



# Estimación de la respuesta generada por el detector MuTe al paso de partículas cargadas

Adriana Vásquez-Ramírez

**Director:** Luis A. Núñez

**Codirector:** Mauricio Suárez-Durán

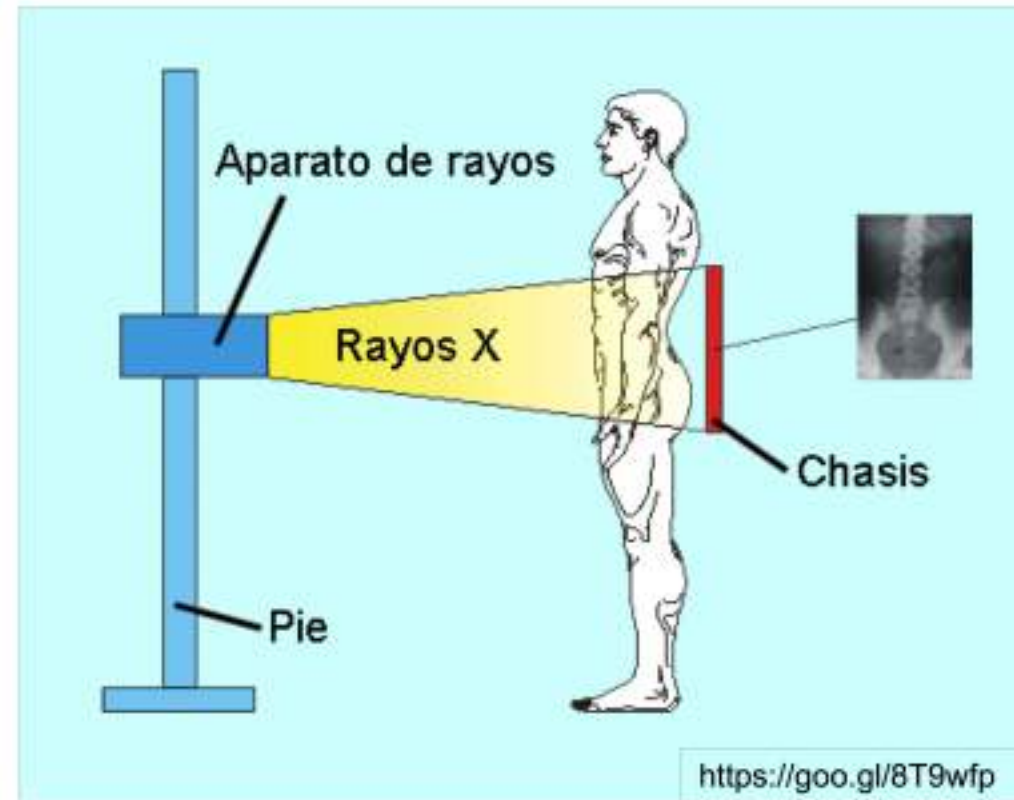
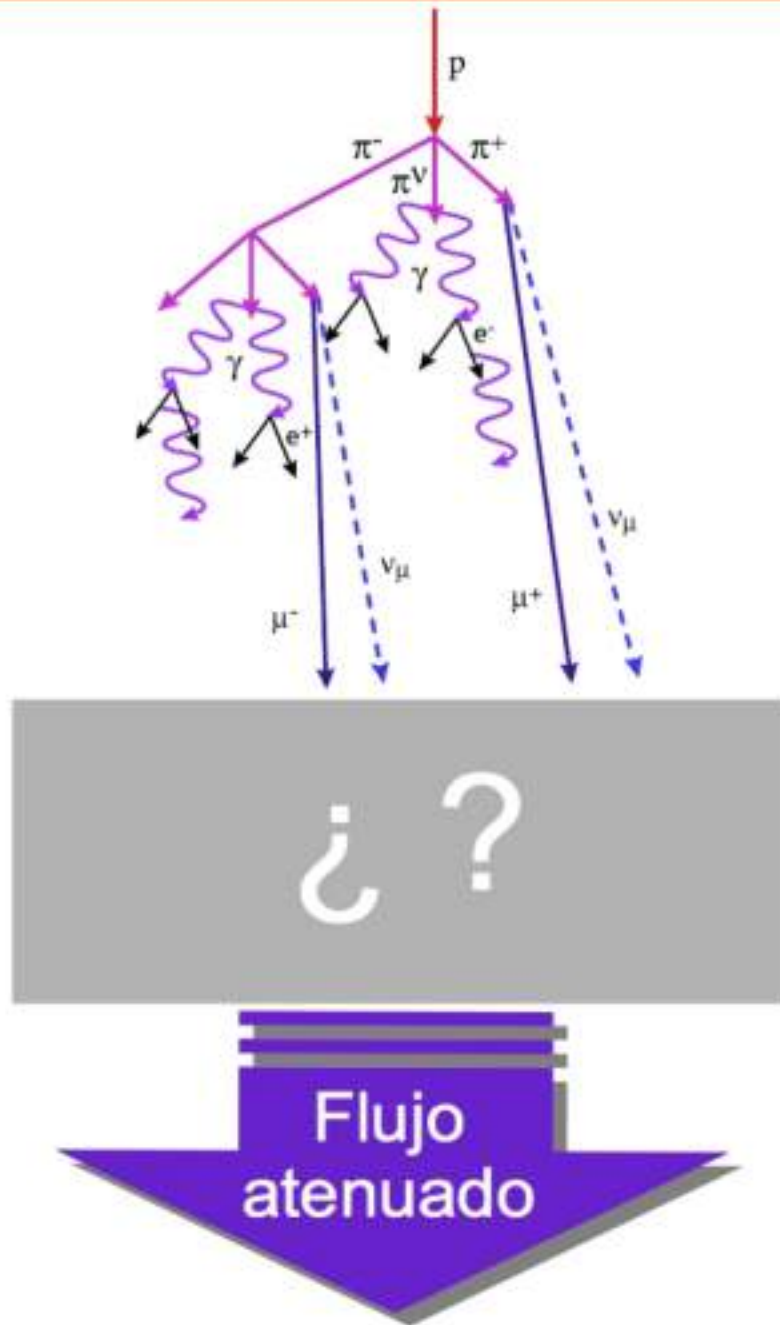
Grupo de Investigación en Relatividad y Gravitación  
Grupo Halley de Astronomía y Ciencias Aeroespaciales

# Tabla de contenido

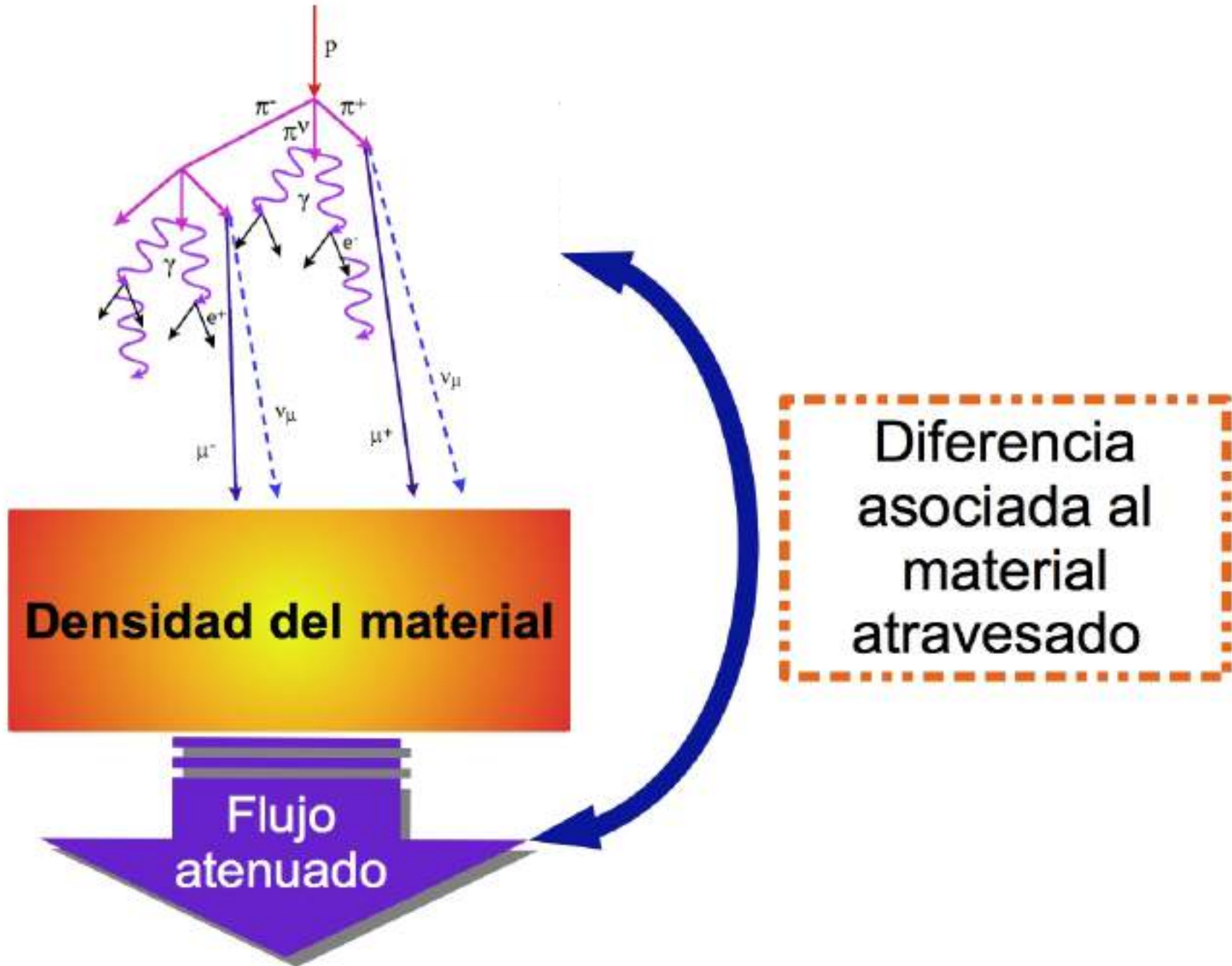
---

1. Muongrafía de volcanes y el Proyecto MuTe
2. El detector híbrido Mute:
  - 2.1. Respuesta del Hodoscopio
  - 2.2. Respuesta del Detector Cherenkov de Agua
3. Propuesta de Trigger para la detección de muones con el detector híbrido MuTe
4. Conclusiones

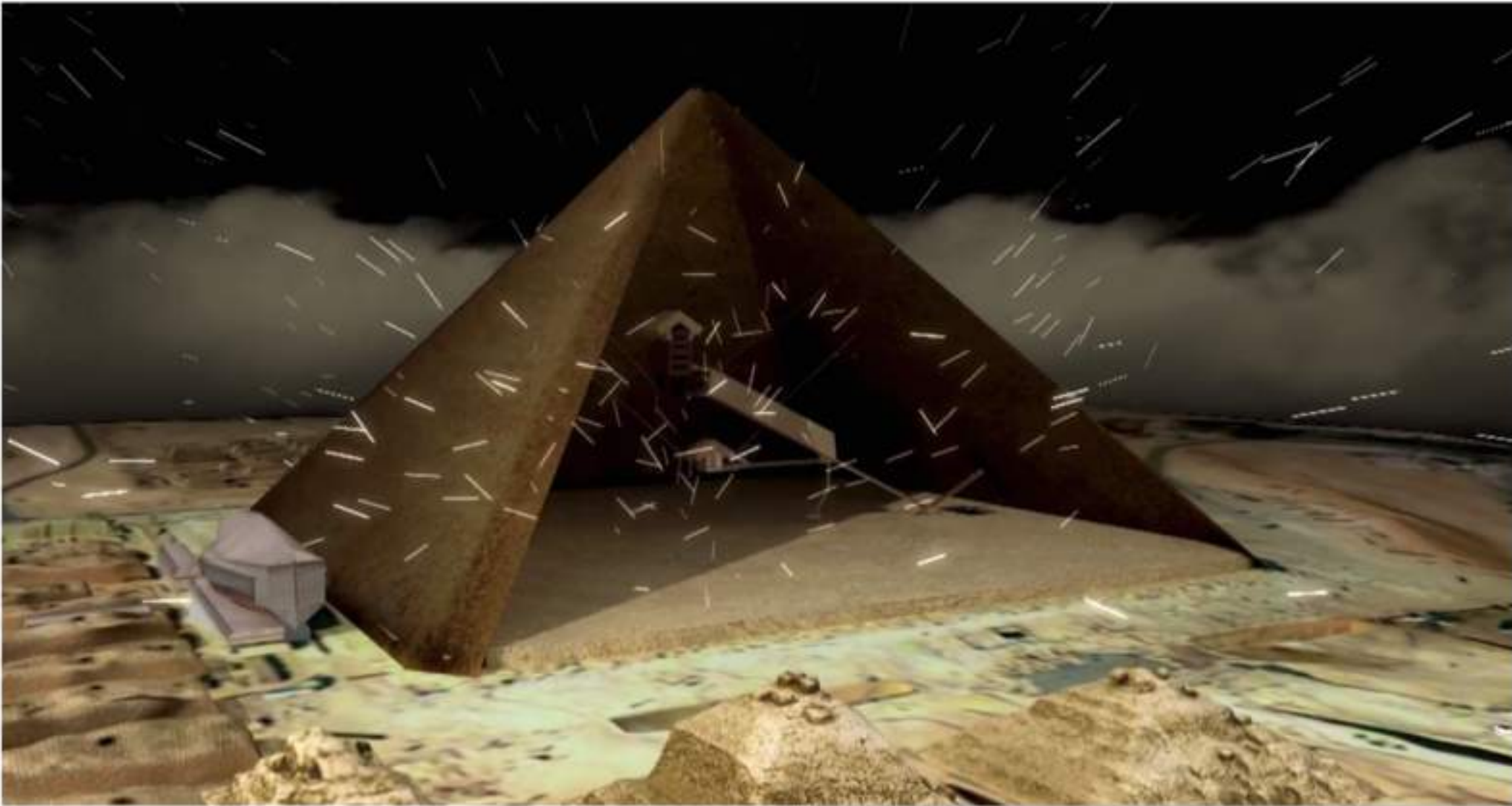
# La muongrafía



# La muongrafía



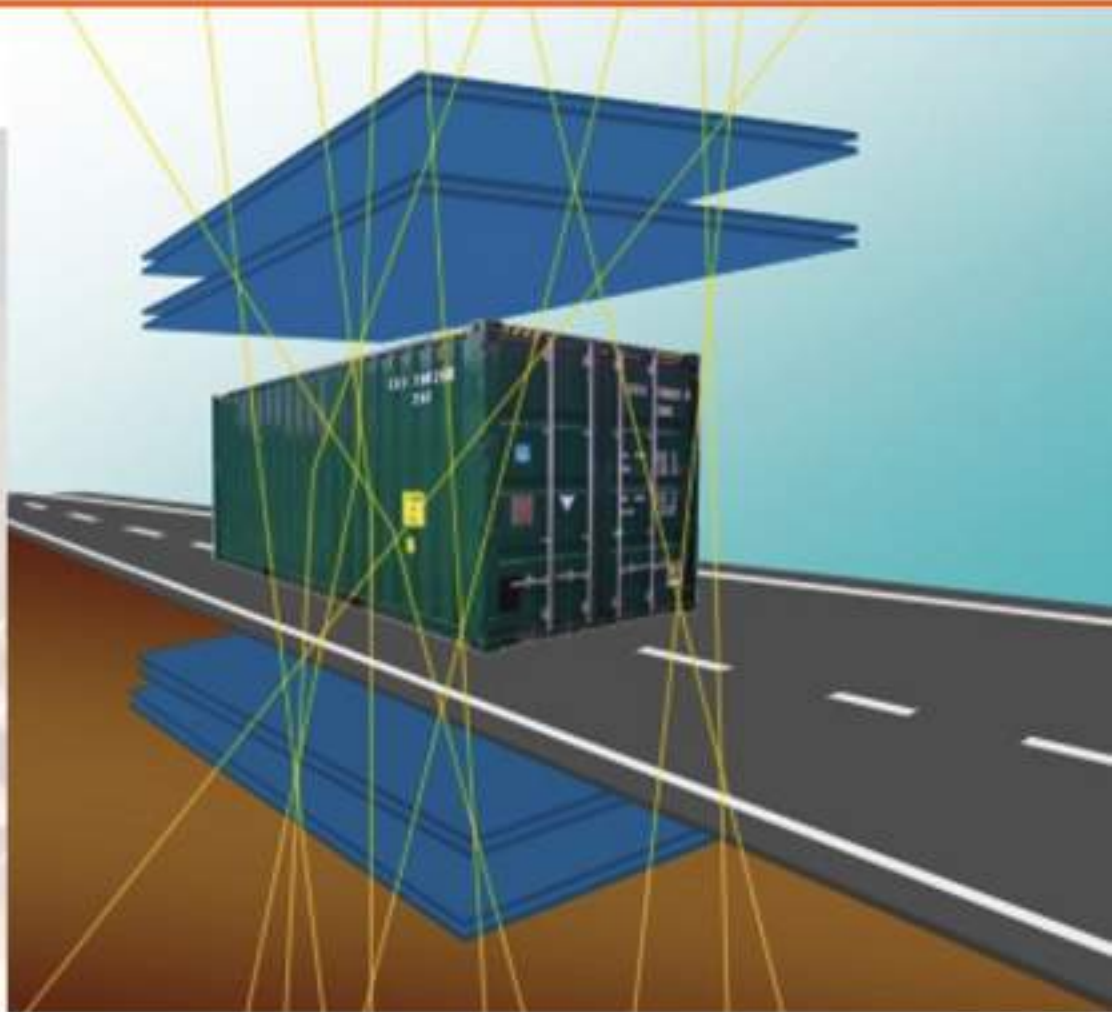
# Aplicaciones de la muongrafía



Morishima, K. et al. Nature, 552(7685):386, 2017

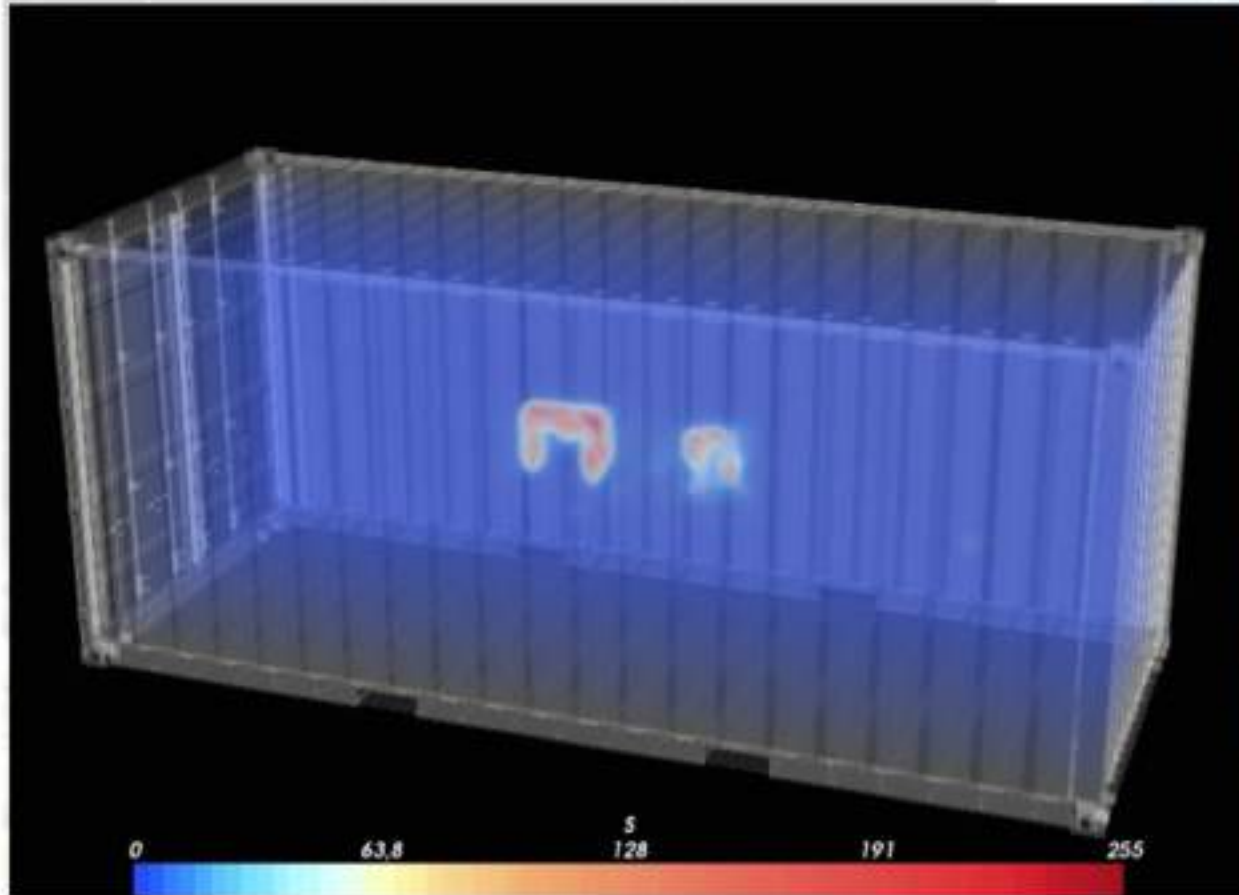


# Aplicaciones de la muongrafía



La Rocca, Paola, et al. Search for hidden high-Z materials inside containers with the Muon Portal Project. Journal of Instrumentation, 2014, vol. 9, no 01, p. C01056.

# Aplicaciones de la muongrafía



La Rocca, Paola, et al. Search for hidden high-Z materials inside containers with the Muon Portal Project. Journal of Instrumentation, 2014, vol. 9, no 01, p. C01056.



# Aplicaciones de la muongrafía



<http://ppse.in2p3.fr/Tomography%20of%20volcanoes>

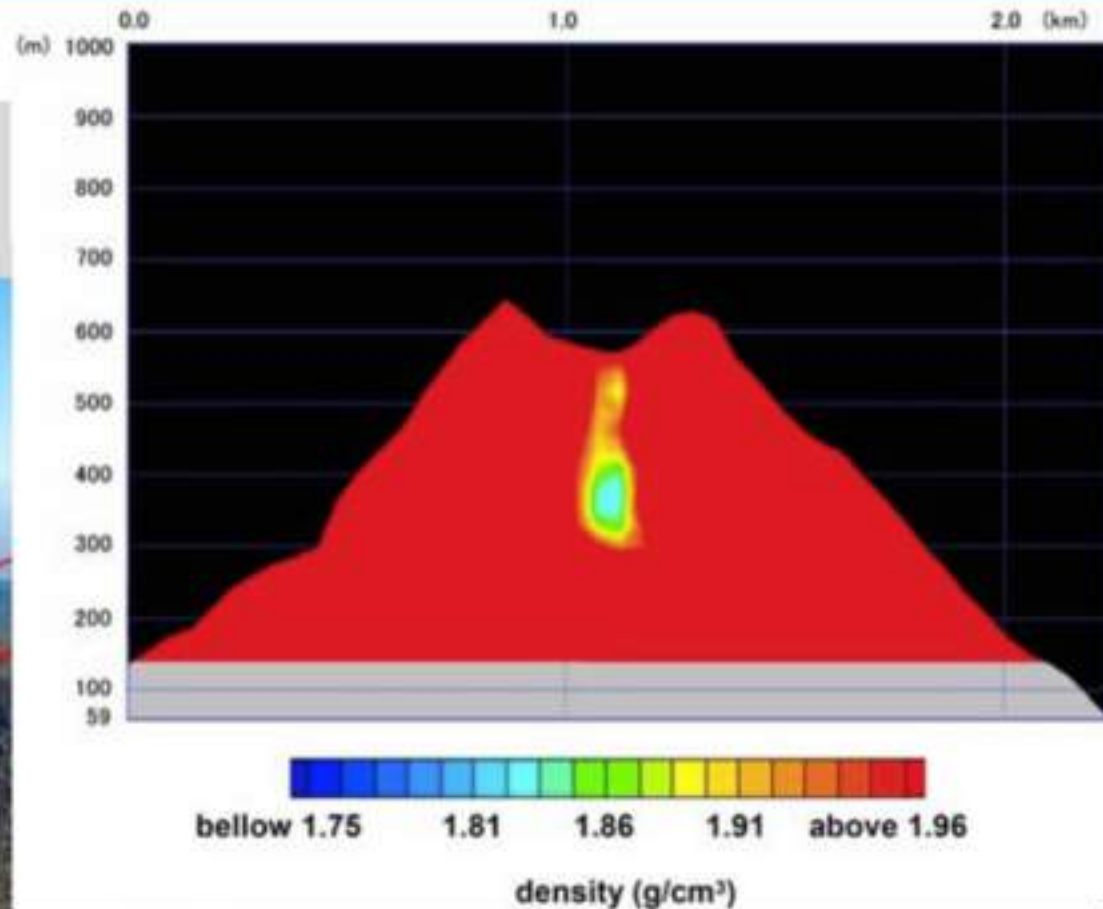
0 63.2 126 191 255



# Muongrafía de volcanes



<http://ppse.in2p3.fr/Tomography%20of%20volcanoes>

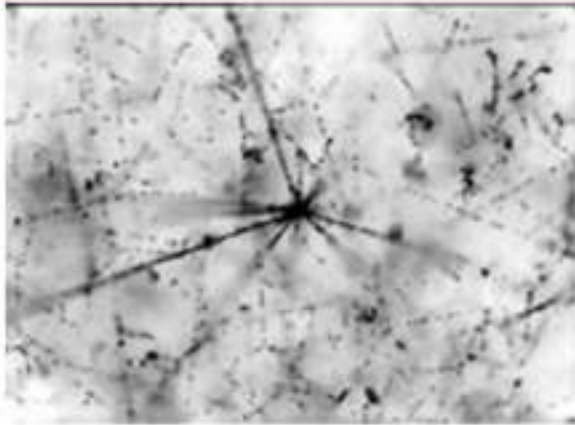


Tanaka, H.K.M., et.al. Geophys. Res. Lett. 2009

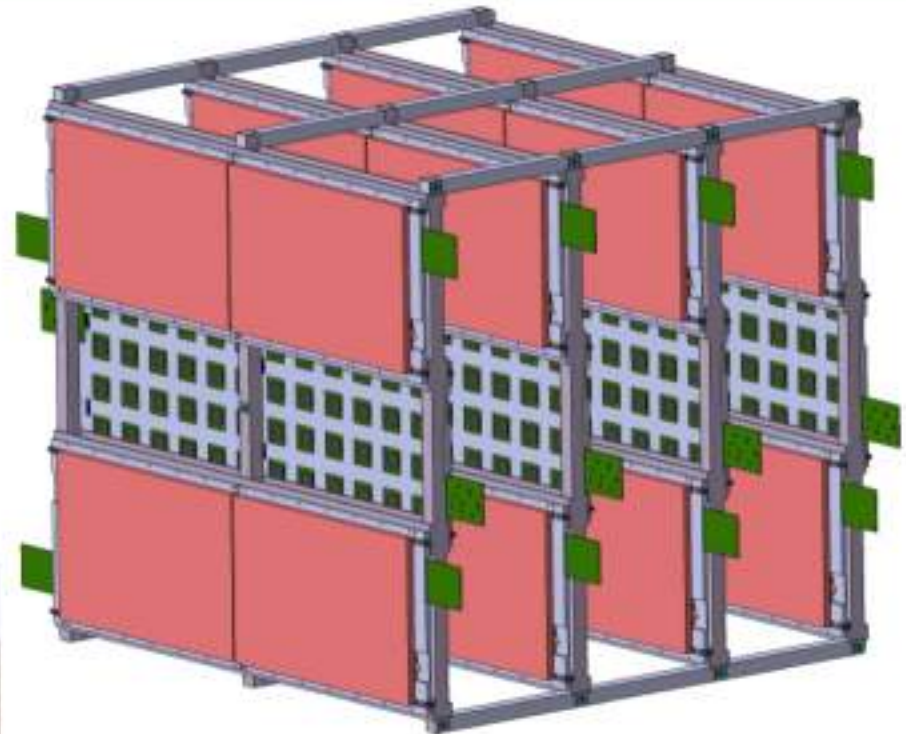
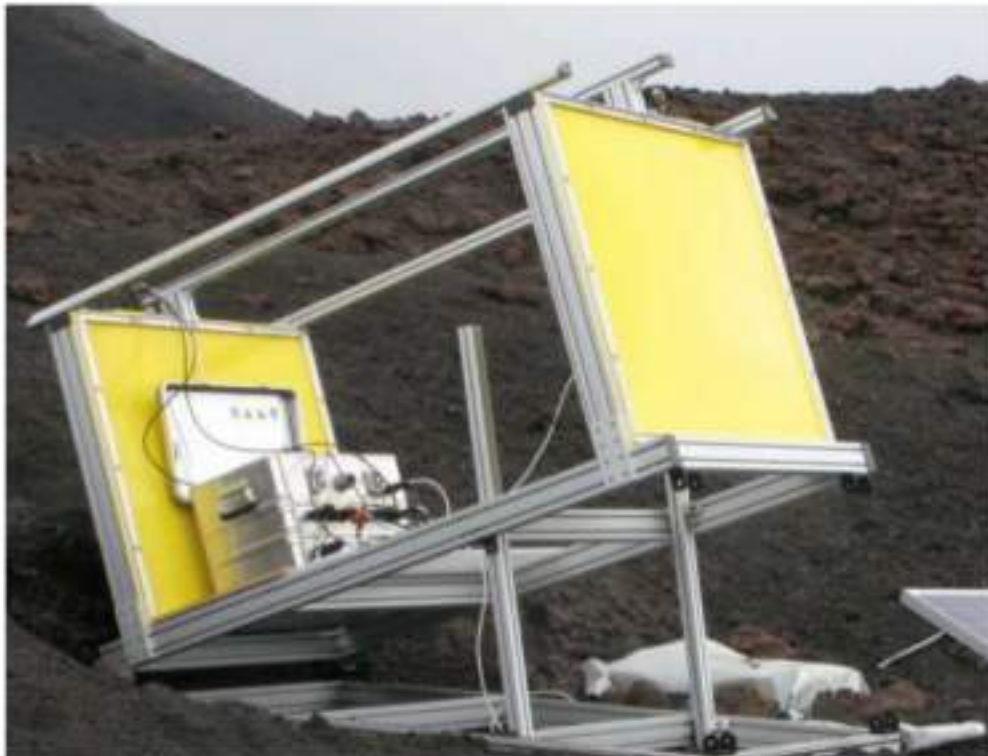
# ¿Qué detectores se utilizan?

