CEM de los protones presenta la mayor densidad en el centro de la cascada, alcanzando 10^{-1} partícula/m² y disminuye a distancias mayores a 350 m. Por otra parte, la CEM de los rayos gamma muestra una densidad máxima en el núcleo de la cascada con 3.6×10^{-2} partículas/m², y se reduce a los 345 m. La densidad de la CM para los protones, claramente mayor que para los rayos gamma, presenta su máxima densidad en el centro de la cascada, con un valor de 2×10^{-2} partículas/m², disminuyendo hasta los 339

m. En contraste, la densidad de la CM del rayo gamma es menor, alcanzando 2×10^{-4} partículas/m² en el centro de la cascada, y reduciéndose hasta los 191 m.

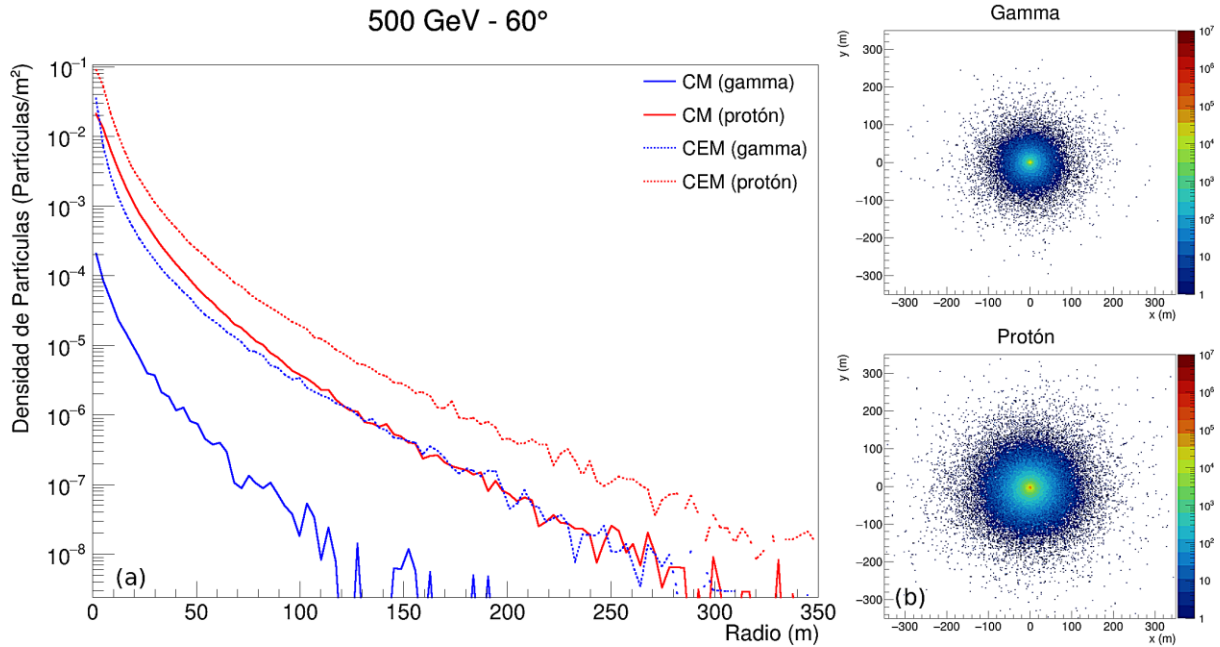


Figura 4.9: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gamma de 500 GeV a 60°.

Las cascadas producidas por los rayos gamma produjeron un total de 2.33×10^5 partículas, mientras que las cascadas hadrónicas, 1.74×10^6 partículas. Como se observa en la Figura 4.9 (b), las cascadas de protones están más dispersas que las producidas por rayos gamma, con las partículas distribuyéndose dentro de un radio de 343.3 m y 679.2 m, respectivamente.

4.1.10. Rayos gamma y protones a 1 TeV y 0°

En la Figura 4.10 (a), se observa que la CEM de los protones presenta la mayor densidad en el centro de la cascada, alcanzando 10 partículas/m² y disminuye hasta los 250 m. Por otra parte, la CEM de los rayos gamma muestra una densidad máxima en el núcleo de la cascada con 7 partículas/m², y se reduce a los 141 m. La densidad de la CM para los protones, claramente mayor que para los rayos gamma, presenta su máxima densidad en el centro de la

cascada, con un valor de 4×10^{-1} partículas/m², disminuyendo hasta los 175 m. En contraste, la densidad de la CM del rayo gamma es menor, alcanzando 6×10^{-3} partículas/m² en el centro de la cascada, y decreciendo rápidamente hasta los 87 m.

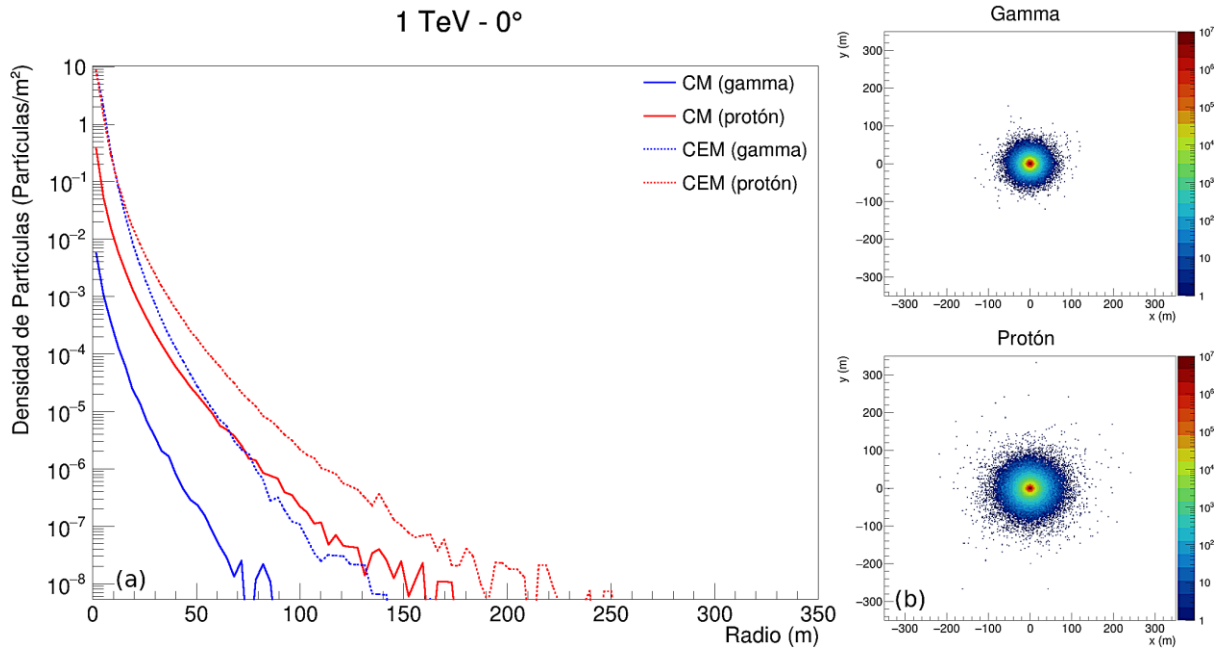


Figura 4.10: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 1 TeV a 0°.

Las cascadas producidas por los rayos gamma produjeron un total de 1.29×10^8 partículas, mientras que las cascadas hadrónicas, 5.95×10^7 partículas. Como se observa en la Figura 4.10 (b), las cascadas de protones están más dispersas que las producidas por rayos gamma, con las partículas distribuyéndose dentro de un radio de 161.5 m y 487.5 m, respectivamente.

4.1.11. Rayos gammas y protones a 1 TeV y 30°

En la Figura 4.11 (a), se observa que la CEM de los protones presenta la mayor densidad en el centro de la cascada, alcanzando 9 partícula/m² y disminuye hasta los 340 m. Por otra parte, la CEM de los rayos gamma muestra una densidad máxima en el núcleo de la cascada con 7 partículas/m², y se reduce a los 209 m. La densidad de la CM para los protones,

claramente mayor que para los rayos gamma, presenta su máxima densidad en el centro de la cascada, con un valor de 3×10^{-1} partículas/m², disminuyendo hasta los 232 m. En contraste, la densidad de la CM del rayo gamma es menor, alcanzando 3.7×10^{-3} partículas/m² en el centro de la cascada, y decreciendo rápidamente hasta los 136 m.

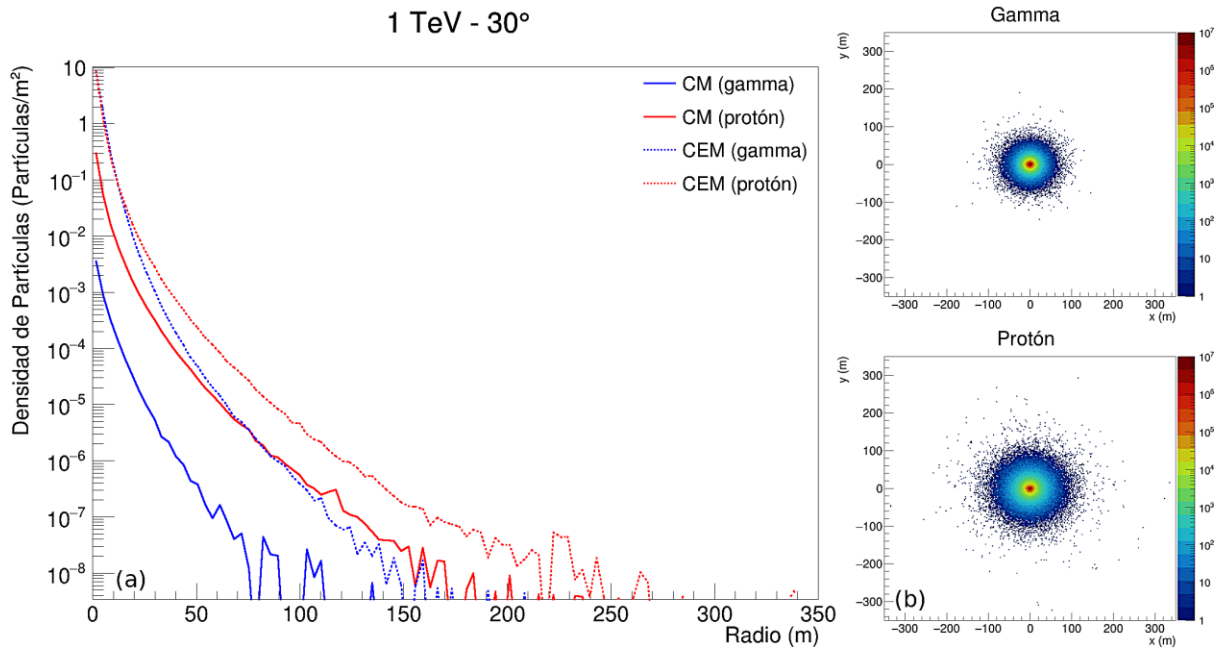


Figura 4.11: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 1 TeV a 30°.

Las cascadas producidas por los rayos gamma produjeron un total de 7.03×10^7 partículas, mientras que las cascadas hadrónicas, 3.98×10^7 partículas. Como se observa en la Figura 4.11 (b), las cascadas de protones están más dispersas que las producidas por rayos gamma, con las partículas distribuyéndose dentro de un radio de 208.4 m y 515.4 m, respectivamente.

4.1.12. Rayos gammas y protones a 1 TeV y 60°

En la Figura 4.12 (a), se observa que la CEM de los protones presenta la mayor densidad en el centro de la cascada, alcanzando 4×10^{-1} partícula/m² y decrece hasta más de 350 m. Por otra parte, la CEM de los rayos gamma muestra una densidad máxima en el núcleo de la

cascada con 1.2×10^{-1} partículas/m², y se reduce hasta más de 350 m. La densidad de la CM para los protones, claramente mayor que para los rayos gamma, presenta su máxima densidad en el centro de la cascada, con un valor de 7×10^{-2} partículas/m², disminuyendo hasta más de 350 m. En contraste, la densidad de la CM del rayo gamma es menor, alcanzando 5×10^{-4} partículas/m² en el centro de la cascada, y decreciendo rápidamente hasta los 243 m.

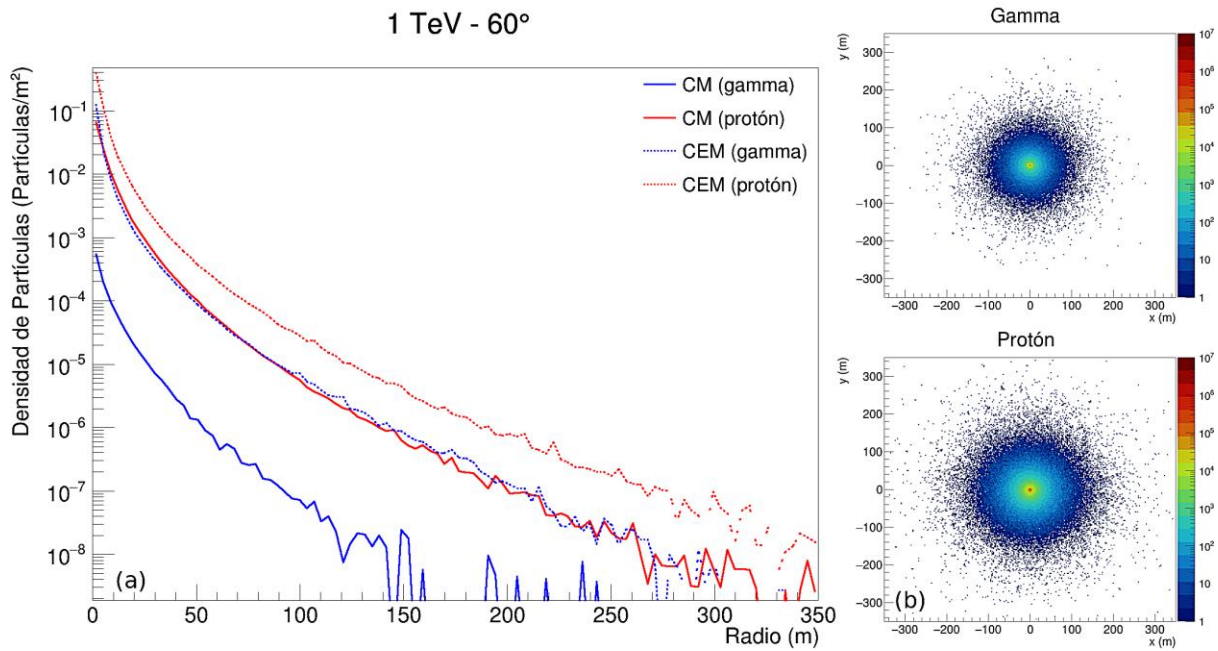


Figura 4.12: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 1 TeV a 60°.

Las cascadas producidas por los rayos gamma produjeron un total de 7.1×10^5 partículas, mientras que las cascadas hadrónicas, 3.65×10^6 partículas. Como se observa en la Figura 4.12 (b), las cascadas de protones están más dispersas que las producidas por rayos gamma, con las partículas distribuyéndose dentro de un radio de 430.9 m y 807.2 m, respectivamente.

