

# Simulación de Chubascos Atmosféricos Extensos Generados por Partículas Primarias Entre 10 GeV y 100 TeV

Quirola Jonathan<sup>1</sup>; Erazo David<sup>1</sup>; Vásquez Nicolás<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Física, Quito, Ecuador

**Resumen:** Los rayos cósmicos (CR) son partículas energéticas que provienen de fuentes galácticas y extragalácticas. Estas partículas al interactuar con el campo magnético y la atmósfera terrestre generan chubascos atmosféricos extensos (EAS). En este artículo se realizaron simulaciones con el paquete computacional CORSIKA de los chubascos de partículas secundarias generados por protones ( $p^+$ ), partículas alfa ( $\alpha$ ), fotones ( $\gamma$ ) y núcleos de hierro (Fe) con energías de 10 GeV, 100 GeV, 1 TeV, 10 TeV y 100 TeV, considerando la rigidez magnética en la región ecuatorial y una altitud de  $\sim 2800$  m.s.n.m. para la calibración de un Detector Cherenkov de Agua (WCD). Se obtuvo la distribución longitudinal de partículas secundarias y la distribución longitudinal de la energía de las partículas secundarias creadas respecto a la profundidad atmosférica. Los resultados muestran que el número de muones secundarios generados es menor comparado con el número de electrones; sin embargo, de acuerdo con las simulaciones, los muones muestran una mayor energía longitudinal.

**Palabras clave:** Rayos cósmicos, chubascos atmosféricos extensos, detectores Cherenkov de agua, Corsika

## Simulation of Atmospheric Extensive Showers Generated by Primary Particles between 10 GeV and 100 TeV

**Abstract:** Cosmic rays (CR) are energetic particles that come from galactic and extragalactic sources. Eventually, this kind of particles could interact with the earth magnetic field and the atmosphere, which would generate atmospheric extensive showers (EAS). In this paper, we done simulations using CORSIKA of the atmospheric extensive shower generated by protons ( $p^+$ ), alpha particles ( $\alpha$ ), photons ( $\gamma$ ) and iron nuclei (Fe), with energy range between 10 GeV and 100 TeV at 2800 meters above the sea level, considering the intensity of the earth magnetic field in the equatorial region. We found the average longitudinal secondary particles distribution and the average longitudinal energy distribution about the atmospheric depth. Additionally, the results show that the number of secondary muons are less than the number of electrons, nevertheless muons are more energetic.

**Keywords:** Cosmic rays, atmospheric extensive showers, water Cherenkov detectors, Corsika

### 1. INTRODUCCIÓN

Los rayos cósmicos son un tema activo de investigación desde su descubrimiento por Hess en 1912. Los rayos cósmicos son la fuente de mayor energía en el Universo, sin embargo, su origen y mecanismo de aceleración a energías muy altas ( $\sim 10^{20}$  eV) es aún desconocido. Existen fuentes astrofísicas candidatas como: explosiones de supernovas, núcleos activos de galaxias, agujeros negros y ráfagas de rayos gamma (Mészáros P. et al. 2015, Perkins D. 2009, Mészáros P. 2010). Los CR están compuestos principalmente por protones (86 %), partículas alfa (11 %), electrones (2 %) y núcleos pesados como el uranio (1 %) (Perkins D. 2009, Nava A. 2012).

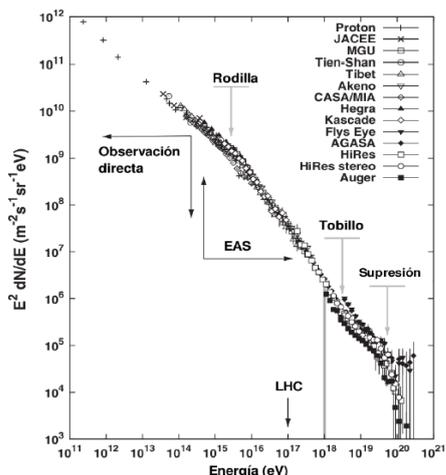
Ciertos autores (Perkins D. 2009, Mészáros P. 2010) proponen que los electrones y positrones son creados por la

