

## EXPERIMENTO LAGO CHACALTAYA 2013

### LAGO EXPERIMENT CHACALTAYA 2013

P. MIRANDA<sup>†</sup>, R. TICONA, A. VELARDE, H. RIVERA, & M. SUBIETA

Instituto de Investigaciones Físicas, Carrera de Física  
Universidad Mayor de San Andrés  
c. 27 Cota-Cota, Campus Universitario, Casilla de Correos 8635  
La Paz - Bolivia

#### RESUMEN

Se inicia otra etapa del experimento LAGO (*Large Aperture Gamma Ray Burst Observatory*) desde septiembre de 2012, con una implementación electrónica moderna consistente de dos tarjetas: una ADC de tres canales, y otra FPGA (Nexys2) que lee las señales cada 25 ns. Este nuevo equipo es compacto; se probó la funcionalidad y se recalibraron los detectores del experimento. El software ofrece mayores bondades, gracias a los cuales se optó por registrar cuentas cada 5 ms para 7 umbrales por canal; además se observa cuentas de coincidencias entre los tres canales. Se presentan los resultados actuales de la variación temporal de los tres detectores Cherenkov que están operando desde 2009 en la montaña de Chacaltaya (La Paz, Bolivia), así como la valoración de este equipo. Actualmente las cuentas diarias y mensuales pueden ser observadas en internet. Se ha visto que las variaciones diarias están en correlación con las variaciones de presión; se observa asimismo la disminución de Forbush de la actividad solar.

Código(s) PACS: 95.85.Pw — 95.85.Ry — 95.45.+i

*Descriptores:* Destellos de rayos gamma (GRBs) — Rayos cósmicos — Instalaciones de detección.

#### ABSTRACT

Another stage of the LAGO (*Large Aperture Gamma Ray Burst Observatory*) experiment starts since September 2012, with modern electronic implementation consisting of two cards: one three-channel ADC, and other FPGA (Nexys2) that reads signals each 25 ns. This new device is compact; it has been tested for functionality and the detectors of the experiment were recalibrated. Due to the greater benefits of the software, we could register counts every 5 ms for 7 thresholds per channel; count coincidences were observed among the three channels. We present the current results of the time variation of the three Cherenkov detectors operating since 2009 in the Chacaltaya mountain (La Paz, Bolivia), as well as the valuation of this equipment. The daily and monthly counts can be consulted online via internet. We have observed that the daily variations are correlated with variations in pressure and with the Forbush decrease in the solar activity.

*Subject headings:* Gamma Ray Bursts (GRBs) — Cosmic rays — Observatories and site testing.

#### 1. ANTECEDENTES

El experimento LAGO-Chacaltaya está ubicado en 16°21'00"S latitud y 68°07'53"W longitud, con rigidez de 12GV, a 5240msnm, ésta altura ofrece mejores posibilidades para el estudio de detección de GRB en tierra, detectando fotones secundarios mediante la técnica de partículas individuales sobrevivientes de los pequeños chubascos atmosféricos producidos por fotones de energías mayores a 1GeV. Opera desde el año 2009 con tres detectores Cherenkov, basados en tanques de agua y electrónica del experimento

Auger (Bariloche-Argentina) conocidas como Local Station (LS). La adquisición de datos se actualiza con una nueva electrónica formada por dos tarjetas; una, construida en Bariloche-Argentina, es un digitizador para tres canales (Arnaldi *et al.* 2011b), y otra FPGA adquirida, la Nexys2. Durante el workshop de LAGO en Riobamba-Ecuador el mes de julio de 2012 se inician las pruebas, los detalles de la instalación se indican en anexo A. A la nueva electrónica haremos referencia como Lago2.

La información que se genera con este nuevo equipo esta basada en 12 muestreos de 25 ns cada vez que en alguno de los detectores se muestre algún

<sup>†</sup>Email: pmiranda@fiums.a.edu.bo

TABLA 1  
PARÁMETROS DE LOS DETECTORES DE AGUA CHERENKOV

Parámetros	WCD1	WCD2,3
Material	plástico	Fibra de vidrio
Diametro(m)	1.4	2.2
Altura del agua(m)	1.4	1.5
Volumen agua (lts)	2000	5000
Coef. transparencia agua $t$	0.8	0.8
polvo Amino-G	si	si(wcd2),no(wcd3)
Superficie reflectante	Tyvek	Lona vinilica
Coef. de reflexión pared $t$ (PM)	9353KB 8'	9353KB 8'
Linealidad (Volt. Divider)	B	B
Eficiencia cuantica(PM) $Q_E$	0.3	0.3
Ganancia	$10^6$	$10^6$
Amplif. último dinodo	20	20

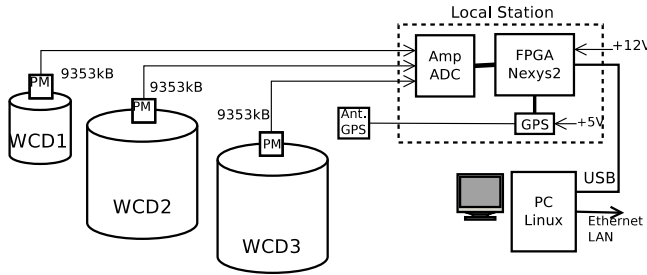


FIG. 1.— Tanques de agua y equipo electrónico del experimento LAGO en Chacaltaya

pulso, es decir como un osciloscopio de tres canales en el que dispara cualquier señal que sobrepase la línea base.

Por otro lado se continúa usando los tres detectores Cherenkov, WCD1, WCD2 y WCD3, descritos posteriormente.

El experimento Lago de Chacaltaya Bolivia, forma parte de una red de detectores en varios países, Argentina, México, Venezuela, Perú, Colombia, Guatemala y Ecuador, bajo la Colaboración LAGO.

### 1.1. Detectores Cherenkov

Basicamente son tres tanques de agua, WCD1, WCD2 y WCD3 que suman un área frontal de  $9.3m^2$ , cada uno tiene un fotomultiplicador y tarjeta base con dos salidas de señal una del ánodo y otra señal amplificada que proviene del último dinodo, en la tabla 1 se resumen las características, en la figura 1 se describe la instalación en bloques, en la figura 2 se muestran la distribución y orientación dentro del ambiente con techo de calamina.

A continuación resumimos algunos cálculos descritos en Velarde *et al.* (2009).

Las paredes internas de los tanques usan materiales reflectantes de color blanco, Tyvek y lona vinilica cuyo coeficiente de reflexión fué medido usando un led violeta. El agua es filtrada, además para WCD1y2 se han agregado Amino-G, este polvo desplaza la longitud de onda (nUV a visible) y aumenta la sensibilidad del fotomultiplicador, conocido como 3-Amino-2,7-naftalenodisulfonato ácido de sodio, su

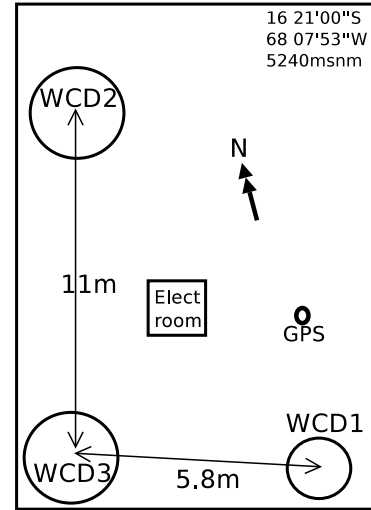


FIG. 2.— Distribución de los detectores WCD1, WCD2 y WCD3 a 5240msnm

fórmula es  $NH_2C_{10}H_5(SO_3H)$  (CAS Number 5332-41-2).

La ecuación utilizada para los fotoelectrones que llegan al fotomultiplicador es:

$$N_{fe} = N_{fot/cm} \cdot H \cdot Q_E \cdot \frac{A_{PM}}{A_{Tanq}} \cdot r \cdot t, \quad (1)$$

donde  $N_{fot/cm}$  es el número de fotones Cherenkov por  $cm$ ,  $H$  es la altura del agua,  $Q_E$  es la eficiencia cuántica,  $r$  la reflexión de las paredes y  $t$  el coeficiente de transparencia del agua.  $A_{PM}/A_{Tanq}$  es la relación de áreas del fotomultiplicador de 8" (20cm diámetro) con el área total del tanque, para el pequeño y grande son  $3.4 \times 10^{-3}$  y  $1.75 \times 10^{-3}$  respectivamente (la relación entre tanques es  $\approx 0.5$ ).

Para el número de fotones que se producen dentro del agua ( $N_{fot/cm}$ ) fue necesario realizar varios cálculos conocidos con el muón que atraviesa el tanque de forma vertical denominado Vertical Equivalent Muon (VEM) este valor es usado para calibrar el detector en energía. Los valores resultantes fueron:

- El muón pierde 2MeV/cm en agua
- Fotoelectrones Tanque chico :  $106f_e$
- Fotoelectrones Tanque grande:  $54f_e$
- Número de fotoelectrones producidos en agua: entre 200 a 250 por cm.