4.1.13. Rayos gammas y protones a 10 TeV y 0°

En la Figura 4.13 (a), se observa que la CEM de los protones presenta la mayor densidad en el centro de la cascada, alcanzando 10 partícula/m² y disminuye hasta los 290 m. Por otra parte,

la CEM de los rayos gamma muestra una densidad máxima a 20 m del núcleo de la cascada con 8×10^{-1} partículas/m², y se reduce hasta los 209 m. La densidad de la CM para los protones, claramente mayor que para los rayos gamma, presenta su máxima densidad en el centro de la cascada, con un valor de 3 partículas/m², disminuyendo hasta los 240 m. En contraste, la densidad de la CM del rayo gamma es menor, alcanzando 10^{-1} partículas/m² en el centro de la cascada, y decreciendo rápidamente hasta los 98 m.

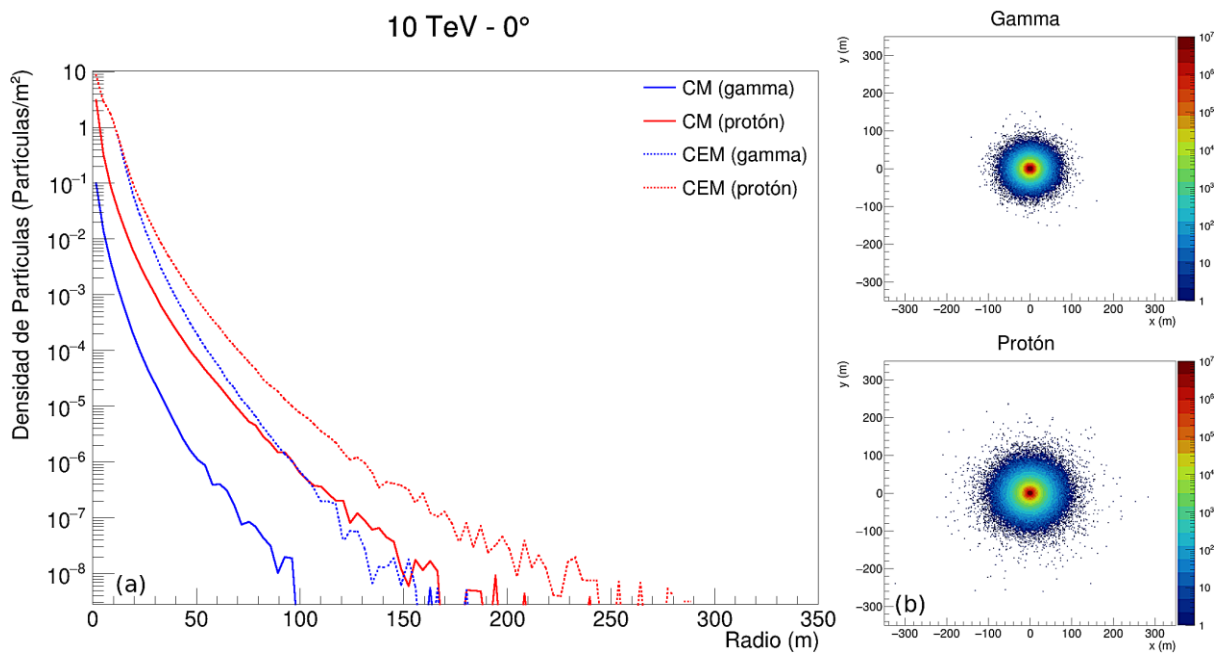


Figura 4.13: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 10 TeV a 0°.

Las cascadas producidas por los rayos gamma produjeron un total de 1.88×10^9 partículas, mientras que las cascadas hadrónicas, 9.38×10^8 partículas. Como se observa en la Figura 4.13 (b), las cascadas de protones están más dispersas que las producidas por rayos gamma, con las partículas distribuyéndose dentro de un radio de 181.1 m y 593.3 m, respectivamente.

4.1.14. Rayos gammas y protones a 10 TeV y 30°

En la Figura 4.14 (a), se observa que la CEM de los protones presenta la mayor densidad en el centro de la cascada, alcanzando 9 partículas/m² y disminuye hasta los 290 m. Por otra parte, la CEM de los rayos gamma muestra una densidad máxima a 10 m del núcleo de la cascada con 2 partículas/m², y se reduce hasta los 206 m. La densidad de la CM para los protones, claramente mayor que para los rayos gamma, presenta su máxima densidad en el centro de la cascada, con un valor de 2.6 partículas/m², disminuyendo hasta los 240 m. En contraste, la densidad de la CM del rayo gamma es menor, alcanzando 7×10^{-2} partículas/m² en el centro de la cascada, y decreciendo rápidamente hasta los 146 m.

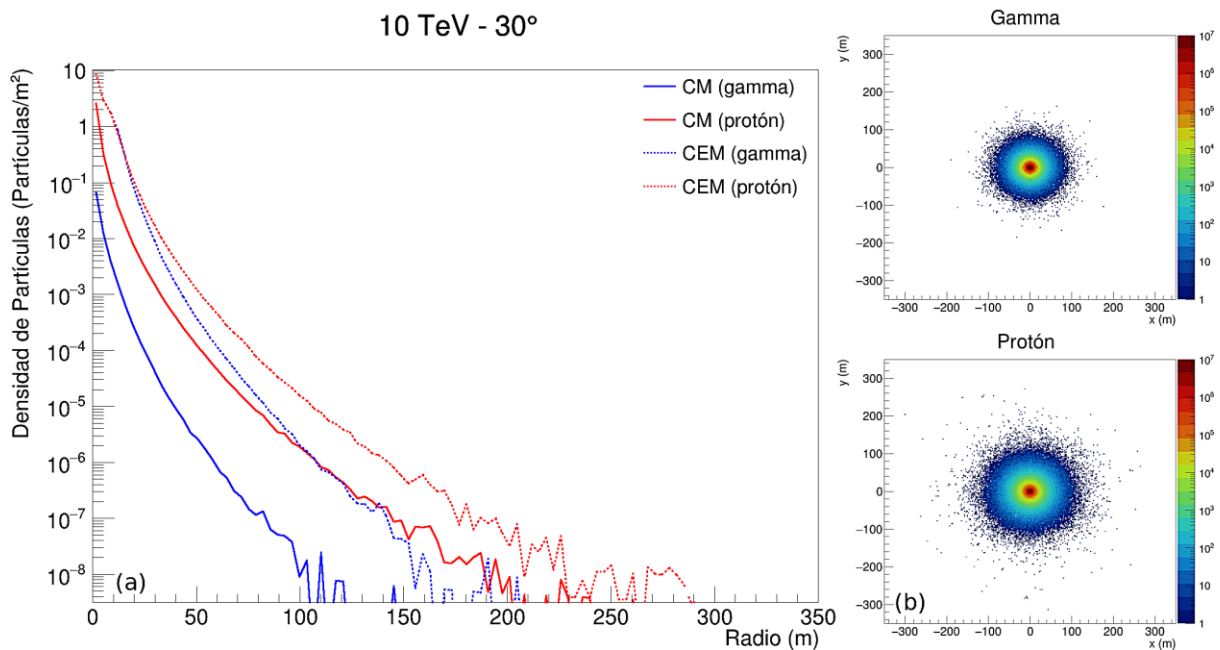


Figura 4.14: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 10 TeV a 30°.

Las cascadas producidas por los rayos gamma produjeron un total de 1.28×10^9 partículas, mientras que las cascadas hadrónicas, 7.06×10^8 partículas. Como se observa en la Figura 4.14 (b), las cascadas de protones están más dispersas que las producidas por rayos

gamma, con las partículas distribuyéndose dentro de un radio de 205.2 m y 363.4 m, respectivamente.

4.1.15. Rayos gammas y protones a 10 TeV y 60°

En la Figura 4.15 (a), se observa que la CEM de los protones presenta la mayor densidad en el centro de la cascada, alcanzando 9 partículas/m² y decrece hasta más de 350 m. Por otra parte, la CEM de los rayos gamma muestra una densidad máxima en el núcleo de la cascada con 7 partículas/m², y se reduce hasta más de 350 m. La densidad de la CM para los protones, claramente mayor que para los rayos gamma, presenta su máxima densidad en el centro de la cascada, con un valor de 8×10^{-1} partículas/m², disminuyendo hasta más de 350 m. En contraste, la densidad de la CM del rayo gamma es menor, alcanzando 10^{-2} partículas/m² en el centro de la cascada, y decreciendo rápidamente hasta los 246 m.

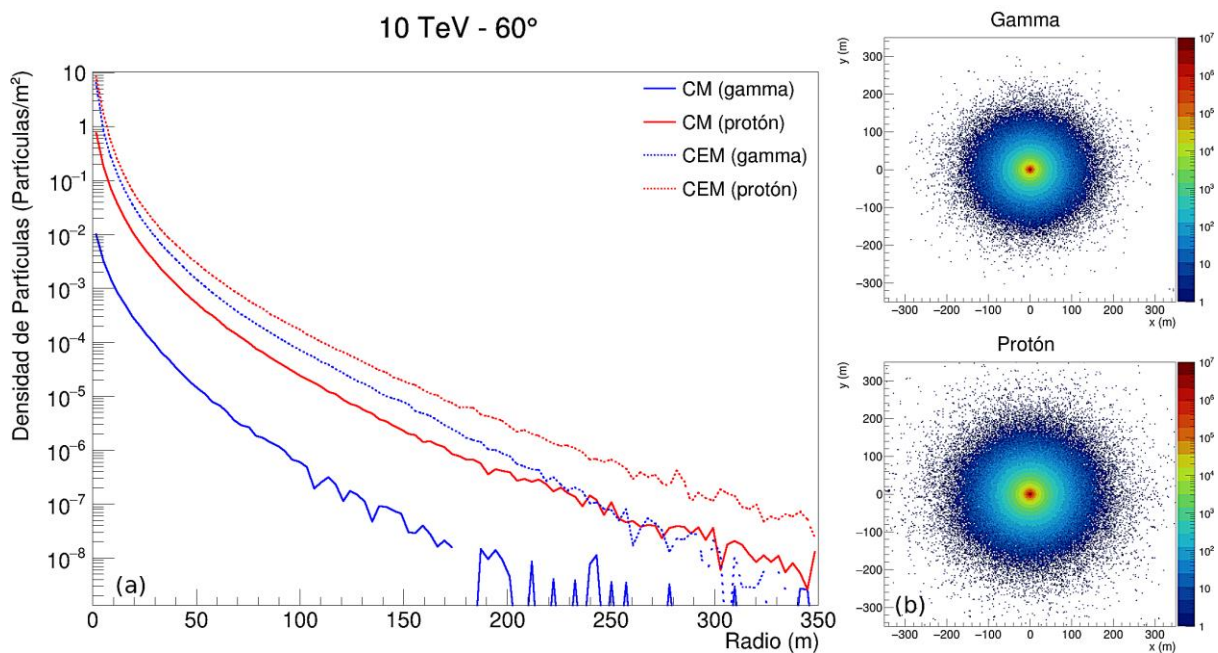


Figura 4.15: (a) Densidades de la CM y CEM, (b) distribuciones espaciales de las partículas secundarias en el nivel de observación, producidas por protones y rayos gammas de 10 TeV a 60°.

Las cascadas producidas por los rayos gamma produjeron un total de 2.61×10^7 partículas, mientras que las cascadas hadrónicas, 6.18×10^7 partículas. Como se observa en la

Figura 4.15 (b), las cascadas de protones están más dispersas que las producidas por rayos gamma, con las partículas distribuyéndose dentro de un radio de 496 m y 806.1 m, respectivamente.

4.2. Distribución de las componentes muónica y electromagnética para los eventos de rayos gamma y protones

La Tabla 4.1 presenta los promedios del número de partículas de las componentes muónica y electromagnética por cascada, obtenidos para todos los casos de rayos gamas y protones que se simularon con energías de 50 GeV, 100 GeV, 500 GeV, 1 TeV y 10 TeV, y ángulos cenitales 0° , 30° y 60° , observadas al nivel de la Laguna Sibiracocha. También se muestra la desviación estándar, así como los valores máximos y mínimos, proporcionando una visión amplia de las variaciones en cada caso. En el anexo 2, se muestran los histogramas del número de partículas de cada componente por evento para cada caso de partícula primaria.

La Figura 4.16 muestra el promedio del número de partículas de la componente muónica (CM) por evento vs el promedio del número de partículas de la componente electromagnética (CEM) por evento. Se puede apreciar que los protones generaron más muones que los rayos gamma en todas las energías y ángulos estudiados, lo que significa que existe una separación entre los eventos producidos por los rayos gamma y los protones. Además, se observa que el ángulo de incidencia afectó más a la producción tanto de muones como de fotones, electrones y positrones en los rayos gamma, con una menor producción a ángulos menores, mientras que en los protones la relación fue más consistente.

Tabla 4.1

Promedios del número de partículas de la CM y CEM por evento.

Rayo Primario	Energía	Ángulo (°)	Componente Muónica				Componente Electromagnética			
			Media	D. Est.	Min.	Máx.	Media	D. Est.	Min.	Máx.
Gamma	50 GeV	0	0.01	0.13	0	4	46.84	41.38	0	425
		30	0.01	0.13	0	4	19.68	24.63	0	389
		60	0.00	0.06	0	2	0.11	0.68	0	47
	100 GeV	0	0.03	0.25	0	8	125.99	90.29	0	811
		30	0.02	0.21	0	8	55.93	57.16	0	775
		60	0.01	0.12	0	5	0.33	1.34	0	66
	500 GeV	0	0.23	0.95	0	37	1079.60	483.77	0	3383
		30	0.17	0.80	0	33	550.01	362.99	0	3335
		60	0.06	0.42	0	13	4.61	13.49	0	994
	1 TeV	0	0.50	1.58	0	48	2577.63	937.97	0	6528
		30	0.39	1.33	0	42	1406.50	780.57	0	6309
		60	0.14	0.76	0	24	14.07	32.56	0	1881
	10 TeV	0	6.94	12.44	0	336	37643.65	6287.99	0	57049
		30	5.75	11.33	0	294	25599.22	7696.83	0	67689
		60	2.07	6.48	0	209	520.35	775.77	0	37505
Protón	50 GeV	0	2.16	1.56	0	15	24.30	27.85	0	320
		30	1.75	1.37	0	12	15.20	21.52	0	321
		60	0.63	0.76	0	7	1.95	5.72	0	190
	100 GeV	0	4.24	2.41	0	21	62.67	64.67	0	589
		30	3.56	2.15	0	21	38.42	49.25	0	534
		60	1.54	1.24	0	14	4.45	10.76	0	298
	500 GeV	0	16.28	6.79	0	56	493.31	369.90	0	2709
		30	14.42	6.16	0	52	315.81	310.41	0	2688
		60	7.69	3.55	0	40	26.96	58.44	0	1818
	1 TeV	0	28.24	11.24	0	90	1158.18	744.09	0	5174
		30	25.34	10.39	0	94	767.80	648.15	0	5370
		60	13.89	5.82	0	65	58.74	127.81	0	4203
	10 TeV	0	195.51	63.70	0	436	18535.94	6776.15	0	50354
		30	181.80	61.31	0	483	13916.05	6710.17	0	50418
		60	102.52	39.92	8	369	1130.32	1891.70	1	37117

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, como se muestra en la Tabla 4.1, la desviación estándar en la mayoría de casos fue mayor que la media, lo que indicó una alta dispersión de los datos y dificultó separar claramente los eventos solo con base en sus medias. Por esta razón, se aplicó el método SVM para maximizar la separación entre las cascadas producidas por rayos gamma y protones. Los resultados obtenidos con este método se presentan en la Tabla 4.2.

