

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

PROYECTO **CULTURAL, CIENTÍFICO Y COLECTIVO** DE NACIÓN

Monitoreo de la actividad sísmica del territorio colombiano usando aprendizaje profundo

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Maestría en Ciencias-Geofísica

Emmanuel David Castillo Taborda

Director:
Ph.D. Germán Andrés Prieto Gómez

Facultad de Ciencias –Departamento de Geociencias- Sede Bogotá

Universidad Nacional de Colombia

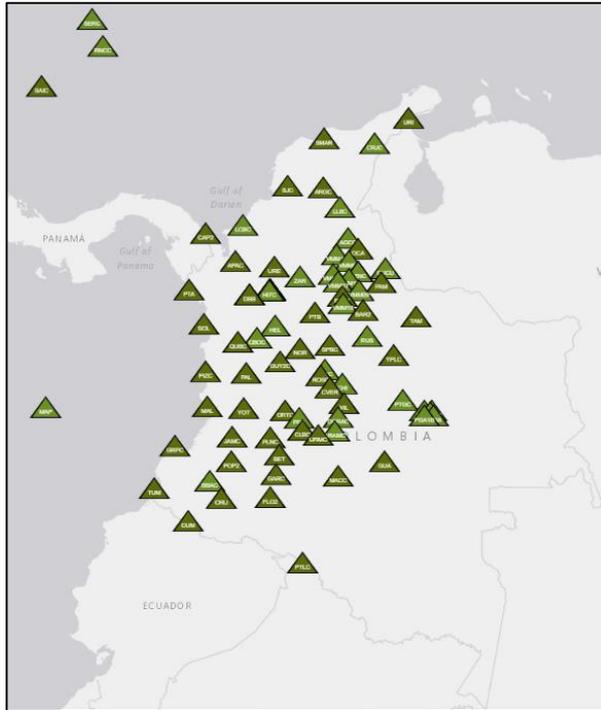
PROYECTO **CULTURAL, CIENTÍFICO Y COLECTIVO** DE NACIÓN

Contenido

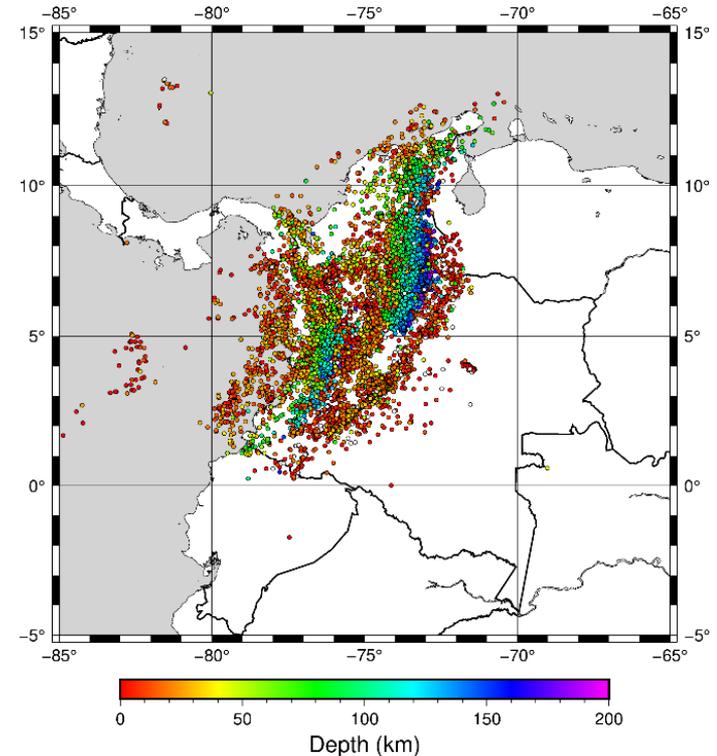
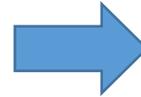
- 1 Pasos de un monitoreo sísmico**
- 2 Detección y picado automático de fases**
- 3 Asociación automática de fases**
- 4 Catálogo sísmico automático del territorio Colombiano**
- 5 Conclusiones y trabajos futuros**

Monitoreo sísmico

A partir del monitoreo se obtiene un catálogo sísmico en la zona cubierta por la red.



Red Sismológica Nacional de Colombia.



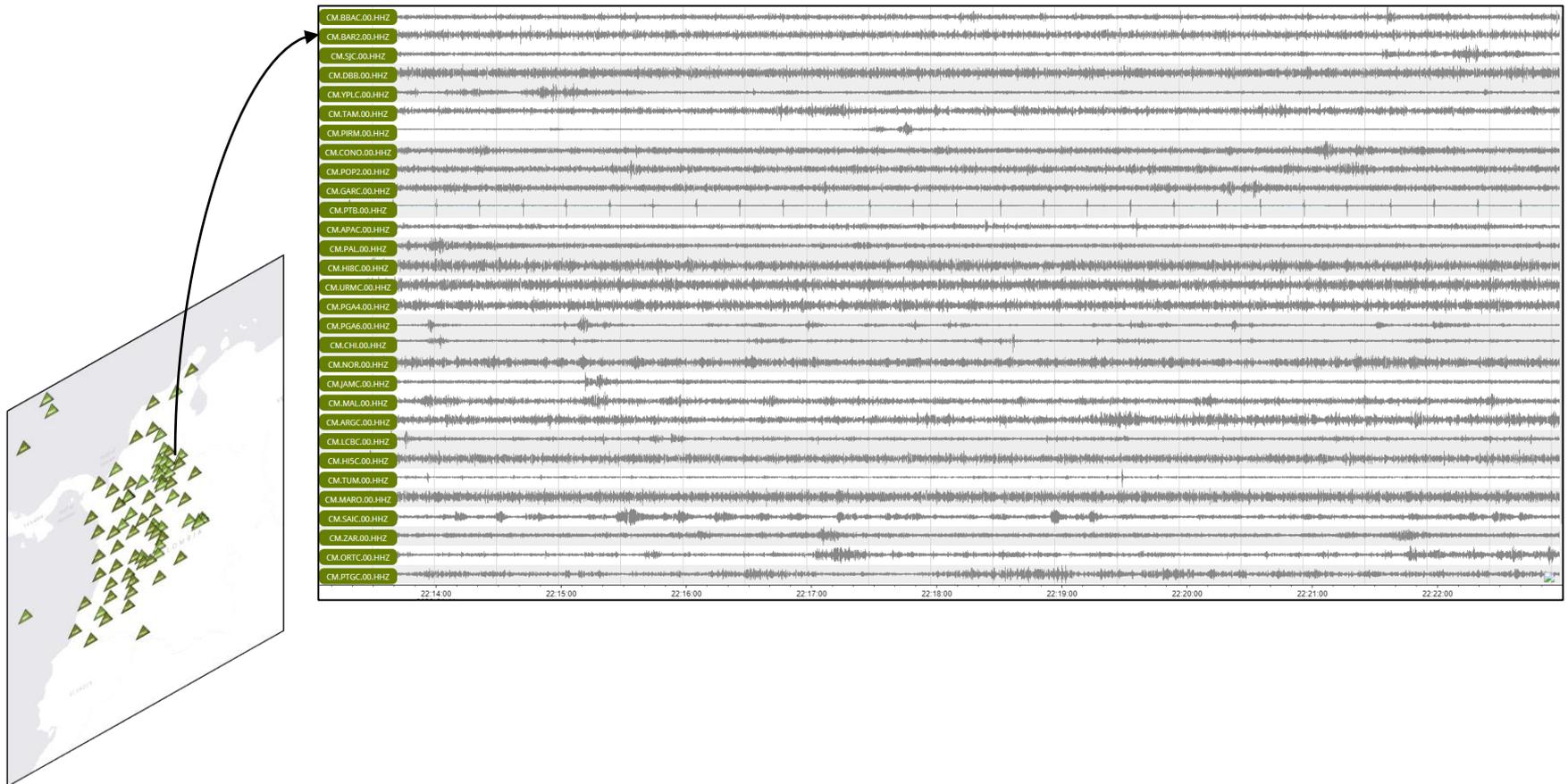
Catálogo sísmico de Colombia desde 2019/12/01 a 2021/01/01 reportado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Registro de una red sismológica

Cada estación registra el movimiento del suelo y presenta sus datos en un sismograma.

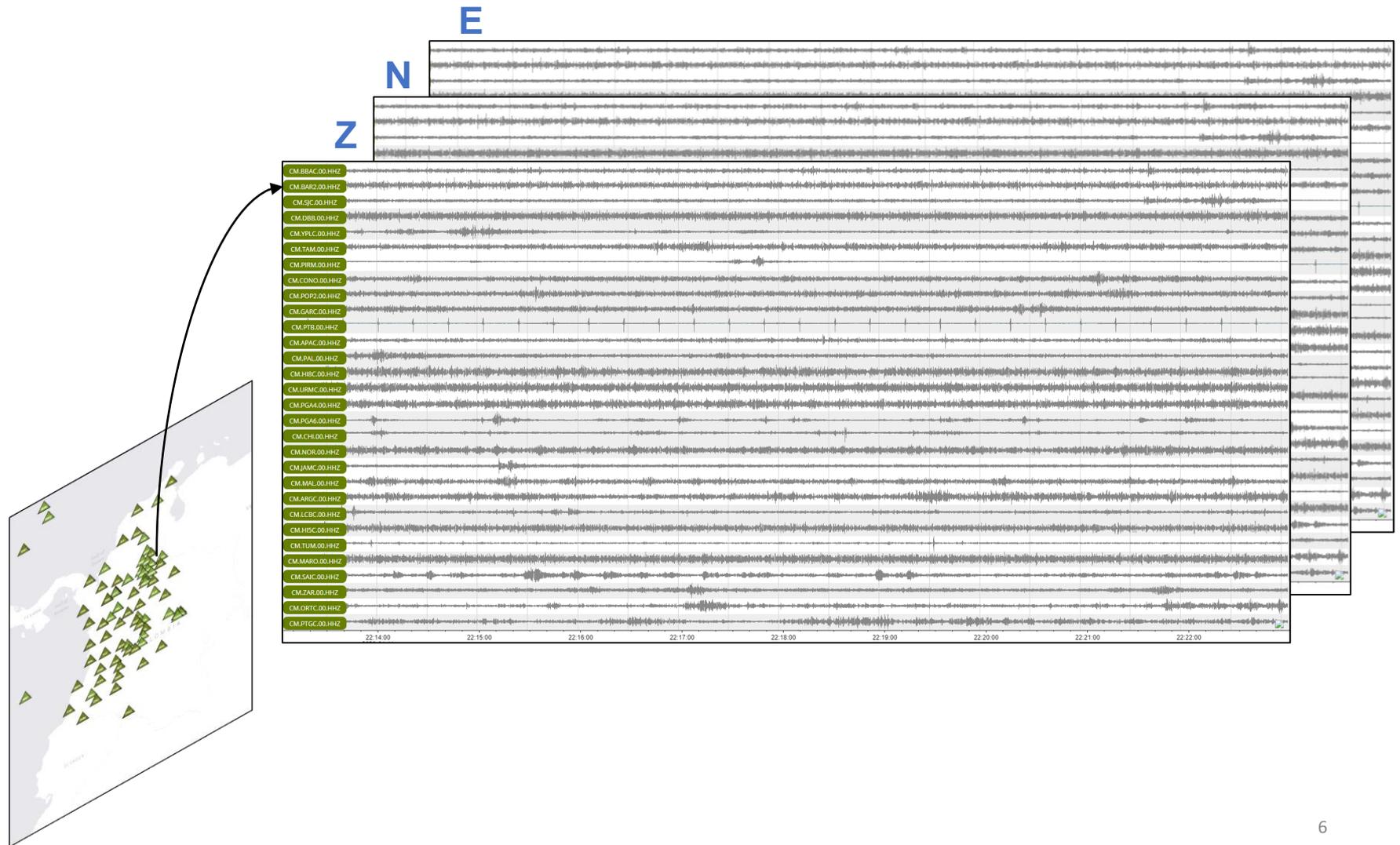
Visualización de la componente Vertical

Z

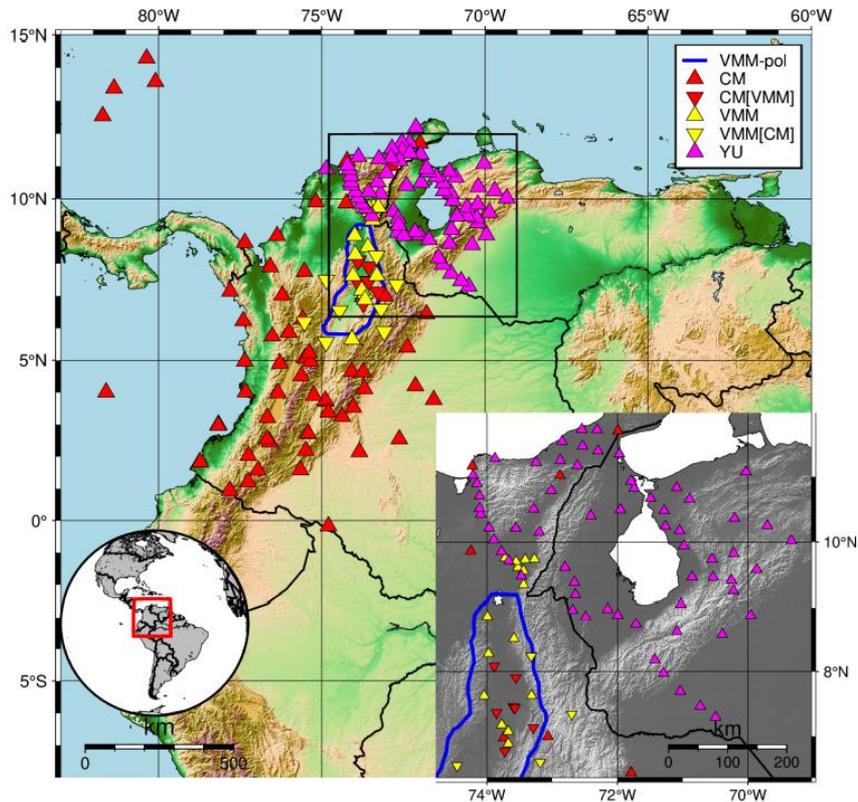


Registro de una red sismológica

Los sismómetros actuales permiten el registro en sus tres componentes.



Redes a monitorear



Red CM

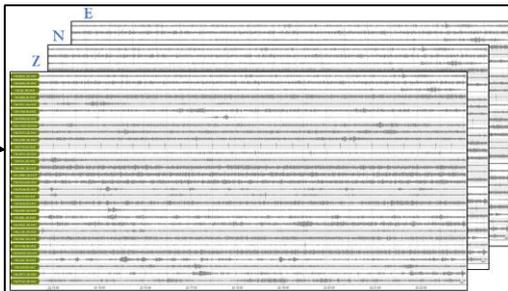
◆ 1 año y 1 mes
2019/01/01 – 2021/01/01
No. Estaciones: 59

Red VMM

◆ 4 años y 9 meses
2016/01/01 – 2020/09/01
No. Estaciones: 32

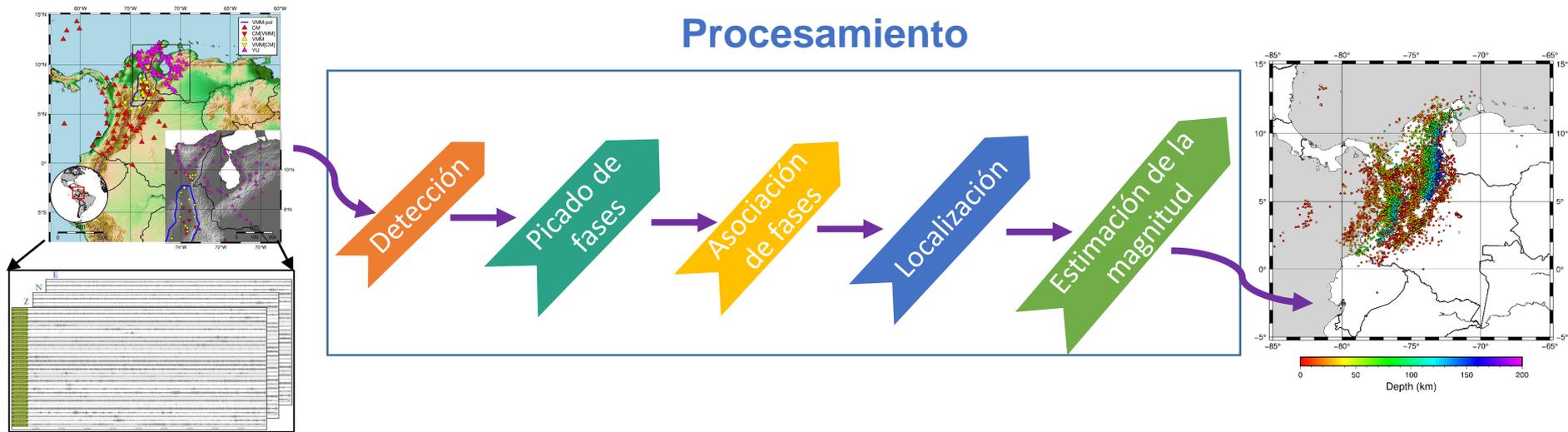
Red YU

◆ 2 años
2016/01/01 – 2018/01/01
No. Estaciones: 65



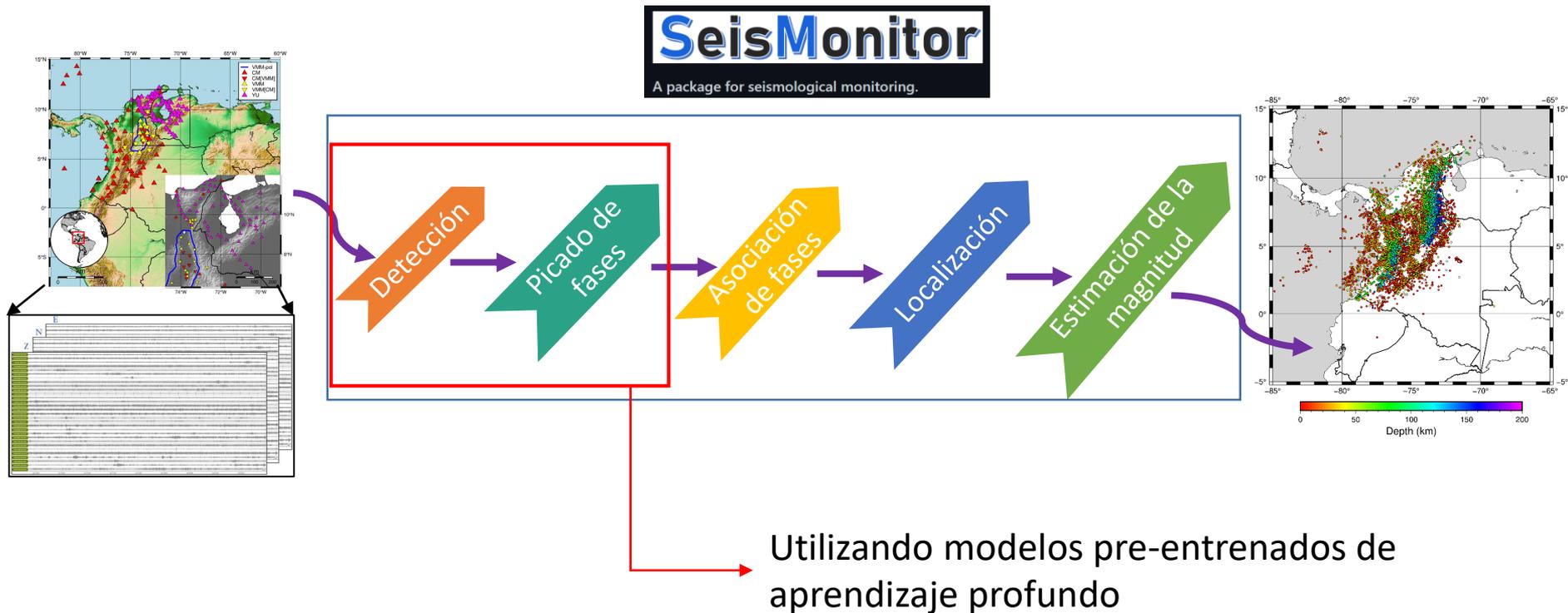
Pasos principales para monitorear la actividad sísmica

Tanto para el monitoreo manual como el monitoreo automático existe el siguiente flujo de trabajo.