---

# Hodoscopios para la muongrafía



a) Cámara de emulsión  
[Tanaka et al. NIMPR 575, 3 (2007)]



b) **TOMUVOL (GRPC)**  
[C'arloganu et al. GIMDS 2 (2013)]

c) **DIAPHANE (Centelladores)**  
[Lesparre et al. GIMDS 1 (2012)]

**MURAY**  
[Anastasio, A. et al. NIMPR 732 (2013)]



# El Proyecto MuTe

---

Diseñar, construir, calibrar y poner en marcha un **dispositivo** que permita ejecutar la **muongrafía** de volcanes en Colombia.



# ¿Cómo es el detector MuTe?

---

# El detector híbrido MuTe

Detector Cherenkov de agua

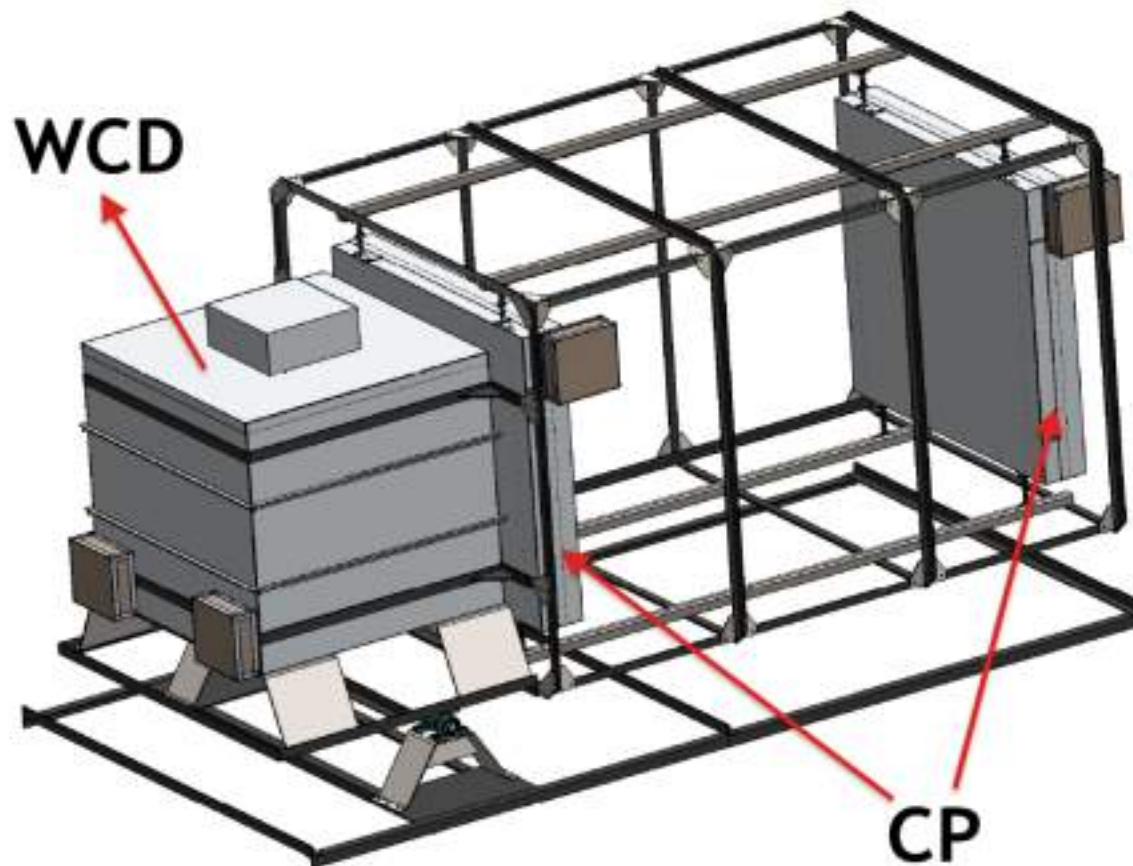
+

Hodoscopio

=



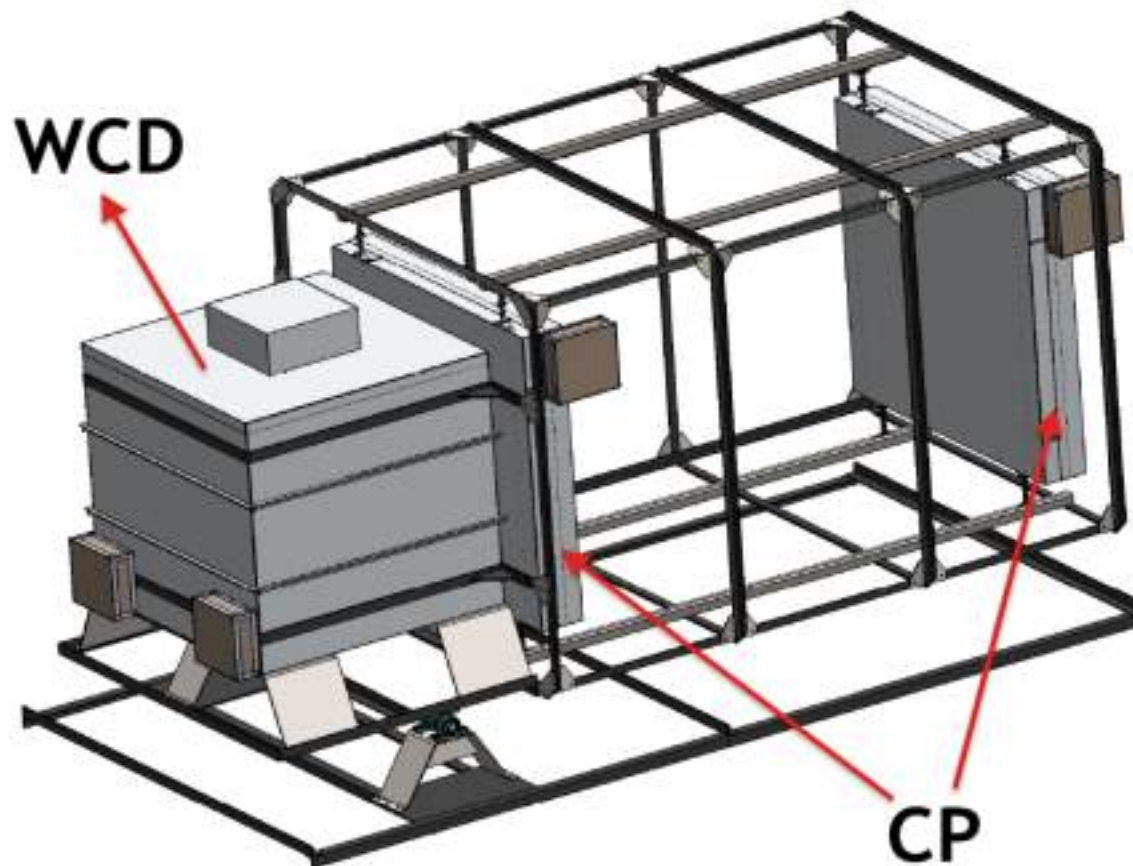
MuTe



# El detector híbrido MuTe

- Dirección de arriba

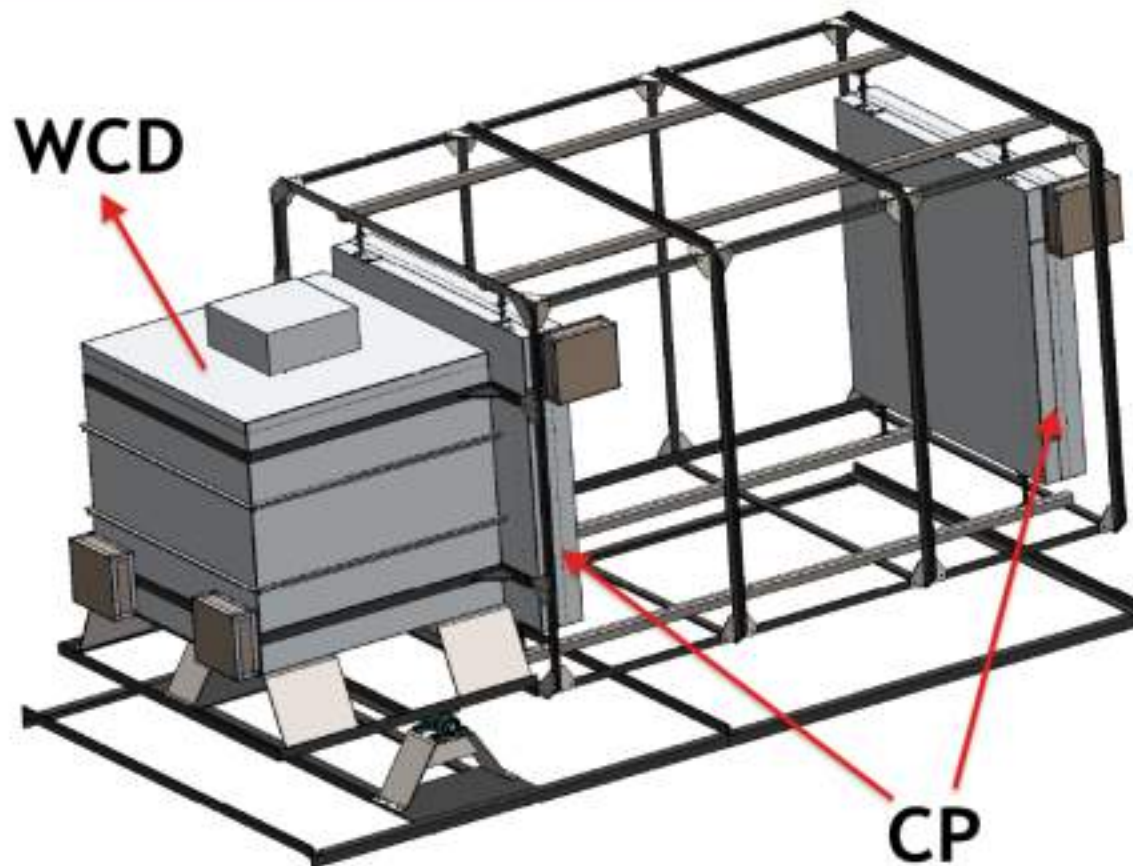
Detector Cherenkov de agua + Hodoscopio = MuTe



# El detector híbrido MuTe

- Diferenciar entre las componentes de las Cascadas Atmosféricas Extendidas.
- Dirección de arribo

Detector Cherenkov de agua + Hodoscopio = MuTe

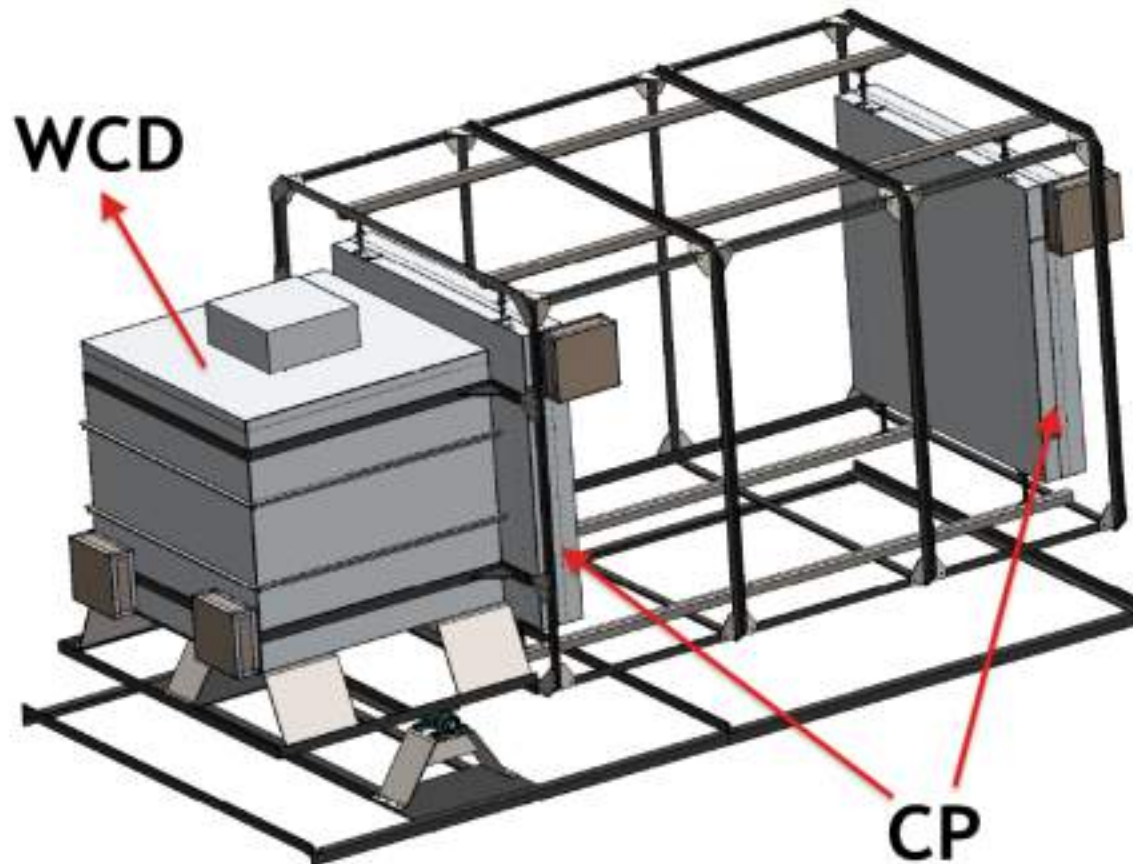




# El detector híbrido MuTe

- Diferenciar entre las componentes de las Cascadas Atmosféricas Extendidas.
- Discriminar partículas que vienen del volcán.
- Dirección de arribo

**Detector Cherenkov de agua** + **Hodoscopio** = **MuTe**

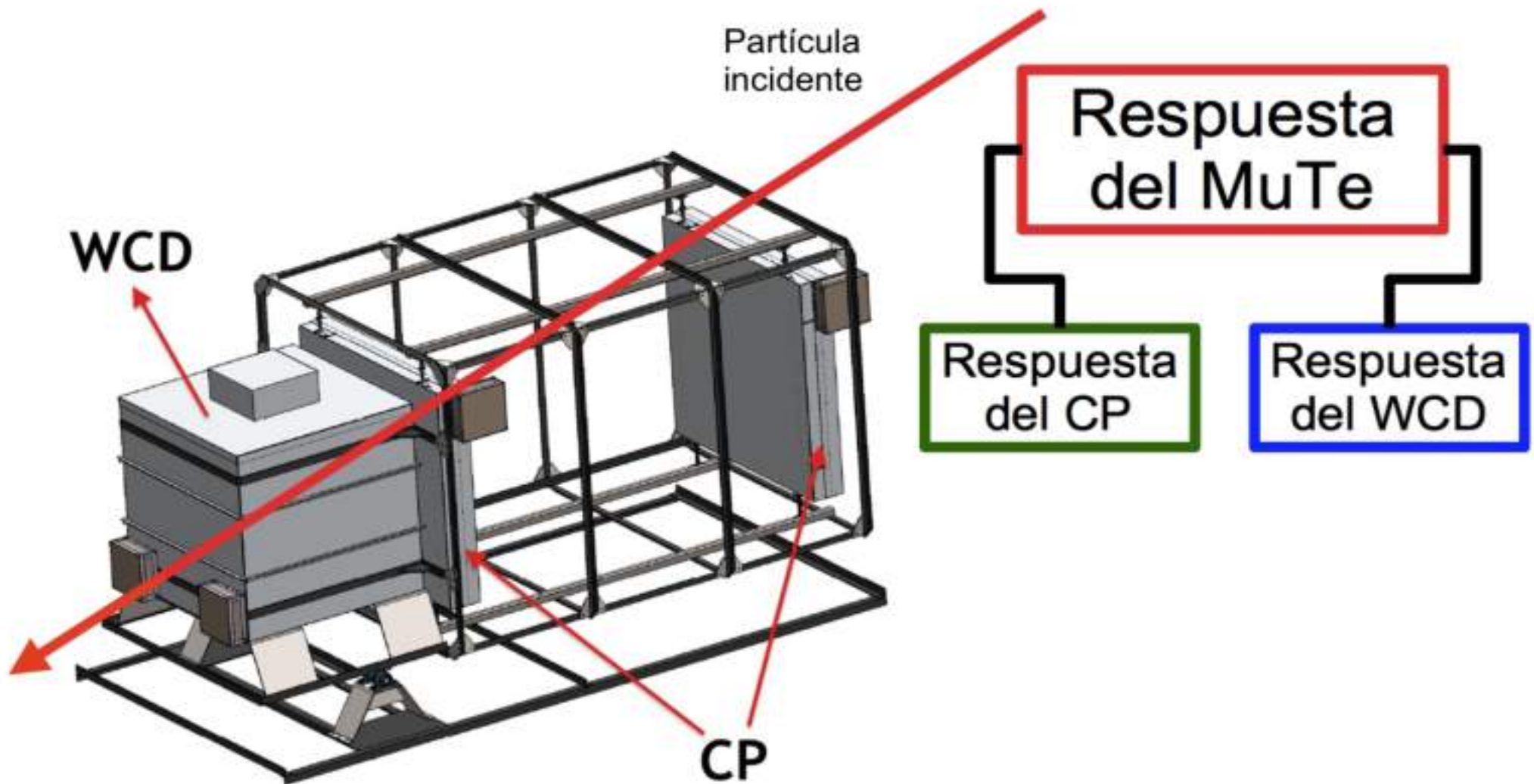


Si el MuTe está compuesto de **dos** detectores independientes,

---

¿Cómo **responde** ante partículas cargadas?

