

## I. ANTECEDENTES DEL TRABAJO

El estudio de los rayos cósmicos (RCs) es una de las más exitosas aventuras científicas del último siglo. Es un tópico que trasciende las barreras disciplinarias tradicionales teniendo repercusiones para la astrofísica, física de partículas, geofísica y telecomunicaciones por mencionar algunos.

Históricamente el Perú, a través del Observatorio de Huancayo tuvo participación activa en el campo. Desde los años 30, en colaboración con la Universidad de Washington se operó un detector de rayos cósmicos tipo cámara de ionización que aportó al descubrimiento del ahora llamado efecto Forbush, también desde los los 40 se contó con un detector de Neutrones, las medidas de este instrumento fueron consideradas como medidas patrón para todas los detectores similares en el Mundo. Lamentablemente en las últimas décadas esta actividad desapareció. En el Perú las perspectivas para desarrollar esta área son buenas debido a la diversidad de terrenos y alturas, su posición en el hemisferio sur, la cercanía del Ecuador Magnético y a la anomalía Magnética del Atlántico Sur, así como su historia.

El flujo medio de RCs que ingresan a la atmósfera de la Tierra es conocido<sup>[3]</sup>. La modulación solar influencia este flujo en el rango de las decenas de GeV y el campo magnético terrestre genera un corte difuso alrededor de los 10 GeV, este corte depende de la magnitud local de campo magnético donde se realiza la observación y por lo tanto de las coordenadas de este punto en la Tierra

En su interacción con la atmósfera de la Tierra un rayo cósmico genera una cascada de decaimientos (RCs secundarios). La evolución de la cascada de decaimientos esta determinada por dos factores que compiten entre sí: la producción de partículas secundarias por reacciones nucleares y decaimientos, y la absorción en la atmósfera de partículas de baja energía. Este flujo de partículas secundarias se convertirá en el Detector Cherenkov de Agua (WCD) en señales eléctricas.

Por su bajo costo y razonable eficiencia, uno de los detectores más comunes en Física de rayos cósmicos son los WCDs. Estos detectores se componen típicamente de un volumen de agua que va desde uno a miles de metros cúbicos, y con uno o varios PMT. Estos dispositivos detectan la radiación Cherenkov producida por el paso de una partícula cargada con velocidad mayor a la velocidad de la luz en el agua. Otra de las ventajas de los WCD es su capacidad para detectar los fotones presentes de las cascadas, que constituyen el  $\approx 70\%$  del total de partículas de la EAS. Con

un metro cúbico de agua se alcanzan altas probabilidades de conversión de un fotón en un par  $e^{\pm}$  [3]

El análisis del detector debe de ser capaz de deconvolucionar las señales del detector, hasta obtener información sobre el flujo de RCGs. Al estudiar este flujo en diferentes escalas temporales es posible asociar sus variaciones con la ocurrencia de un efecto Forbush u otro fenómeno (transitorios solares, Gamma Rays Burst, fenómenos electro-sísmicos, etc.), comparándolos además con datos registrados por sondas en satélites.

La deconvolución es posible con un método híbrido de mediciones, simulaciones y aplicación de modelos. Luego de esto se corrigen los efectos atmosféricos, principalmente de presión, para seguidamente estudiar las variaciones en diferentes escalas temporales en el flujo de RCs. La mayor ventaja de estos detectores es que debido a la velocidad de adquisición son capaces de discernir la energía depositada por cada partícula en el tanque. Finalmente se validarán los datos obtenidos por el detector mediante comparación con simulaciones.

La CONIDA ha instalado y operado sobre los 4600 m.s.n.m., en Marcapomacocha, Junín, un arreglo prototipo de tres detectores Cherenkov fabricados con componentes comerciales, obteniendo datos del flujo de rayos cósmicos durante seis meses. Actualmente ha firmado un convenio específico para operar un arreglo de detectores Cherenkov en el Observatorio Magnético del Huayao regentado por el Instituto Geofísico del Perú, donde ya se ha instalado un nuevo modelo de Detector Cherenkov de Agua diseñado basado en simulaciones y en la experiencia previa.