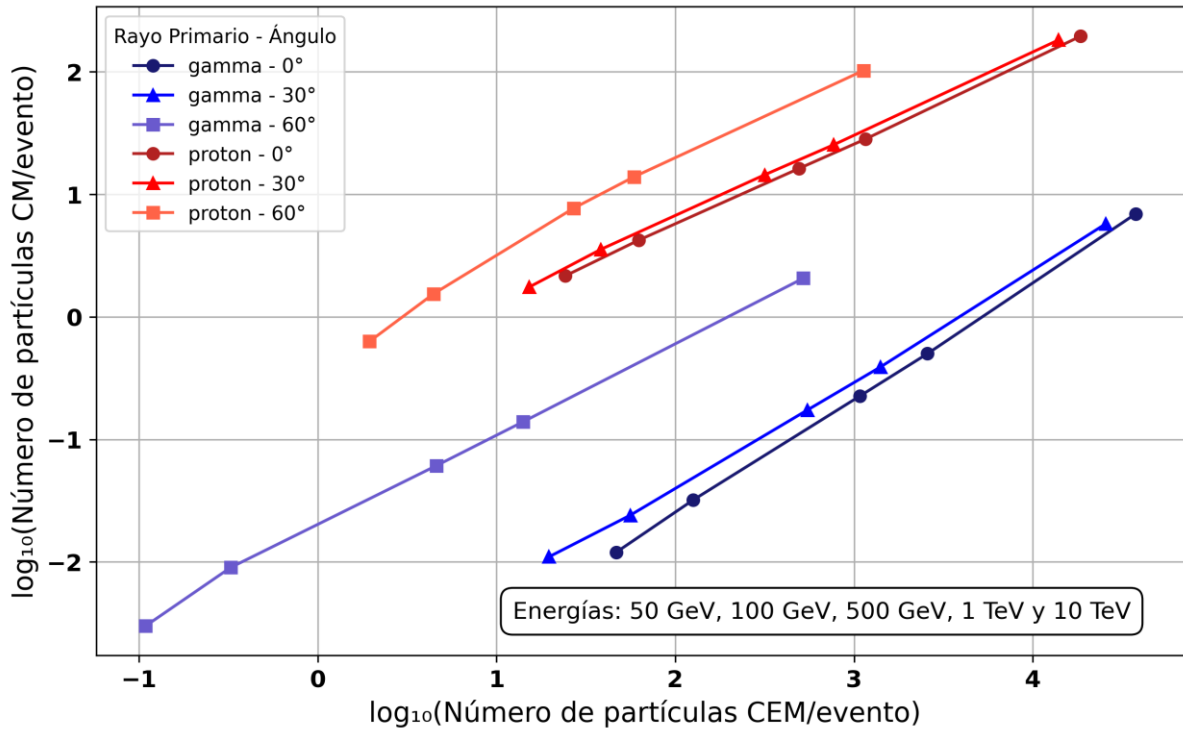


Figura 4.16: Componente muónica vs componente electromagnética de los 50 000 eventos simulados para rayos gamma y protones, cada uno con energías de 50 GeV, 100 GeV, 500 GeV, 1 TeV y 10 TeV y ángulos cenitales 0°, 30° y 60°.

4.3. Clasificación de rayos gamma y protones con SVM

En las Figuras 4.17, 4.18 y 4.19, se observan los gráficos de dispersión del número de partículas de la componente muónica vs el número de partículas de la componente electromagnética de todos los eventos y el hiperplano de separación efectuado con SVM.

Se aprecia que la mayor parte de los eventos producidos por un rayo gamma presentaron valores bajos de la componente muónica, típicamente cercanos a 0, mientras que los protones generaron una cantidad significativamente mayor de muones. La componente electromagnética fue predominante en los rayos gamma, con valores más altos que los asociados a los protones, a excepción de los eventos de que tienen ángulo cenital de 60°. Para ángulos cenitales de 0°, se observa que las pendientes de los hiperplanos de separación son más pronunciadas que para 30°. Sin embargo, para 60° las pendientes son negativas para energías de 50 GeV, 100 GeV y 500 GeV, esto debido a la mayor cantidad de partículas de la CEM en los eventos protónicos.

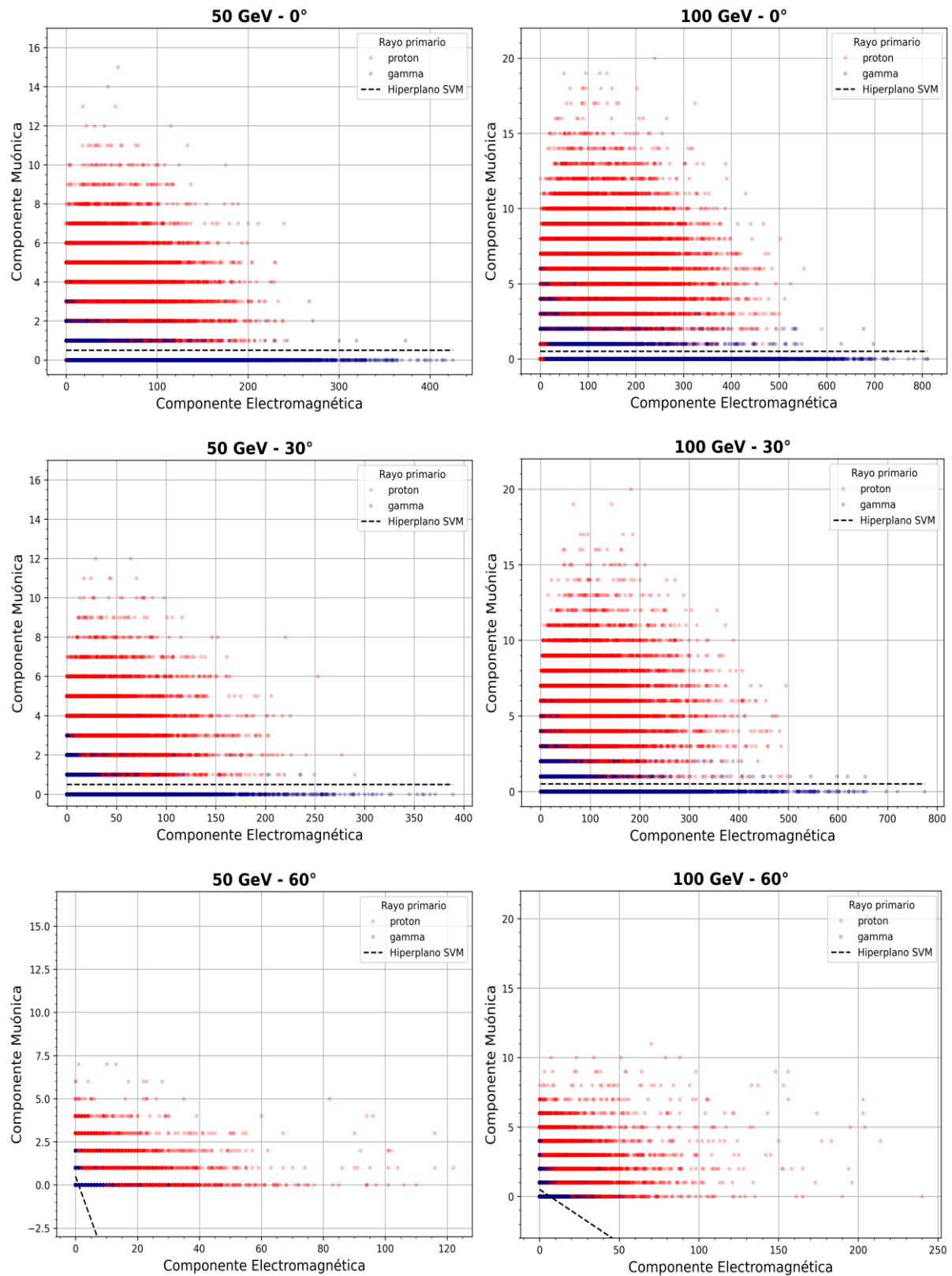


Figura 4.17: Dispersión del número de partículas de la CM vs el número de partículas de la CEM, hiperplano de separación (línea punteada) para los eventos de rayos gamma (azul) y protones (rojo) con energías de 50 GeV y 100 GeV.

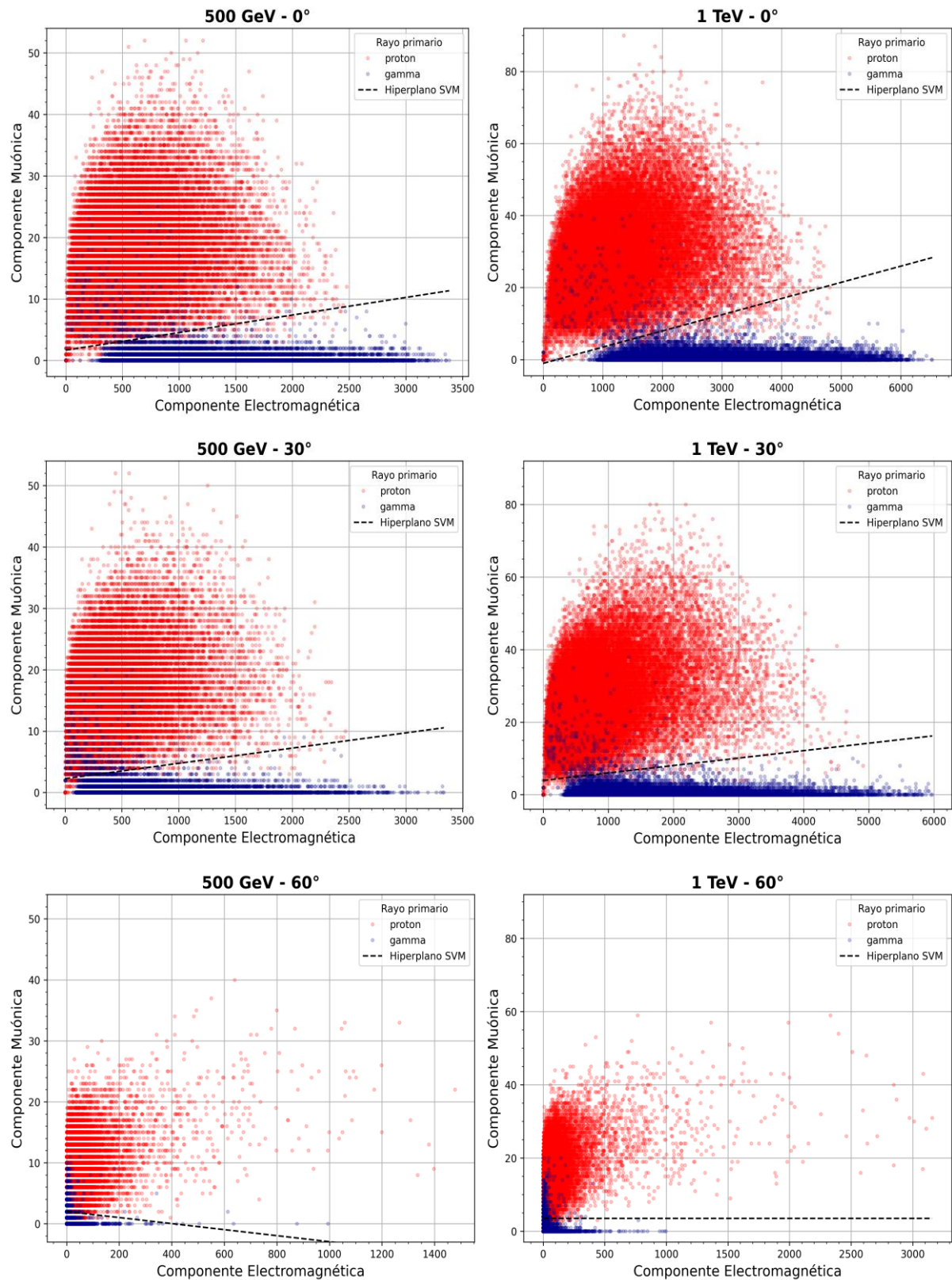


Figura 4.18: Dispersión del número de partículas de la CM vs el número de partículas de la CEM, hiperplano de separación (línea punteada) para los eventos de rayos gamma (azul) y protones (rojo) con energías de 500 GeV y 1 TeV.

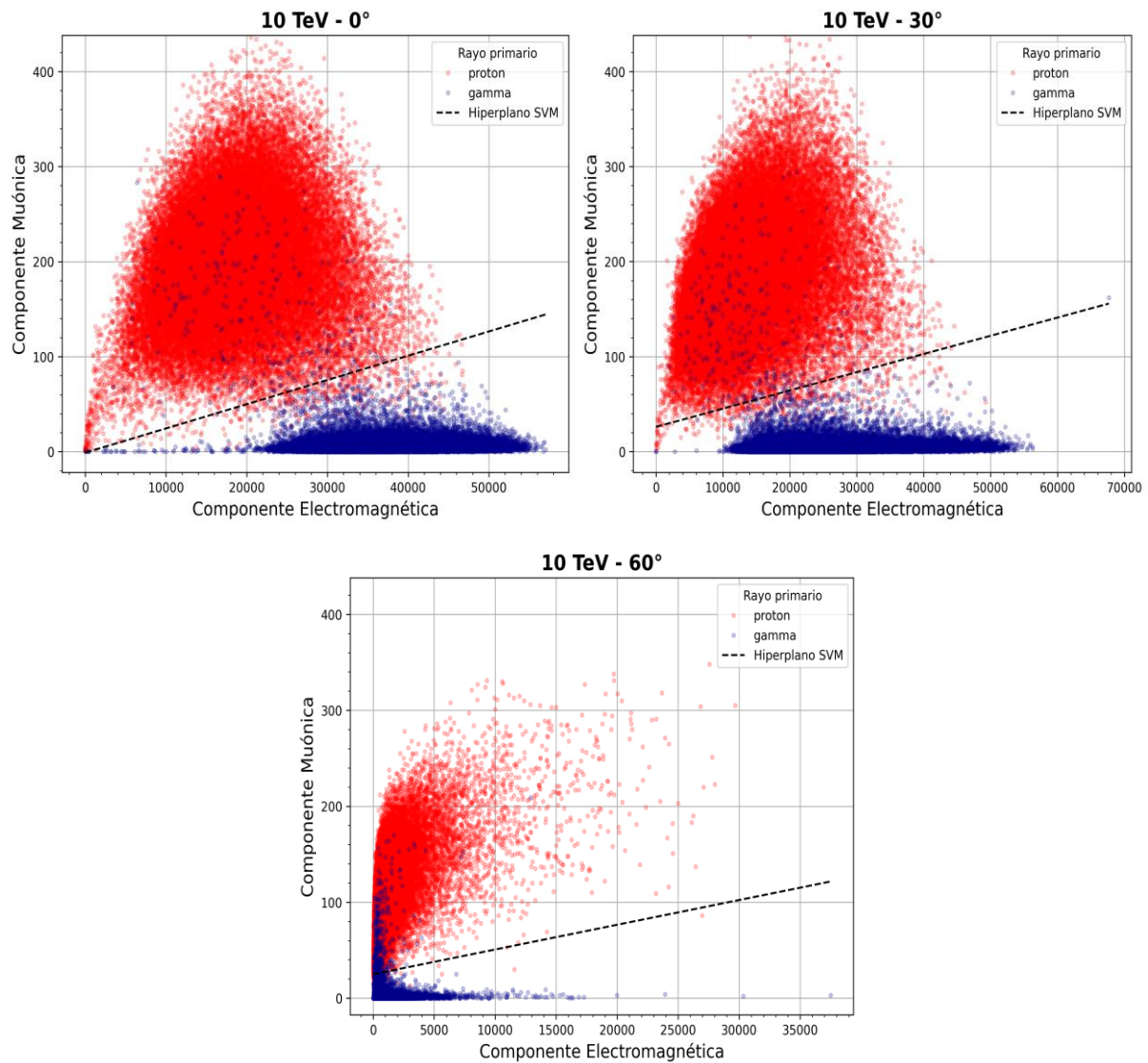


Figura 4.19: *Dispersión del número de partículas de la CM vs el número de partículas de la CEM, hiperplano de separación (línea punteada) para los eventos de rayos gamma (azul) y protones (rojo) con energías de 10 TeV.*

Las eficiencias de la clasificación correcta de los rayos gamma y de los protones, se resumen en la Tabla 4.2. Asimismo, se muestran las purezas obtenidas para los rayos gamma, el Factor Q de la discriminación entre los rayos gamma y protones estudiados, y las ecuaciones de los hiperplanos de separación del modelo SVM. Al reemplazar en estas ecuaciones los números de partículas de ambas componentes para un evento dado, se clasifica como generado por un protón si el resultado es mayor que 0, y como generado por un rayo gamma si es menor que 0.