interacción con el medio interestelar. Como la mayor parte de rayos cósmicos son partículas cargadas, es difícil determinar la fuente de donde provienen, ya que el medio interestelar y galáctico es gobernado por campos magnéticos aleatorios, los cuales desvían la trayectoria de este tipo de partículas (Perkins D 2009, Mészáros P. 2010). Los rayos cósmicos han sido estudiados en un amplio rango de energías, desde energías menores que  $10^9$  eV hasta energías superiores a  $10^{20}$  eV. En la Figura 1 se observa el espectro de los rayos cósmicos, donde se muestran los diferentes puntos de inflexión. La región más baja del espectro,  $E \leq 10^{10}$  eV, está principalmente dominado por el viento solar. A energías más altas, el espectro puede ser ajustado mediante una ley de potencia de la forma (Perkins D. 2009, Nava A. 2012, Asorey H. 2012). A continuación se presenta la Ecuación (1).

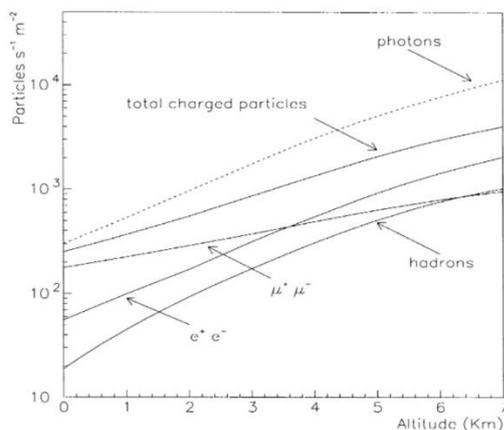
$$\frac{dN}{dE} \propto E^\alpha \quad (1)$$

aragorndj@hotmail.com; nicolas.vasquez@epn.edu.ec

Donde  $\alpha$  es el índice espectral y es aproximadamente igual a  $-3$ . El espectro está compuesto de tres regiones y se las conoce como: rodilla, tobillo y corte (o supresión). La rodilla se encuentra a energías del orden de  $\sim 2 \times 10^{15} - 4 \times 10^{15}$  eV, donde el índice espectral va desde  $\alpha = -2,7$  a  $\alpha = -3$ . Después, el índice espectral regresa a  $\alpha = -2,7$  en la región del tobillo a  $E \cong 4 \times 10^{18}$  eV, y finalmente alcanza el valor de  $\alpha = -4,2$  para  $E > 40 \times 10^{18}$  eV (Asorey H. 2012, Mészáros P. 2010). Para las simulaciones descritas en este trabajo se consideraron partículas incidentes con índice espectral de  $\alpha = -2,7$ .



**Figura 1.** Espectro de los rayos cósmicos. Las flechas grises muestran las regiones donde la pendiente del espectro cambia, mientras que la flecha negra muestra la energía de referencia del LHC en el sistema de referencia del laboratorio ( $10^{17}$ eV). Imagen tomada de A. Letessier-Selvon (Letessier-Selvon, 2011, Asorey, 2012).



**Figura 2.** Flujo de partículas cargadas secundarias (hadrones, muones, electrones, protones y fotones), generados por protones y átomos de helio, en función de la altitud del detector (respecto al nivel del mar). Imagen tomada de S. Vernetto (Vernetto S, 1999).