El Perú a través de la CONIDA forma parte de la colaboración internacional LAGO (Latin American Giant Observatory) con detectores de rayos cósmicos en ocho países de Latinoamérica y con planes de extenderse durante el presente año a Brasil y la Antártida. Gracias a esto el personal de la CONIDA, muchas veces con apoyo de CONCYTEC, a participado en varias escuelas, reuniones de trabajo y pasantías en diversos países de latinoamerica. A continuación se numera la lista de de publicaciones presentadas en eventos y conferencias, nota técnicas y tesis de licenciatura que actualmente se encuentran en evaluación:

- (2011) “The LAGO (Large Aperture GRB Observatory) in Peru ”, E. Tueros Cuadros, Proceedings of the International Astronomical Union /, Mendoza, Argentina/ , Volume 7 / Symposium S286 / October 2011, pp 445-447
- (2011) “Simulador de Tanque Cherenkov de Agua para la Detección de Rayos Cósmicos ”,

Luis Javier Otiniano Ormachea, Carlos Soncco Meza, Nota Técnica, Dirección de Astrofísica de la CONIDA.

- (2012) “Divisor de Voltaje para Tanque Cherenkov ”, Luis Javier Otiniano Ormachea Edith Tueros Cuadros, Nota Técnica, Dirección de Astrofísica de la CONIDA.
- (2012) “Fuente de alto voltaje para fotomultiplicadores ”, Luis Javier Otiniano Ormachea, Edith Tueros Cuadros, Dirección de Astrofísica de la CONIDA.
- (2013) “Construcción e instrumentación de un tanque Cherenkov para un telescopio de muones”. E. Tueros Cuadros. Tesis para obtener el Título de Licenciado en Física. (enrevisión Universidad San Luis Gonzaga de Ica).
- (2010) “El proyecto LAGO en Perú”, Luis Javier Otiniano Ormachea, Presentación: Encuentro Peruano de Astronomía.
- (2010) “The LAGO project in Perú” XI ICFA School on Instrumentation, Luis Javier Otiniano Ormachea, Presentación: Elementary Particle Physics. Bariloche –Argentina.
- (2010) “El proyecto LAGO en Perú”, Luis Javier Otiniano Ormachea. Presentación: Encuentro Científico Internacioanl de Invierno ECI 2010i.
- (2011) “Los Rayos Cósmicos de Ultra Alta Energía”, Luis Javier Otiniano Ormachea XV Simposio Nacional de Estudiantes de Física.
- (2012) “Simulador de Tanque Cherenkov basado en métodos Montecarlo”, Luis Javier Otiniano Ormachea. Presentación: Encuentro Científico Internacional de Invierno ECI 2012i.
- (2011) “Los Rayos Cósmicos de Ultra Alta Energía”, Luis Javier Otiniano Ormachea Presentación: IV Encuentro Científico Regional de Junín.
- (2012) “Instrumentación y Calibración de un Telescopio de muones basado en ele efecto Cherenkov”, Luis Javier Otiniano Ormachea Presentación: Tercer Congreso Colombiano de Astronomía y Astrofísica.

El principal impacto social de este proyecto se espera dar en la generación de Recursos Humanos en el ámbito de la investigación. Además se desarrollarán nuevas técnicas de detección en el campo de rayos cósmicos que involucran la apropiación de tecnologías de adquisición electrónica y tratamiento de datos de manera remota. Este diseño además servirá como arreglo de ingeniería para la futura propuesta de un observatorio de grades dimensiones en la Sierra Central del Perú. También se espera poder realizar aportes de transferencia de tecnología en la aplicación de electrónica de bajo consumo para el control y adquisición de datos en estaciones de sensado remotas. Las aplicaciones de esta tecnología a sensores de todo tipo podría tener un alto impacto científico (por ejemplo, estaciones climáticas inteligentes), social (p. ej, control de poblaciones de

ganado o agrícolas) y económico (p. ej., aplicaciones de sensado en la industria petrolera o gasífera).

