

# Estimación del espectro de muones usando algoritmos de inteligencia artificial

*Jhon Almanzar Quintero*  
*Cristian Orduz Carvajal*

---

*Luis A. Núñez de Villavicencio*  
*Christian Sarmiento Cano*  
*Rafael Martínez Rivero*



# CONTEXTO

Nuestro trabajo

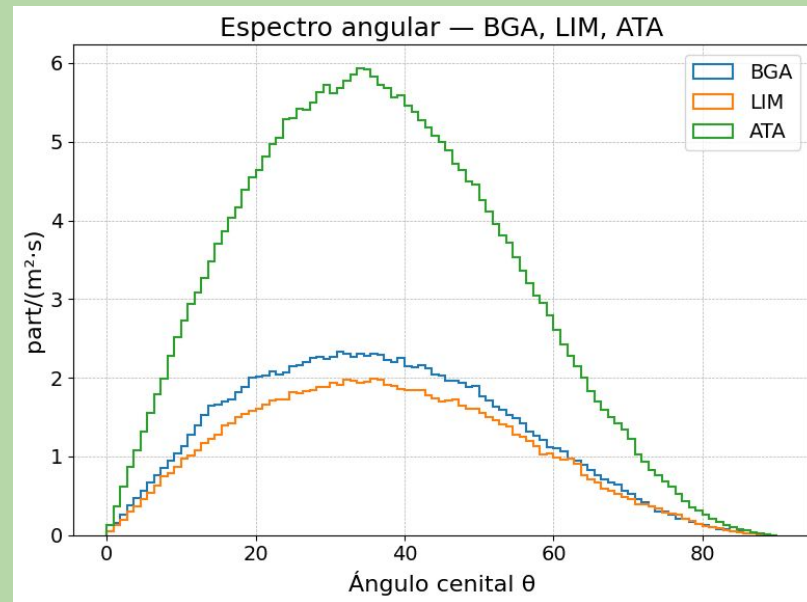
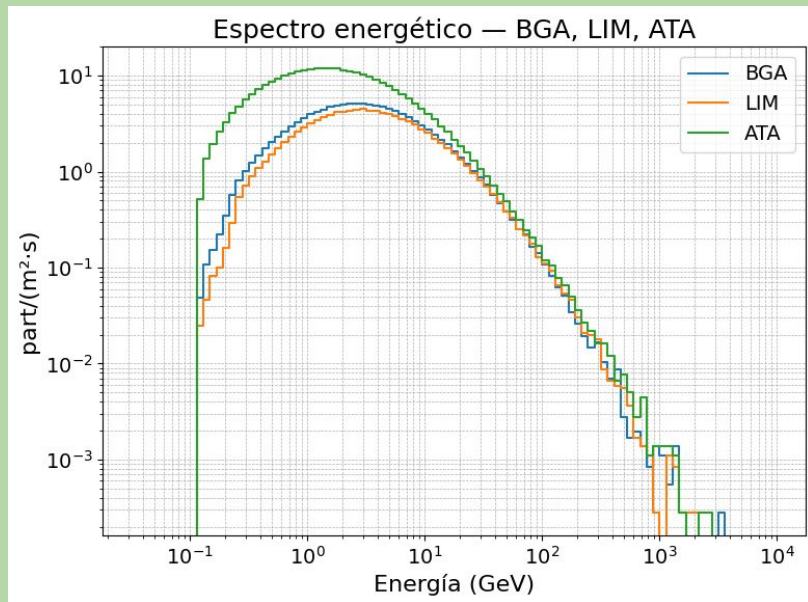
# Muones

Los muones son partículas subatómicas cargadas, producidas por la interacción de rayos cósmicos con la atmósfera.

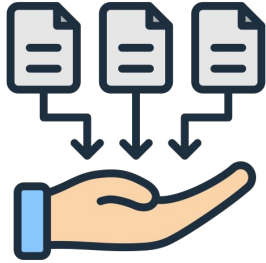
- Se simulan en herramientas como CORSIKA o ARTI.
- Se realizan aproximaciones analíticas en dominions acotados.
  - MUPAGE(MUon GEnerator from PArametric for-mulas)



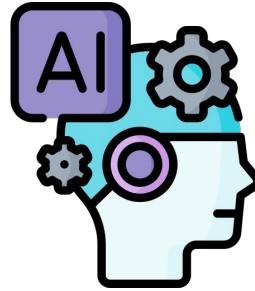
# Espectro del flujo de muones



# Proyecto



Recopilación de  
datos/simulaciones.



Modelo de inteligencia  
artificial para la estimación.

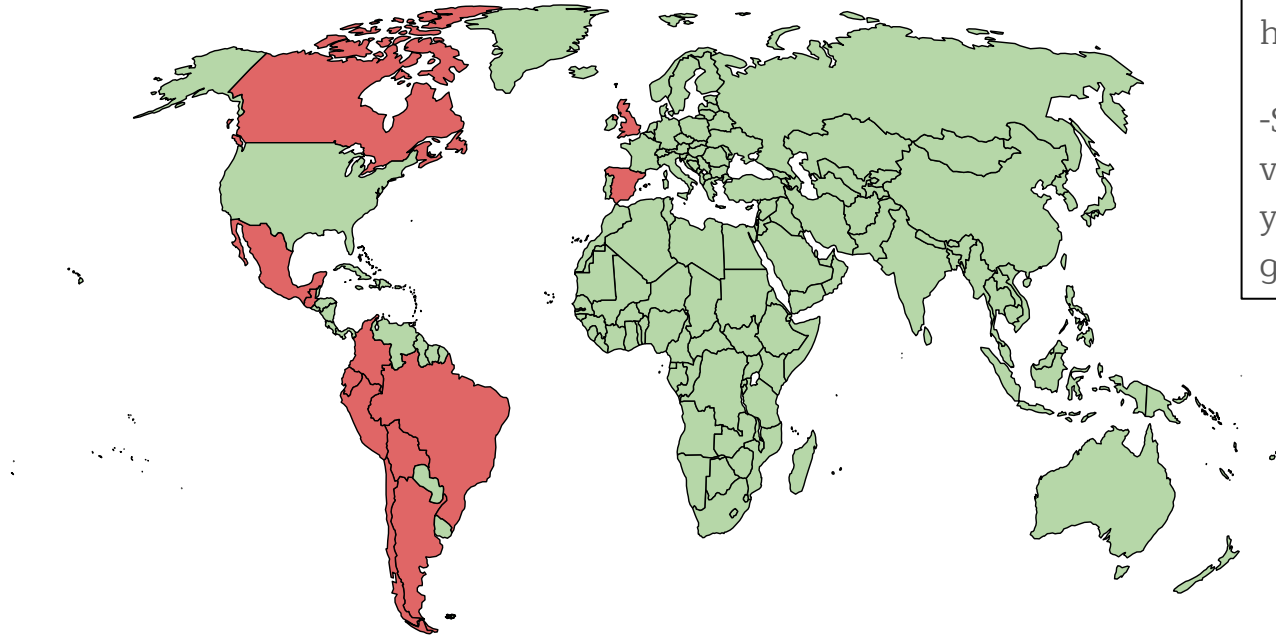


Plataforma Web para la  
visualización.

