



# Reconstrucción de trazas en detectores tipo TRASGO para la medida de rayos cósmicos: Detectores TRAGALDABAS y STRATOS

Sara Costa, Miguel Cruces, Juan A. Garzón

LabCAF / IGFAE  
Universidade de Santiago de Compostela

## 1. Introducción

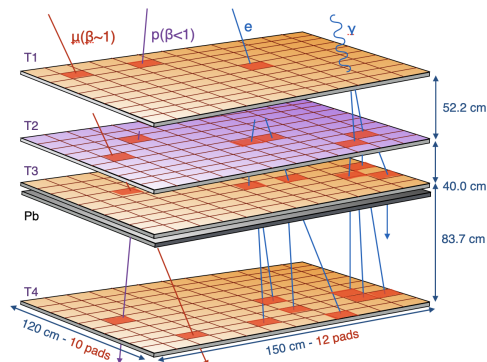
Presentamos en este informe un resumen de las actividades realizadas para la puesta a punto de un programa para la reconstrucción de trazas en detectores tipo TRASGO, en particular para los detectores del proyecto STRATOS. Para ello se ha adaptado y mejorado una cadena de programas existente, GENEDITIGTANA, que genera datos aleatorios, los digitaliza y, finalmente, los reconstruye, permitiendo estimar tanto la aceptación como la resolución de la reconstrucción realistas asociadas a un detector. Como novedad, hemos introducido la posibilidad de buscar candidatos a trazas mediante un algoritmo de filtrado de Kalman. Esto permitirá separar y reconstruir las cascada electromagnéticas asociadas a electrones y gammas, tarea imprescindible para los estudios atmosféricos que pretendemos, con una gran eficacia.

## 2. Los detectores tipo TRASGO y la atmósfera

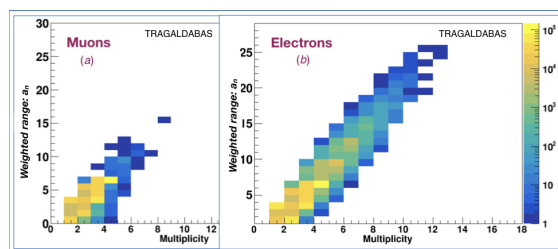
El desarrollo de la tecnología RPC (Resistive Plate Chambers) propia de experimentos de Física Nuclear y de Física de Partículas de Altas Energías y ha abierto la posibilidad de diseñar y construir detectores de rayos cósmicos de nueva generación capaces de medir con gran precisión haces de electrones de alta multiplicidad y muones de origen cósmico a nivel del suelo. Sin duda, la propuesta mas interesante de dicho tipo de detectores a nivel mundial la constituyen los detectores tipo TRASGO [3, 4], desarrollados por la Universidad de Santiago de Compostela en colaboración con el LIP de Coimbra. Las empresas Hidronav y Digafer han tenido un papel muy destacado, proporcionando soporte técnico, material electrónico y desarrollo instrumental. Fruto de ello han sido los detectores TRAGALDABAS, actualmente tomando datos en la Univ. de Santiago de Compostela, el detector TRISTAN, instalado en una base española en la Antártida, y el detector MUTT, que estuvo instalado en los locales de Digafer, cerca de Porriño, siendo pionero en usar

la tecnología de RPCs para la realización de tomografía mediante rayos cósmicos. Finalmente, el proyecto STRATOS constituye un salto adelante muy importante pues reúne gran parte de la experiencia adquirida en los proyectos anteriores con el desarrollo de una nueva familia de detectores con prestaciones en posición, reconstrucción angular y resolución angular muy por encima de los conseguidos en los detectores previos.

Es bien conocido el importante efecto que las condiciones atmosféricas, en particular la presión y el perfil de temperaturas de la atmósfera sobre el detector, ejercen sobre el resultado de la medida de rayos cósmicos medidos en tierra. En particular, es muy interesante la correlación observada entre la tasa de muones de muy alta energía medida en tierra y la temperatura efectiva de la atmósfera, en la que dominan las variaciones de la temperatura en la estratosfera. Ello abre la posibilidad de aprovechar las magníficas prestaciones que ofrecen los detectores tipo TRASGO, capaces de acceder a información vedada a los detectores de rayos cósmicos tradicionales, para estimar en tiempo real el perfil de temperaturas de la atmósfera en la vertical del detector. Esta posibilidad conlleva la necesidad de desarrollar y poner a punto algoritmos novedosos de reconstrucción de la dirección de llegada de electrones y muones y que, además, permitan tanto su identificación como incluso la estimación de la energía de las cascadas electromagnéticas inducidas por los electrones de alta energía.