Adicionalmente, los rayos cósmicos al interactuar con la atmósfera terrestre producen chubascos de partículas secundarias generadas por su interacción con los átomos y moléculas de la atmósfera, conocidos como chubascos atmosféricos extensos (o EAS por sus siglas en inglés, extensive atmospheric showers). Existen tres tipos de EAS: hadrónicas, electromagnéticas y leptónicas (Mészáros, 2010). Para la detección de los rayos cósmicos se utiliza detectores Cherenkov de agua (o WCD por sus siglas en inglés, water Cherenkov detectors), los cuales detectan el paso de las

partículas producidas por las EAS mediante efecto Cherenkov (Auger Collaboration 2004, A. Castellina et al., 2000). Este tipo de detectores capturan la radiación generada por el paso de las partículas cargadas en un medio dieléctrico, además son de bajo presupuesto y alta eficiencia, por lo que fueron usados en observatorios como HAWC y Pierre Auger (Auger Collaboration 2004, HAWC collaboration 2011). La ventaja de este tipo de detectores radica en la altura a la que pueden ser ubicados, es decir, permiten estudiar una correlación entre el flujo de partículas cargadas que llegan a tierra y la altitud. A mayor altitud habrá un mayor flujo de partículas. En la Figura 2 se presenta el flujo de partículas cargadas generadas y fotones (Vernetto, 1999), en donde según Vernetto, a  $\sim 2800$  m.s.n.m. (la altura de Quito) existe un alto flujo de muones y electrones secundarios respecto al nivel del mar.

En este artículo se describen las simulaciones realizadas de las EAS generadas por partículas primarias como protones ( $p^+$ ), fotones ( $\gamma$ ), partículas alfa ( $\alpha$ ) y núcleos de hierro (Fe), con energías entre 10 GeV y 100 TeV, para la calibración de un WCD ubicado a 2809 m.s.n.m., en las instalaciones de la Escuela Politécnica Nacional de Quito (llamado "Politanque") (Vargas, 2015). Para esto se consideraron condiciones locales de rigidez magnética y altitud.

La distribución del artículo es la siguiente: en la sección 2 se detallan los parámetros utilizados para la simulación de las cascadas atmosféricas extensas con Corsika, y las condiciones de las mismas. En la sección 3 se explican los resultados más relevantes obtenidos y una comparación con simulaciones de otros autores con condiciones y parámetros similares (Vernetto, 1999, Vargas, 2015), y en la sección 4 se ponen a consideración las conclusiones y perspectivas de trabajos futuros.

## 2. SIMULACIÓN DE LAS EAS

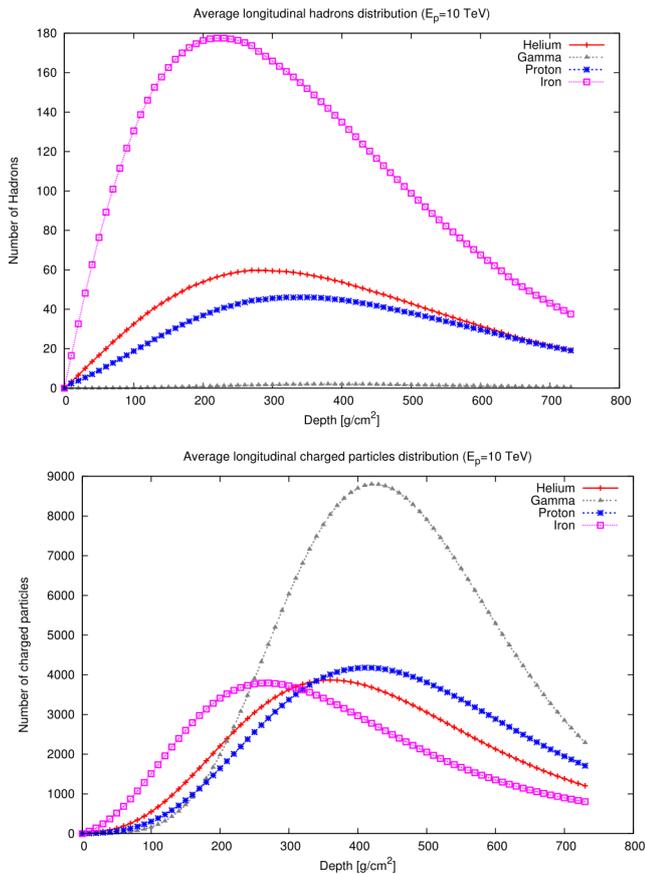
Para simular el desarrollo de las EAS se utilizó el programa CORSIKA v 7.350, donde se seleccionaron como partículas primarias a protones ( $p^+$ ), núcleos de helio o partículas alfa ( $\alpha$ ), fotones ( $\gamma$ ) y núcleos de hierro (Fe), ya que son las partículas más abundantes en los rayos cósmicos. Además, se consideraron diferentes energías para las partículas incidentes: 10 GeV, 100 GeV, 1 TeV, 10 TeV y 100 TeV, lo cual define un índice espectral de  $\sim -2,7$ . Para las simulaciones se consideraron la localización geográfica de la ciudad de Quito, su altitud (2809 m.s.n.m.) y la rigidez magnética en la zona ecuatorial (componente norte: 27,0578  $\mu T$ , componente vertical: 10,514  $\mu T$ ; datos obtenidos de la National Oceanic and Atmospheric Administration). Hay que resaltar que en esta región la intensidad del campo magnético es mayor que en otras latitudes (Perkins, 2009). Por otro lado, el ángulo cenital o de incidencia de la partícula primaria se consideró de  $\theta = 0^\circ$ , mientras que el ángulo azimutal en el rango de  $-180^\circ < \phi < 180^\circ$ , esto debido que en primera instancia necesitamos conocer solamente el número de partículas secundarias con incidencia vertical para la calibración del Politanque. El objetivo de estas simulaciones es encontrar cuáles son las partículas secundarias predominantes en las EAS, así como su energía asociada.

