

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**



**PRÁCTICAS EN EMPRESA**

**EXTRACCIÓN DE ATRIBUTOS DE UN REGISTRO SÍSMICO**

**INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL**

Tutora de la entidad : Resurrección Antón

Tutor UCM : Raúl Fernández

**Pablo Suárez Reyero**

Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones

Curso académico 2022-2023

Convocatoria ORDINARIA

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. El IGN como institución</b>	<b>2</b>
<b>3. Objetivos y Motivación</b>	<b>3</b>
<b>4. Desarrollo</b>	<b>3</b>
4.1. Entorno de trabajo . . . . .	3
4.2. Datos . . . . .	4
4.3. Procedimiento . . . . .	5
4.3.1. Método espectral . . . . .	7
4.3.2. Método de correlación . . . . .	10
4.3.3. Método de atributos . . . . .	13
<b>5. Resultados y conclusiones</b>	<b>14</b>
<b>6. Aprendizaje y algunas reflexiones</b>	<b>14</b>
<b>7. Enlace a los códigos</b>	<b>15</b>
<b>8. Diagrama de Gantt</b>	<b>15</b>

## 1. Introducción

Históricamente, el estudio de los fenómenos sísmicos ha suscitado numerosos debates y preguntas dentro de los círculos científicos, no solo por la motivación de preservar la existencia del ser humano en nuestro planeta, sino por el saber acerca de la naturaleza de estos eventos. Gracias al avance de la ciencia y consecuentemente el de la tecnología, la implementación de sensores, e.g., sismógrafos, fue posible. Gracias a ellos, se ha podido detectar una gran cantidad de eventos sísmicos, que posteriormente son analizados, con el fin de entender mejor su naturaleza y así poder diferenciarlos de explosiones artificiales.

En aquel entonces, las preguntas del momento perseguían respuestas exclusivamente ligadas a la comprensión de los fenómenos sísmicos y al emplazamiento de los sensores. A día de hoy, un segundo foco está puesto en el desarrollo de técnicas de análisis y procesamiento de datos, entre otras cosas, gracias a la gran labor científica del pasado y del presente. Algunas de estas herramientas han demostrado un gran potencial en la realización de tareas reiterativas, como el *machine learning*. Gracias al aprendizaje máquina, se pueden discriminar eventos naturales de aquellos propiciados intencionadamente, a partir de los atributos de cada uno de los eventos sísmicos. Sin embargo, la discriminación de los eventos sísmicos es complicado debido a la baja tasa de incidencia. [\[AKL<sup>+</sup>22\]](#)

Para poder introducir datos en un modelo de *machine learning*, hay que saber los atributos que se quieren introducir en el modelo, y para ello, se ha de procesar cada evento con el fin de extraer sus características más relevantes. El trabajo realizado durante los dos meses de prácticas, entre otras cosas, ha consistido en el procesado de señales, para intentar discriminar terremotos de voladuras, con el fin de extraer los atributos que les caracterizan y analizarlos, para que en un futuro, un modelo de *machine learning*, pueda diferenciarlos.

## 2. El IGN como institución

Estas prácticas se han realizado durante febrero y marzo en la Red Sísmica Nacional dentro del Instituto Geográfico Nacional, situado en la Calle del General Ibáñez de Ibero, 3, Madrid.

Dentro del conglomerado de tareas que desempeña el IGN, se encuentra una gran variedad de proyectos y actividades que van desde los estudios sísmicos hasta la realización de trabajos de investigación dentro del campo de la radioastronomía. La Red Sísmica, se encarga de planificar y administrar los sistemas para detectar y comunicar los movimientos sísmicos que ocurren dentro del país y su posible impacto en la costa, además de realizar trabajos e investigaciones sobre la actividad sísmica y coordinar la normativa asociada a estos fenómenos. Es importante destacar la cooperación que existe a nivel nacional e internacional, pues el progreso de la ciencia depende de ello.

Actualmente, la discriminación de eventos es llevada a cabo por un grupo de trabajadores dentro de la Red Sísmica, este grupo es conocido como el grupo 24 horas. Estas personas, vigilan en tiempo real los eventos relevantes que se van sucediendo en la península ibérica o en lugares que se encuentren al alcance de las capacidades técnicas de la entidad.

### 3. Objetivos y Motivación

La labor que se realizó durante el periodo de prácticas en el IGN, fue la de analizar y estudiar aspectos de un registro sísmico implementando códigos en **Python** con la ayuda de librerías como **numpy**, **pandas** y **obspy**. Todo ello, con el fin de entender los atributos de un registro sísmico para relacionarlos con otros eventos artificiales (que no sísmicos), que presenten similitudes en la forma de onda en el dominio temporal, similitudes en el dominio frecuencial o que compartan valores con el registro sísmico. Esto último persigue un objetivo principal, explotar técnicas software que contribuyan a diferenciar mejor y más rápido, voladuras de terremotos.

### 4. Desarrollo

En este apartado se explican las herramientas utilizadas, así como la dinámica seguida durante los dos meses de prácticas. Es importante mencionar, que las técnicas que se explican a lo largo de este informe, han sido aplicadas a múltiples registros sismológicos, pero por falta de espacio, solo se ha documentado para una serie de ejemplos. No obstante, al final del informe se adjunta un enlace al repositorio donde se pueden ver muchas de las imágenes que se han generado a lo largo del periodo de prácticas, así como todos los registros que se han estudiado.

#### 4.1. Entorno de trabajo

El trabajo de análisis al principio de las prácticas, fue llevado a cabo con el software: *Swarm*. Este software, brinda una interfaz intuitiva que permite el análisis de formas de onda en formato **.mseed**<sup>1</sup>. Como ejemplo, en la figura 1 se muestran tres gráficas generadas con este programa, correspondientes al terremoto de Granada del 2021, tanto en el dominio temporal como en el frecuencial. Es importante mencionar, que el análisis más profundo y posterior al uso del *Swarm*, se realizó con la ayuda de **Python** y de librerías como:

- **NumPy**. Esta es una biblioteca de **Python** que proporciona *arrays* multidimensionales, transformadas de Fourier y operaciones algebraicas, entre muchas otras funciones (ver [enlace](#)).
- **Pandas**. Pandas es un paquete de **Python** que proporciona estructuras de datos rápidas, flexibles y expresivas, diseñadas para que el trabajo con datos etiquetados resulte en una tarea fácil e intuitiva. (ver [enlace](#)).
- **Obspy**. ObsPy es un proyecto de código abierto dedicado a proporcionar un marco de trabajo en **Python** para el procesamiento de datos sismológicos. Proporciona analizadores sintácticos para formatos de archivo comunes, clientes para acceder a centros de datos y rutinas de procesamiento de señales sismológicas que permiten la manipulación de series temporales. El objetivo del proyecto ObsPy es facilitar el rápido desarrollo de aplicaciones para sismología. (ver [enlace](#)).

