

Caracterización del sensor fotométrico del instrumento FOG

Octavio Cabrera Morrone*
Instituto Balseiro
Av. Bustillo 9500, CP 8400,
S.C. de Bariloche, Argentina
(Dated: 25 de junio de 2012)

En este trabajo se presenta una caracterización de un sistema digital de detección de fotones de radiación uv presentes en destellos de luz de tiempos cortos comprendidos entre algunos ns hasta μ s. En esta caracterización se realizaron estudios de la electrónica asociada a los sistemas de adquisición de datos, como la calibración de conversores digital analógicos y medidas del consumo eléctrico del sistema.

Para realizar la detección de fotones se utilizó un tubo fotomultiplicador multianodo de 16 canales. Se realizaron diferentes mediciones colocando sobre el fototubo material centellador de manera de detectar el paso de muones. Se desarrollaron diferentes algoritmos para procesar las mediciones e identificar el paso de estos.

Con las mediciones obtenidas se realizó un estudio de las correlaciones existentes entre diferentes píxeles, dado que se observó que la medición de un píxel podía perturbar la medición de los otros. Mediante un análisis estadístico se definieron índices que permitan cuantificar el grado de correlación y heterogeneidad existente entre diferentes píxeles del detector.

I. INTRODUCCION

El proyecto foca es un proyecto que nace con la motivación de medir destellos de luz muy cortos en frecuencia ultravioleta, estos destellos están emprendidos entre algunos ns hasta μ s. Estos se dan en muchos fenómenos de física de altas energías como en la interacción de rayos cósmicos con la atmósfera.

Se busca insertar un sistema de detección de fotones de dichas características sobre un proyecto ARSAT. Este implica realizar un sistema de medición capaz de ser montado en un satélite geostacionario que se encuentra apuntado aproximadamente sobre Kito (capital de Ecuador). Este sistema observaría una amplia zona de la corteza terrestre que involucra tanto mar como tierra.

El sistema trabajado consta de un detector de 16 píxe-

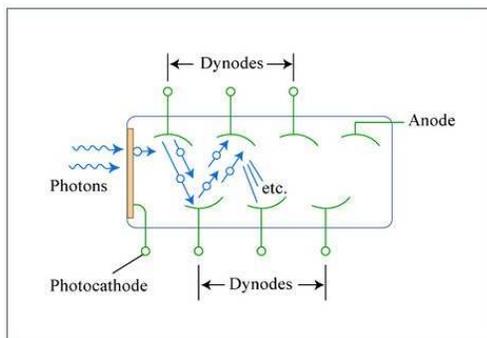


Figura 1: Diagrama general de un PMT (*Photo Multiplier Tube*).

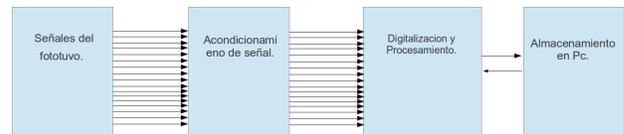


Figura 2: Representación en bloques del sistema de medición.

les. Esto quiere decir que en principio se dividirá la zona terrestre observada en 16 parcelas menores. Pudiendo identificarse los fotones provenientes de cada parcela.

Para realizar un sistema de monitoreo remoto es importante contar con una adecuada caracterización electrónica que permita asegurar su correcto funcionamiento. Mostraremos los resultados obtenidos al realizar esta caracterización que comprende entre otras una medida del consumo eléctrico del sistema. Es importante destacar que el sistema de medición que se tratara aquí será digital. Se realizará una breve introducción a los tipos de procesamientos que se podrían utilizar para realizar análisis de la información obtenida con el sistema y se mostrarán resultados obtenidos con estos. Comentaremos un análisis estadístico posible de realizarse para obtener índices que permitan cuantificar la sensibilidad relativa y correlación existente entre los diferentes píxeles del sistema de medición.

II. DESCRIPCION DE SISTEMA ELECTRONICA

El objetivo de este sistema es identificar fotones de frecuencia ultravioleta que incidan sobre diferentes píxeles del detector. Esto se traduce en identificar de una forma adecuada las señales de un detector PMT de 16 píxeles que sobrepasan un nivel prefijado de tensión que llamaremos en adelante Trigger (Tr). Estas señales al ser iden-

*URL: <http://www.ib.edu.ar>; Electronic address: tavicornu@hotmail.com

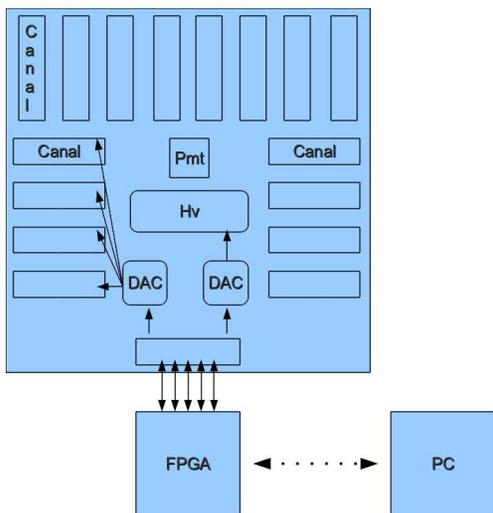


Figura 3: Esquema general del sistema de adquisición de datos.

2081	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
2082	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
47936	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
47939	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
47940	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47958	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
47961	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Figura 4: Formato de almacenamiento de la adquisición de datos en Pc.

tificadas por el sistema deben ser almacenadas en algún formato para pos procesamiento. Es decir, estamos ante un problema típico de adquisición de datos con la complicación de resolver intervalos de tiempo muy cortos (del orden de ns) complicando esto la electrónica a utilizar.

Para ilustrar como es el sistema electrónico a grandes rasgos podemos ver la Figura 2 donde mostramos los 4 bloques básicos que componen este sistema. El primer bloque representa el detector de 16 píxeles con sus respectivas 16 señales de salida. Estas entran a un segundo bloque de acondicionamiento de señal, en este las señales se amplifican y filtran. Luego de esto las señales acondicionadas entran a un bloque de digitalización y procesamiento. En este se comparan todas las señales con un mismo nivel de referencia (T_r) y las que sobrepasan este nivel tendrán un estado (1), de lo contrario (0). Luego, si existe al menos una señal con estado (1) se almacena el estado de todas las señales en un buffer. A esta situación denominaremos adquisición. Finalmente al llenarse este buffer se vacía de forma automática en una Pc.