Tabla 4. 2

Eficiencias de rayos gamma y protones, pureza y factor Q de la discriminación gamma-protón.

Energía	Ángulo	Ecuación	ϵ_γ (%)	ϵ_p (%)	P_γ (%)	Q_{factor}
50 GeV	0°	$CM - 1.37 \times 10^{-11}CEM - 0.5 = 0$	99.04	88.56	89.65	2.93
	30°	$CM + 8.18 \times 10^{-12}CEM - 0.5 = 0$	99.18	83.3	85.59	2.43
	60°	$CM + 0.5CEM - 0.5 = 0$	94.79	64.21	72.59	1.58
100 GeV	0°	$CM - 5.14 \times 10^{-12}CEM - 0.5 = 0$	97.74	97.8	97.8	6.59
	30°	$CM + 7.94 \times 10^{-12}CEM - 0.5 = 0$	98.26	96.37	96.44	5.16
	60°	$CM + 0.08CEM - 0.5 = 0$	98.84	82.73	85.13	2.38
500 GeV	0°	$CM - 3 \times 10^{-3}CEM - 1.673 = 0$	99.34	99.22	99.22	11.25
	30°	$CM - 2 \times 10^{-3}CEM - 2.266 = 0$	99.26	99.35	99.35	12.31
	60°	$CM + 4 \times 10^{-3}CEM - 2 = 0$	98.93	98.9	98.9	9.43
1 TeV	0°	$CM - 4 \times 10^{-3}CEM + 1.06 = 0$	99.39	99.39	99.39	12.73
	30°	$CM - 2 \times 10^{-3}CEM - 3.929 = 0$	99.35	99.51	99.51	14.19
	60°	$CM - 1.04 \times 10^{-12}CEM - 3.5 = 0$	99.34	99.16	99.16	10.84
10 TeV	0°	$CM - 2 \times 10^{-3}CEM + 1.05 = 0$	99.5	99.15	99.15	10.79
	30°	$CM - 2 \times 10^{-3}CEM - 26.04 = 0$	99.46	99.07	99.07	10.31
	60°	$CM - 2 \times 10^{-3}CEM - 24.94 = 0$	99.25	99.53	99.53	14.48

Fuente: Elaboración propia

Las eficiencias obtenidas para los rayos gamma fueron consistentemente altas, superando el 94% en todos los casos evaluados. Para energías más altas, como 500 GeV, 1 TeV y 10 TeV, la eficiencia alcanzó niveles prácticamente ideales ($\geq 99\%$), lo que demuestra que el modelo SVM identificó correctamente la mayoría de los eventos gamma. Sin embargo, para energías bajas (50 GeV y 100 GeV), se observó una ligera disminución de la eficiencia en ángulos cenitales más inclinados (60°), que sería a causa de la escasa llegada de ambas componentes, ya que el rayo primario al poseer tan baja energía y al incidir con mayor ángulo, ocasiona que gran parte de la cascada sea absorbida en la atmósfera.

La eficiencia para los protones mostró una mayor variabilidad en comparación con los rayos gamma. En energías bajas, como 50 GeV y 100 GeV, la eficiencia disminuyó significativamente con ángulos cenitales altos, como el caso de 50 GeV y 60°, donde se obtuvo un valor de 64.21%. En cambio, para energías más altas, la eficiencia se mantuvo elevada

($\geq 98\%$), incluso en ángulos inclinados, destacando la capacidad del modelo SVM para diferenciar los eventos protónicos con alta precisión en estas condiciones.

La pureza fue generalmente alta, teniendo en la mayoría de las configuraciones 85%. Sin embargo, para la condición de 50 GeV y 60° , la pureza disminuyó significativamente con un valor de 72.59%, lo que es consistente con las dificultades del modelo para separar adecuadamente este tipo de eventos.

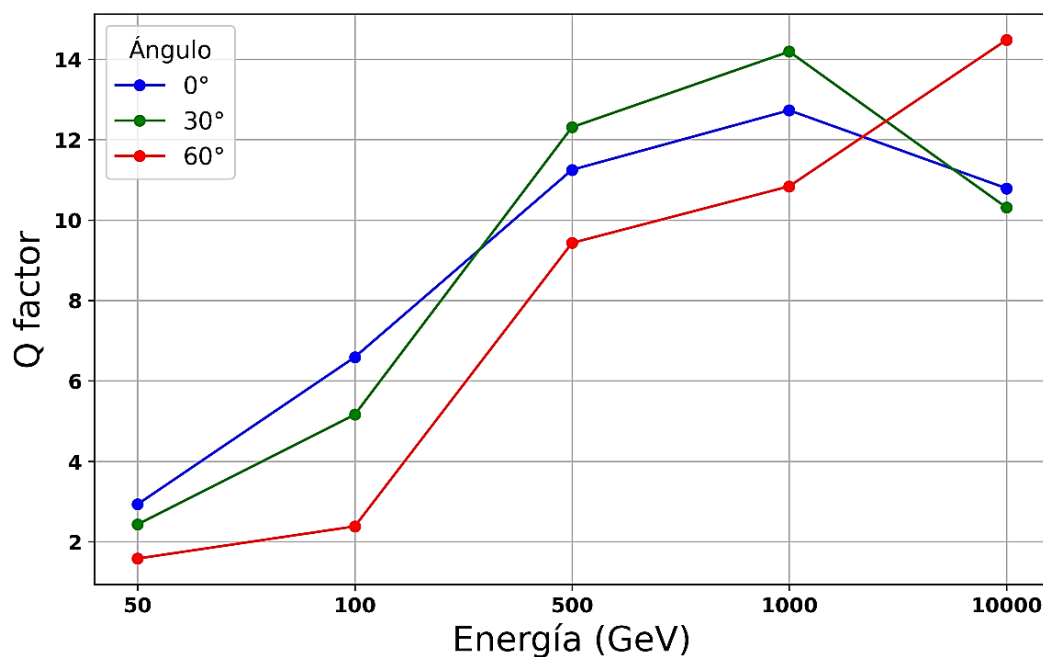


Figura 4.20: Factor Q en función de las energías de las partículas primarias, para cada ángulo.

El factor Q mostró valores elevados en casi todas las configuraciones (Figura 4.20), confirmando la efectividad del modelo SVM. A energías bajas, como 50 GeV, los valores de Q fueron mínimos, oscilando entre 1.58 y 2.93. Conforme se incrementaba la energía, el factor Q fue mayor, alcanzó el máximo valor de 14.48 para la energía de 10 TeV y 60° , indicando una discriminación óptima.

Las ecuaciones de clasificación evidenciaron cómo el modelo combinó las CEM y CM para separar los eventos. Para energías bajas, la constante fue más relevante, mientras que, a

energías altas, la pendiente aumentó significativamente, indicando que la CEM es prioritaria en la clasificación.

4.4. Discusión general

Los resultados de este estudio demuestran que el modelo SVM, aplicado a las componentes muónica y electromagnética, fue altamente eficaz en la discriminación entre rayos gamma y protones en diferentes configuraciones de energía y ángulo cenital, alcanzando eficiencias casi ideales para altas energías, en comparación a lo encontrado en estudios previos como los de Tian et al. (2018), quienes reportaron eficiencias de discriminación superiores al 87% para rayos gamma en energías del orden de 100 TeV. Además, las eficiencias obtenidas en este estudio fueron superiores a las de Luzquiños Saavedra (2024), quien, utilizando el tiempo de llegada de las partículas dentro de un anillo de 100 a 150 m, alcanzó una eficiencia de $\geq 88\%$ para la señal y un rechazo de fondo de $\geq 90\%$.

Sin embargo, para energías bajas, como 50 GeV y 100 GeV, y ángulos de 60° , se observó una ligera disminución en la eficiencia de discriminación. Estos resultados concuerdan con Conceição et al. (2022), quienes encontraron que, para bajas energías y ángulos cenitales altos, la efectividad de los métodos de discriminación se reduce. Estos hallazgos indicaron que, aunque el modelo es robusto para altas energías, aún hay margen para mejorar su desempeño en condiciones de energías bajas y ángulos altos.

Cabe destacar que, a diferencia de otros estudios que principalmente se centraron en simulaciones a mayores energías y partículas primarias sin inclinación, este trabajo evaluó la discriminación en ángulos cenitales de 30° y 60° . Si bien se alcanzaron eficiencias casi ideales, así como Q_{factor} muy altos, se debe a que este trabajo se limitó a la simulación con CORSIKA, lo que se entendería como condiciones ideales.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Las diferencias observadas en las componentes muónica y electromagnética entre rayos gamma y protones, aplicadas al modelo SVM, demostraron ser altamente eficaces para discriminar entre ambos tipos de partículas. La alta eficiencia y pureza alcanzadas en la mayoría de los casos, respaldan la viabilidad científica de establecer un observatorio de rayos gamma en la Laguna Sibilacocha, con un gran potencial para investigar fuentes astrofísicas extremas.

- En general, los protones generaron una mayor cantidad de partículas secundarias, con una distribución que alcanzó distancias superiores a los 350 m desde el núcleo de la cascada. Asimismo, se observó que, a mayores ángulos cenitales, las partículas presentaron una mayor dispersión espacial y una reducción en la cantidad de partículas en el centro de la cascada, especialmente en eventos de baja energía. Estos resultados demuestran que el ángulo cenital tiene un impacto significativo en la propagación de las cascadas atmosféricas y dificulta la clasificación en condiciones de energías bajas y ángulos altos.

- Las densidades de las componentes muónica y electromagnética mostraron claras diferencias entre rayos gamma y protones, los rayos gamma con energías de 50 y 100 GeV presentaron densidades de la componente electromagnética más altas que los protones en el centro de las cascadas, con más de 4×10^{-4} partículas/m². Mientras que, para energías mayores, los protones generaron valores más altos de esta componente, teniendo un valor mínimo en promedio de 0.1 partículas/m² para energías de 500 GeV a 60°.

- Se observó que, en promedio, los eventos generados por rayos gamma produjeron aproximadamente el 1.3 % de la cantidad de muones generados por protones en los casos analizados. Además, para ángulos menores, hay una clara diferencia del número de partículas de la componente electromagnética, siendo mayor en los eventos de rayos gamma. Estas diferencias fueron clave para la discriminación gamma-protón, aunque en ángulos cenitales elevados (60°) y bajas energías (50 GeV), se complicó la separación debido al mayor solapamiento entre las distribuciones de partículas y la dispersión espacial.
- El análisis conjunto de la eficiencia para gamma y protones, pureza y factor Q confirmó que el modelo SVM demuestra una alta efectividad en la discriminación entre rayos gamma y protones en la Laguna Sibiracocha, alcanzando eficiencias mayores al 94% para rayos gamma y al 88% para protones en la mayoría de los casos. No obstante, en energías bajas y ángulos elevados, se observó una disminución en la pureza, hasta un 72.59% a 50 GeV y 60° , debido a la mayor trayectoria atmosférica y absorción de las partículas, lo que complicó la separación.

5.2. Recomendaciones

- Explorar técnicas complementarias de clasificación, aunque el modelo SVM demostró ser altamente efectivo, sería bueno comparar su rendimiento con otros modelos de clasificación avanzados, como redes neuronales o métodos de aprendizaje profundo.
- Realizar simulaciones para otras energías, incorporando una mayor variedad de ángulos cenitales y azimutales, lo que permitirá explorar con mayor detalle las características de las cascadas atmosféricas. Además, aplicar estas simulaciones en simuladores de detectores como Geant4 posibilitará estudiar la respuesta

instrumental y evaluar la eficiencia de detección, lo cual contribuirá a una caracterización más completa de los eventos.

- Puesto que existe potencial de separación en el sitio de observación, se podría realizar pruebas experimentales en la laguna Sibinacocha, para validar las predicciones obtenidas y ajustar el modelo a condiciones reales.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, L. R. (2017). *Simulación de cascadas aéreas extensas en corsika para la colaboración ligo en Guatemala [Tesis de licenciatura]*. Universidad San Carlos De Guatemala.
- Aguilar, M. (2011). Cien años de rayos cósmicos. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Director del Departamento de Investigación Básica del CIEMAT*, 105(1), 107-128.
- Alania, M., Araya, I. J., Gomez, A. V., Huerta, H. M., Flores, A. P., & Knapp, J. (2009). Air Shower Simulations. *AIP Conference Proceedings*, 1123(1), 150-165.
- Alfaro, R., Alvarez, C., Álvarez, J. D., Arceo, R., Arteaga-Velázquez, C., J., . . . Collaboration),. (2017). All-particle cosmic ray energy spectrum measured by the HAWC experiment from 10 to 500 TeV. *Physical Review D*, 96(12), 122001. doi:<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.122001>
- Alfaro, R., Alvarez, C., Álvarez, J. D., Camacho, J. A., Arteaga-Velázquez, J. C., Rojas, D. A., . . . Zhou, H. (2022). Gamma/hadron separation with the HAWC observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1039, 166984. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166984>
- Asorey, H. G. (2012). *Los detectores cherenkov del observatorio Pierre Auger y su aplicación al estudio de fondos de radiación [Tesis Doctoral en Física]*. Universidad Nacional de Cuyo, Instituto Balseiro. Obtenido de <https://ricabib.cab.cnea.gov.ar/1097/>
- Atwood, W. B., Abdo, A. A., Ackermann, M., Althouse, W., Anderson, B., Axelsson, M., & Morselli, A. (2009). The large area telescope on the Fermi gamma-ray space telescope mission. *The Astrophysical Journal*, 697(2), 1071.
- Auger, P., Ehrenfest, P., Maze, R., Daudin, J., & Fréon, R. A. (1939). Extensive cosmic-ray showers. *Reviews of modern physics*, 11(3-4), 288.