---

<sup>1</sup>.seed ("Standard for the Exchange of Earthquake Data") es el formato estándar internacional para el intercambio de datos sismológicos no procesados entre diferentes instituciones y agencias. [GFZ]

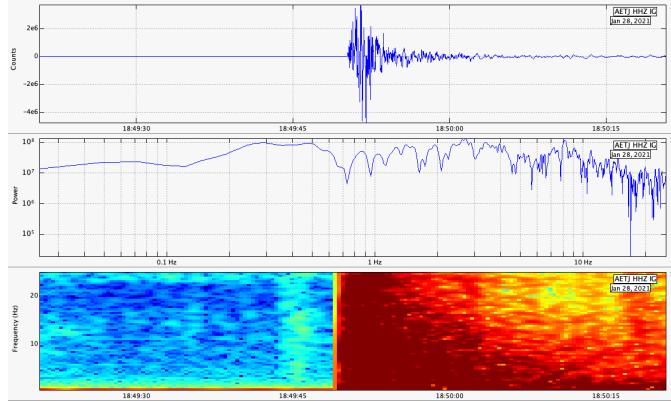


Figura 1: Terremoto de Granada el 28/10/2021 a las 18:49:49 de magnitud 4.4

Como podemos ver en la figura 1, efectivamente hay un terremoto a la hora enunciada, esto puede verse también en el espectro en frecuencia de la señal dónde la gama de colores cambia drásticamente en ese instante de tiempo. Se observa además como la potencia máxima se da para  $f = 2,76 \text{ Hz}$ <sup>2</sup>. En algunos casos, cuando se dudó de la presencia de un terremoto, se aplicaron filtros paso banda, con  $f \in \{f_1, f_2\} [\text{Hz}]$ , donde  $f_1 \approx 2 \text{ Hz}$  y  $f_2 \approx 8 \text{ Hz}$ . El uso de filtros permite una visión más clara del espectro, con el fin de enfatizar una zona del espectro o simplemente para querer eliminar una banda de frecuencias. Es importante destacar la unidad del eje vertical, pues como puede verse en la figura de arriba, en el dominio temporal, el eje y mide los *counts*. Cada *count* equivale a 10 nm de desplazamiento de tierra, que equivalen a  $10^{-9} \text{ metros}$ .

## 4.2. Datos

Los datos que se han analizado, han sido proporcionados por la persona que nos ha guiado durante los dos meses de prácticas, Resurrección Antón (Resu).

Gracias a la librería `Obspy`, se han podido importar registros sísmicos en formato `seed`, permitiendo el estudio y comprensión de las funcionalidades que esta librería escrita en Python ofrece. Aunque se han estudiado múltiples eventos en diferentes registros, este informe se centra en el estudio de dos fuentes de datos;

- **EMLI.mseed.** Este archivo contiene datos con varios terremotos del Sur del Mar de Alborán en una estación del IGN en Melilla.
- **CART.mseed.** Este otro `.mseed`, contiene explosiones submarinas en una estación en Cartagena, la cual forma parte de un consorcio entre la Complutense y el Real Observatorio de la Armada. El IGN, agradece que estos datos se compartan para fines de investigación.

El estudio se centró en estos dos registros, porque el primero cuenta con terremotos submarinos, y en el segundo, hay un conjunto de explosiones registradas, y se cree que entre ellas hay un terremoto.

---

<sup>2</sup>Los terremotos que generan tsunamis generalmente se rompen con relativa lentitud, produciendo más energía en períodos más largos (frecuencias más bajas) que los que generalmente se usan para medir magnitudes. La mayoría de las frecuencias en terremotos rondan los [Hz]. [\[Wik23a\]](#)

#### 4.3. Procedimiento

La dinámica de trabajo que se ha seguido para el estudio y análisis de los dos registros mencionados y del resto, se explica detalladamente en los siguientes párrafos.

El primer paso, consiste en identificar un terremoto real, esto, solo se hará para el archivo `EMLI.mseed`, ya que el `CART.mseed` solo tiene registradas voladuras, a excepción del evento mencionado. Para identificar el terremoto, hay que saber el día que se produjo, para ello se ha realizado una pequeña tarea de investigación en la web del IGN (ver: [catálogo-terremotos](#)) y por todos los recursos citados en este documento, con el fin de saber los terremotos que se sucedieron en el Mar de Alborán. Finalizada la búsqueda, se encontraron 114 terremotos (la mayoría en el Mar de Alborán) registrados por la estación del IGN en Melilla, el 28 de octubre del 2021. Como resumen, se muestra a continuación el listado de los seísmos más destacados, a modo de cuadro:

Lugar	Fecha	Hora	Profundidad (km)	Intensidad	Magnitud
ALBORÁN SUR	28/08/2021	02:03:20	18.0	-	2.3
ALBORÁN SUR	28/08/2021	02:29:15	14.0	-	2.2
ALBORÁN SUR	28/08/2021	03:31:31	30.0	-	2.4
ALBORÁN SUR	28/08/2021	03:37:35	27.0	-	2.2
ALBORÁN SUR	28/08/2021	06:17:12	7.0	-	2.2
ALBORÁN SUR	28/08/2021	11:20:50	0.0	IV	5.1
ALBORÁN SUR	28/08/2021	11:24:11	14.0	II	3.2
ALBORÁN SUR	28/08/2021	11:27:34	0.0	II	3.1
ALBORÁN SUR	28/08/2021	11:30:01	5.0	II	3.3
ALBORÁN SUR	28/08/2021	11:31:26	0.0	-	2.6
ALBORÁN SUR	28/08/2021	11:32:32	9.0	-	2.5
ALBORÁN SUR	28/08/2021	11:33:34	16.0	-	2.4
ALBORÁN SUR	28/08/2021	11:39:21	2.0	-	2.5
ALBORÁN SUR	28/08/2021	11:40:19	0.0	-	2.4
ALBORÁN SUR	28/08/2021	11:41:36	9.0	-	2.4

Cuadro 1: Algunos de los terremotos registrados en el Mar de Alborán.

El terremoto con intensidad<sup>3</sup> = IV, es el seleccionado, para estudiar los atributos. Una vez seleccionado el terremoto, se representa el intervalo de señal asociado, con la ayuda del *Swarm*, para confirmar la presencia del terremoto en el `EMLI.mseed` y estudiar sus características principales. A continuación, se muestra el terremoto del `EMLI.mseed` y un conjunto de explosiones registradas en el `CART.mseed`. y en otros dos ficheros correspondientes a otras dos estaciones: `ATIN.mseed` y `APOR.mseed`.