Detector: El detector utilizado es un Hamamatsu H87A, este es de tipo PMT y de 16 píxeles. En la Figuras 5 y 6 se muestran respectivamente las dimensiones y una señal característica de un píxel al detectar un foton. De ahora en adelante llamaremos V_{hv} a la tensión de alimentación del detector.

Acondicionamiento de Señal: El acondicionamiento

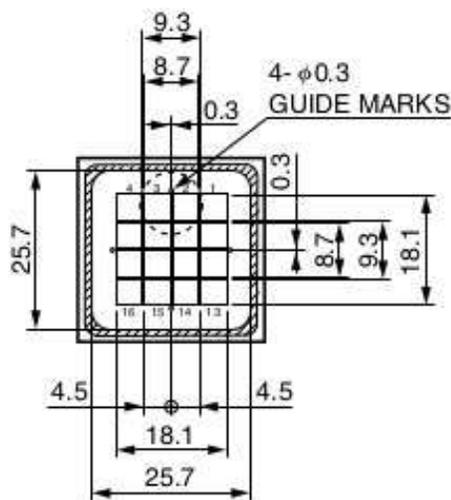


Figura 5: Dimensiones del detector Hamamatsu H8711. Todas las medidas se encuentran en mm.

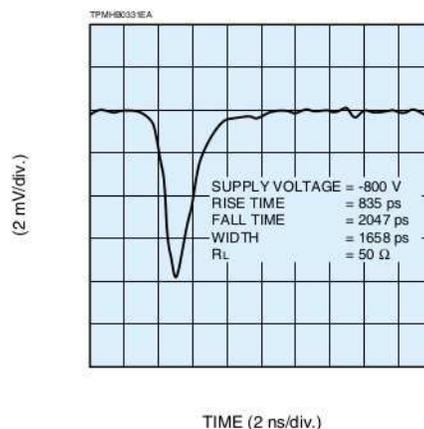


Figura 6: En la Figura se muestra una señal típica producida en una de las salidas del PMT.

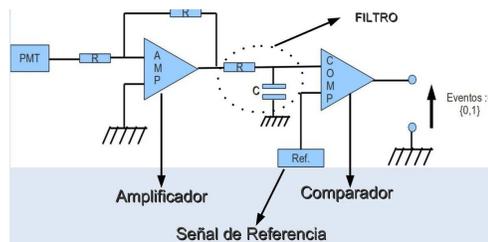


Figura 7: En esta figura se muestra la estructura de una canal para un píxel arbitrario. Un canal está constituido por un amplificador inversor un filtro pasa bajos y un comparador o discriminador. La salida de un canal puede encontrarse en estados 0 o 1 siendo que la señal a la salida del amplificador sea mayor o menor que en nivel de referencia (T_r) respectivamente.

to de señal de cada píxel se encuentra constituido por una etapa amplificadora y un filtro pasa bajos. La primera se encuentra implementada mediante un amplificador operacional y el filtro es de tipo RC.

Digitalización: La etapa de digitalización para cada píxel se encuentra implementada con un comparador. En la entrada de este se tiene el nivel de Trigger y la señal proveniente del detector. Al ser mayor la señal del detector que el nivel de Tr se obtiene un 1 lógico en la salida del comparador, de lo contrario se obtiene 0.

En la Figura 7 podemos ver los circuitos de amplificación y filtrado que constituyen el bloque de acondicionamiento de señal para un píxel arbitrario, también se observa el comparador que constituye la etapa de digitalización de este. A este circuito completo lo llamaremos Canal y existe un canal por píxel. Notemos que cada canal puede tener un estado de salida 1 o 0 siendo que se sobrepase o no el nivel de Tr.

Procesamiento: Esta etapa se encuentra constituida por una FPGA. Esta, en inglés "Field Programmable Gate Array," es un dispositivo que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada 'in situ' por el usuario mediante un lenguaje de descripción de hardware especializado. La lógica programable puede reproducir desde funciones tan sencillas como las llevadas a cabo por una compuerta lógica o un sistema combinatorial hasta complejos sistemas digitales.

La FPGA representa el pulmón de este bloque y realiza por el momento dos tareas en particular. En primer lugar es la encargada de almacenar los eventos exitosos en el buffer comentado anteriormente. Es decir, esta se encuentra testeando continuamente la salida de los 16 canales. Si al menos uno de ellos se encuentra en estado 1 se almacenan en el buffer el estado de los 16 canales. Luego, al llenarse el buffer la FPGA lo vacía en la Pc por medio de un puerto USB.

La otra tarea efectuada por la FPGA es controlar los parámetros de Tr y Vhv que son configurados por el usuario. Una vez que desde la Pc se envían estos parámetros, la FPGA coloca el valor de estos en respectivos convertidores digitales analógicos (DAC). La salida del DAC de Tr se encuentra conectada directamente al comparador del bloque de Digitalización. De otra manera la salida del DAC de Vhv se encuentra conectada a la entrada de ajuste de una fuente de alta tensión, esta entrada controla el valor de alta tensión proporcionado por la fuente.

Almacenamiento en Pc: Este bloque representa las tareas efectuadas por la Pc. Principalmente aquí se efectúan dos tareas, una de Entrada y otra de Salida. La tarea de Salida es la conflagración de los valores de Tr y Vhv. Aquí, la Pc le envía los parámetros a la FPGA del modulo de procesamiento. Luego la tarea de Entrada consta de adquirir los datos que envía la FPGA al vaciar su buffer y almacenarlos en un archivo de computadora bajo un formato útil para pos procesamiento. Para efectuarse la comunicación entre la Pc y la FPGA se utiliza un programa llamado Foca desarrollado por el grupo de Campos y Partículas del CAB (Centro Atómico

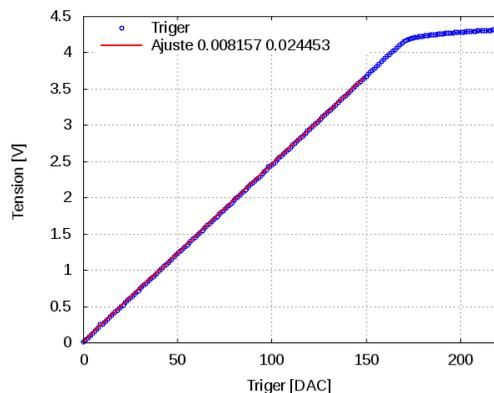


Figura 8: Calibración del DAC de trigger. En la figura se muestra el valor de tensión de salida del DAC como función del valor digital de entrada.