Los fotoelectrones se convierten en la carga que el fotomultiplicador entrega sobre una resistencia  $R$  en corriente. La corriente entregada por el fotomultiplicador desde el último dinodo sobre la resistencia es  $V_R = I \cdot R$  luego este tiene una amplificación de voltaje  $V = I \cdot R \cdot A$ . La corriente  $I$  es  $\Delta Q/\Delta T$ , con lo que el voltaje de salida que llegará al convertidor ADC ( $V_{ADC}$ ) está dado por:

$$V = \frac{N_{fe} \cdot 0.25 \cdot G \cdot qe^-}{T} \cdot R \cdot A. \quad (2)$$

Los valores correspondientes son: la ganancia del PM  $G = 10^6$ , la carga  $q = 1.6 \times 10^{-19}C$ , el tiempo para un fotoelectrón.  $T_{FWHM} = 6ns$ , la resistencia  $R = 50\Omega$  y la amplificación  $A = 20$ .

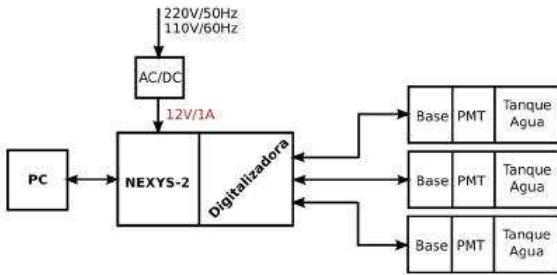


FIG. 3.— Partes de la nueva electrónica Lago2 (Arnaldi *et al.* 2011a)

Al construir los histogramas de carga para los tres detectores se determinaron que las jorobas corresponden al VEM, en canal para la energía de la partícula que produjo cada pulso, estos fueron:

- WCD1 canal  $315 \pm 20 = 280\text{MeV}$  con HV 1350V
- WCD2 canal  $273 \pm 20 = 300\text{MeV}$  con HV 1600V
- WCD3 canal  $197 \pm 20 = 300\text{MeV}$  con HV 1200V

El histograma de *peak* se construye en función al pico mas alto de cada pulso, relacionando en voltajes  $1\text{V}/1024$ , es decir que cada canal tiene  $1\text{mV}$ . en el caso de WCD1 VEM es  $280\text{MeV}$  corresponde a  $180\text{mV}$  hay una relación de 1.6 veces. Para WCD2  $300\text{Mev}$  en  $150\text{mV}$  con una relación de 2. Esto fue útil para ver la linealidad con un generador de pulsos.

### 1.2. Hardware de Lago2

La nueva Local Station esta construida en base a dos tarjetas y otros accesorios, una tarjeta es el digitizador y la otra es la Tarjeta FPGA Nexys2 (fabricante Digilent), al que se conectan también sensores de presión y temperatura. La tarjeta digitizadora tiene tres canales de entrada para la señal analoga (impedancia de 50 ohms), un amplificador y un conversor ADC de 10 bits con el rango de 0 a 1 V. y muestreo de 25 ns. Para control de alto voltage de los fotomultiplicadores se tiene tres controles; uno via DAC y dos via PWM (Pulse Width Modulation), los tres generan el voltaje necesario de 0 a 2.5V ( ó 0 a 5V).

La tarjeta FPGA de Nexys2 opera a 40 Mhz, se comunica via USB, se carga el programa *lago.xvf* y arranca de inmediato. Al comunicarse via USB2 se alcanza hasta 400 Mbits (aproximadamente 40 Mbytes).

En la figura 3 se observa el conjunto de los componentes indicados y en los artículos Arnaldi *et al.* (2011b) y Arnaldi *et al.* (2011a) se describen el uso.

En un computador se recolectan los datos enviados por la Local Station y se crea un archivo horario.

### 1.3. Software de Lago2

Esta electrónica viene con un nuevo software para adquirir datos “lago” y otro para procesar “process”, ambos desarrollados en C++, estos son diagramados en las figuras 4 y 5.

Observamos que el programa *lago* usado como comando *lago -f CHA* realiza la tarea de recibir datos mientras esté en operación. También tiene otras opciones previas, tanto para elegir el trigger y el alto

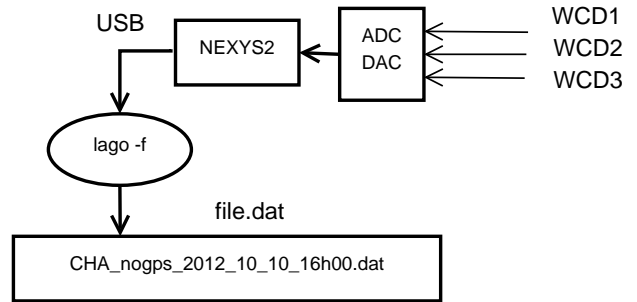


FIG. 4.— Etapas del programa de adquisición de datos daq

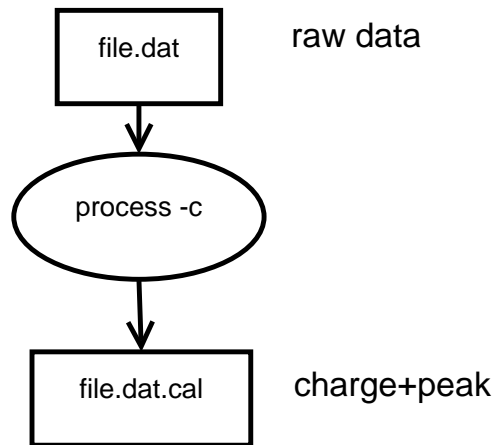


FIG. 5.— Programa de análisis de datos genera histograma de charge y peak

voltaje de cada canal, (ver anexo E ). Genera uno de los archivos de salida horaria *file.dat* (sin GPS o con GPS respectivamente)

- *CHA\_nogps\_2012\_10\_10\_00h00.dat*
- *CHA\_2012\_10\_10\_00h00.dat*

Estos files contienen información secuencial de los pulsos, y otros parámetros como la temperatura y la presión con identificadores únicos.

El segundo archivo es el “process”, éste toma como entrada el *file.dat* que fué la salida anterior clasifica y genera un archivo de salida *file.dat.cal*, este archivo tiene seis columnas que contienen datos para construir histogramas de *charge y peak*; al graficarlos se observa la distribución de carga y de pico [Pulse Hight Distribution (PHD)] de cada detector.

Se espera que partiendo de estas informaciones *file.dat* y *file.dat.cal* cada grupo pueda generar otra información útil destinado al estudio de los GRB.

El *file.dat* es extenso (del orden de gigabytes) y no es posible guardar aún comprimido, por lo que debe ser borrado. Antes de borrar se hace correr otro programa para clasificar las sumatorias cada 5 ms en 7 canales de discriminación *scalers*, el programa se llama *lagoS.c* y el archivo de salida es *file.datS*.

## 2. PRUEBAS

En el computador con sistema linux se hace correr el programa *lago* con los argumentos que determinan las acciones paso a paso, estos son:

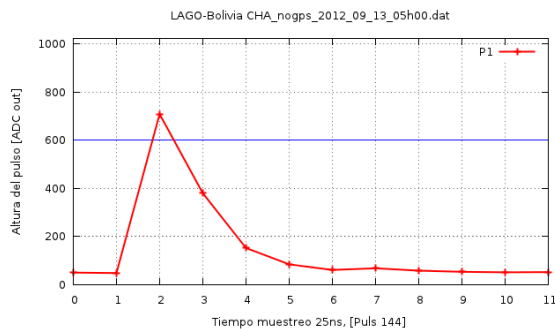


FIG. 6.— Muestreo del pulso cada 25 ns

```

lago -x lago.xsvf Programa el FPGA
lago -s t1 70 Coloca el trigger de canal
                  1 en 70
lago -s hv1 1350 Selecciona alto voltaje (HV) de
                  WCD1 en 1350V
lago -f CHA Inicia adquisición y graba
                en file.dat
                CHA_2012_08_10_12h00.dat
                CHA_nogps_2012_08_10_12h00.dat
  
```

Para detener el proceso se interrumpe con *ctrl+C*. Cada hora se crea el archivo de salida *file.dat*. En el archivo de salida se observa el registro de 12 datos que tienen el siguiente formato:

```

50 52 51
8 49 51
709 51 52
380 53 51
152 47 53
84 50 50
61 47 49
68 53 48
58 48 53
53 47 49
51 50 51
52 51 48
# t 1 2294066
# c 200815953
  
```

Se trata de un pulso iniciado por el canal 1 que esta conectado al detector cherenkov WCD (u otro detector o simplemente a un generador de onda).

El intervalo del muestreo es 25 ns, resulta 300 ns en total, observemos 12 muestras, luego dos líneas que inician con marcas “#”, la marca de *# t 1 2294066* corresponde al trigger del canal, al final el tiempo del GPS, *# c 200815953* corresponde al contador de eventos o triggers. La línea base está por defecto en 50, eso implica que los pulsos deben estar arriba de este valor, y los tres canales están al rededor de este umbral.