A continuación se adjuntan las explosiones<sup>4</sup>;

<sup>3</sup>La intensidad, define cuanto y como se ha sentido el terremoto por las personas y el entorno. IGN et al [IGN], las definiciones y asignaciones pueden verse en la página 4/6 del siguiente documento escrito por el IGN: [SIS-Escala-intensidad-Macrosismica.pdf](#)

<sup>4</sup>En este informe de prácticas, los términos, “voladuras” y “explosiones” son sinónimos.

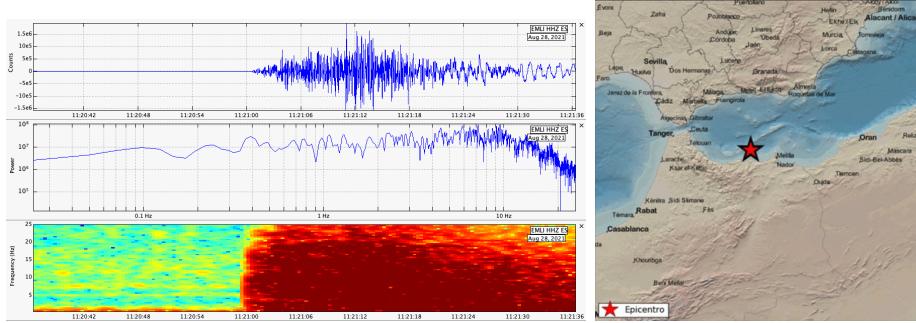


Figura 2: Terremoto de magnitud 5.1, en el Mar de Alborán el 28/08/2021 a las 11:20:50. A la derecha se puede ver la situación geográfica del lugar donde ocurrió.

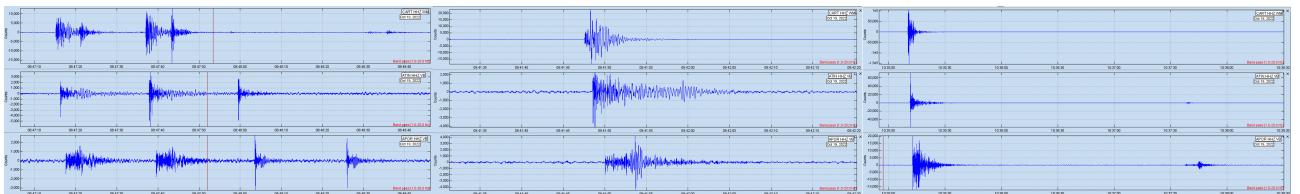


Figura 3: Posibles explosiones en el dominio temporal.

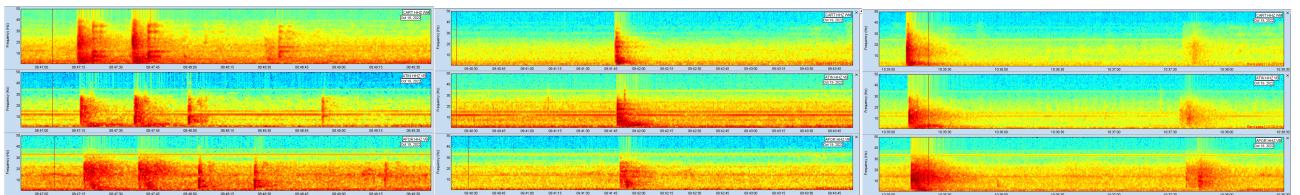


Figura 4: Posibles explosiones en el dominio frecuencial.

En las imágenes 3 y 4 se observan las explosiones registradas en el Mar de Alborán, en el dominio temporal y frecuencial respectivamente. Como puede verse, se han incluido los otros dos registros mencionados antes, con el fin de discriminar a simple vista si puede tratarse de un terremoto o una explosión.

Estudiando las figuras 3 y 4, uno puede darse cuenta de como la estación de APOR está más lejos, respecto a la estación de ATIN, pues la onda aparece instantes más tarde. Además, en APOR, la onda recibida llega más atenuada que la que se obtiene en la estación correspondiente al registro ATIN.

Por último, centrando la atención en el evento de las 10:37, puede verse como este tiene valores de frecuencia ligeramente más bajos respecto al evento de las 10:35 y al resto de eventos de la figura, pero también se aprecia una ligera diferencia. Si bien en los eventos de las 8:47:15 y 9:41:45 se observan aumentos de frecuencia abruptos, propios de las explosiones, a las 10:37 no se observa ese comportamiento, pues la frecuencia máxima entre las 10:37:30 y las 10:38:00 se alcanza casi a mitad del intervalo. De aquí surge la duda acerca de la naturaleza real de este evento.

#### 4.3.1. Método espectral

Una vez escogido el terremoto del `EMLI.mseed` e identificado el posible terremoto en el `CART.mseed`, se pasa a `Python`, para procesar las señales y comparar sus espectros. En la figura 5 se muestra el terremoto del `EMLI.mseed` en el dominio temporal. A la hora de comparar las

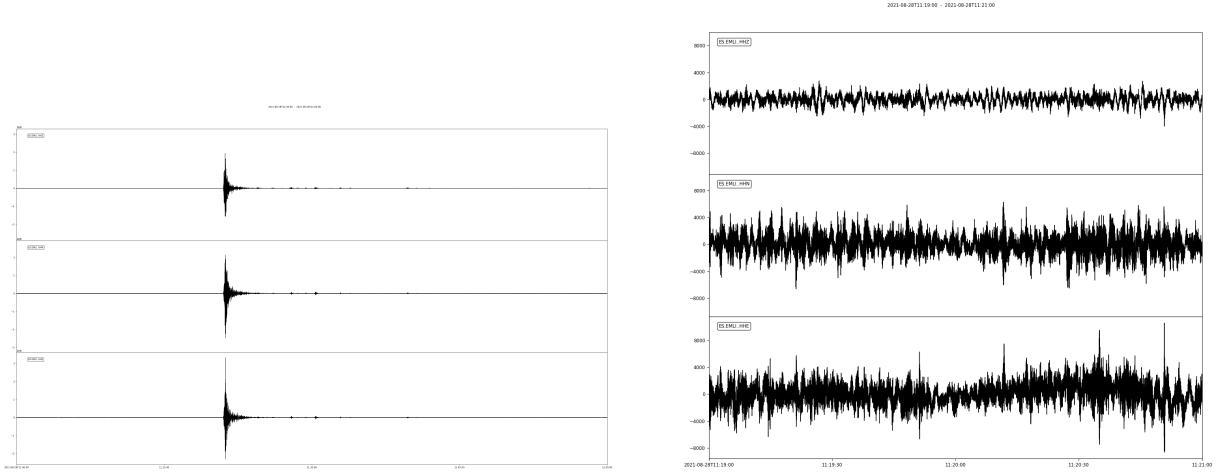


Figura 5: Terremoto de magnitud 5.1, en el Mar de Alborán el 28/08/2021 a las 11:20:50, señal completa (izquierda) y terremoto (derecha)