# Datos

Simulaciones ARTI

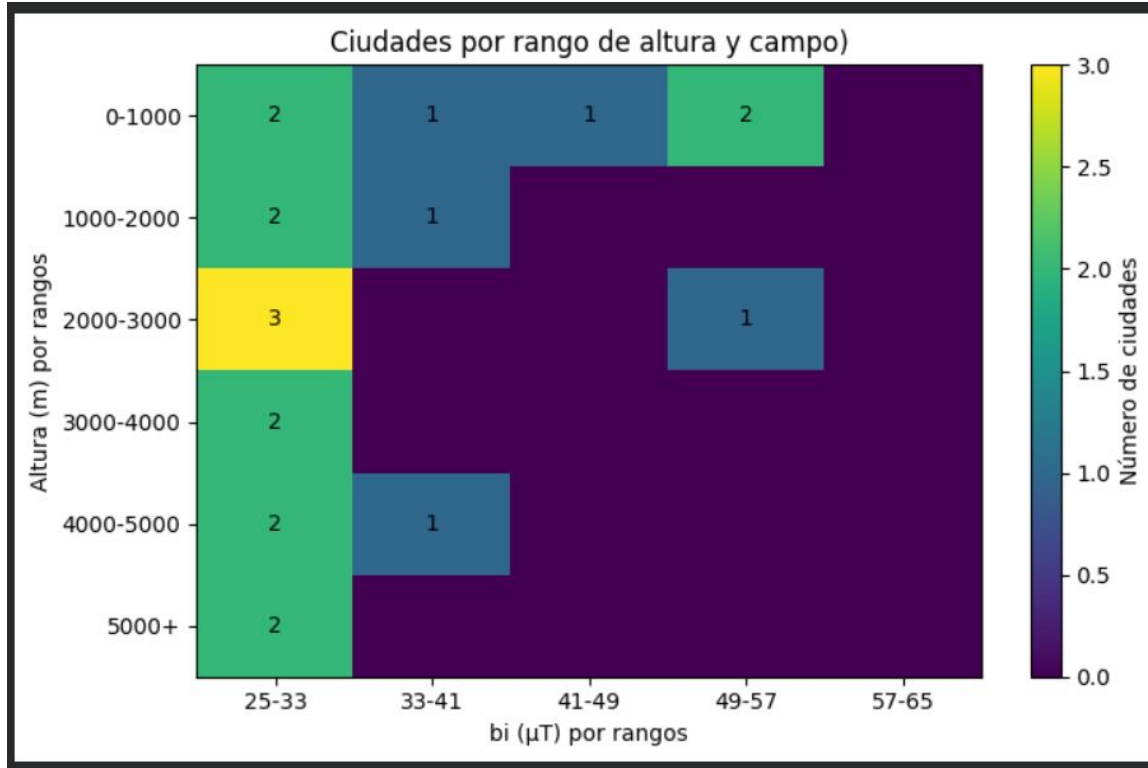
# Datos Simulados



-Países simulados  
hasta el momento.

-Se priorizo  
variedad de altura  
y campo  
geomagnético.

# Datos Simulados



- Se planea realizar un muestreo estratificado.
- Por el momento se tomaron ciudades específicas.
- 20 ciudades simuladas actualmente.



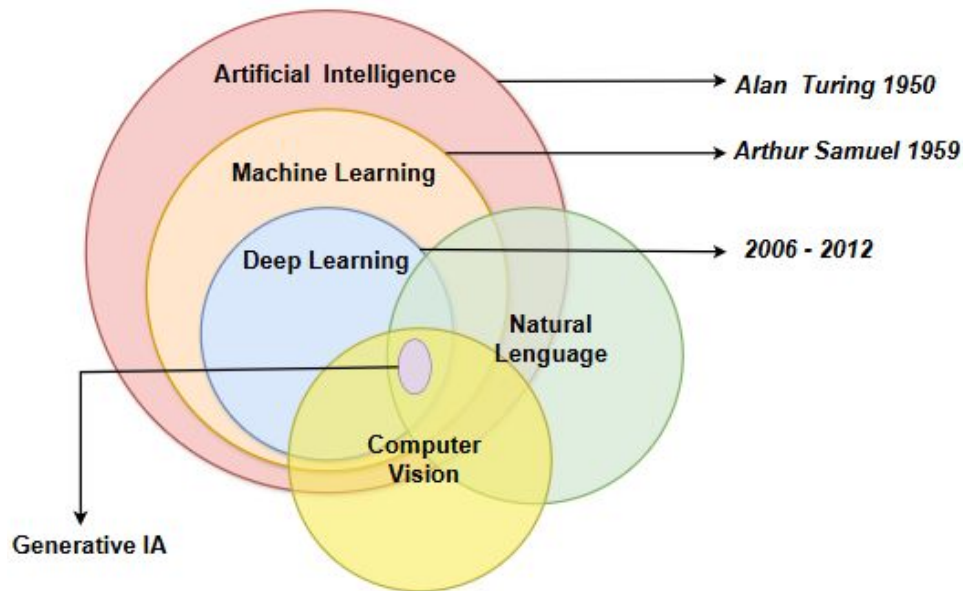
# CONDITIONAL NORMALIZING FLOWS

Introducción al modelo

# Inteligencia artificial

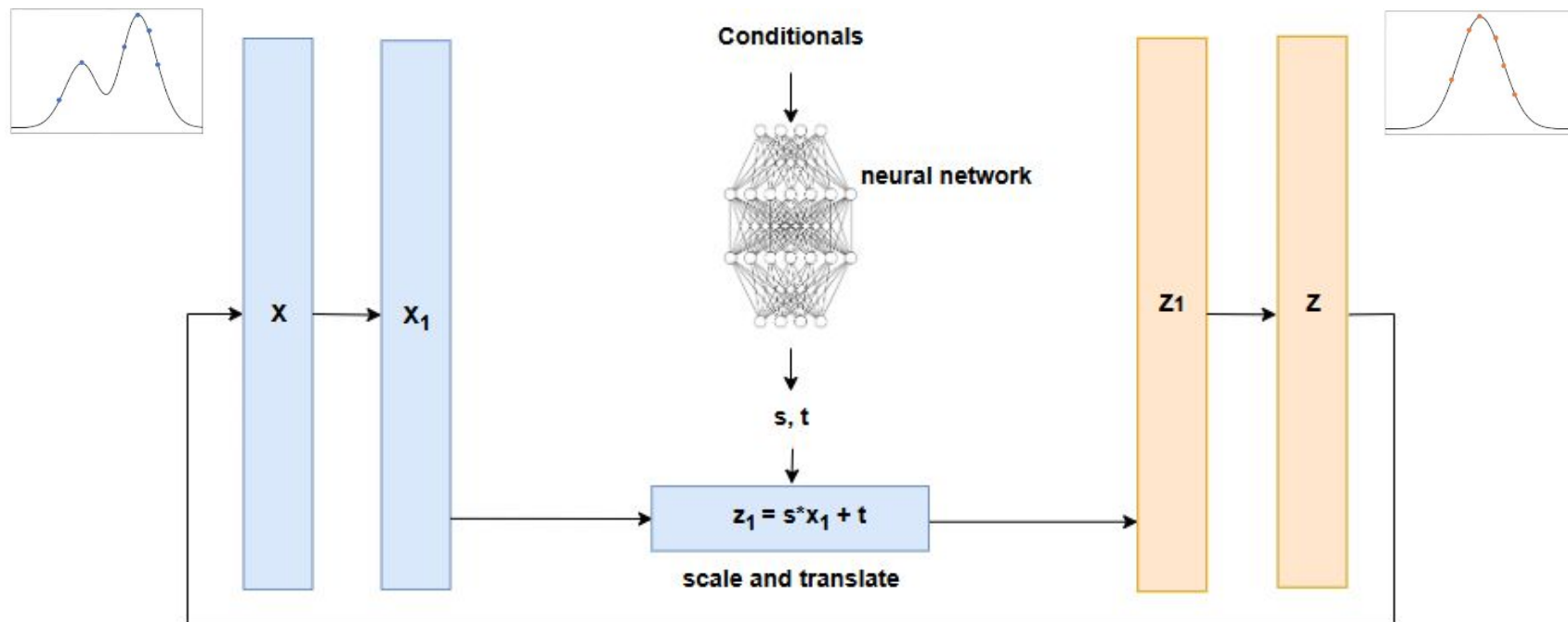
La inteligencia artificial es un área interdisciplinaria de la informática que busca crear sistemas capaces de realizar tareas propias de la inteligencia humana.