El pulso del canal 1 alcanza el máximo del pico al valor 709; este valor está dentro de los límites del ADC de 10 bits de 0 a 1024. La forma del pulso se muestra en la figura 6

Cuando se tienen tres detectores como en Chacaltaya, se presenta el mejor caso cuando hay coincidencia entre los tres detectores. El resultado será como en la figura 7, correspondiente a los siguientes datos.

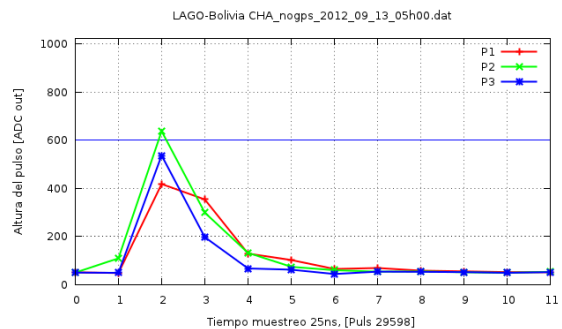


FIG. 7.— Pulsos en coincidencia de tres detectores cherenkov

```

51 50 50
48 109 49
418 638 537
354 299 197
129 132 67
102 74 62
65 60 44
69 54 54
58 55 53
55 51 52
52 49 49
51 53 52
# t 7 16231005
# c 200845539
  
```

Para poner en operación el experimento, se realiza una serie de calibraciones para la correcta interpretación de los datos, estas son: la amplificación de la señal analógica, la línea base, el plateau, la selección del alto voltaje, la selección del trigger, la cantidad de datos por segundo (el rate), el análisis de las señales, el registro de datos final, el manejo de los datos, el control del proyecto, la publicación de datos brutos en la web, etc.

### 2.1. Características

Resumimos algunas características para proseguir con la calibración:

Frecuencia de Operación	40 Mhz
Tiempo de muestreo	25 ns
Amplificación	2
Voltaje línea base	50 mV
Señal en ADC	2*Vin+50 mV
Rango ADC 10 bits	1V (0 a 1023 mV)
Sensibilidad DAC	1 mV
Rango DAC 10 bits para HV	0 a 5 Vdc
Transmisión de datos	Via USB2
Velocidad de Transmisión	400 Mbits (40 MBytes)
Eventos máximos de 250B	160K eventos

### 2.2. Trigger

El valor del trigger que se seleccione, debe ser mayor a la línea base. Según el esquema del circuito, la línea base está seleccionada por defecto en 50 mV. Si el trigger seleccionado está cerca de la línea base, se tiene un rate mayor y por tanto, el archivo es muy grande, si está lejos de la línea base el rate y

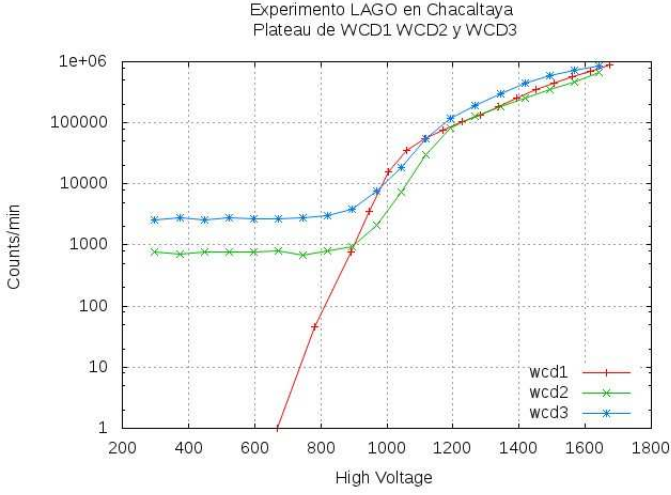


FIG. 8.— Plateau para WCD1, WCD2 y WCD3.

el archivo son menores, esta es una ley de potencias proporcional a la energía.

### 2.3. Alto Voltaje

Un fotomultiplicador funciona con un alto voltaje, éste voltaje lo proporciona un convertor DC-DC controlado por un bajo voltaje inserto en la tarjeta base. El voltaje de control está en el rango 0~2.5 V y se obtiene 0~2000 V (la relación es de 800), El voltaje de control es la salida de un convertor DAC. Para activar este voltaje se usa el comando *lago -s hv1 1350*, donde 1350 es el voltaje esperado  $V_i$ . En la práctica este voltaje sufre una modificación, expresado como un factor multiplicativo; para ambos canales tenemos:

$$HV_{wcd1} = 1.115 \cdot V_i \quad (3)$$

$$HV_{wcd2} = HV_{wcd3} = 0.746 \cdot V_i \quad (4)$$

Esta relación es usada para construir el plateau, la obtención de estos factores se redacta en anexo D

### 2.4. Plateau

Como primer paso construimos el plateau, tomamos en cuenta dos aspectos: el trigger y el alto voltaje. En este caso dejamos el trigger constante mientras variamos el alto voltaje, incrementando en 50 voltios para construir la tabla para corridas de un minuto; a estos valores los multiplicamos por los coeficientes para obtener el alto voltaje real sobre el fotomultiplicador. Con esto construimos la curva que se presenta en la figura 8. Se observan tres pendientes, a partir de 1200 voltios es la pendiente del plateau ya que no incrementa rápidamente. Complementando con el histograma elegimos el voltaje apropiado.

## 3. HISTOGRAMAS DE AJUSTE

Se construyen dos tipos de histogramas: uno de picos y otro de carga, (*peak* y *charge*) para tiempos de un minuto. Eligiendo el voltaje en la zona del plateau, graficamos el histograma. En él se observa

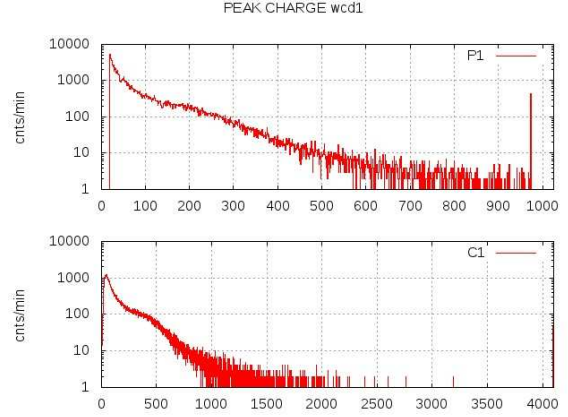


FIG. 9.— Histograma de pico y carga para WCD1.

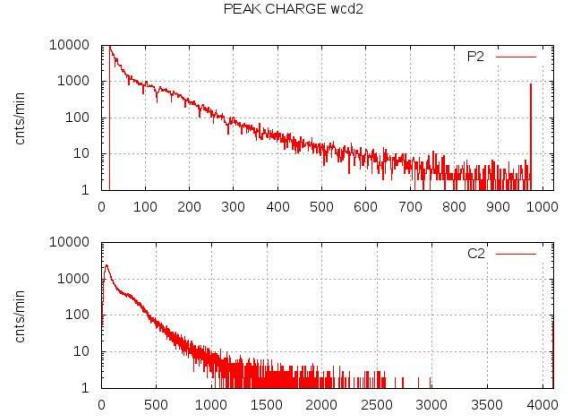


FIG. 10.— Histograma de pico y carga para WCD2

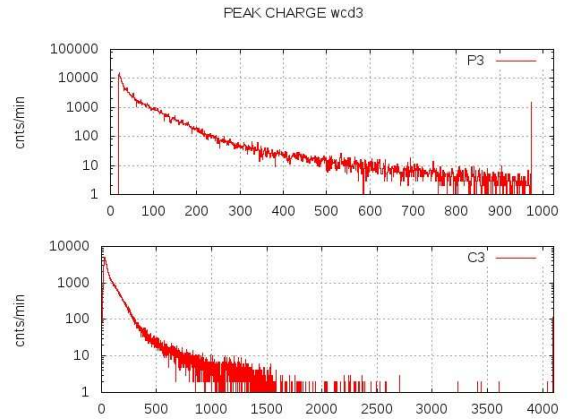


FIG. 11.— Histograma de pico y carga para WCD3

la joroba representativa del VEM. En la figura 9 se presenta el comportamiento del WCD1.

La curva del peak refleja los voltajes de pico para cada pulso de entrada, el rango es de 0 a 1 V para el convertor Análogo digital (ADC) de 10 bits. En binario corresponde entre 0 y 1023 canales, corresponde a la sensibilidad de 0.977 mV, el que redondemos a 1 mV/canal.