dos señales, la única parte de la señal que importa es la correspondiente al terremoto, por ello, se recorta la señal con la función `trim(start_time, end_time)`. Esta función es propia de `Obspy` y permite recortar señales especificando en segundos, el tiempo de inicio y fin. Para representar esta señal se ha escogido una frecuencia de muestreo de  $f_s = 100$  Hz, lo que hace que la señal que se va a procesar tenga 360001 muestras. Según el registro, puede ser que un terremoto se haya registrado con una orientación del sismógrafo, o con las tres (`HHZ`, `HHN` y `HHE`). En las dos imágenes de la figura 5 aparecen tres señales, que se corresponden con cada una de las tres orientaciones tradicionales del sismógrafo con las que se ha registrado el evento:

- `ES.EMLI..HHZ`  $\Rightarrow$  (`H`: “High Broad Band”, `H`: “High Gain Seismometer” y `Z`: “Vertical”)
- `ES.EMLI..HHN`  $\Rightarrow$  (`H`: “High Broad Band”, `H`: “High Gain Seismometer” y `N`: “North-South”)
- `ES.EMLI..HHE`  $\Rightarrow$  (`H`: “High Broad Band”, `H`: “High Gain Seismometer” y `E`: “East-West”)

Cada una de estas tres letras tienen un significado, que puede verse en mayor detalle en el siguiente documento escrito por el IRIS<sup>5</sup>: [SEED\\_Format\\_definitions.pdf](#). Significados de arriba;

- `H`. Esta letra determina la frecuencia de muestreo y como es High Broad Band, entonces  $f_s \geq 80$  Hz<sup>6</sup>.
- `H`. Esta letra especifica el tipo de sismómetro, en este caso, se trata de un sismómetro de alta ganancia.

<sup>5</sup>IRIS es un consorcio universitario de investigación dedicado a explorar el interior de la Tierra mediante la recogida y distribución de datos sismográficos. Wikipedia et al [[Wik23b](#)]

<sup>6</sup>Por eso la frecuencia de muestreo en Python es de 100 Hz.

- **Z, N, E.** Determina la orientación del sismómetro; orientación vertical, orientación norte-sur y orientación este-oeste, respectivamente.

Estudiando las imágenes de la figura 5, no se pueden sacar conclusiones vinculantes, pues hay que filtrar la señal y calcular su espectro en frecuencia para poder saber más acerca de ella. A continuación se adjunta el espectro de la señal original filtrada y sin filtrar, y el espectro del terremoto sin filtrar y luego el filtrado.

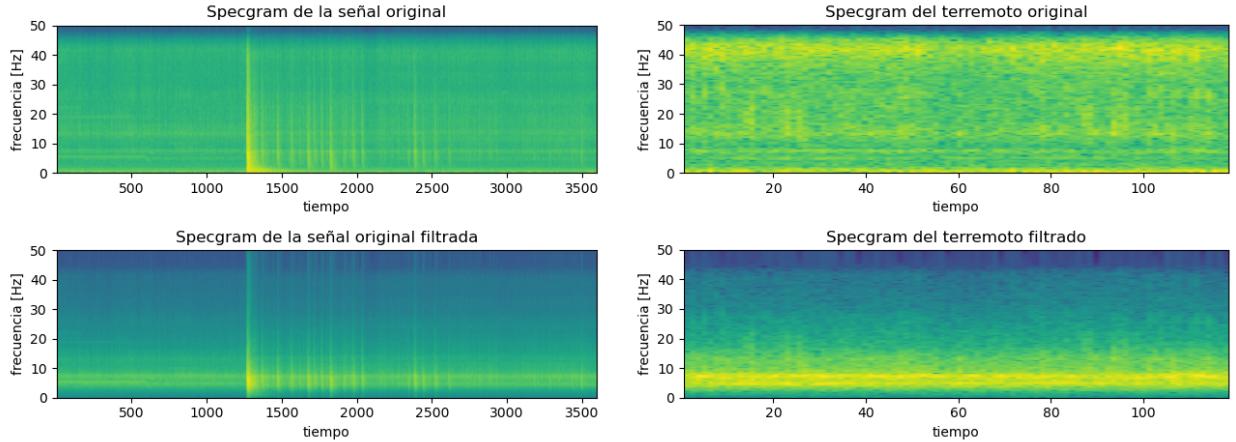


Figura 6: Espectrograma de la señal entera (izquierda) y espectrograma del terremoto (derecha)

Puede verse como la energía se concentra en las frecuencias más bajas. Teniendo el espectro, se podría comparar las señales más fácilmente. Este proceso se repite para la señal del CART.mseed.

Estudiando la imagen de la derecha en la figura 7, se observan similitudes entre los dos pares de señales. Ya que en las dos parejas de señales se puede apreciar una primera explosión e instantes más tarde, otra de mucha menor magnitud.

En la figura 8 se adjuntan los dos espectrogramas de las dos imágenes de la figura 7. Comparando los espectrogramas de la imagen inferior de la derecha en la figura 8, respecto al espectrograma en la imagen inferior de la derecha en la figura 6, se ve claramente como en el caso del terremoto, las frecuencias se mantienen constantes a lo largo del tiempo, mientras que en la figura 8 hay cambios bruscos de frecuencia, propios de una explosión. Si se compara el espectrograma de la figura 8 con el evento de las 10:37 en la figura 4, se ven claras diferencias, mientras que el primero muestra un comportamiento propio de una voladura, el segundo se asemeja más a un terremoto.

Aunque la visualización del espectrograma de las figuras 8 y 6 no ha dado mucha más información de la que ya se sabía, ha permitido corroborar la clara diferencia entre los espectrogramas de un terremoto y el de una voladura.

