

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

Máster en Meteorología y Geofísica



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Sísmica Pasiva en estudios de Cuencas Sedimentarias

Laura Fernández Gallego

Tutora: Beatriz Benjumea Moreno

Co-Tutor: Juan José Ledo Fernández

Curso académico 2024 - 2025

Calificación: 9.1

Contenido

Contenido.....	1
Agradecimientos.....	1
Resumen	2
Abstract	2
Introducción.....	3
Objetivos.....	3
Contexto Geológico.....	4
Datos.....	5
Metodología.....	9
Procesado.....	12
Modelización.....	13
Inversión.....	14
Resultados.....	17
Resultados del Procesado.....	17
Resultados de la Modelización.....	18
Resultados de la Inversión.....	18
Discusión.....	20
Conclusiones.....	22
Bibliografía.....	23

Agradecimientos.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Beatriz Benjumea, por brindarme la oportunidad de participar en su proyecto y por su disposición a tutelar este trabajo, aportando siempre su apoyo y orientación.

A todo el equipo del proyecto GEO-TAG (Potencial GEOTérmico del Territorio del Alto Guadiana), cuyas entidades participantes son el Instituto Geociencias Barcelona (GEO3BCN-CSIC), IGME-CSIC y GEAPRAXIS (empresa privada), por facilitarme el acceso a los datos y la información necesarios, así como por la confianza depositada en mí para llevar a cabo este estudio.

A la Universidad Complutense, por ofrecerme el entorno y los recursos para continuar desarrollándome profesionalmente.

A mis compañeros del máster, por el compañerismo y el apoyo constante que han hecho más llevadero este camino.

A mi familia, mi pareja y mis amigos, por ser un pilar fundamental durante este proceso, brindándome siempre su ánimo, comprensión y fuerza.

Resumen

Este estudio se centra en la caracterización del subsuelo en cuencas sedimentarias mediante técnicas de sísmica pasiva, con especial énfasis en el método del cociente espectral H/V (Horizontal/Vertical). Esta técnica, basada en el análisis del ruido sísmico ambiental, permite estimar de forma no invasiva la frecuencia fundamental del terreno. Dicha frecuencia proporciona información valiosa sobre el espesor de los sedimentos y los contrastes de impedancia con el basamento rocoso, factores clave para identificar zonas con mayor susceptibilidad al efecto de sitio, que puede amplificar significativamente el movimiento sísmico.

La investigación se llevó a cabo en la Cuenca del Guadiana, una región que, a pesar de su interés geológico y su potencial para estudios de geotermia y riesgo sísmico, ha sido escasamente investigada mediante métodos geofísicos. Este estudio busca mejorar el conocimiento sobre la estructura del subsuelo mediante la aplicación del método H/V, destacando su utilidad en contextos con escasa información sísmica, así como su eficiencia operativa y bajo coste.

Abstract

This study focuses on the characterization of the subsurface in sedimentary basins using passive seismic techniques, with particular emphasis on the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (H/V) method. This technique, based on the analysis of ambient seismic noise, allows for a non-invasive estimation of the site's fundamental frequency. This frequency provides valuable information on sediment thickness and impedance contrasts with the underlying bedrock—key factors in identifying areas more susceptible to the site effect, which can significantly amplify earthquake ground motion.

The research was conducted in the Guadiana Basin, a region that, despite its geological interest and potential for geothermal and seismic hazard studies, has been scarcely investigated using geophysical methods. This study aims to improve the understanding of the subsurface structure through the application of the H/V method, highlighting its usefulness in data-scarce contexts, as well as its operational efficiency and low cost.

Introducción.

Este trabajo se centra en el estudio de la caracterización del subsuelo en cuencas sedimentarias utilizando técnicas de sísmica pasiva. El propósito del método de sísmica pasiva es analizar las propiedades del subsuelo de manera indirecta y con el empleo de métodos no invasivos, a partir del análisis del ruido sísmico (Wathelet et al., 2004).

El estudio de cuencas sedimentarias tiene diversas utilidades como puede ser la geotermia, la hidrogeología o el estudio del fenómeno conocido como efecto de sitio, que puede incrementar considerablemente los efectos de un terremoto. Este efecto se produce debido a las condiciones locales del terreno, particularmente en zonas donde los sedimentos no consolidados recubren un basamento más denso y consolidado, generando contrastes de impedancia que pueden provocar resonancia y amplificación del movimiento sísmico (Bard, 1999; Field & Jacob, 1995).

Dentro de los métodos de sísmica pasiva, el método del cociente espectral H/V (Horizontal/Vertical), propuesto inicialmente por Nakamura (1989), permite estimar la frecuencia fundamental del terreno a partir del análisis del ruido sísmico ambiental. Este método ha demostrado ser una herramienta eficiente, no invasiva y de bajo coste, especialmente útil en zonas con escasa información sísmica o geotécnica (SESAME Project, 2004). La frecuencia fundamental obtenida mediante H/V proporciona una indicación del espesor de los sedimentos y del contraste de impedancia elástica con el basamento, aspectos clave para identificar áreas con mayor susceptibilidad a la amplificación del movimiento sísmico. Este método se desarrolló en el ámbito de la ingeniería sísmica (Lachet & Bard, 1994).