(a) Diferentes tipos de partículas muestran diferentes topologías típicas a su paso por el detector.



(b) Ejemplo de cómo la medida del número de celdas impactadas y el alcance ponderado de las trazas permiten separar electrones de muones.

Figura 1: Ejemplo de la capacidad de identificación de los detectores de tipo TRASGO, aplicada al detector TRAGALDABAS de la USC.

La figura 1a resume el fundamento de la capacidad de los detectores tipo TRASGO para la identificación de los diferentes tipos de partículas. En relación con la separación entre muones y electrones, es de destacar que mientras los primeros deben de producir trazas rectilíneas proporcionando un buen ajuste, los electrones de alta energía tienen tendencia a producir cascadas electromagnéticas formadas por nuevos electrones y gammas activando un número elevado de electrodos. Dicho efecto queda bien reflejado en los resultados de simulación que se muestran en la figura 1b. En ella se observa la capacidad que un detector tipo TRASGO ofrece para separar electrones y muones analizando algunos observables; en concreto, el valor del chi cuadrado del ajuste, el número de celdas activadas y el alcance ponderado, que tiene en cuenta la distribución longitudinal de las celdas activadas. La capacidad de distinguir electrones de muones alcanza valores que superan el 90 por ciento.

TimTrack [5] y el filtrado de Kalman [2] son dos herramientas de reconstrucción de trazas

ideales para sacar provecho de la magníficas prestaciones que ofrecen los detectores tipo TRASGO. La primera de ellas fue desarrollada específicamente para este tipo de detectores mientras que la segunda constituye un estándar ampliamente utilizado en la ciencia y en la técnica. Hemos aplicado ambas herramientas al desarrollo de un programa de reconstrucción de haces de partículas, necesario para su uso en el proyecto STRATOS, si bien lo hemos aplicado también a la estructura en electrodos planos del detector TRAGALDABAS de la Univ. de Santiago de Compostela, ya que para él disponemos de datos reales. Para ello nos hemos ayudado de la cadena de programas *genedigitana*, que permite simular la respuesta de un detector cualquiera a la incidencia de partículas cargadas y proceder después a su reconstrucción y estimar la incertidumbre de los parámetros de la partícula incidentes, junto con su matriz de correlación.

### 3. Genedigitana

*GENEDIGITANA* es el acrónimo de las tres palabras generación, digitalización y análisis y llamamos así a un programa, o cadena de subprogramas, desarrollado en el LabCAF y disponible en *Mathematica* y en *Python* y que puede ser usado para el estudio de las prestaciones de cualquier detector de partículas de configuración conocida. El programa permite incluir efectos como zonas muertas en los detectores, ineficiencias o ruido de cualquier tipo, siendo así extremadamente útil para la simulación realista de un cierto detector.

Hemos partido de un script previo en *Python* de *GENEDIGITANA*, acomodándolo para aplicar el proceso a la estructura de los detectores TRAGALDABAS y STRATOS. También hemos ampliado el código para añadir nuevas funcionalidades y mayor flexibilidad y robustez.

La cadena *genedigitana* consta de tres procesos:

- Generación: construcción aleatoria de rectas en tres dimensiones que emulan trayectorias de partículas que se mueven a una cierta velocidad e incidiendo en el detector en un cierto instante de tiempo.
- Digitalización: conversión de la información analítica del paso de la partícula por un detector a la respuesta esperada que de dicho detector. Este proceso es conveniente que sea lo mas realista posible reproduciendo en lo posible todas las características conocidas del detecto, incluidas las zonas muertas o la ineficiencia en la medida. Por ejemplo, en el caso de un detectores de electrodos rectangulares, o pads, como el TRAGALDABAS , la respuesta esperada son las coordenadas del centro de la celda, donde se supone que está conectado el electrodo de lectura, y un tiempo que es la suma del tiempo de paso de la partícula por el electrodo mas el tiempo que necesita el pulso de la señal inducida en llegar al electrodo de lectura. En el caso de un detector de electrodos longitudinales, o strips, como STRATOS la respuesta esperada es son la coordenada de un extremos del strip impactado y los dos tiempos de llegada del pulso inducido por la llegada de la partícula a ambos extremos del electrodo. A partir de dichas dos medidas se estimarán tanto el tiempo de llegada de la partícula al electrodo como su coordenada transversal en el propio electrodo.
- Análisis: a partir de las coordenadas digitalizadas, se reconstruyen las trazas originales mediante un algoritmo, que inicialmente era TimTrack y en el que hemos incluido la posibilidad de usar un algoritmo basado en el filtrado de Kalman.