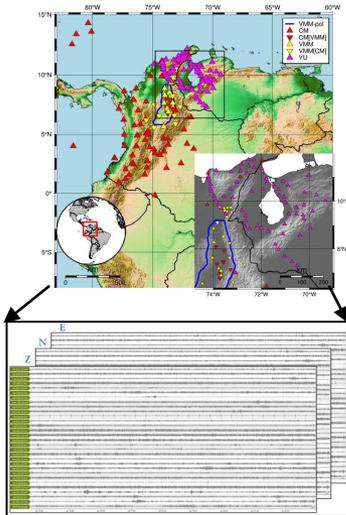


Pasos principales para monitorear la actividad sísmica

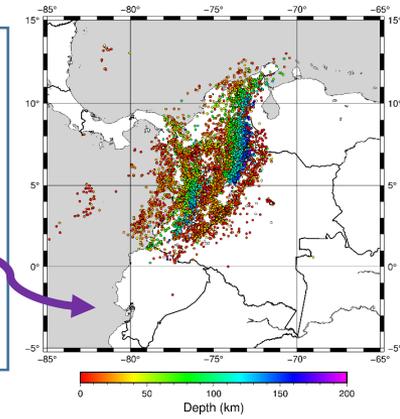
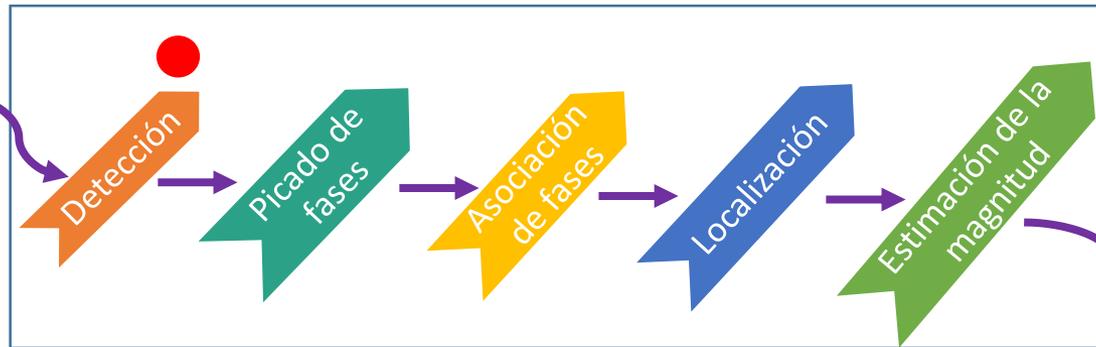
Procesamos los datos automáticamente dando un enfoque distinto al tradicional para la detección y el picado de fases sísmicas. Además se creó un repositorio que ejecuta cada uno de los pasos.



Detección

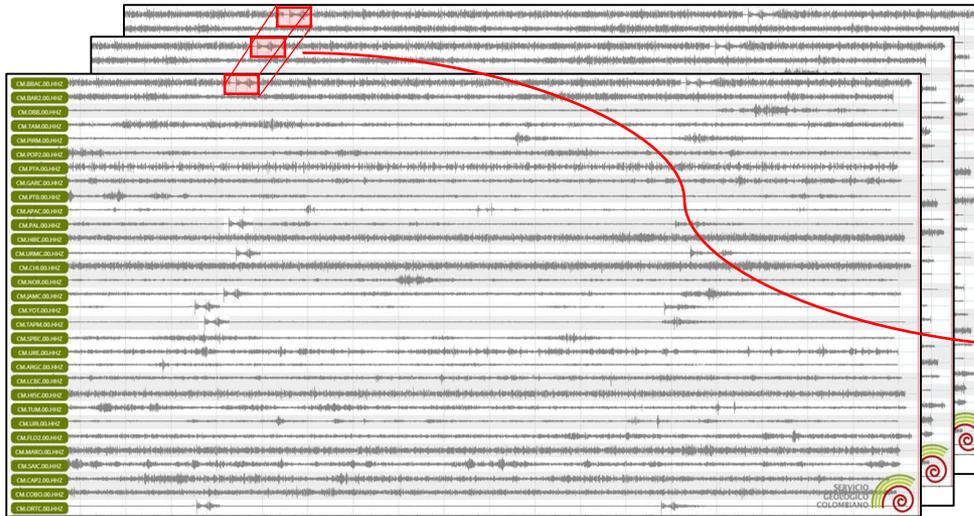


Procesamiento

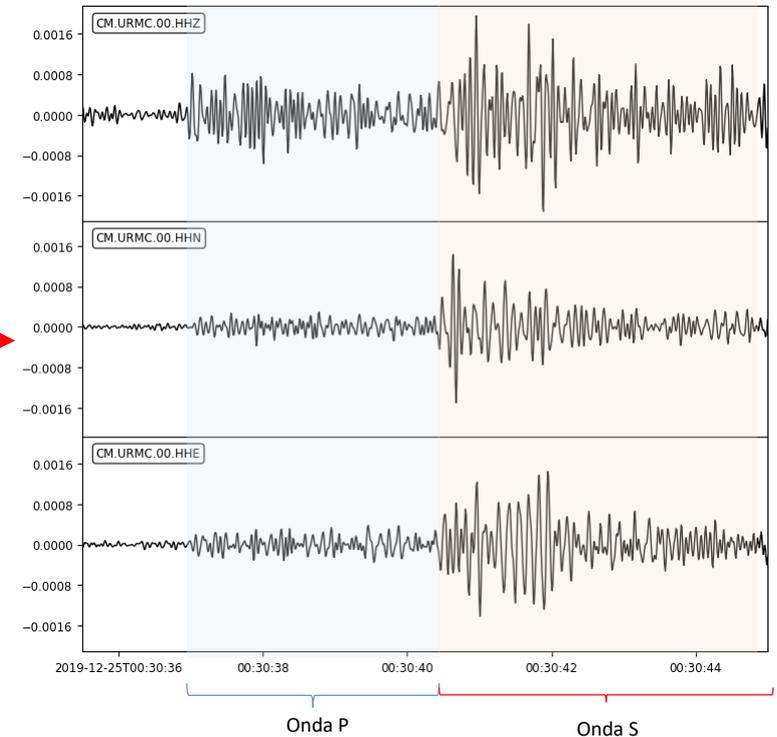


Detección

Se revisa donde se registraron eventos sísmicos y se captura el tiempo dónde se registro el evento.



Evento sísmico

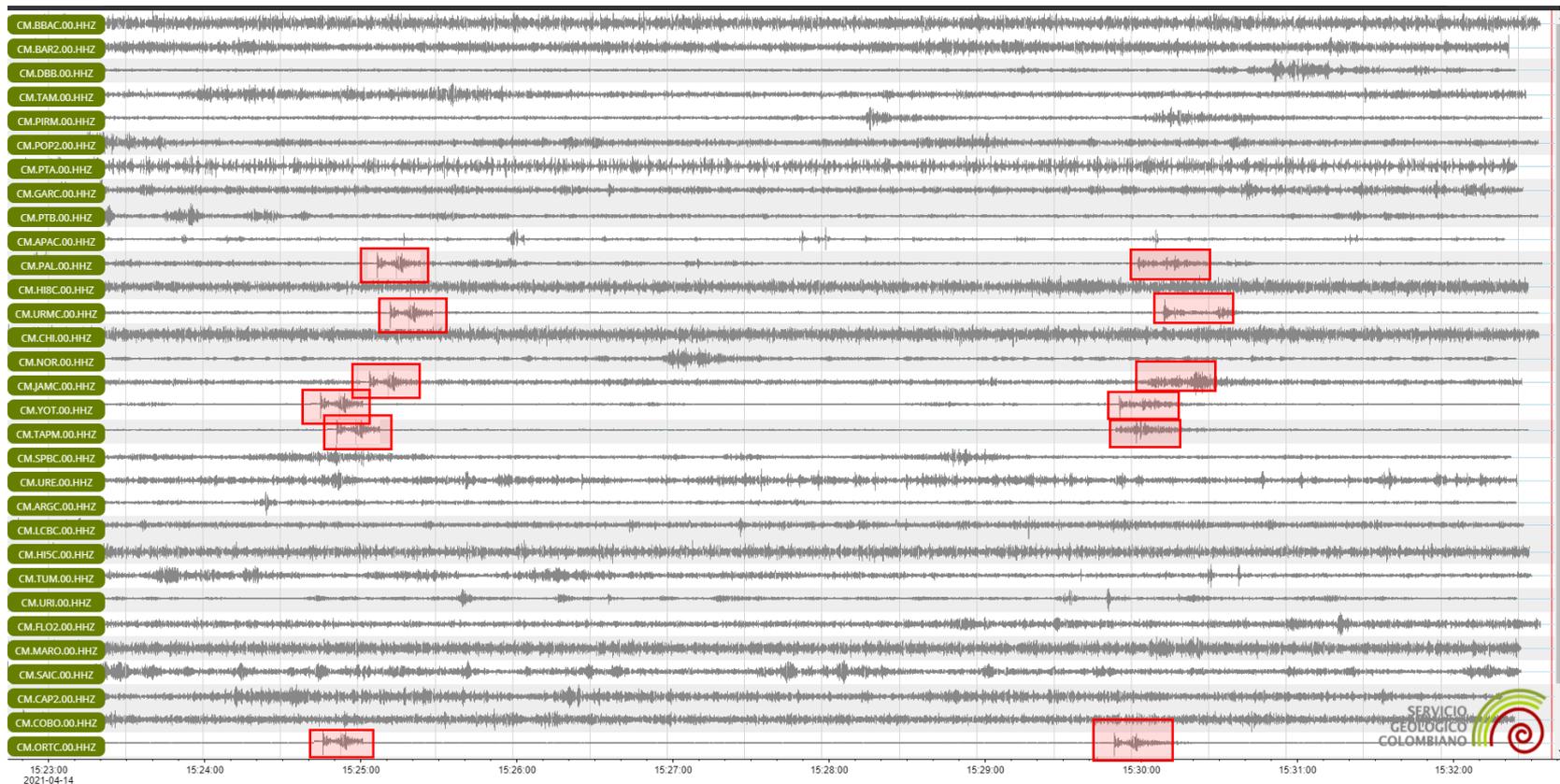


Un evento se identifica porque en el sismograma se presenta el registro de una onda P y onda S

Detección en cada estación

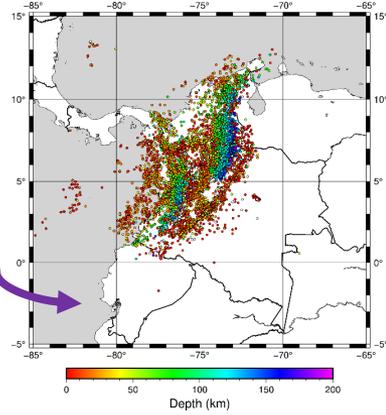
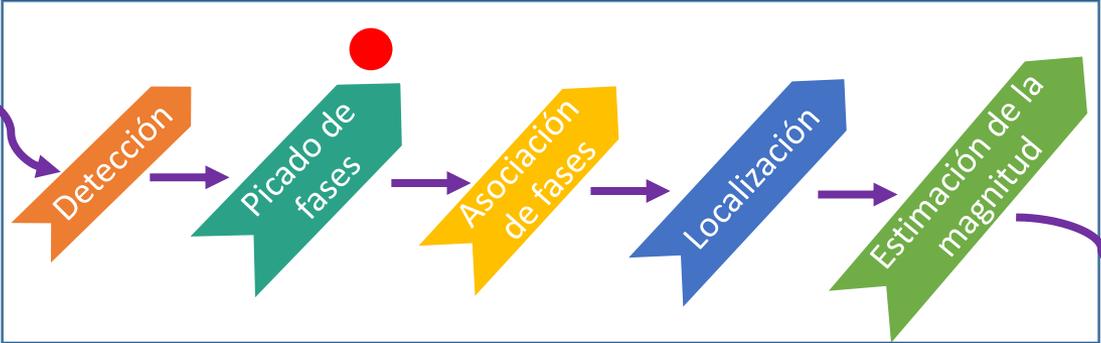
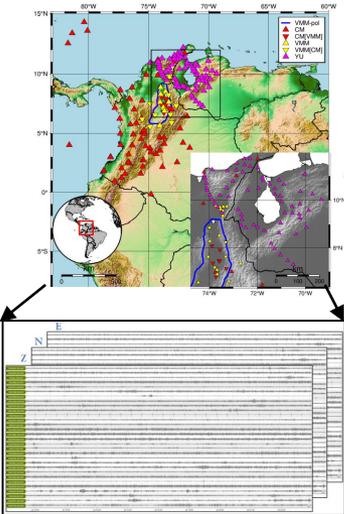
Para cada una de las estaciones se detectan los eventos sísmicos.