# Estimación de la respuesta del MuTe

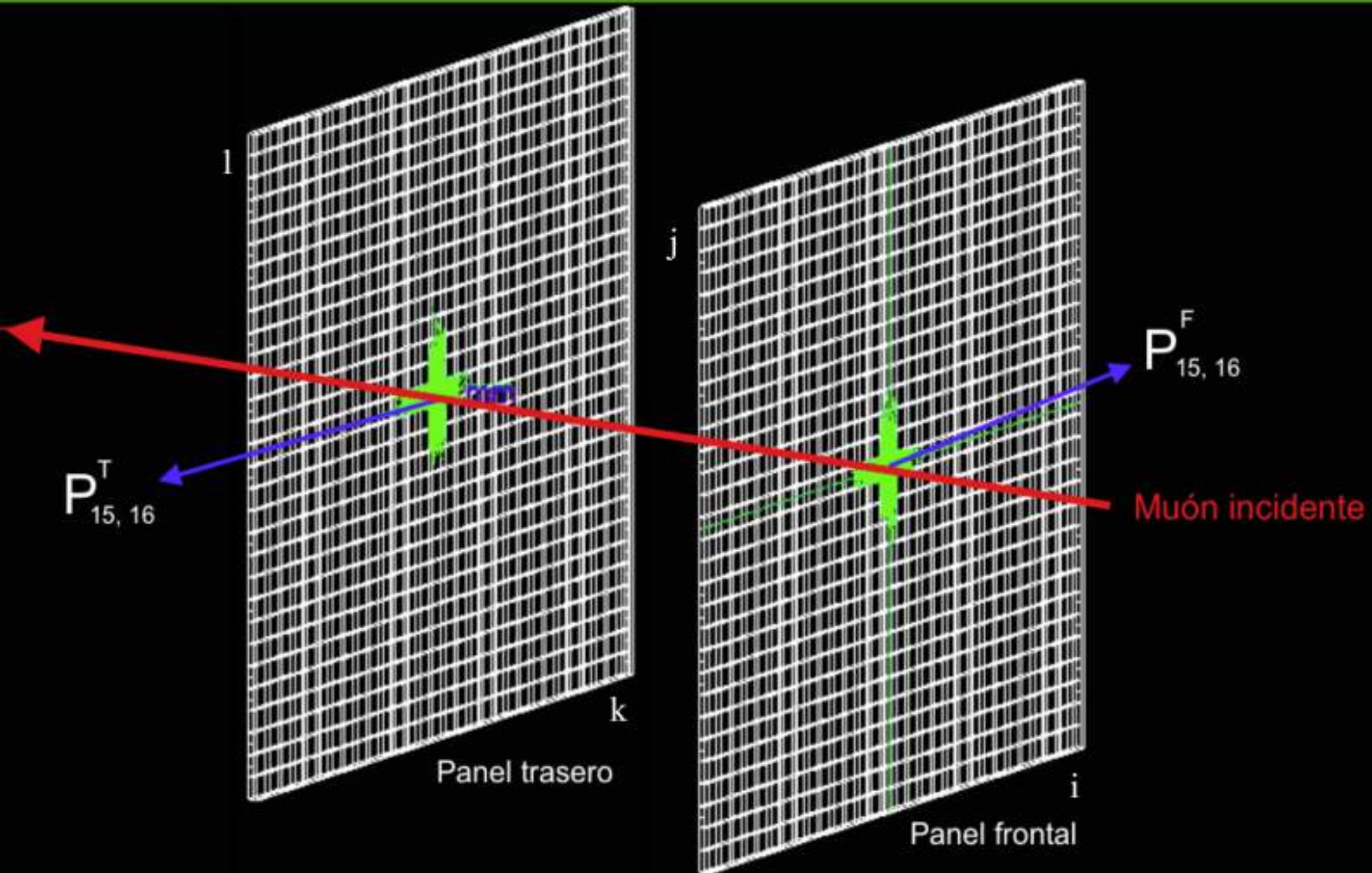


# El hodoscopio del MuTe

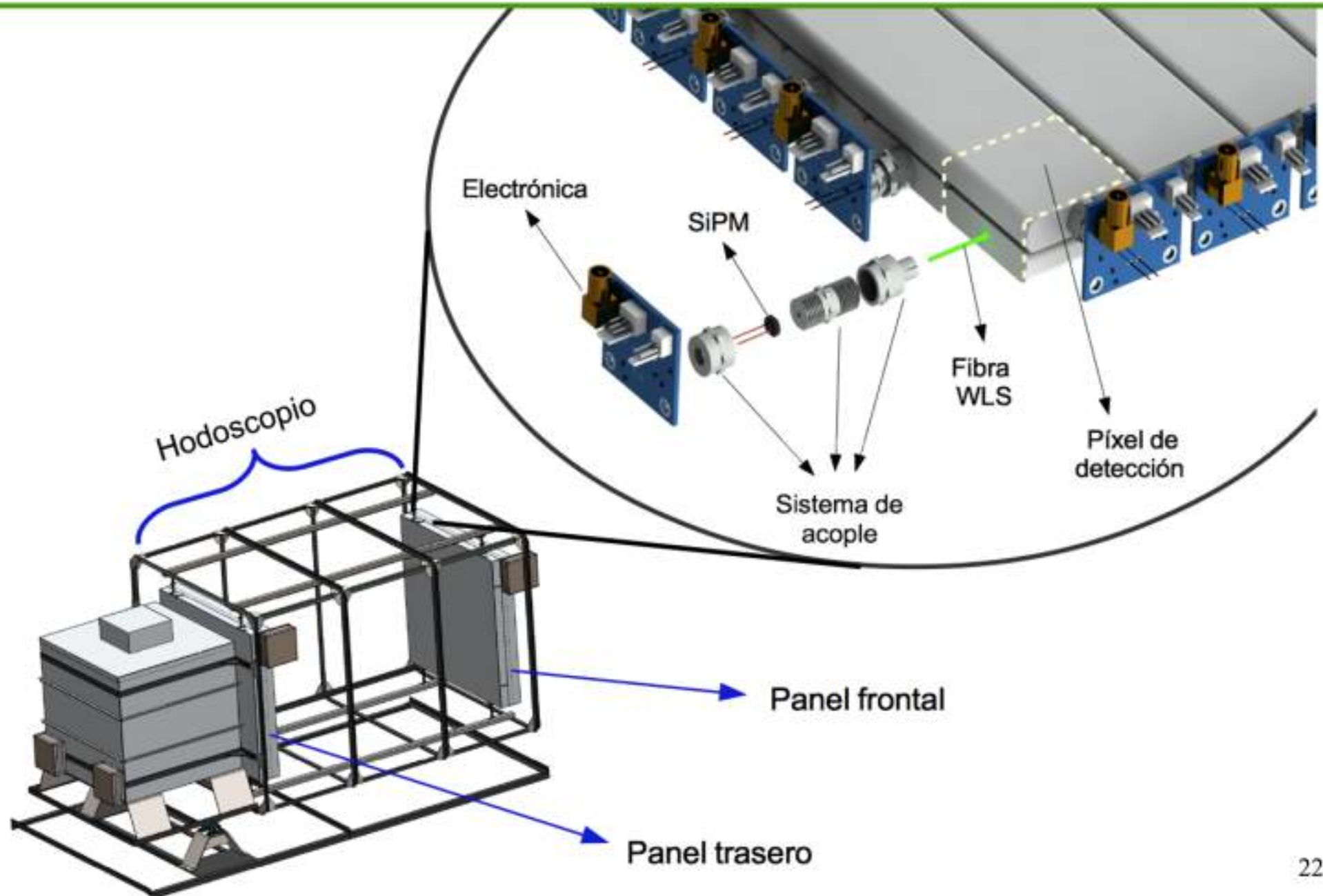
---



# Hodoscopio simulado en Geant4

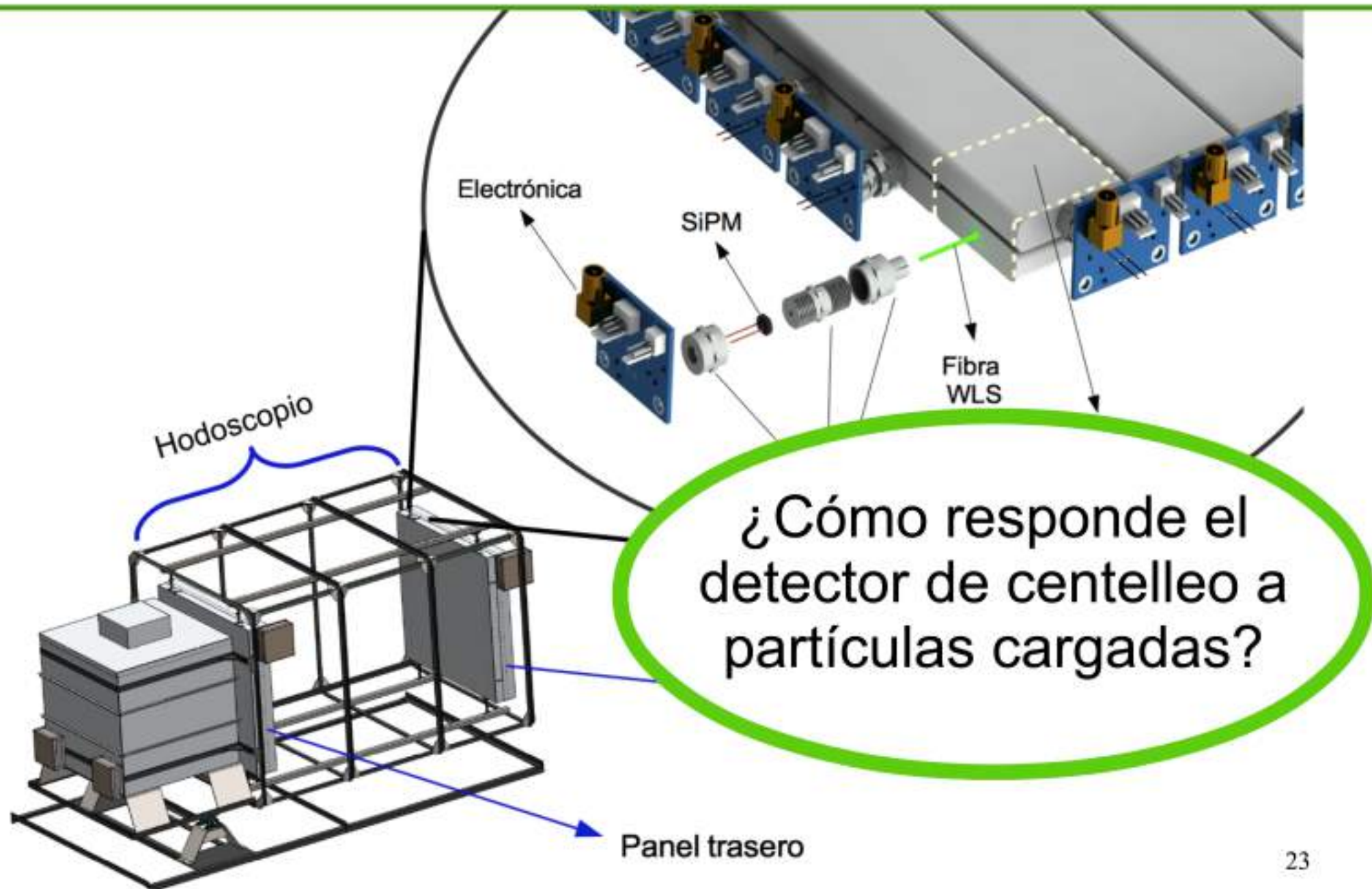


# El hodoscopio del MuTe





# El hodoscopio del MuTe

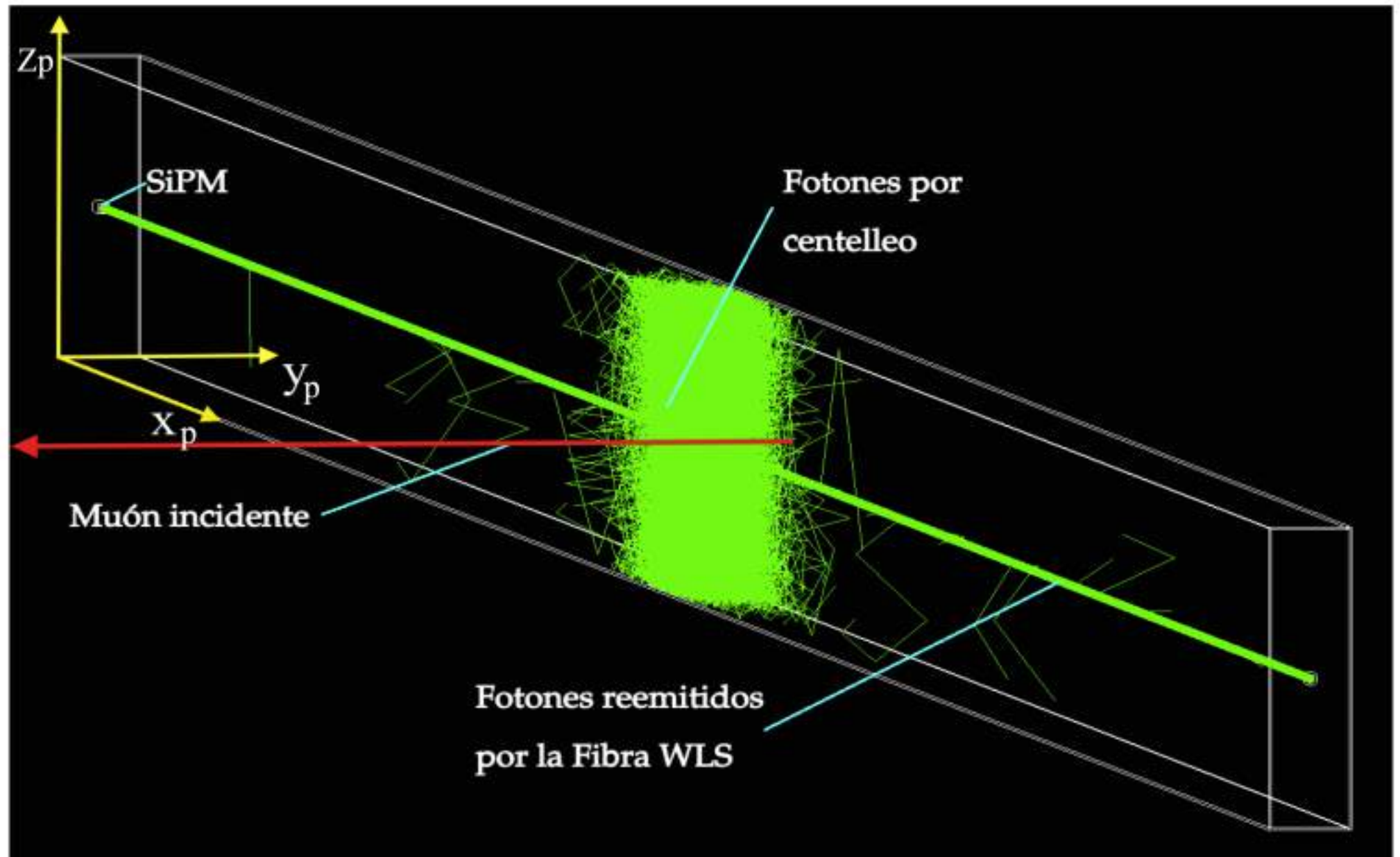


# Respuesta del detector de centelleo

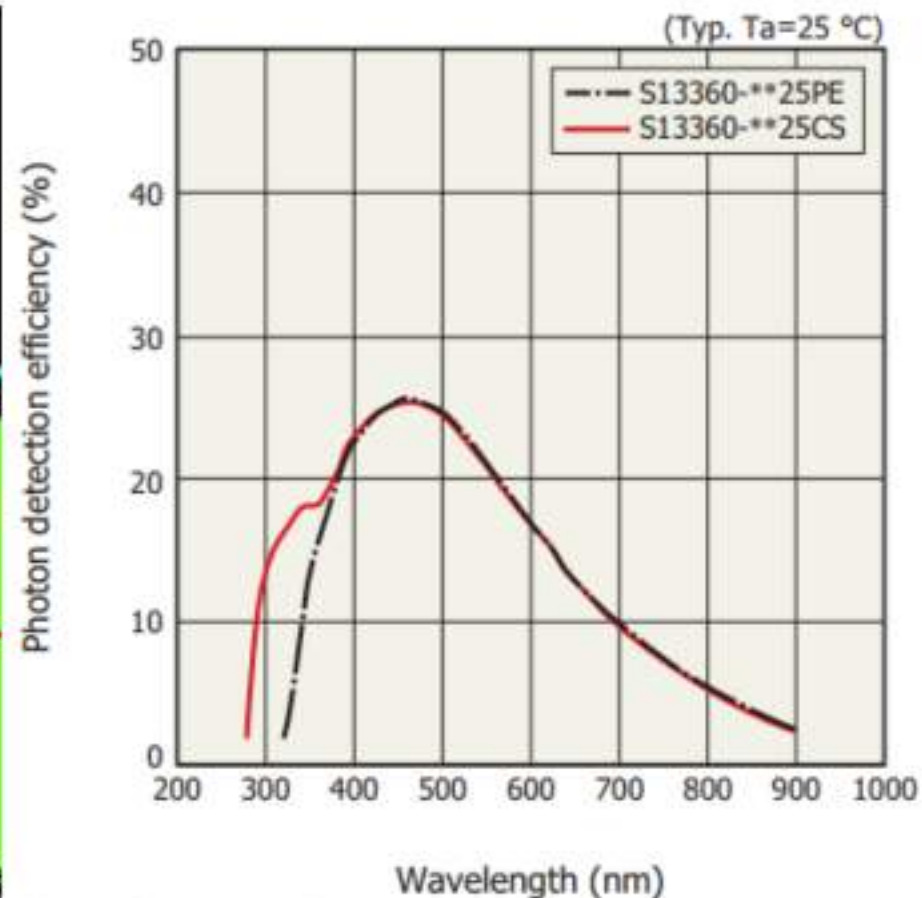
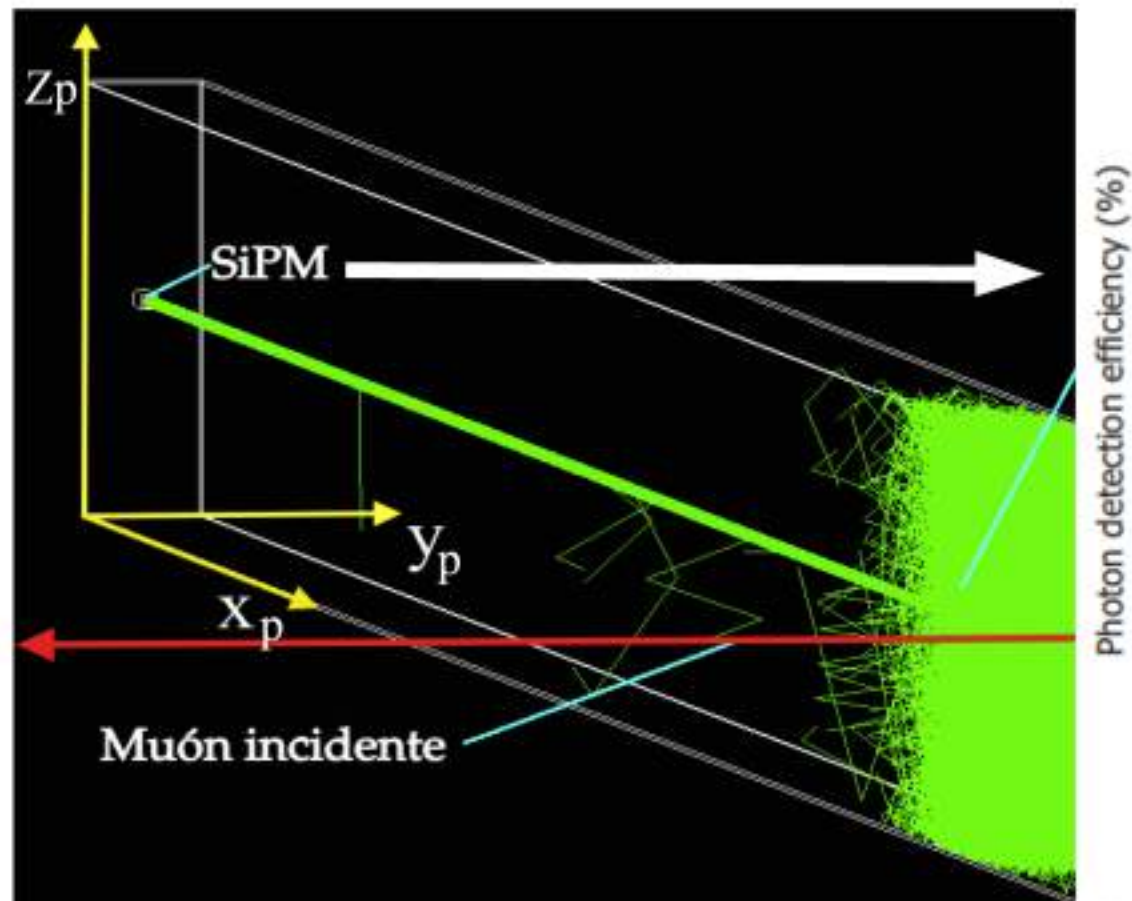
---



# Detector de centelleo en Geant4



# Detector de centelleo en Geant4



SiPM S13360-1325PE Hamamatsu <https://goo.gl/cRsRz2>

Fotones reemitidos  
por la Fibra WLS

# Respuesta del detector de centelleo

Se simula el paso de muones de 3 GeV en diferentes posiciones respecto a la barra

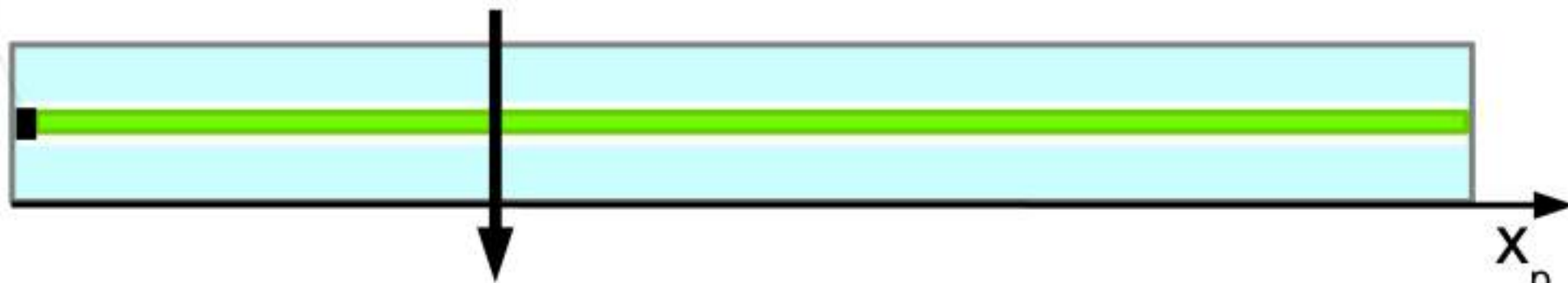
$$x_p = (2 + 4n)\text{cm}$$

$$y_p = 1\text{cm}$$

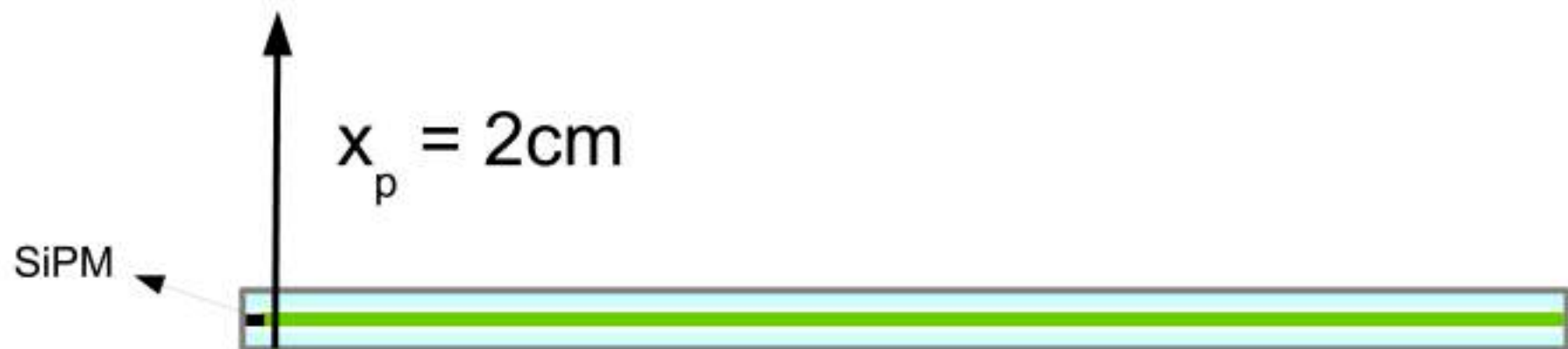
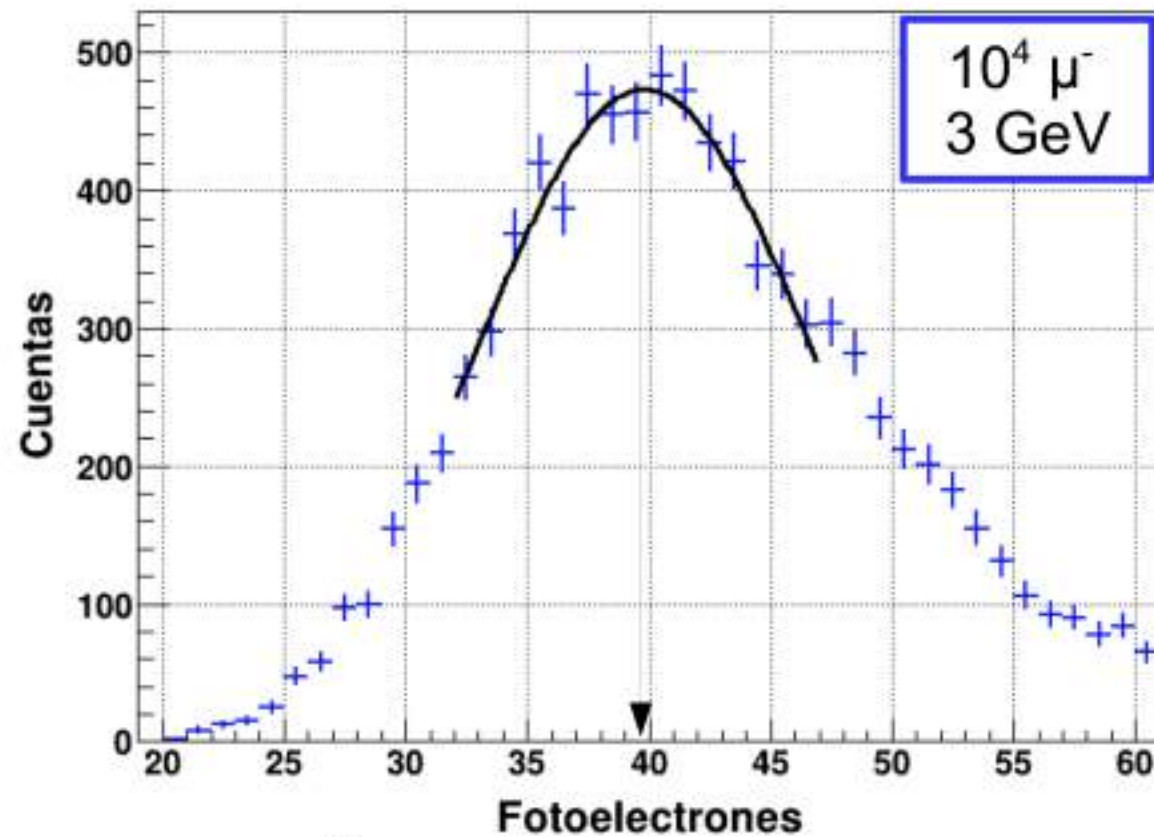
$$z_p = 2\text{cm}$$

SiPM

P



# Resultado:



# Resultado:

---

$$x_p = (2 + 4n)\text{cm}$$

$$y_p = 1\text{cm}$$

$$z_p = 2\text{cm}$$





# Resultado:

---

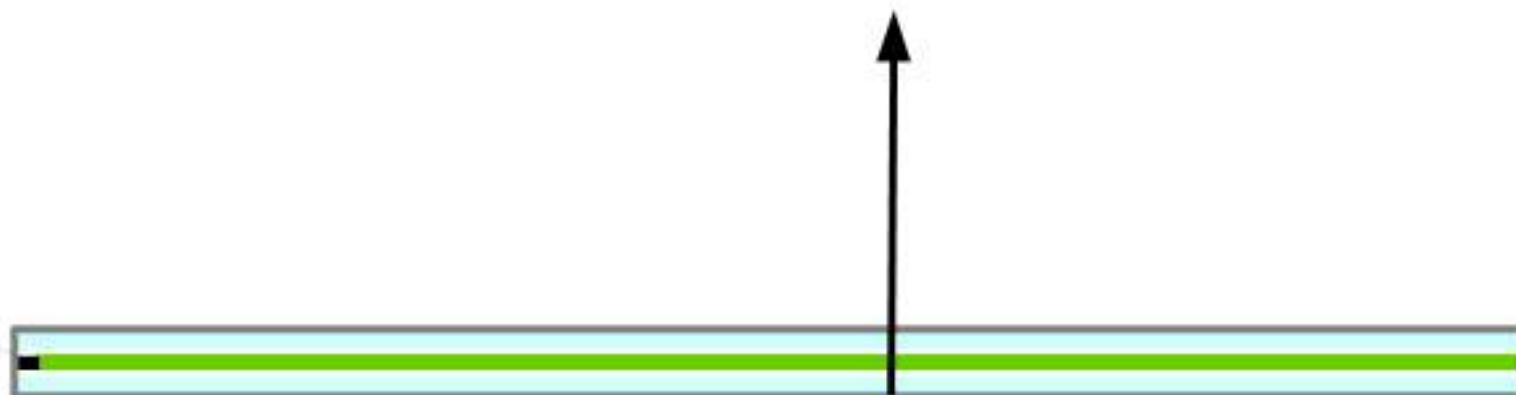
$$x_p = (2 + 4n)\text{cm}$$

$$y_p = 1\text{cm}$$

$$z_p = 2\text{cm}$$

■ ■

SiPM



# Resultado:

---

$$x_p = (2 + 4n)\text{cm}$$

$$y_p = 1\text{cm}$$

$$z_p = 2\text{cm}$$

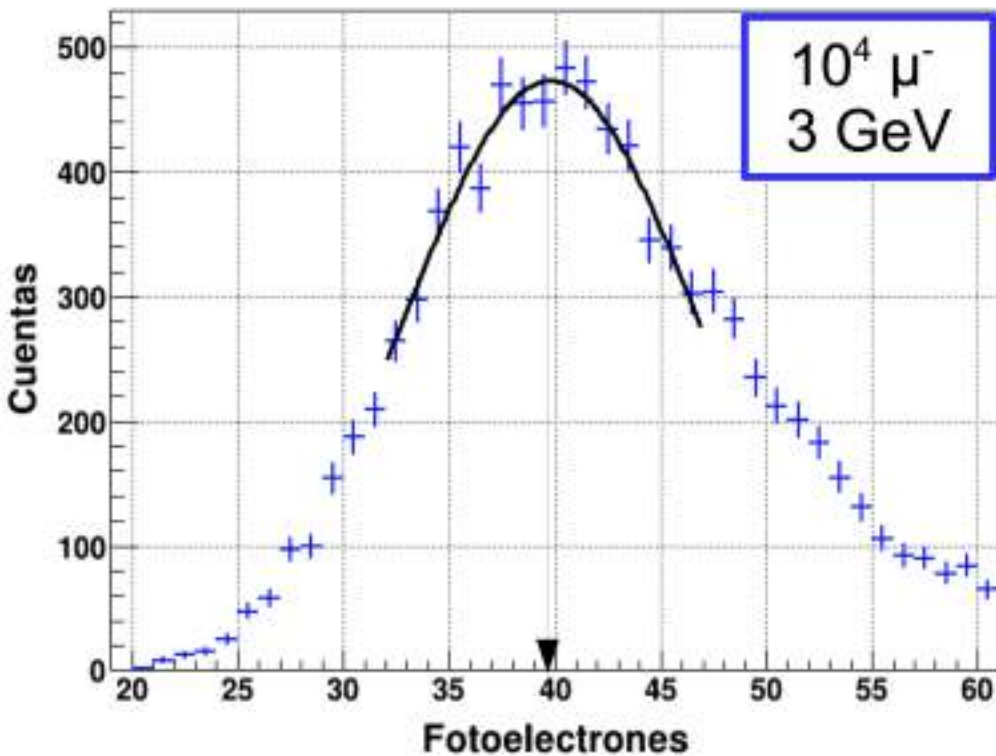
■ ■ ■

SiPM

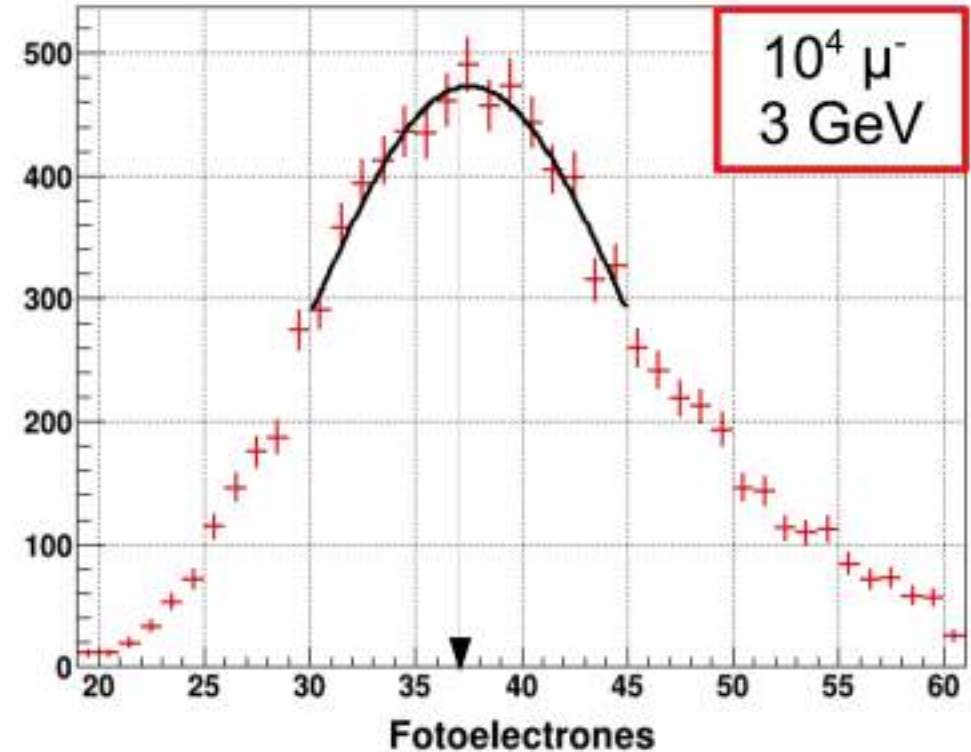


# Resultado:

El número medio de fotoelectrones disminuye con el aumento de la distancia al SiPM