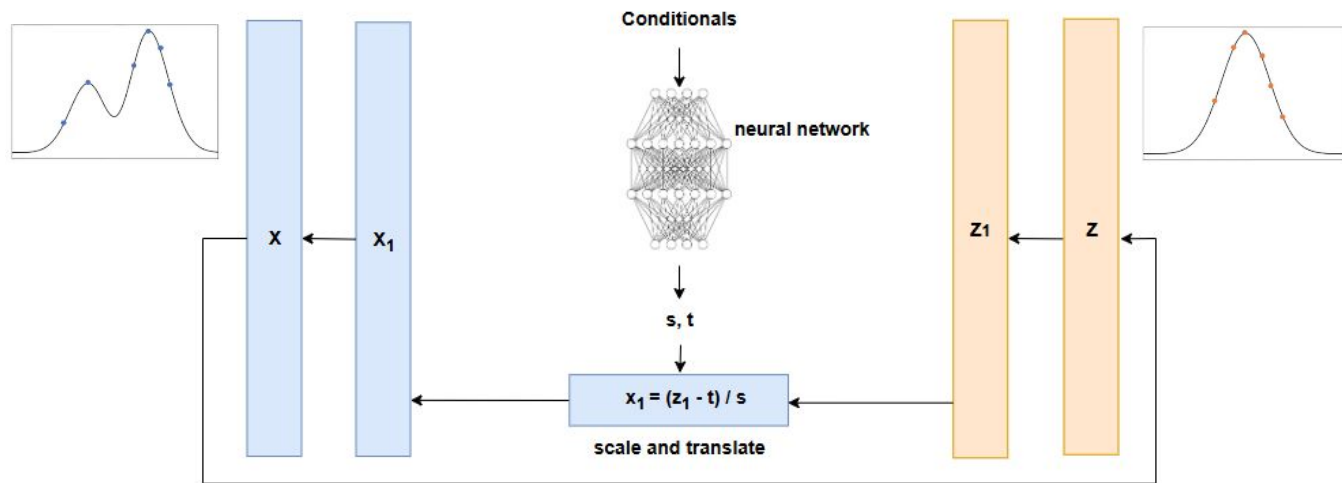
---



# Conditional Normalizing Flows

Los CNFs son modelos generativos que transforman distribuciones simples en complejas mediante funciones invertibles y diferenciables.





Regla del cambio de variable en probabilidad:

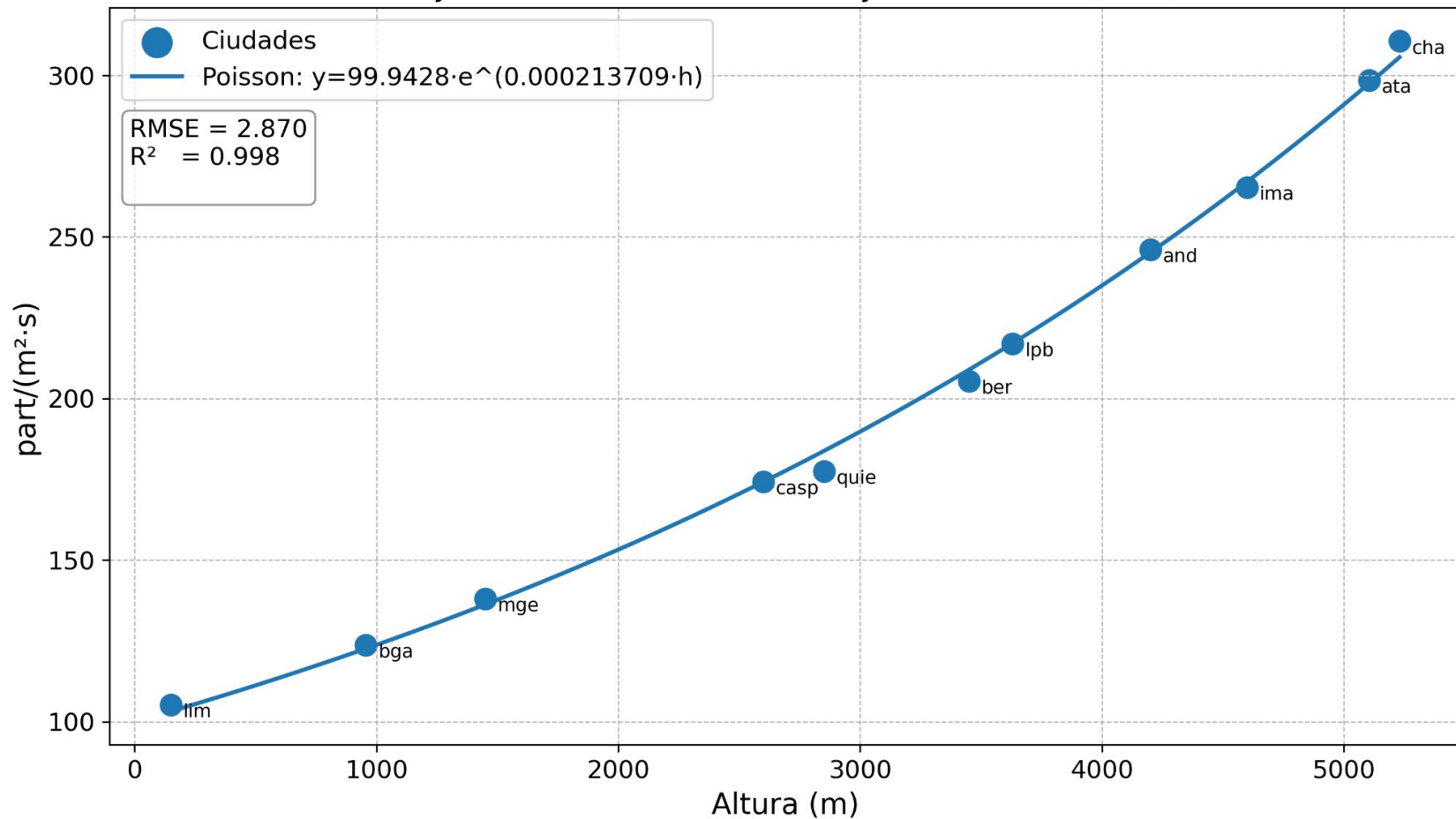
$$f_{\theta} = f_K \circ f_{K-1} \circ \dots \circ f_2 \circ f_1$$

$$\log p_{X|C}(x | c) = \log p_Z(f_{\theta}(x; c)) + \log \left| \det J_{f_{\theta}}(x; c) \right|$$