Visualización de la componente Vertical



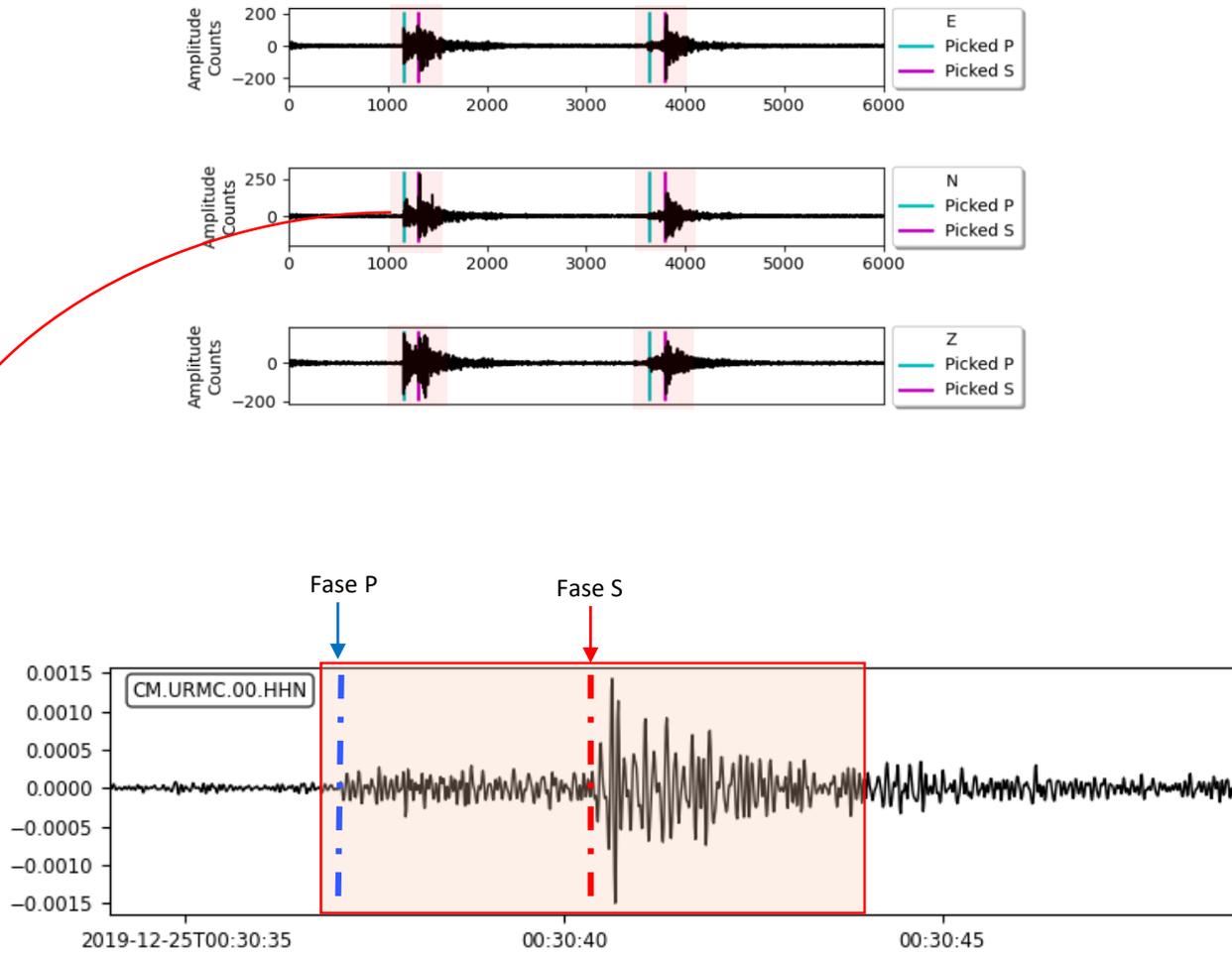
Picado de fases

Procesamiento



Picado de fases

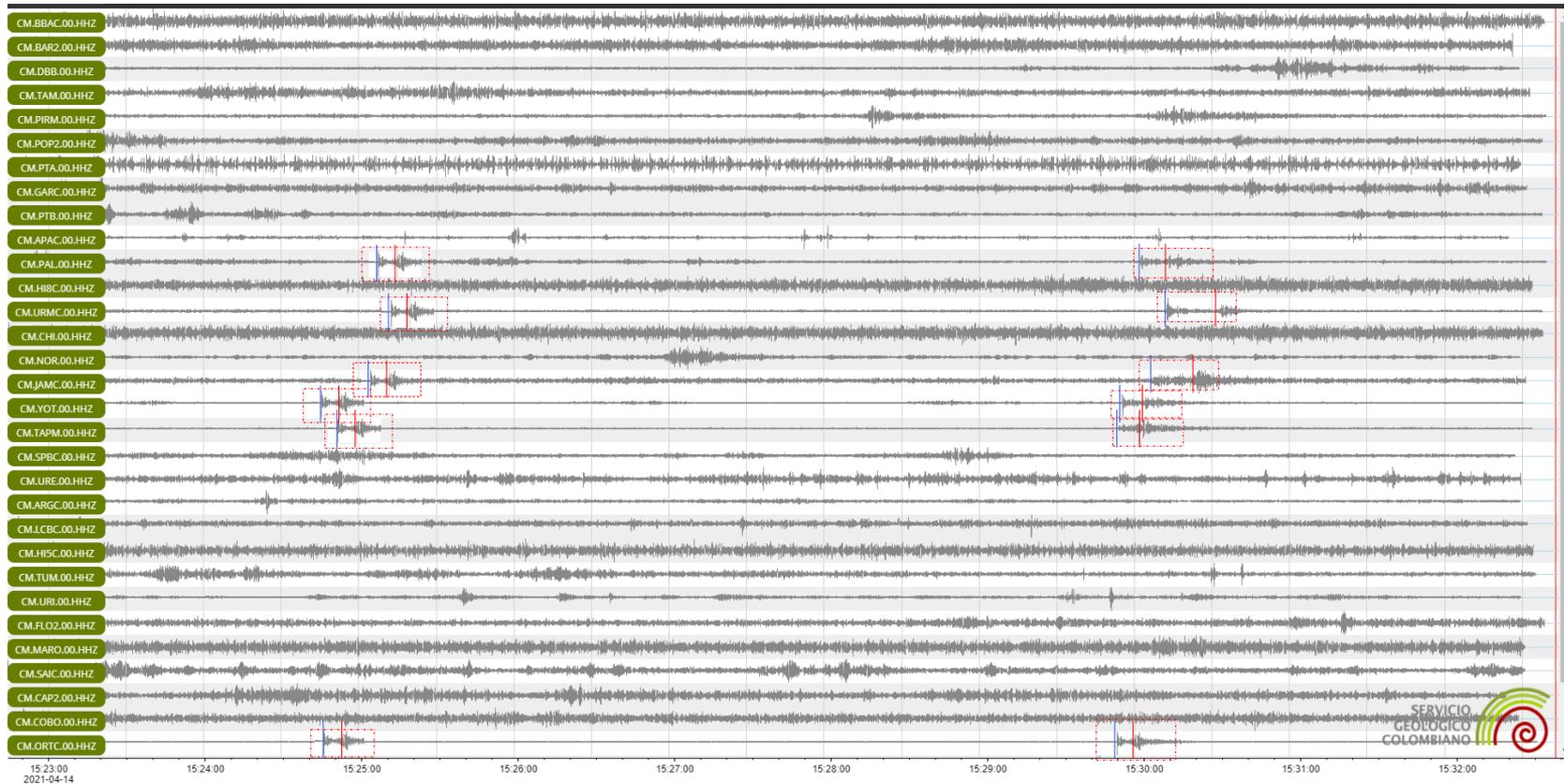
Al detectar el evento, se capturan los tiempos de arribo de cada onda.



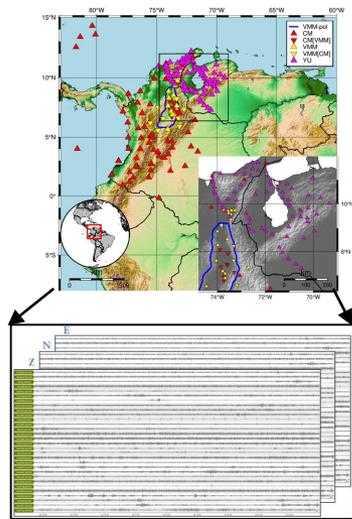
Picado de fases en cada estación

Se capturan los tiempos de arribo para cada una de las detecciones.

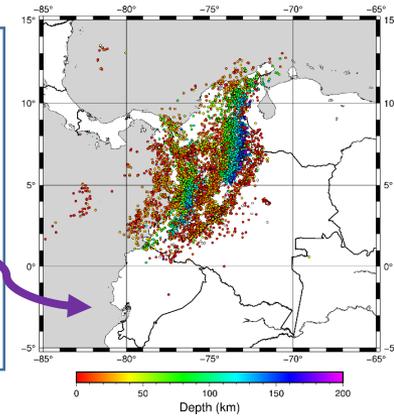
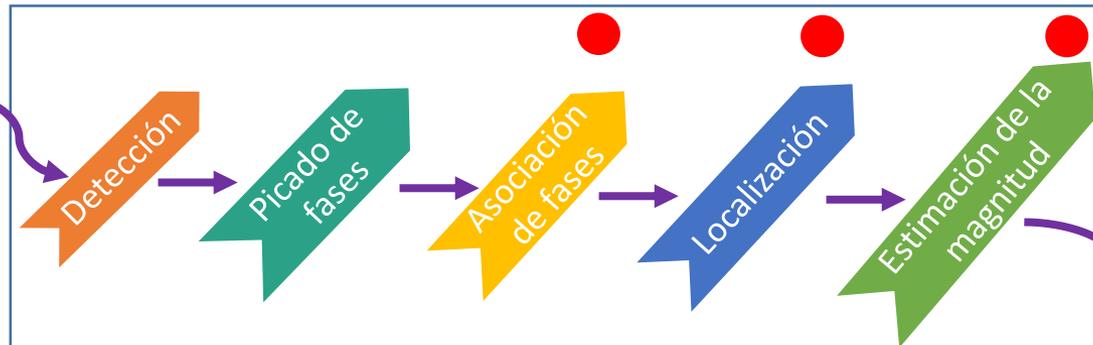
Visualización de la componente Vertical



Otros pasos

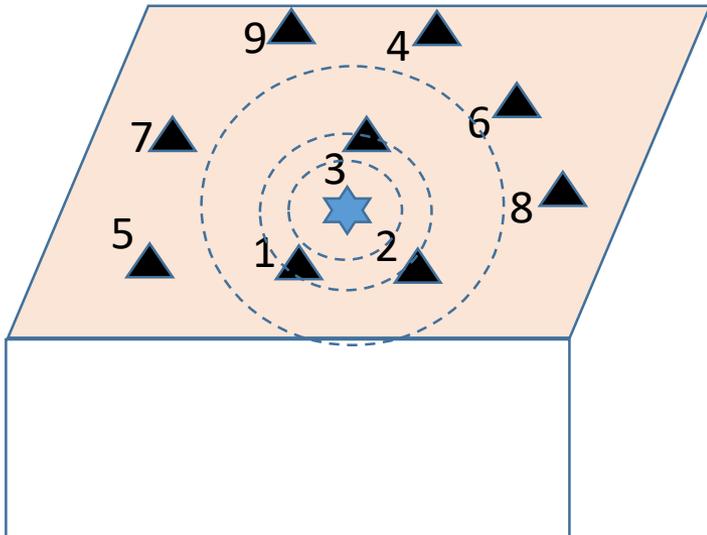


Procesamiento

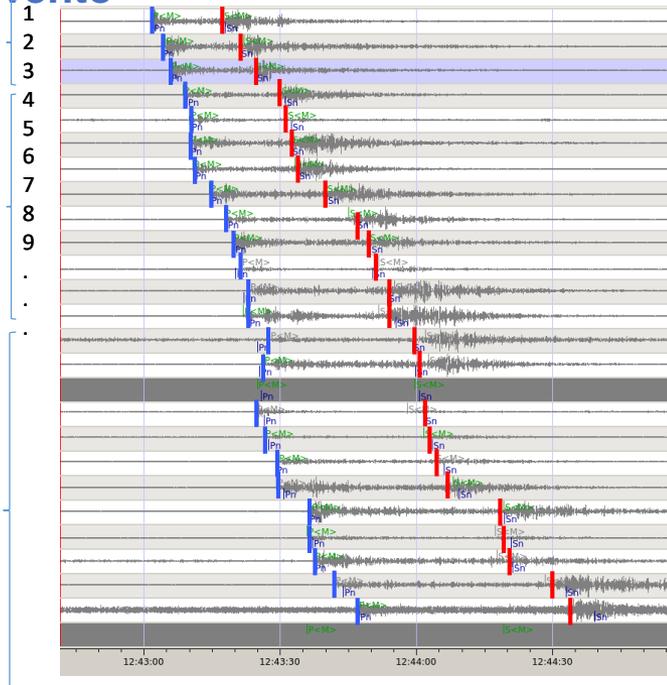


Asociación de fases

- Obtener las fases que provienen de la misma fuente
- Cada una de las diferentes ondas viajan a diferentes velocidades y, por lo tanto, llegan a una estación sísmica en diferentes instantes de tiempo.

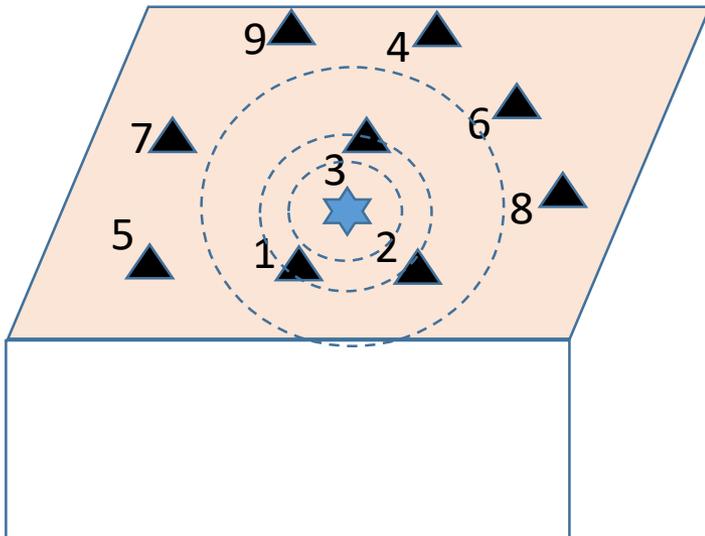


Visualización ordenando las trazas desde la estación más cercana al evento

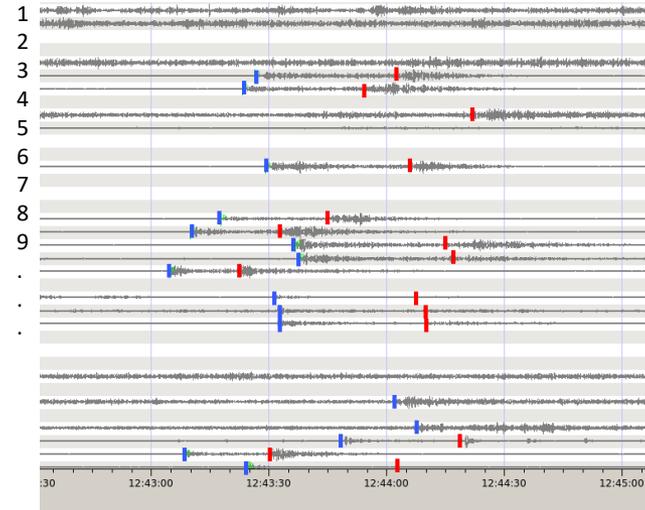


Reto de la asociación de fases

No sabemos dónde está ubicada la fuente por tanto la asociación de picks no es tan fácil.



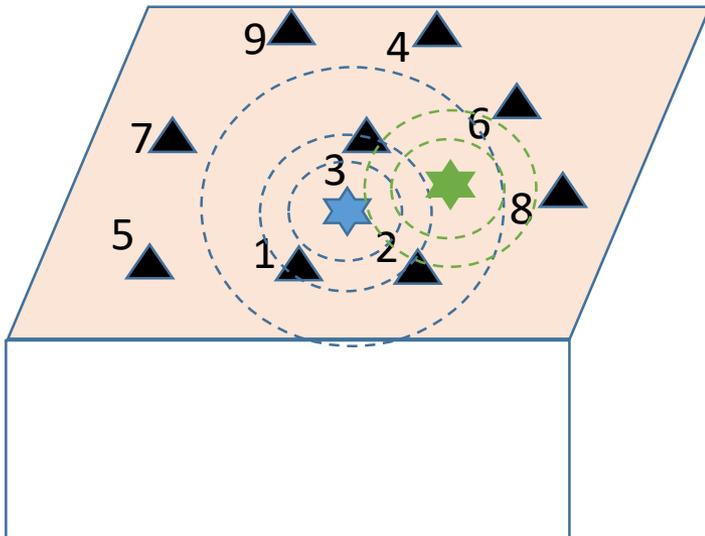
Visualización de las trazas con un orden arbitrario



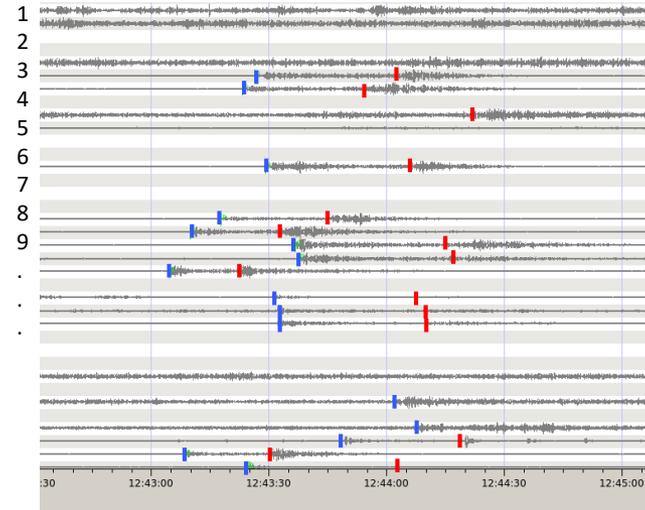
Un reto actual de la sismología

Reto de la asociación de fases

Pueden haber más de 1 evento cercano en tiempo y/o en espacio.