La curva de carga representa la integral de cada

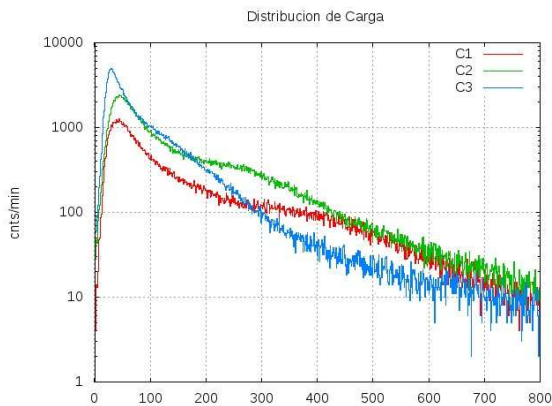


FIG. 12.— Histograma de carga la joroba corresponde al VEM, WCD1 425, WCD2 272, WCD3 200

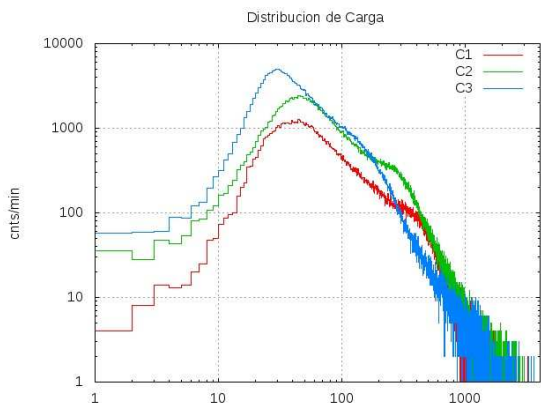


FIG. 13.— Histograma de carga (log log) para precisar el cambio de pendiente del VEM, WCD1 425, WCD2 272, WCD3 200

pulso y representa la energía de la partícula. En el pico de la joroba está la energía mínima depositada por el muón que atraviesa el tanque, esta joroba no es tan pronunciada como a nivel del mar, puesto que a mayor altura existen menos muones y mas electrones.

De igual forma, para los detectores WCD2 y WCD3 se muestran en las figuras 10 y 11. Se observa que tienen diferentes comportamientos, en WCD2 existe la joroba y en WCD3 se manifiesta debilmente. De todas formas, para la calibración se requieren estos gráficos.

Con la intención de comparar las curvas de carga se grafican, en la figura 12, el rango visible dentro de las jorobas, también se grafica en escala log-log fig. 13 para ver si existe cambio de pendiente, y efectivamente se observan en los tres, además se destaca la primera joroba correspondiente a los electrones.

De esta forma con el plateau y el histograma se han elegido los valores de, alto voltaje, y el correspondiente promedio al minuto y segundo, para determinar los VEMs (ver tabla 2).

### 3.1. Cuentas (Rate de scalers)

En la tabla 2 se presenta el rate del WCD2 que tiene valor cercano al WCD3, mientras que el rate del WCD1 es la mitad de WCD2 debido a la pro-

TABLA 2

AJUSTE SEGÚN PLATEAU, EL CANAL VEM DEL HISTOGRAMA DE CARGA

Parametro	WCD1	WCD2	WCD3
HV esperado	1150	1900	1800
HV fotomultiplicador	1280	1417	1342
trigger	70	70	70
Cuentas tot. $N_{tot}(\text{min})$	135764	257324	299422
Rate (seg)	2340	4361	5162
Energía muón (MeV)	280	300	300
VEM (canal de carga)	425	272	194
VEM (canal peak)	220	175	125

porcionalidad de áreas de cada detector. El rate de WCD3 es algo mayor que WCD2, pero está dentro de lo esperado. Este rate responde también al trigger de 70, para los tres detectores está alejado en 20 de la línea base. El alto voltaje también esta dentro el rango esperado.

En las pruebas, al tratar de acercarse al trigger a la línea base de 50 se observó que el tamaño del archivo horario crece exponencialmente, algunos datos experimentados son:

trigger	file(bytes/hora)
55	30 Gb
60	10 Gb
70	5 Gb
80	4 Gb
100	100 Mb
150	9 Mb
160	6 Mb

Está claro que para un trigger de 55, estamos a 5 canales de la línea base, equivalente a 5 mV. En la entrada del ADC tendremos 55 mV, los tres canales generaran aproximadamente 30 Gbytes/hora. Por esto el análisis demora mas de media hora en el computador.

En consecuencia, se ha elegido el trigger de 70 y se obtiene entre 5 y 6 Gbytes hora, el proceso de analizar toma como 10 minutos.

## 4. PROGRAMAS ADICIONALES

Como se indicó anteriormente se obtiene los resultados en dos archivos, el *file.dat* es enorme si el trigger está cerca de la línea base, pero inevitablemente esa es la tendencia para buscar GRB. Este archivo que alcanza varios Gigabytes por hora, presenta problemas al almacenar incluso en forma comprimida; por esta razón el análisis debe ser inmediato para luego guardar el resultado y borrar el *file.dat*. Estos análisis comprenden: Scalers, Sigmas, GRB, Charge, Peak, Forbush y otros, además de otras facilidades como graficos diarios para control via internet.

En este sentido se han confeccionado cuatro programas, dos para análisis y dos para gráficos. Los de análisis desarrollados en C++ como *lagoS* permite crear los *Scalers* (cada 5 ms) y el *calib* horario como archivos patrones. El programa *lagoSseg* permite reducir los *Scalers* a sumatorias por segundos, minutos y horas. Estos serán apropiados para crear

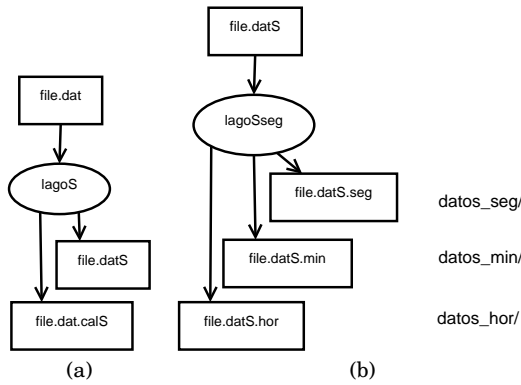


FIG. 14.— Flujogramas de programas que Construye: (a) Scalers e Histogramas, (b) Datos temporales de minutos y horas.

gráficos temporales de forma simple. Estos programas en forma de esquema se presentan en la figura 14.

El Scaler para 5 ms tiene una particularidad, se han dispuesto 7 niveles de discriminación para diferenciar 7 niveles de energía (en MeV para los muones). Suponiendo que el rango binario del ADC de 10 bits es de 0 a 1023 (equivalente de 0 a 1000 mV), los umbrales se eligieron: 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 500 por encima de la línea base. En el mismo archivo se incluyen los rates de trigger t1, t2, t3, t4, t5, t6 y t7 del archivo original *file.dat*.

En consecuencia el formato de *file.datS* es de 29 columnas: tiempo(ms) *7ch1 7ch2 7ch3 7trigg* y se conservan los demas comentarios que inician con #, por lo que el tiempo del GPS forma parte del archivo, así como las presiones, temperaturas y otros.

A continuación como ejemplo se presenta cuatro strings del archivo *CHA\_2013\_04\_09\_00h00.datS* con las cuentas para los tiempos 5, 10, 15, y 20 ms, del segundo 1365465600 correspondiente el GPS.

```
# x h 00:00:00 09/04/2013 1365465600
5 7 7 6 3 2 1 0 16 16 15 11 7 1 0 33 33 33 13 8 1 0 7 16 0 33 0 0 0
10 9 9 9 4 3 2 0 11 11 11 5 3 1 0 26 26 25 12 5 1 0 9 11 0 26 0 0 0
15 5 5 5 4 3 0 0 23 23 22 9 5 3 0 21 21 21 9 3 1 1 5 23 0 21 0 0 0
20 15 15 15 8 4 2 1 28 28 24 10 9 4 1 22 22 22 9 7 3 0 15 28 0 22 0 0 0
```

En vista de que será borrado el *file.dat* se crea también el *file.dat.calS* en semejanza al generado por el *process*.

Posteriormente, el *file.datS* es comprimido con *gzip*. Por esta razón previamente se hace correr el programa *lagoSseg* para crear los archivos temporales reducidos a *file.datS.seg*, *file.datS.min*, *file.datS.hor*. Estos se pegan a un solo archivo diario con el comando *tar*, para luego ser movidos a diferentes directorios.

Este es el proceso de operación en Chacaltaya, y se han creado varios scripts que son llamados desde *crontab*; además cada fin de hora corre el script *comprimir.sh* como se detalla en anexo F.

Al terminar el día en el tiempo universal (horas 20:00 en Bolivia) se realizan los resúmenes en gráficos estos gráficos se almacenan en un directorio de graficos. Finalmente se envía al servidor para ver

TABLA 3  
CUENTAS AL SEGUNDO PARA CADA SCALER EN UN DÍA DE OPERACIÓN

disc.	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7
umbral.	5	10	20	50	100	200	500
WCD1	2310	2310	2227	1228	726	314	30
WCD2	4440	4440	4283	2280	1327	430	58
WCD3	5116	5116	4893	2254	1047	318	76
trigg.	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7
	2241	4330	23	5011	18	58	27

TABLA 4  
DISPERSIÓN PARA CADA DETECTOR Y COINCIDENCIAS EN UN DÍA DE OPERACIÓN

disc.	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7
umbral.	5	10	20	50	100	200	500
WCD1	79.2	79.2	76.9	47.7	32.7	19.4	5.6
WCD2	135.0	135.0	130.8	76.5	50.3	23.3	7.8
WCD3	154.8	154.8	148.6	77.0	42.7	19.7	8.9
trigg.	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7
	77.3	132.0	4.9	151.9	4.3	7.7	5.3

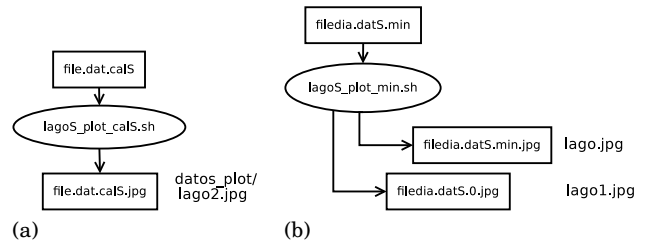


FIG. 15.— Flujogramas de programa de ploteos: (a) calS, (b) temporal diario.

lo sucedido desde cualquier otro sitio remoto.