Para la adecuada aplicabilidad de los resultados del proyecto es necesario capacitar a investigadores de diferentes áreas en Perú en la fenomenología de rayos cósmicos relacionada con los detectores, esto se alcanzará mediante la realización de una escuela internacional de una semana al finalizar el proyecto. Además los datos generados por los detectores del proyecto estarán al alcance de investigadores peruanos via web.

## **II. HIPÓTESIS DE TRABAJO**

En su camino a la Tierra, los rayos cósmicos producidos en la galaxia por diversas fuentes (llamados rayos cósmicos galácticos, GCR), son desviados por diversos campos magnéticos. El principal efecto es generado por la Heliósfera que es modulada por el ciclo de actividad solar y los eventos transitorios (fulguraciones solares, eyecciones de masa coronal, etc.) <sup>[5]</sup>. Es conocido la anticorrelación que existe entre el flujo normal de RC y la actividad solar, siendo mayor el flujo de RC durante un mínimo solar. Tradicionalmente la modulación solar de los GCR se observa en Tierra, de manera indirecta, con detectores de neutrones que solo miden el paso de estos y no es posible reconstruir las propiedades de los RC que los generaron en la atmósfera.

Al medir el flujo de GCR, uno puede por lo tanto determinar de forma indirecta la actividad solar. Esto permite que los experimentos de RC observar los ciclos de 11 y 22 años del Sol, así como los fenómenos transitorios violentos que generan disminuciones en el flujo en escalas menores de tiempo. Estos fenómenos son asociadas generalmente a una eyección de masa coronal (CME) que se produce en el Sol generando una enorme masa de plasma magnetizado se envía a través del medio interplanetario. Al llegar a la Tierra, este plasma actúa como un “escudo” para los GCRs, y produce descensos estadísticamente rápidos del flujo de GCR, (pocas centésimas de variación en unas pocas horas). Luego, una vez que la CME sigue su camino, el flujo de GCR lentamente vuelve a su valor original, en una escala de tiempo de días. Esta disminución del flujo de GCR se llama disminución Forbush y puede ser bien observado por cualquier detector de rayos cósmicos sobre la Tierra.

La colaboración LAGO ha reportado recientemente la posibilidad de usar WCDs individuales para estudiar modulaciones solares del flujo de GCR a partir del análisis de la señal

producida en los detectores por las partículas secundarias producidas en la atmósfera por estos mismos GCRs<sup>[4]</sup>. Como los detectores Cherenkov de LAGO pueden medir distintas componentes de los rayos cósmicos secundarios generados en la atmósfera (componente electromagnética, muónica, lluvia atmosférica extendida principalmente), pueden proporcionar nueva información sobre estos fenómenos. Además las medidas en Tierra son influenciadas por el alcance global de estos fenómenos por lo que complementen las medidas en satélites que aunque permiten observar directamente el flujo de plasma y las variaciones de campo magnético en la Heliósfera son de carácter local y unidimensional a lo largo de la trayectoria del satélite. El Observatorio LAGO<sup>[7]</sup> con su red de detectores ubicados en todo Latinoamérica puede hacer un análisis multiespectral del flujo de rayos cósmicos debido a la diferencia a que la diferencia en la rigidez magnética en la localización de los detectores genera cortes en la energía del flujo de rayos cósmicos primarios que pueden alcanzar la atmósfera.