Describimos a continuación algunas de las características de la versión actual de *GENEDIGITANA* . En el apéndice se muestra una pequeña documentación de las clases utilizadas en el código informático.

### 3.1. Generación

Para definir las trazas de partículas se generan trazas, o rectas, con ángulo polar  $\theta$  y ángulo acimutal  $\phi$  aleatorios, siguiendo una distribución definida por el usuario. Por defecto, lleva definida una distribución uniforme en ángulo sólido que se corresponde con una distribución uniforme en  $\cos \theta$  y  $\phi$ , entre la vertical y un ángulo polar máximo  $\theta_{max}$ . El punto de incidencia  $(x_0, y_0)$  se genera con distribución uniforme en cualquier punto del plano superior del detector.

Para un detector con un cierto número de planos activos para la medida de las partículas que lo atraviesan, asumimos que existe un cierto *trigger* entre planos por lo que, para simular un detector real, sólo se aceptan aquellas trazas que dejan señal en dichos planos, descartando todas las demás. Esto permite utilizar el programa también para el cálculo de aceptancias de un detector en función del tamaño del mismo y de la distancia entre los planos del trigger para una cierta distribución de partículas incidentes.

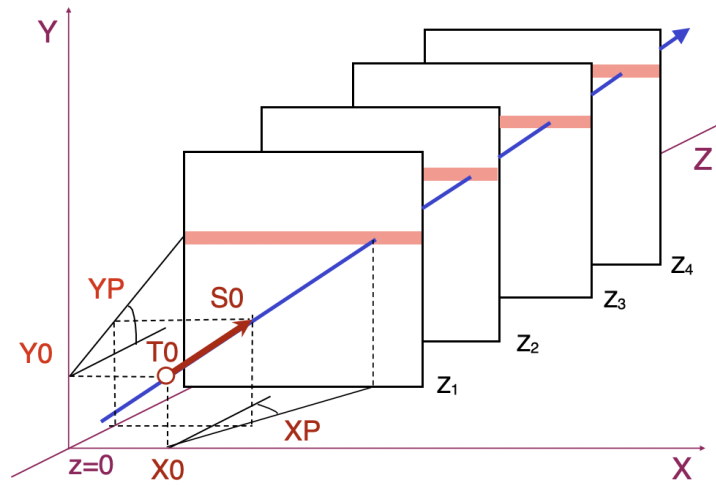


Figura 2: Representación gráfica de una saeta.

Cada traza o partícula viene caracterizada por seis parámetros que constituyen lo que llamamos una SAETA<sup>1</sup>,  $s$ .

$$s = (X0, XP, Y0, YP, T0, S0) \quad (1)$$

La definición de cada parámetro se muestra en la figura 2 y es la siguiente:

- X0: Coordenada X del punto de corte de la partícula con el plano de referencia en  $z = 0$ .
- XP: Pendiente proyectada de la partícula en el plano XZ.
- Y0: Coordenada Y del punto de corte de la partícula con el plano en  $z = 0$ .
- YP: Pendiente proyectada de la partícula en el plano YZ.

<sup>1</sup>SAETA:SmAllest sET of pArameters. La llamamos así porque frente a la costumbre habitual en física de partículas de definir una partícula por su trayectoria, en nuestra aproximación, al igual que una flecha o saeta, en cada momento lleva asociada también el tiempo de paso por una cierta coordenada y su velocidad

- T0: Tiempo de paso de la partícula por el plano  $z = 0$ , que se toma como el plano de referencia para los ajustes.
- S0: Slowness o lentitud. Es la inversa del módulo de la velocidad de la partícula en el plano  $z = 0$ , ( $S0 = 1/v$ ). Se introduce para que las ecuaciones de generación y reconstrucción de trazas guarden una cierta simetría entre la parte espacial, pares (X0, XP) y (Y0, YP), y la parte temporal, par (T0, S0).

Usando la definición de los cosenos directores de una recta en el espacio que a su vez constituyen los elementos del vector unitario en la dirección de la recta,  $\mathbf{n} = (c_x, c_y, c_z)$ , se verifica:

$$\begin{aligned} c_x &= \sin \theta \cos \phi, \\ c_y &= \sin \theta \sin \phi, \\ c_z &= \cos \theta, \end{aligned} \tag{2}$$

y las pendientes proyectadas de una saeta se definen como:

$$\begin{aligned} XP &= c_x/c_z, \\ YP &= c_y/c_z. \end{aligned} \tag{3}$$

### 3.2. Digitalización

Las trazas digitalizan a partir de todos aquellos puntos en los que intersectan con alguno de los planos del detector en un electrodo concreto y que como hemos visto, dependen de la geometría del detector. La información almacenada para cada intersección lo denominamos hit. Cada uno de estos hits son de clase Hit, que también se almacenan en la clase SimEvent en una lista desordenada. Esto es lo mismo que ocurre con los datos reales del detector que vienen determinados por el tiempo de llegada de las señales medidas a la electrónica de adquisición y los tiempos de retraso dentro de ésta.