Cabe destacar, que tanto el terremoto seleccionado de Melilla como la voladura de las 8 de la mañana en Cartagena, han sido filtrados con un filtro paso banda con  $f \in \{4 - 16\}$  Hz. Las frecuencias del eje vertical que aparecen en las figuras 6 y 8 no representan con claridad las frecuencias reales, esto se debe a que las figuras se obtuvieron con la librería de Python

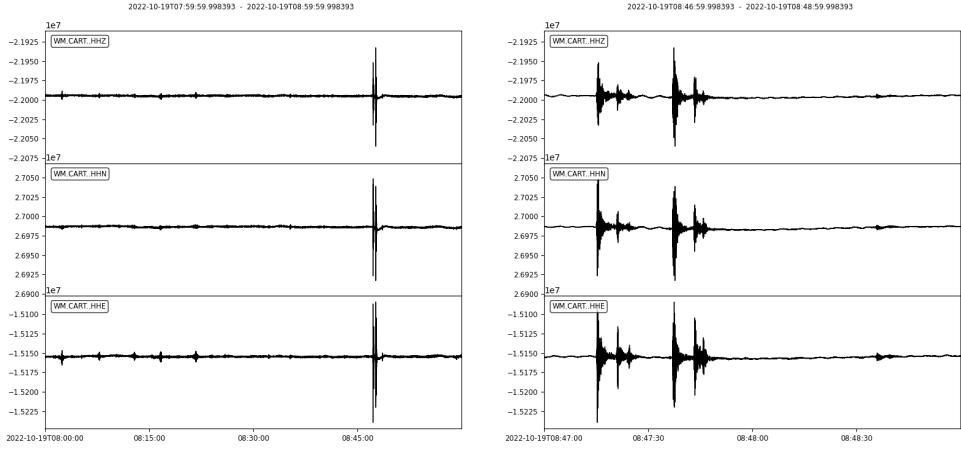


Figura 7: Señal completa (izquierda) y señal de la voladura (derecha)

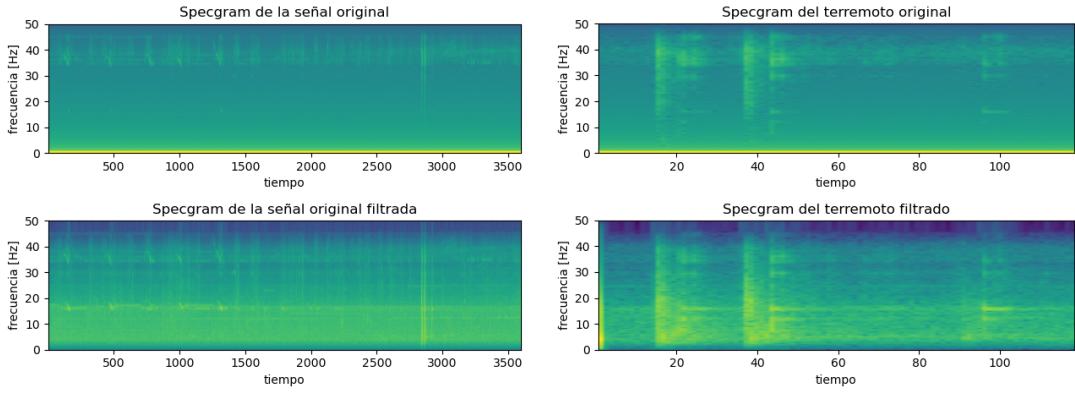


Figura 8: Espectrograma completo (izquierda) y espectrograma de la voladura (derecha)

`matplotlib`, y esta librería solo trabaja bien cuando se le pasan *arrays* creados con `numpy`, pero en este caso, los datos que se están representando son datos obtenidos con `Obspy`, de ahí la problemática a la hora de representar este tipo de datos. No obstante, `Obspy` ofrece una función para representar el espectrograma de las señales de un registro sísmico.

En la figura 9 se adjuntan los dos espectrogramas correspondientes al terremoto del `EMLI.mseed` y a la voladura submarina del `CART.mseed`. La diferencia entre las dos imágenes es clara y además verifica un concepto que se ha mencionado anteriormente, y es que, los terremotos poseen frecuencias más bajas, mientras que las explosiones, alcanzan valores de frecuencia mayores. Mientras que la frecuencia máxima del terremoto es de 1 Hz, en la voladura se alcanzan los 40 Hz de frecuencia máxima. Otro aspecto que ya se ha comentado antes, es que, en el caso de los terremotos, las bandas colindantes a las frecuencias que se dan con mayor intensidad, suelen desvanecerse con el tiempo, mientras que en las explosiones, la frecuencia de mayor intensidad (en el eje temporal) se alcanza de manera abrupta. Véanse los dos puntos de gran intensidad, concentrados en la parte superior del espectrograma de la voladura.

Ahora se adjunta el evento de las 10:37, el cual se cree que es un terremoto. Como puede verse en la imagen de la izquierda en la figura 10, hay un pico de amplitud, este pico no se corresponde con el evento mencionado, sino con una fuerte explosión a las 10:35 (esto está

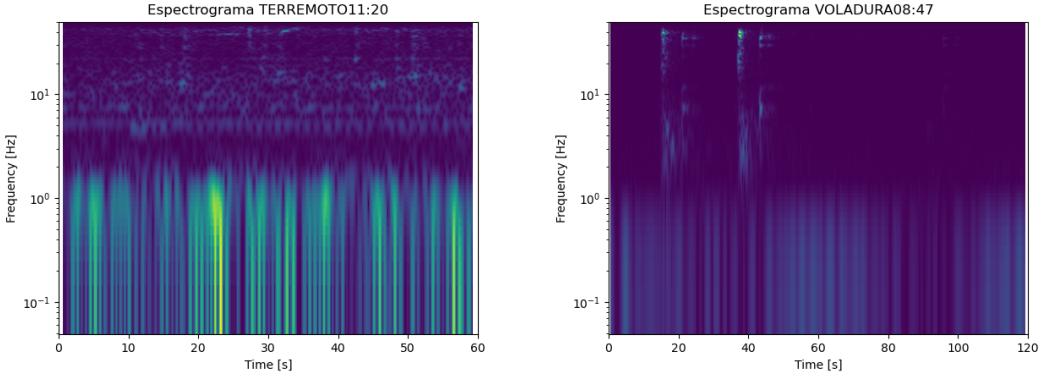


Figura 9: Espectrograma del terremoto (izquierda) y espectrograma de la voladura (derecha)

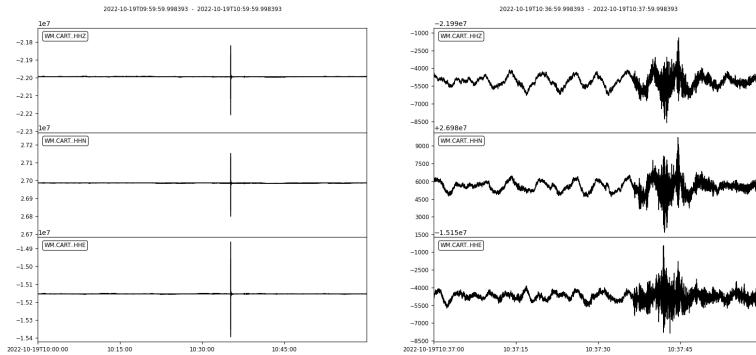


Figura 10: Señal completa (izquierda) y terremoto (derecha).

confirmado en la figura 4). Por ello, a la derecha se muestra el evento de las 10:37, en este caso, la función `trim(...)` ha resultado ser de gran utilidad e importancia, pues el evento mencionado podría haberse visto eclipsado por la voladura a las 10:35. A continuación se adjunta el espectrograma del evento de las 10:37 junto al terremoto de Melilla y a la voladura de las 8:47.