Bariloche).

El formato con el que se almacena la información adquirida por el sistema se muestra en la Figura 4. La primera columna representa una medida de tiempo proporcionada por la FPGA y las 16 columnas restantes representan el estado de cada píxel. Es importante destacar que cada fila de este archivo corresponde al haber obtenido al menos una señal que paso el nivel de trigger. Por lo que en una fila arbitraria se encuentran los estados de todos los píxel en un instante determinado y si o si tiene que existir un píxel en estado 1. El primer valor de una fila es el estado de un contador interno a la FPGA de 16 bit's. Este se incrementa cada 20ns.

Finalmente para terminar esta sección mostramos en la Figura 3 un esquema muy realista del sistema electrónico. En esta figura se muestran los 16 canales distribuidos en los tres de los cuatro lados de la placa con forma cuadrada. En el centro se encuentra el PMT junto a la fuente de alta tensión. También se esquematiza la FPGA comandando los dos DAC. Se puede observar como la salida de un DAC se encuentra conectada a los canales, este es el DAC que controla el nivel de trigger. El otro DAC se muestra conectado a la entrada de ajuste de la fuente de alta tensión, pues esta controla el valor de tensión en la fuente y esta a su vez alimenta al PMT.

III. CARACTERIZACION ELECTRONICA

A continuación en esta sección presentaremos los resultados obtenidos al realizar diferentes caracterizaciones del sistema electrónico anteriormente descrito. En primera instancia se obtuvieron las curvas de calibración de los DAC utilizados en el sistema electrónico. Calibrar un DAC implica obtener la curva que relaciona los valores digitales de entrada con valores analógicos de salida, esto se puede realizar enviando diferentes valores digitales al DAC y midiendo el valor de tensión obtenido en la salida de este. Luego con diferentes pun-

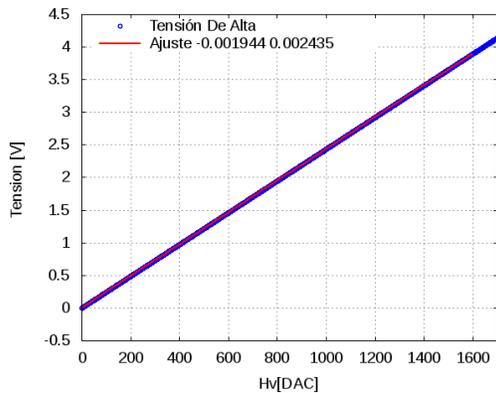


Figura 9: Calibración del DAC que controla Vhv. En la figura se muestra el valor de tensión de salida del DAC como función del valor digital de entrada.

tos obtenidos de esta manera se traza la curva que relaciona ambas variables. Para realizar estas calibraciones se desarrolló un programa que permitía aprovechando la interfaz existente entre la Pc y la FPGA configurar un barrido de valores digitales que se mandaba a la entrada de alguno de los DAC. Luego el programa en simultáneo controlaba un osciloscopio que medía los valores de tensión de salida del respectivo DAC y los guardaba en un archivo de computadora. Finalmente se obtuvo una tabla de valores en la cual para cada valor digital de entrada corresponde un valor de tensión de salida.

Este programa se ejecutó para calibrar tanto los DAC de trigger como los utilizados para controlar la tensión Vhv obteniéndose las Figuras 8 y 9 respectivamente.

En la Figura 8 puede observarse como para un valor de 170 DAC la curva de calibración que se esperaba recta comienza a disminuir su pendiente. Esta era una de las incógnitas que se deseaba contestar con esta medición, por esto la medición se realizó con tantos puntos y no con unos pocos sospechando que la curva de calibración era una recta, cosa que típicamente ocurre al calibrar un DAC. Se investigó esta pérdida de linealidad en la curva y se observó que esta se debía a un circuito de protección implementado en el sistema electrónico para impedir el paso de un valor determinado considerado peligroso. Este nivel de peligrosidad se atribuye al DAC que controla la alta tensión Vhv, pues al superarse un valor específico en esta tensión es posible dañar el PMT. Esta protección se identificó en una primera instancia para la calibración de los DAC de control de alta tensión. Por ello se realizó la calibración en el intervalo de tensiones no peligrosas. En cuanto a la calibración de trigger no se sabía como este circuito de protección afectaría al correspondiente DAC, pues esta protección se encontraba conectada a ambos DAC y no se sabía para que valor de trigger esta comenzaría a trabajar. Finalmente con esta calibración se determinó que el rango de trabajo en el trigger es de aproximadamente 0 a 4V, intervalo que se corresponde a la zona lineal del gráfico.

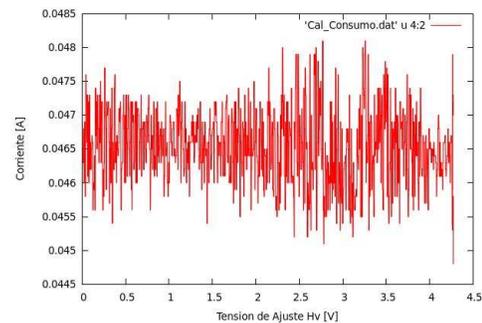


Figura 10: Calibración del consumo electrónico como función de la tensión de ajuste presente en la fuente de alta tensión. Este barrido en tensión de ajuste se corresponde con un barrido de Vhv desde 0V a 980V aprox.

Utilizando el mismo programa se realizó una medida del consumo electrónico como función de Vhv. El resultado de esta calibración se muestra en la Figura 10.

Utilizando el mismo programa se realizó una medida del consumo electrónico como función de Vhv. El resultado de esta calibración se muestra en la Figura 10.