### 3.3. Análisis

El proceso de análisis consiste en reconstruir, mediante el algoritmo que se disponga y a partir de la información digitalizada proporcionada por el detector las trazas generadas y comparar la diferencia entre éstas y las generadas. Este estudio en función de los parámetros de incidencia que se desee (distribución de partículas incidentes, posición, ángulo, velocidad, etc.) permitirá estimar la resolución del detector en función de aquellos parámetros. Así se podrán estudiar las prestaciones de un detector para distintas configuraciones y mejorar su diseño o determinar sus limitaciones.

En nuestro caso, hemos escrito un código de reconstrucción basado en el algoritmo del “Kalman filter” o filtrado de Kalman, que se describe con mayor profundidad y generalidad en la sección homónima de la referencia [2].

En su formulación general, el método Kalman filter está destinado a encontrar la estimación óptima de un conjunto de parámetros dado por un llamado vector de estado  $\mathbf{r}^2$  desconocido a partir de un conjunto de medidas en los  $n$  planos,  $\mathbf{m}_k$ ,  $k = 1 \dots n$ .

Se comienza con una aproximación inicial  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_n$  en el último plano del detector y de forma recursiva se refina el vector  $\mathbf{r}$ , consecutivamente añadiendo sucesivamente la información proporcionada por el resto de los detectores. El valor óptimo se alcanza después de añadir la última

---

<sup>2</sup>Consideramos que, por defecto, todos los vectores  $\mathbf{r}$  son de naturaleza vertical y sus traspuestos  $\mathbf{r}^t$  son de naturaleza horizontal

medida tras la que se procede a un ajuste general. Dado que en un cierto plano puede haber diversas medidas asociadas al paso de varias partículas por el plano, el algoritmo intenta mejorar el ajuste del vector con cada una de las medidas y solo acepta aquellas que superen un cierto test de calidad. El método funciona así no solo como algoritmo de ajuste sino también como algoritmo búsqueda.

En este proceso se aplica para una combinación de hits que cumpla las condiciones:

- El segmento que une dos hits en dos planos consecutivos debe de ser compatible con no superar la velocidad de la luz, de acuerdo con la resolución de medida del detector
- Cuando en un plano hay varios hits compatibles con el vector de estado que se está reconstruyendo se acepta aquel hit que proporciona una mejor calidad del ajuste

### 3.3.1. Paso 1: INICIALIZACIÓN

Partimos en el último plano del detector<sup>3</sup>, de un vector de estado, en nuestro caso una saeta, perpendicular al plano y centrado en uno de los hits medidos en dicho plano. Asumimos que su “lentitud” es la correspondiente a la velocidad de la luz  $s_c = 1/c$ . Así, la saeta inicial es.

$$\mathbf{r}_0 = (x_0, 0, y_0, 0, t_0, s_c)^T, \quad (4)$$

donde  $x_k$ ,  $y_k$  y  $t_k$  son los valores asociados a las tres variables  $(x, y, t)$  medidas en el plano  $k$ .

Precisamos de la matriz de covarianza de los parámetros del ajuste que se establece como

$$C_0 = \sigma^T \cdot I_{6 \times 6} \cdot \sigma \quad (5)$$

donde  $\sigma$  es un vector de las varianzas de cada uno de los parámetros de  $\mathbf{r}$ :

$$\sigma = (\sigma_x, \sigma_{x'}, \sigma_y, \sigma_{y'}, \sigma_t, \sigma_s) \quad (6)$$

### 3.3.2. Paso 2: PREDICCIÓN

Comienzo de la iteración por planos. Se propaga el vector desde el plano  $k - 1$  hasta el plano  $k$ , mediante la matriz de transporte

$$F_k = \begin{pmatrix} 1 & \Delta z_k & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & ks_k \Delta z_k \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

donde  $\Delta z_k$  es la distancia entre dichos planos:

$$\Delta z_k = z_k - z_{k-1}, \quad (8)$$

y  $ks_k$  es el llamado “factor de pendiente”:

$$ks_k = \sqrt{1 + x_k'^2 + y_k'^2}. \quad (9)$$

Finalmente,

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{r}}_k &= F_k \mathbf{r}_{k-1}, \\ \tilde{C}_k &= F_k C_{k-1} F_k^T. \end{aligned} \quad (10)$$

---

<sup>3</sup>Definimos este último plano del detector con el índice 0 por ser el inicial.