En la figura 11, uno puede notar rápidamente la gran similitud que existe entre las dos primeras imágenes, aun viniendo de diferentes registros sísmicos y pertenecer a eventos que no guardan relación alguna. Mientras que la tercera imagen, no se parece en nada a la primera. Las frecuencias máximas en las dos primeras imágenes son muy similares, siendo ligeramente más bajas en la primera. Por lo que se puede concluir, afirmando que el evento de las 10:37<sup>7</sup> se corresponde con un terremoto y no con una voladura. Como se ha visto, el estudio de los espectros resuelve muchas dudas y corrobora suposiciones, pero se necesita más información, para poder encontrar más diferencias entre voladuras y explosiones.

#### 4.3.2. Método de correlación

Lo que se busca con este método son las posibles similitudes que pueda haber, correlando las dos señales. La librería de `Obspy` que se llama, `obspy.signal.cross_correlation`, ofrece múltiples funciones que permite llevar a cabo la correlación de señales.

---

<sup>7</sup>Este terremoto no es que sea de pequeña magnitud, sino que se encuentra lejos de la estación.

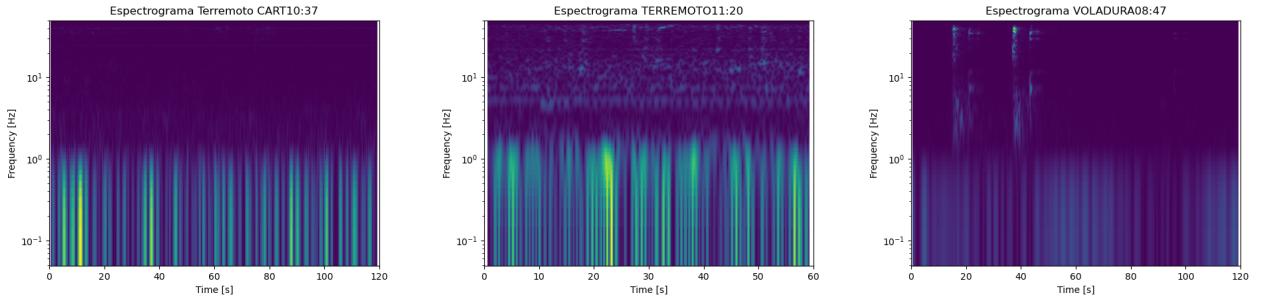


Figura 11: Espectrogramas del supuesto terremoto, del terremoto de Melilla, y de la voldaura en Cartagena.

La dinámica a seguir es simple, primero se extrae la señal del registro sísmico y luego se trocea la señal para extraer el intervalo que se desea correlar frente a otra señal completa. En este caso, la señal completa recibe el nombre de *stream*, y el trozo que se quiere correlar se le llama *template*. Cabe destacar, que para el filtrado de las dos señales se ha implementado un filtro paso banda con  $f \in \{0'5 - 2\}$  Hz.

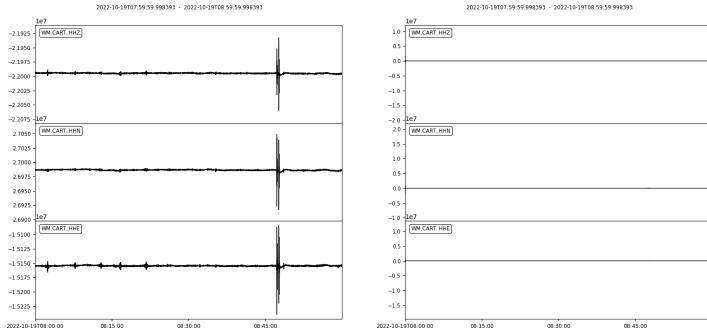


Figura 12: Explosiones 08:00-09:00 sin filtrar (izquierda), explosiones filtradas (derecha)

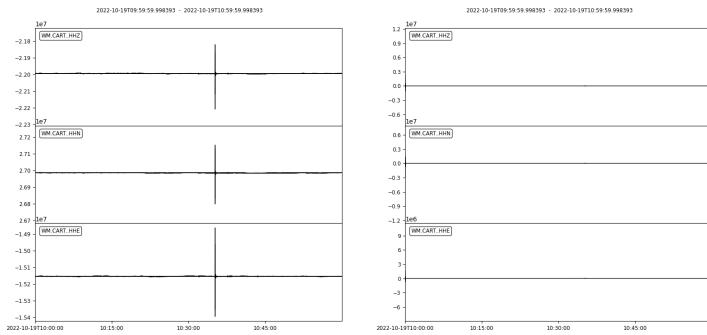


Figura 13: Terremoto 10:37 sin filtrar (izquierda), explosiones filtradas (derecha)

La primera correlación que se ha llevado a cabo, ha sido entre el terremoto correspondiente al evento de las 10:37 y las voladuras que se suceden en el intervalo de las 08:00 y las 09:00 horas, con el fin de descartar cualquier coincidencia mayor. Los resultados obtenidos para umbrales de 0'15, 0'20 y 0'25, se muestran en la figura 14. Como puede verse por los resultados, a partir de