Con esta calibración se pudo identificar que no existen fluctuaciones importantes en el consumo eléctrico al variar Vhv. Este es un resultado importante ya que al tratarse de un sistema remoto es importante conocer bien su consumo, y saber que se mantiene prácticamente constante simplifica su estudio y permite calcular una potencia de consumo. Siendo que el sistema se alimentaba con una diferencia de potencial de 30V la potencia de consumo resultó de $(1.38 \pm 0.07)W$. Se observó el consumo al apagar y encender el dispositivo y tampoco se obtuvieron fluctuaciones considerables a este valor de consumo. Finalmente la última calibración que se realizó fue comprobar que cada canal funcione correctamente. Esto se comprobó inyectando una señal cuadrada en la entrada de cada canal y midiendo la salida de este con un osciloscopio. Se observó que al inyectar esta señal a un canal solo se obtenían los estados correspondientes a la salida de este canal y no se filtraba ruido en los demás canales. De vioó que no había delay entre que la señal de entrada sobrepasaba el nivel de Tr y se obtenía un estado 1 a la salida de este canal.

IV. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y PMT

A continuación vamos a describir la caracterización que se realizó del sistema completo, es decir, del sistema electrónico ya calibrado con el PMT conectado a este. La idea de esta caracterización es tratar de probar el sistema completo. Si bien el sistema está focalizado a la medición de fotones de frecuencia ultravioleta, se adaptó el sistema para medir también partículas cargadas, principalmente muones. Esta adaptación se realizó principalmente con el

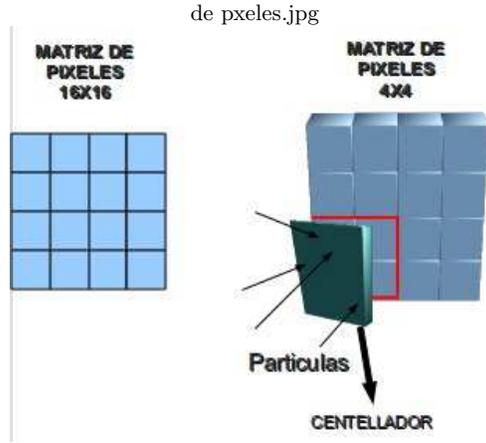


Figura 11: En la Figura se muestra como se colocaron los bloques de material centellador sobre la matriz de 16 píxeles

objetivo de simplificar las condiciones en las que se iba a probar el sistema completo, es decir PMT mas sistema de adquisición. Pues si queremos medir fotones es necesario adentrar el sistema en una cámara oscura donde se pueda controlar una mínima cantidad de luz para no quemar el PMT.

Se desean obtener mediciones para comenzar a entender como varía la adquisición del sistema en función de los parámetros Tr y V_{hv} . Esto es muy importante ya que para realizar una medición particular que nos permita buscar algún fenómeno físico, probablemente necesitemos conocer que valor de Tr es chicoz cual "grande". Para esto necesitamos hacer un estudio de como varía el sistema completo en función de estos parámetros. También es de interés analizar que procesamientos son posibles realizar y que información puede obtenerse a partir de ellos.

Para poder observar partículas cargadas como muones con el detector es necesario poner en el frente de este un material centellador. Este tiene la propiedad de excitar los estados electrónicos en su interior al ser atravesado por una partícula cargada, y luego al decaer estos, lo hacen emitiendo fotones. Luego estos fotones son los que entran al detector comenzando el ciclo de adquisición.

En la Figura 11 se muestra como se colocó el material centellador sobre el frente del PMT. Puede verse que no se colocó en un solo bloque sino en cuatro, donde cada uno de estos cubre cuatro píxeles. Dando como resultado un análogo detector de cuatro píxeles como se muestra en la Figura 17. La idea de colocar el material centellador en cuatro bloques se debe principalmente a facilitar la identificación de muones. Esto se debe ya que en caso de atravesar un muon uno de los 4 bloques centelladores los cuatro píxeles que se encuentran debajo deberían medir la llegada de fotones. De esta manera sería mas fácil identificar muones inmersos en ruido proporcionado por diferentes fuentes. Pues ante la llegada de un muon deberían encontrarse practicamente todos los píxeles debajo del bloque que fue atravesado en estados 1.

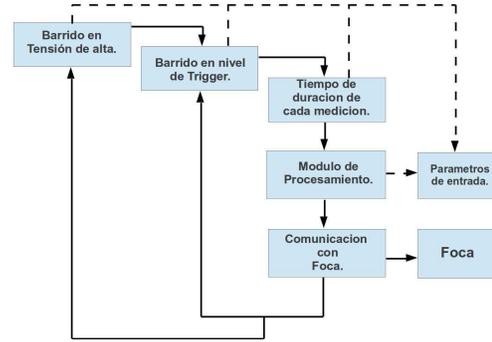


Figura 12: Diagrama representativo del programa desarrollado para realizar mediciones. En este se muestran los cuatro parámetros de entrada que el usuario controla. Barrido en H_v y Tr , tipo de procesamiento y duración de la medición. El bloque de comunicación con foca es una parte del programa que se comunica con el programa Foca para enviar los parámetros de Tr y V_{hv} a la FPGA. Luego esta se encargará de guardar las adquisiciones en un buffer y vaciar este en la Pc

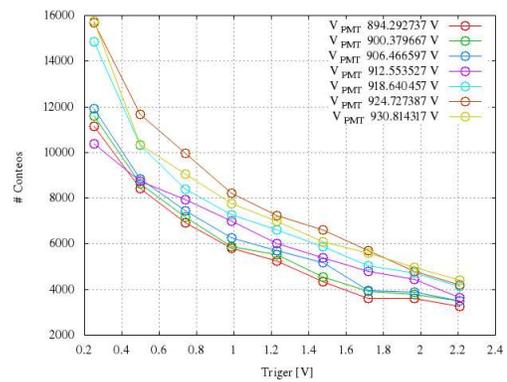


Figura 13: Datos medidos durante 10min con el algoritmo Conteo de M Eventos para $M = 1$. Con diferentes colores se muestran diferentes valores de V_{hv}

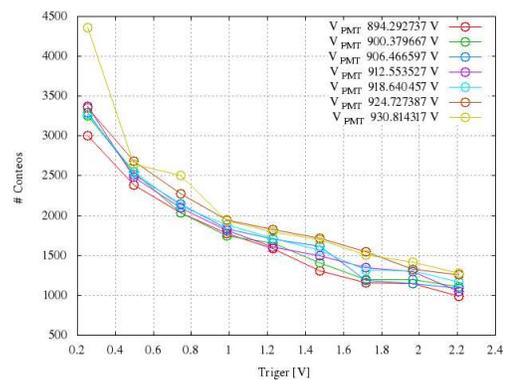


Figura 14: Datos medidos durante 10min con el algoritmo Conteo de M Eventos para $M = 4$. Con diferentes colores se muestran diferentes valores de V_{hv}