En el siguiente cuadro se incluyen los promedios al segundo de un día de operación: los siete discriminadores d1..d7 para WCD1, WCD2, WCD3, y los siete triggers t1..t7.

Revisando d1 a d7 existe una disminución exponencial, que es lógico por que corresponde a la sumatoria que incluye hasta el máximo del histograma de carga. Es decir que para *d4* correspondiente al umbral 50 (100 mV), se suman las cuentas del canal 100 a 1023. Habiendo seleccionado el trigger a 70 correspondiente a *d3*, los *d1*, *d2* y *d3* debieran ser cercanos.

En t1 a t7 se observa las cuentas individuales: t1, t2, t4 correspondientes a WCD1, WCD2, WCD3, t3 t5 t6 t7 que corresponden a las coincidencias entre los detectores.

### 5. GRÁFICOS

Los datos básicos, generados por los archivos *lagoS* y *lagoSseg* son 5, muestran las variaciones temporales. Como se indicó anteriormente, se han construido tres programas graficadores, estos son útiles principalmente para controlar la buena operación del experimento los flujogramas se presentan en la figura 15.

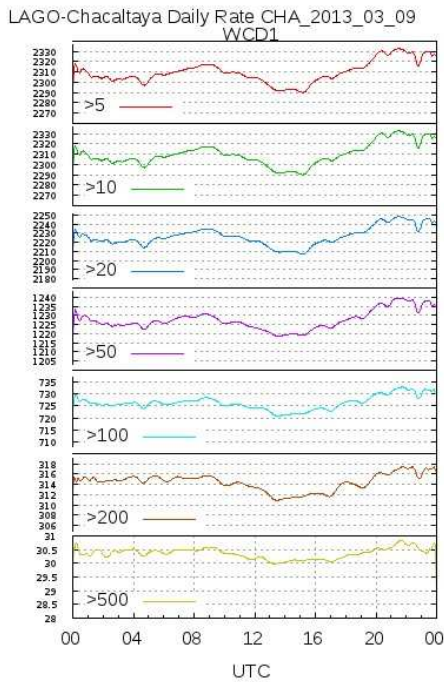


FIG. 16.— Rate de WCD1 para 7 niveles

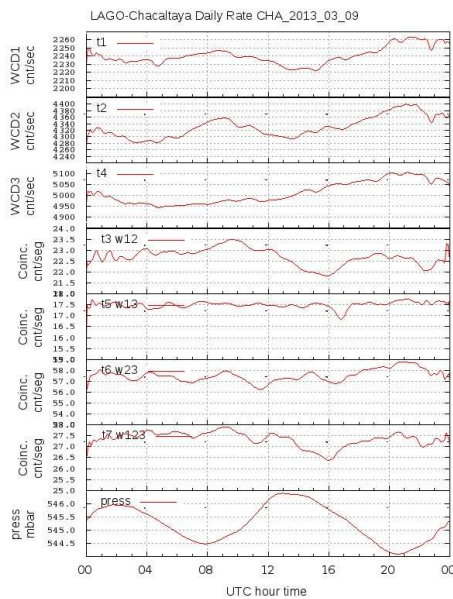


FIG. 17.— Rate de triggers de WCD1, WCD2, WCD3, coincidencias y presión

5.1. Información en internet

La UMSA logró instalar internet en Chacaltaya y opera con regularidad a partir del año 2013. La acción inmediata fue construir la página web *www.chacaltaya.umsa.bo*, en la que se han incluido gráficos con datos brutos de todo los experimentos en rayos cósmicos. Con estos graficos públicos, se controla la operación, se supervisa y se planifican acciones desde cualquier punto. Posteriormente en esta página explicaremos detalles de cada experimento.

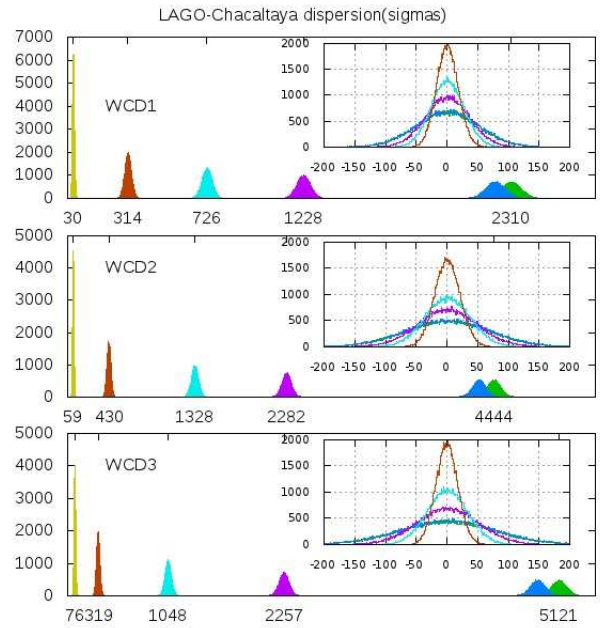


FIG. 18.— Distribución de sigmas

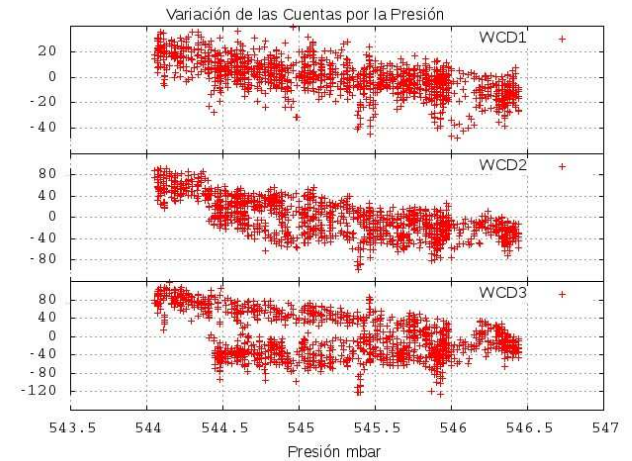


FIG. 19.— Variación de las Cuentas Vs. Presión para WCD1, WCD2 y WCD3 para el mismo día de corrida, muestra la anticorrelación en los tres detectores.

6. RESULTADOS

La operación del equipo comienza oprimiendo una tecla que activa el programa *lago.sh* desde pantalla.

Cada hora se analiza el *file.dat* de salida con el programa *comprimir.sh* activado automáticamente en crontab, este crea el *file.datS*, y *file.dat.calS*.

Cada fin de día a horas 20:00:00 se construyen gráficos a minutos y horas, los gráficos de minutos se publican en la web.

Al incorporar esta nueva electrónica, se vio que WCD1 y WCD2 operan bien, mientras que para WCD3 se realizó el mantenimiento correctivo desde el cambio de agua, hasta la tarjeta base.

Se obtuvieron nuevamente, los plateaus de cada detector. Se han adoptado otros valores de voltajes de operación. Se construyeron los programas necesarios para clasificar en 7 umbrales cada 5 ms y poder ob-