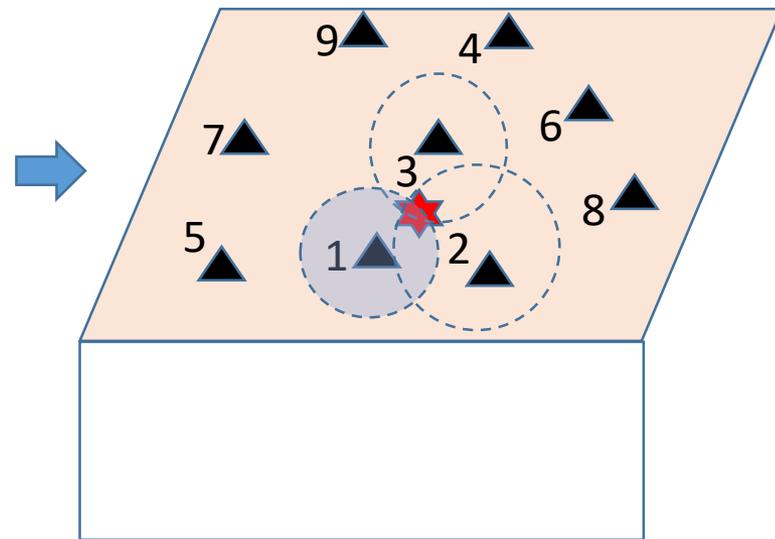
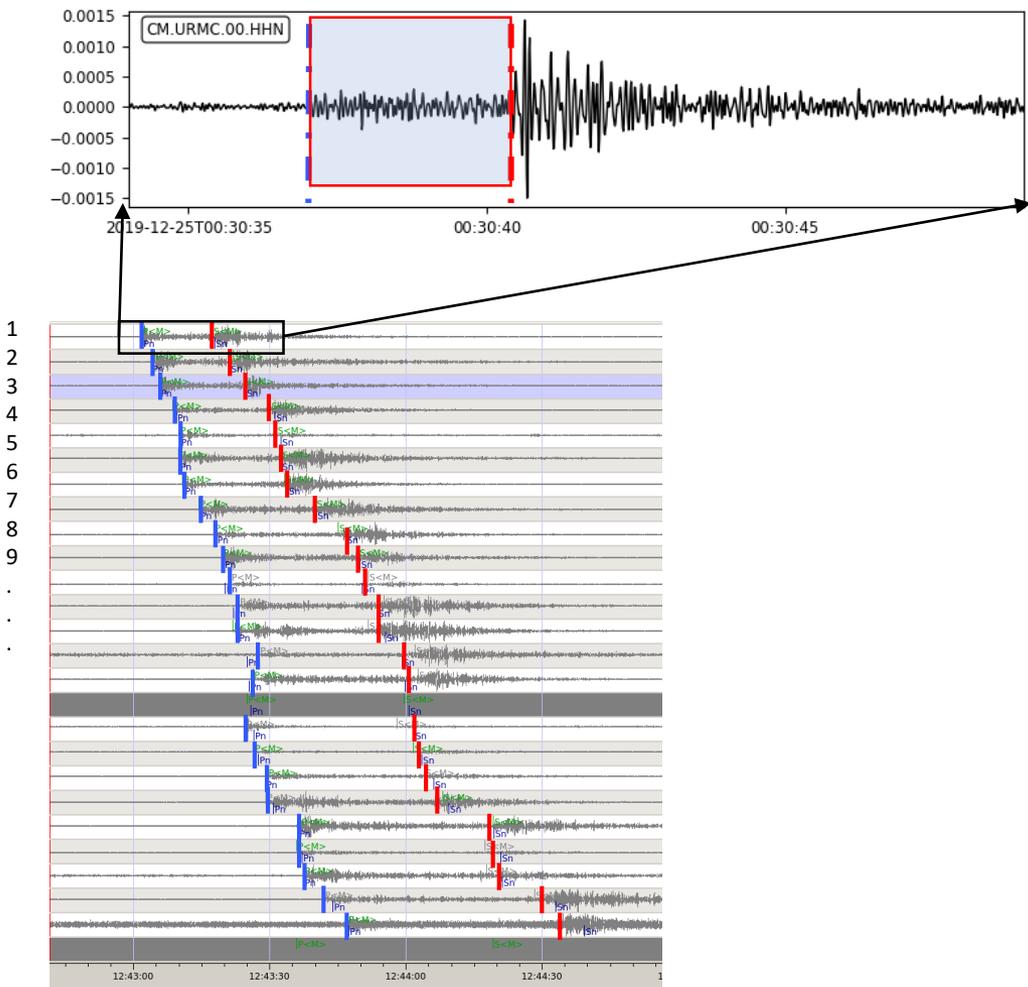
Visualización de las trazas con un orden arbitrario



Un reto actual de la sismología

Localización y estimación de la magnitud de los eventos

A partir de las fases sísmicas se localiza el evento y luego se puede estimar la magnitud



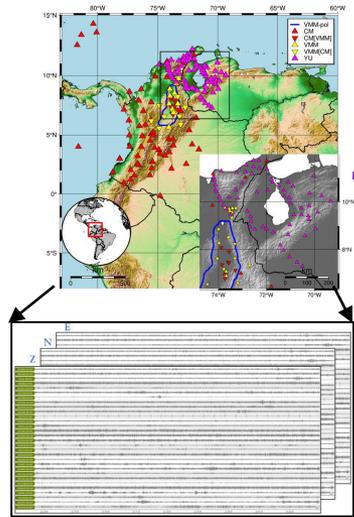
$$M_I = \log A - \log A_0 + S$$

A Promedio de la amplitud máxima en mm de las componentes horizontales simulando un sismógrafo de Wood Anderson

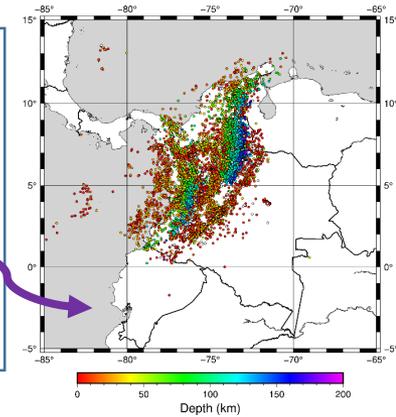
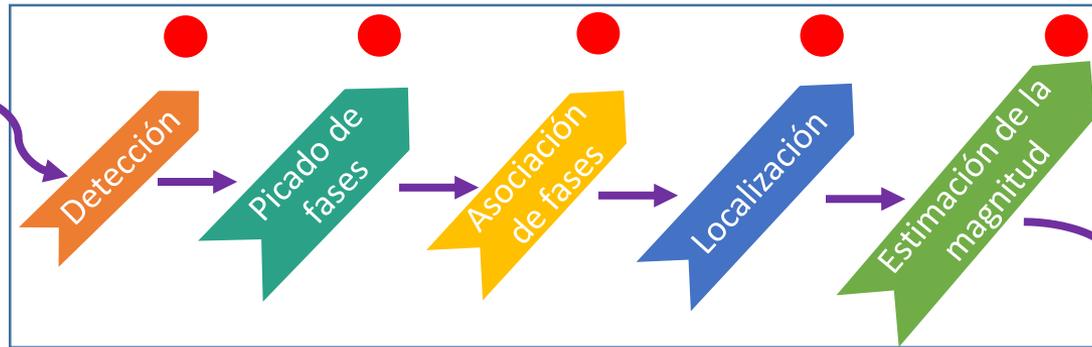
A_0 Función de corrección de distancia

S Función de corrección por estación

Pasos principales para monitorear la actividad sísmica

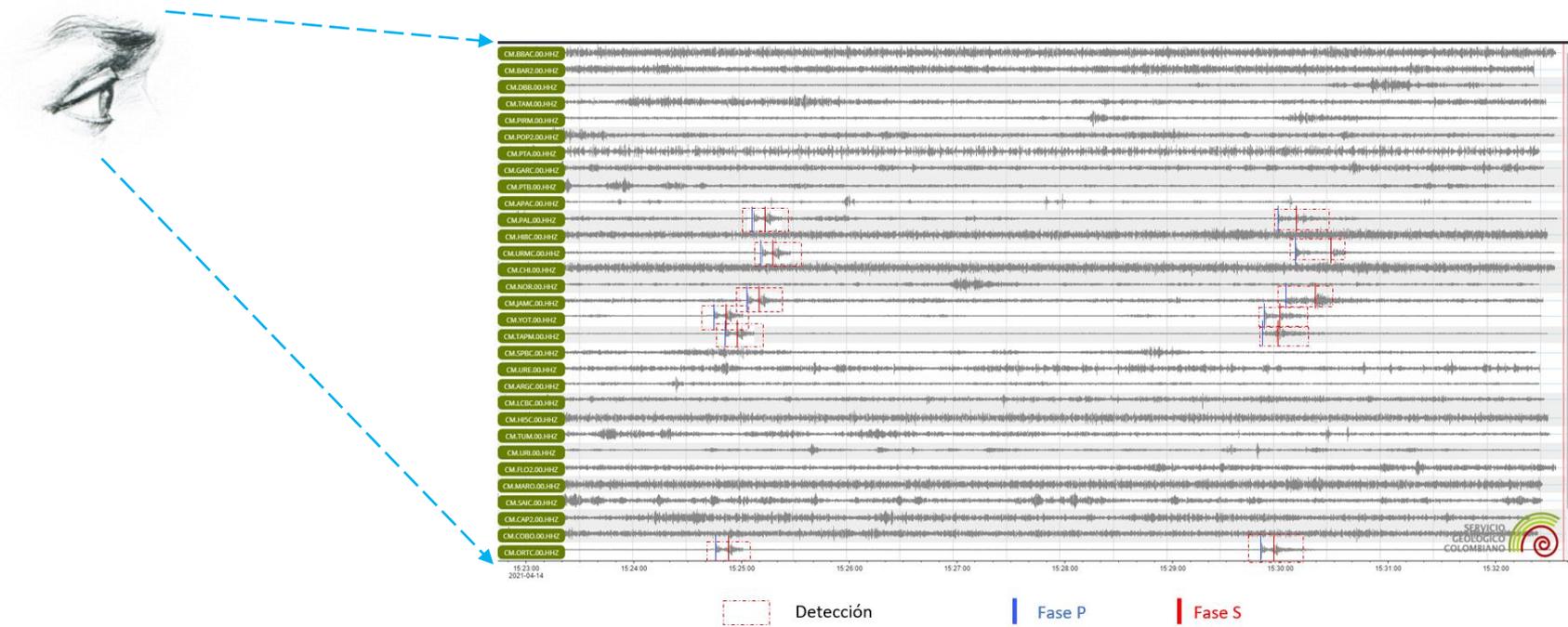


Procesamiento



Importancia del procesamiento automático

El trabajo de **detección y picado** es uno de los procesos que consume más tiempo y esfuerzo del personal.



Variables que hacen más extenso el procesamiento manual.

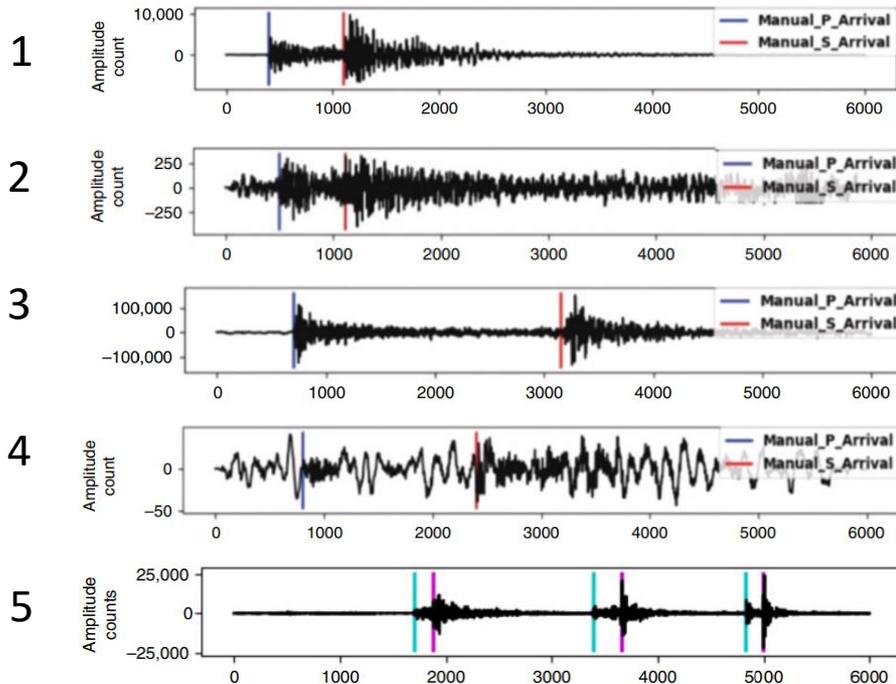


- Número de eventos.
- Número de estaciones.
- Calidad del registro.

Ejemplos de registro de eventos sísmicos

Existen distintos tipos de registro de eventos. Los algoritmos automáticos deben enfrentarse a varios posibles ejemplos.

Distintos tipos de eventos en una componente de una estación



Fuente cercana a la estación

Evento en un registro con niveles de ruido alto

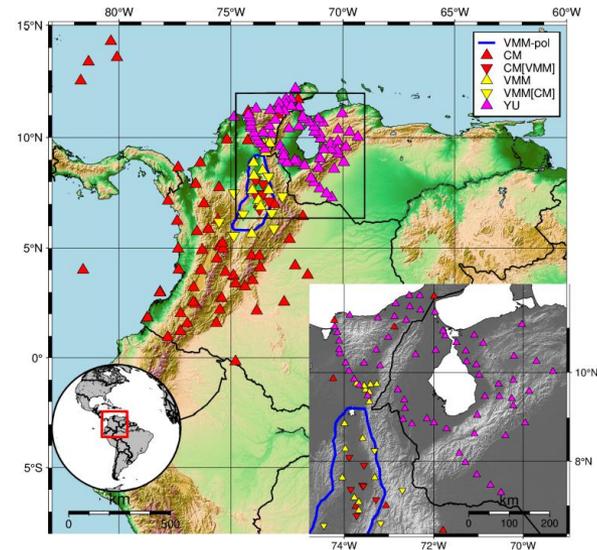
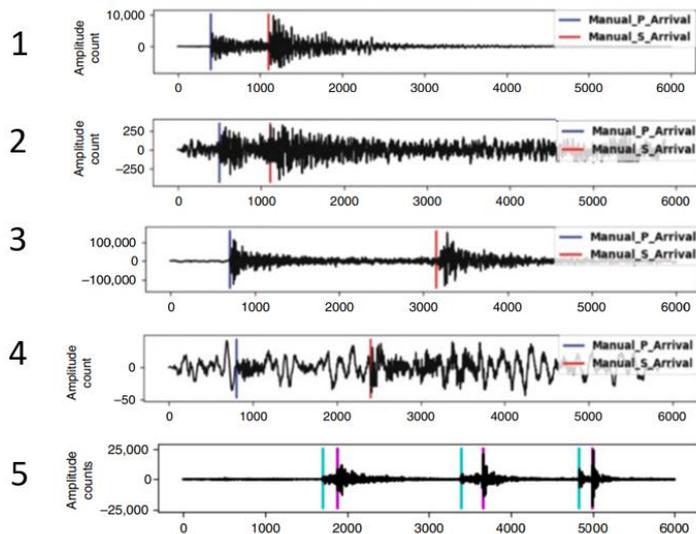
Fuente lejana a la estación

Baja relación de calidad señal/ruido

Varios eventos cercanos en tiempo

Ejemplos de registro de eventos sísmicos

Cada uno de los ejemplos se puede presentar en cualquier momento y en cualquier estación de la red sismológica.



Algoritmos tradicionales

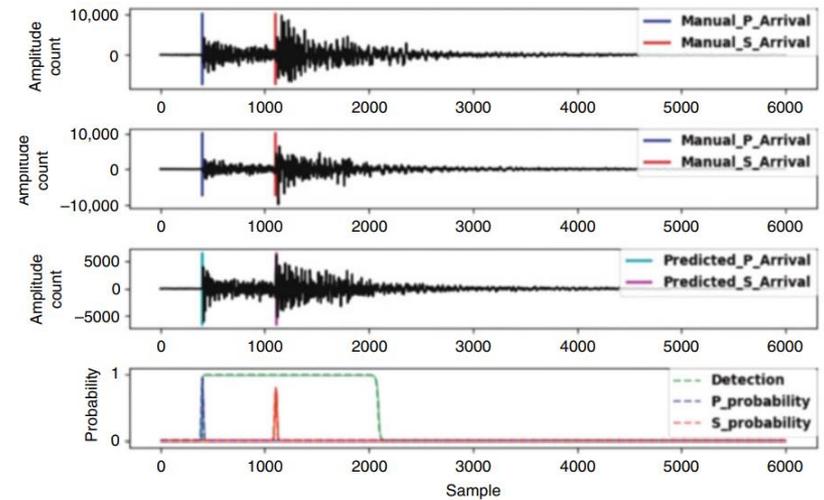
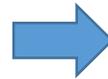
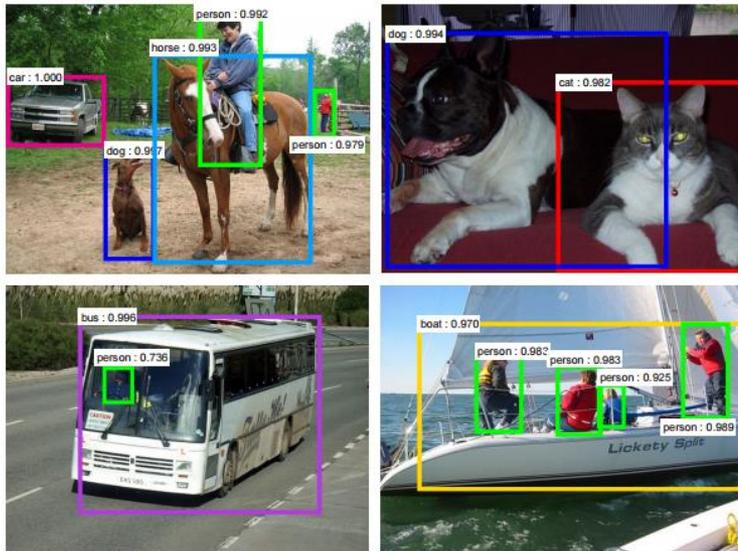
Definir parámetros (filtros, umbrales, etc) para cada una de las estaciones es extenuante.

Nuevo enfoque

Necesitamos un nuevo enfoque que nos permita entrenar al algoritmo para que generalice las detecciones en distintos tipos de señales.

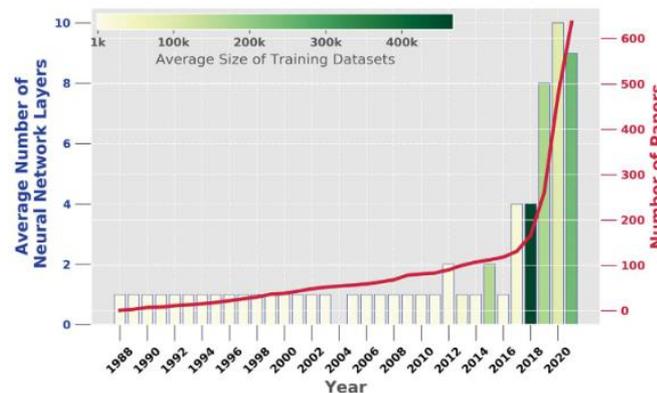
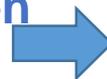
Motivación al aprendizaje profundo

Si con Aprendizaje profundo (Deep Learning en inglés) se pueden detectar distintos objetos en imágenes, también se podría detectar eventos sísmicos en un sismograma.