# DESARROLLO DEL CNFs

Introducción al desarrollo realizado

## Flujo de muones vs Altura: Ajuste Poisson (MLE)



# Modelado del CNFs

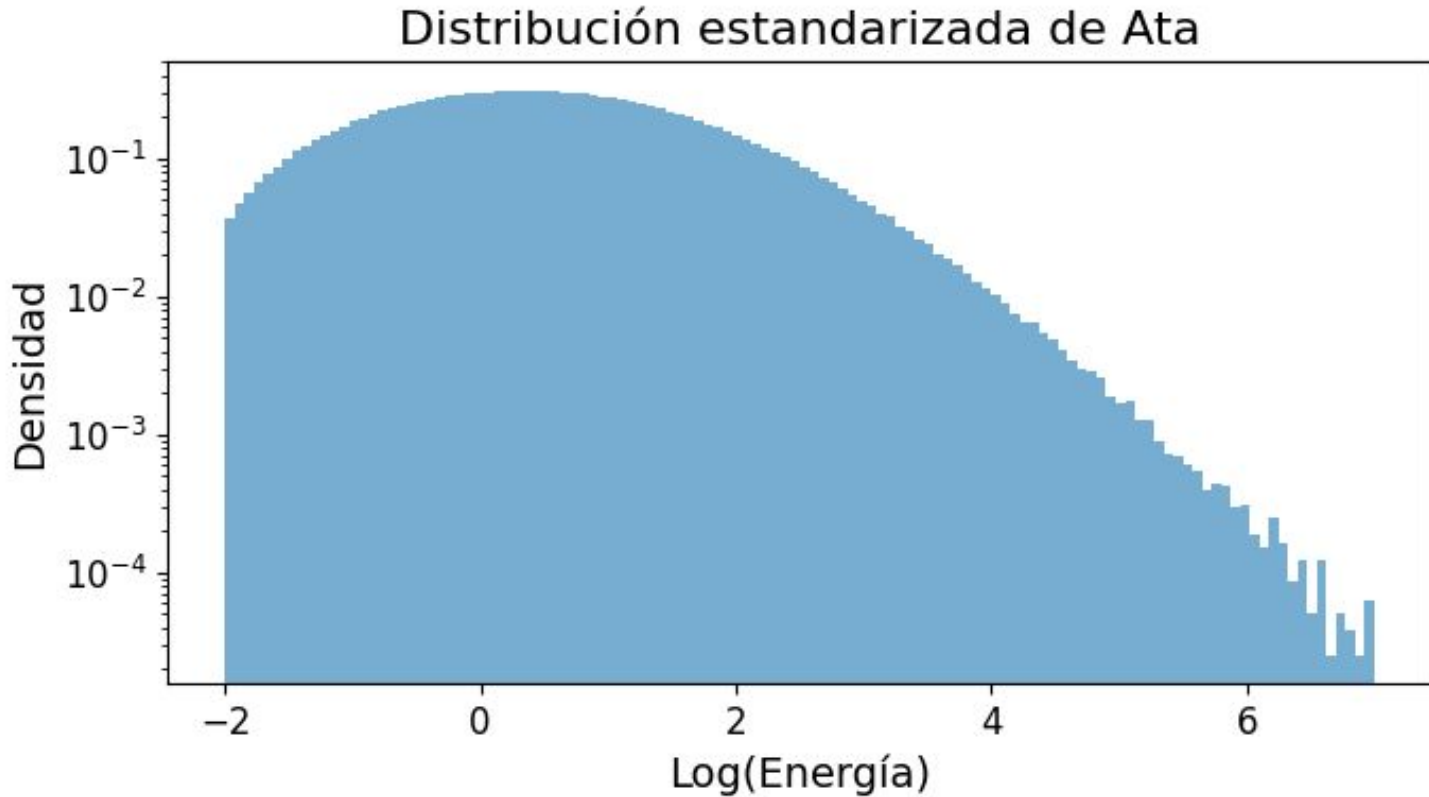
## Preprocesamiento:

- Se seleccionaron solo muones y las variables se estandarizaron.
- Se dividió en 11 ciudades para entrenamiento y 5 para validación, para un total de 8.223.722 datos de entrenamiento.

## Entrenamiento:

- CNFs con 6 capas (128 neuronas), 3 bins, núm layers = 8.
- Entrenado durante 60 epochs, usando batches de tamaño 4096.
- El entrenamiento se ejecutó en Kaggle y culminó en 2 h 30 min.