### 3.3.3. Paso 3: FILTRADO

En esta etapa, el vector  $\tilde{\mathbf{r}}_k$  se actualiza con la nueva medida  $\mathbf{m}_k$  para calcular una estimación mejorada <sup>4</sup> de  $\mathbf{r}_k$  y de su matriz de covarianza  $C_k$

$$\begin{aligned} K_k &= \tilde{C}_k H_k^T (V_k + H_k \tilde{C}_k H_k^T)^{-1}, \\ \mathbf{r}_k &= \tilde{\mathbf{r}}_k + K_k (\mathbf{m}_k - H_k \tilde{\mathbf{r}}_k), \\ C_k &= \tilde{C}_k - K_k H_k \tilde{C}_k, \\ \chi_k^2 &= \chi_{k+1}^2 + (\mathbf{m}_k - H_k \tilde{\mathbf{r}}_k)^T (V_k + H_k \tilde{C}_k H_k^T)^{-1} (\mathbf{m}_k - H_k \tilde{\mathbf{r}}_k). \end{aligned} \quad (11)$$

Aquí, la medida  $k$ -ésima es

$$\mathbf{m}_k = (x_k, y_k, t_k)^T, \quad (12)$$

y su matriz de covarianza

$$V_k = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_t^2 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

La matriz del modelo es simplemente la matriz identidad  $H$  definida como:

$$H_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

que convierte un vector del espacio de parámetros  $\mathbf{r}_k$  al espacio de medidas  $\mathbf{m}_k$ :

$$\begin{pmatrix} x_k \\ x'_k \\ y_k \\ y'_k \\ t_k \\ s_k \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ t_k \end{pmatrix}.$$

Deben iterarse desde el paso (2) hasta el (4) con  $k$  para todos los planos detectores.

La notación utilizada en esta sección se completa aquí:  $\mathbf{r}_{k-1}$ ,  $C_{k-1}$  son la estimación óptima obtenida y la matriz de covarianza en el paso previo; La matriz  $F_k$  relaciona el estado en el paso  $k-1$  con el  $k$ <sup>5</sup>;  $\tilde{\mathbf{r}}_k$ ,  $\tilde{C}_k$  son la estimación predicha de  $\mathbf{r}_k^t$  y su matriz de covarianza;  $\mathbf{m}_k$ ,  $V_k$  es la medida y su matriz de covarianza  $k$ -ésimas; la matriz  $H_k$  es la transformación del espacio de parámetros al espacio de medidas; la matriz  $K_k$  es la llamada “matriz de ganancia”; el valor  $\chi_k^2$  es la desviación total de la estimación obtenida  $\mathbf{r}_k$  a partir de las medidas  $\mathbf{m}_1, \dots, \mathbf{m}_k$  tal que:

$$\chi^2 = \sum_{j=0}^N \sum_{i=0}^n \frac{(x_{ij}^s - x_{ij}^m)}{\sigma_i^2} \quad (15)$$

siendo  $N$  el número de hits utilizados para calcularlo y  $n = 3$  el índice para las tres coordenadas espacio-temporales  $(x^s, y^s, t^s)$  de la saeta y  $(x^m, y^m, t^m)$  de las medidas.

El vector  $\mathbf{r}_n$  obtenido después del filtrado de la última medida es la estimación óptima obtenida de  $\mathbf{r}_n^t$  con la matriz de covarianza  $C_n$ .

<sup>4</sup>Evidentemente esto es así si el hit nuevo hit incorporado corresponde a la saeta que queremos reconstruir ya que estamos añadiendo información sobre la misma

<sup>5</sup>Recuérdese que se empieza desde el plano inferior hasta el superior

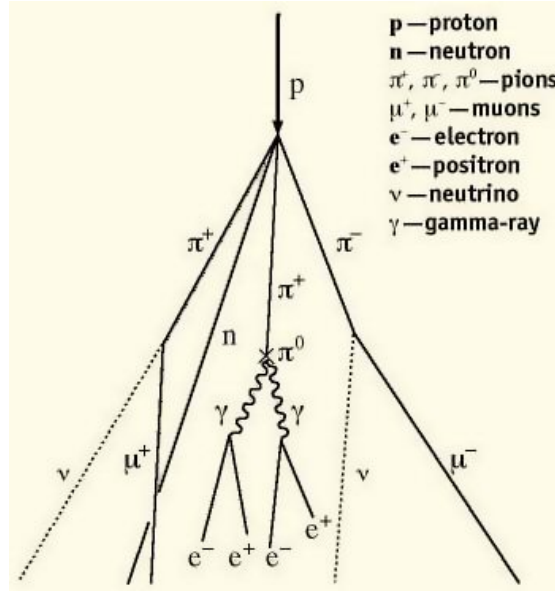


Figura 3

#### 4. Resultados de las simulaciones

En esta sección, se muestran los resultados de las reconstrucciones que hemos estimado para los detectores TRAGALDABAS y STRATOS. Sus configuraciones respectivas se muestran en las figuras 4a y 4b.