Mousavi et. al., 2020

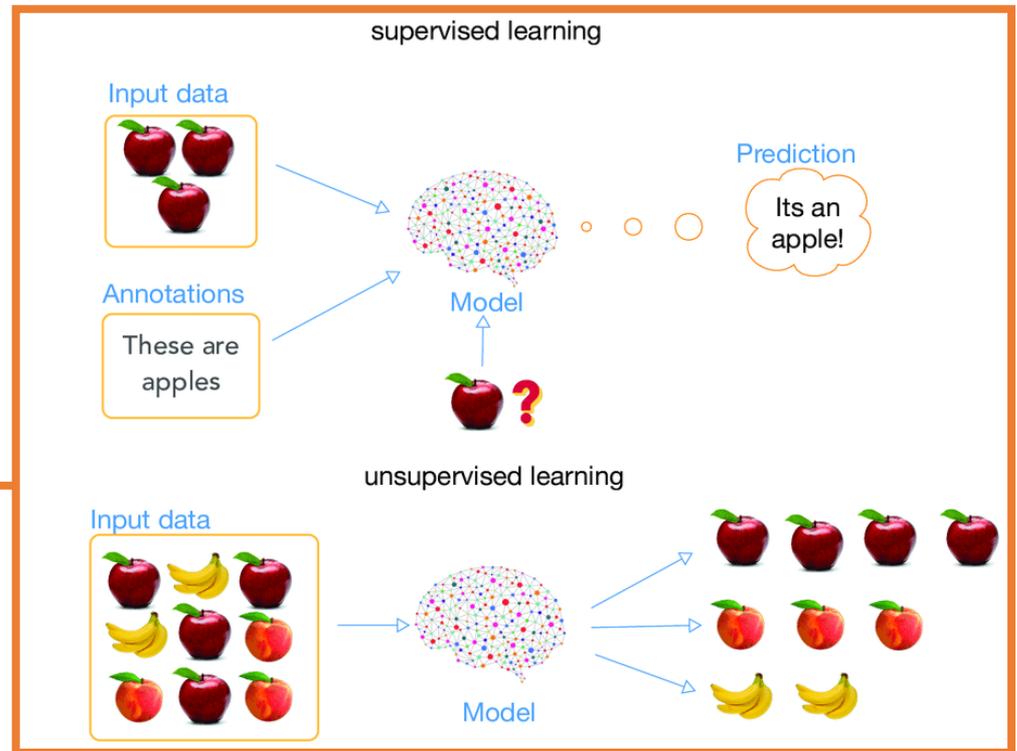
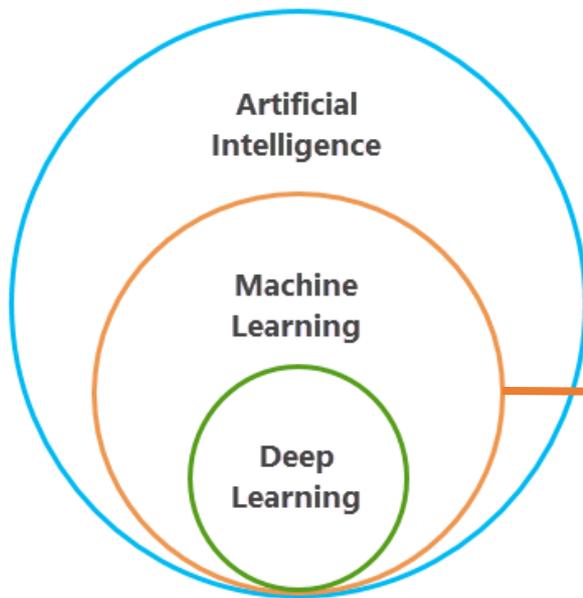
Interés en aplicaciones de DL en sismología



(Mousavi and Beroza, 2022)

Nuevo enfoque: Machine Learning

El Aprendizaje de Máquinas (Machine Learning en inglés) ha desarrollado distintos algoritmos que aprende de los datos (de manera supervisada y no supervisada) para construir modelos que den predicciones requeridas por el científico.

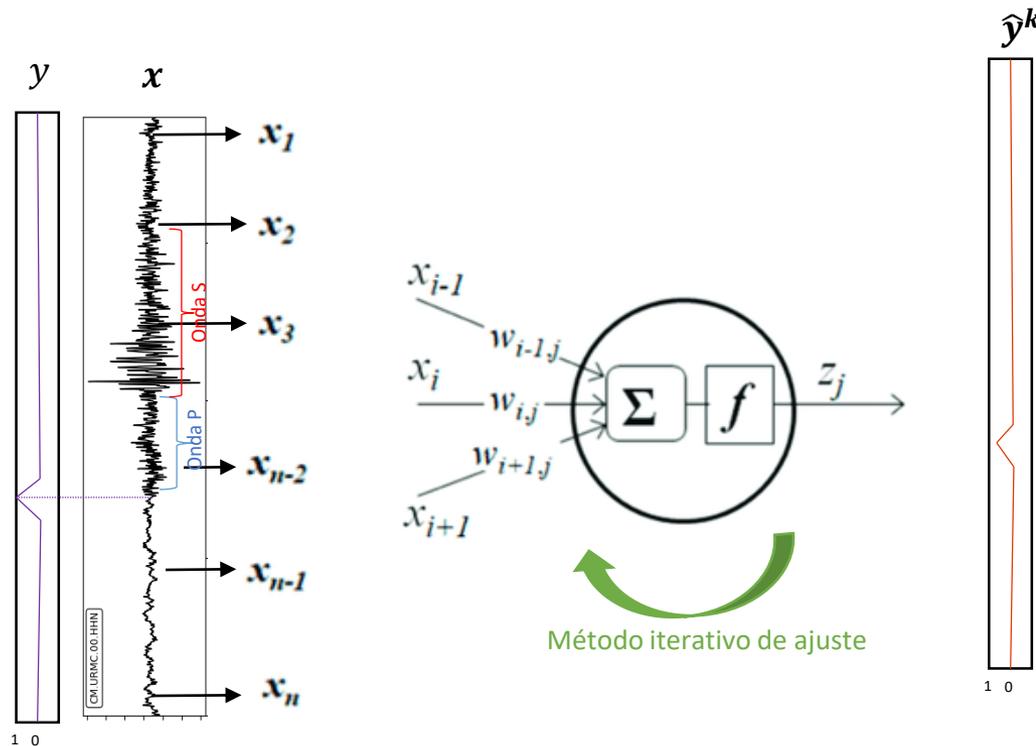


Nuevo enfoque: Deep Learning

El Aprendizaje profundo (Deep Learning en inglés) es un conjunto de algoritmos del aprendizaje automático basados en redes neuronales e inspirados en como funciona el cerebro humano.

Red neuronal de una neurona

Objetivo:
Picado de fase P



Entrenamiento:

Ajustar $W_{i,j}$ Para minimizar $L(\hat{y}, y) \rightarrow 0$

$i \rightarrow$ No. de datos a la neurona
 $j \rightarrow$ No. de capa de la red

$$\Sigma = \sum_i^n w_{i,j} x_{i,j} + b_{i,j}$$

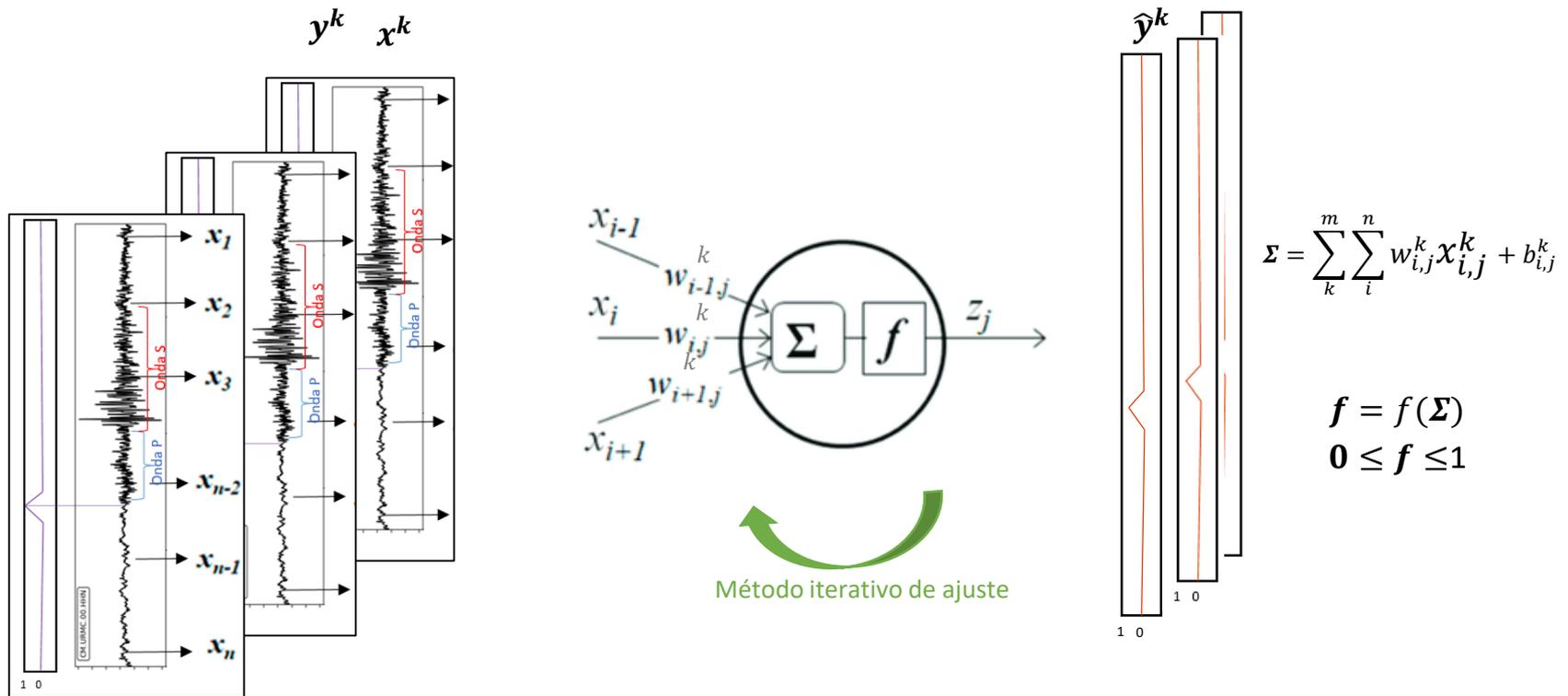
$$f = f(\Sigma)$$

$$0 \leq f \leq 1$$

Nuevo enfoque: Deep Learning

El Aprendizaje profundo (Deep Learning en inglés) es un conjunto de algoritmos del aprendizaje automático basados en redes neuronales e inspirados en como funciona el cerebro humano.

Red neuronal de una neurona con varios ejemplos de entrenamiento



Entrenamiento:

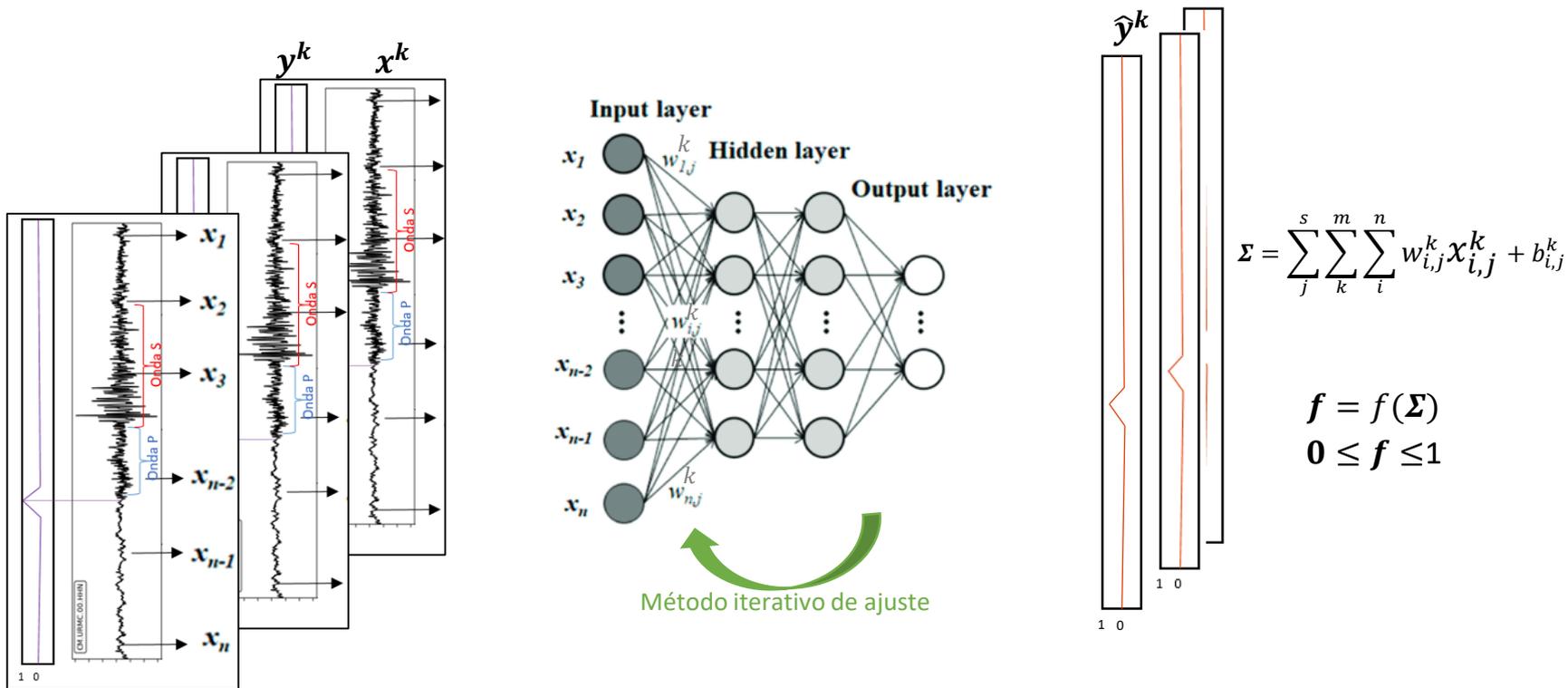
Ajustar $w_{i,j}^k$ Para minimizar $L(\hat{y}^k, y^k) \rightarrow 0$

$i \rightarrow$ No. de datos a la neurona
 $j \rightarrow$ No. de capa de la red
 $k \rightarrow$ No. de trazas.

Nuevo enfoque: Deep Learning

El Aprendizaje profundo (Deep Learning en inglés) es un conjunto de algoritmos del aprendizaje automático basados en redes neuronales e inspirados en como funciona el cerebro humano.

Red neuronal de varias capas con varios ejemplos de entrenamiento



Entrenamiento:

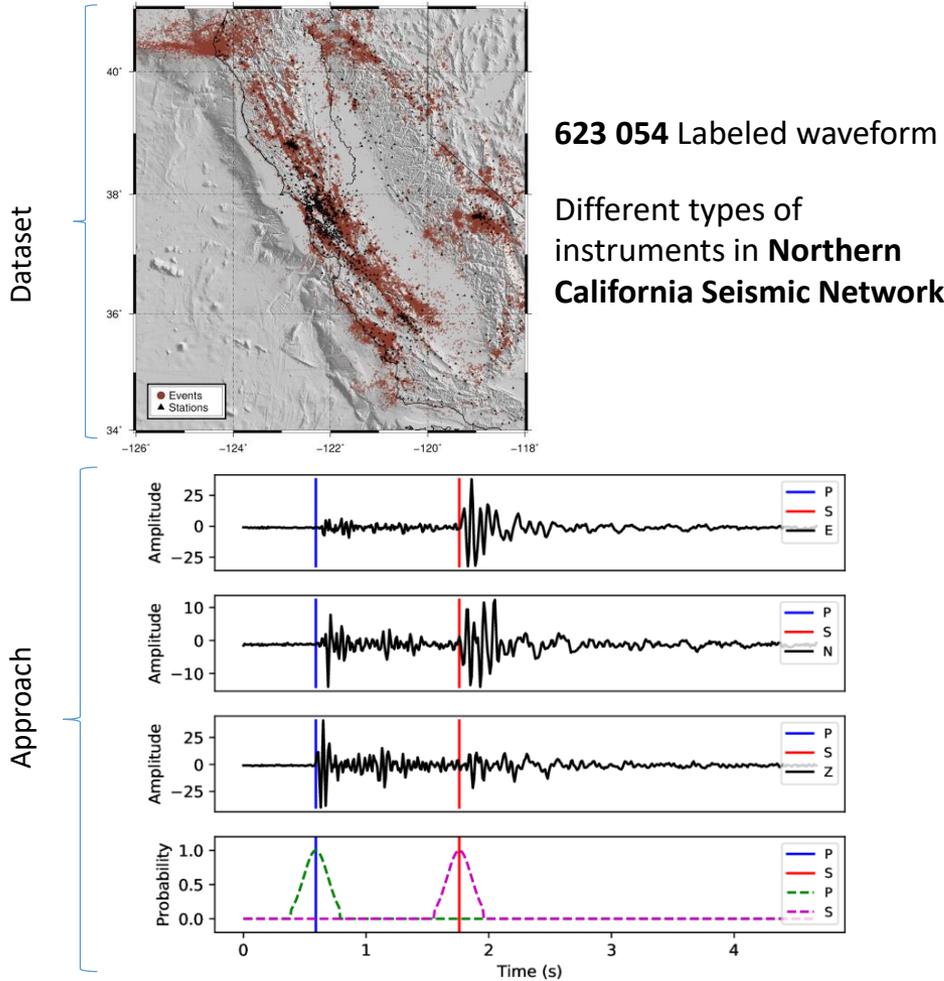
Ajustar $w_{i,j}^k$ Para minimizar $L(\hat{y}^k, y^k) \rightarrow 0$

$i \rightarrow$ No. de datos a la neurona
 $j \rightarrow$ No. de capa de la red
 $k \rightarrow$ No. de trazas.