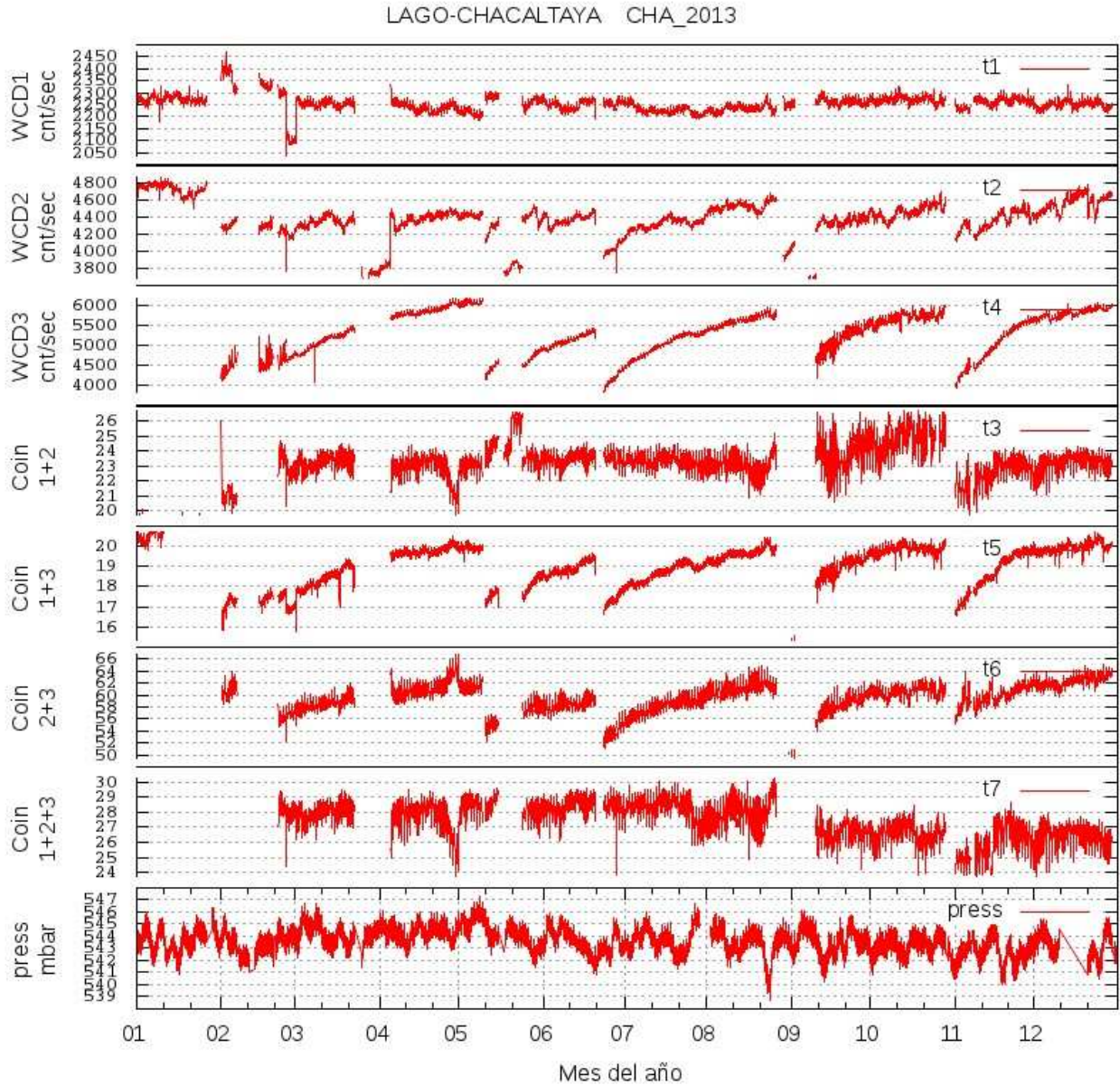


FIG. 20.— Variación temporal anual de cuentas al segundo: WCD1, WCD2, WCD3, coincidencias WCD1y2, WCD1y3, WCD2y3 y WCD1,2y3. La inferior corresponde a la presión en mbar

servar muones con energías entre 5 MeV a 1 GeV, que podrían reportar la detección de posible GRB mayores a 1 GeV.

Se ha estabilizado la adquisición de datos y LAGO2 está en operación generando datos de conteos diarios en files de 200 Mbytes.

En la figura 16 se incluye el gráfico suavizado del rate diario de WCD1 con sus 7 niveles de discriminación con la finalidad de ver la variación en todo los niveles.

En la figura 17 se observa la variación diaria de WCD1, WCD2, WCD3 y las coincidencias WCD1+2, 1+3, 2+3, 1+2+3 mas la variación de la presión, los cuales son promediados al segundo, y corresponden con la media de la tabla 3. Podemos afirmar que los tres detectores funcionando con mínima dispersión,

en la figura 18 se incluyen las dispersiones para los 7 umbrales, a la derecha está el mas bajo ( $> 5$ ) con mayor sigma y a la izquierda el mas alto ( $> 500$ ) con menor sigma. En dicho gráfico se incluye un acercamiento sobrepuesto de las distribución gaussiana y estos están dentro del orden esperado como se muestra en la tabla 4 que sirve como referencia.

En el rate de un día, figura 17, la última curva representa la variación de presión, que compara con las demás curvas presenta una anticorrelación. Esto se observa con mayor claridad en la figura 19 (corresponden al umbral de 20) para los tres detectores. En este comportamiento el WCD3 presenta alguna diferencia, que se debe posiblemente a la falta de algún ajuste o corrección.

Se incluye, en el gráfico de la figura 20, el compor-

tamiento de un año completo, se observa que WCD1 permanece dentro del margen de estabilidad, mientras que WCD2 y WCD3 son sensibles pero presentan un incremento, del tipo exponencial a lo largo del tiempo, posterior a cada reiniciar el equipo. En 30 días WCD3 se incrementa el 37.5% de cuentas (1.25% día para caso lineal). En el caso de WCD2 lo propio 12.5% de incremento (0.42% día).

Finalmente se incluyen tres gráficos figuras F1, F2 y F3 que se presentan en la página web, esto para monitoreo. La elaboración se realiza al finalizar el día, estos gráficos contienen datos brutos sin suavizar.

Con la finalidad de ver si se observa eventos de Forbush como el sucedido el 14 de abril 2013 se incluye el gráfico F3 del mes de abril de 2013, se observa que los tres detectores presentan una variación importante que se inicia el día 14 y dura más de dos días. Para el análisis de esta variación exclusiva se está redactando un artículo.

#### 7. CONCLUSIONES

El experimento Lago en Chacaltaya, en esta fase, opera desde septiembre de 2012 y regularmente desde marzo de 2013 con tres detectores Cherenkov, en las mismas condiciones.

El umbral elegido es de 70 para los tres detectores, generando archivos horarios de 6 Gbytes que luego

del análisis son borrados quedando otro archivo con sumas a 5 ms de 8 Mbytes. Por día se almacena a 200 Mbytes más otro archivo de histogramas de 1.4 Mbytes.

El promedio del rate al segundo es de  $1150/m^2$  para trigger a 5 ms equivalente a 20 mV y  $580/m^2$  para 50 mV. Las coincidencias t3, t5, t6, t7 en la figura A y según la tabla 18 corresponderían a un arreglo de t5 este-oeste con 18 cuentas, t6 norte-sur con 58 cuentas, y t7 coincidencias tipo chubasco con 27 cuentas.

Las energías VEM para cada detector según la carga y de la tabla 2:

- WCD1 canal 425 para 280MeV HV 1280
- WCD2 canal 272 para 300MeV HV 1417
- WCD3 canal 200 para 300MeV HV 1342

En las figuras mensuales y anuales, se observa que WCD1 presenta cuentas casi constantes al rededor del rate con un sigma de 30. Presenta variación temporal en anticorrelación con la presión que varía el 1.8% diario. Para WCD2 y WCD3 de igual forma se tiene sigma de 50 y variación del 2% ante la presión.

En WCD2 y WCD3 lo destacable con la nueva electrónica es el incremento paulatino de cuentas de un día a otro 0.42% y 1.26% respectivamente. Este efecto parece ser por incremento de alto voltaje causado por el modo PWM usado en estos canales.

#### REFERENCIAS

Arnaldi H., Bertou, X. & Sofu M. (2011)a, *Data analysis of the high bandwidth LAGO Electronics* (Centro Atómico Bariloche)

Arnaldi H., Haro M. S. & Asorey H. G. (2011)b, *Lago Oficial Electronic guide, Electrónica LAGO:Guía de Conexión de Hardware Interfaces LAGO, New Lago Electronic Getting Started* (Centro Atómico Bariloche)

Velarde A., Ticona R., Miranda P., Rivera H. & Quispe J. (2009), *Revista Boliviana de Física* **15**, 32

## APÉNDICE

## A. LAGO2 INSTALACIÓN

Los pasos para la instalación de la tarjeta electrónica Nexyx2 y la digitizadora:

Usamos la información solicitada a la colaboración LAGO en Bariloche (Arnaldi *et al.* 2011b) contiene detalles importantes para la operacin y las primeras pruebas. Aún así fueron necesarias otras aclaraciones. Las pruebas se realizaron en el laboratorio de rayos C3smicos del IIF en La Paz Bolivia.

- El Computador sistema linux
- Instalar el programa compilado *lago* en PC.
- Habilitar a usuario acceso a USB.
- Conectar PC-Nexys2 con cable USB.
- La tarjeta digitizadora contiene jumpers que se deben seleccionar.
- Conectar tarjeta digitizadora y Nexys2 -En Nexys2 el switch 7 en ON.
- En Nexys2 el jumper 9 en JTAG
- En Nexys2 el jumper 7 de power en Wall.
- Alimentar a Nexys2 con fuente externa de +12V dc.
- En Nexys2 el push button 1 es usado para restituir los triggers.