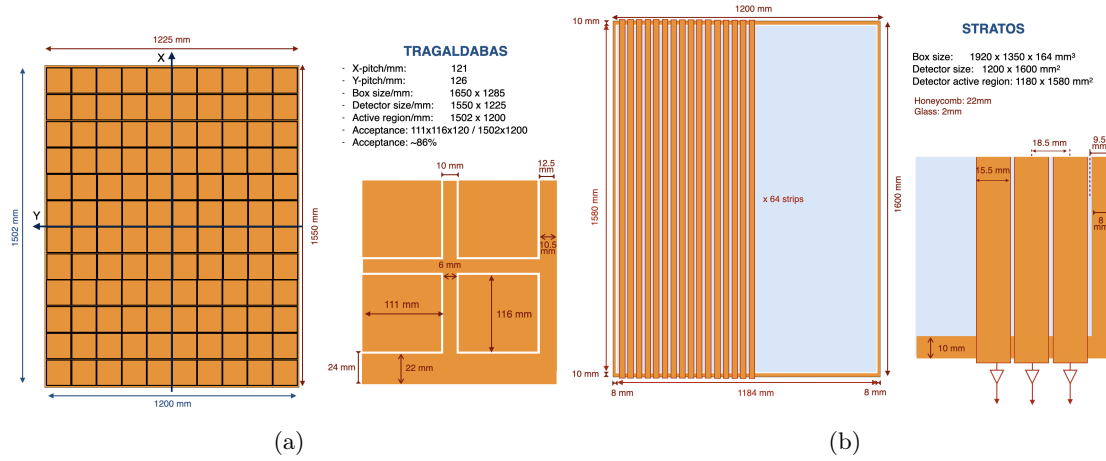


Figura 4: Topología de las RPCs de TRAGALDABAS y STRATOS respectivamente.

Hemos probado su correcto funcionamiento hasta hasta un número máximo de cinco trazas sin que las prestaciones se vean afectadas dada la gran granularidad que tienen ambo detectores. Es de destacar que, de acuerdo con las medidas previas hechas con el detector TRAGALDABAS, la proporción de eventos con mas de 5 partículas simultáneas apenas representarán menos del



1 % de la muestra total. Por el contrario, el mayor rato será reconstruir cascadas complejas de partículas en las que los electrones de alta energía puedan dar lugar a cascadas electromagnéticas como las que se muestran en la figura 3. Este es un proceso mas complicado de estudiar de forma automática y forma parte de la lista de prioridades generales del proyecto STRATOS.

#### 4.1. Representación gráfica

Esta versión de genedigitana tiene la opción de mostrar los resultados del proceso en forma de gráfico en 3D, donde las trazas reconstruidas se muestran como líneas continuas, las trazas simuladas como líneas discontinuas, y en color morado se intuye la topología de cada detector. Estas líneas continuas que representan las trazas reconstruidas, se colorean siguiendo un gradiente desde rojo a amarillo según el valor de  $\chi^2$  obtenido en la reconstrucción, siendo el color rojo para la mejor reconstrucción y el amarillo para la peor.