Para tener una buena estadística se simularon 100 000 chubascos para 10 GeV, 100 GeV y 1 TeV, mientras que para 10 TeV y 100 TeV se simularon 10000 chubascos, ya que la capacidad computacional es limitada. Las simulaciones se realizaron tomando los parámetros de la atmósfera estándar U.S. (Heck, 1998), ya que no existen modelos atmosféricos para la región ecuatorial.

### 3. RESULTADOS

Se obtuvo la distribución longitudinal del número de partículas secundarias, así como su energía asociada para diferente tipo de partículas primarias con diferente energía de incidencia. Se adquirió el número de electrones, positrones, muones positivos, muones negativos y gammas y su energía asociada respecto a la profundidad atmosférica. Hay que enfatizar que el tipo de partículas incidentes que se simuló interactúan con los átomos de la atmósfera inmediatamente.

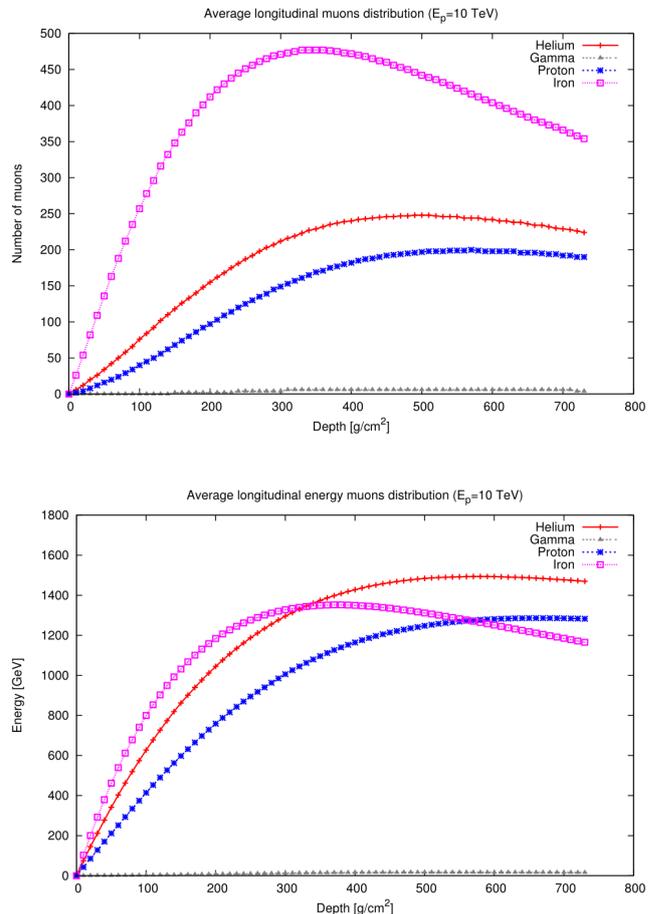
En los chubascos atmosféricos extensos producidos por fotones se obtuvo que alrededor del ~99,7 % del total de partículas secundarias son partículas cargadas. Esta particularidad estaría asociada con la naturaleza de los procesos de interacción del fotón incidente, es decir, solamente se producen procesos de naturaleza electromagnética. Entonces, en las EAS producidas por fotones se obtuvo que la mayoría son partículas cargadas con una componente hadrónica casi nula.