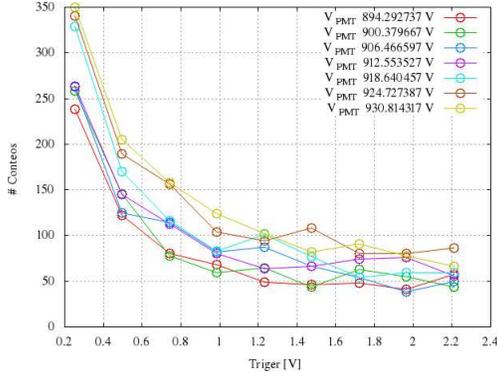


Figura 15: Datos medidos durante 10min con el algoritmo Cascada para $M = 4$ y $N = 2$. Con diferentes colores se muestran diferentes valores de V_{hv}

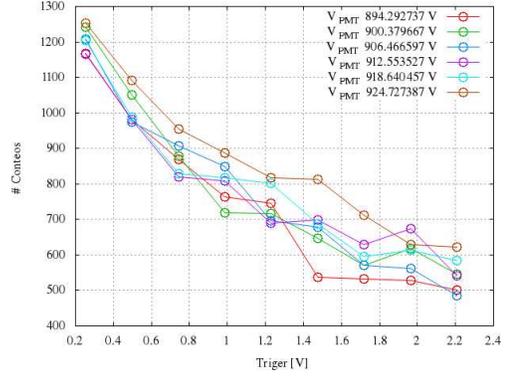


Figura 18: Datos medidos durante 10min con el algoritmo Cokie. Con diferentes colores se muestran diferentes valores de V_{hv}

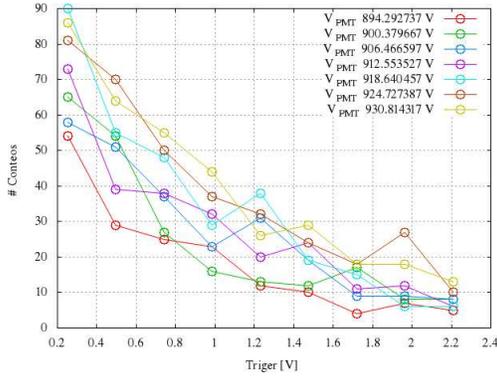


Figura 16: Datos medidos durante 10min con el algoritmo Cascada para $M = 4$ y $N = 3$. Con diferentes colores se muestran diferentes valores de V_{hv}

Para poder efectuar las mediciones anteriormente comentadas se desarrolló un programa capaz de realizar mediciones múltiples de forma automática. El diagrama en bloques de este programa se muestra en la Figura 12. En este se seteaban diferentes parámetros de entrada y luego el programa se encargaba de realizar las mediciones pertinentes. Estos parámetros se muestran en la figura como barrido en tensión de alimentaron del PMT (V_{hv}), nivel de trigger (Tr), tiempo de duración de la adquisición y tipo de procesamiento. Para los parámetros

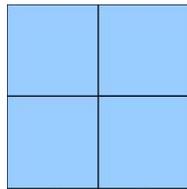


Figura 17: Detector de 16 píxeles cubierto con 4 bloques de material centellador, dando lugar a un análogo detector de 4 píxeles

de Tr y V_{hv} el usuario ingresaba al programa los intervalos de estos donde desea efectuar mediciones. Puede verse en la Figura el arreglo de bucles anidados donde se ve como primero se efectúa un barrido en el intervalo elegido para V_{hv} y para cada punto de esta se realiza un barrido en Tr . Entonces tenemos que para cada valor de V_{hv} y Tr se efectúa una medición con una duración y procesamiento establecido. La duración es el tiempo en que el sistema esta adquiriendo, es decir el PMT esta midiendo. Al terminarse los barridos de V_{hv} y Tr se obtenía en una carpeta seleccionada un conjunto de archivos donde cada uno tenia la adquisición correspondiente a cada par (V_{hv} , Tr). El formato de estos archivos es el comentado anteriormente y mostrado en la Figura 4.

Aun no hemos descrito el parámetro de Procesamiento, este es optativo y puede ser no utilizado. Mediante este parámetro el usuario puede elegir diferentes tipos de algoritmos preestablecidos para aplicar a las adquisiciones y al terminar estas no solo se obtenían los archivos comentados anteriormente sino también un solo archivo con el procesamiento seleccionado. Típicamente se miraba este archivo por su simplicidad, pero siempre se tenía el respaldo de todos los otros archivos con las adquisiciones sin procesar, con estos era posible rastrear datos o realizar distintos algoritmos en la marcha del análisis.

Dentro de los diferentes procesamientos preestablecidos fueron tres los mas utilizados. En primer lugar describiremos el algoritmo Conteo de M Eventos. Este consistía en contar cuantas veces para cada nivel de V_{hv} y Tr al menos M píxeles obtuvieron el evento 1 simultáneamente, es decir cuantas veces las señales de al menos M píxeles pasaron el nivel de Tr . Obtener M píxeles con evento 1 simultáneos se refleja a obtener en un archivo de adquisición para un dado nivel de Tr y V_{hv} M unos en una fila del archivo. Por ejemplo, en la Figura 4 en la tercer fila tenemos 9 eventos 1 simultáneos.

Seleccionando el algoritmo Conteo de M Eventos y tomando como tiempo de duración 10 min se obtuvieron curvas como las mostradas en las Figuras 13 y 14 donde estas corresponden al procesamiento con dicho algoritmo

para $M = 1$ y $M = 4$ respectivamente. En estas se indica el conteo realizado con este algoritmo como función del nivel de Tr. Las curvas de diferente color indican diferentes niveles Vhv.

En primer lugar es notable observar como a medida que el Tr aumenta el conteo baja. Esto es de esperar ya que si el nivel de Tr aumenta, menos señales entregadas por el PMT pasaran este nivel.