*lago -x lago.xsvf.*

Observar que los leds en Nexys2 muestran su nuevo comportamiento, (LD0 ON). Luego se inicializan los niveles de trigger con:

*lago -s t1 100*

Se selecciona el alto voltaje del fotomultiplicador:

*lago -s hv1 1350*

Finalmente se corre el programa que recibe datos. *lago -f CHA.*

Para iniciar con la recepci3n de se1al conectar alguna se1al a la entrada de uno de los tres canales, la se1al puede ser de *detector* o de *generador de pulsos*, como indicio los leds3, 4 y 5 se vuelven intermitentes.

Una vez iniciado, los datos se graban en el archivo *CHA\_2013\_03\_09\_12h00.dat*, autom1ticamente con la fecha y hora extraida del PC.

En nuestro caso el PC opera en linux Suse 11.4, mientras que las recomendaciones del readme que viene en el software de la tarjeta son para Ubuntu, es decir, no son totalmente compatibles, pero bajando via internet el ejecutable o compilando en otro PC con Ubuntu, se logra el programa *lago* puesto que este utiliza drivers de USB que proporciona la Nexys2 lo que hace que la comunicaci3n sea exclusiva.

En los scripts del anexo E se observan retardos *sleep 10*, estos son usados para una correcta toma de datos, el caso especial es la puesta de HV de WCD2 y WCD3 controlados por la t3cnica usada PWM, le toma varios segundos comenzando de cero hasta alcanzar el alto voltaje elegido.

## B. HABILITACI3N NEXYS2

Habilitar a usuarrrio el acceso a USB y comunicarse con Nexys2. Se realiza creando el archivo */etc/udev/rules.d/52-nexys-usb.rules* con el siguiente contenido en una sola linea.

```
SYSFS{idVendor}=="1443", MODE="666" ACTION=="add", SYSFS{idVendor}=="0403", SYSFS{manufacturer}=="Digilent", MODE="666", RUN+="/usr/local/sbin/dftdrvdtch %s{busnum} %s{devnum}"
```

## C. CORRIDA

En los scripts E y F se resumen las acciones autom1ticas para la corrida del experimento *lago*. El script E inicializa y pone a operar creando archivos horarios, el script F es corrido cada hora activado por el *crontab*, el trabajo principal es hacer correr el programa de an1lisis *lagoS* (similar al programa *processmas scalesrs*) y luego borra el archivo horario \*.dat por ser grande. El resto de los scripts son para crear archivos de segundos, minutos, horas y gr1ficos.

## D. FACTOR PARA ALTO VOLTAJE

La relaci3n entre el voltaje seleccionado en el argumento del comando (*lago -s hv1 1350*) y el voltage en el photomultiplicador, se vi3, que no es directa debido a que en el canal 1 usa DAC y en los canales 2 y 3 genera voltaje mediante PWM, por tal raz3n, fue necesario construir una tabla de relaci3n entre el voltaje que se selecciona y el voltaje que entrega el DAC para el alto voltaje del photomultiplicador. En la tabla D, se apunta el resultado, tomando en cuenta que la tarjeta base del photomultiplicador tiene un regulador dc-dc que opera de 0 a 5V y sale de 0 a 2000 V, tambien contiene un amplificador de 2 dentro de la tarjeta base con lo que la entrada se reduce al rango 0 a 2.5 V equivale 0 a 2000 V, es decir una relaci3n de 800. Cuando el voltaje de entrada exede a 2.5 V la salida se sostiene en el m1ximo de 2000 V.

TABLA D1

EQUIVALENCIA DE VOLTAJE SELECCIONADO Y ENTREGADO POR EL HARDWARE

$HV_{esperado}$	Vdac1	HVwcd1	Vdac2y3	HVwcd2y3
200	0.29	231	0.18	148
500	0.71	562	0.46	373
1000	1.39	1115	0.93	744
1200	1.67	1336	1.12	968
1210	1.68	1350	1.3	1125
1500	2.08	1668	1.4	1120
1800	2.49	2000	1.68	1344
1900	2.63	2000	1.77	1416
2000	2.77	2000	1.86	1488
2200	3.05	2000	2.05	1640
2500	3.46	2000	2.34	1874

De este cuadro obtenemos los factores *1.115* y *0.746* indicadas en las ecuaciones (3) y (4), para seleccionar el correcto alto voltaje (ejemplo: *lago -s hv 1 1210* selecciona 1350 V por el canal 1 y 1125 V por el canal 2 3.), 3sto indica que el argumento introducido en el comando ser1 modificado seg1n la tabla D o la curva en la figura D1.

## E. LAGO.SH

```
#!/bin/sh
if ps h -C lago
then
```

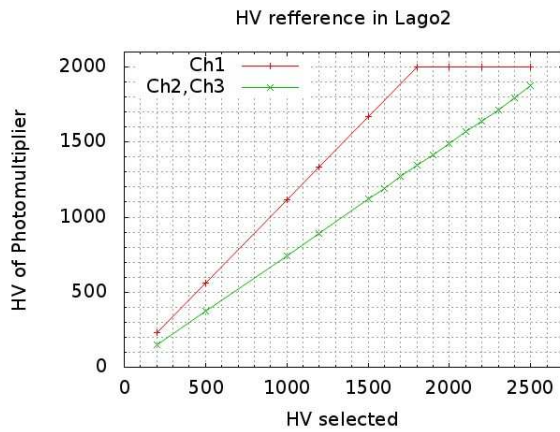


FIG. D1.— Relación de voltaje entrada salida

```

echo "El programa lago ya esta corriendo"
exit
fi
cd /home/lago/lago2/lago/
./lago -x lago.xsvf
echo "sleep 5 seconds" ; sleep 5
./lago -s t1 70 ; sleep 1
./lago -s t2 70 ; sleep 1
./lago -s t3 70 ; sleep 1
./lago -s hv1 1150 ; sleep 1
./lago -s hv2 1900 ; sleep 1
./lago -s hv3 1800
echo "sleep 10 seconds Setting High Voltage" ; sleep 10
./lago -a

echo "sleep 15 seconds to run and HV setup from PWM" ; sleep 15
echo "RUN LAGO2 !!!"
while true
do ./lago -f CHA
done

```

## F. COMPRIMIR.SH

```

#!/bin/sh
## comprimir.sh scripts para manejo de files bruto de Lago
## P.Miranda, Lago2 sep-2012
[ "$#" == "1" ] && [ "$1" == "-h" ] && {
  echo "Programa de scripts para comprimir datos brutos de LAGO"
  echo "      sh comprimir.sh"
  echo "      sh comprimir.sh FileTipo.dat"
  exit
}

DIR=$HOME/lago2/lago
cd $DIR

hora='date +%Y_%m_%d_%Hh00.dat --date="+11800 sec"'
dia='date +%Y_%m_%d.dat --date="+11800 sec"'
mes='date +%Y_%m.dat'
lab=CHA_
file=$lab$hora; ! [ -r $file ] && lab=CHA_nogps_

[ "$#" == "1" ] && {
  Nl='expr length $1'
  let Nf=$Nl-19; let Nlab=$Nl-20
  lab='expr substr $1 1 $Nlab'
  hora='expr substr $1 $Nf 20'
  dia='expr substr $1 $Nf 10'.dat
  mes='expr substr $1 $Nf 7'.dat
}

file=$lab$hora
filedia=$lab$dia
filemes=$lab$mes
! [ -r $file ] && echo "El file No Existe: $file" && exit

./lagoS $DIR/$file
rm -f $DIR/$file

./lagoSseg $DIR/$file"S"
bzip2 $DIR/$file"S"

tar -rf $DIR/datos_zip/$filedia"S.bz2.tar" $file"S.bz2"
rm -f $DIR/$file"S.bz2"

tar -rf $DIR/datos_zip/$filedia".calS.tar" $file".calS"
rm -f $DIR/$file".calS"

cat $DIR/$file"S.seg" >> $DIR/datos_seg/$filedia"S.seg"
rm -f $file"S.seg"

cat $DIR/$file"S.min" >> $DIR/datos_min/$filedia"S.min"
rm -f $file"S.min"

cat $DIR/$file"S.hor" >> $DIR/datos_hor/$filedia"S.hor"

cat $DIR/$file"S.hor" >> $DIR/datos_hor/$filemes"S.hor"
rm -f $file"S.hor"