**Figura 3.** Distribución longitudinal promedio del número de hadrones (arriba) y partículas cargadas (abajo) respecto a la profundidad atmosférica para diferentes primarios con  $E_p = 10$  TeV.

En la Figura 3 se presentan el número de hadrones y de partículas cargadas respecto a la profundidad atmosférica generadas por diferentes partículas primarias de 10 TeV. Se puede observar que las partículas cargadas continúan siendo predominantes en las EAS, sin embargo, el número de hadrones no es nulo como el caso de las EAS producidas por fotones, lo que estaría relacionado con procesos no electromagnéticos. Por otro lado, el número de hadrones es mucho más representativo cuando la partícula primaria no es un fotón ( $p^+$ ,  $\alpha$ , Fe). El porcentaje de partículas hadrónicas es del ~4,30 % cuando son generadas por un núcleo de hierro, mientras que el porcentaje cuando las partículas primarias son fotones y protones es de ~1,47 % y ~1 %, respectivamente.

Estos resultados sugieren que las EAS producidas por Fe tienen una mayor componente hadrónica, seguido por las  $\alpha$  y los  $p^+$ , además son consistentes con los resultados encontrados por Vernetto para altitudes y primarios similares (Vernetto, 1999).



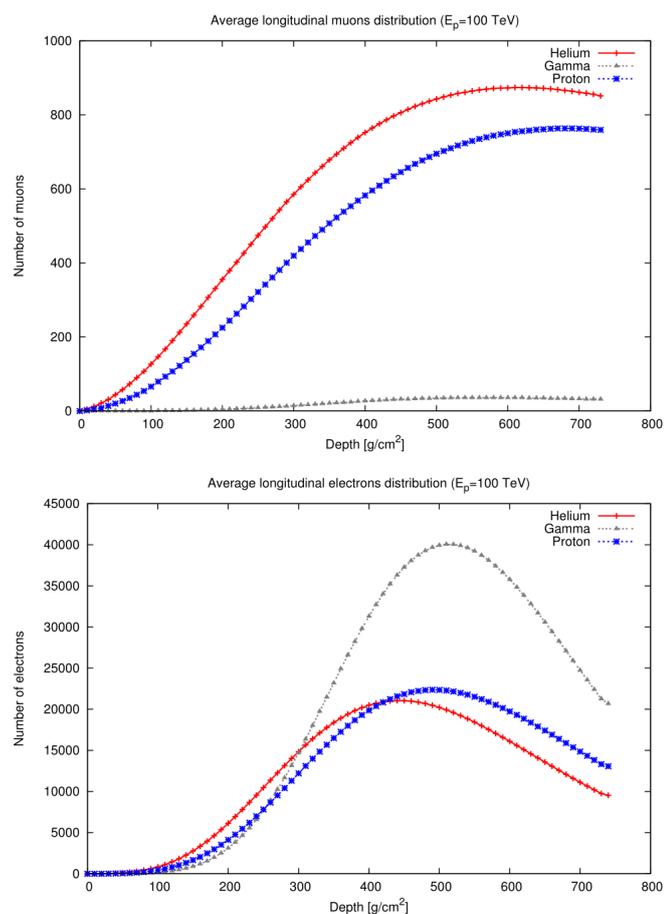
**Figura 4.** Distribución longitudinal promedio del número de muones (arriba) y su energía (abajo) respecto a la profundidad atmosférica para diferentes primarios con  $E_p = 10$  TeV.