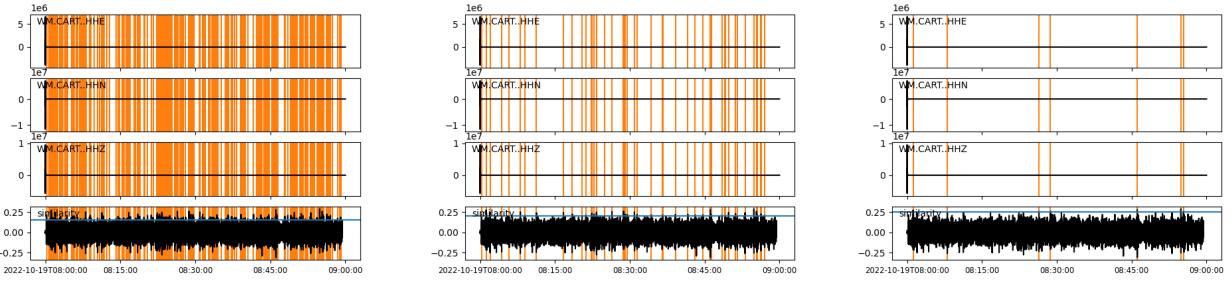


Figura 14: Resultado de la correlación, 0'15 (izquierda), 0'20 (centro), 0'25 (derecha)

un umbral de 0'25, casi no hay coincidencias. Normalmente el umbral suele ser de 0'4 y según disminuye, las coincidencias aumentan. Para un umbral de 0.3 ya no existe correlación entre señales, por lo tanto, esto nos muestra una clara diferencia entre el terremoto de las 10:37 y el resto de voladuras que se suceden. Ahora se repite el mismo proceso que antes, pero correlando el terremoto de las 10:37 con los terremotos que se suceden en el `EMLI.mseed`, los resultados tras correlar estas dos señales son los siguientes;

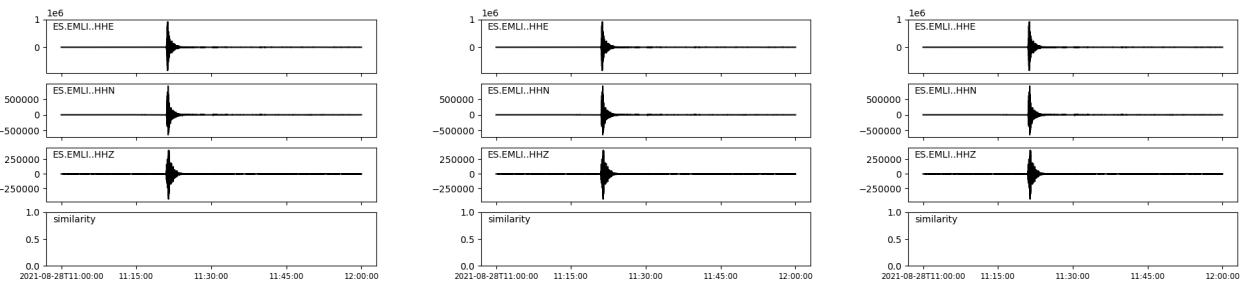


Figura 15: Resultado de la correlación, 0'15 (izquierda), 0'20 (centro), 0'25 (derecha)

En este caso, no se ha conseguido encontrar ninguna similitud entre el terremoto de las 10:37 en `CART.mseed` y el resto de terremotos del `EMLI.mseed`. Esto puede deberse a varias razones: no haber filtrado <sup>8</sup> bien la señal, o haber puesto una distancia entre detecciones equivocada. Puede deberse también, al hecho de que el terremoto de las 10:37 tiene amplitudes negativas en la orientación `HHZ` y `HHE`, mientras que en la componente `HHN` solo hay componentes positivas. Si uno compara estas amplitudes con las amplitudes del `EMLI.mseed` en la figura de arriba, puede verse como en las tres componentes del `EMLI.mseed` hay amplitudes positivas y negativas, en cada una de las orientaciones `HHE`, `HHZ` y `HHN`. Esto podría reducir el grado de correlación entre señales, pues no se encontrarían patrones similares debido a la amplitud de los eventos. Cabe destacar, que se ha probado a correlar las señales con otras funciones de Python, pero el tipo de datos no eran compatible.

<sup>8</sup>Antes de diseñar el filtro paso banda, se han analizado los espectros de las señales para estudiar las frecuencias de interés, una vez hecho esto, se ha probado con muchas frecuencias, y ninguna ha dado buen resultado.

### 4.3.3. Método de atributos

La finalidad de este método de discriminación, consiste en extraer los atributos correspondientes a cada uno de los registros sísmicos estudiados, con el fin de relacionarlos y compararlos, para saber si guardan alguna similitud entre ellos. El resultado de comparar los atributos de cada registro, nos da información acerca de las características que pueden tener en común los eventos de esos registros. Para entender mejor que es lo que representan los atributos de un registro sísmico, se ha estudiado este documento escrito por Turner et al. [TLR21].

Este proceso consiste en extraer los atributos de un evento (en el caso de este informe, se ha escogido el terremoto de las 10:37) y los atributos de los terremotos registrados en el `EMLI.mseed`. Una vez extraídos los atributos, estos se han representado gráficamente, de esta forma, al representar los valores en una gráfica, se puede ver que atributos del `EMLI.mseed` están más cerca de los valores de atributos correspondientes al terremoto del `CART.mseed`.

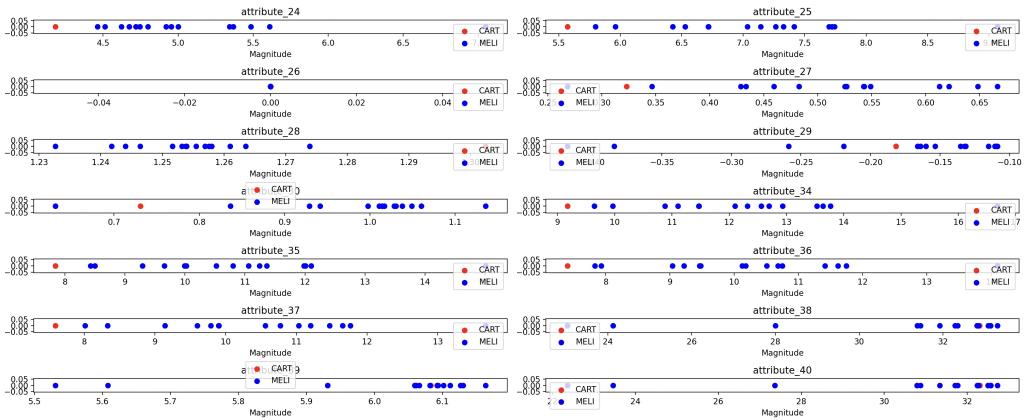


Figura 16: En rojo, los valores de los atributos del `CART.mseed` y en azul los del `EMLI.mseed`.

Como se puede apreciar en la figura de arriba (16), los atributos que más se aproximan entre sí son los atributos: 26, 29, 38 , 39 y 40, mientras que los atributos 34, 35 y 36 solo comparten una tendencia a la baja. Los atributos 26, 29, 38, 39 y 40 representan la frecuencia en el valor máximo, la mediana de la DFT normalizada, el centroide espectral<sup>9</sup>, el radio de giro<sup>10</sup>, y el ancho del centroide espectral<sup>11</sup> respectivamente. Teniendo en cuenta los atributos que comparten similitudes, uno puedo notar, como dos de ellos se corresponden con atributos que representan características espectrales, validando el estudio spectral llevado a cabo al principio. Los atributos relacionados con el centroide espectral, el radio de giro y el ancho del centroide espectral, también confirman que el evento de las 10:37 es un terremoto, pues son características clave a la hora de describir un terremoto.