$x_p = 2\text{cm}$

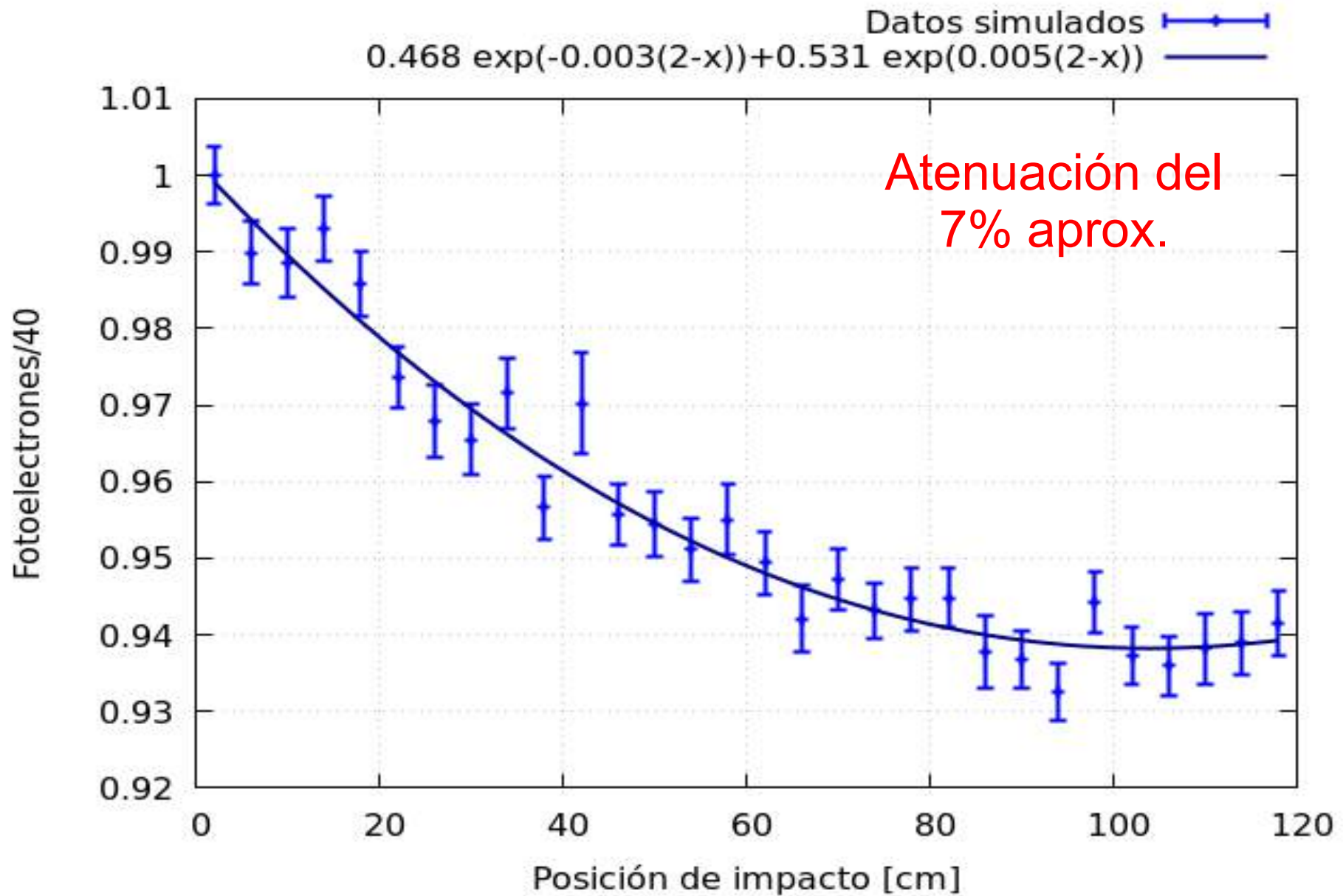


$x_p = 118\text{cm}$

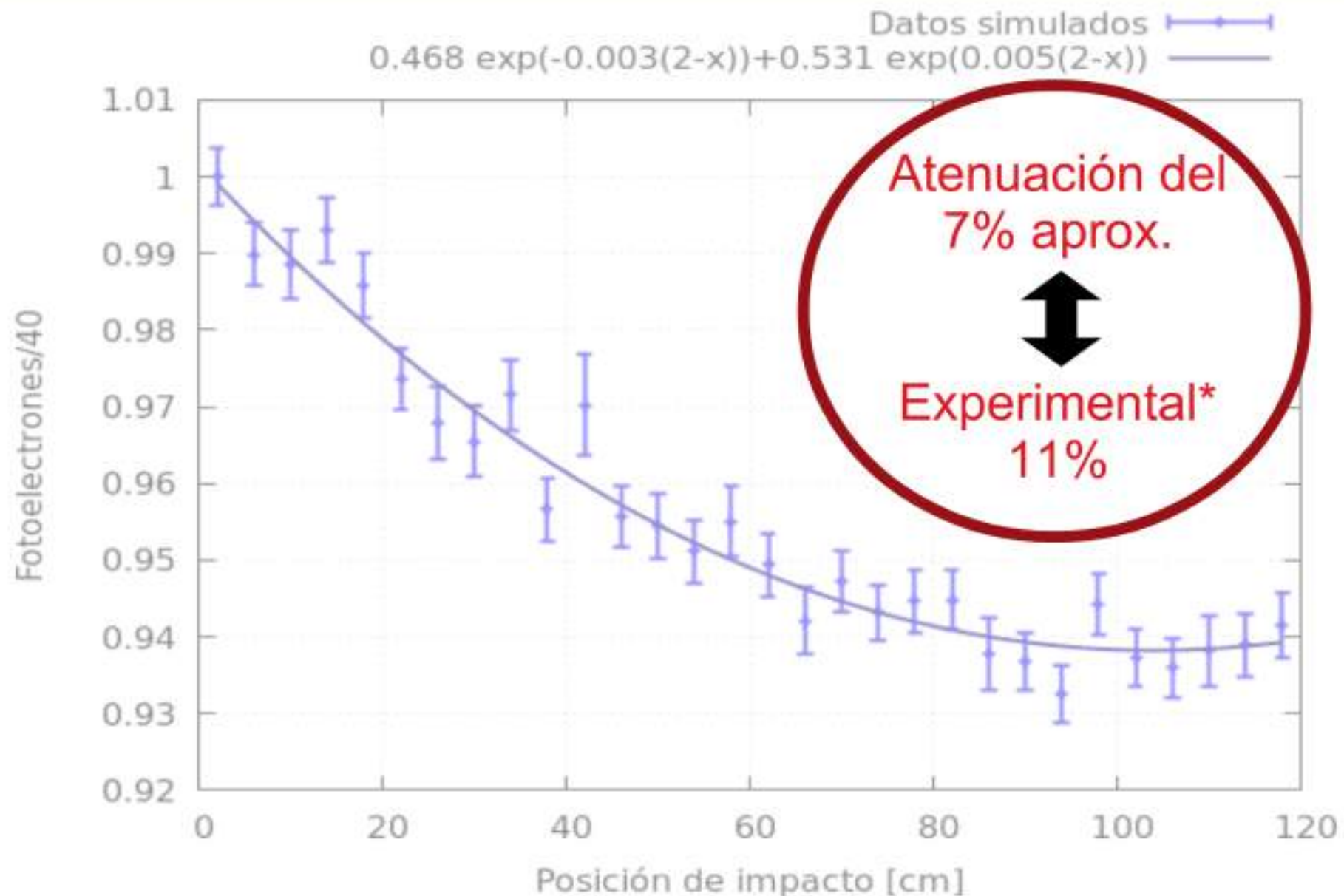
SiPM



# Resultado: Estimación de la atenuación



# Resultado: Estimación de la atenuación



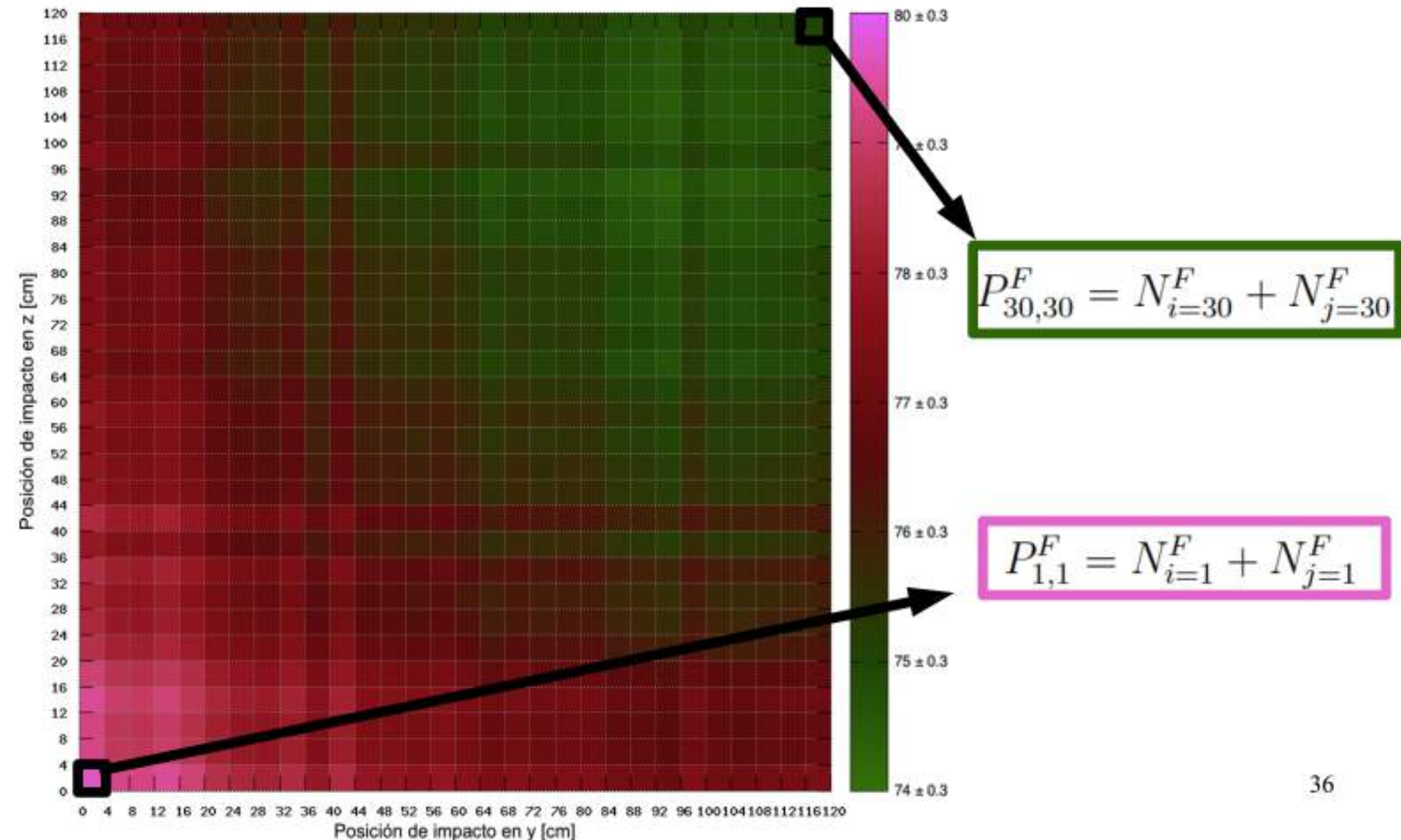
\*Calderón-Ardila, R. Estudio de centelladores plásticos en el proyecto MuTe para muongrafía de volcanes. UIS, 2018.



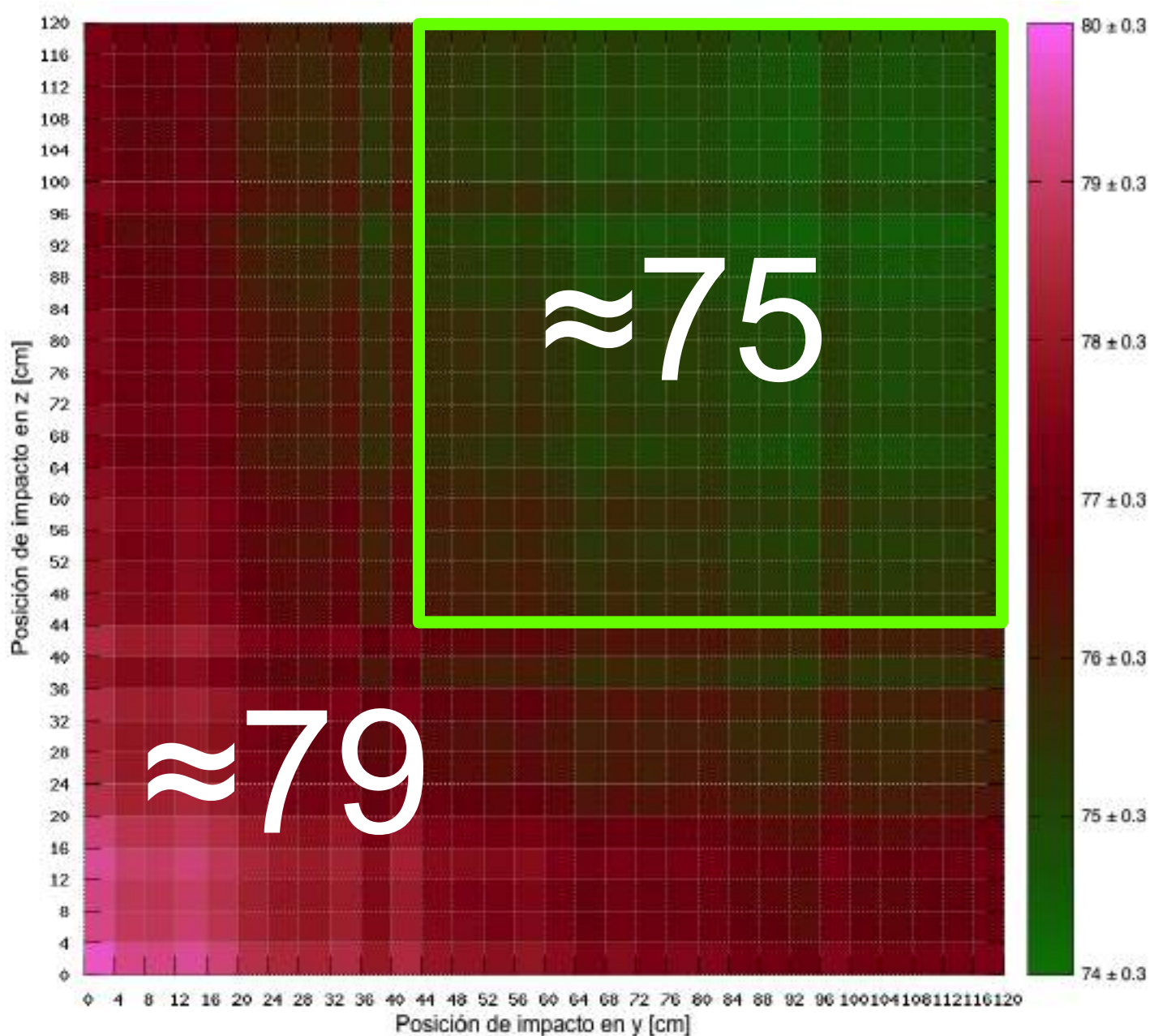
# Respuesta de los paneles del hodoscopio

---

# Respuesta de los paneles del hodoscopio



# Respuesta de los paneles del hodoscopio

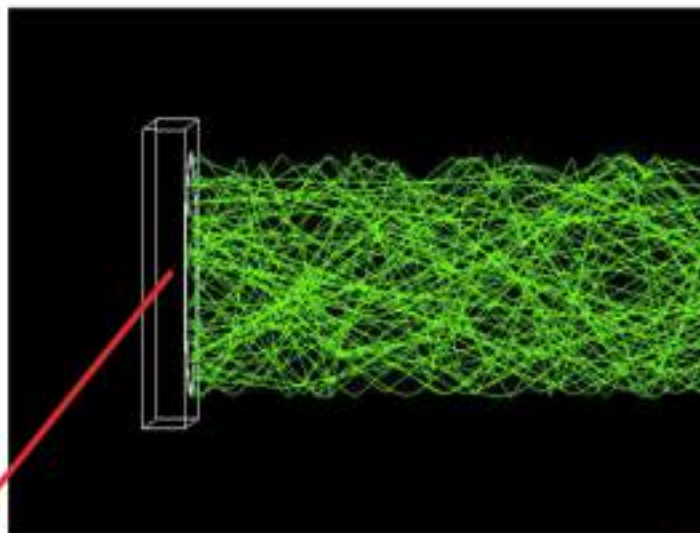


# Ubicación del SiPM

---

# Ubicación del SiPM

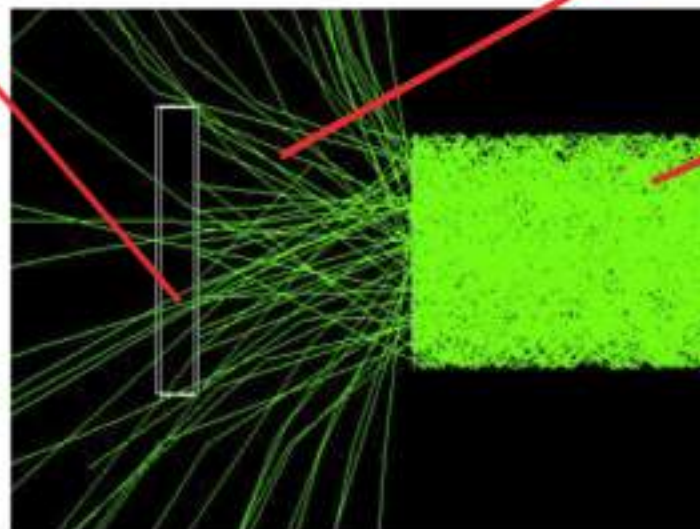
Caso ideal



Aire ( $n=1$ )

SiPM

Distancia entre  
el SiPM  
y la fibra de  
1.15 mm



Fibra ( $n=1.6$ )

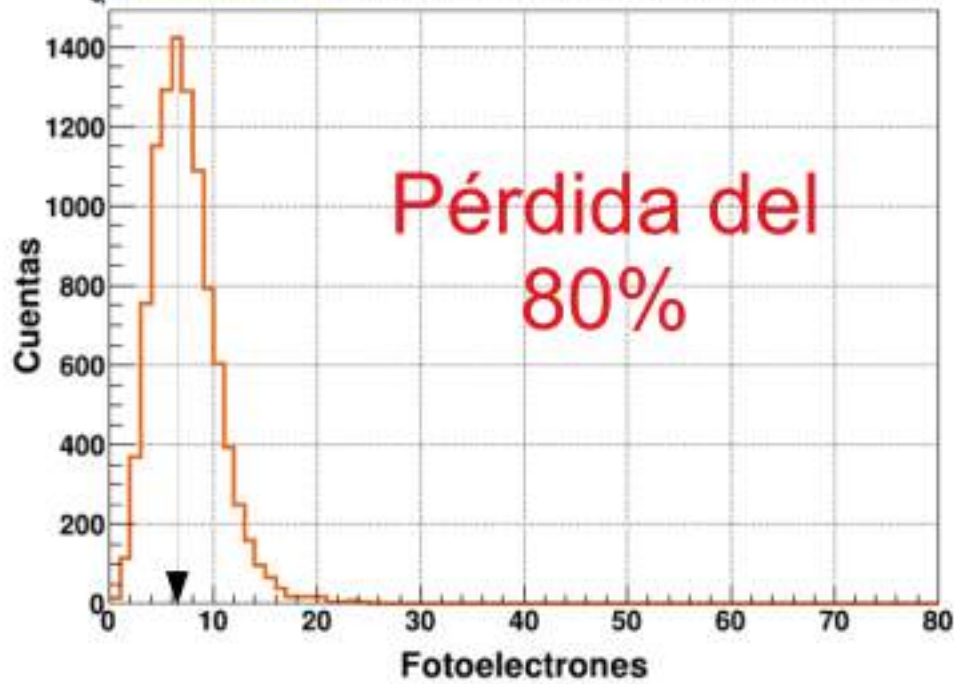


# Ubicación del SiPM

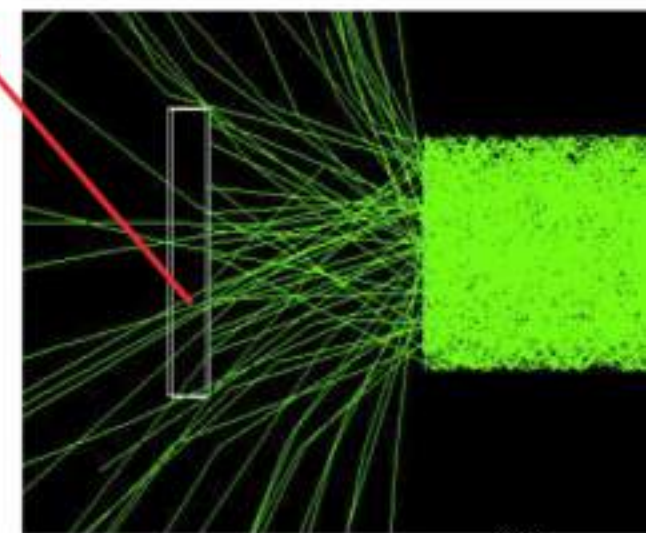
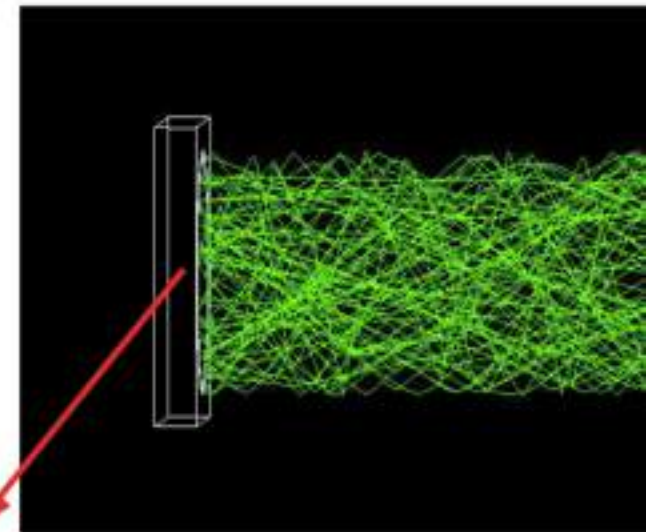
Caso ideal



Distancia entre el SiPM y la fibra de 1.15 mm



SiPM



# Respuesta del Hodoscopio

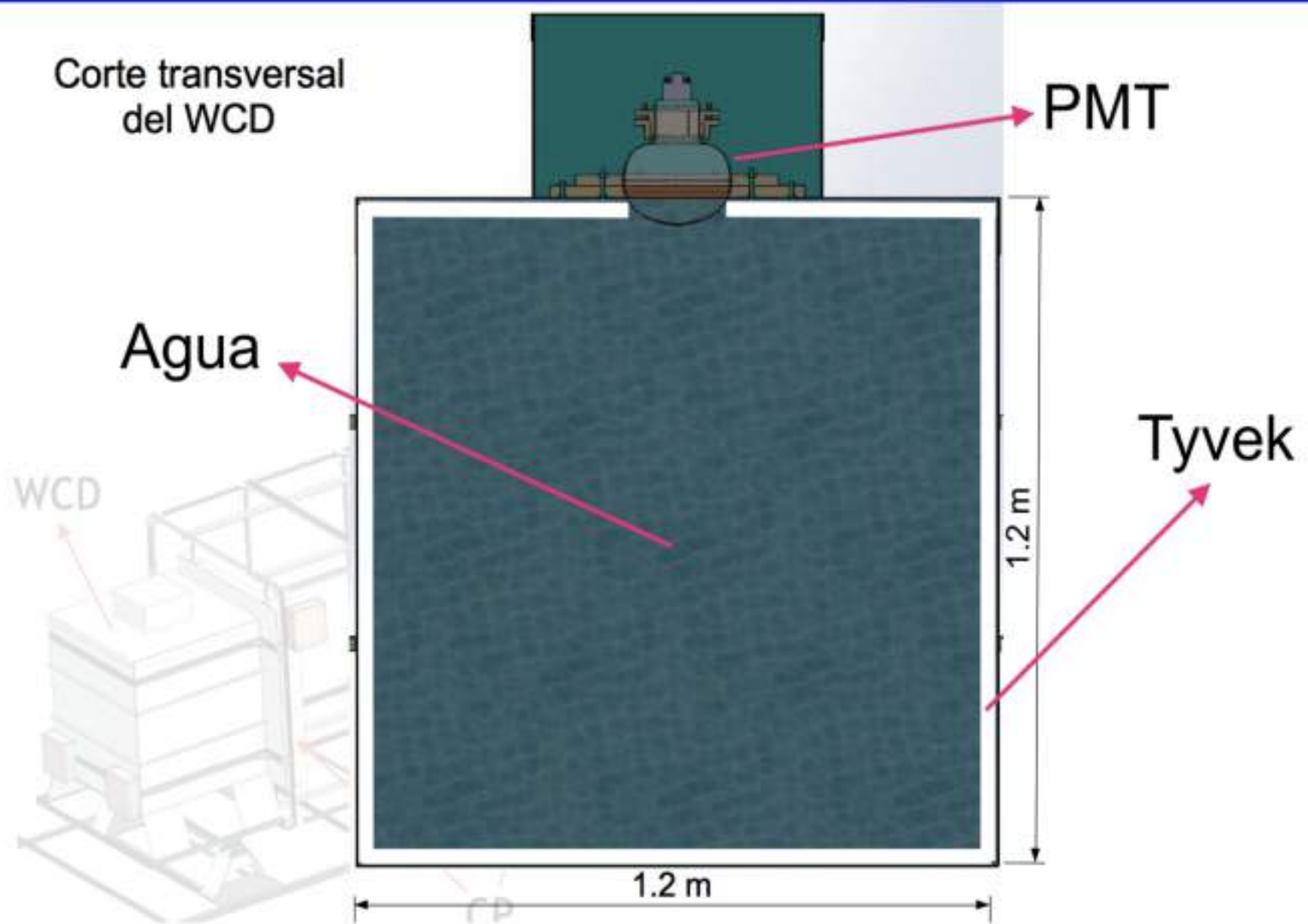
---

- La atenuación del número de fotoelectrones en el detector de centelleo simulado es del 7%, que está acorde a la atenuación experimental del 11%.
- Esta atenuación marca dos zonas en los paneles del hodoscopio, donde el número de fotoelectrones generados por un muón de 3 GeV es de 75 y 79 aproximadamente.
- Un acople deficiente puede originar el 80% de pérdida de señal, si la distancia entre el SiPM y la fibra es de 1.15 mm.