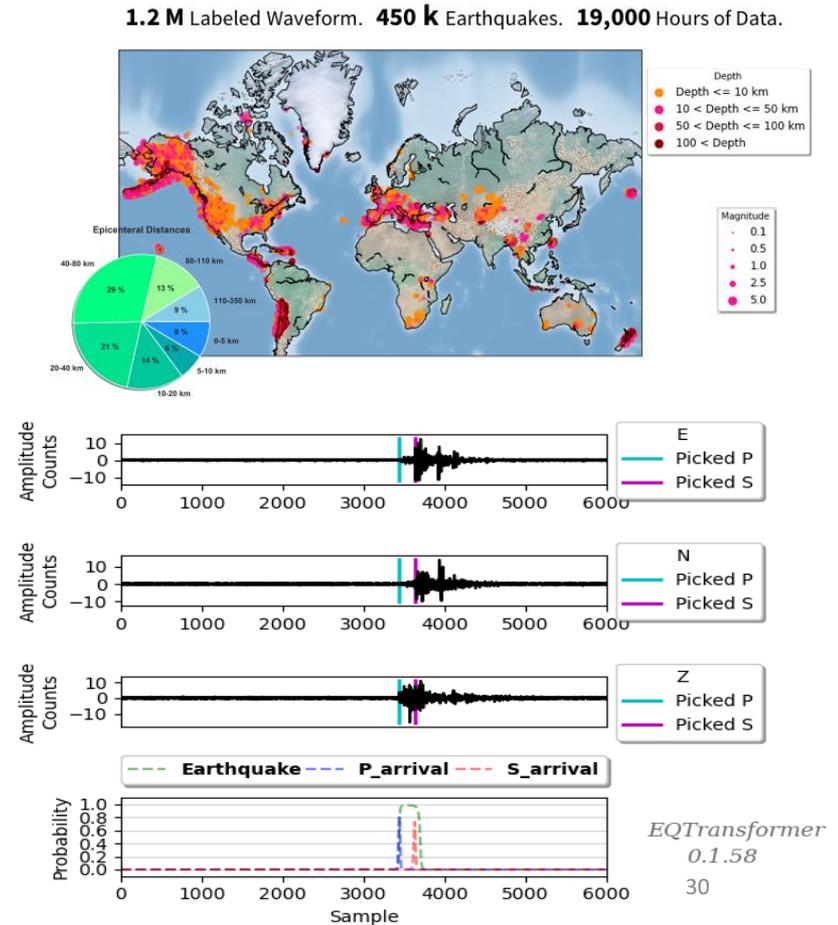
Modelos de DL para detección y picado

Se utilizaron dos modelos de DL para detectar y picar eventos registrados en la red nacional

PhaseNet (Zhu & Beroza, 2019)

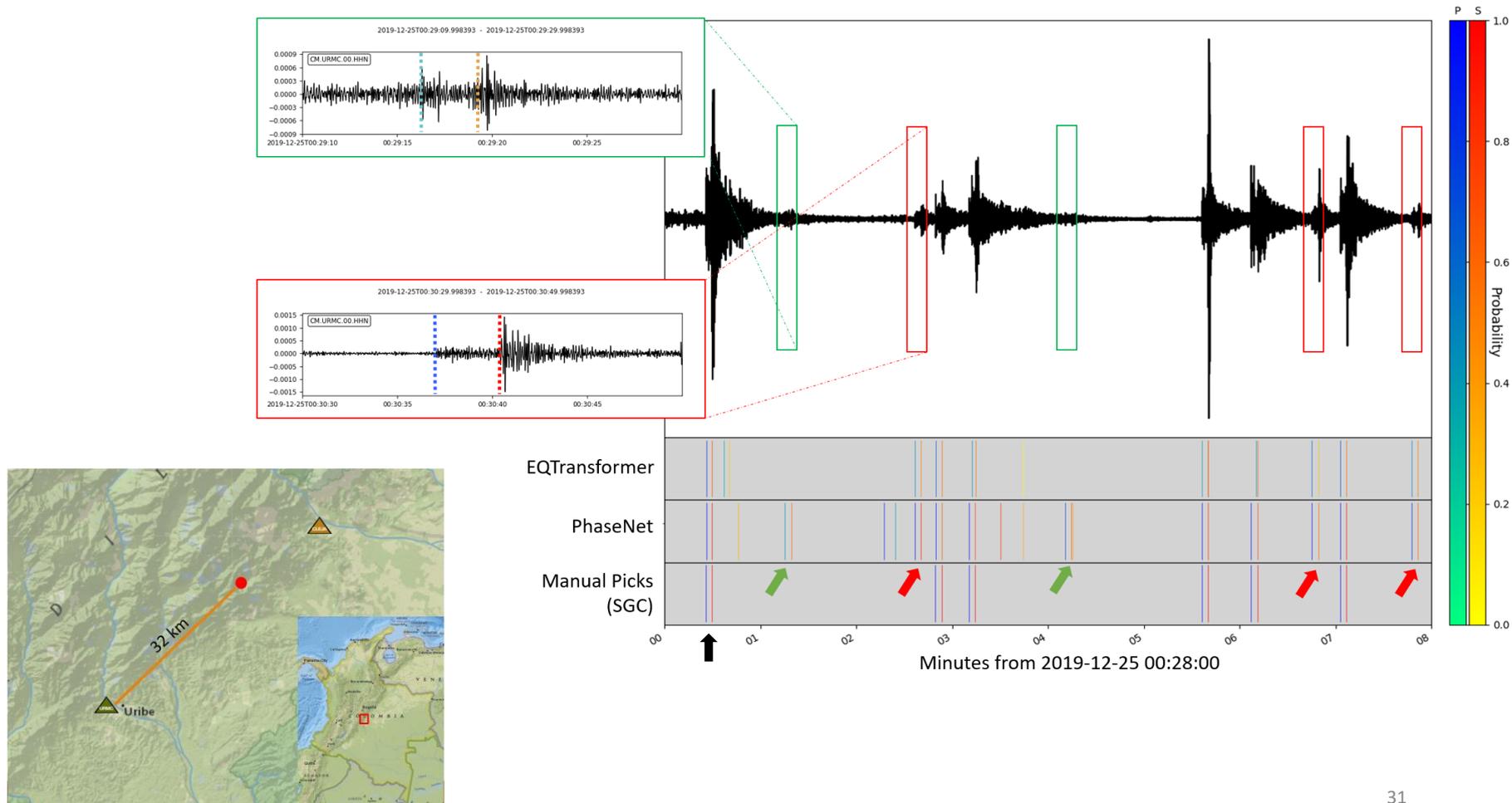


EQTransformer (Mousavi et. al., 2020)



Picks en una serie de réplicas

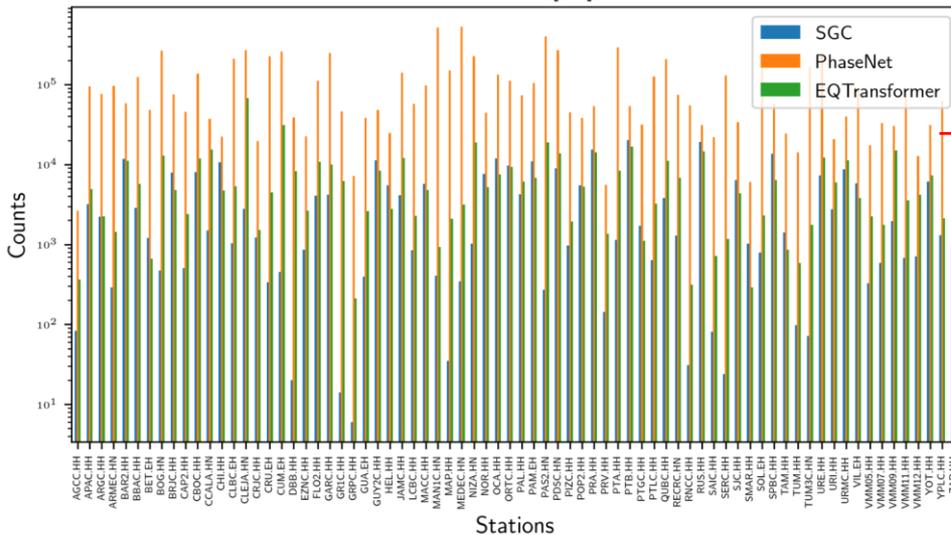
Réplicas después de 5.5 horas del sismo principal ($M_W = 6$) registrada en la estación más cercana al epicentro.



Análisis de número de picks

Comparación de No. picks automáticos respecto al manual

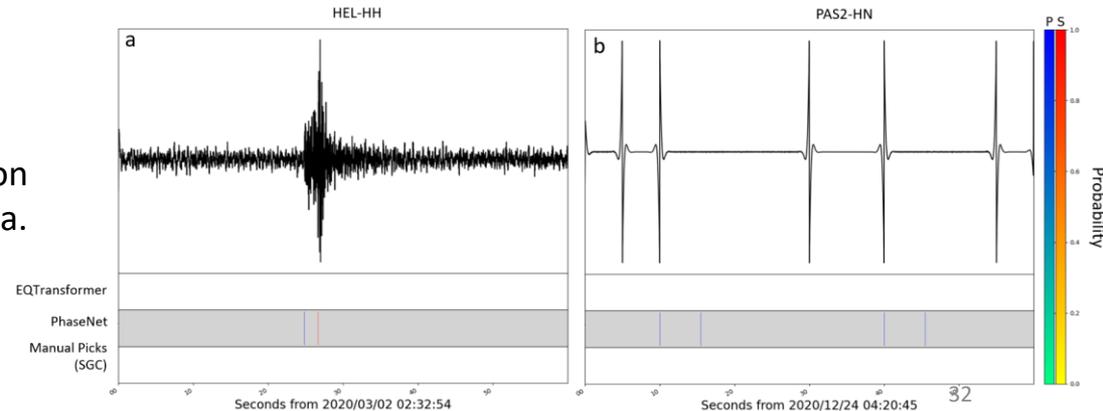
PhaseHint: ['P']



PhaseNet tiene muchos más picks que los otros.
¿Por qué?

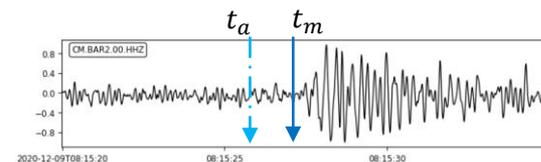
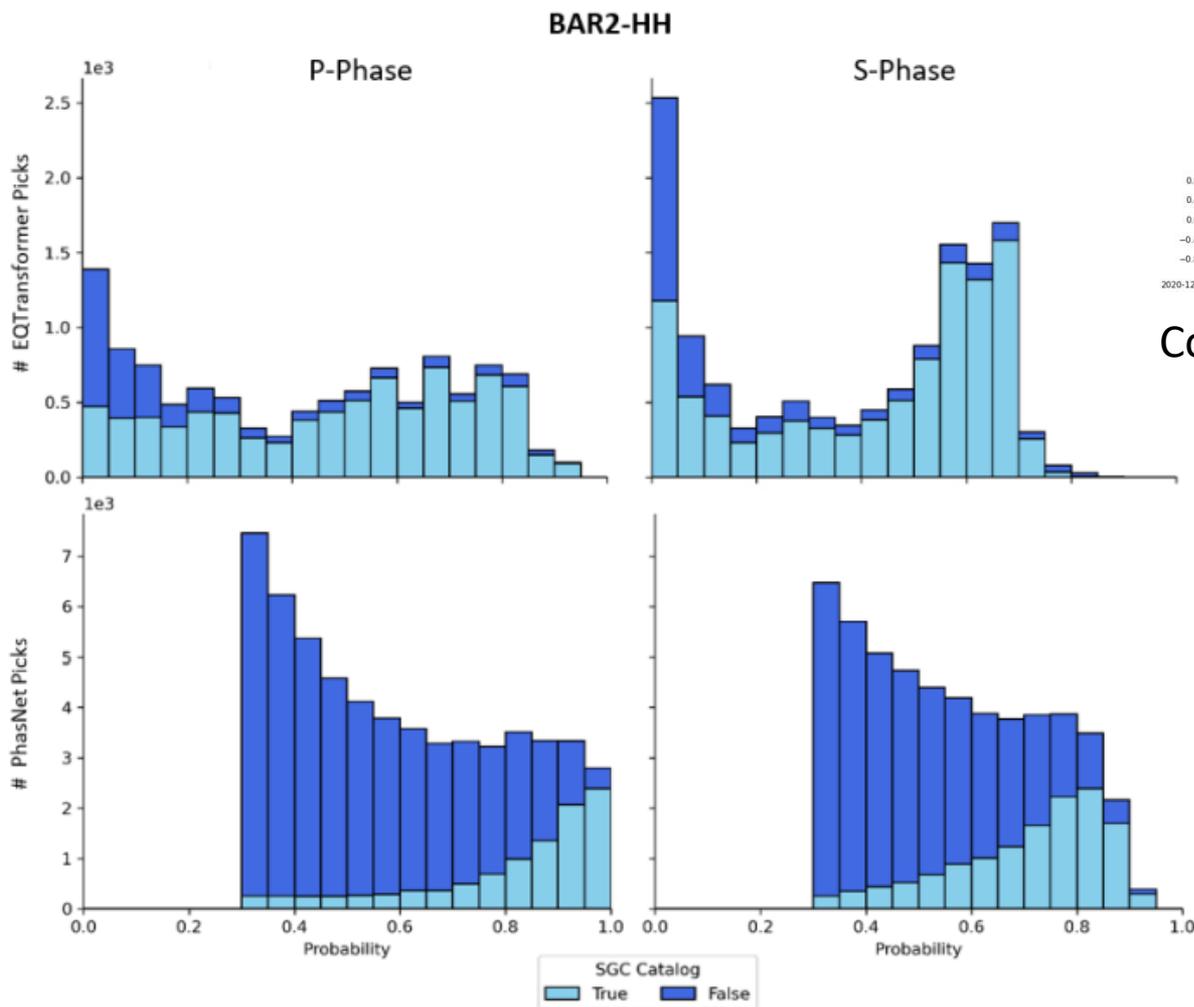
PhaseNet puede detectar eventos no detectados por otros, pero varios son picks falsos atribuidos a picos en la señal u otros tipos de ruido

No es fácil remover picks falsos de PhaseNet con un buen criterio ya que tienen probabilidad alta.



Confiabilidad de los picks

No. Picks automáticos que se encuentran en el catálogo de picks manuales.



Condición para pick verdadero.

$$t_a - t_m \leq 1.5s$$

t_a : Tiempo automático

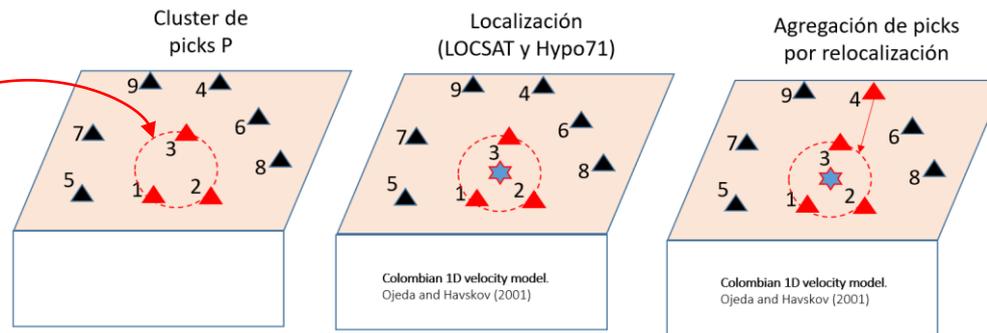
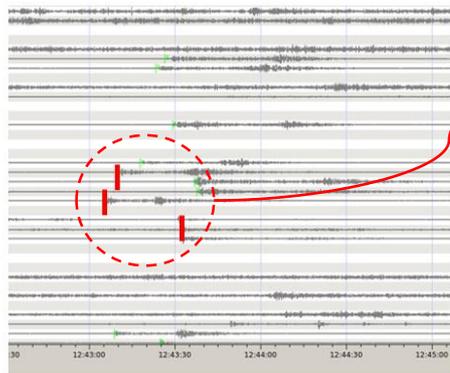
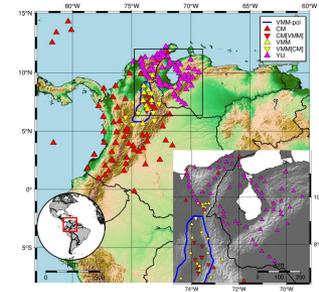
t_m : Tiempo manual

Asociación automática de fases

Métodos para la asociación de fases

Scanloc-SeisComP

Funcional independiente de la red

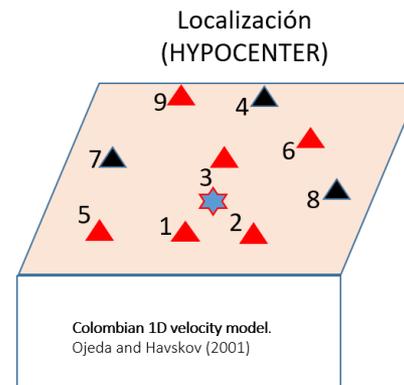
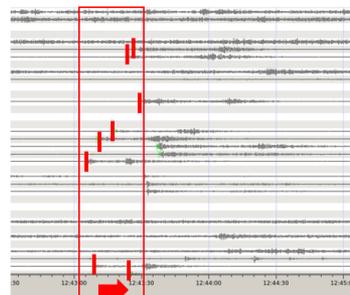


Usado para

- VMM
- CM

Asociador útil de EQTransformer

Funcional para redes locales



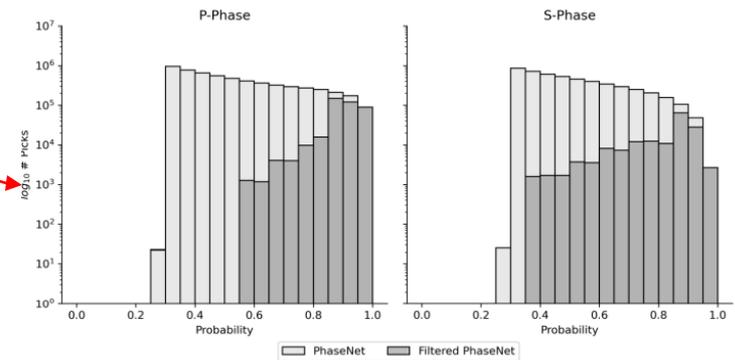
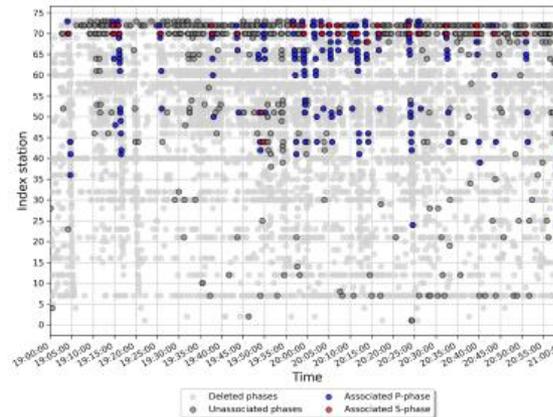
Usado para

- YU

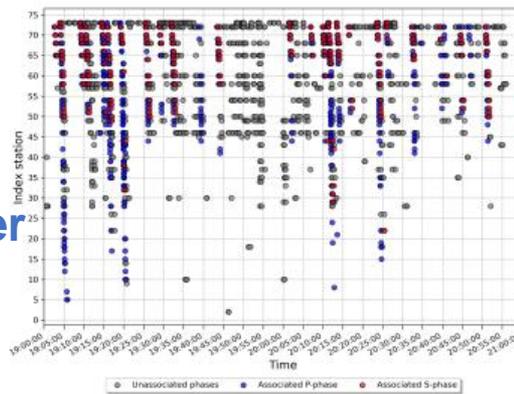
Asociación de fases en una serie de réplicas

Comparación de picks asociados automáticamente con distintos picadores y el asociador scanloc.