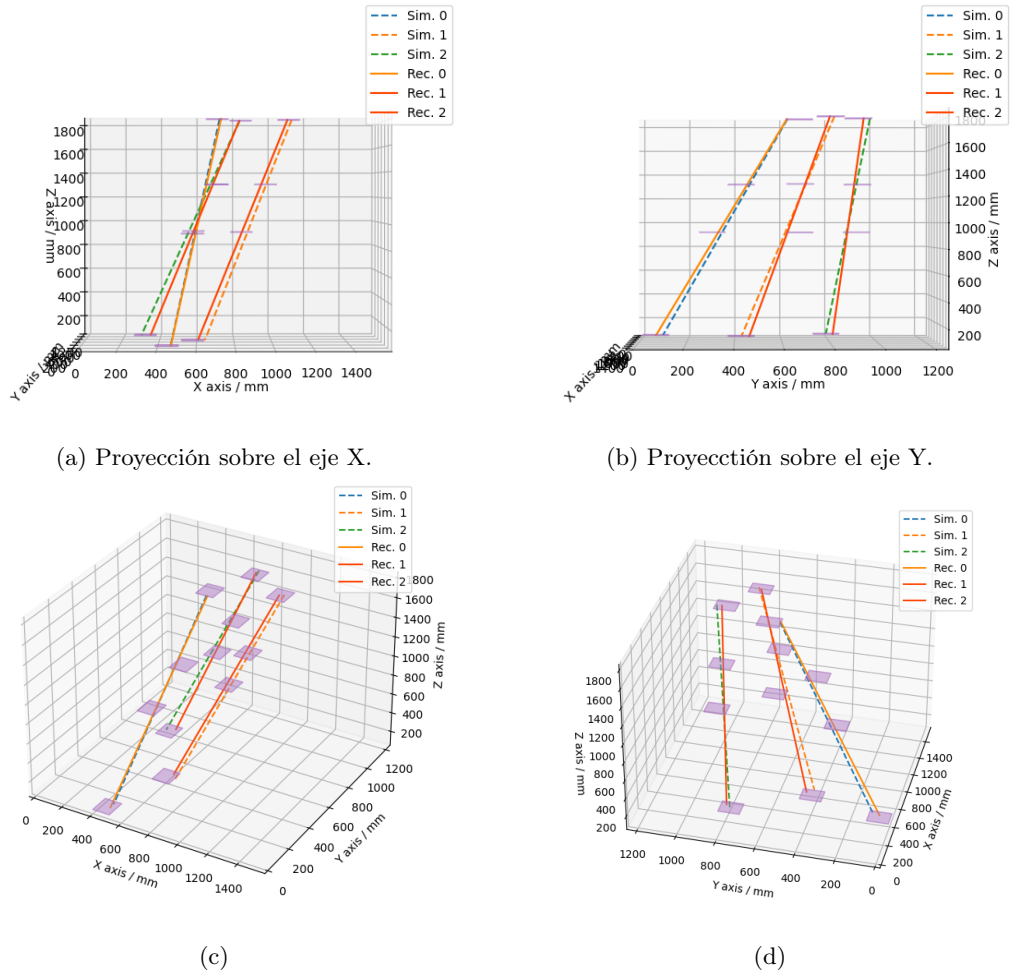
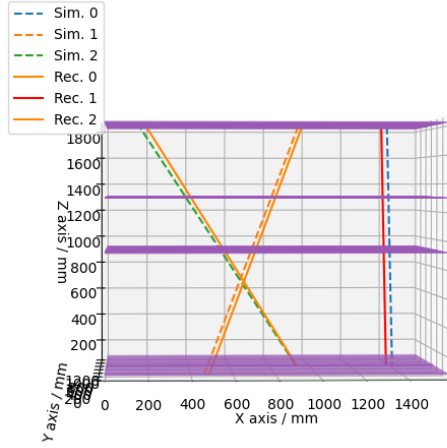


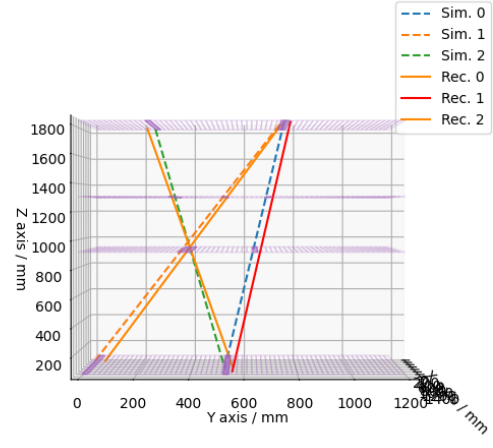
Figura 5: Evento de tres trazas en TRAGALDABAS reconstruido.

En la figura 5 está representado un evento en TRAGALDABAS con tres trazas que se reconstruyen sin dificultad. Se puede ver en las proyecciones sobre el plano XZ (figura 5a) y el plano

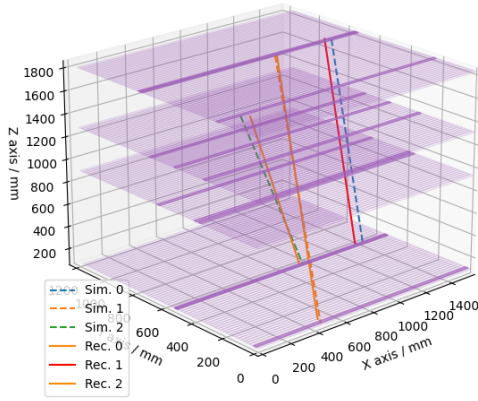
YZ (figura 5b), así como en perspectiva (figuras 5c y 5d).