```

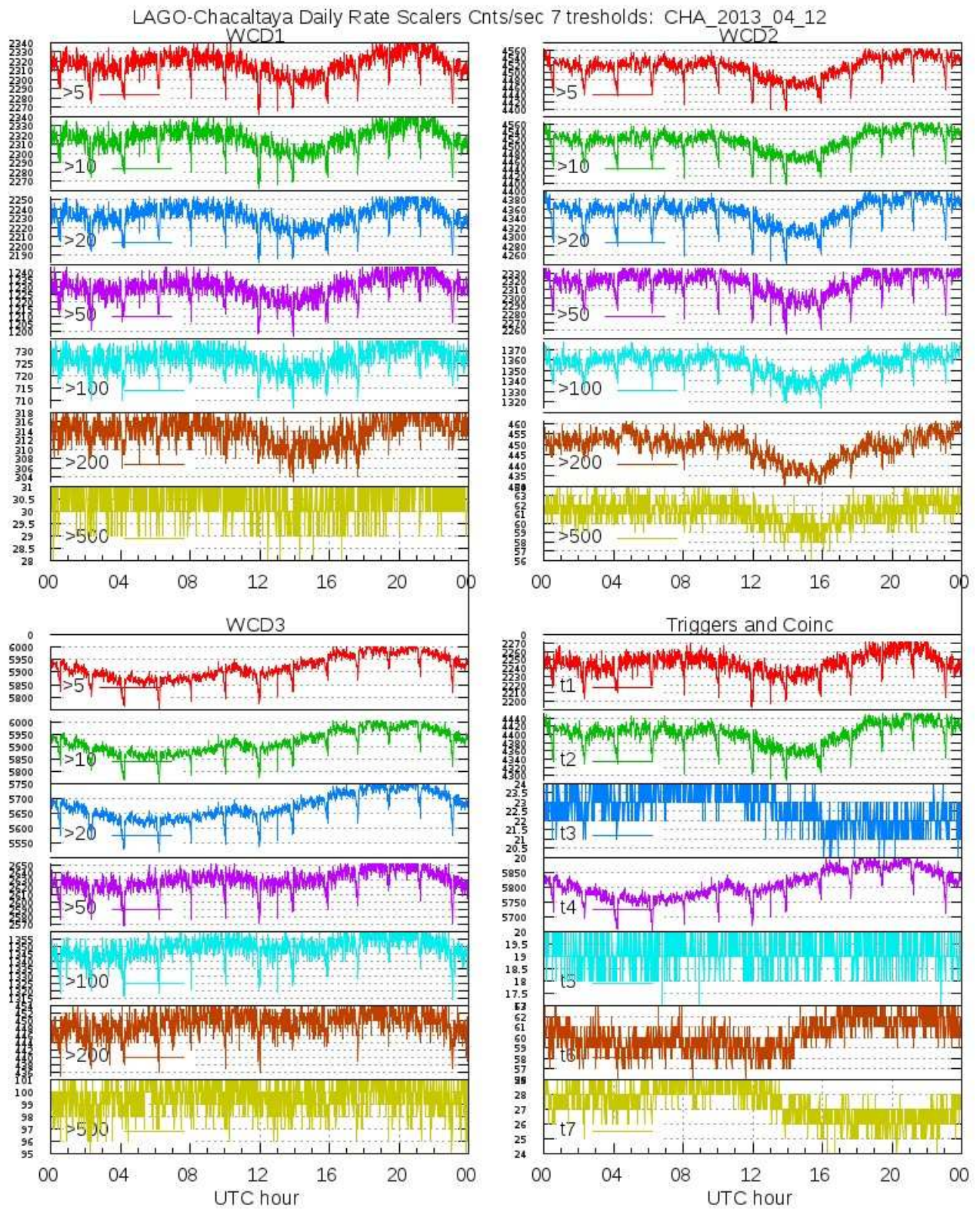


FIG. F1.— Variación temporal diaria en bruto para WCD1,WCD2,WCD3 para los 7 umbrales, y t1 a t7

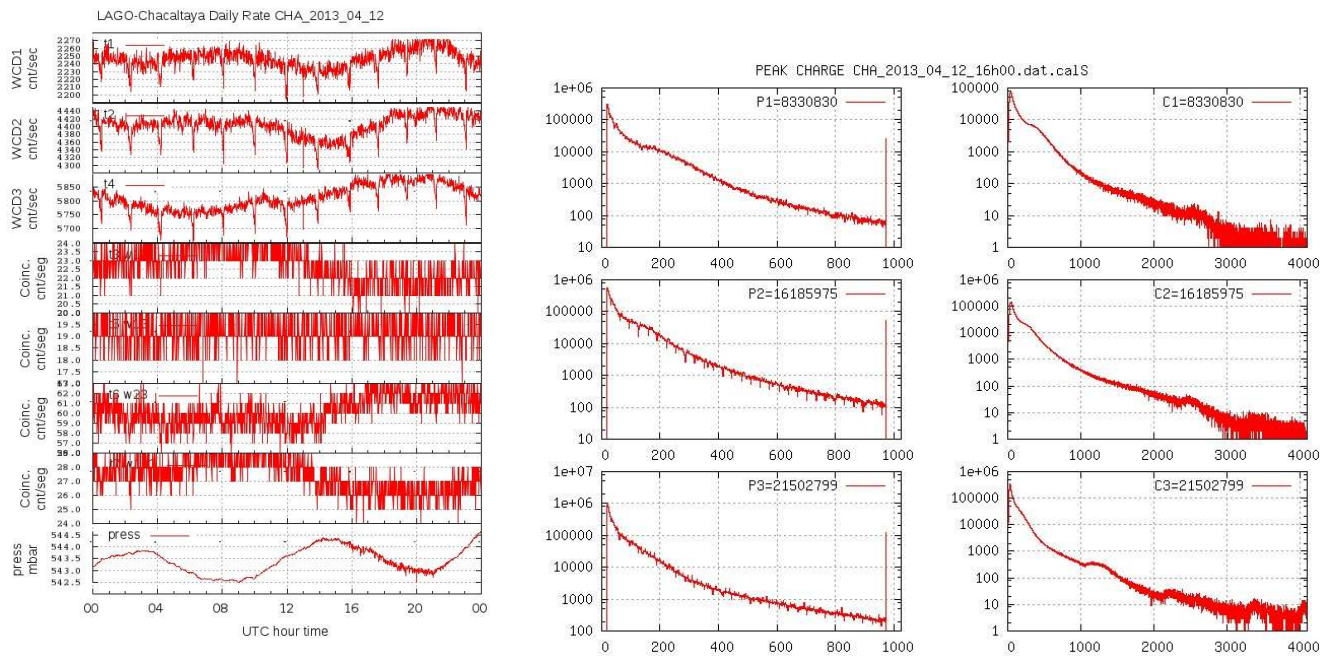


FIG. F2.— (izquierda) Variación temporal en detalle de datos brutos de un día, (derecha) Peak y Charge de una hora

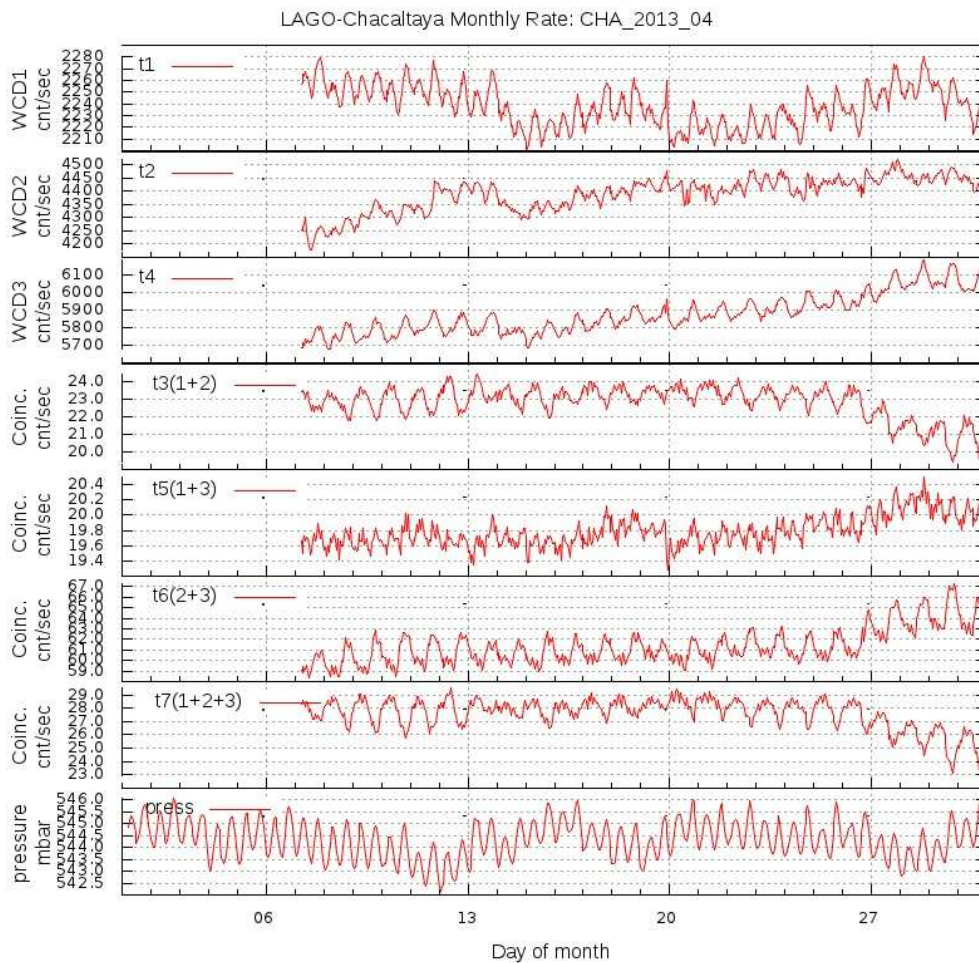


FIG. F3.— Variación temporal mensual