PhaseNet

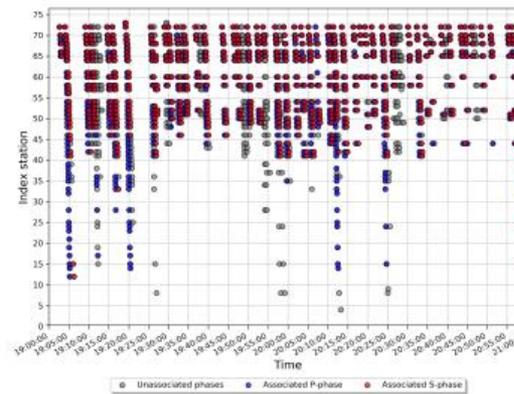


EQTransformer



(b)

Picador elegido para las redes locales



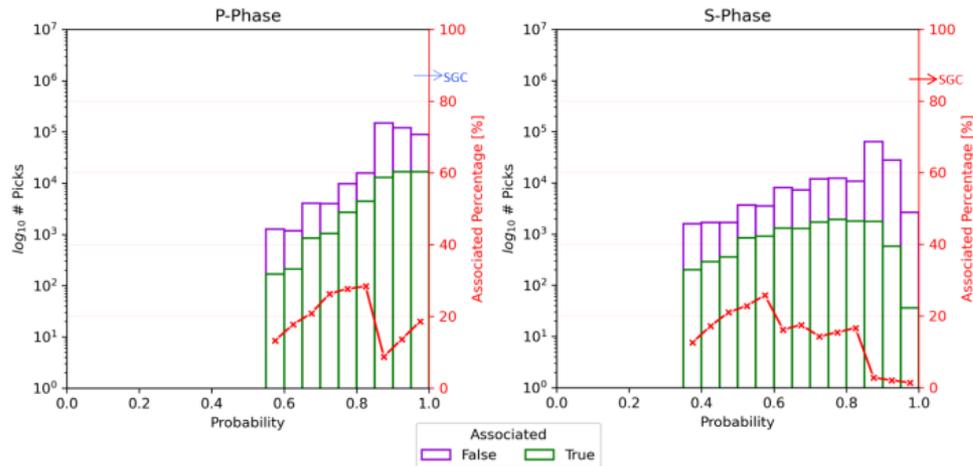
(c)

SGC-auto
Picks manuales y asociador automático

Análisis de asociaciones en la red nacional

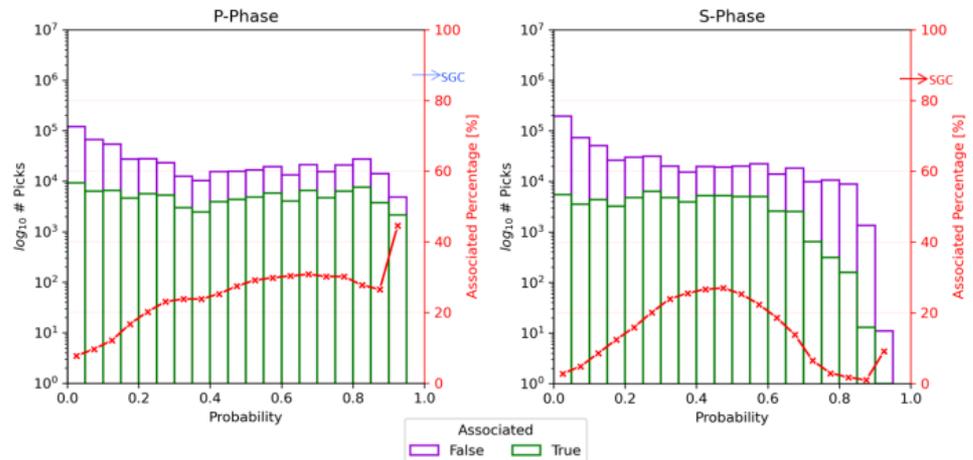
No. Picks automáticos asociados junto al porcentaje de asociación.

PhaseNet



(a)

EQTransformer



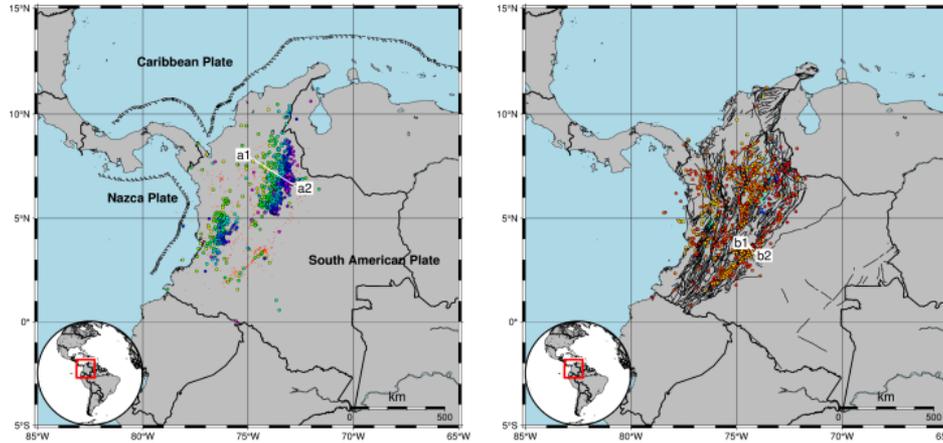
(b)

Catálogo sísmico automático del territorio Colombiano

Catálogos para la red CM

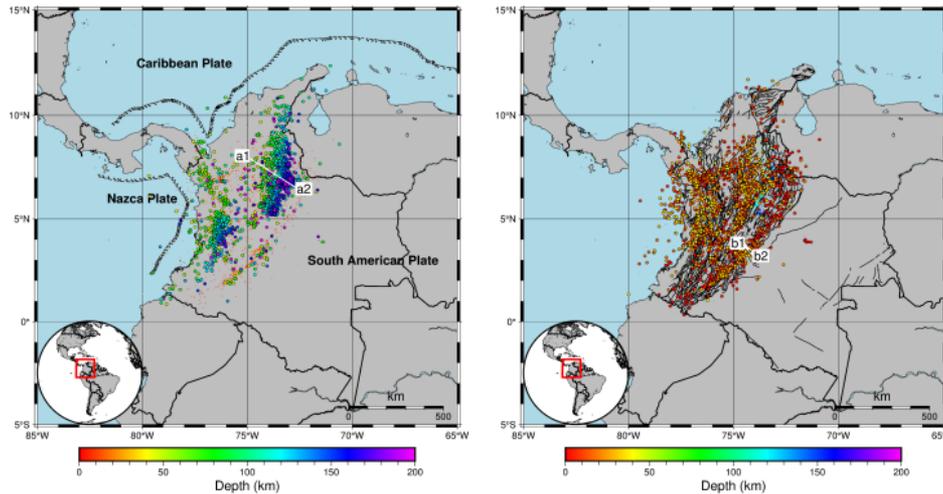
Logran mostrar la sismicidad más representativa del territorio Colombiano.

PhaseNet



$$\Delta x, \Delta y, \Delta z \leq 18 \text{ km}$$
$$\text{rms} \leq 2.5 \text{ s}$$

EQTransformer

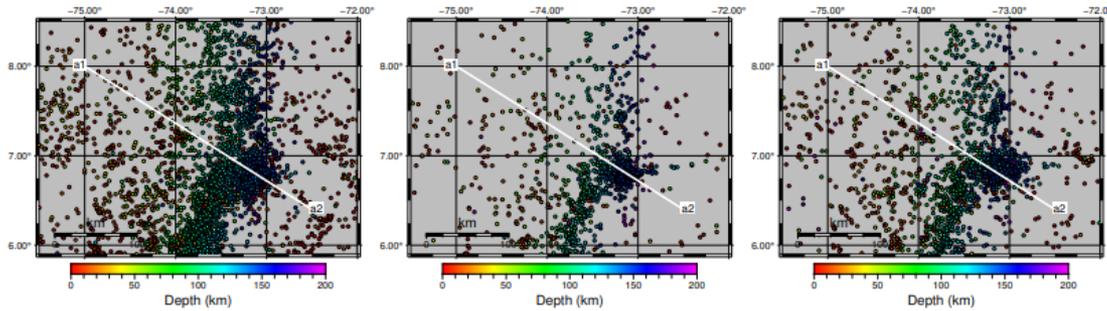


(a) Depths ≥ 40 km are highlighted

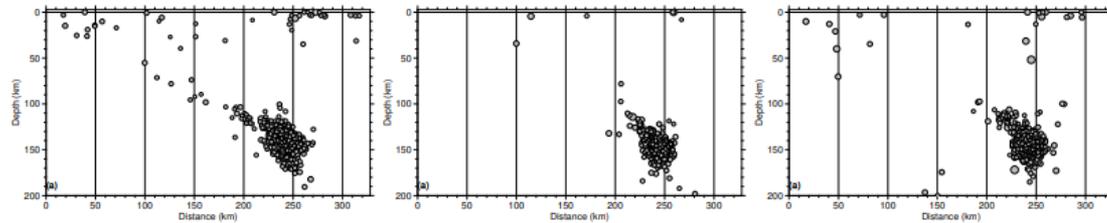
(b) Depths < 40 km are highlighted

Iluminación de estructuras con el catálogo CM

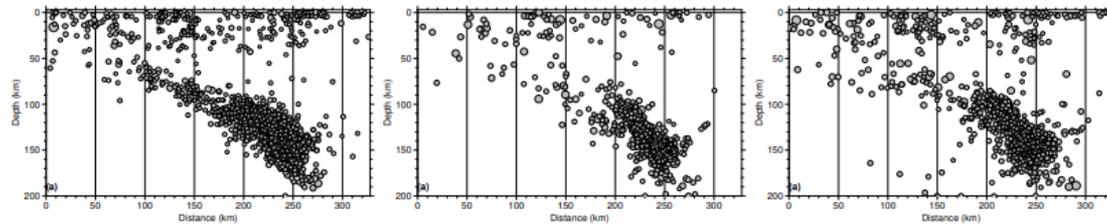
Los catálogos con PhaseNet y EQTransformer iluminan las mismas estructuras que el catálogo manual dónde hay buena cobertura de estaciones



(a) Region of interest for profile a1-a2



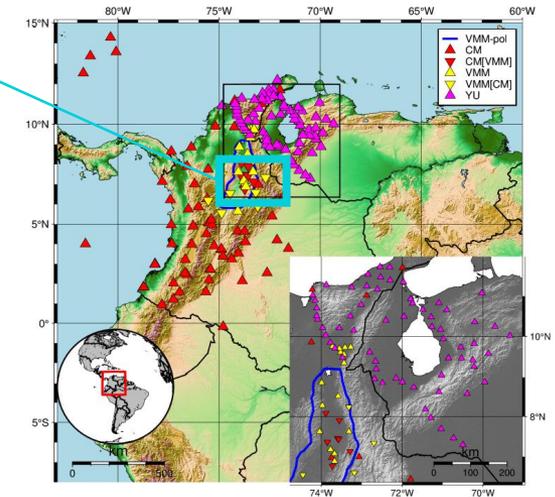
(b) Profile a1-a2 with width of 5 km on each side.



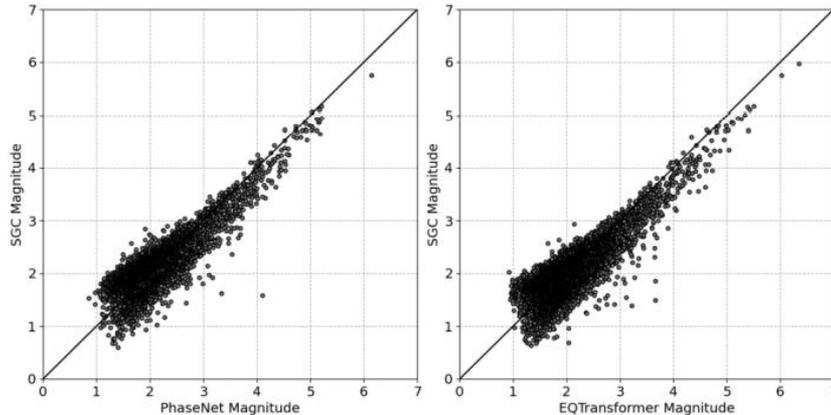
SGC

PhaseNet

EQTransformer



Análisis de los catálogos para la red CM



Se calculó la magnitud local de los eventos.
Las magnitudes calculadas para cada uno de los catálogos son confiables.

$$M_I = \log A - \log A_0 + S,$$

$$-\log A_0 = a \times \log(r/r_{ref}) + b \times (r - r_{ref}) + K(r_{ref}).$$

Values from the
Colombian
Seismic Network

$$a = 1.019,$$

$$b = 0.0016$$

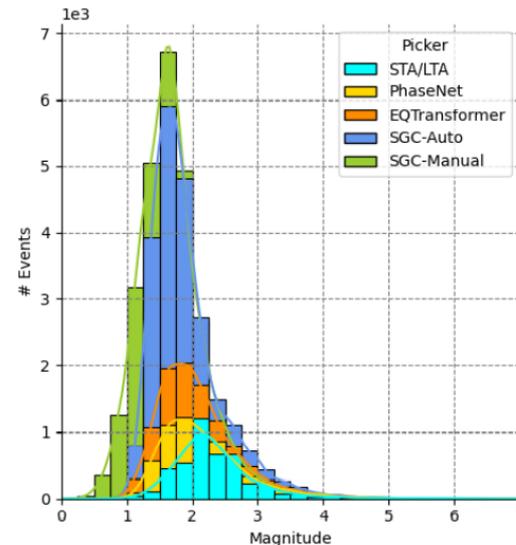
$$K(r_{ref}) = -1.79,$$

$$r_{ref} = 140km$$

Rengifo and Ojeda (2004)

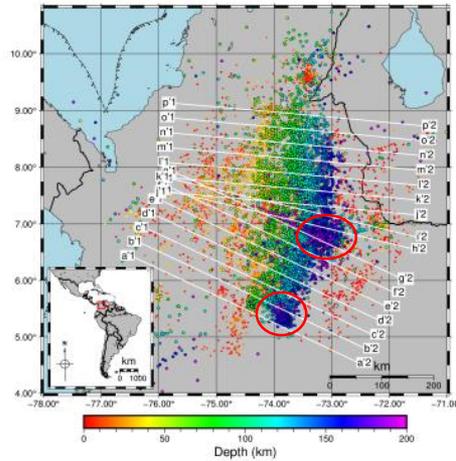
- A pesar de que el número de picks de EQTransformer era parecido al manual, después de la asociación se reducen mucho las detecciones.
- No obstante, EQTransformer es el algoritmo automático de picado que permite mayor detección de eventos.

No. eventos vs Magnitud

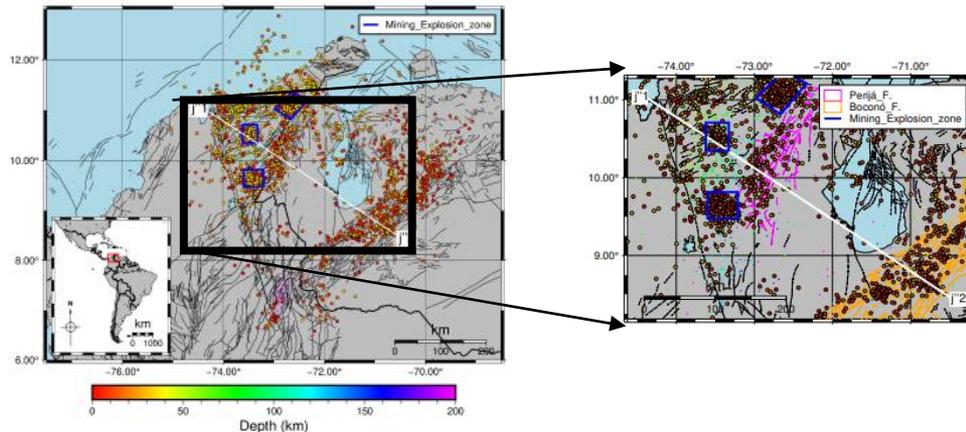
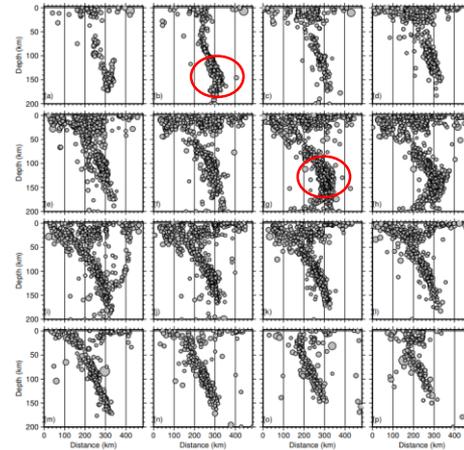


Illuminación de estructuras con los catálogos VMM y YU

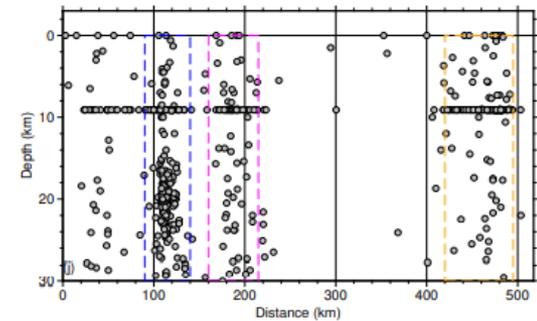
Con una red local se observa mejor aún la sismicidad de la zona.