- Bakalová, A., Conceição, R., Gibilisco, L., Novotný, V., Pimenta, M., Tomé, B., & Vícha, J. (2023). Gamma/hadron discrimination at PeV energies through the azimuthal fluctuations of air shower footprint at the ground. *PoS, ICRC2023*, 964. doi:<https://doi.org/10.22323/1.444.0964>
- Betancourt, G. A. (2005). Las máquinas de soporte vectorial (SVMs). *Scientia et technica*, 1(27).
- Bhatnagar, S. (2009). Extensive Air Shower High Energy Cosmic Rays (II).
- Carramiñana, A. (2019). *Detectors for γ - ray astronomy*. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla. Obtenido de <https://indico.nucleares.unam.mx/event/1495/contribution/19/material/slides/0.pdf>.
- Cecchini, S., & Spurio, M. (2012). Atmospheric muons: experimental aspects. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 1(2), 185-196.
- Chauhan, V. K., Dahiya, K., & Sharma, A. (2019). Problem formulations and solvers in linear SVM: a review. *Artificial Intelligence Review*, 803-855.
- Chiavassa, A., & collaboration., S. (2024). SWGO: a wide-field of view gamma-ray observatory in the southern hemisphere. *Journal of Instrumentation*, 19(02). doi:[10.1088/1748-0221/19/02/C02065](https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/02/C02065)
- collaboration, M. (2011). Technical status of the MAGIC telescopes. *Proc. International Cosmic Rays Conference*. Obtenido de arXiv:0907.1211
- Conceição, R., González, B. S., Guillén, A., Pimenta, M., & Tomé, B. (2021). Muon identification in a compact single-layered water Cherenkov detector and gamma/hadron discrimination using machine learning techniques. *The European Physical Journal C*, 81(6), 1-9. doi:<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09312-4>

- Conceição, R., González, B. S., Pimenta, M., & Tomé, B. (2022). $P\gamma h$: A new variable for γ/h discrimination in large gamma-ray ground arrays. *Physics Letters B*, 827, 136969. doi:<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2022.136969>
- Conrad, J., & Reimer, O. (2017). Indirect dark matter searches in gamma and cosmic rays. *Nature Phys*, 13, 224–231. doi:<https://doi.org/10.1038/nphys4049>
- Degrange, B., & Fontaine, G. (2015). Introduction to high-energy gamma-ray astronomy. *Comptes Rendus Physique*, 16(6-7), 587-599. doi:<https://doi.org/10.1016/j.crhy.2015.07.003>
- Doro, M. M. (2022). The search for high altitude sites in South America for the SWGO detector. *PROCEEDINGS OF SCIENCE*, 395.
- Gaisser, T. K., Engel, R., & Resconi, E. (2016). *Cosmic rays and particle physics*. Cambridge University Press.
- Grieder, P. K. (2010). *Extensive air showers: high energy phenomena and astrophysical aspects-a tutorial, reference manual and data book*. Springer.
- Groom, D., & Klein, S. (2000). Passage of particles through matter. *Eur. Phys. J. C*, 15, 163-173. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02683419>
- Gruppen, C. (2020). *Astroparticle physics* (Vol. 50). Berlin: Springer.
- Hampel-Arias, Z. (2017). Cosmic Ray Observations at the TeV Scale with the HAWC Observatory [Tesis Doctoral].
- HAWC. (18 de 10 de 2024). Obtenido de The High-Altitude Water Cherenkov Observatory: <https://www.hawc-observatory.org/science/cosmicrays.php>
- Heck, D., & Pierog, T. (2023). *Extensive air shower simulation with CORSIKA: A user's guide.(Version 7.7500 from April 14, 2023)*. Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Kernphysik.
- Heitler, W. (1954). *The quantum theory of radiation*. Courier Corporation.

- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2020). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Ciudad de Mexico.
- HESS. (5 de 10 de 2024). Obtenido de <https://www.mpi-hd.mpg.de/HESS/pages/about/>
- Hillas, A. (1996). Differences between gamma-ray and hadronic showers. In *TeV Gamma-Ray Astrophysics: Theory and Observations Presented at the Heidelberg Workshop*, 17-30. doi:https://doi.org/10.1007/978-94-009-0171-1_2
- Jochem, D. H. (2006). Ultra high energy cosmic ray extensive air shower simulations using CORSIKA.
- Kudryavtsev, V. A. (2002). Muon pair production by photons in atmosphere: is any room left for high-energy muon astronomy? *Astroparticle Physics*, 18(1), 97-105. doi:[https://doi.org/10.1016/S0927-6505\(02\)00112-3](https://doi.org/10.1016/S0927-6505(02)00112-3)
- Letessier-Selvon, A., & Stanev, T. (2011). Ultrahigh energy cosmic rays. *Reviews of modern physics*, 83(3), 907-942. doi:<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.83.907>
- LHASSO. (5 de 10 de 2024). Obtenido de http://english.ihep.cas.cn/lhaaso/oy/sg/202110/t20211026_286771.html
- Luzquiños Saavedra, D. A. (2024). *Gamma-Hadron separation using the temporal distribution of particle cascades at TeV energies in the SWGO experiment [Tesis de Licenciatura]*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/27943>
- Makelvani, S. K., & Bahmanabadi, M. (2022). Discrimination between gamma and proton-induced showers using the parabolic shape of the air shower front. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1042, 167468. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167468>

- NOAA. (20 de 10 de 2024). Obtenido de <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm>
- Olive, K. A. (2014). Review of particle physics. *Chinese physics C*, 38(9), 090001.
- Ong, R. A. (1998). Very high-energy gamma-ray astronomy. *Physics Reports*, 305(3-4), 93-202.
- Osorio, J. M. (2019). *Actividad en rayos gamma para una muestra de blazares [Tesis de Licenciatura]*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Rengifo Gonzáles, J. (2017). *Disentangling atmospheric cascades started by gamma rays from cosmic rays with CORSIKA [Tesis de Maestria]*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/8716>
- Reyes, A. Z., Almada, A. H., Espinosa, A. S., & Collaboration, t. (2017). Muon study for gamma/hadron air-shower discrimination in the HAWC observatory. *Journal of Physics: Conference Series*, 012023.
- Risse, M. (2004). Properties of extensive air showers. doi:<https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0402300>
- ROOT. (10 de 10 de 2024). Obtenido de <https://root.cern/about/>
- Salazar Santiago, D. G. (2020). *Reconstrucción del espectro de rayos cósmicos con el observatorio HAWC [Tesis de Licenciatura]*. Facultad de Ciencias, UNAM. Obtenido de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3573119>
- Shaffer, T., Pratt, E., & Grimm, J. (2017). Utilizing the power of Cerenkov light with nanotechnology. *Nature nanotechnology*, 12(2), 106-117. doi:<https://doi.org/10.1038/nnano.2016.301>
- Shapiro, M. M., Stanev, T., & Wefel, J. P. (2013). *Astrophysical sources of high energy particles and radiation* (Vol. 44). Springer Science & Business Media.

- Stanev, T. (2010). *High Energy Cosmic Rays* (second ed.). Chichester, UK: Springer-Praxis Publishing Ltd.
- Suárez, E. J. (2014). Tutorial sobre máquinas de vectores soporte (sVM). *Tutorial sobre Máquinas de Vectores Soporte (SVM)*, 1, 1-12.
- Tanabashi, M. (2018). Review of particle physics. *Phys. Rev. D*, 98:030001.
- Tian, Z., Wang, Z., Liu, Y., Guo, Y., Ma, X., & Hu, H. (2018). Study of the γ /p discrimination at ~ 100 TeV energy range with LHAASO experiment. *Astroparticle Physics*, 99, 43-50. doi:<https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2018.02.009>.
- Velázquez, C. (2017). *HAWC: astronomía de rayos gamma desde México*.
- VERITAS. (4 de 10 de 2024). Obtenido de <https://veritas.sao.arizona.edu/>
- Vizcaya Hernández, A. P. (2016). *Identificación de muones y sus aplicaciones en el observatorio Hawc [Tesis de Licenciatura]*. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Obtenido de [//repositorio.unam.mx/contenidos/326955](https://repositorio.unam.mx/contenidos/326955)
- Weekes, T. (2003). *Very high energy gamma-ray astronomy*. Institute of Physics Pub .
- Weidenhaupt, K. F., & Erdmann, M. (2014). Antenna calibration and energy measurement of ultra high energy cosmic rays with the Auger Engineering Radio Array. *Fachgruppe Physik*.
- Zuñiga Reyes, A. (2017). *Estudio de muones para separación Gamma/Hadrón en el observatorio HAWC[Tesis de Licenciatura]*. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Obtenido de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/259877>
- Zuñiga-Reyes, A., Hernández, A., Miranda-Aguilar, A., Sandoval, A., Martínez-Castro, J., Alfaro, R., . . . Vizcaya, A. P. (2017). Detection of vertical muons with the HAWC water Cherenkov detectors and its application to gamma/hadron discrimination. Obtenido de arXiv preprint [arXiv:1708.09500](https://arxiv.org/abs/1708.09500).

ANEXOS

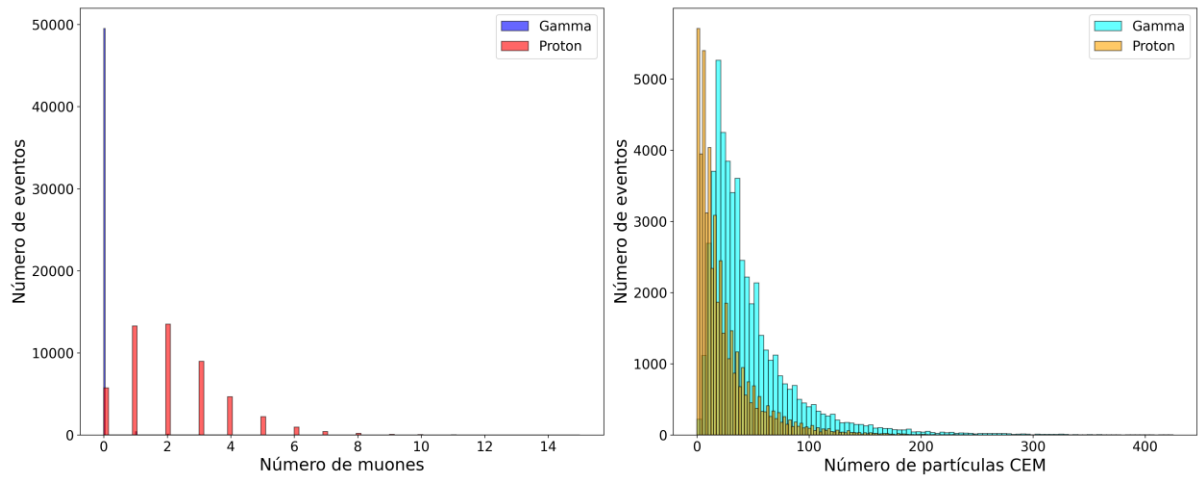
A1. Matriz de Consistencia

TÍTULO: “Discriminación Gamma-Protón Utilizando las Componentes Muónica y Electromagnética Simuladas con CORSIKA para un Observatorio de Rayos Gamma en la Laguna Sibinacocha”

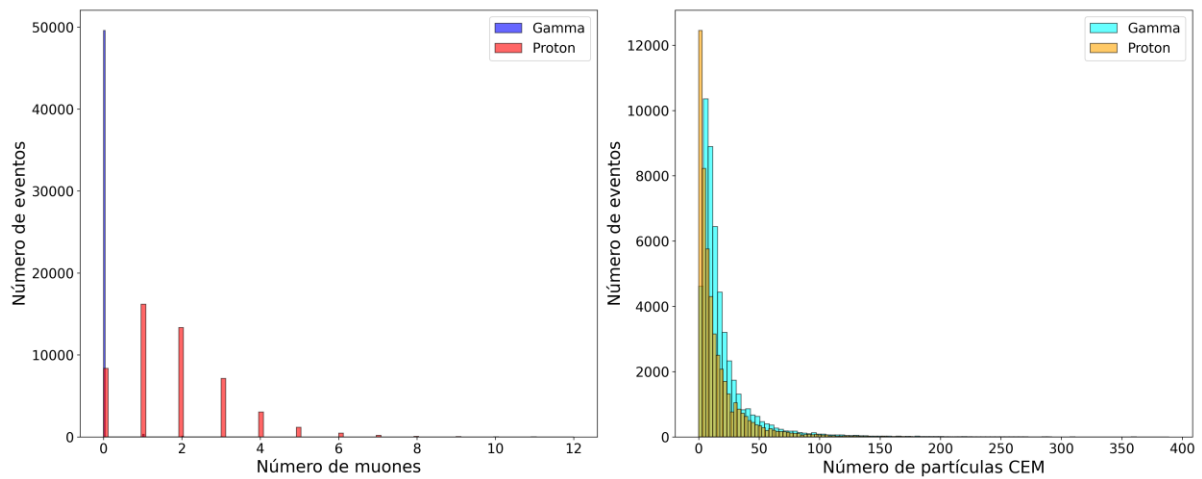
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
Problema General ¿Qué tan eficaces son las componentes muónica y electromagnética simuladas con CORSIKA para discriminar rayos gamma y protones en un Observatorio de Rayos Gamma en la Laguna Sibinacocha? Problemas Específicos ¿Cómo varía el número de partículas y su distribución espacial en las cascadas atmosféricas producidas por rayos gamma y protones a diferentes ángulos y energías? ¿Cómo varía la densidad superficial de las componentes muónica y electromagnética en las cascadas atmosféricas generadas por rayos gamma y protones en el nivel de observación? ¿Cuál es la cantidad de partículas correspondientes a las componentes muónica y electromagnética por cascada que generan los rayos gamma y protones a diferentes ángulos y energías en el nivel de observación? ¿Cuál es la eficiencia, pureza y Factor Q del modelo SVM aplicado a las componentes muónica y electromagnética para separar los eventos iniciados por rayos gamma de los protones, para diferentes ángulos y energías?	Objetivo General Evaluar la eficacia de las componentes muónica y electromagnética simuladas con CORSIKA para discriminar rayos gamma y protones en un Observatorio de Rayos Gamma en la Laguna Sibinacocha. Problemas Específicos - Analizar el número de partículas y su distribución espacial en el nivel de observación de las cascadas atmosféricas producidas por rayos gamma y protones a diferentes ángulos y energías. - Calcular la densidad superficial de las componentes muónica y electromagnética de las cascadas atmosféricas generadas por rayos gamma y protones en el nivel de observación. - Determinar el número de partículas correspondientes a las componentes muónica y electromagnética por cascada que generan los rayos gamma y protones a diferentes ángulos y energías en el nivel de observación. - Calcular la eficiencia, pureza y Factor Q del modelo SVM aplicado a las componentes muónica y electromagnética para separar los eventos iniciados por rayos gamma de los protones, para diferentes ángulos y energías.	Hipótesis General Las componentes muónica y electromagnética permiten una discriminación eficaz entre los rayos gamma y protones simulados con CORSIKA en la Laguna Sibinacocha. Hipótesis Específicas - El número de partículas y su distribución espacial de las cascadas atmosféricas varían significativamente entre rayos gamma y protones a diferentes ángulos y energías en el nivel de observación. - La densidad superficial de las componentes muónica y electromagnética en el nivel de observación presenta diferencias entre las cascadas atmosféricas de rayos gamma y protones. - El número de partículas correspondientes a las componentes muónica y electromagnética por cascada en el nivel de observación es significativamente diferente entre rayos gamma y protones. - La eficiencia, pureza y factor Q del modelo SVM aplicado a las componentes muónica y electromagnética para la discriminación entre rayos gamma y protones son altos y dependen de los diferentes ángulos y energías.	Variable independiente: Componentes muónica y electromagnética Variable dependiente: Discriminación gamma-protón	▪ Cantidad de partículas ▪ Densidad superficial ▪ Radio de distribución espacial ▪ Eficiencia ▪ Pureza ▪ Factor Q	▪ Número de partículas por cascada ▪ Densidad superficial (partículas/m²) ▪ Radio de distribución (m) ▪ Porcentaje de discriminación ▪ Porcentaje de pureza ▪ Factor Q	Enfoque de Investigación: Cuantitativo Nivel de investigación: Descriptivo Diseño de Investigación: No experimental, transversal Ámbito De Estudio: Laguna Sibinacocha, Cusco, Cusco. Población: Componentes muónica y Electromagnética Muestra: Componentes muónica y electromagnética observadas al nivel de la laguna Sibinacocha Técnicas de Recolección: Simulaciones con CORSIKA Técnicas de Procesamiento de datos: - ROOT - Python - SVM

A2. Histogramas de las componentes muónica y electromagnética para cada caso.