Para la calibración del Politanque, lo que más interesa son las partículas secundarias cargadas, principalmente electrones ( $e^-$ ) y muones ( $\mu^\pm$ ), así como la energía promedio con la que arriban. En la Figura 4 se muestra el número de  $\mu^\pm$  y su energía promedio respecto a la profundidad atmosférica para diferentes primarios con energía de 10 TeV. Se observa que

un gran número de los muones producidos en las EAS provienen de núcleos de hierro, y en menor medida de  $\alpha$  y  $p^+$ . Por otro lado, la energía de los muones que llegan a tierra no es muy distinta para cada uno de los casos.

En la Figura 5 se presenta la distribución longitudinal promedio del número de  $\mu^\pm$  y  $e^-$  respecto a la profundidad atmosférica para primarios con energía de 100 TeV. Se observa que el número de muones respecto al de electrones es muchísimo menor; por ejemplo, el porcentaje de muones respecto al número total de leptones generados por un  $\alpha$  es de  $\sim 13,04\%$ , mientras que el porcentaje de  $\mu^\pm$  producidos por  $p^+$  es de  $\sim 7,70\%$ . Por otra parte, las EAS generadas por fotones tienen una producción de  $\mu^\pm$  muy baja respecto a la producción de  $e^-$ . Este hecho estaría asociado con la sección eficaz de la creación de pares al interactuar el fotón con la atmósfera (Vernetto, 1999, Asorey, 2012). Estos resultados muestran que en tierra se tiene un mayor número de electrones que de muones; sin embargo, los muones serán más energéticos ( $\sim 9\,000$  GeV) que los electrones ( $\sim 2\,000$  GeV), como se puede apreciar en la Figura 6. Por lo tanto, sería más sencillo detectar muones en tierra que electrones, debido a su energía asociada.

En la etapa de calibración del Politanque se debe fijar una energía umbral  $> 2\,000$  GeV, para de esta forma asegurar que las únicas partículas que arriban al detector sean muones.



**Figura 5.** Distribución longitudinal promedio del número de muones (arriba) y electrones (abajo) respecto a la profundidad atmosférica para diferentes primarios con  $E_p = 100$  TeV.

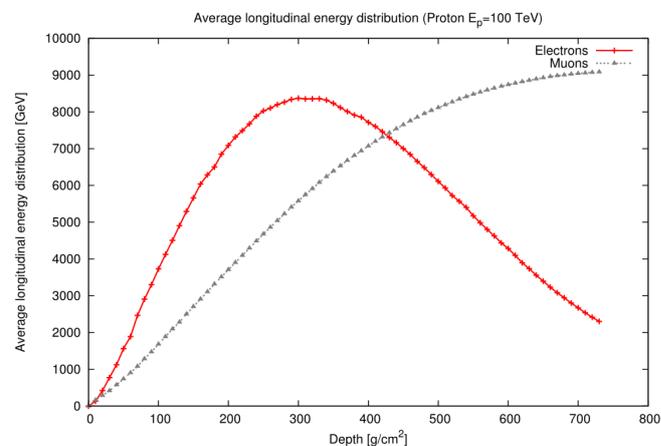
#### 4. CONCLUSIONES

Se realizaron simulaciones de los chubascos atmosféricos extensos (EAS) para encontrar el tipo de partículas y su energía asociada que se esperaría bajo ciertas condiciones, para la calibración de un detector de muones ubicado a 2809 m de altura.

Las EAS producidas por  $p^+$ ,  $\alpha$  y Fe tienen una importante componente hadrónica (sobre todo para el Fe), mientras que para el caso de la EAS producidas por un  $\gamma$  prácticamente sólo se tiene componente electromagnética.