<sup>9</sup>Provost et al. [PHM17], define este término como  $\gamma_1 = \frac{m_2}{m_1}$  siendo  $m_1$  y  $m_2$  el primer y segundo momento. Wang et al. [WYW13] relaciona el concepto de momento con el producto de los deslizamientos de la falla y las zonas de ruptura, entre otros.

<sup>10</sup>Provost et al. [PHM17], define este término como  $\gamma_2 = \sqrt{\frac{m_3}{m_2}}$ , donde  $m_3$  representa el tercer momento.

<sup>11</sup>Provost et al. [PHM17], define este término como  $\sqrt{\gamma_1^2 - \gamma_2^2}$

## 5. Resultados y conclusiones

Como se ha visto, la discriminación entre terremotos y voladuras no es tarea fácil, pues requiere de un análisis exhaustivo de datos y distintas técnicas de procesado de señal, como aplicar filtros o recortar señales, con el fin de depurar la información que posteriormente será interpretada. Las tres técnicas que se han visto, son técnicas que se complementan entre si, para poder llegar a una conclusión vinculante.

Aunque el objetivo principal de estas prácticas era la extracción de atributos, todo el proceso que se ha documentado en este informe era necesario. Esto es muy importante, pues para poder saber que atributos hay que sacar, hay que saber el evento correspondiente, y para saber el evento hay que analizar la señal meticulosamente, de manera muy similar a la que se ha documentado.

Por último, quiero agradecer a Resu su tiempo empleado, su dedicación hacia nosotros y por acogernos en su despacho todos los miércoles.

## 6. Aprendizaje y algunas reflexiones

Estas prácticas en empresa han resultado ser muy fructíferas y enriquecedoras, no solo por la cantidad de cosas nuevas que he aprendido, sino por la cantidad de conceptos que he logrado poner en práctica para resolver los problemas que han ido surgiendo a lo largo de este periodo de prácticas.

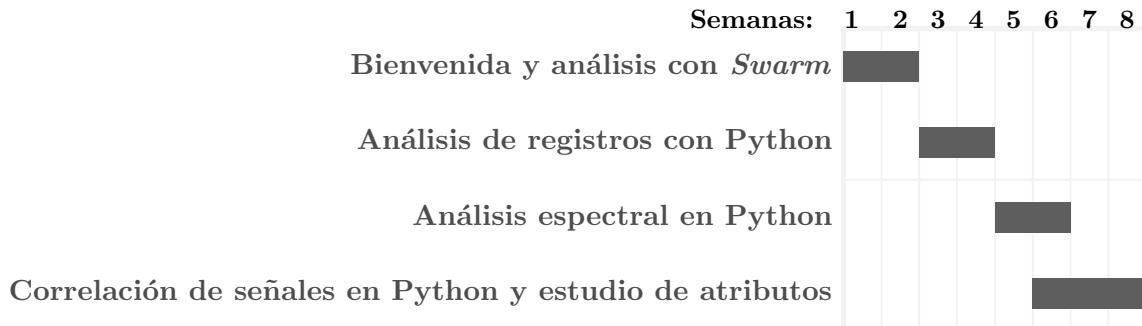
Todas las herramientas y soluciones que he aplicado son el fruto de 4 años de carrera, en los que he aprendido muchísimas cosas, y aunque parezca mentira, todas las asignaturas que he estudiado, han contribuido directa o indirectamente al desarrollo de estas prácticas, y me han permitido afrontarlas con seguridad y motivación. En estas prácticas he aprendido curiosidades acerca de la dinámica de las placas y el impacto del manto en la frecuencia de los terremotos. Además, he mejorado muchísimo mis habilidades programando en Python, pues he tenido que escribir códigos por mí mismo, para representar y gestionar datos de forma correcta y eficiente. Por fin he logrado entender el uso de `pandas`, desarrollando códigos para leer los atributos de los registros y relacionarlos con otros. También he aprendido a usar la librería de `Obspy` con la que me he familiarizado, y tengo que decir, que su potencial aún sigue alucinándome.

Estas prácticas han sido posible gracias al conocimiento de asignaturas como, Sistemas lineales, Informática, Sistemas Operativos, y sobre todo, Procesamiento de señales, pues trabajar con archivos sismológicos requiere de conocimientos acerca de cualquier tipo de señal y sus propiedades, como los espectros, la probabilidad y los filtros. Indirectamente, esta experiencia también ha contribuido al desarrollo de mi trabajo de fin de grado, pues al igual que gran parte de estas prácticas, lo he desarrollado en Python y en él, el procesamiento de señales junto al *Deep Learning* juegan un papel protagonista.

## 7. Enlace a los códigos

El siguiente enlace redirige a la página de GitHub dónde se encuentra el repositorio con todos los códigos desarrollados en Python, así como todas las imágenes que no han podido ponerse en este informe por falta de espacio. <https://github.com/pablosreyero/IGN-codes>

## 8. Diagrama de Gantt



## Referencias

- [AKL<sup>+</sup>22] Hyeongki Ahn, Sangkyeum Kim, Kyunghyun Lee, Ahyeong Choi, and Kwanho You. Imbalanced seismic event discrimination using supervised machine learning. *Sensors*, 22, 2022.
- [GFZ] GFZ. Data format. [GFZ, Data Format](#).
- [IGN] IGN. Descripción del tipo de magnitud. <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/SIS-Tipo-Magnitud.pdf>.
- [PHM17] F. Provost, C. Hibert, and J.-P. Malet. Automatic classification of endogenous landslide seismicity using the random forest supervised classifier. *Geophysical Research Letters*, 44(1):113–120, 2017.
- [TLR21] Ross J. Turner, Rebecca B. Latto, and Anya M. Reading. An obspy library for event detection and seismic attribute calculation: Preparing waveforms for automated analysis. *Journal of Open Research Software*, Oct 2021.
- [Wik23a] Wikipedia. Escalas de magnitud sísmica — wikipedia, la enciclopedia libre, 2023. [Internet; descargado 14-abril-2023].
- [Wik23b] Wikipedia contributors. Iris consortium — Wikipedia, the free encyclopedia, 2023. [Online; accessed 11-May-2023].
- [WYW13] J. P. Wang, X. Yun, and Y.-M. Wu. A first-order second-moment calculation for seismic hazard assessment with the consideration of uncertain magnitude conversion. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(10):2649–2657, 2013.