# Espectro energético estandarizado

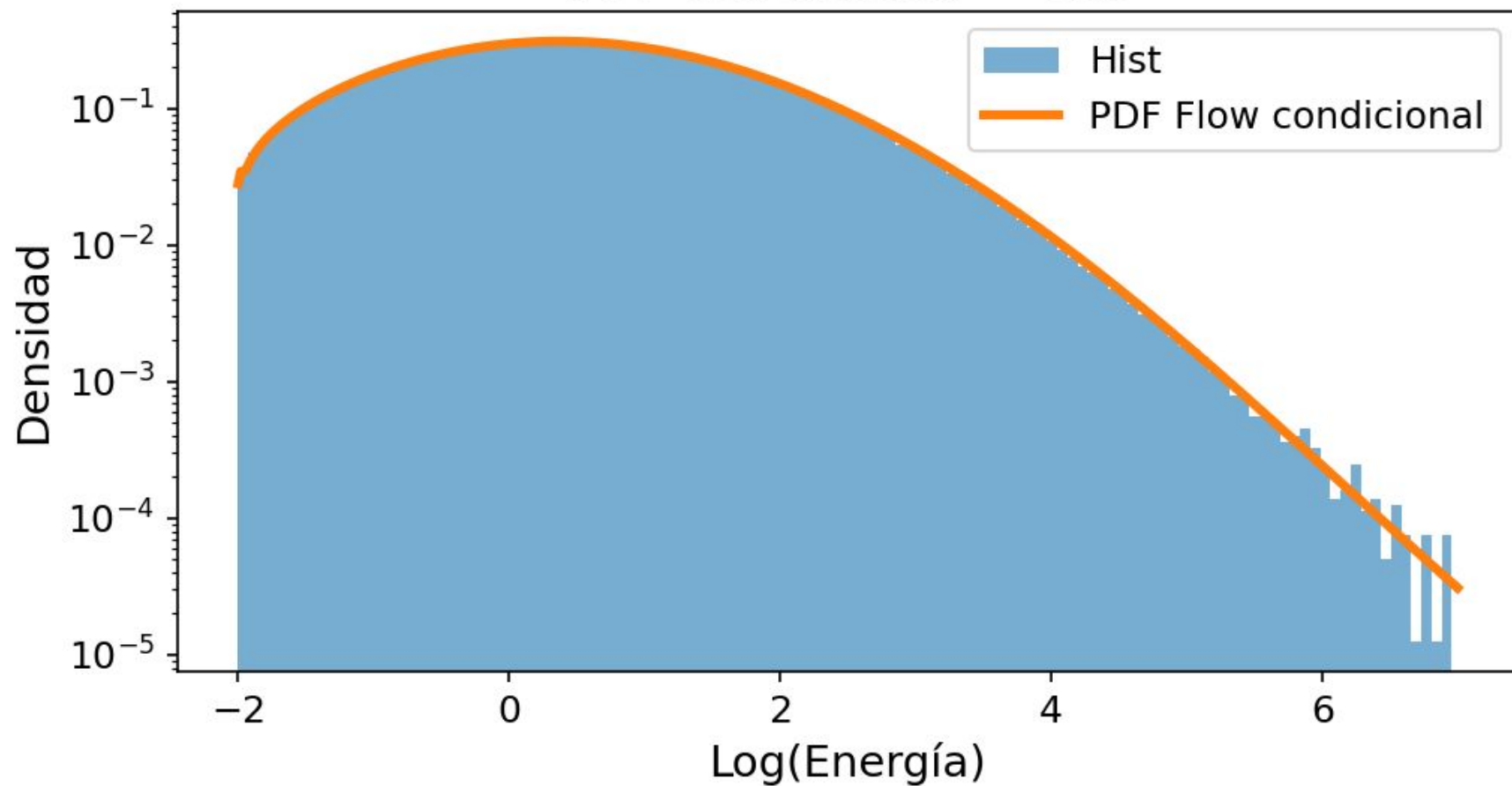




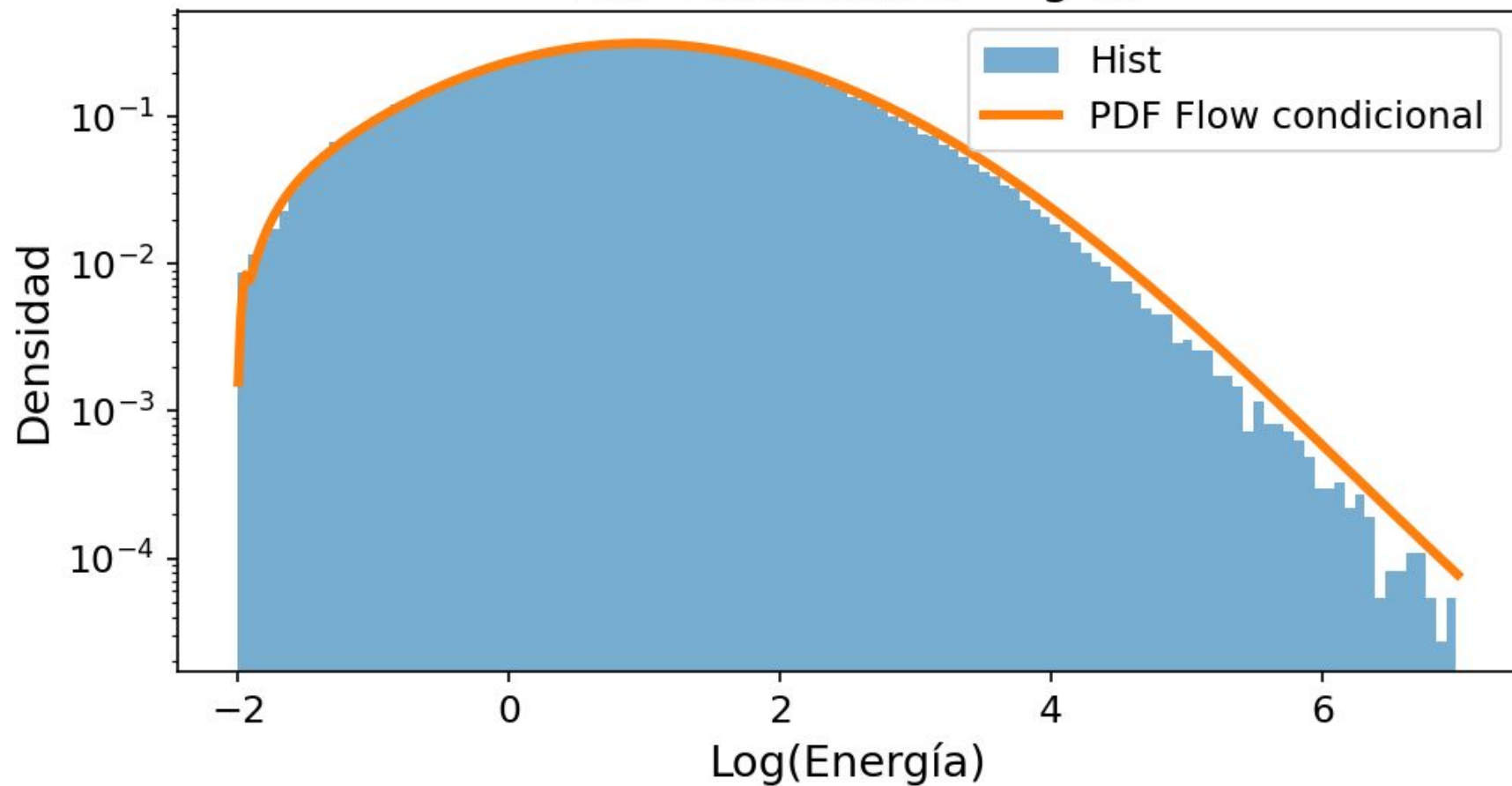
# Inferencia del CNFs

Resultados de validación

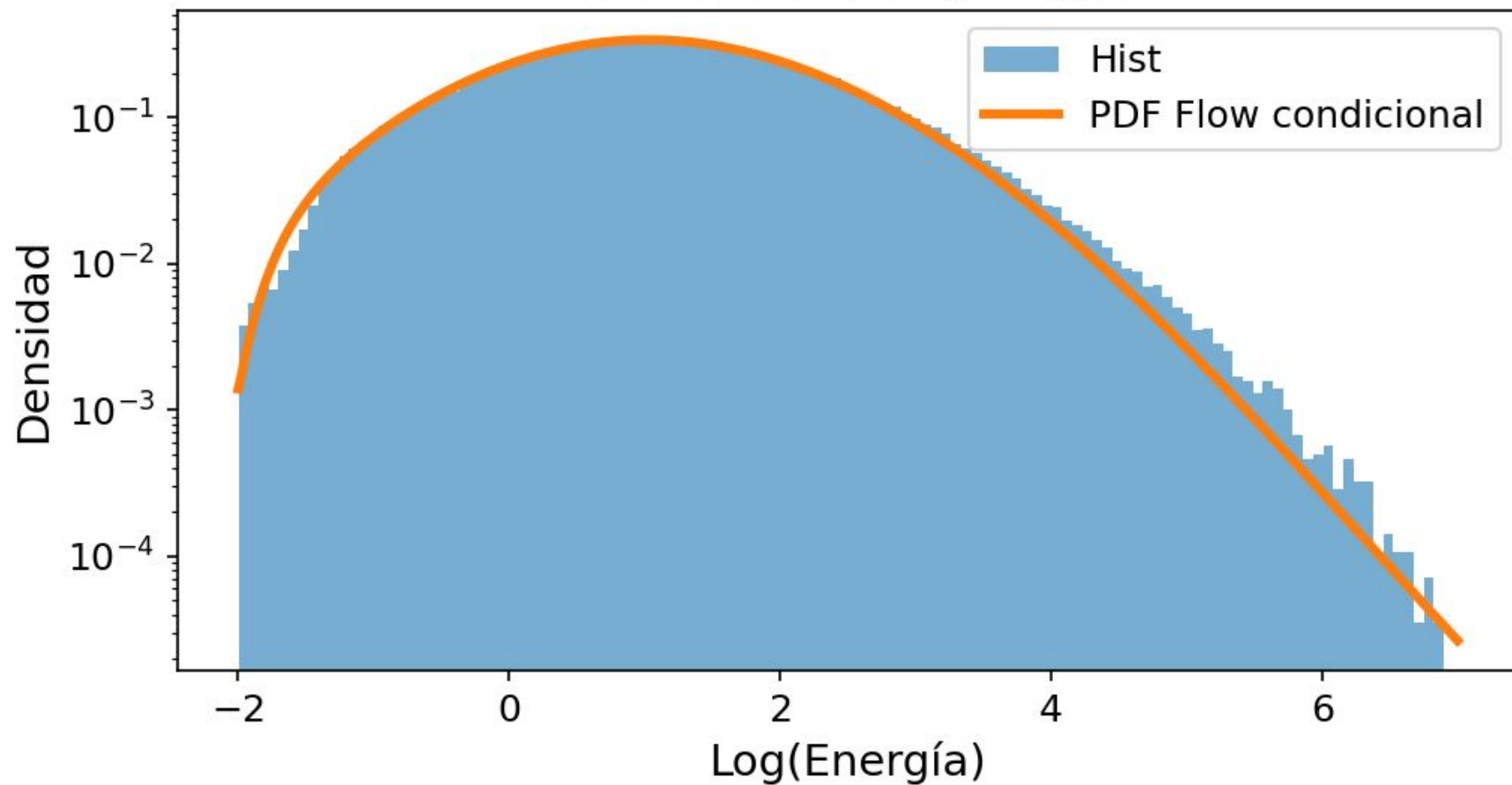
## PDF condicional — ata



## PDF condicional — gua



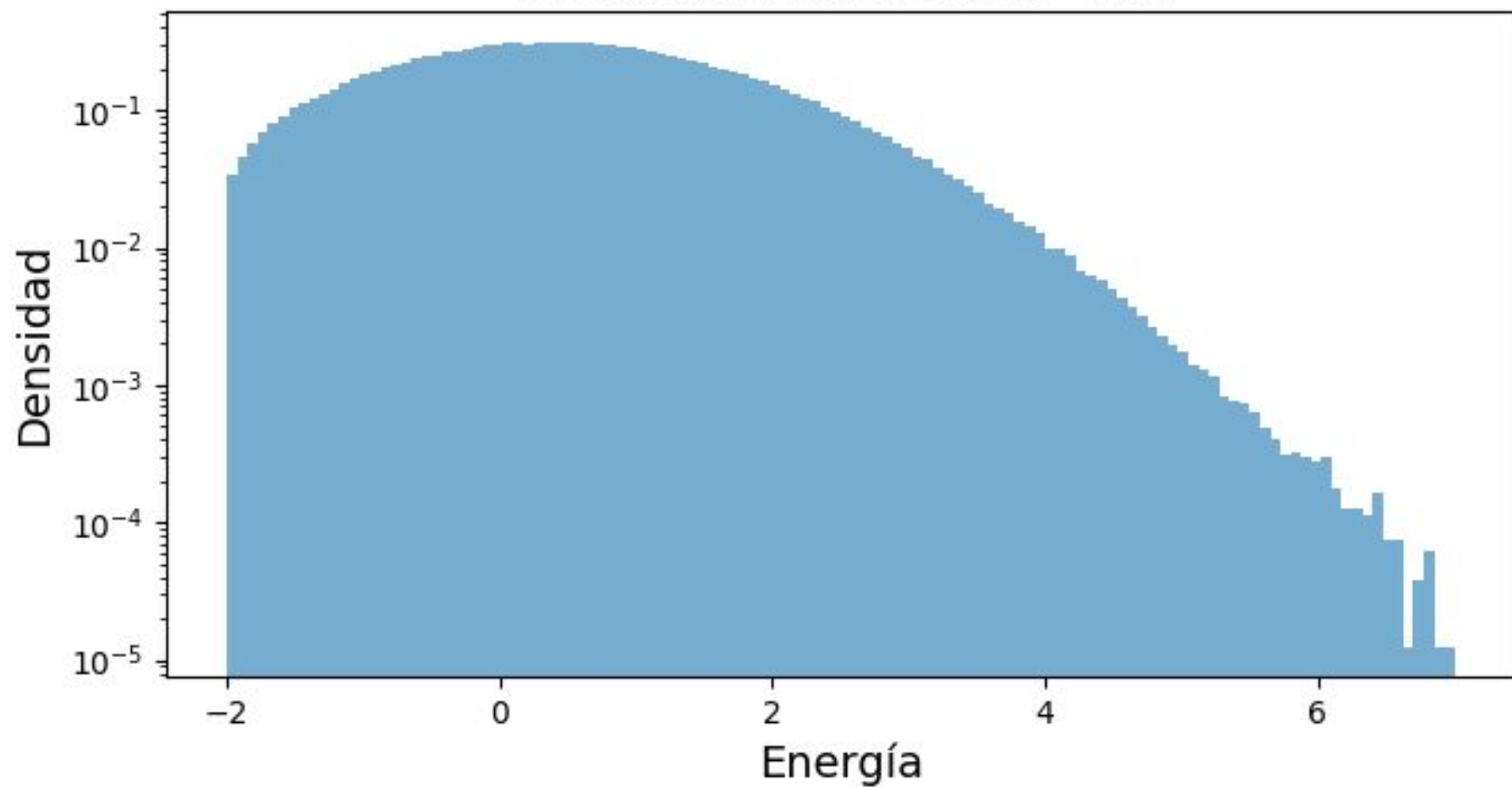
## PDF condicional — lim



# Resultados del muestreo

Resultados y tiempos