# El WCD del MuTe

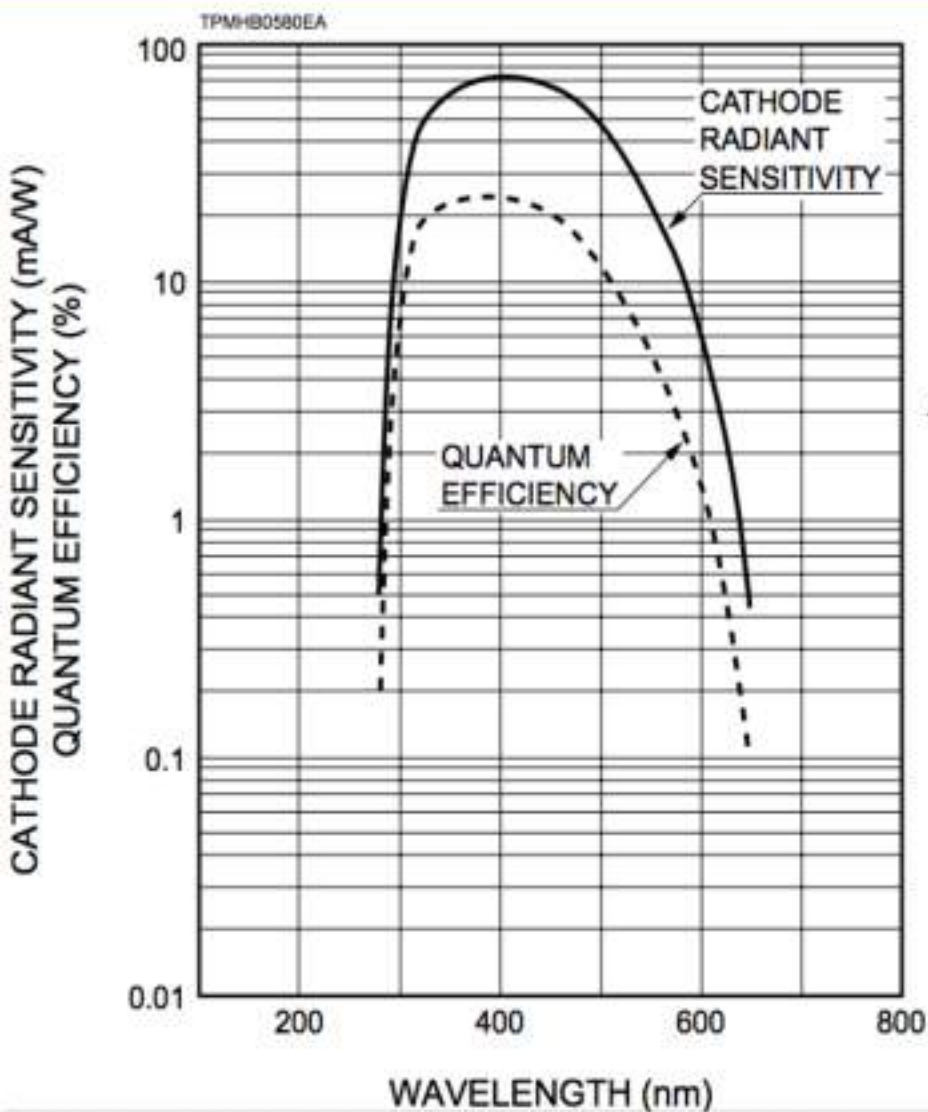
---

# El WCD del MuTe

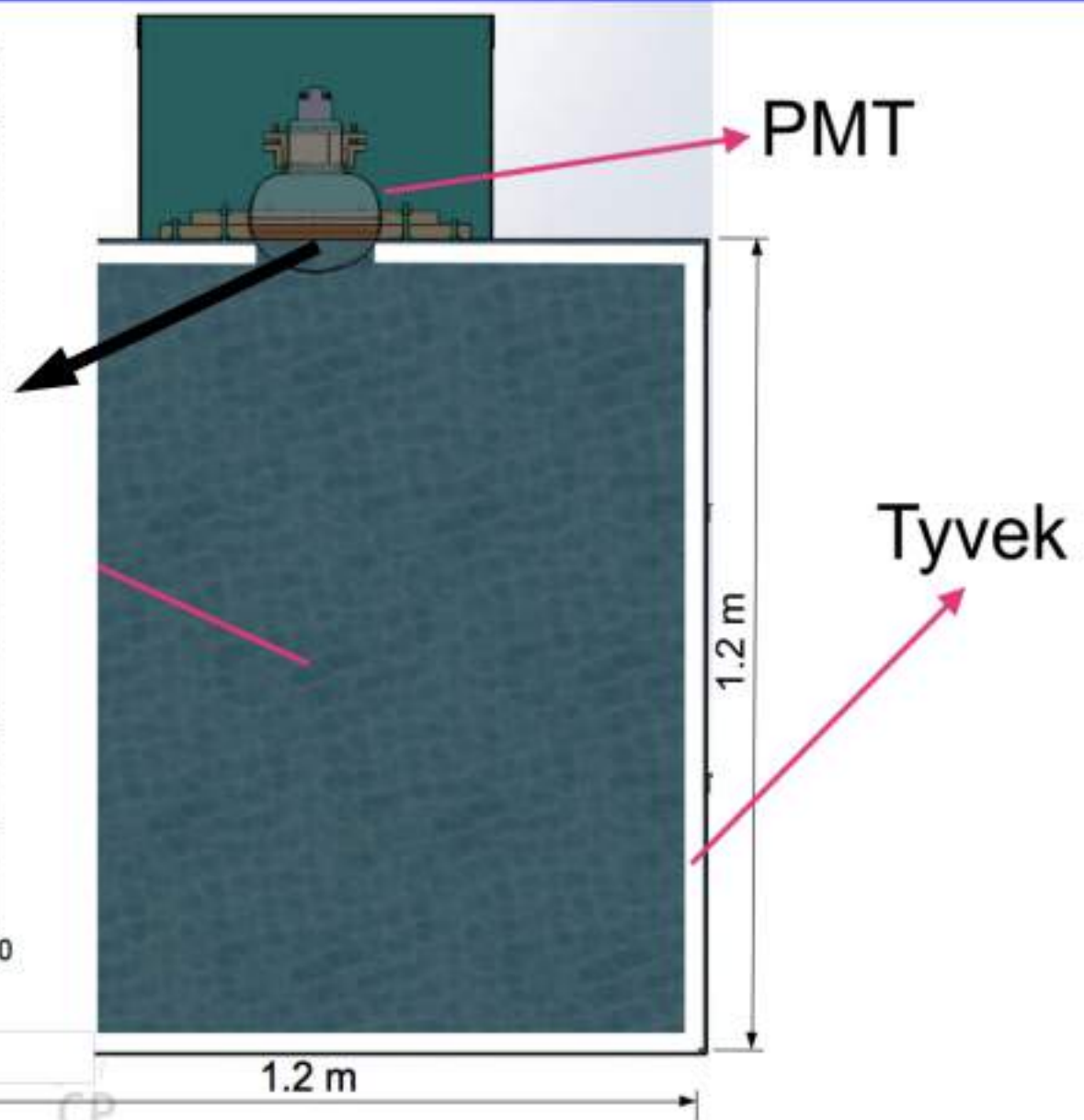




# El WCD del MuTe



PMT R5912 de Hamamatsu <https://goo.gl/HwDTre>

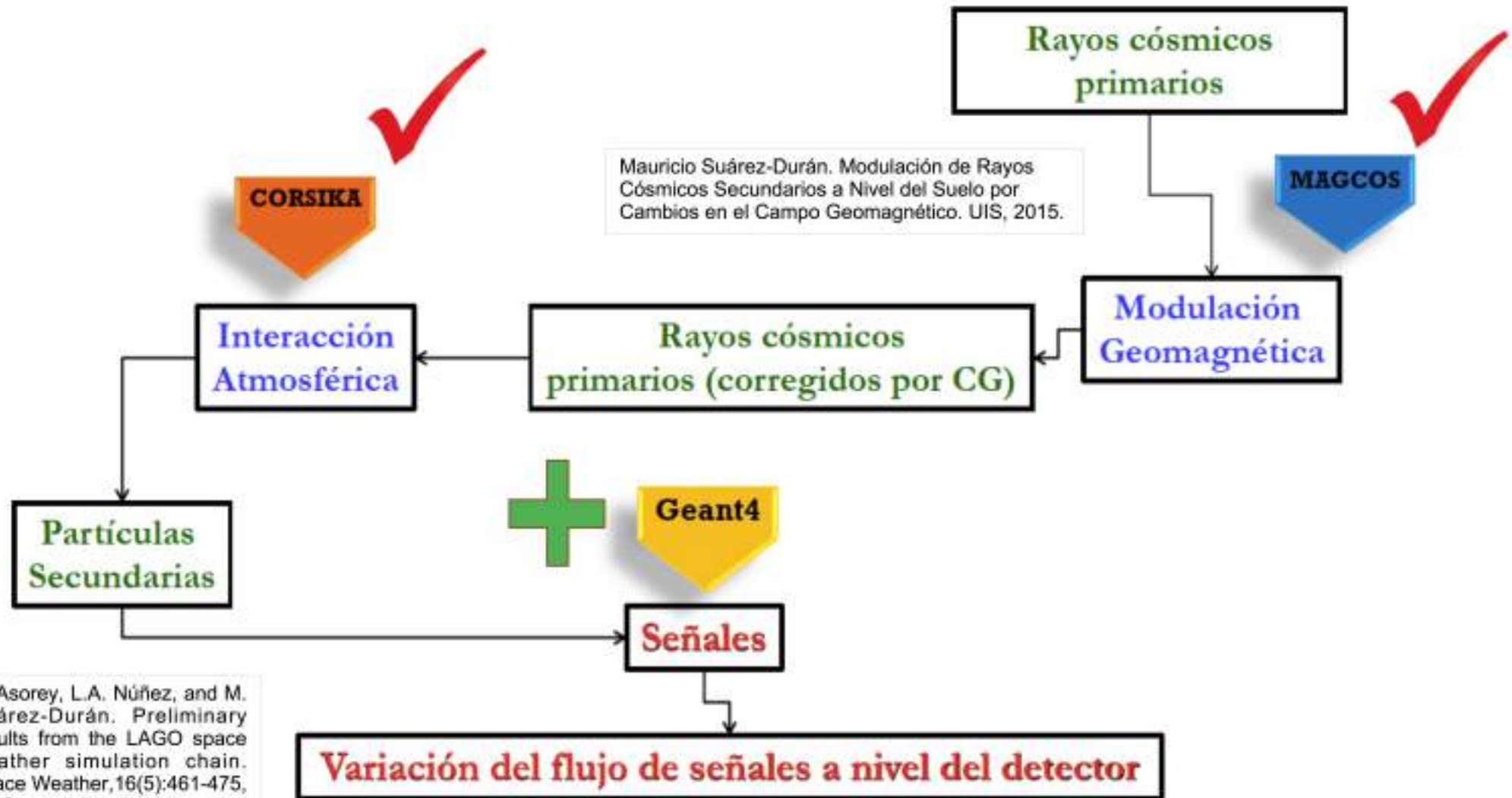


# Respuesta del WCD ante el flujo de fondo de Rayos Cósmicos

---

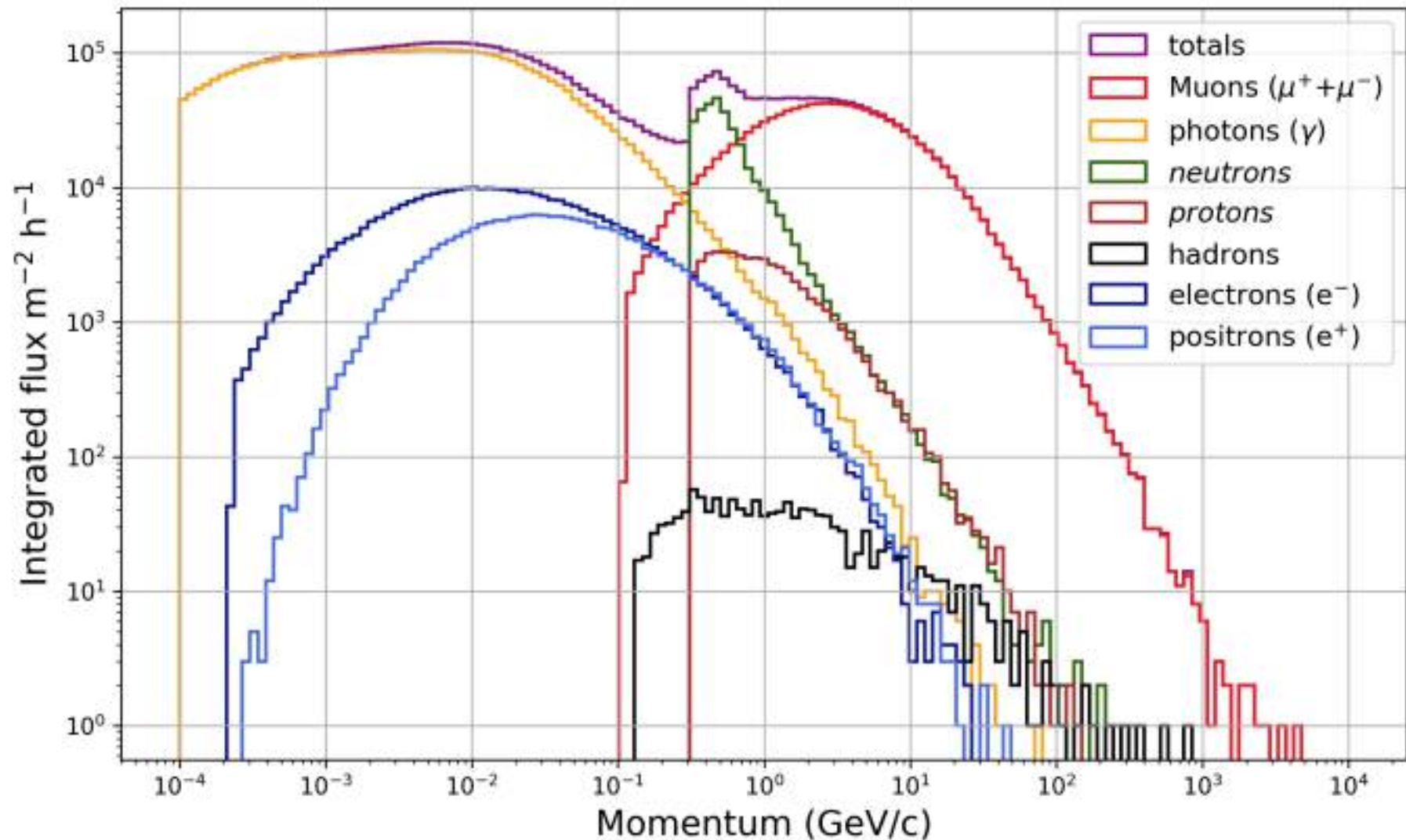
# Respuesta del WCD ante el flujo de fondo de RC

## CADENA DE SIMULACIÓN



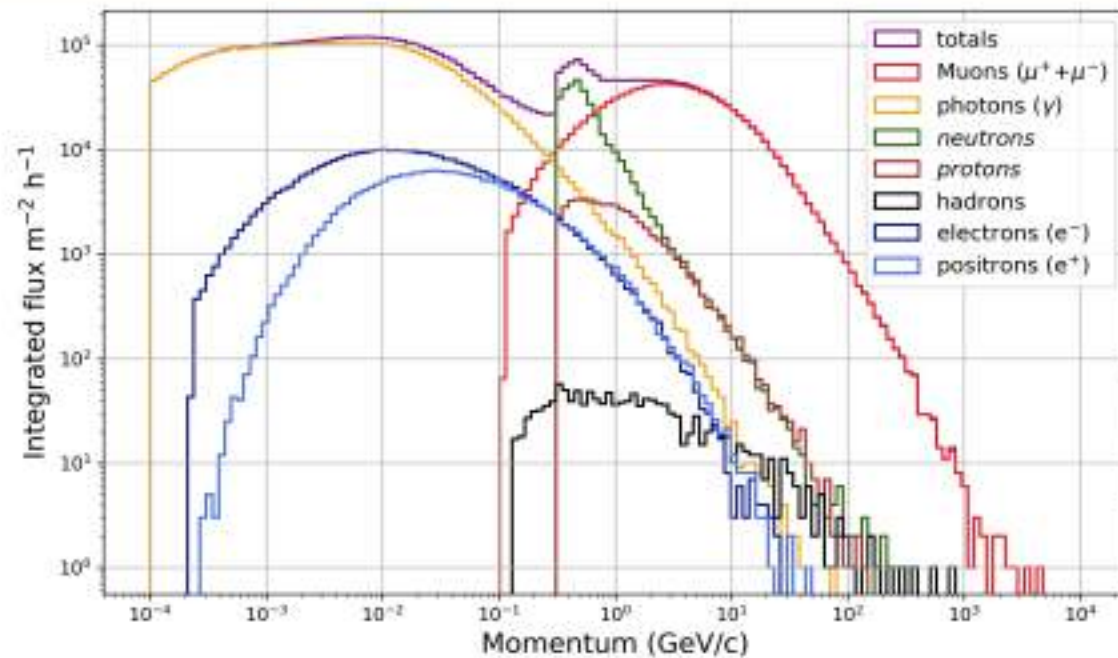
# Respuesta del WCD ante el flujo de fondo de RC

MAGCOS + CORSIKA





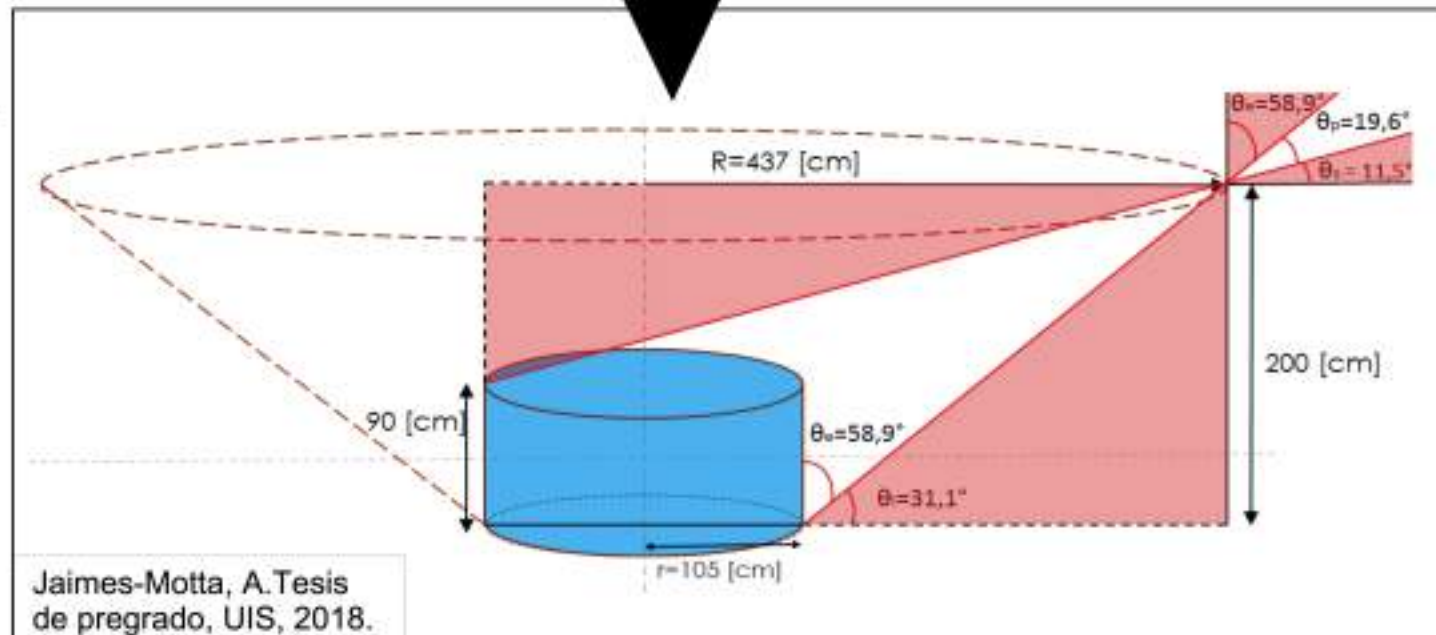
# Respuesta del WCD ante el flujo de fondo de RC



MAGCOS + CORSIKA

Asorey, H., et al. Muon Tomography sites for Colombia volcanoes. arXiv preprint arXiv:1705.09884, 2017.

GEANT4



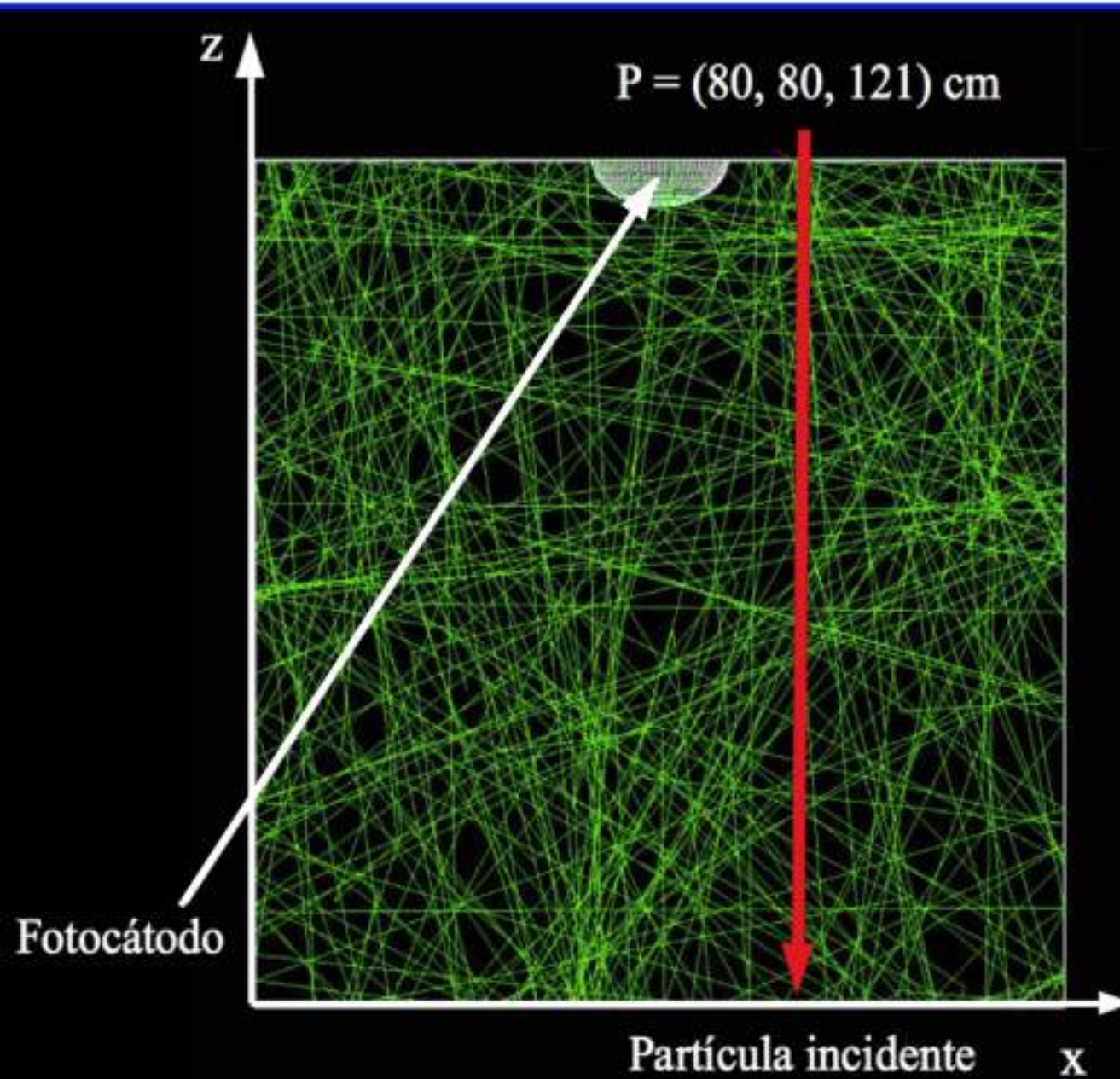


# Respuesta del WCD a muones y electrones verticales de energía típica\*

---

\*En el volcán Cerro Machín

# Simulación del WCD en Geant4

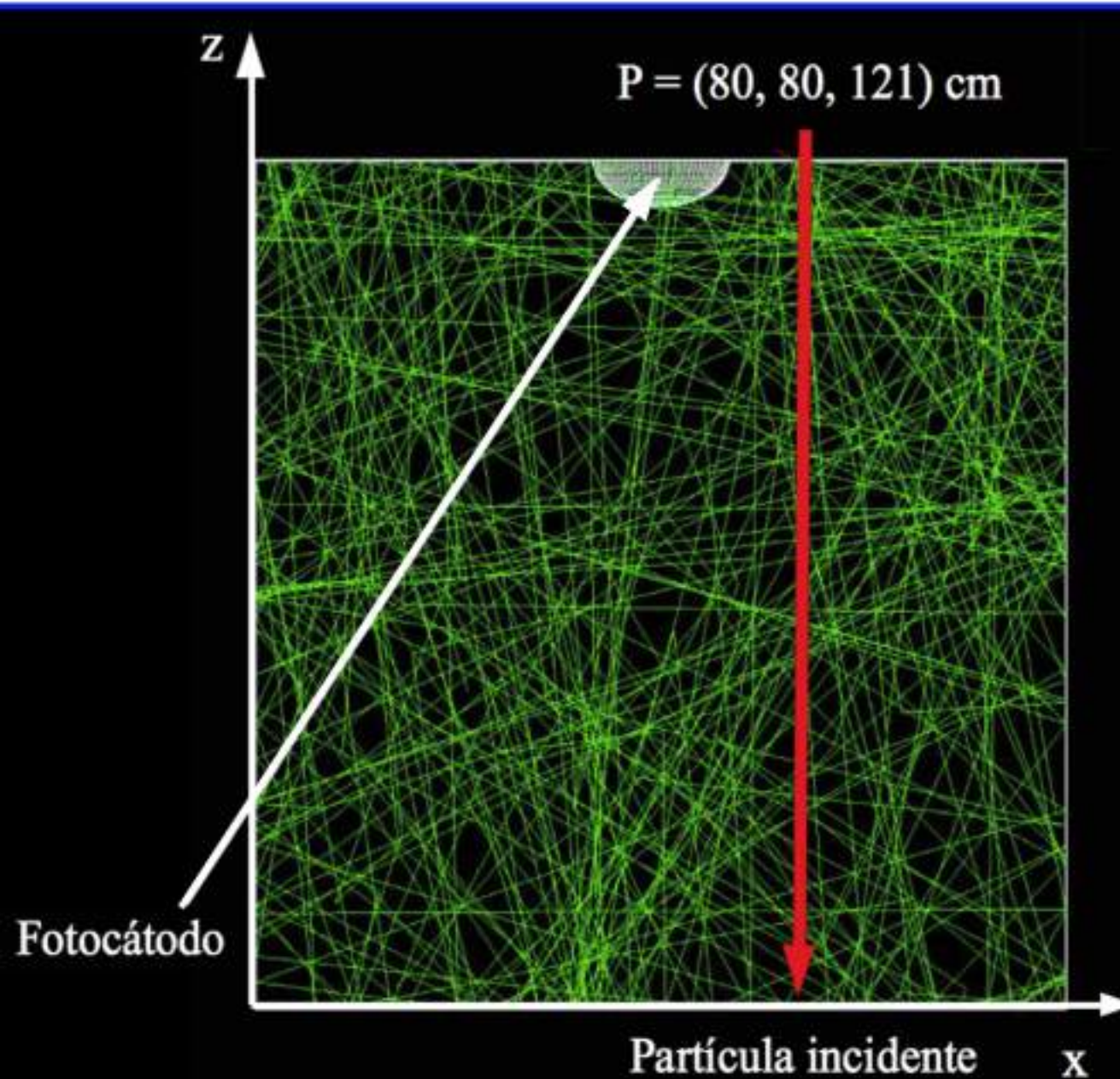


- $N$  Cherenkov

- $N_{\text{PMT}}$

- $N_{\text{FE}}$

# Muón Vertical Equivalente (VEM)



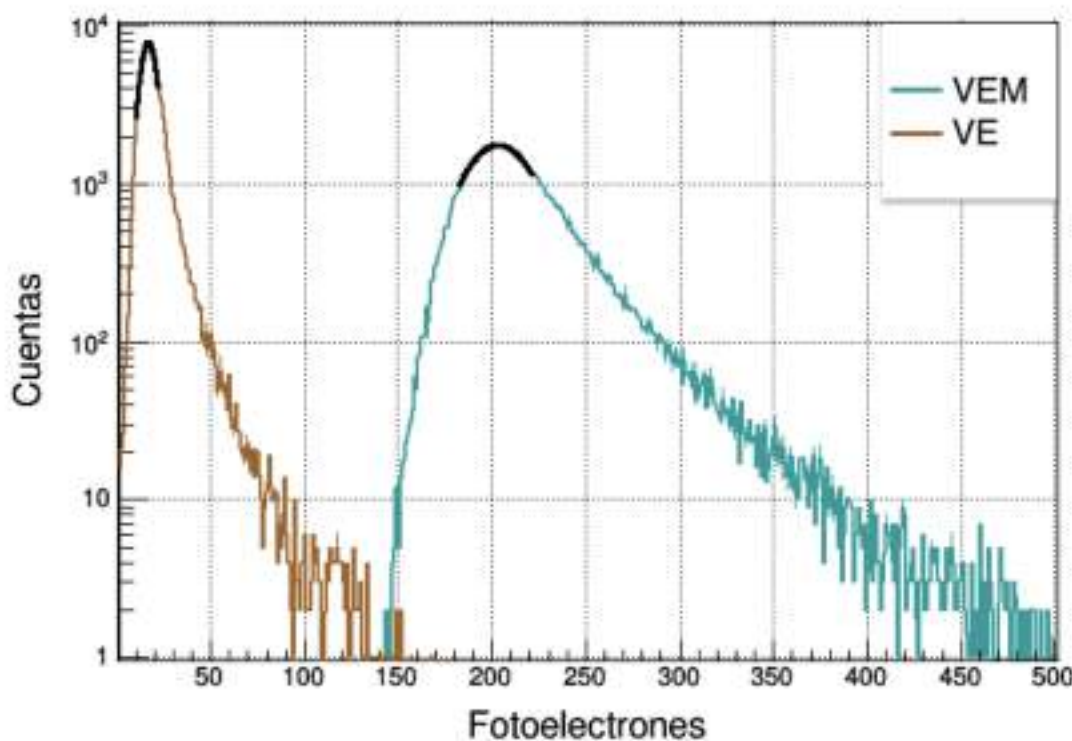
VEM

Fotoelectrones ( $N_{FE}$ )  
producidos en el PMT  
por un muón que  
atraviesa el detector  
verticalmente

Etchegoyen, A. et al. Nucl. Inst.  
Meth 545(3):602-612, 2005.