La mayoría de partículas cargadas que se producen son electrones y muones, donde los electrones son más numerosos ( $N_e > N_\mu$ ); sin embargo, al llegar a tierra los  $\mu^\pm$  son más energéticos. Por otra parte, se observa que el número de  $\mu^\pm$  es mayor cuando son generados por Fe,  $\alpha$  y  $p^+$ , en ese orden. Uno de los inconvenientes en estas simulaciones es el modelo de atmósfera que se utilizó, ya que no refleja las condiciones particulares de la ubicación del detector; sin embargo, es una primera aproximación buena para la calibración del detector.

El siguiente paso será simular la incidencia de este tipo de radiación con el detector, con su estructura geométrica y sus diversas componentes. Para realizar este tipo de simulaciones hay que usar el paquete computacional GEANT4 (GEometry AND Tracking), el cual permite simular la interacción de la radiación con la materia.



**Figura 6.** Distribución longitudinal de energía respecto a la profundidad atmosférica para muones (verde) y electrones (rojo) producidos por un protón de 100 TeV.

#### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido realizada en parte gracias al financiamiento de CEDIA a través de los fondos CEPRA proyecto CEPRAIX-2015-04-Astropartículas y de la Escuela Politécnica Nacional. Los autores agradecen a O. Martínez, L. Lascano, A. Almeida, J. Costa y C. Guevara por su colaboración.

## REFERENCIAS

- Aharonian F. *Very High Energy Cosmic Gamma Radiation*, World Scientific, 2014.
- Asorey H. *Los detectores Cherenkov del observatorio Pierre Auger y su aplicación al estudio de fondos de radiación*, Tesis de doctorado. Centro Atómico Bariloche-Argentina, 2012.
- Asorey H. *Los detectores Cherenkov del Observatorio Pierre Auger y sus aplicaciones al estudio de fondos de radiación*, tesis doctoral, 2012.
- Auger Collaboration. *Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory*, Nuclear instruments and methods in physics research A, 2004.
- Castellina ., Vernetto S., et al. *Search for Gamma Ray Burst at Chacaltaya*, Il nuovo cimento, 2000.
- Cotzomi J., Martínez O., Moreno E., Salazar H., Villaseñor L. *Air shower array at the university of Puebla for the study of cosmic rays*, Revista Mexicana de física, 51, 38-46, 2005.
- Ghisellini G. *Gamma ray burst: basic facts and ideas*, Proceedings IAU Symposium No. 275, 2010.
- Ghisellini G. *Radiative Processes in High Energy Astrophysics*, ArXiv e-prints, 2012.
- Grupen C, Shwartzclaus B. *Particles detectors*, Cambridge University Press, 2008.
- HAWC collaboration. *On the sensitivity of the HAWC observatory to gamma-ray bursts*, Astroparticle physics, 2011.
- Heck D, Knapp J, Capdevielle J. *CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers*, 1998.
- LAGO Collaboration. *Water Cherenkov Detectors response to a Gamma ray burst in the Large Aperture GRB Observatory*, Proceedings 31nd International Cosmic Ray Conference, Lodz, 2009.
- Letessier-Selvon A., Stanev T. *Ultra high energy cosmic rays*, Reviews of Modern Physics, 83 (3) 907-942, 2011.
- Malcolm S. Longair. *High Energy Astrophysics*, Cambridge University Press, 2011.
- Mészáros P. *The high energy Universe*, Cambridge university press, 2010.
- Mészáros P. et al. *Gamma Ray Bursts in the HAWC Era*, 2015.
- Nava A. *Simulación del experimento LAGO en Sierra Negra*. Tesis pregrado en Física, Universidad Autónoma del Estado del Hidalgo, 2012.
- Perkins D. *Particle Astrophysics*, Oxford University, 2009.
- Salazar H. *The large apertura GRB observatory*, Proceedings 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, 2012.
- Vargas S. et al. *Implementing a set of WCD detectors for Space Weather research: first results and further developments*, Proceedings of science ICRC, 2015.
- Vernetto S. *Detection of Gamma-Ray Bursts in the 1 GeV-1 TeV energy range by ground based experiments*, Nuclear instruments and methods in physics research A, 1999.