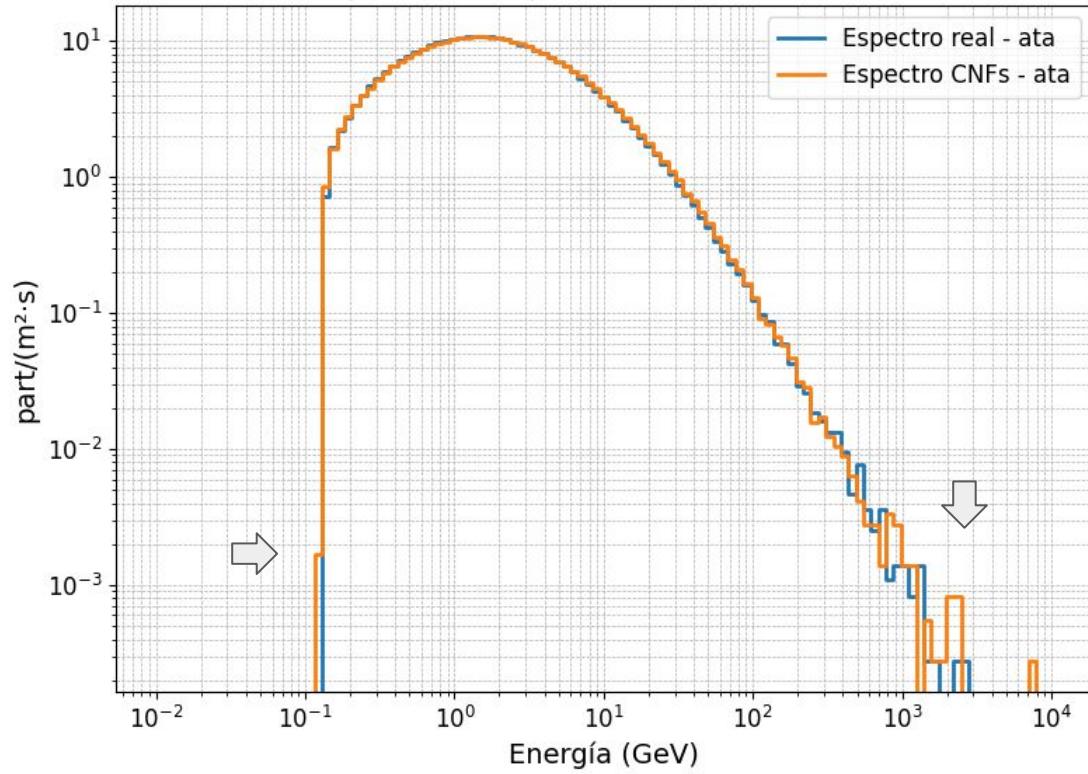
## Distribución del CNFs - Ata



# Análisis por intervalos de energía

	lim	gua	quie	ima	ata
[-2.0, 1.0]	2.86 %	-3.71 %	-0.90 %	-1.40 %	-0.95 %
[ 1.0, 3.0 ]	-0.19 %	2.03 %	1.56 %	1.79 %	1.24 %
[ 3.0, 5.0 ]	-17.05%	17.29%	-2.06 %	8.72 %	5.41 %
[-5.0, 7.0]	-41.66%	44.21%	-1.20 %	27.01%	3.82 %
[ Tiempo ]	31.67 s	44.37s	55,11 s	80,65 s	90.49 s