Otro de los algoritmos utilizados para el procesamiento de datos es el llamado Conteo Cascada. Este se basa en contar cuantas veces para cada nivel de Tr y Vhv ocurrieron al menos M eventos 1 simultáneos en N adquisiciones consecutivas absolutas. La consecutividad absoluta de dos adquisiciones esta dada por dos adquisiciones consecutivas que verifiquen tener el valor de Conteo Temporal (primera columna en el formato de almacenamiento) incrementado en uno. Esto se refleja en el formato de adquisición utilizado (ver Figura 4) en tener N filas consecutivas que verifican tener la primer columna incrementada en uno y donde cada fila tiene al menos M eventos 1. Por ejemplo, en la Figura 4 podemos ver para $M = 1$ y $N = 2$ tenemos un conteo dado por las primeras dos filas y otro dado por la cuarta y quinta. Ambas son consecutivas absolutas y cada una tiene al menos un evento tipo 1.

Con este procesamiento se obtuvieron las Figuras 15 16 que corresponden ambas a valores de $M = 4$ con $N = 2$ y 3 respectivamente.

El ultimo de los algoritmos utilizados que vamos a describir corresponde al denominado Conteo Cokie. Este consiste en contar cuantas veces ocurre que los cuatro píxel que se encuentran debajo del mismo bloque centellador tienen simultaneamente estados 1. Es decir si la Figura 17 representa los cuatro bloques de material centellador colocados sobre el detector, el conteo se realiza de esta manera sobre cada grupo de píxeles que se encuentra debajo de cada bloque.

Con este algoritmo se obtuvieron gráficas como la mostrada en la Figura 19.

V. ANALISIS

En esta sección trataremos algunos análisis estadísticos que se realizaron sobre el sistema de medición. Estamos interesados en encontrar índices estadísticas que permitan analizar heterogeneidades en el detector y correlaciones existentes entre dos píxeles arbitrarios. A continuación veamos como interpretar estos conceptos de heterogeneidad y correlación. La heterogeneidad en el detector nos indica en cierta forma píxeles que miden mas que otros. Dado que la radiación incidente sobre el detector es en promedio uniforme, deberían obtenerse para tiempos largos de medición conteos practicamente iguales en diferentes píxeles. De no ser así existe alguna heterogeneidad constructiva en el detector o en la electrónica que facilite la medición por parte de algunos píxeles mas que otros. Por ejemplo, podría ocurrir que si el factor de

amplificación de cada canal en el acondicionamiento de señal correspondiente a la salida de cada píxel fuera diferente se obtengan píxeles mas sensibles que otros. También podrían existir fuentes localizadas de ruido que afecten a un grupo del píxeles particulares. Esto se descarto ya que se observo la misma heterogeneidad colocando el detector en diferentes orientaciones. Luego el concepto de correlación nos indica una medida de que tanto el estado de un píxel influye sobre el estado de otro.

Para un dado valor de trigger y una dada tension de alimentacion en el detector tenemos una lista de N adquisiciones ordenados en el tiempo ($N \gg 1$), cada una dada por un arreglo ordenado de 16 bits. Llamemos $s_{i,n}$ al estado del bit i en la adquisicion n : $s_{i,n} \in \{0,1\}$ para $i = 1, \dots, 16$ y $n = 1, \dots, N$. Queremos definir medidas de correlación entre los estados de diferentes bits. Los valores medios temporales de cada bit son,

$$\bar{s}_i = N^{-1} \sum_n s_{i,n}, \quad (1)$$

y sus correspondientes desviaciones estándar,

$$\sigma_i = \sqrt{N^{-1} \sum_n (s_{i,n} - \bar{s}_i)^2} = \sqrt{\bar{s}_i - \bar{s}_i^2}. \quad (2)$$

La última igualdad vale porque, en nuestro caso, $s_{i,n}^2 = s_{i,n}$ para todo i y n .

La medida de correlación que consideramos es

$$C_{ij} = (N\sigma_i\sigma_j)^{-1} \sum_n (s_{i,n} - \bar{s}_i)(s_{j,n} - \bar{s}_j), \quad (3)$$

para todos los pares i, j . C_{ij} mide la correlación entre los bits i y j a un dado tiempo: si C_{ij} es positivo (negativo) los bits i y j tienden a estar simultáneamente en el mismo (en distinto) estado. $C_{ii} = 1$ para todo i , y $C_{ij} = 0$ para $N \rightarrow \infty$ si los bits i y j están descorrelacionados. Para N finito y bits descorrelacionados tenemos $C_{ij} \sim N^{-1}$, de modo que este valor puede usarse como umbral para decidir si los valores empíricos de la correlación son significativos.

Veamos que podemos representar todas las correlaciones en una matriz C de 16x16 donde el elemento C_{ij} representa la correlación entre los píxel i e j . Veamos que esta matriz es simétrica y de diagonal 1. Pues los elementos C_{ii} son identicamente 1 y $C_{ij} = C_{ji}$.

Para calcular la matriz C de correlación se desarrolló un programa que realizaba el análisis estadístico descrito anteriormente. Antes de ejecutar este programa para alguna medición en particular se eliminaban todas las adquisiciones consecutivas absolutas de la medición, de manera de eliminar posibles contribuciones al estudio estadístico dadas por mini lluvias muonicas. De no se eliminar estas adquisiciones existe una fuerte correlación entre los grupos de píxeles que se encuentran debajo de cada bloque centellador. Esto se debe a que el paso de un muon por uno de los bloques centelladores provoca la medición de la mayoría de los píxeles que se encuentran debajo de este.

1.0	0.0742	-0.007	0.0254	0.0233
0.0742	0.9999	0.0256	0.0668	0.0517
-0.007	0.0256	1.0	0.0447	-0.004
0.0254	0.0668	0.0447	0.9999	0.0283
0.0233	0.0517	-0.004	0.0283	1.0

Figura 19: En la figura se ilustra parte de la matriz de correlación obtenida para los valores de $Tr = 30$ Dac y $V_{hv} = 1530$ Dac.