# Comparación del VEM y el VE

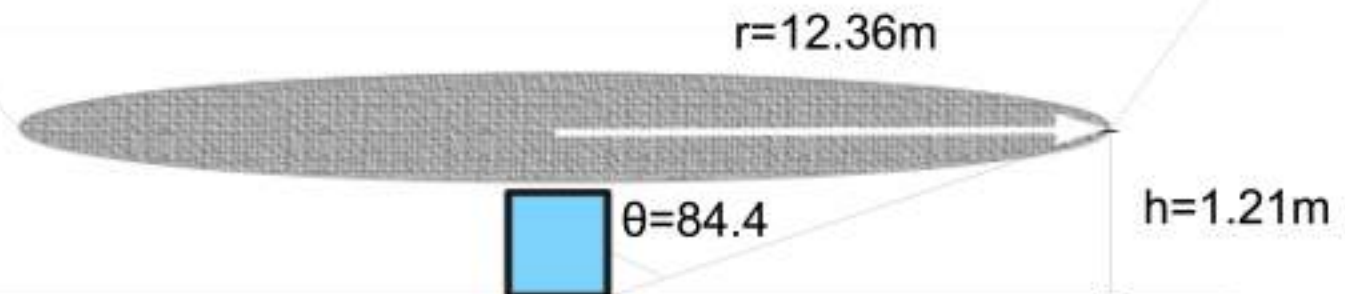
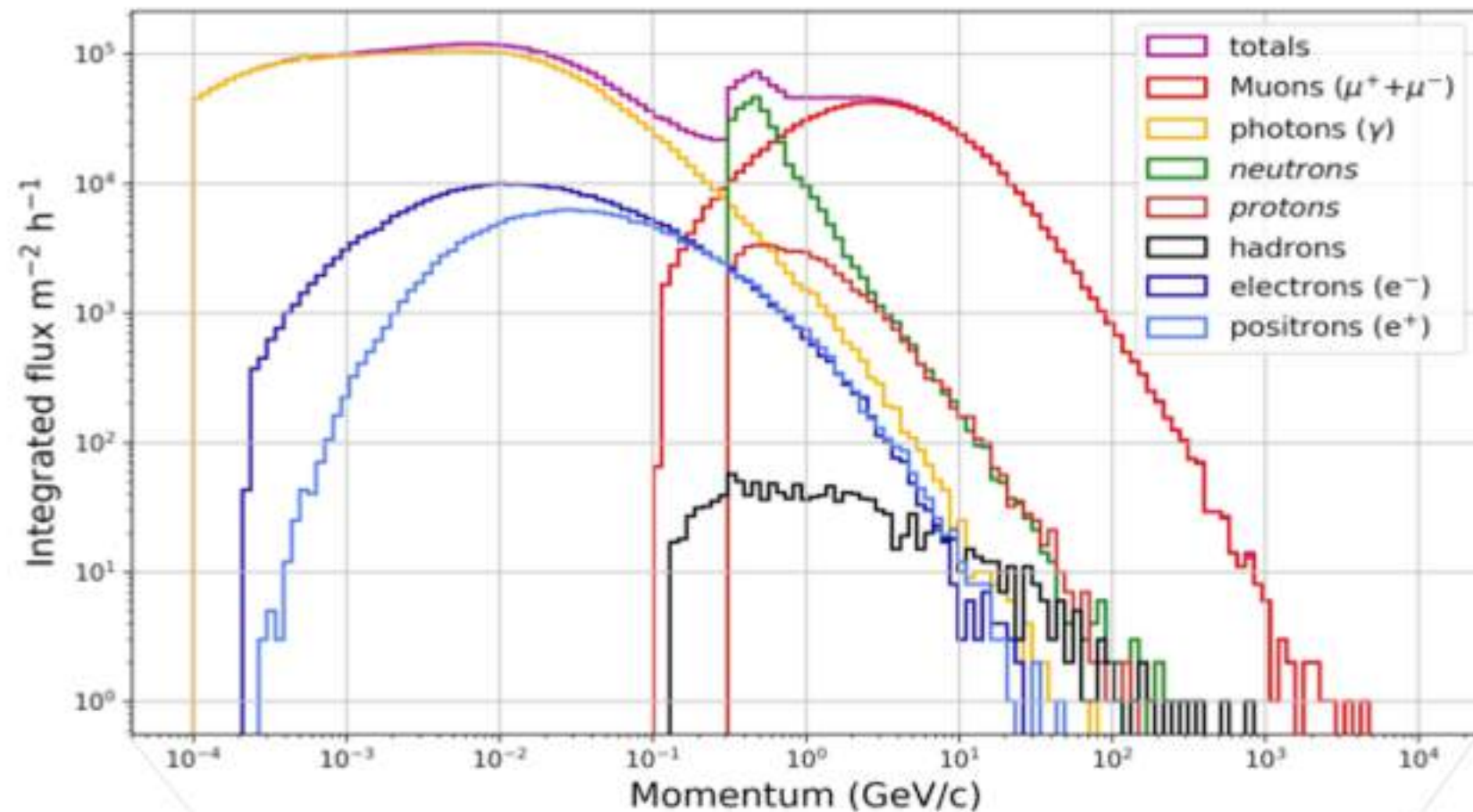


$$\text{VE} = 0.08 \text{ VEM}$$

VE: electrones que ingresan al WCD verticalmente

	$\mu^-$ (3 GeV)	$e^-$ (20 MeV)
$l$	$(120 \pm 1) \text{ cm}$	$(10 \pm 1) \text{ cm}$
$N$	$46857 \pm 13 \quad \sigma = (1632 \pm 10)$	$3538 \pm 1 \quad \sigma = (243 \pm 2)$
$N_{\text{PMT}}$	$1617 \pm 1 \quad \sigma = (96 \pm 2)$	$132.1 \pm 0.1 \quad \sigma = (17.0 \pm 0.2)$
$N_{\text{FE}}$	$203.2 \pm 0.2 \quad \sigma = (20 \pm 1)$	$16.729 \pm 0.003 \quad \sigma = (4.520 \pm 0.004)$

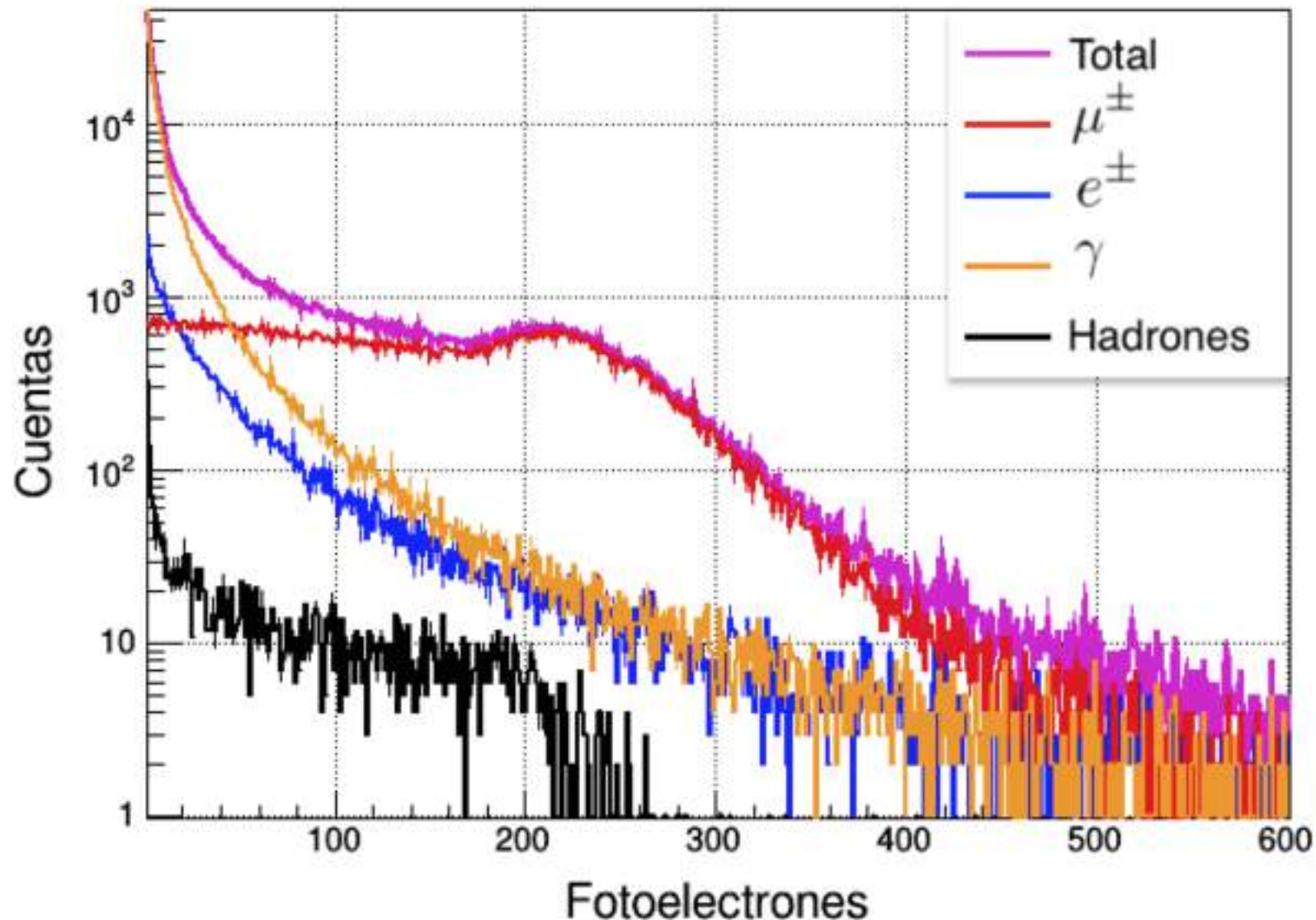
# Respuesta del WCD del MuTe al FFRC





# Respuesta del WCD del MuTe al FFRC

Histograma del número de fotoelectrones por partícula secundaria



# Respuesta del WCD del MuTe

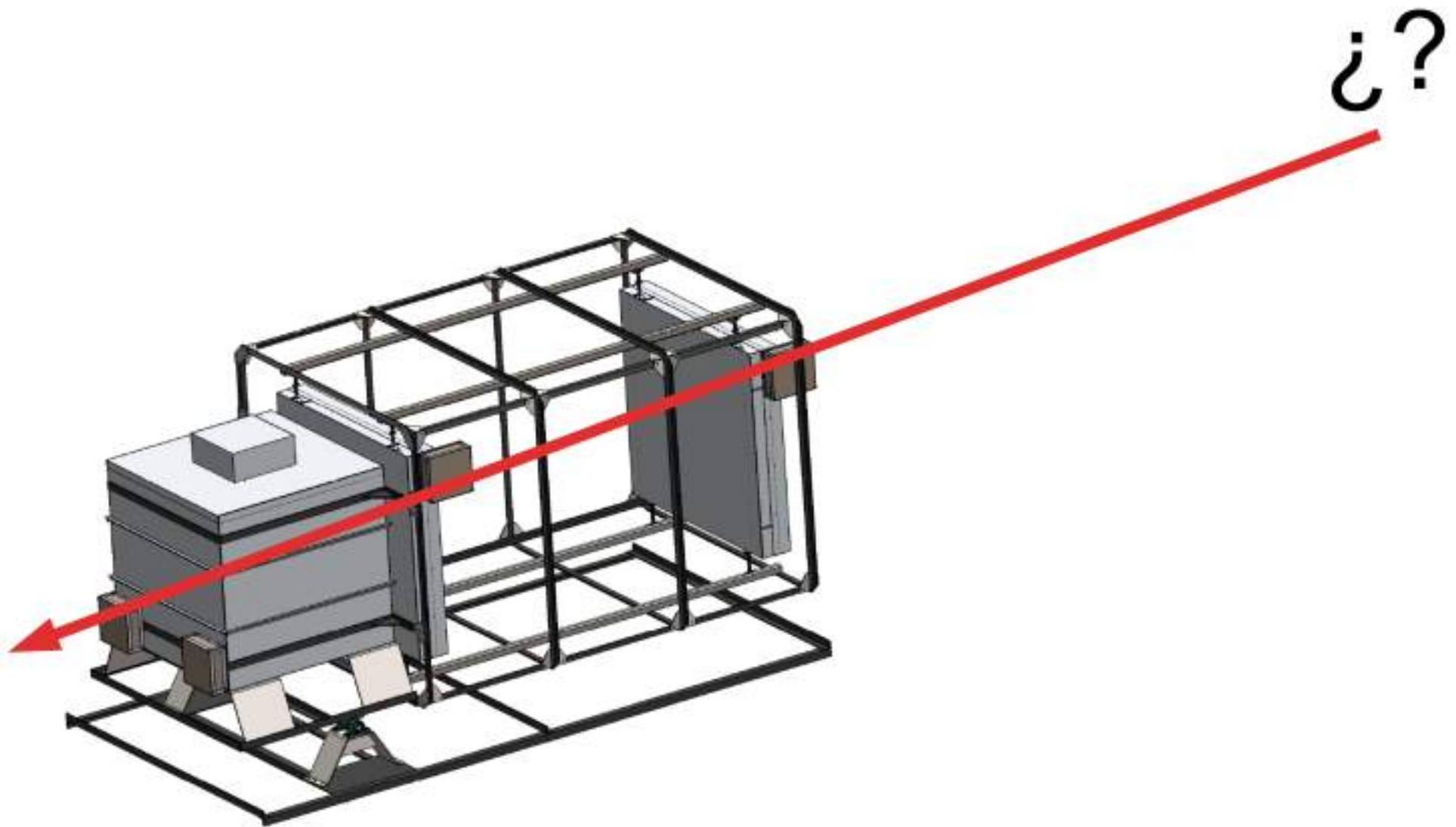
---

- **VEM = 203 fotoelectrones** en promedio para muones con energía típica de 3 GeV.
- **VE = 0.08 VEM** en promedio con energía típica de 20 MeV.
- Es posible distinguir la componente electromagnética (centrada en 0.02 VEM) de la muónica (centrada en 1.03 VEM) de las EAS a la altura del Volcán Cerro Machín.

# Trigger de detección de muones con MuTe

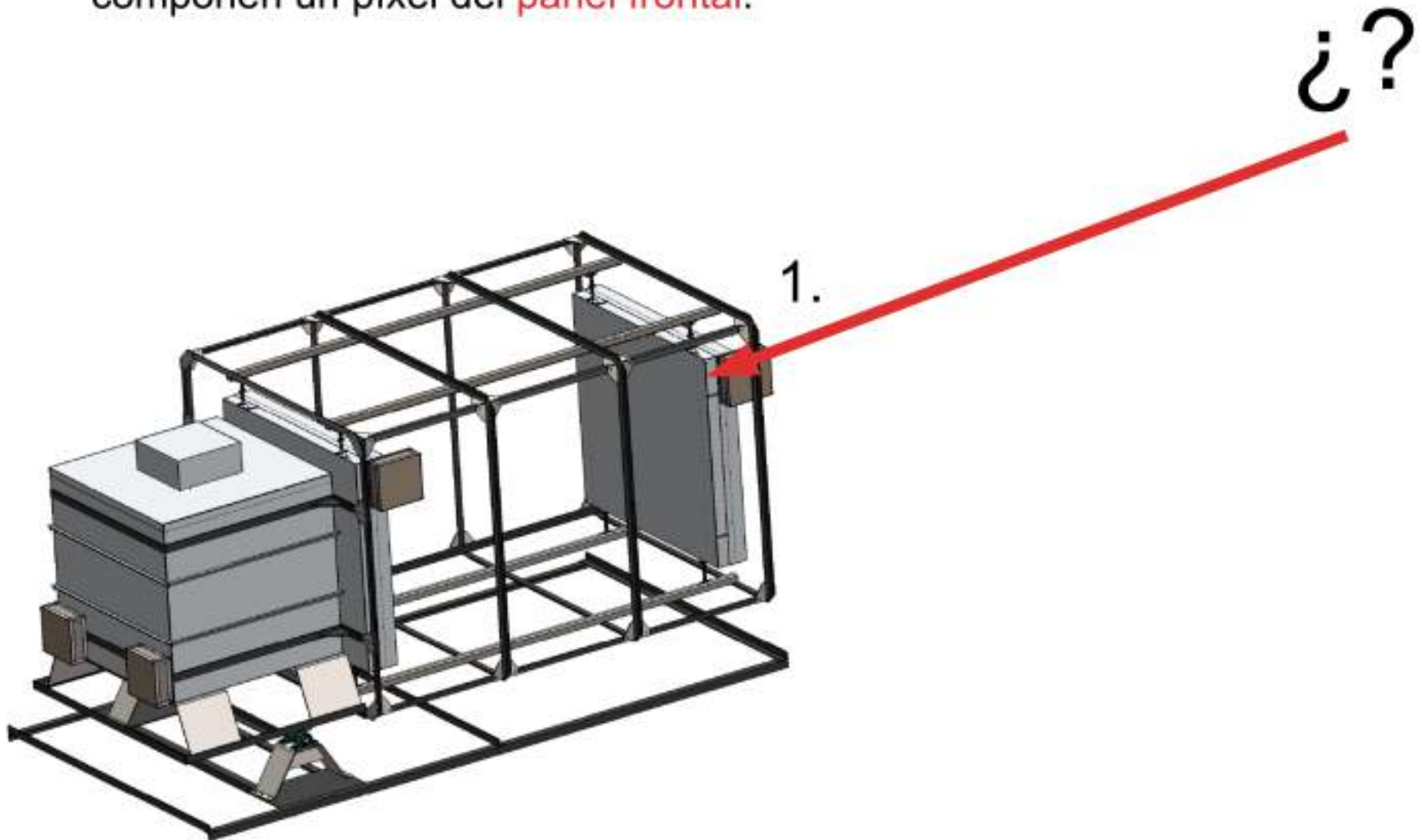
---

# Trigger de detección de muones con MuTe



# Trigger de detección de muones con MuTe

1. Conteo de al menos **37 fotoelectrones** en el SiPM de los dos centelladores que componen un píxel del **panel frontal**.

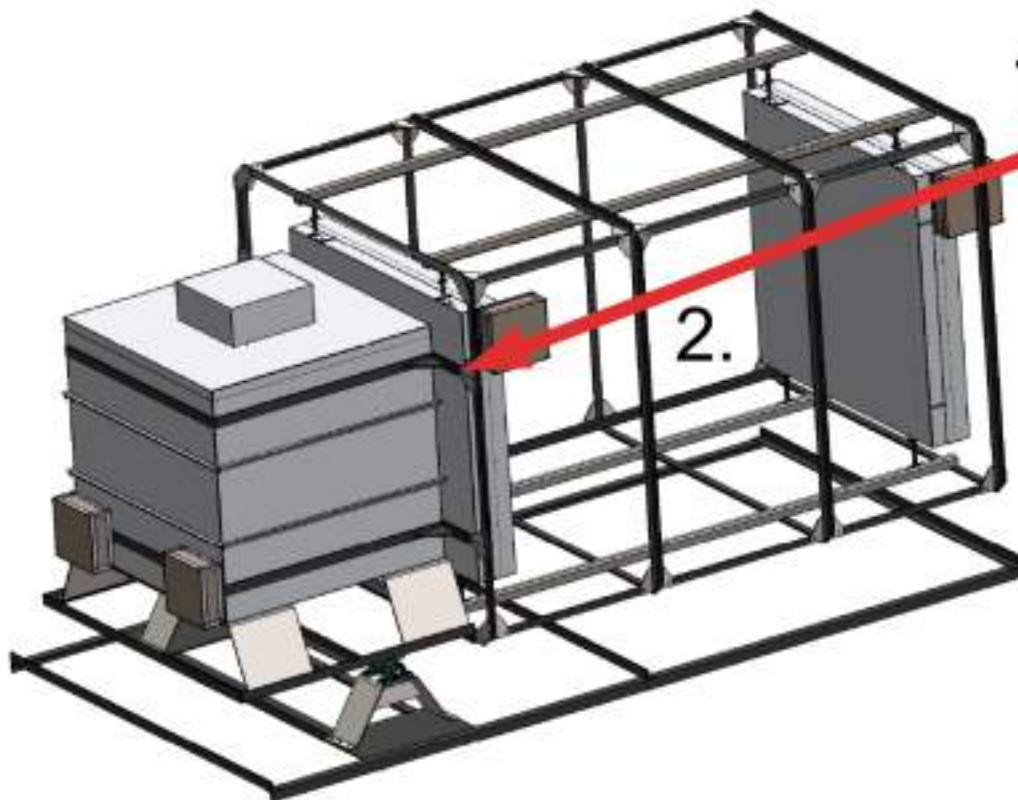




# Trigger de detección de muones con MuTe

1. Conteo de al menos **37 fotoelectrones** en el SiPM de los dos centelladores que componen un píxel del **panel frontal**.

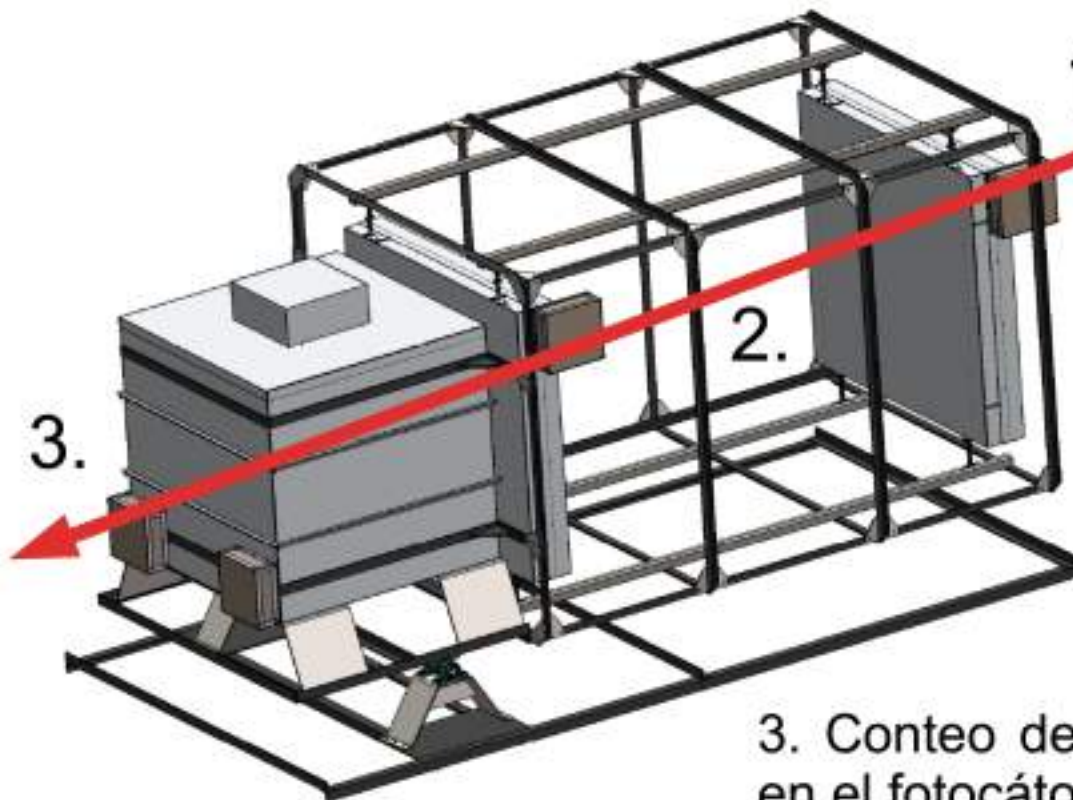
2. Conteo de al menos **37 fotoelectrones** en el SiPM de los dos centelladores que componen un píxel del **panel trasero**.



# Trigger de detección de muones con MuTe

1. Conteo de al menos 37 fotoelectrones en el SiPM de los dos centelladores que componen un píxel del panel frontal.

2. Conteo de al menos 37 fotoelectrones en el SiPM de los dos centelladores que componen un píxel del panel trasero.



3. Conteo de alrededor de 203 fotoelectrones en el fotocátodo del WCD.

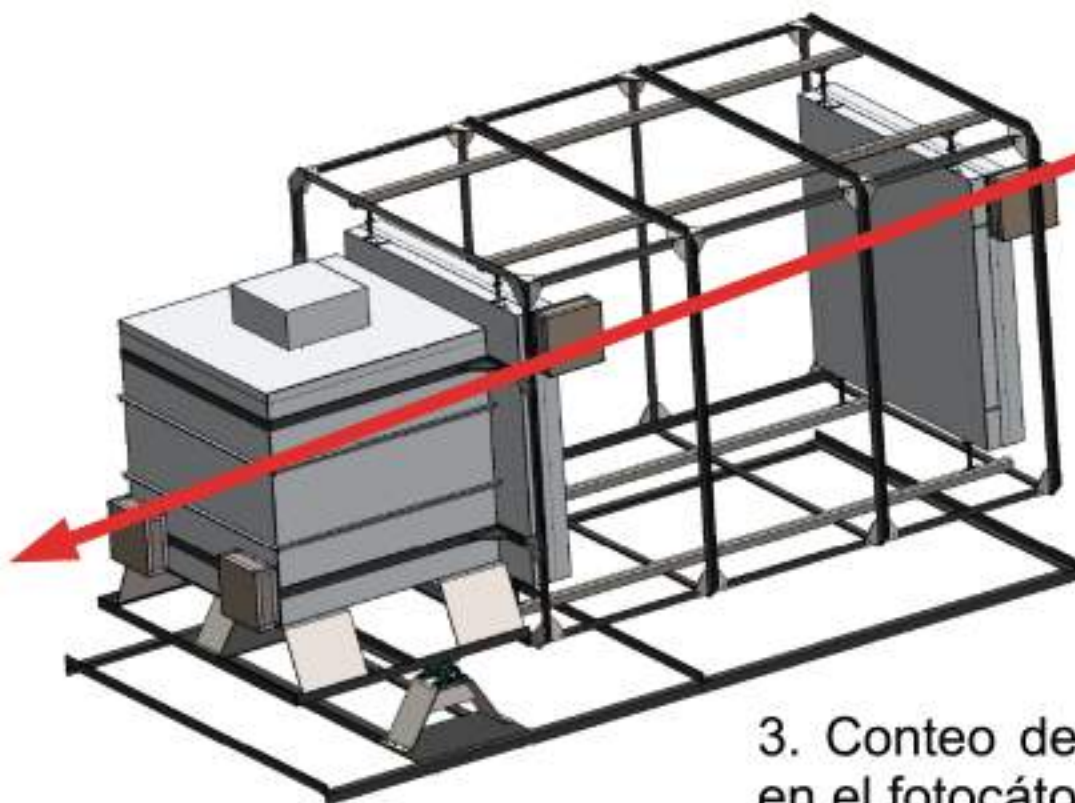
# Trigger de detección de muones con MuTe

1. Conteo de al menos **37 fotoelectrones** en el SiPM de los dos centelladores que componen un píxel del **panel frontal**.