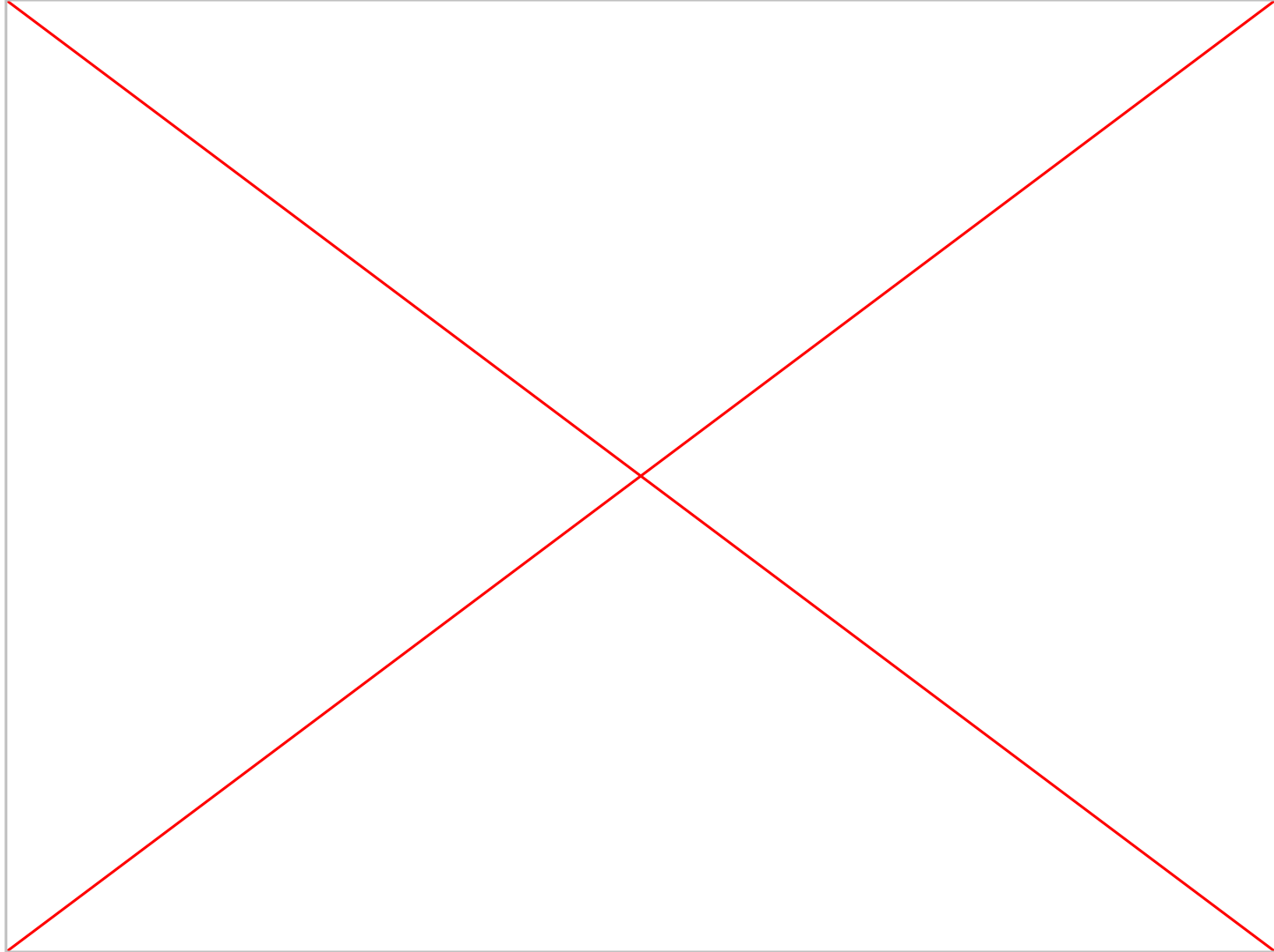
Comparación espectro real vs CNFs — ata





# Desarrollo Web

Visualización



# Trabajo por desarrollar

Que falta realizar



# Desarrollo futuro

## Modelo CNFs:

- Completar las simulaciones para todas las ciudades.
- Incorporar el espectro angular en el modelo CNF.
- Mejorar y validar el modelo CNF.

## Desarrollo web:

- Integrar y ajustar el frontend con el backend.
- Desplegar el modelo en la plataforma.

# GRACIAS

Preguntas...



# ANEXOS

Sesión de preguntas



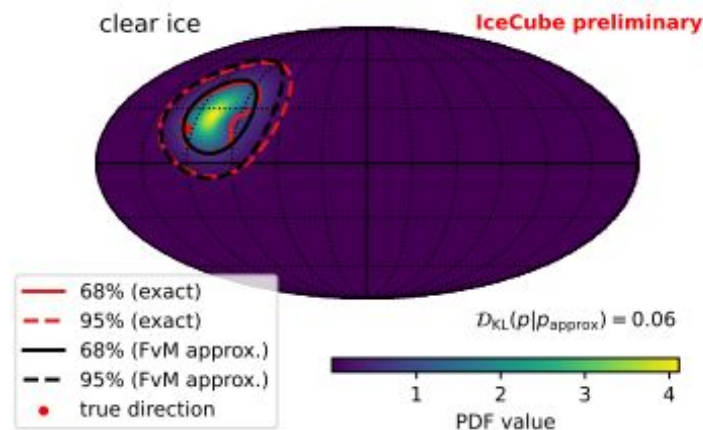
# Estado del arte

## IceCube:

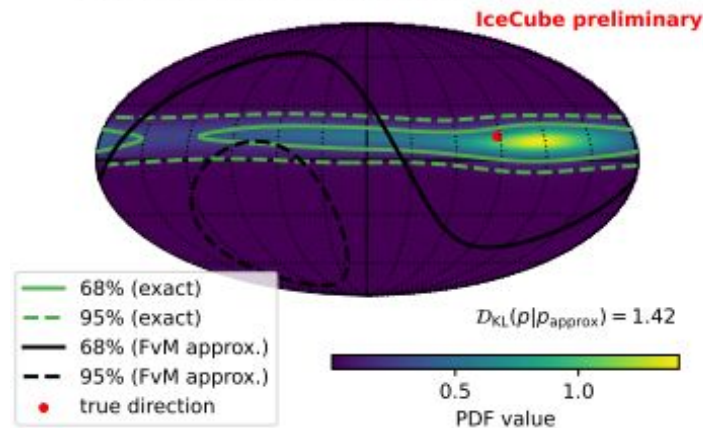
Reconstruye la energía y dirección de neutrinos usando la luz Cherenkov detectada en el hielo.

## Modelo:

Se entrenan CNFs separados para energía (1D) y dirección (2D). La FvM sirve como referencia, pero los CNF capturan estructuras direccionales más complejas.