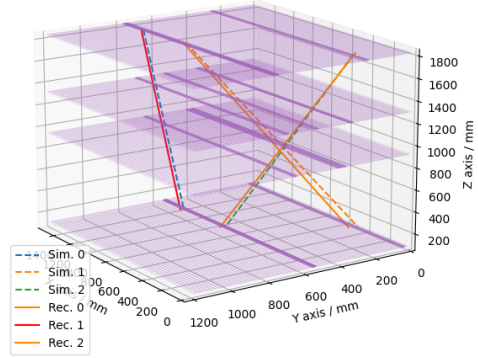
(a) Proyección sobre el eje X.



(b) Proyección sobre el eje Y.



(c)



(d)

Figura 6: Evento de tres trazas en STRATOS reconstruido.

Como se puede observar en la figura 6 que representa otro evento diferente simulado para el detector STRATOS, las imágenes están colocadas de la misma forma.

El detector STRATOS tiene 64 conductores en cada plano colocados de forma paralela entre sí que legan de un extremo a otro llamados *strips*. La posición del hit en el eje Y se determina por el *strip* que recibe la señal. La posición en el eje X en cambio, se determina por el tiempo que dicha señal tarda en recorrer todo el conductor. El proceso de simulación para este detector es el mismo que para TRAGALDABAS, así como la reconstrucción una vez obtenidas las posiciones  $(x, y)$  en cada plano digitalizadas.

## 4.2. Resultados numéricos

Finalmente, se muestra a continuación como ejemplo algunos de los datos generados y re-construïdos para ambos detectores.

### TRAGALDABAS

Parámetros iniciales			Incertidumbre en parámetros reconstruidos					
XP	YP	v/c	sX0/mm	sYP	sY0/mm	sYP	sT0/ps	sS0/%
0	0	1	29.2	28	28.0	27	226	6.47
0	0	0.9	29.2	28	28.0	27	226	5.81
0	0	0.8	29.2	28	28.0	27	226	5.17
0.1	0.1	1	29.2	28	28.0	27	226	6.40
0.1	0.1	0.9	29.2	28	28.0	27	226	5.76
0.1	0.1	0.8	29.2	28	28.0	27	226	5.12
0.2	0.2	1	29.2	28	28.0	27	226	6.22
0.2	0.2	0.9	29.2	28	28.0	27	226	5.60
0.2	0.2	0.8	29.2	28	28.0	27	226	4.98
0.3	0.3	1	29.2	28	28.0	27	226	5.95
0.3	0.3	0.9	29.2	28	28.0	27	226	5.36
0.3	0.3	0.8	29.2	28	28.0	27	226	4.76

Figura 7: Datos de la reconstrucción en el detector TRAGALDABAS.

Parámetros iniciales			Incertidumbre en parámetros reconstruidos					
XP	YP	v/c	sX0/mm	sYP	sY0/mm	sYP	sT0/ps	sS0/%
0	0	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.74
0	0	0.9	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.25
0	0	0.8	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	3.79
0.1	0	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.65
0	0.1	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	3.64
0.1	0.1	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.67
0.2	0	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.61
0	0.2	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.60
0.2	0.2	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.51
0.2	0.2	0.9	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.05
0.2	0.2	0.8	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	3.79
0.3	0	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.52
0	0.3	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.52
0.3	0.3	1	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	4.30
0.3	0.3	0.9	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	3.90
0.3	0.3	0.8	4.34	0.0039	3.74	0.0033	177	3.48

Figura 8: Datos de la reconstrucción en el detector STRATOS.

## 5. Apéndice

### 5.1. Código para la reconstrucción

El código destinado a la reconstrucción para este estudio se puede encontrar en el repositorio público de GitHub:

[https://github.com/MCruces-fz/TRAGALDABAS-Kalman-Filter/tree/first\\_reconstruction](https://github.com/MCruces-fz/TRAGALDABAS-Kalman-Filter/tree/first_reconstruction)

Aquí se pueden leer las clases utilizadas y mencionadas en este documento, así como interpretar el software con Python 3.

## Referencias

- [1] **Studies on the Composition and Energy of Secondary Cosmic Rays with the Tragaldabas Detector**

*Yanis Fontela Barba*, departamento de Física de Partículas.

Universidade de Santiago de Compostela

- [2] **The Kalman Filter Technique applied to Track Fitting in GLAST**

*Jose A. Hernando*, Santa Cruz Institute for Particle Physics.

University of California. Santa Cruz

- [3] **jag**

*Jose A. Garzón*, ....

...

- [4] **Moscú**

*Jose A. Garzón*, ....

...

- [5] **Tim Track**

*Jose A. Garzón*, ....

...