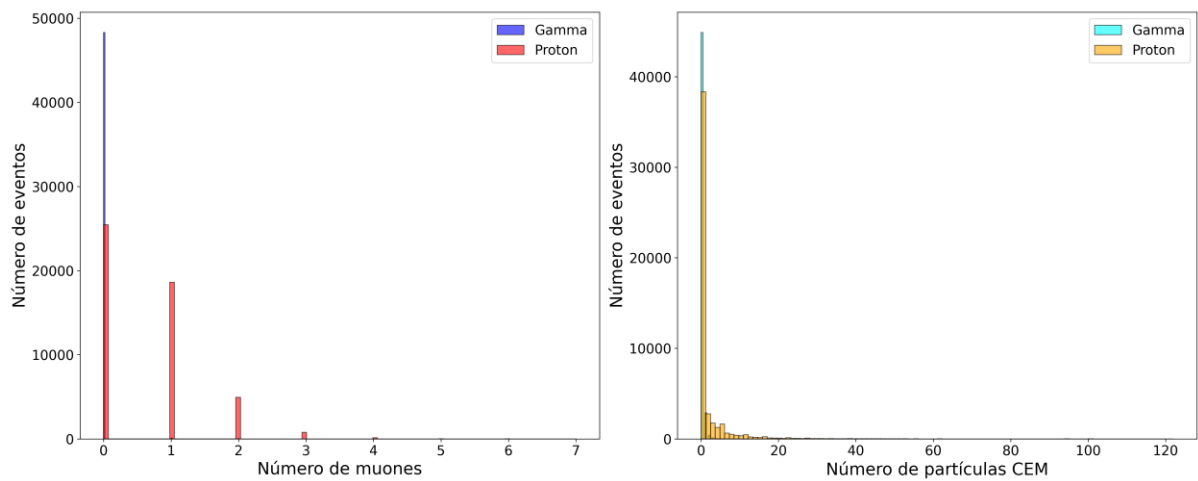
50 GeV - 0°

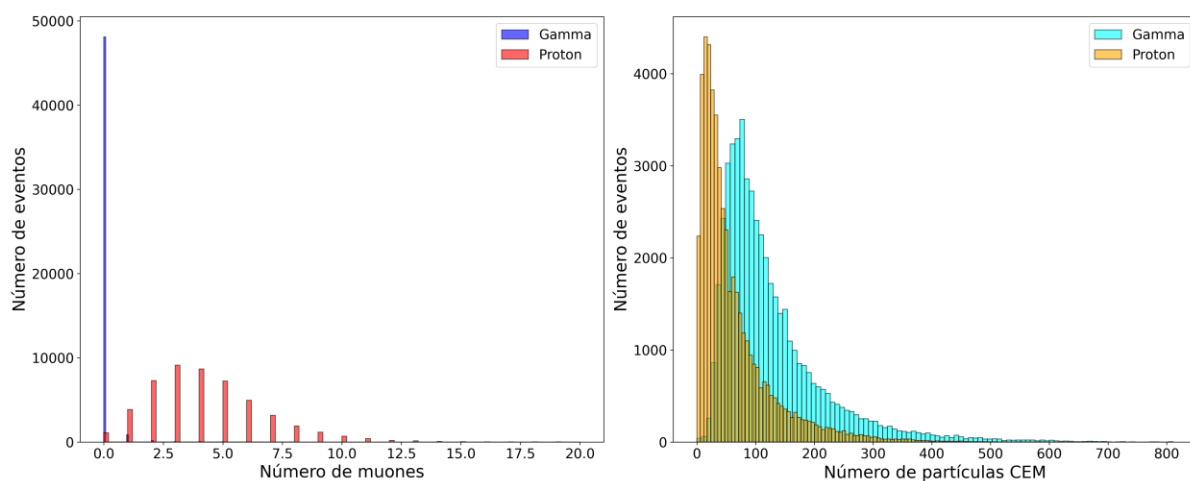
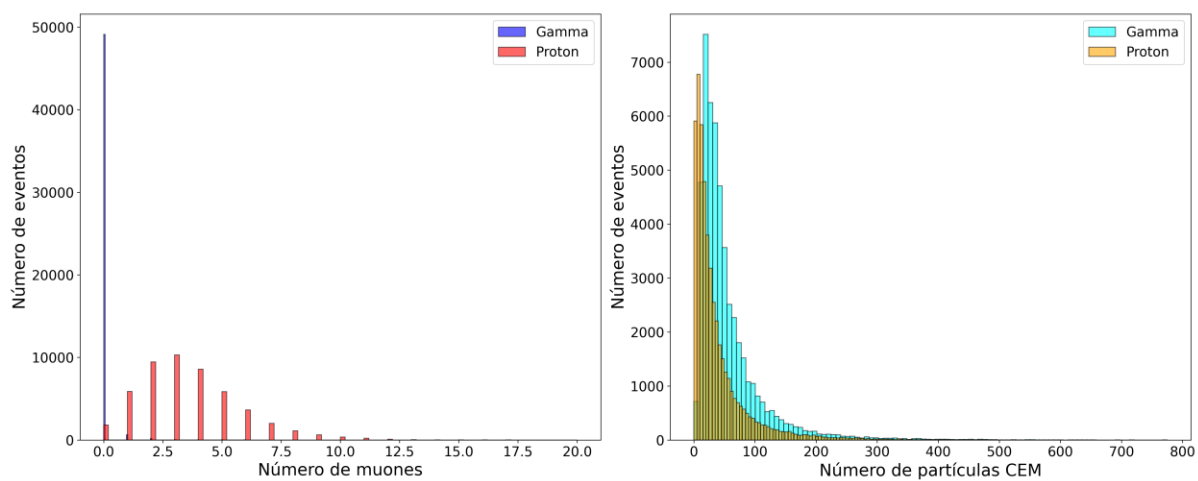
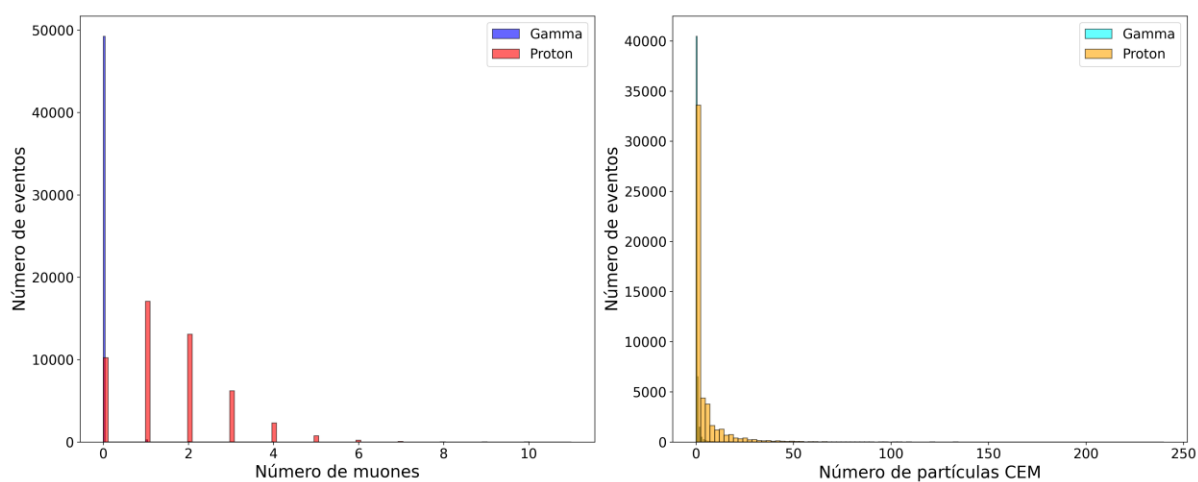


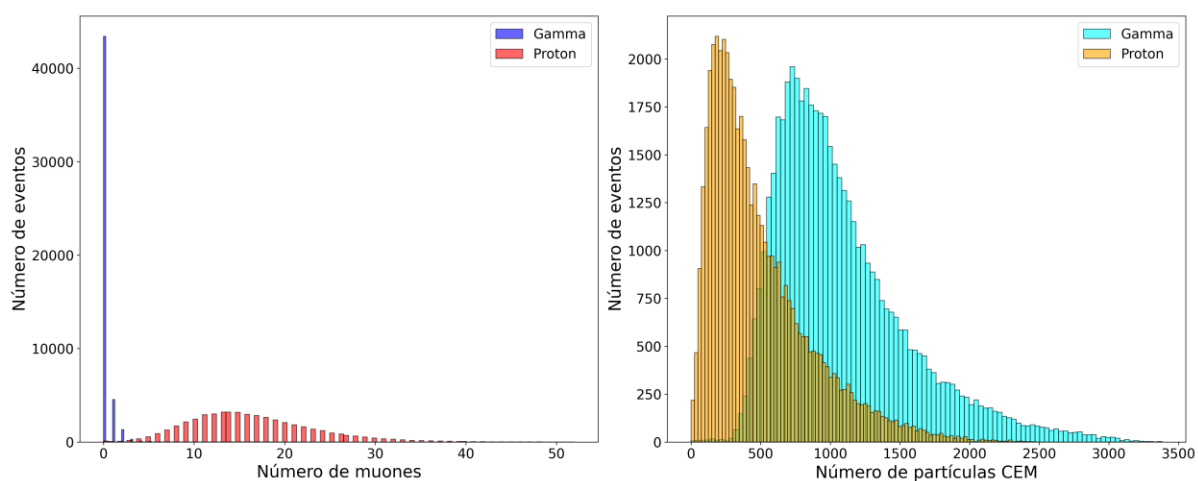
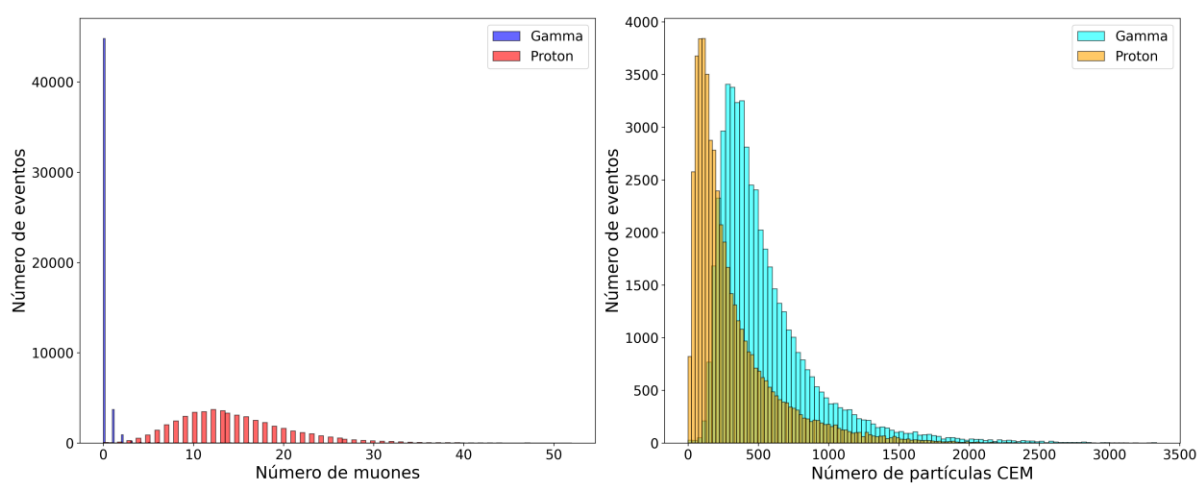
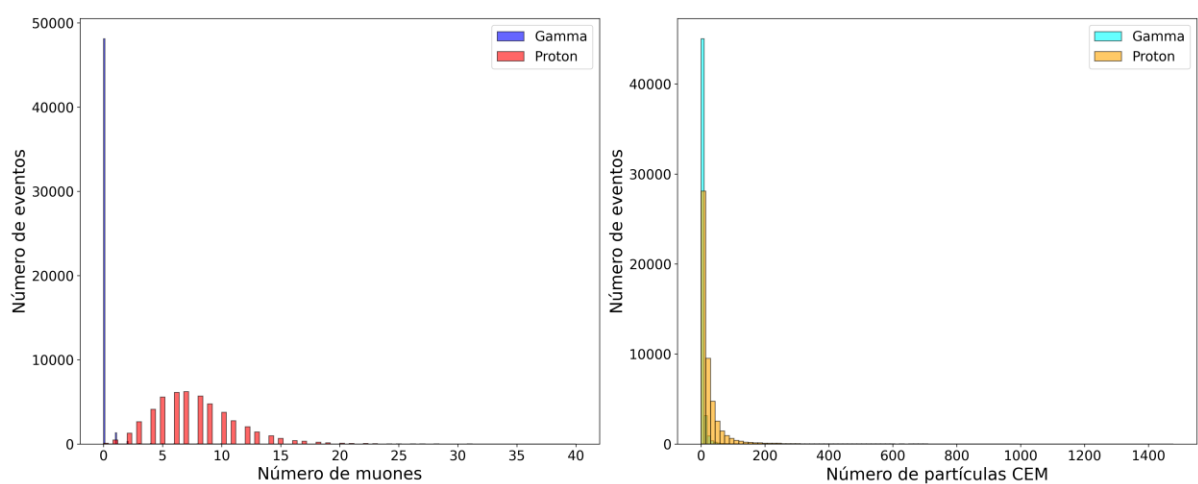
50 GeV - 30°