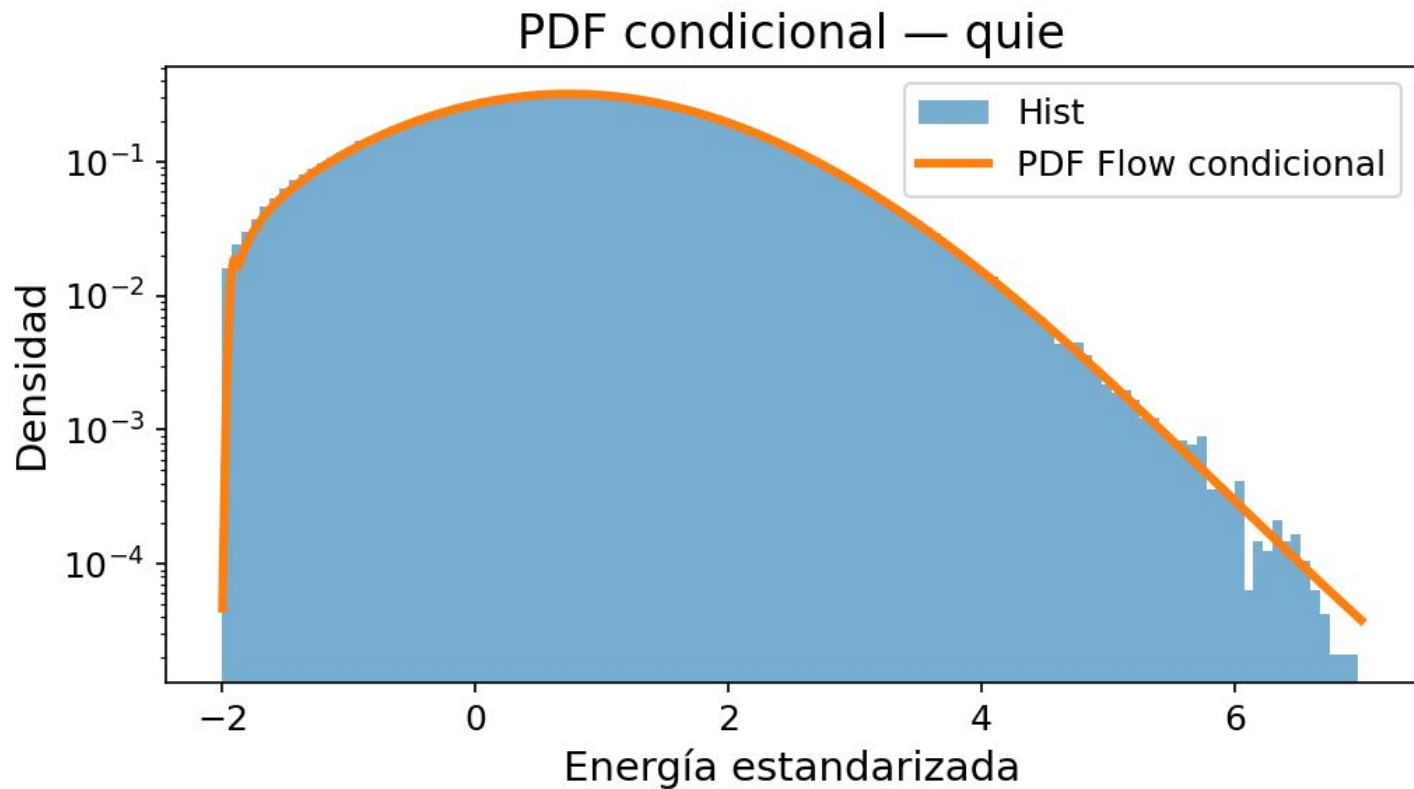


(b) example of direction posterior in clear ice



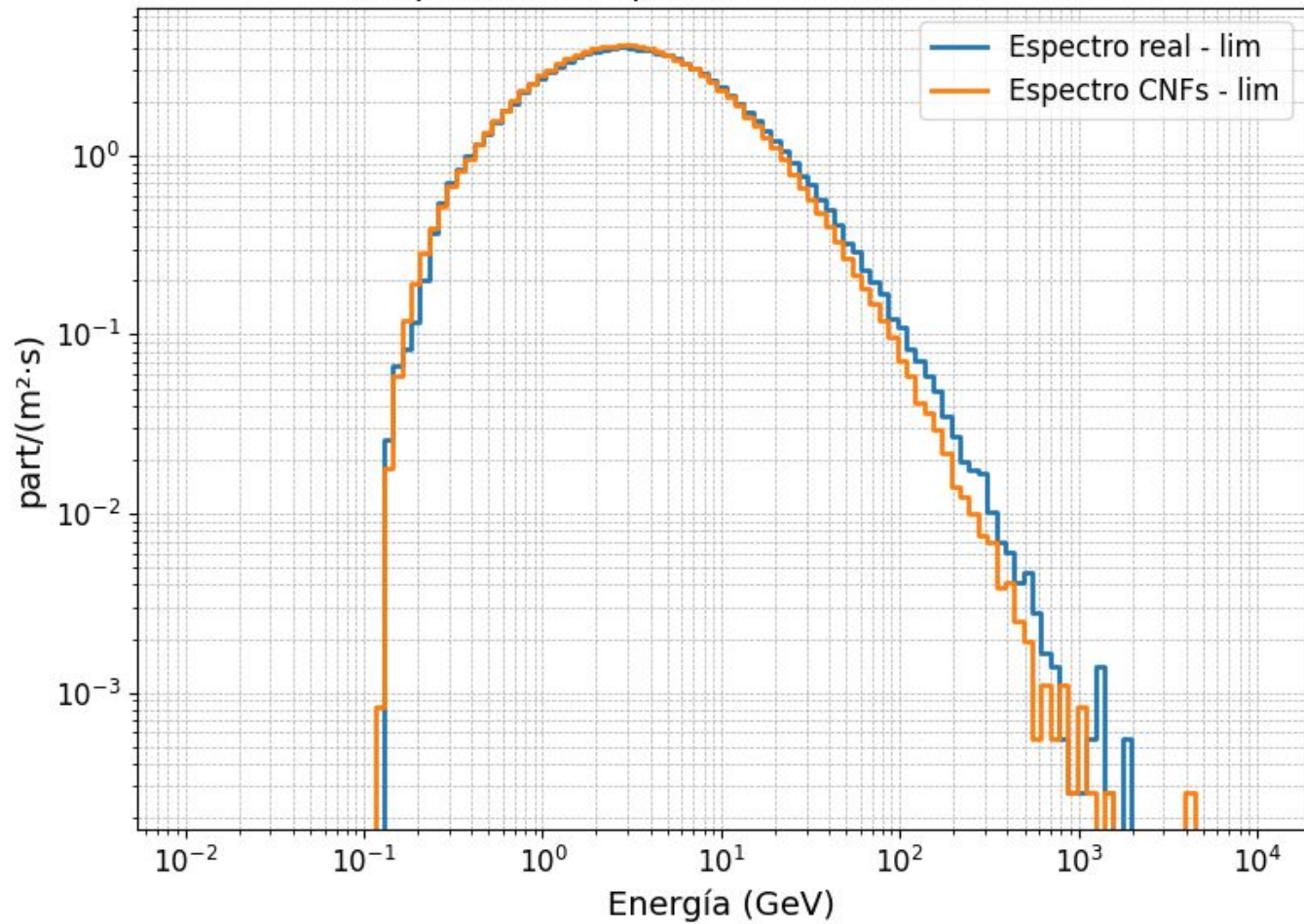
(d) direction posterior of a high KL-divergence event

# Escenarios de estudio





Comparación espectro real vs CNFs — ata



# MUPAGE

Es un generador rápido de muones atmosféricos pensado para telescopios de neutrinos en agua o hielo (ANTARES, KM3NeT, IceCube). En lugar de correr CORSIKA completo cada vez, usa fórmulas paramétricas para:

- profundidad ( $h$ ),
- ángulo cenital ( $\theta$ )
- Distribución lateral
- Espectro de energía

# Inteligencia Artificial

- Computing Machinery and Intelligence (Turing, 1950): Plantea la pregunta “Can machines think?” e introduce el Test de Turing, considerado el origen conceptual de la IA.
- Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers (Samuel, 1959): Muestra un programa de damas que mejora jugando y populariza la idea de que las máquinas pueden aprender de la experiencia.

---

A. M. Turing, Computing Machinery and Intelligence, Mind, 1950.

A. L. Samuel, Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers, IBM Journal of Research and Development, 1959.

## Flujo de muones vs Altura: Ajuste Poisson (MLE)