2.08 MeV  
en poliestireno

2. Conteo de al menos **37 fotoelectrones** en el SiPM de los dos centelladores que componen un píxel del **panel trasero**.

$\mu^{\pm}$



240 MeV  
en agua

3. Conteo de alrededor de **203 fotoelectrones** en el fotocátodo del **WCD**.



# Trigger de detección de muones con MuTe

1. Conteo de al menos **37 fotoelectrones** en el SiPM de los dos centelladores que componen un píxel del **panel frontal**.

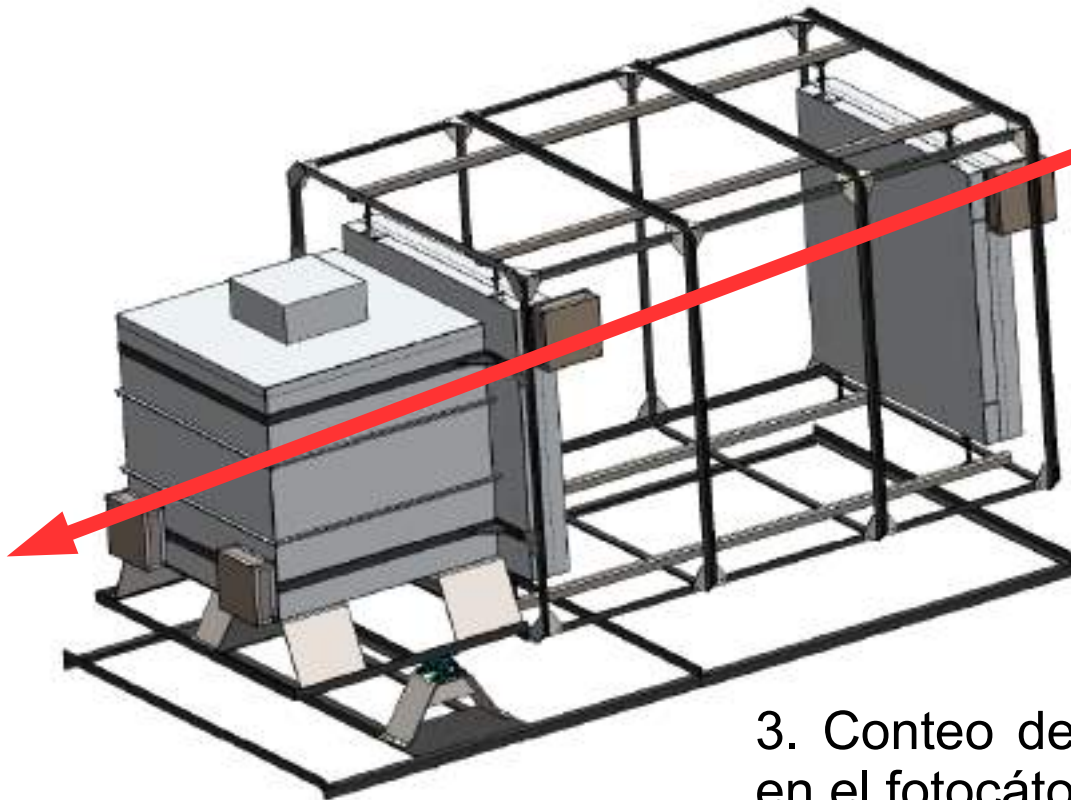
2.08 MeV  
en poliestireno

2. Conteo de al menos **37 fotoelectrones** en el SiPM de los dos centelladores que componen un píxel del **panel trasero**.

$\mu^\pm$   
>248 MeV

240 MeV  
en agua

3. Conteo de alrededor de **203 fotoelectrones** en el fotocátodo del **WCD**.



# Conclusiones

---



# Conclusiones

---

- Se obtuvo la **respuesta del detector híbrido MuTe** ante partículas cargadas, como la correlación entre la respuesta del hodoscopio de centelladores plásticos, y la respuesta del detector Cherenkov de Agua.

# Conclusiones

---

- Se obtuvo la **respuesta del detector híbrido MuTe** ante partículas cargadas, como la correlación entre la respuesta del hodoscopio de centelladores plásticos, y la respuesta del detector Cherenkov de Agua.
- Con esta correlación se propuso el **trigger de detección de muones** del MuTe. Los muones deben tener  **$E > 248 \text{ MeV}$**  para ser detectados.

# Conclusiones

---

- Se obtuvo la **respuesta del detector híbrido MuTe** ante partículas cargadas, como la correlación entre la respuesta del hodoscopio de centelladores plásticos, y la respuesta del detector Cherenkov de Agua.
- Con esta correlación se propuso el **trigger de detección de muones** del MuTe. Los muones deben tener  **$E > 248 \text{ MeV}$**  para ser detectados.
- Debido a que el poder de frenado de los electrones de energía típica (20 MeV) en el poliestireno, es similar al poder de frenado de los muones (3 GeV), se puede afirmar que **la respuesta del detector de centelleo ante muones y electrones, es indiferenciable.**

# Conclusiones

---

- Se obtuvo la **respuesta del detector híbrido MuTe** ante partículas cargadas, como la correlación entre la respuesta del hodoscopio de centelladores plásticos, y la respuesta del detector Cherenkov de Agua.
- Con esta correlación se propuso el **trigger de detección de muones** del MuTe. Los muones deben tener  **$E > 248 \text{ MeV}$**  para ser detectados.
- Debido a que el poder de frenado de los electrones de energía típica (20 MeV) en el poliestireno, es similar al poder de frenado de los muones (3 GeV), se puede afirmar que **la respuesta del detector de centelleo ante muones y electrones, es indiferenciable**.
- La respuesta del **WCD** ante el **fujo de fondo de rayos cósmicos a nivel del Volcán Cerro Machín**, dio como resultado el histograma del número de fotoelectrones donde se puede **diferenciar la componente electromagnética de la componente muónica** de las EAS.

# Conclusiones

---

- El proyecto MuTe es pionero en el empleo de **dos detectores independientes** para la detección de muones atmosféricos, con un trigger más **restrictivo** respecto a aquellos utilizados en los hodoscopios de centelladores plásticos para la muongrafía. Entonces, se puede decir que el detector híbrido MuTe permite estimar el flujo de muones con **mayor precisión**.



# Conclusiones

---

- El proyecto MuTe es pionero en el empleo de **dos detectores independientes** para la detección de muones atmosféricos, con un trigger más **restrictivo** respecto a aquellos utilizados en los hodoscopios de centelladores plásticos para la muongrafía. Entonces, se puede decir que el detector híbrido MuTe permite estimar el flujo de muones con **mayor precisión**.
- Los resultados del presente trabajo son producto de la **primera simulación completa** realizada para obtener el trigger del MuTe.

# Producciones científicas

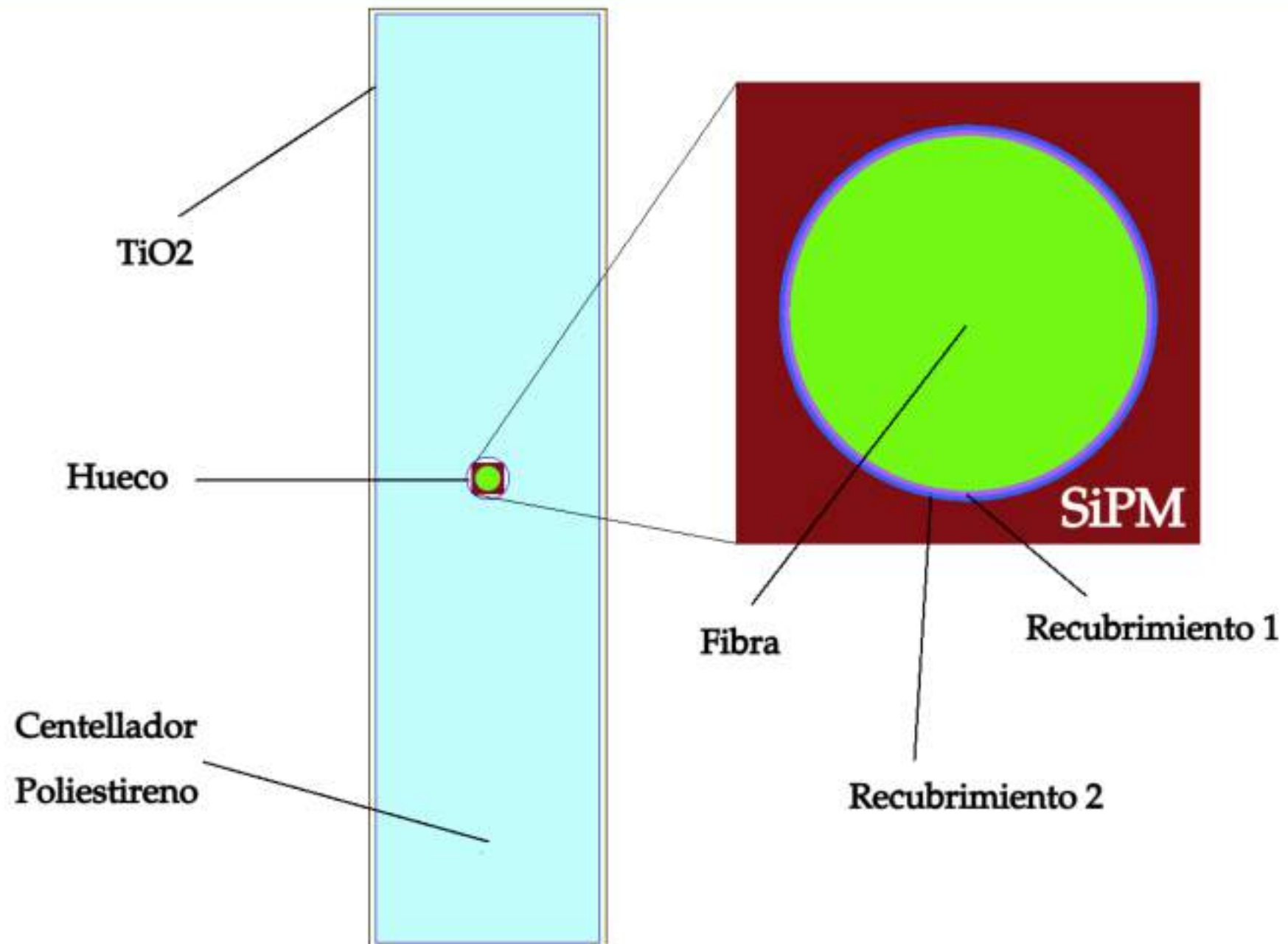
---

- 1. Astroparticle projects at the Eastern Colombia region: facilities and instrumentation.** H. Asorey, R. Calderón-Ardila, C. R. Carvajal-Bohorquez, S. Hernández-Barajas, L. Martínez-Ramírez, A. Jaimes-Motta, F. Leon- Carreño, J. Peña-Rodríguez, J. Pisco-Guavabe, J.D. Sanabria-Gómez, M. Suárez-Durán, A. Vásquez-Ramírez, K. Forero-Gutierrez, J. Salamanca-Coy, L. A. Núñez, D. Sierra-Porta. *Aceptado para publicación en la Revista Scientia et Technica de la Universidad Tecnológica de Pereira (Categoría B COLCIENCIAS). Diciembre 2017.*
- 2. Estimación de la respuesta de un detector Cherenkov de agua al fondo de rayos cósmicos en Bucaramanga (956 m s.n.m).** Co-dirección del *trabajo de pregrado en Física* del estudiante Andrei Jaimes.
- 3. The Mute Project.** En *The Latin American School of High Energy Physics CERN 2017*. European Organization for Nuclear Research. San Juan del Río, México, Marzo de 2017.
- 4. Estudio de la Respuesta de un Hodoscopio de Centelladores Plásticos al Paso de Muones para el Estudio de Estructuras Volcánicas.** En el *V Congreso Colombiano de Astrofísica y Astronomía (COCOA)*. Pereira, Colombia, Octubre de 2017.
- 5. MuTe: Digital Astroparticle Detector for Volcano Tomography.** En *41<sup>st</sup> International School of Young Astronomers*. Socorro, Colombia, Julio de 2018.