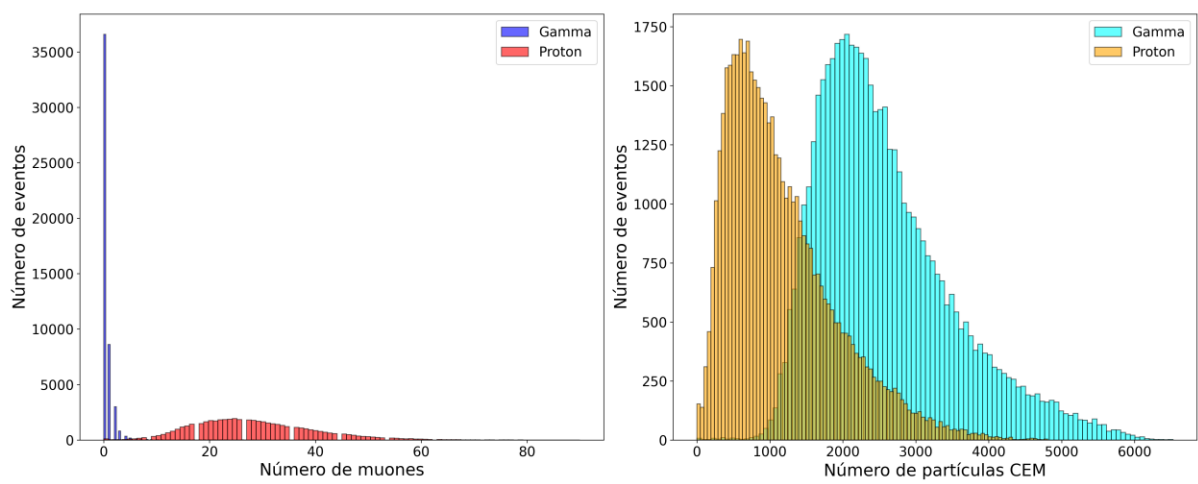
50 GeV - 60°



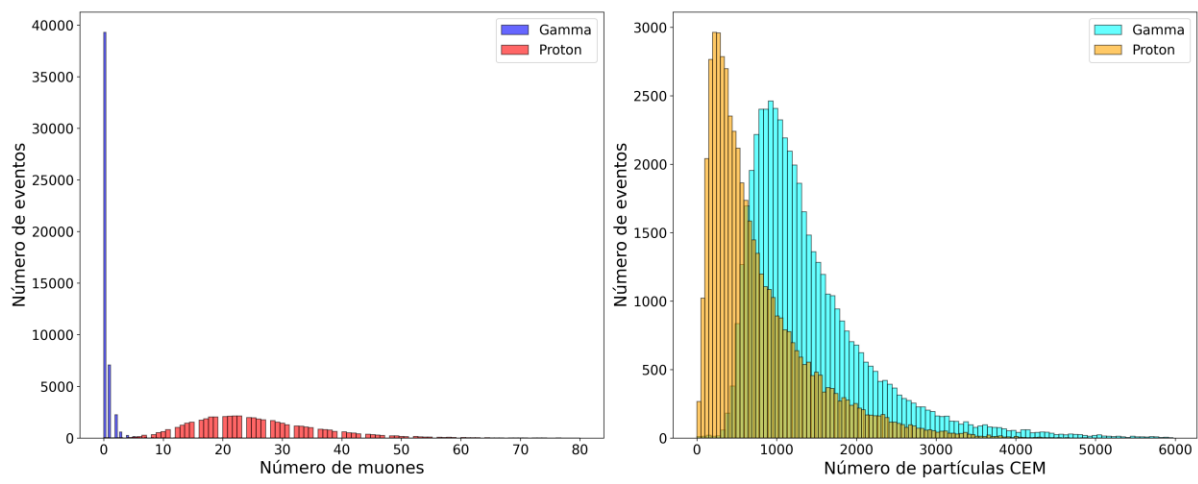
100 GeV - 0°**100 GeV - 30°****100 GeV - 60°**

500 GeV - 0°**500 GeV - 30°****500 GeV - 60°**

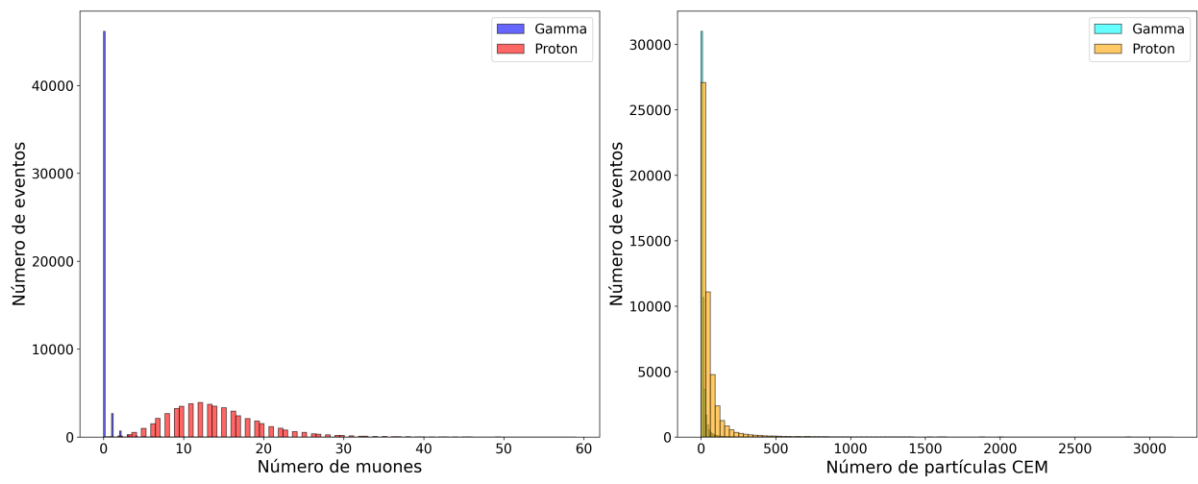
1 TeV - 0°

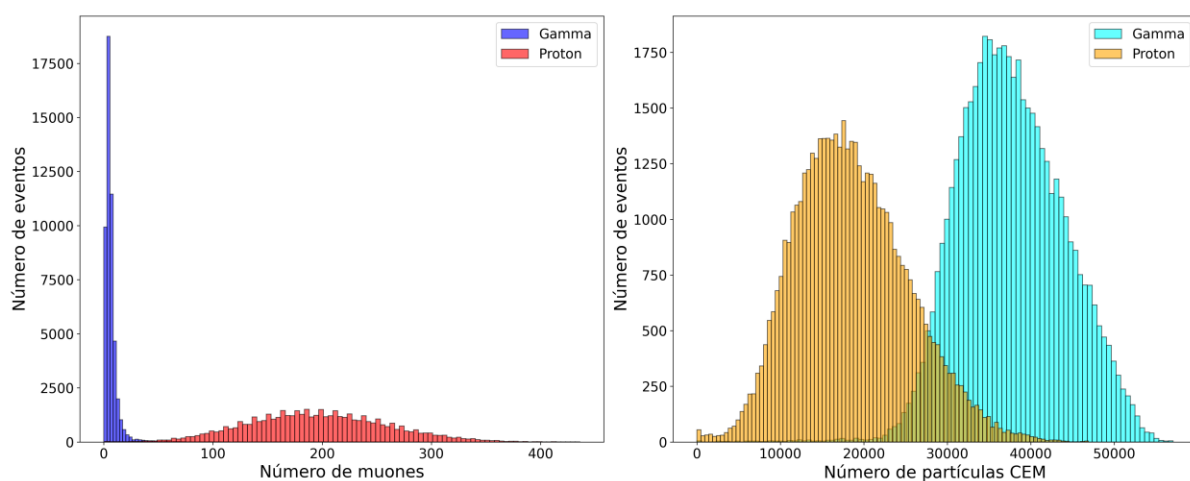
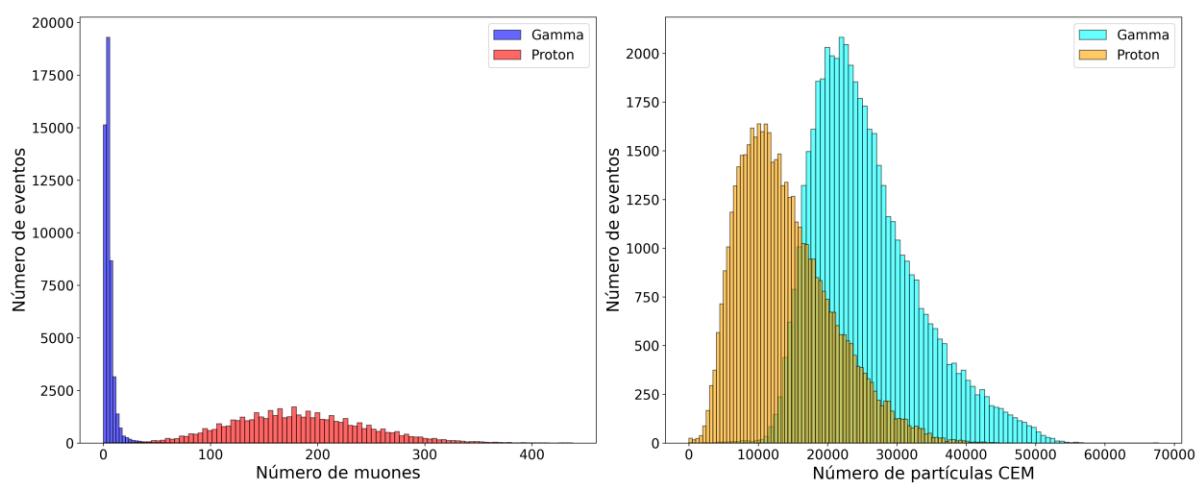
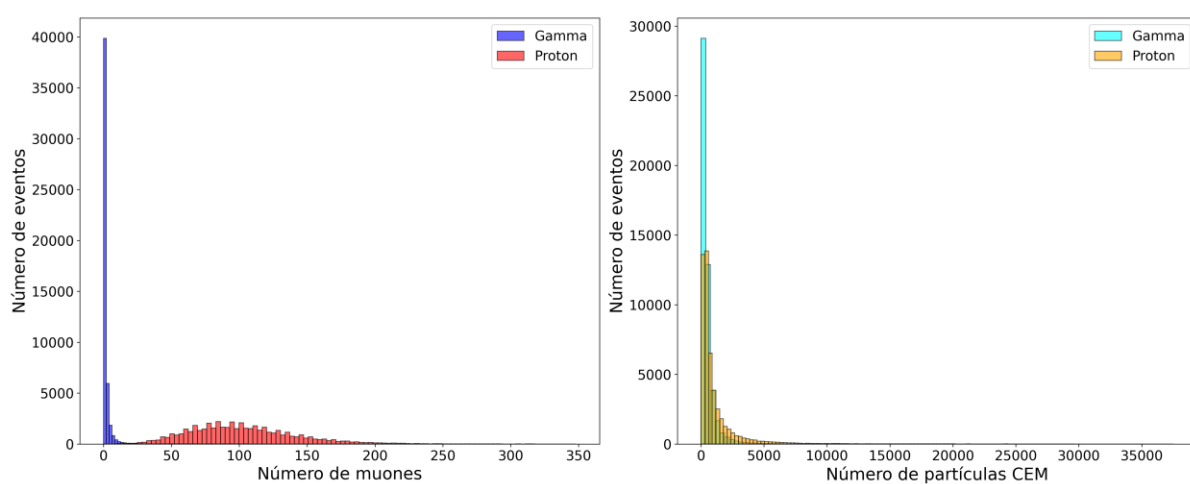


1 TeV - 30°



1 TeV - 60°



10 TeV - 0°**10 TeV - 30°****10 TeV - 60°**

A3. Código en C++ para calcular y graficar la densidad de las partículas secundarias.

```

#include <TSystemDirectory.h>
#include <TList.h>
#include <TSystemFile.h>
#include <TString.h>
#include <TFile.h>
#include <TTree.h>
#include <TH1F.h>
#include <TCanvas.h>
#include <TLegend.h>
#include <iostream>
#include <cmath>
#include <map>
#include <sstream>

// Función para convertir energía a formato legible para títulos
std::string formatEnergyForTitle(const std::string& energy) {
    if (energy == "50GeV") return "50 GeV";
    else if (energy == "100GeV") return "100 GeV";
    else if (energy == "200GeV") return "200 GeV";
    else if (energy == "300GeV") return "300 GeV";
    else if (energy == "400GeV") return "400 GeV";
    else if (energy == "500GeV") return "500 GeV";
    else if (energy == "1000GeV") return "1 TeV";
    else if (energy == "5000GeV") return "5 TeV";
    else if (energy == "10000GeV") return "10 TeV";
    else if (energy == "50000GeV") return "50 TeV";
    else return energy;
}

// Función para convertir ángulo a formato legible para títulos
std::string formatAngleForTitle(const std::string& angle) {
    if (angle == "0deg") return Form("0%c", 0xB0); // Unicode para °
    else if (angle == "30deg") return Form("30%c", 0xB0);
    else if (angle == "60deg") return Form("60%c", 0xB0);
    else return angle;
}

void densi_radio(TString inputDir, TString outputDir) {
    gROOT->SetBatch(kTRUE);
    gStyle->SetOptStat(0);

    TSystemDirectory dir(inputDir, inputDir);
    TList *files = dir.GetListOfFiles();

    std::map<TString, TString> filePairs;

    // Agrupamos archivos por energía y ángulo, ignorando si son proton o
    // gamma
    if (files) {
        TSystemFile *file;
        TIter next(files);

        while ((file = (TSystemFile*)next())) {
            TString filename = file->GetName();

```

```

    if (!file->IsDirectory() && filename.EndsWith(".root")) {
        TString key = filename;
        key.ReplaceAll(".root", "");
        key.ReplaceAll("proton_", "");
        key.ReplaceAll("gamma_", "");

        if (filePairs.find(key) != filePairs.end()) {
            filePairs[key] += "," + filename;
        } else {
            filePairs[key] = filename;
        }
    }
}

// Procesamos cada par de archivos
for (const auto &entry : filePairs) {
    TString filePair = entry.second;
    TObjArray* tokens = TString(filePair).Tokenize(",");
    std::vector<TString> filesToProcess;

    for (int i = 0; i < tokens->GetEntries(); i++) {
        filesToProcess.push_back(((TObjString*)tokens->At(i))-
>GetString());
    }
    delete tokens; // Liberamos memoria

    TH1F *hGammaMuons = nullptr;
    TH1F *hProtonMuons = nullptr;
    TH1F *hGammaEM = nullptr;
    TH1F *hProtonEM = nullptr;

    std::string energy_title, angle_title;

    // Procesamos cada archivo individualmente
    for (TString &filename : filesToProcess) {
        bool isGamma = filename.Contains("gamma");
        TString filename_no_ext = filename;

        // Eliminar la extensión .root del nombre de archivo
        filename_no_ext.ReplaceAll(".root", "");

        // Convertir el nombre sin extensión a std::string para el
análisis
        //nombre del archivo sigue el formato:
<partícula>_<energía>_<ángulo>

        std::istringstream iss(std::string(filename_no_ext.Data()));
        std::string particle, energy, angle;
        std::getline(iss, particle, '_');
        std::getline(iss, energy, '_');
        std::getline(iss, angle, '_');

        // Formatear energía y ángulo
        energy_title = formatEnergyForTitle(energy);

```

```

angle_title = formatAngleForTitle(angle);

// Crear histogramas según el tipo de archivo
if (isGamma) {
    hGammaMuons = new TH1F("hGammaMuons", Form(" %s - %s",
energy_title.c_str(), angle_title.c_str()), 100, 0, 300);
    hGammaEM = new TH1F("hGammaEM", Form(" %s - %s",
energy_title.c_str(), angle_title.c_str()), 100, 0, 300);
} else {
    hProtonMuons = new TH1F("hProton Muons", Form(" %s - %s",
energy_title.c_str(), angle_title.c_str()), 100, 0, 300);
    hProtonEM = new TH1F("hProtonEM", Form(" %s - %s",
energy_title.c_str(), angle_title.c_str()), 100, 0, 300);
}

TFile *inputFile = TFile::Open(inputDir + "/" + filename);
if (!inputFile || inputFile->IsZombie()) {
    std::cerr << "Error al abrir el archivo ROOT: " << filename <<
std::endl;
    continue;
}

TTree *tree = (TTree*)inputFile->Get("particles");
if (!tree) {
    std::cerr << "No se encontró el árbol 'particles' en el
archivo: " << filename << std::endl;
    inputFile->Close();
    continue;
}

float x, y;
int id;
tree->SetBranchAddress("x", &x);
tree->SetBranchAddress("y", &y);
tree->SetBranchAddress("id", &id);

Long64_t nEntries = tree->GetEntries();
for (Long64_t i = 0; i < nEntries; i++) {
    tree->GetEntry(i);
    double radius = std::sqrt(x * x + y * y) / 100;

    // Clasificación de partículas
    if (id == 5 || id == 6) { // Muones
        (isGamma ? hGammaMuons : hProtonMuons)->Fill(radius);
    } else if (id == 1 || id == 2 || id == 3) { // Componente
Electromagnética
        (isGamma ? hGammaEM : hProtonEM)->Fill(radius);
    }
}

// Calcula la densidad de partículas para cada histograma
for (int bin = 1; bin <= (isGamma ? hGammaMuons : hProtonMuons)-
>GetNbinsX(); bin++) {
    double r = (isGamma ? hGammaMuons : hProtonMuons)-
>GetBinCenter(bin);