(a) Depths >= 40 km are highlighted



(b) Depths <= 40km are highlighted

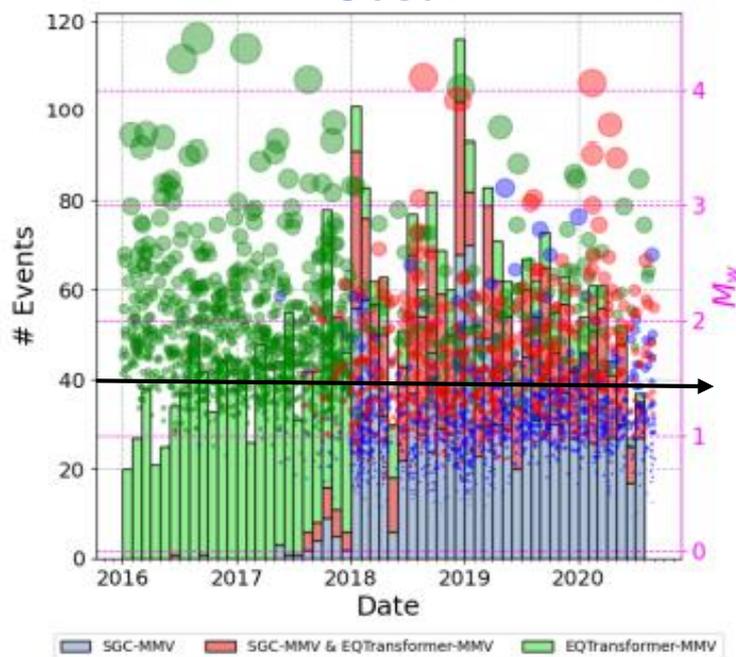


(b) j*1-j*2 profile to illuminate the Perijá F. and Boconó F.

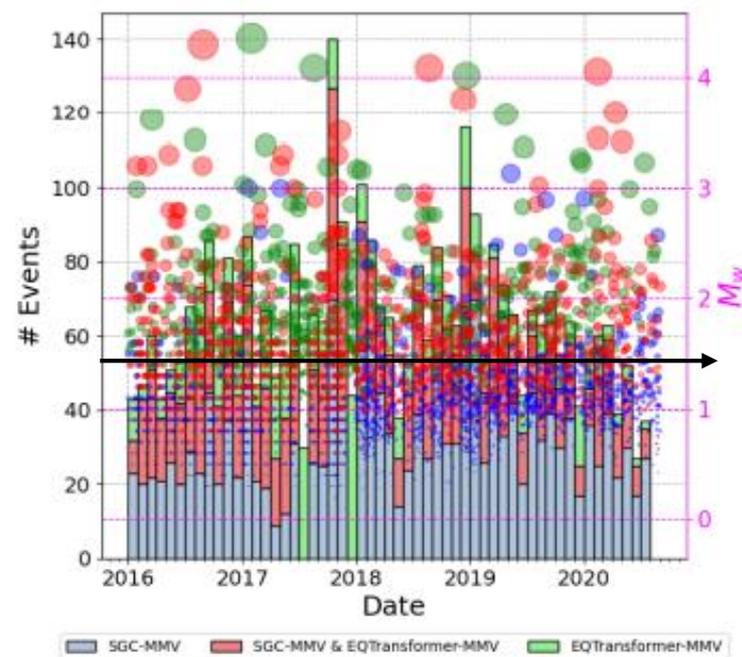
Análisis del catálogo de la red VMM

Comparación del catálogo del VMM con dos catálogos de la zona brindados por el SGC

Catálogo de Sismicidad Línea Base General del Valle Medio del Magdalena y La Loma Cesar



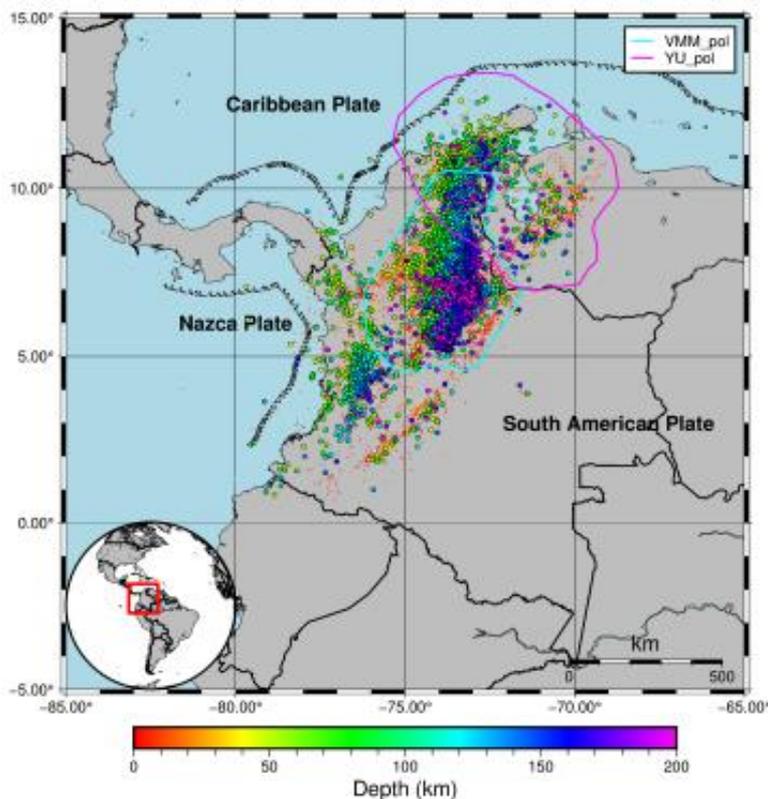
Catálogo TECTO: 14 de febrero de 2014 a la fecha



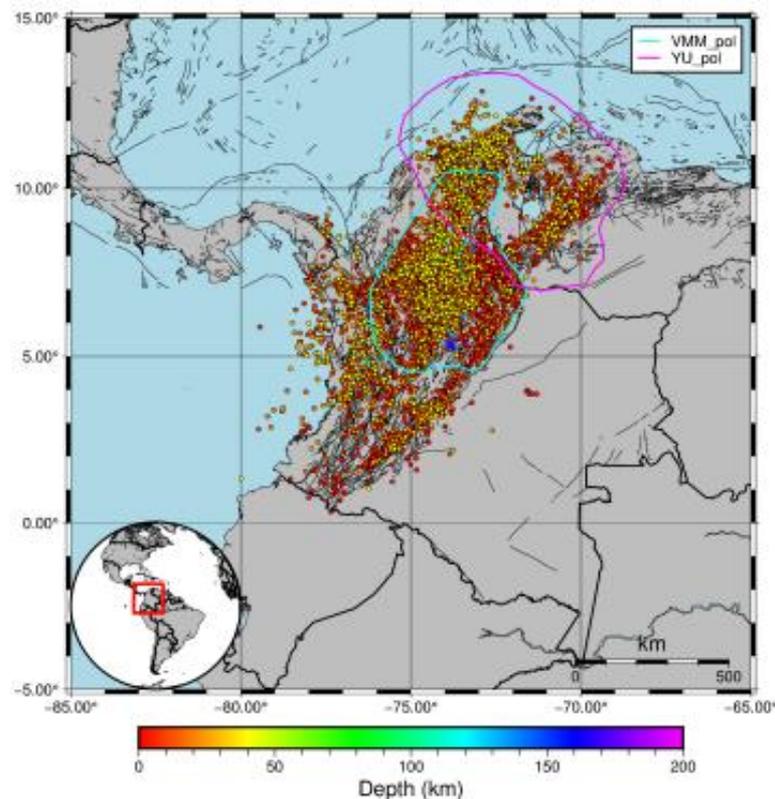
Catálogo final generalizado

Se unieron los tres catálogos para obtener un catálogo final generalizado.

Los polígonos señalan la localización preferida en caso de que el evento esté repetido en los catálogos.



(a) Depths ≥ 40 km are highlighted



(b) Depths < 40 km are highlighted

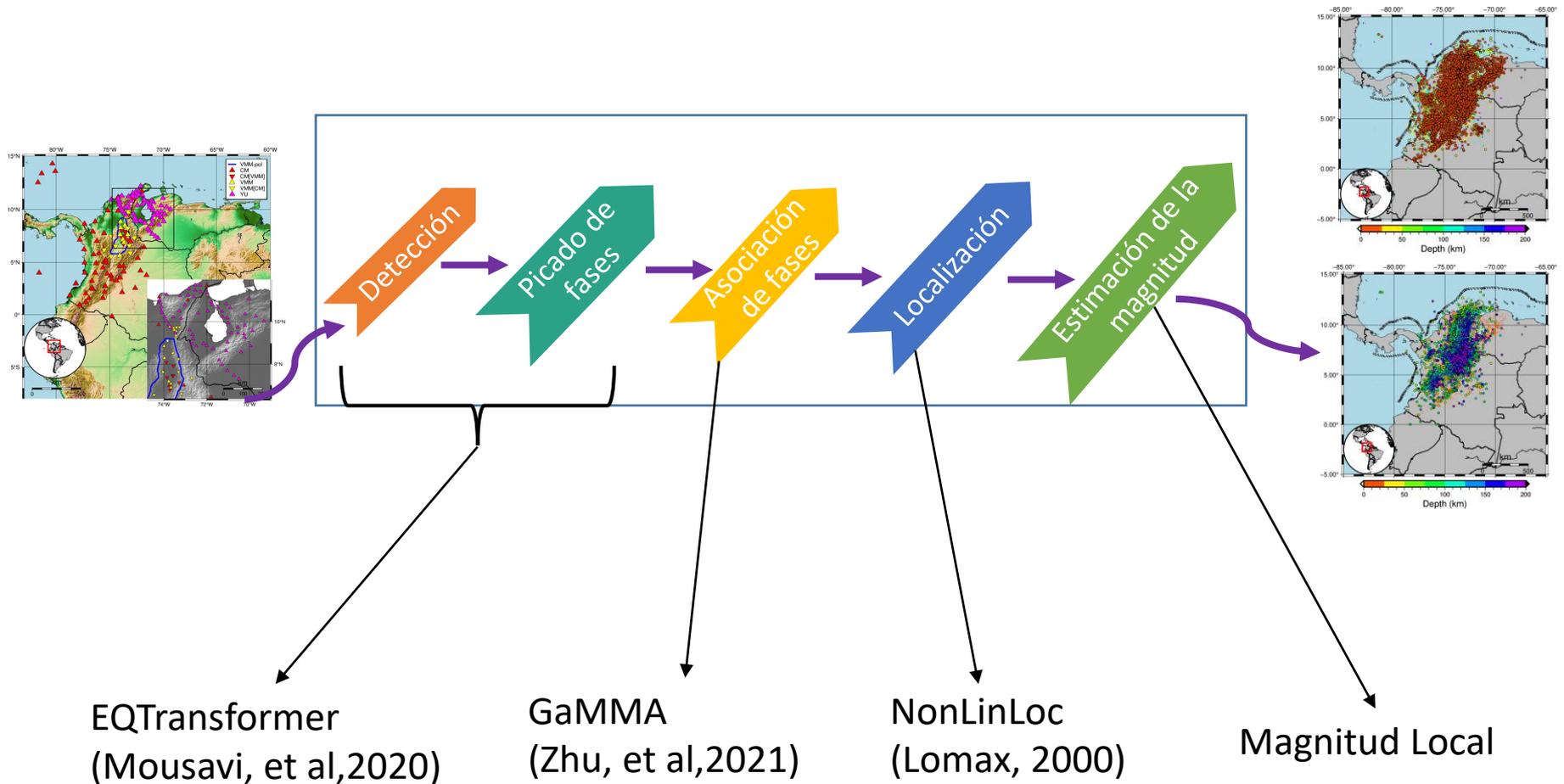
Trabajos futuros y conclusiones

Conclusiones

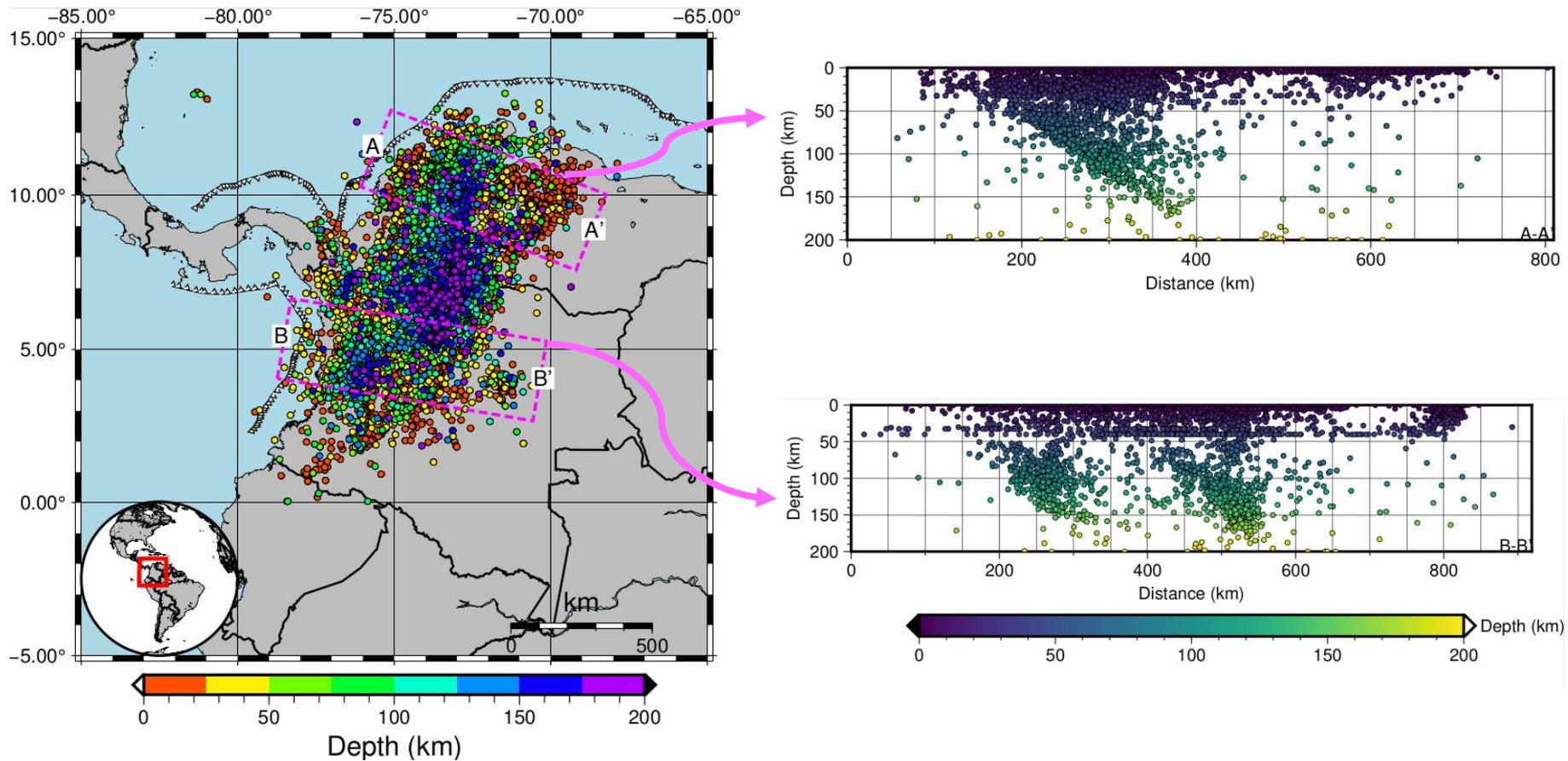
1. Se presentó un análisis detallado de las ventajas y desventajas de los picadores automáticos: EQTransformer y PhaseNet. En términos de detección, PhaseNet detecta eventos más pequeños, pero EQTransformer muestra mayor confianza en sus resultados.
2. Los asociadores usados permiten obtener catálogos confiables pero no son los más óptimos para este tipo de picks.
3. Se presentó un catálogo sísmico automático a partir de tres redes sismológicas que permiten visualizar la sismicidad del territorio colombiano. El catálogo es confiable en términos de errores en la localización y es capaz de definir las estructuras más importantes del territorio.

Trabajos futuros: Catálogo sísmico automático

- Catálogo desde el 2016/01/01 hasta 2022/09/01 con todas las estaciones disponibles de CM, VMM, YU



Trabajos futuros: Iluminación de estructuras del catálogo



Agradecimientos

- A el **Profesor Germán Prieto y a los jurados** por sus aportes y su seguimiento al trabajo de tesis.
- A **Daniel Siervo** (antes sismólogo del SGC, ahora sismólogo de TexNet) por su tiempo y dedicación como coasesor del trabajo.
- A **Alan Levander** (Profesor asociado en la universidad de Rice) por compartir los datos de la red YU.
- Al **SGC** por almacenar y compartir los datos sismológicos de las redes CM y VMM.
- A los **analistas sismológicos del SGC** por sus invaluable contribuciones al trabajo.
- A mis **amigos y familia** por sus comentarios y apoyo en el desarrollo del trabajo.

Gracias

Universidad Nacional de Colombia

PROYECTO CULTURAL, CIENTÍFICO Y COLECTIVO DE NACIÓN