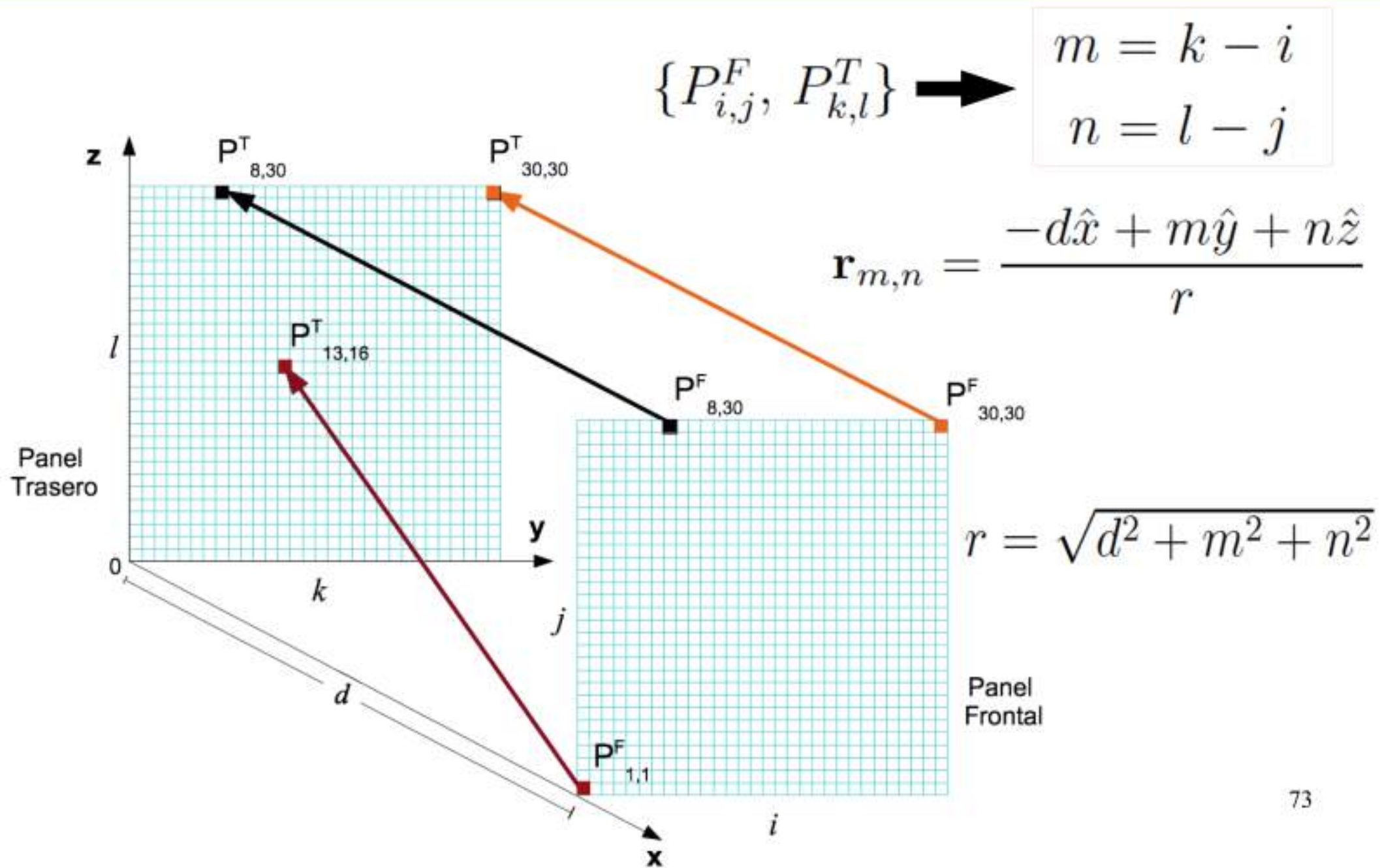
GRACIAS



# Detector de centelleo



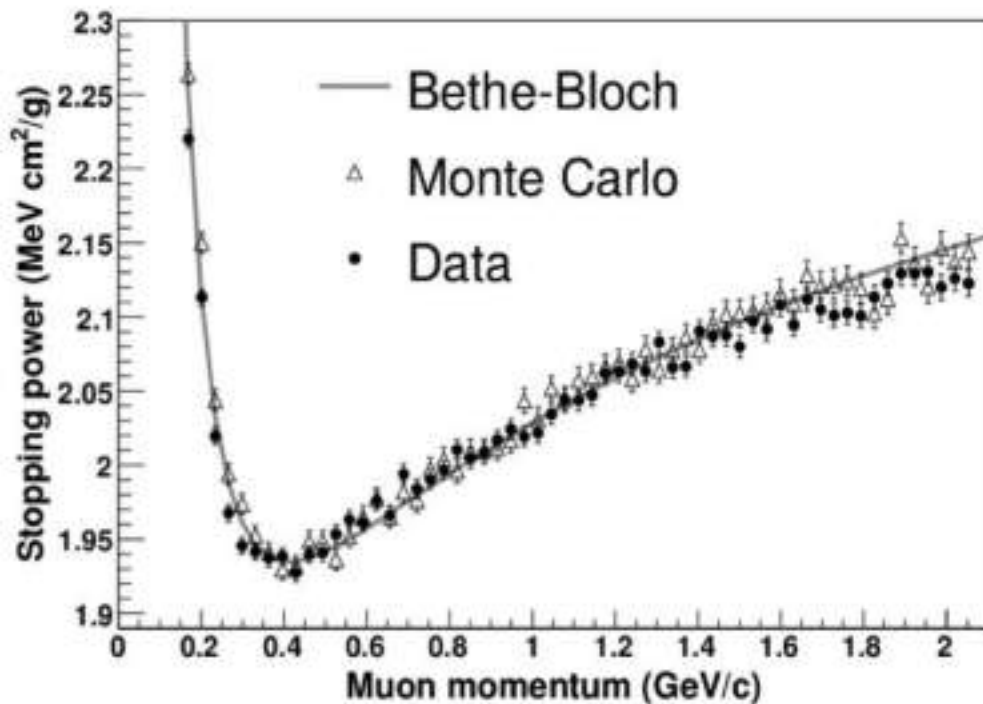
# Sistema de coordenadas del hodoscopio



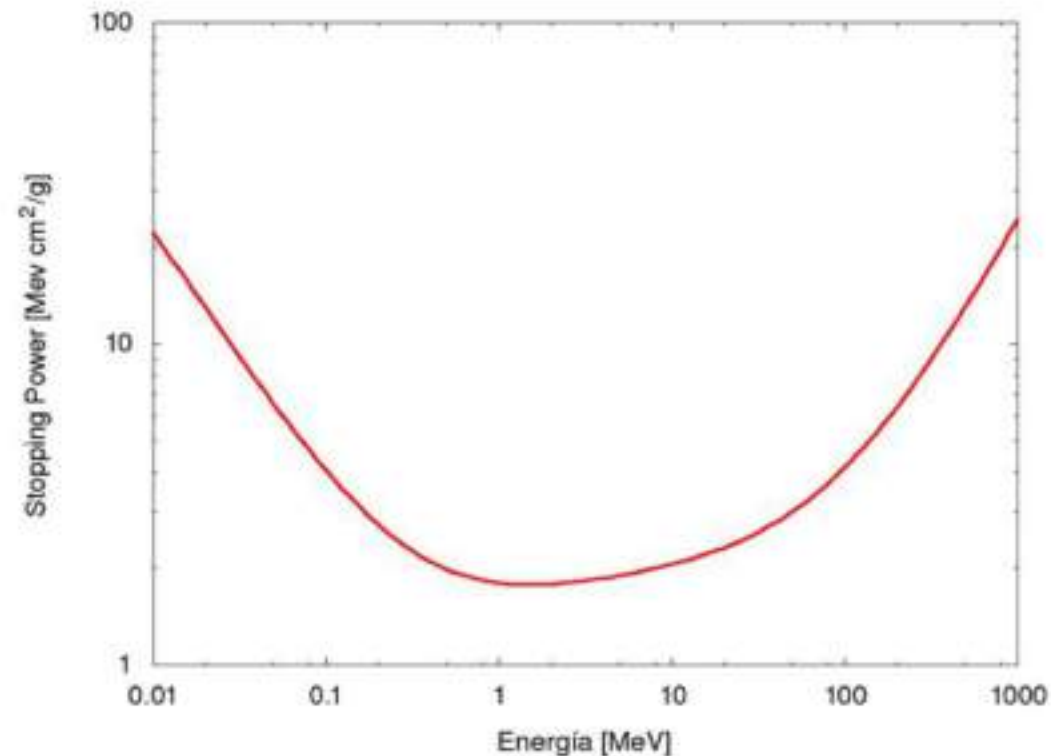


# Poder de frenado en poliestireno

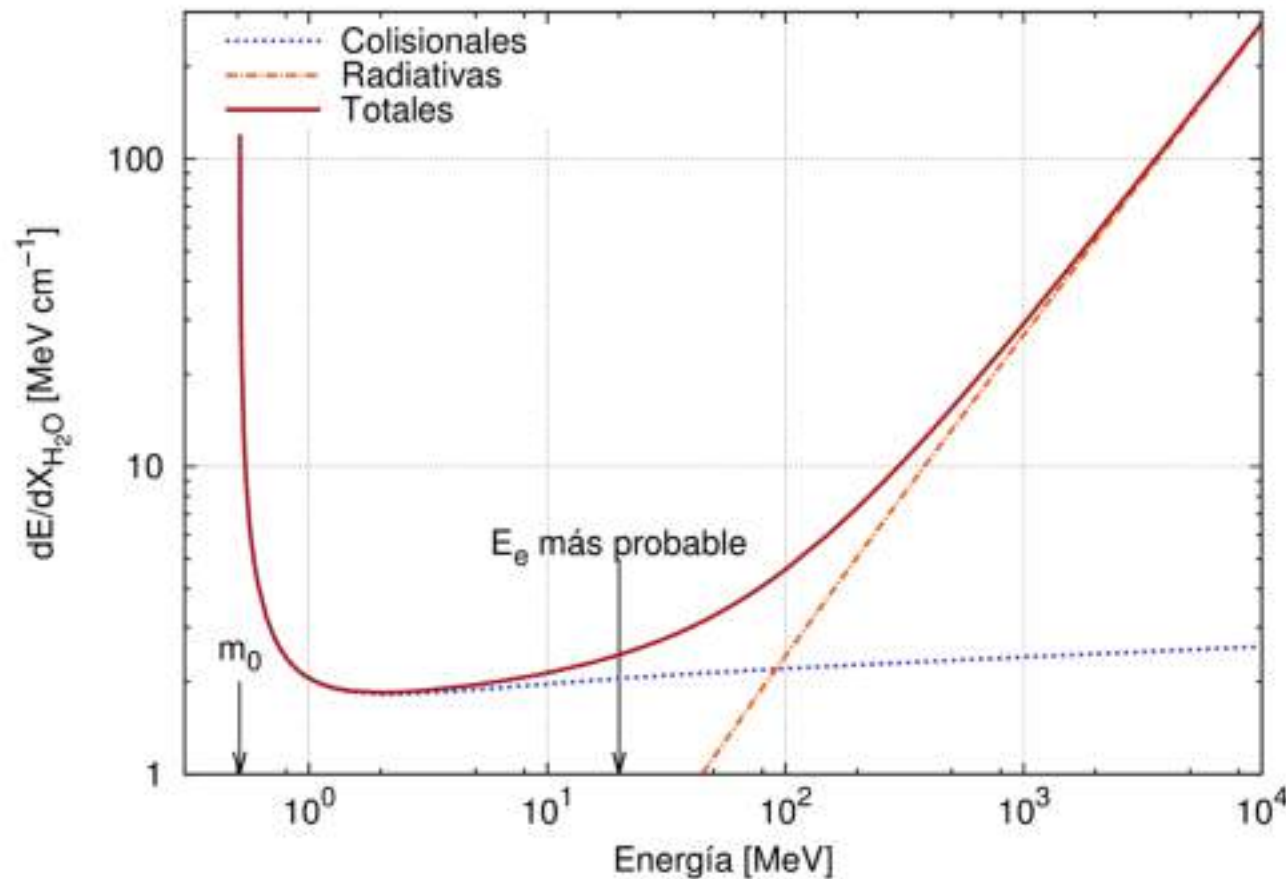
## Muones



## Electrones



# Poder de frenado del electrón en agua

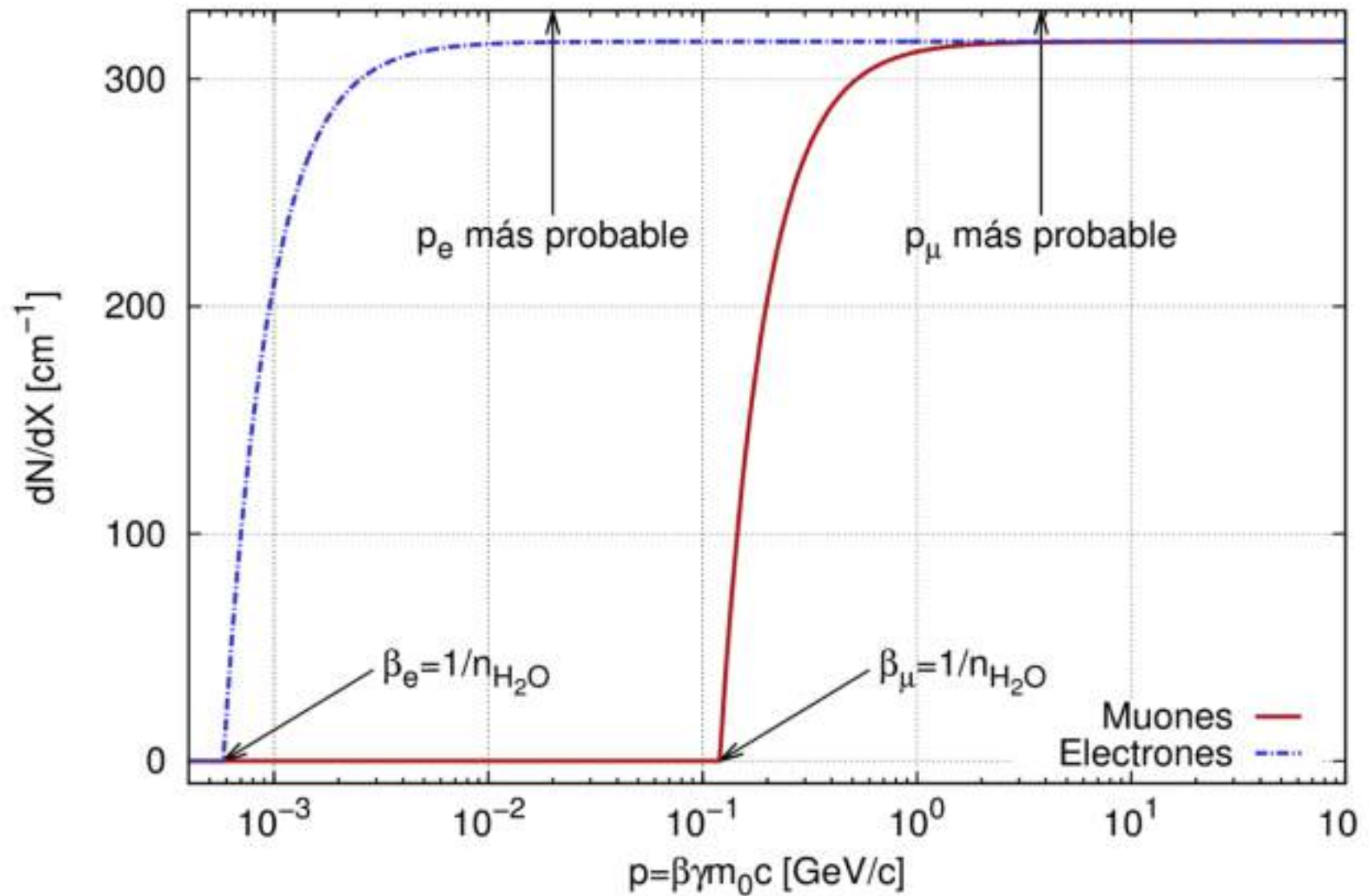


Electrones

Muones

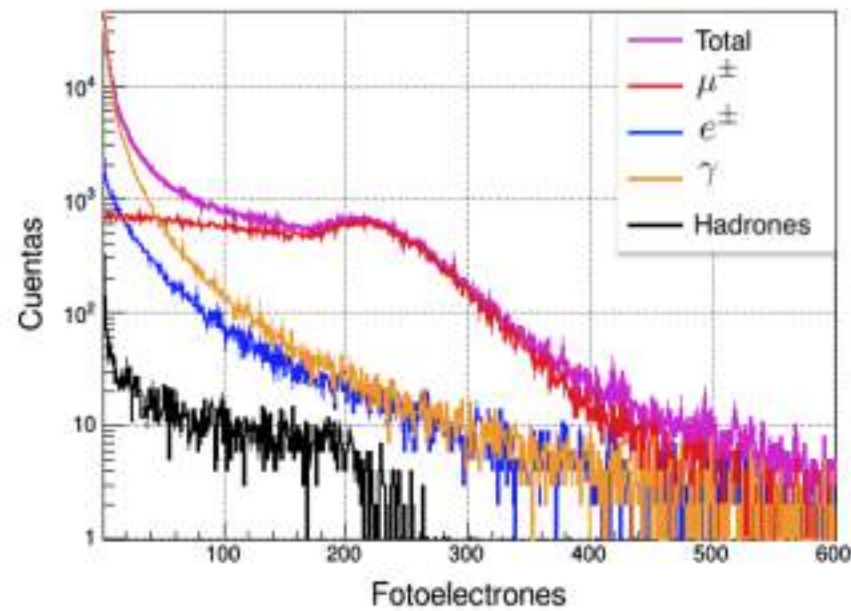
$$\frac{dE}{dx}_{H_2O} \simeq 2MeV/cm$$

# Producción de fotones Cherenkov

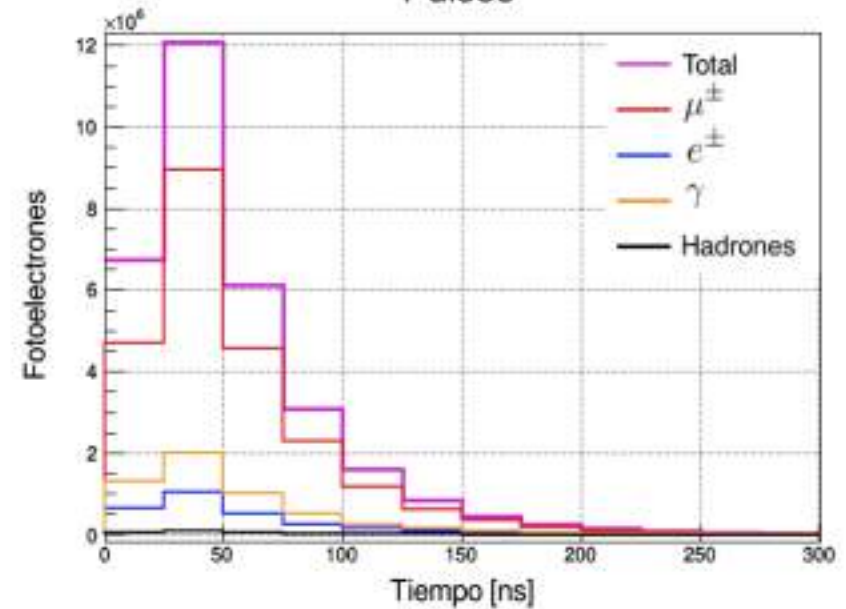


# Respuesta del WCD del MuTe al FFRC

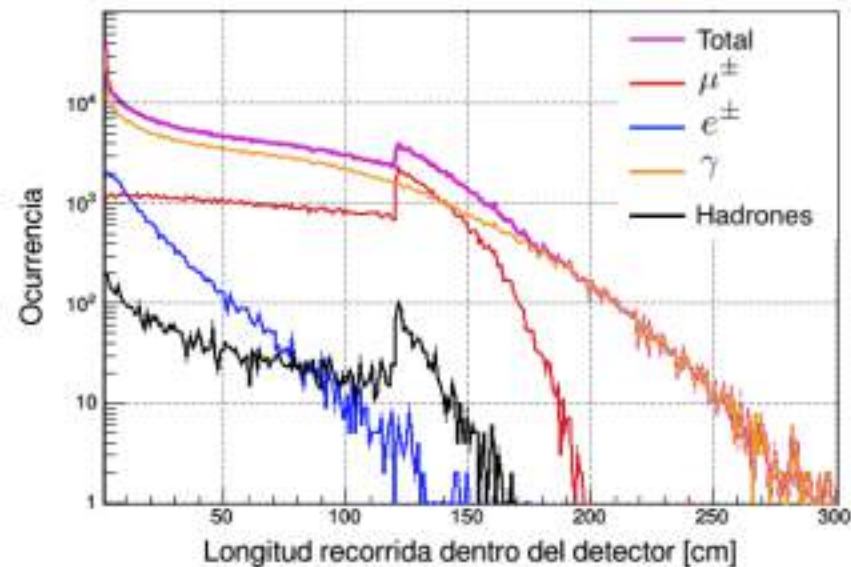
## Histograma del # de fotoelectrones



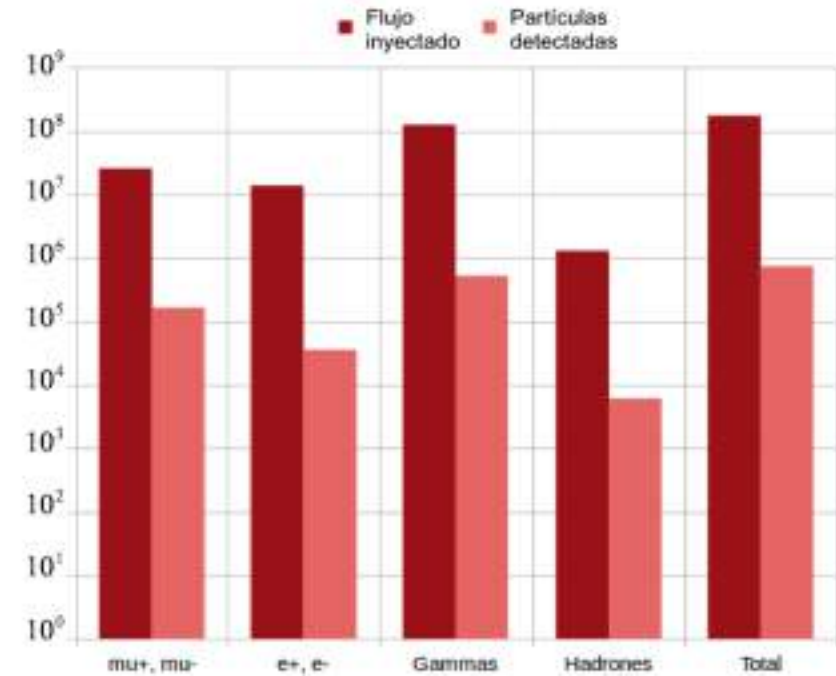
## Pulsos



## Histograma de distancia recorrida

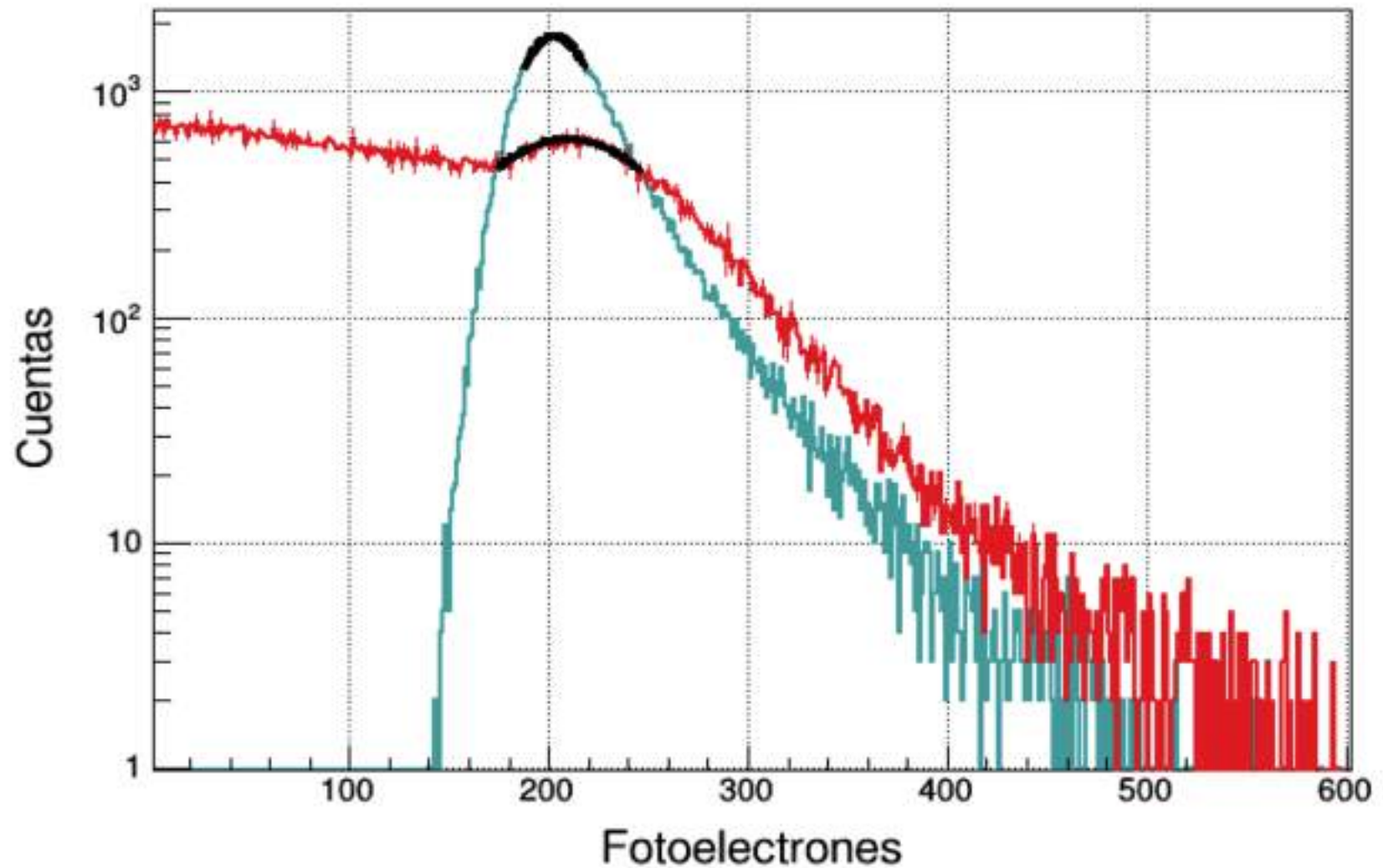


## Porción de partículas detectadas

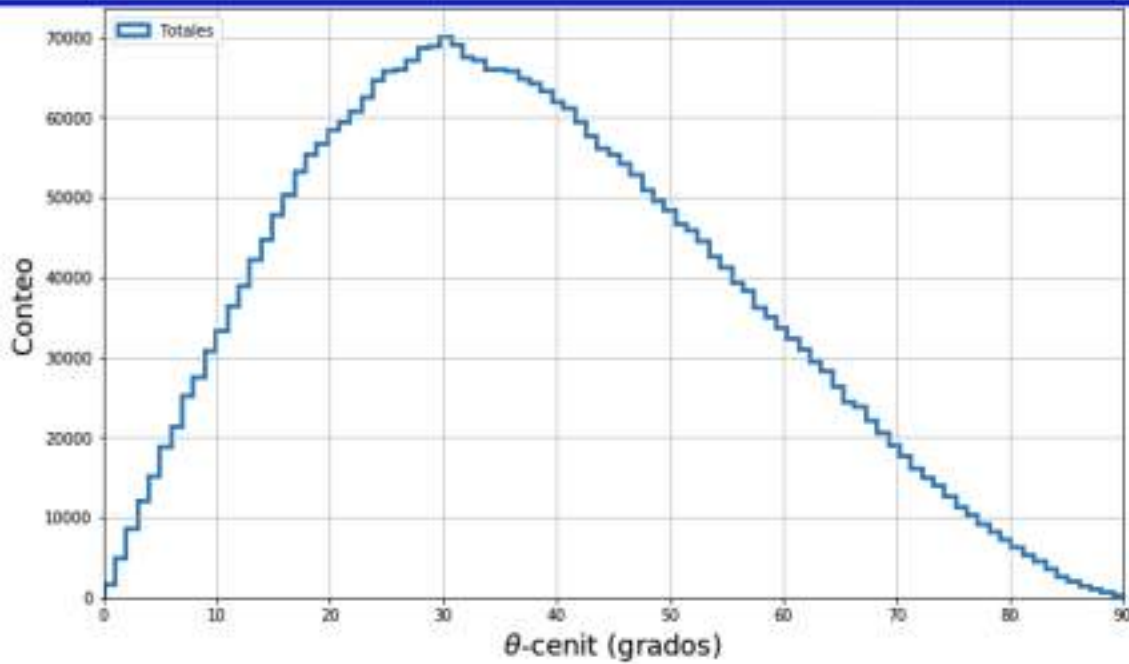




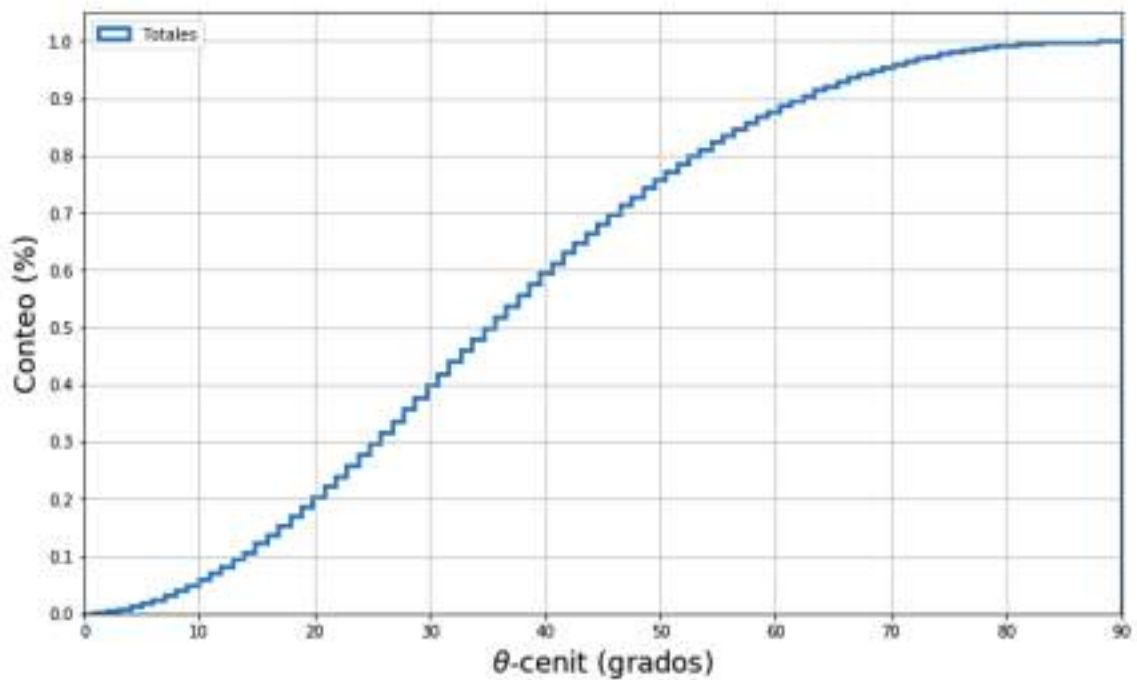
# Respuesta del WCD del MuTe al FFRC



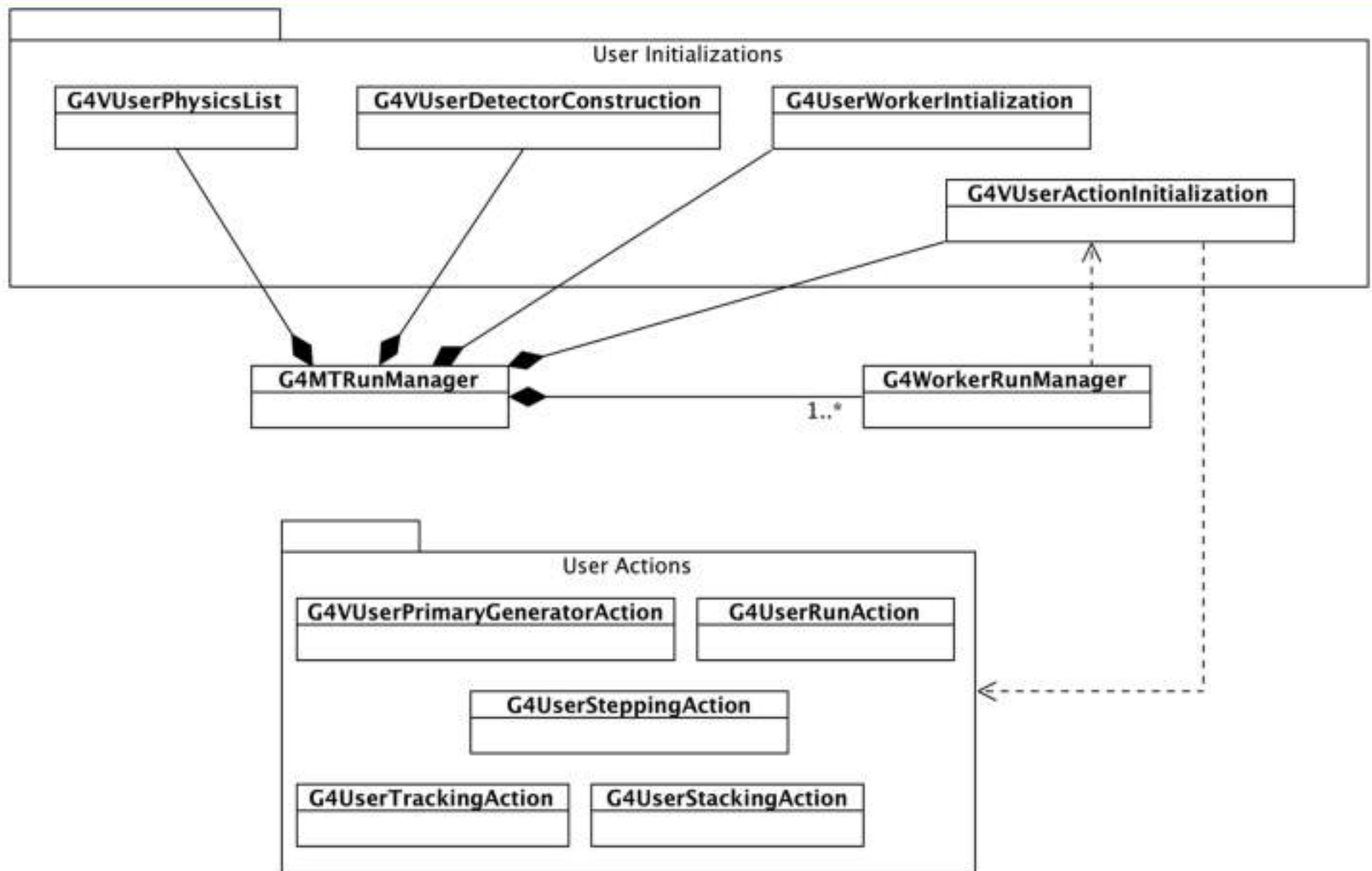
# FFRC según el ángulo



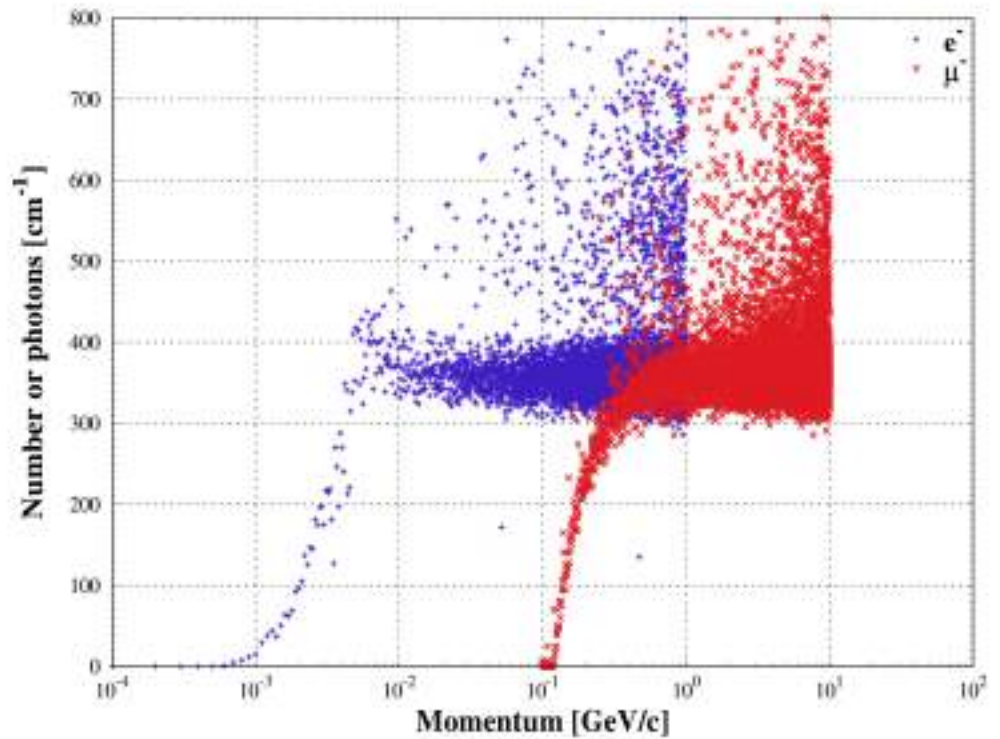
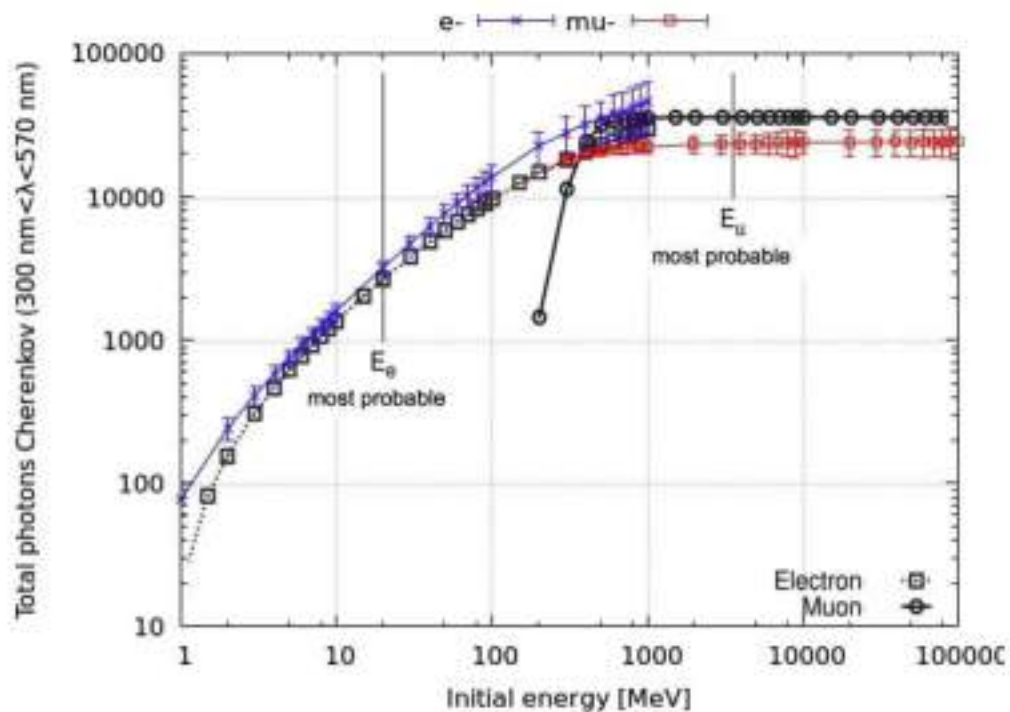
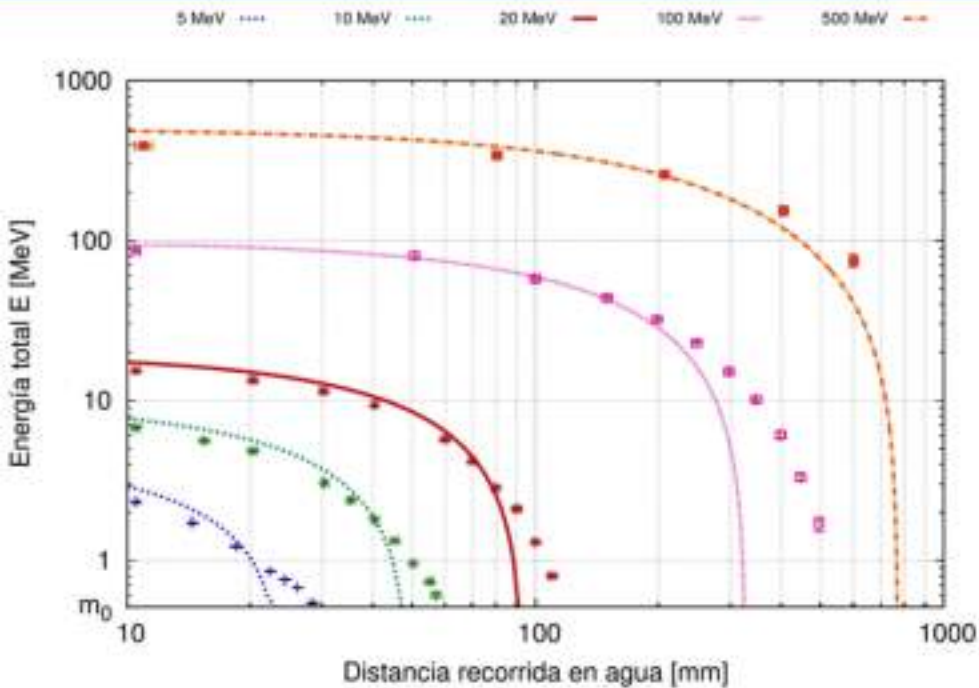
Jaimes-Motta, A. Estimación de la respuesta de un detector Cherenkov de agua al fondo de rayos cósmicos en Bucaramanga(956 m s.n.m), UIS, 2018.



# Geant4



# Validación del código en Geant4



Jaimes-Motta, A. Estimación de la respuesta de un detector Cherenkov de agua al fondo de rayos cósmicos en Bucaramanga (956 m s.n.m), UIS, 2018.