```

```

        double binWidth = (isGamma ? hGammaMuons : hProtonMuons)-
>GetBinWidth(bin);
        double area = 2 * M_PI * r * binWidth;

        if (isGamma) {
            hGammaMuons->SetBinContent(bin, hGammaMuons-
>GetBinContent(bin) / area);
            hGammaEM->SetBinContent(bin, hGammaEM->GetBinContent(bin)
/ area);
        } else {
            hProtonMuons->SetBinContent(bin, hProtonMuons-
>GetBinContent(bin) / area);
            hProtonEM->SetBinContent(bin, hProtonEM-
>GetBinContent(bin) / area);
        }
    }

    inputFile->Close();
}

// Escalar el contenido de los histogramas dividiendo el eje Y por 500
if (hGammaMuons) hGammaMuons->Scale(1.0 / 500.0);
if (hProtonMuons) hProtonMuons->Scale(1.0 / 500.0);
if (hGammaEM) hGammaEM->Scale(1.0 / 500.0);
if (hProtonEM) hProtonEM->Scale(1.0 / 500.0);

// Configuración de colores y estilos de líneas
if (hGammaMuons) { hGammaMuons->SetLineColor(kBlue); hGammaMuons-
>SetLineStyle(1); hGammaMuons->SetLineWidth(3); }
if (hGammaEM) { hGammaEM->SetLineColor(kBlue); hGammaEM-
>SetLineStyle(2); hGammaEM->SetLineWidth(3); }
if (hProtonMuons) { hProtonMuons->SetLineColor(kRed); hProtonMuons-
>SetLineStyle(1); hProtonMuons->SetLineWidth(3); }
if (hProtonEM) { hProtonEM->SetLineColor(kRed); hProtonEM-
>SetLineStyle(2); hProtonEM->SetLineWidth(3); }

// Encontrar el máximo valor de Y
double maxVal = 0;
if (hGammaMuons) maxVal = std::max(maxVal, hGammaMuons->GetMaximum());
if (hGammaEM) maxVal = std::max(maxVal, hGammaEM->GetMaximum());
if (hProtonMuons) maxVal = std::max(maxVal, hProtonMuons-
>GetMaximum());
if (hProtonEM) maxVal = std::max(maxVal, hProtonEM->GetMaximum());
// Configuración de las etiquetas de los ejes

hGammaMuons->GetXaxis()->SetTitle("Radio (m)");
hGammaMuons->GetYaxis()->SetTitle(Form("Densidad de Partículas
(Partículas/m²)", 0xED, 0xED, 0xB2)); // "Densidad de Partículas
(Partículas/m²)"

// Crear el canvas y la leyenda
TCanvas *canvas = new TCanvas("canvas", Form("Densidad de Partículas
en función del Radio - %s - %s", energy_title.c_str(), angle_title.c_str()),
1400, 1200);
canvas->SetLogy();
if (hGammaMuons) hGammaMuons->SetMaximum(1.2 * maxVal); // Ajustar el
máximo del eje Y

```



```

TLegend *legend = new TLegend(0.7, 0.7, 0.9, 0.9);
legend->SetBorderSize(0);
legend->SetFillStyle(0);
if (hGammaMuons) legend->AddEntry(hGammaMuons, "Muones (Gamma)", "l");
if (hProtonMuons) legend->AddEntry(hProtonMuons, "Muones (Proton)",
"l");
if (hGammaEM) legend->AddEntry(hGammaEM, "EM (Gamma)", "l");
if (hProtonEM) legend->AddEntry(hProtonEM, "EM (Proton)", "l");

// Dibujar histogramas y leyenda
if (hGammaMuons) hGammaMuons->Draw("HIST L");
if (hProtonMuons) hProtonMuons->Draw("HIST L SAME");
if (hGammaEM) hGammaEM->Draw("HIST L SAME");
if (hProtonEM) hProtonEM->Draw("HIST L SAME");
legend->Draw();

// Guardar La gráfica
TString outputFilename = "densidad_radio_" + entry.first + ".png";
TString outputFilePath = outputDir + "/" + outputFilename;
canvas->SaveAs(outputFilePath);

// Liberar memoria
delete hGammaMuons;
delete hProtonMuons;
delete hGammaEM;
delete hProtonEM;
delete canvas;
delete legend;
}
}

```

A4. Código en C++ para graficar la distribución espacial de las partículas secundarias.

```

#include <TSystemDirectory.h>
#include <TList.h>
#include <TSystemFile.h>
#include <TString.h>
#include <TFile.h>
#include <TTree.h>
#include <TH2F.h>
#include <TCanvas.h>
#include <iostream>

std::string formatEnergyForTitle(const std::string& energy) {
    if (energy == "50GeV") return "50 GeV";
    else if (energy == "100GeV") return "100 GeV";
    else if (energy == "200GeV") return "200 GeV";
    else if (energy == "300GeV") return "300 GeV";
    else if (energy == "400GeV") return "400 GeV";
    else if (energy == "500GeV") return "500 GeV";
    else if (energy == "1000GeV") return "1 TeV";
    else if (energy == "5000GeV") return "5 TeV";
    else if (energy == "10000GeV") return "10 TeV";
    else if (energy == "50000GeV") return "50 TeV";
    else return energy;
}

// Función para convertir ángulo a formato legible solo para títulos
std::string formatAngleForTitle(const std::string& angle) {
    if (angle == "0deg") return Form("0%c", 0xB0); // Unicode para °
    else if (angle == "30deg") return Form("30%c", 0xB0);
    else if (angle == "60deg") return Form("60%c", 0xB0);
    else return angle;
}

void cor_footprint(TString inputDir, TString outputDir) {
    gROOT->SetBatch(kTRUE);

    TSystemDirectory dir(inputDir, inputDir);
    TList *files = dir.GetListOfFiles();

    if (files) {
        TSystemFile *file;
        TIter next(files);

        while ((file = (TSystemFile*)next())) {
            TString filename = file->GetName();

            if (!file->IsDirectory() && filename.EndsWith(".root")) {
                TString outputFilename = filename;
                outputFilename.ReplaceAll(".root", ".png");
                outputFilename.Prepend("footprint_");
                TString outputFilePath = outputDir + "/" + outputFilename;

                TFile *inputFile = TFile::Open(inputDir + "/" + filename);
                if (!inputFile || inputFile->IsZombie()) {

```

```

        std::cerr << "Error al abrir el archivo ROOT: " <<
filename << std::endl;
        continue;
    }

    TTree *tree = (TTree*)inputFile->Get("particles");
    if (!tree) {
        std::cerr << "No se encontró el árbol 'particles' en el
archivo: " << filename << std::endl;
        inputFile->Close();
        continue;
    }

    TString particle, energy, angle;
    char particleBuffer[50], energyBuffer[50], angleBuffer[50];

    sscanf(filename.Data(), "%[^_]_%[^_]_%[^.].root",
particleBuffer, energyBuffer, angleBuffer);

    particle = particleBuffer;
    energy = energyBuffer;
    angle = angleBuffer;

    std::string formattedEnergy =
formatEnergyForTitle(energy.Data());
    std::string formattedAngle =
formatAngleForTitle(angle.Data());

    TH2F *hXY = new TH2F("hXY", Form("%s - %s - %s; x (m); y (m)",
particle.Data(), formattedEnergy.c_str(), formattedAngle.c_str()),
300, -300, 300, 300, -300, 300);

    // Llenado del histograma
    tree->Draw("y/100:x/100 >> hXY", "", "COLZ");

    // Establece un rango global fijo de la escala de colores
    hXY->SetMinimum(1);
    hXY->SetMaximum(1e7);

    TCanvas *canvas = new TCanvas("canvas", "canvas", 1600, 1200);
    canvas->SetFixedAspectRatio(true);
    // Ajusta el rango máximo de la barra de colores al máximo
valor encontrado en el histograma
    double maxValue = hXY->GetMaximum();
    hXY->GetZaxis()->SetRangeUser(1, maxValue);
    gPad->SetLogz();

    hXY->Draw("COLZ");
    gStyle->SetPalette(kRainBow);
    gStyle->SetOptStat(0);

    canvas->SaveAs(outputFilePath, "300");

    delete hXY;

```

```
        delete canvas;  
        inputFile->Close();  
    }  
}  
}
```

A5. Código en Python para aplicar SVM

```

from sklearn.model_selection import KFold, cross_val_score
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import os
import numpy as np
from sklearn.svm import SVC
from scipy.stats import norm
from matplotlib.ticker import MaxNLocator

ruta_base = '/home/icn/diegovire/simulaciones_corsika/tesis'
ruta_graficas=os.path.join(ruta_base,'graficas_svm')
ruta_datos=os.path.join(ruta_base,'tablas','dat_root')
ruta_tabla=os.path.join(ruta_base,'tablas','str_SVM')

C_SVM = [0.01]
n_splits = 5

confidence = 0.95 # Nivel de confianza
z = norm.ppf(1 - (1 - confidence) / 2) # Factor Z para el nivel de
confianza

energy_format = {
    "50": "50 GeV",
    "100": "100 GeV",
    "500": "500 GeV",
    "1000": "1 TeV",
    "10000": "10 TeV",
}

angle_format = {
    "0deg": "0°",
    "30deg": "30°",
    "60deg": "60°"
}

# Colores para las partículas
colores = {'gamma': 'darkblue', 'proton': 'red'}

for c in C_SVM:
    # Diccionario de datos
    data_dict = {}
    y_max_dict = {}

    for filename in os.listdir(ruta_datos):
        if filename.endswith(".dat"):
            # Extraer información del archivo
            parts = filename.replace(".dat", "").split("_")
            particle = parts[0]
            energy = parts[1].replace("GeV", "")
            angle = int(parts[2].replace("deg", ""))

```

```

# Leer archivo
file_path = os.path.join(ruta_datos, filename)
df = pd.read_csv(file_path, sep=r'\s+')

key = (energy, angle)
if key not in data_dict:
    data_dict[key] = {}
data_dict[key][particle] = df

# Guardar resultados
filas_resultados = []

for (energy, angle), particle_data in data_dict.items():
    if angle == 0 and 'gamma' in particle_data and 'proton' in
particle_data:
        gamma_data = particle_data['gamma']
        proton_data = particle_data['proton']
        y_max_dict[energy] = proton_data['CM'].max()

# Procesar cada combinación energía/ángulo
for (energy, angle), particle_data in data_dict.items():
    if 'gamma' in particle_data and 'proton' in particle_data:
        # Preparar datos
        gamma_data = particle_data['gamma']
        proton_data = particle_data['proton']
        X = np.vstack([gamma_data[['EM', 'CM']].values,
proton_data[['EM', 'CM']].values])
        y = np.hstack([np.zeros(len(gamma_data)),
np.ones(len(proton_data))]) # 0: gamma, 1: proton

# Validación cruzada
kf = KFold(n_splits=n_splits, shuffle=True, random_state=42)
eficiencias_gamma = []
eficiencias_proton = []

for train_index, test_index in kf.split(X):
    # Dividir datos
    X_train, X_test = X[train_index], X[test_index]
    y_train, y_test = y[train_index], y[test_index]

    # Entrenar modelo SVM
    clf = SVC(kernel='linear', C=c)
    clf.fit(X_train, y_train)

    # Coeficientes de la frontera
    w = clf.coef_[0]
    b = clf.intercept_[0]

    # Ecuación de la recta
    slope = -w[0] / w[1]
    intercept = -b / w[1]

# Predicciones

```

```

y_pred = clf.predict(X_test)

# Eficiencia
gamma_correctos = np.sum((y_test == 0) & (y_pred == 0))
proton_correctos = np.sum((y_test == 1) & (y_pred == 1))
eficiencia_gamma = (gamma_correctos / np.sum(y_test == 0))
* 100

eficiencia_proton = (proton_correctos / np.sum(y_test ==
1)) * 100

eficiencias_gamma.append(eficiencia_gamma)
eficiencias_proton.append(eficiencia_proton)

# Promedios de eficiencias
eficiencia_gamma_prom = np.mean(eficiencias_gamma)
eficiencia_proton_prom = np.mean(eficiencias_proton)

# Calcular el margen de error para cada eficiencia
error_gamma = np.std(eficiencias_gamma) / np.sqrt(n_splits)
error_proton = np.std(eficiencias_proton) / np.sqrt(n_splits)

# Pureza y Q factor
pureza_gamma = eficiencia_gamma_prom / (eficiencia_gamma_prom
+ (100 - eficiencia_proton_prom)) * 100
q_factor = eficiencia_gamma_prom /
np.sqrt(eficiencia_proton_prom)

# Gráfica
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 6))
for particle in ['proton', 'gamma']:
    df = particle_data[particle]
    x_data = df['EM']
    y_data = df['CM']
    ax.plot(x_data, y_data,
            marker='.', linestyle='',
            label=f"{particle}", color=colores[particle],
alpha=0.2)

# Frontera de decisión
xx = np.linspace(min(X[:, 0]), max(X[:, 0]), 100)
yy = slope * xx + intercept

if energy in y_max_dict:
    ax.set_ylim(top=y_max_dict[energy]+2)

if slope < -0.0001:
    ax.set_ylim(-3,)

ax.plot(xx, yy, 'k--', label=f'Hiperplano SVM')

```

```

# Configuración de La gráfica
ax.set_xlabel('Componente Electromagnética', fontsize=14)
ax.set_ylabel('Componente Muónica', fontsize=14)
ax.set_title(f'{energy_format[energy]} -
{angle_format[f"{angle}deg"]}', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.legend(title='Rayo primario')
ax.grid(True)
ax.minorticks_on()

# Guardar gráfica
plt.savefig(f'{ruta_graficas}/scatter_{c}_{energy}_{angle}.png',
            format='png', dpi=300, bbox_inches='tight')
plt.close(fig)

# Resultados
filas_resultados.append({
    'energia': energy,
    'angulo': angle,
    'Ecuacion': f'CM={slope}CEM+{intercept:.5f}',
    'E_gamma': round(eficiencia_gamma_prom, 2),
    'error_gamma': f"{error_gamma:.2f}",
    'E_proton': round(eficiencia_proton_prom, 2),
    'error_proton': f"{error_proton:.2f}",
    'Pureza': round(pureza_gamma, 2),
    'Q_factor': round(q_factor, 2)
})

# Guardar resultados en archivo
resultados = pd.DataFrame(filas_resultados)
resultados.to_csv(f'{ruta_tabla}/SVM_cv_{c}.dat', index=False)

```