### **Actividad sísmica**

Una correlación entre las variaciones a corto plazo del flujo de rayos cósmicos cargados de alta energía en el espacio cercano a la Tierra medidas por instrumentos en satélites y la actividad sísmica ha sido reportada en las dos últimas décadas<sup>[1]</sup>. Recientemente, algunos experimentos en satélites observaron chorros anómalos de partículas cargadas que se precipitan desde la parte baja del cinturón interior de radiación, que se supone es causado por perturbaciones sismo-electromagnéticas de baja frecuencia. Estas variaciones se muestran como el repentino incremento en las tasas de conteo de partículas cargadas con varias horas de anticipación a la fase activa de los terremotos con magnitud superior a 4 en la escala de Richter. Aunque el mecanismo es aún desconocido. Estudiar la componente muónica del flujo de rayos cósmicos es un modo viable para intentar medir estas variaciones pues los muones se generan tempranamente en la alta atmósfera por decaimiento de piones cargados y prácticamente no interactúan<sup>[6]</sup>.

### **III. METODOLOGÍA A UTILIZAR**

El flujo de rayos cósmicos puede ser bien aproximado por una ley de potencias de la forma  $j(E) = j_0 E^{-\alpha(E,Z)}$ , donde la pendiente espectral  $\alpha$  dependerá de la energía del primario  $E$  y de su composición química, representada en este caso por su número atómico  $Z$ . En general, el flujo de todas las partículas puede ser bien representado por una pendiente espectral  $\alpha \approx 3$  en el rango

$E > 10^9 \text{ eV}$ , es decir, el flujo disminuye un factor  $1000$  por cada década de aumento en la energía del primario. Para energías de los primarios en el rango  $10 \text{ GeV} < E < 1 \text{ PeV}$ , el valor de  $\alpha$  se ubica en torno a  $2.7$ , estando dominado por  $H \approx 88\%$ ,  $He \approx 10\%$  y elementos del grupo  $C-N-O \approx 1\%$ . A energías por debajo de algunos GeV el flujo está totalmente dominado por el viento solar, mientras que la modulación solar puede influenciar hasta rayos cósmicos con energías de algunos cientos de GeV. Por su parte, el efecto del campo geomagnético terrestre se presenta como un corte difuso para energías del orden de  $10 \text{ GeV}$ , dependiente de la latitud y longitud del lugar considerado.

La interacción de un rayo cósmico (primario) con la atmósfera, lo cual ocurre típicamente a alturas de entre  $15 \text{ km}$  y  $40 \text{ km}$  sobre la superficie terrestre, genera cascada de partículas (secundarios) cuya cantidad es proporcional a la energía del primario. Estas partículas se distribuyen en tres componentes principales: la componente electromagnética (formada por electrones  $e^\pm$  y fotones  $\gamma$ ), la componente muónica (formada por muones  $\mu^\pm$ ) provenientes del decaimiento de mesones cargados, típicamente  $\pi^\pm$  y  $K^\pm$ ), y la componente hadrónica (formada por hadrones, nucleones y algunos núcleos livianos). La relación numérica entre las tres componentes está directamente relacionada con el tipo de primario, pero siempre se da que la componente electromagnética domina la distribución numérica ( $\approx 70\%$ ) y la distribución en energía ( $\approx 85\%$  de la energía del primario se encuentra en esta componente).

La evolución de la cascada resulta entonces de la composición de dos factores claves: la producción de nuevas partículas por reacciones nucleares y decaimientos de partículas inestables, y la absorción de partículas de baja energía en la atmósfera. Luego, el flujo de secundarios registrados por el detector se origina en la convolución del flujo total de primarios que ingresan en la atmósfera en el sitio de interés, y la presión atmosférica al nivel del detector que resulta ser la cantidad total de aire atravesado por las cascadas durante su evolución. Simulaciones detalladas muestran que al integrar el flujo total de primarios la relación numérica entre las tres componentes es  $0.76 : 0.20 : 0.04$ . Luego, este flujo de partículas secundarias se convertirá en el flujo de señales dependiendo de la geometría del detector WCD y de la respuesta del detector frente a cada tipo de partículas secundarias. En resumen, el flujo de señales medidas provendrá de la convolución de los siguientes factores:

Esta deconvolución se logra utilizando un conjunto híbrido de mediciones, simulaciones y aplicación de modelos. En primer lugar, el efecto de la magnetosfera se determina a partir de la aplicación de los modelos como el IGRF11 en códigos como Magnetocosmics, que permiten calcular el valor del campo geomagnético y sus variaciones seculares en cualquier punto de la

Tierra hasta una altura de  $5 R_0$ . La respuesta atmosférica al nivel de los datos se estudia descorrelacionando el efecto de la temperatura ( $T$ ) y la presión ( $P$ ) atmosféricas. La necesidad de conocer los valores de  $P$  y  $T$  motivan la instalación de un sensor de presión y temperatura, el cual es controlado por la FPGA mediante un módulo específico programado para tal fin. Las simulaciones de cascadas se realizan usando el código *Corsika*, el cual se encuentra instalado y funcionando en los *química*, *ficomaco* y *halley*, de la Universidad Industrial de Santander en Colombia que participa del proyecto LAGO, se determina el flujo de secundarios esperados al nivel del detector en condiciones normales de los campos geomagnéticos y de la heliósfera. Finalmente la respuesta del detector se estudia utilizando una simulación completa del detector basada en Geant4.

Una vez validados y caracterizados los datos registrados mediante la comparación con las simulaciones, y luego de corregir los efectos atmosféricos o inestabilidades en el funcionamiento del detector, se estudian las variaciones temporales del flujo. Otra de las ventajas de los WCD y en particular del sistema de adquisición utilizado actualmente en LAGO, es la posibilidad de estudiar la energía depositada en el detector por cada partícula. Esto permite caracterizar los flujos registrados para distintas energías depositadas, los cuales a su vez es posible relacionar con distintos intervalos de energías de los primarios. Es posible así estudiar, de forma indirecta, la modulación del flujo de primarios en distintos intervalos de energía utilizando un único arreglo.

Para el caso específico de estudio de fenómenos sismo electromagnéticos, debemos contar con elementos de información indispensables que son: por un lado, las mediciones continuas del flujo de muones baja energía y las componentes del vector campo magnético terrestre, y por otro, la presencia y registro de actividad sísmica .

Es posible extraer de la señal en los detectores la componente muónica de baja energía buscando decaimientos muónicos en los WCDs (muones que han dejado toda su energía cinética y no consiguen atravesar el detector y decaen en  $e^\pm$ ) buscando señales seguidas de una segunda componente en una escala de decenas de nanosegundos. Se implementará un muestreo estadístico de los datos para garantizar que, efectivamente, existen variaciones abruptas (en el tiempo) de la razón de conteo de muones de baja energía en concordancia temporal con perturbaciones sísmicas.

#### IV. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Aleksandrin, S. Y., et-al. *Hign-energy Charged particle bursts in the near-arth space as earthquake precursors*. *Annalss of Geophysicae*, 21, 497

- [2] Asorey, H. *Measurement of Low Energy Cosmic Radiation with the Water Cherenkov Detector Array of the Pierre Auger Observatory*. Proceedings of the 32th international cosmic ray conference icrc 2011.
- [3] Cane, H. *Coronla mass ejection and Fornush Decrease*. Space Science Reviews, 93(1), 2011.
- [4] Dasso, S. y Asorey, H. *The Scaler Mode in the Pierre Auger Observatory to studi heliospheric modulation os comic rays*. Advances in Space Research, 2012.
- [5] Gurevich, A. V. y Zybin, K. *Hign Energy Cosmic Ray particles and the most powerful discharges in thunderstom atmosphere*. Physics Letters A, 329 (4-5) 2004
- [6] Parrot, M. *Electromagnetic disturbances assiciated with eartquakes: An analysis of ground-based and satellite data*. Journal of Science Exploration, 4(2), 1990.
- [7] The LAGO collaboration. *The LAGO Solar project*. The 33th International Cosmic Ray Conference ICRC 2013, en prensa.