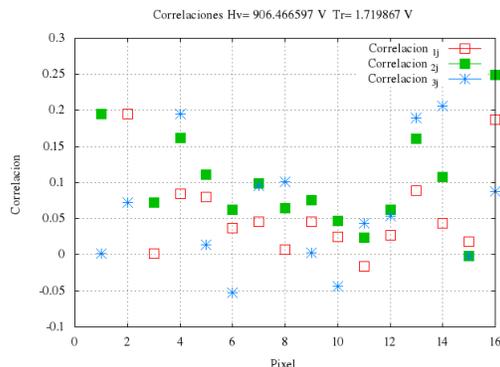


Figura 20: En la Figura se representan con distintos colores las correlaciones obtenidas entre un píxel arbitrario i con los restantes píxeles para una $V_{hv} = 1530$ Dac

Una vez realizado esto se obtuvieron las matrices de correlación para diferentes valores de Tr y V_{hv} . En la Figura ?? se ilustra una parte de la matriz de correlación para valores de $Trigger = 30$ Dac y $V_{hv} = 1530$ Dac, podemos ver que se verifica $C_{ii} = 1$ y $C_{ij} = C_{ji}$.

Las Figuras 20, 21, 22, 23 y 24 representan con diferentes símbolos las correlaciones obtenidas entre un píxel arbitrario y los restantes. Es importante destacar que los valores de correlación presentados pasan en gener-

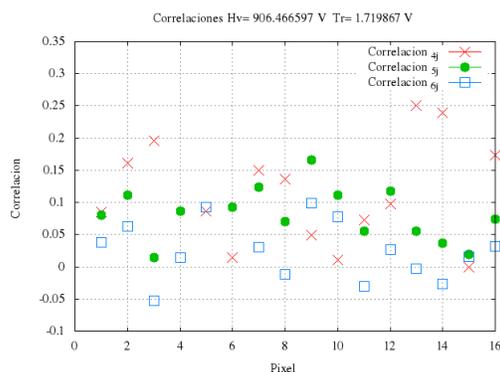


Figura 21: En la Figura se representan con distintos colores las correlaciones obtenidas entre un píxel arbitrario i con los restantes píxeles para una $V_{hv} = 1530$ Dac

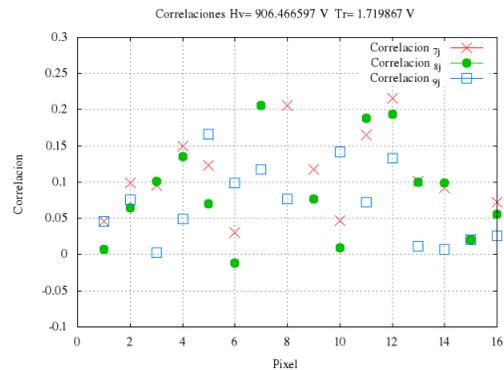


Figura 22: En la Figura se representan con distintos colores las correlaciones obtenidas entre un píxel arbitrario i con los restantes píxeles para una $V_{hv} = 1530$ Dac

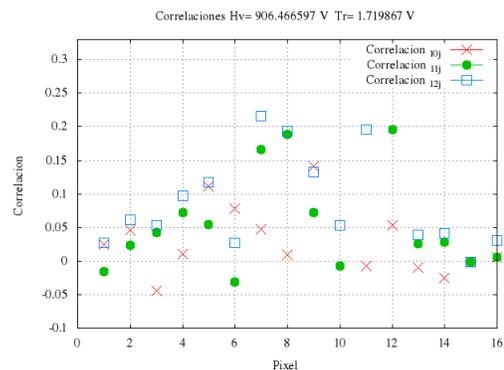


Figura 23: En la Figura se representan con distintos colores las correlaciones obtenidas entre un píxel arbitrario i con los restantes píxeles para una $V_{hv} = 1530$ Dac

al por mas de 2 ordenes de magnitud el valor umbral $C_{ij} \sim N^{-1}$. Los valores de N típicamente estaban comprendidos entre 80000 y 800000 adquisiciones. En las Figuras comentadas puede observarse si ocurre que para un determinado píxel i la correlación con los restantes píxeles j es negativa o positiva. De ocurrir el primer caso tenemos que el estado del píxel i induce en genera un estado contrario en los píxeles j . En cambio para el segundo caso tenemos que el píxel i induce a los píxeles j a tomar el mismo estado.

Vamos a definir un índice $I(i)$ que agrupe la información de la matriz $[C]$ en un numero, este indicara que tan sujetas a correlaciones están las mediciones dadas por un píxel i arbitrario.

$$I(i) = \sum_{j \neq i} \bar{s}_j * C_{ij}, \quad (4)$$

tambien podemos definir

$$\langle I(i) \rangle = \sqrt{\sum_{j \neq i} (\bar{s}_j * C_{ij})^2}, \quad (5)$$

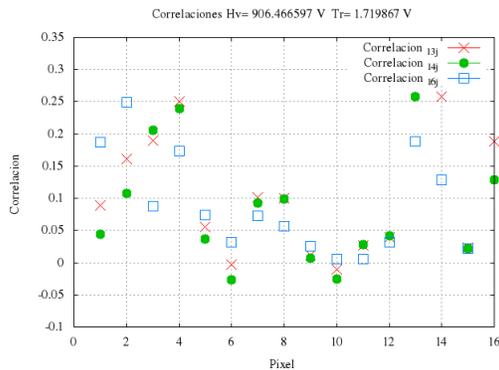


Figura 24: En la Figura se representan con distintos colores las correlaciones obtenidas entre un píxel arbitrario i con los restantes píxeles para una $V_{hv} = 1530$ Dac

sino queremos que correlaciones de diferentes signo se compensen.

En los índices $I(i)$ y $\langle I(i) \rangle$ los términos de las sumas están pesados por los valores medios \bar{s}_j porque debido a la heterogeneidad del detector no todos los píxeles miden igual, dando lugar a la existencia de píxeles más influyentes sobre los demás que otros.

Veamos ahora justamente como definir un índice de heterogeneidad. Podemos tomar como medida la derivación estándar entre los \bar{s}_i , pues de tener un detector absolutamente homogéneo tendríamos todos los \bar{s}_i iguales.

$$\chi = \sqrt{\sum_i N^{-1}(\bar{S} - \bar{s}_i)^2}, \quad (6)$$

donde \bar{S} representa el valor medio de los \bar{s}_i con $i = 1, \dots, 16$.

Finalmente con estos dos índices podemos entender mejor la calidad del sistema de medición completo siendo óptimo valores de $\langle I(i) \rangle$ y χ próximos a cero.

Es importante recordar que estos índices están calculados para valores específicos de Tr y V_{hv} . Si bien los dos parámetros se pueden variar, se encontró que el detector PMT trabaja adecuadamente en valores de V_{hv} cercanos a 900V

En las Figuras 25, 26 y 27 se muestran los resultados obtenidos al analizar la heterogeneidad del sistema de medición para diferentes valores de V_{hv} e igual valor de Tr . En estas gráficas se representa en el plano X-Y la matriz de 4x4 píxeles y en el eje Z un valor proporcional a la desviación estándar de los s_i . La escala de este eje fue modificada para ver mejor la diferencia entre un píxel y otro. También se hizo un corrimiento del cero con el mismo fin. Podemos observar como la relación entre las desviaciones estándar de diferentes píxeles es muy parecida en las tres gráficas, a excepción del píxel que se encuentra en la primera fila y cuarta columna que muestra un comportamiento distinto a los restantes. Lo importante de esto es que las tres figuras corresponden a

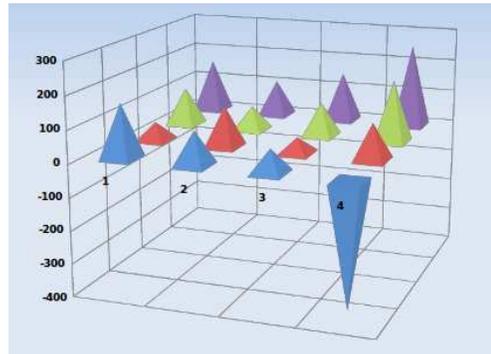


Figura 25: La figura representa la heterogeneidad relativa entre píxeles del sistema de medición para un $Tr = 0.74V$ y $V_{hv} = 882V$. En estas gráficas se representa en el plano X-Y la matriz de 4x4 píxeles y en el eje Z un valor proporcional a la desviación estándar de los s_i .

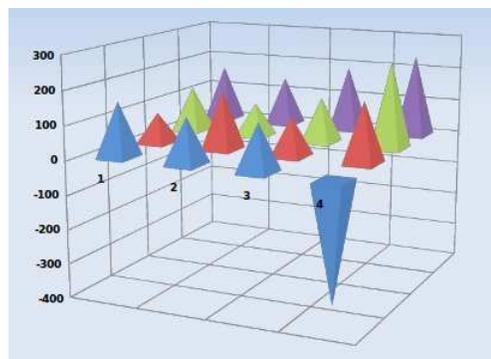


Figura 26: La figura representa la heterogeneidad relativa entre píxeles del sistema de medición para un $Tr = 0.74V$ y $V_{hv} = 906V$. En estas gráficas se representa en el plano X-Y la matriz de 4x4 píxeles y en el eje Z un valor proporcional a la desviación estándar de los s_i .

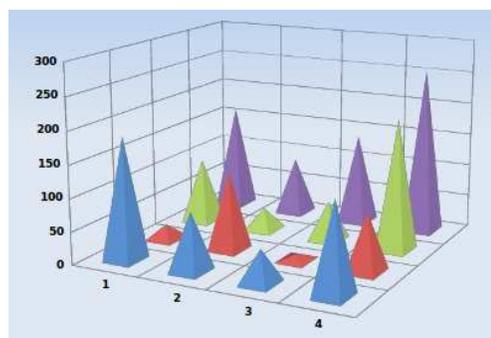


Figura 27: La figura representa la heterogeneidad relativa entre píxeles del sistema de medición para un $Tr = 0.74V$ y $V_{hv} = 930V$. En estas gráficas se representa en el plano X-Y la matriz de 4x4 píxeles y en el eje Z un valor proporcional a la desviación estándar de los s_i .

valores de V_{hv} muy diferentes y siendo que los parámetros del detector dependen fuertemente en su mayoría de esto nos preguntamos si el origen de la heterogeneidad del sistema se encuentra en la electrónica. Como se dijo anteriormente la heterogeneidad en el sistema puede interpretarse como una diferencia de sensibilidad entre píxeles, esta se puede dar si existe una diferencia en el factor de amplificación de cada canal. A su vez esto puede darse por la tolerancia de las resistencias que fijan el factor de amplificación. Una vez pensado esto se observó si estas resistencias son de baja tolerancia y no, en los canales se encuentran resistencias comunes de tolerancia comprendidas entre el 5 y 20 por ciento. Por lo que esto podría explicar el origen de la heterogeneidad. Sería interesante para una continuación de este trabajo cambiar estas resistencias por otras de tolerancia porcentual de 0.1 y ver como esto repercute en el análisis estadístico de la heterogeneidad.

Otra posible continuación de trabajo sería calcular y graficar los índices definidos anteriormente como función de Tr . También sería intentar rastrear el origen de las correlaciones o efectuar un modelo que explique estas. Un análisis que se realizó en este trabajo relacionado a esto consistió en tratar de relacionar la distancia entre dos píxeles arbitrarios con la correlación existente entre ellos. Se logró notar que dado un píxel i arbitrario en general ocurre que si existe algún otro píxel con el cual la correlación es apreciablemente mayor que con todos los otros, este pertenece a uno de los primeros vecinos del píxel i en la matriz de 4×4 píxeles que constituye

el detector. Por ejemplo, podemos ver de la Figura 21 que probablemente sobre la matriz de 4×4 píxeles el píxel 13 o 14 sea uno de los primeros vecinos del píxel 4. En la realidad ocurre que tanto el píxel 13 como el 14 son vecinos del píxel 4.

VI. CONCLUSION

Se realizó una caracterización del sistema electrónico. Se obtuvieron las curvas de calibración para convertidores digital analógico y el consumo del sistema en determinadas condiciones. Se realizó una comprobación del funcionamiento adecuado de los comparadores y amplificadores de cada canal. Se desarrolló un programa capaz de realizar mediciones de forma automática y se implementaron en el diferentes algoritmos de procesamiento. Con estos se obtuvieron diferentes curvas de Conteo Vs Trigger que ayudaron a caracterizar el sistema de medición completo. Se realizó un estudio estadístico para obtener medidas de correlación y heterogeneidad entre las mediciones obtenidas por diferentes píxeles. Para realizar esto se desarrolló un programa que calcule estas medidas a partir de los archivos de adquisiciones. A partir de estas medidas de correlación y heterogeneidad se definieron índices estadísticos que puedan representar cuantitativamente estas propiedades de cada píxel en un único número. Se formuló una posible explicación a las heterogeneidades presentes en el sistema de medición.