La zona de estudio del presente trabajo es la Cuenca del Guadiana, caracterizada por sedimentos fluviales, lacustres y depósitos detríticos de origen terciario y cuaternario que cubren un basamento paleozoico. A pesar de su relevancia, la región ha sido poco estudiada desde el punto de vista geofísico, lo que hace necesario avanzar en la caracterización del subsuelo mediante técnicas como el H/V.

Objetivos.

Este trabajo tiene como propósito principal evaluar la viabilidad del uso de la sísmica pasiva para caracterizar la estructura del subsuelo, en este caso la determinación de la posible litología y estructuras del subsuelo. Para ello, se busca obtener información clave sobre el subsuelo a partir del registro de ruido sísmico ambiental, utilizando un método geofísico que sea eficiente y de bajo costo.

De forma específica, se pretende cumplir con este objetivo general mediante la implementación de una técnica para el procesamiento y análisis del ruido sísmico ambiental: El método del cociente espectral H/V (también conocido como método H/V). Se utilizarán datos adquiridos en la zona de

estudio dentro del marco del Proyecto GEO-TAG adquiridos 2024-2025 y del proyecto Topolberia (2006).

Contexto Geológico.

El área de estudio es la cuenca sedimentaria del Guadiana (Figura 1).

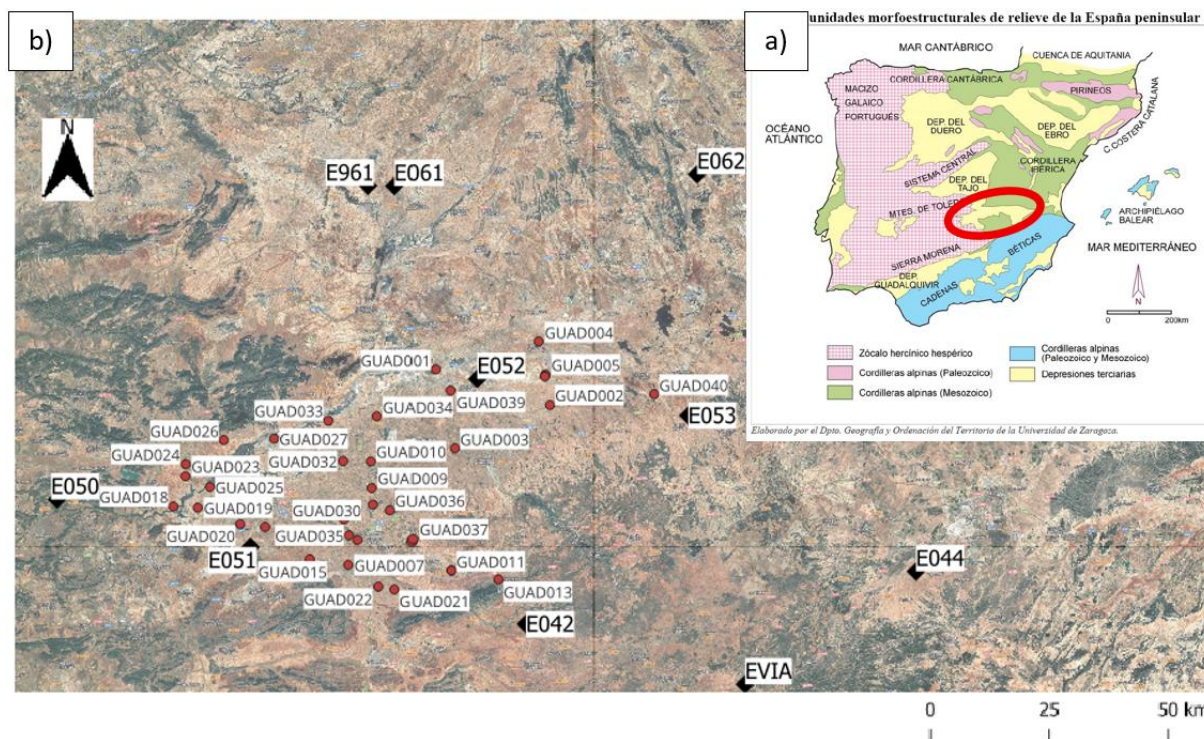


Figura 1 a) Mapa de España con los principales dominios geológicos. En un círculo rojo, la ubicación de la zona de estudio. b) Mapa en vista satélite de la zona de estudio. En rombos negros las ubicaciones de las estaciones pertenecientes al proyecto Topolberia. En círculos rojos se muestran las estaciones pertenecientes al proyecto GEO-TAG.

Desde el punto de vista geológico, la cuenca sedimentaria del Guadiana presenta relleno sedimentario de edades comprendidas entre el Mesozoico y el Cuaternario. Las rocas mesozoicas son mayoritariamente calizas y dolomías de origen marino; las formaciones terciarias incluyen conglomerados, areniscas y arcillas; mientras que los depósitos cuaternarios se componen principalmente de gravas, arenas y limos (IGME, 2019; Rodríguez Pascua et al., 2010) (Figura 2).

En cuanto a la tectónica de la Cuenca del Guadiana, destacan estructuras como las fallas del Sistema Central, la Falla de Badajoz-Córdoba y el cinturón de fallas de Mérida. No obstante, sólo las primeras afectan directamente a la zona de estudio (De Vicente et al., 2011; Silva et al., 2004).

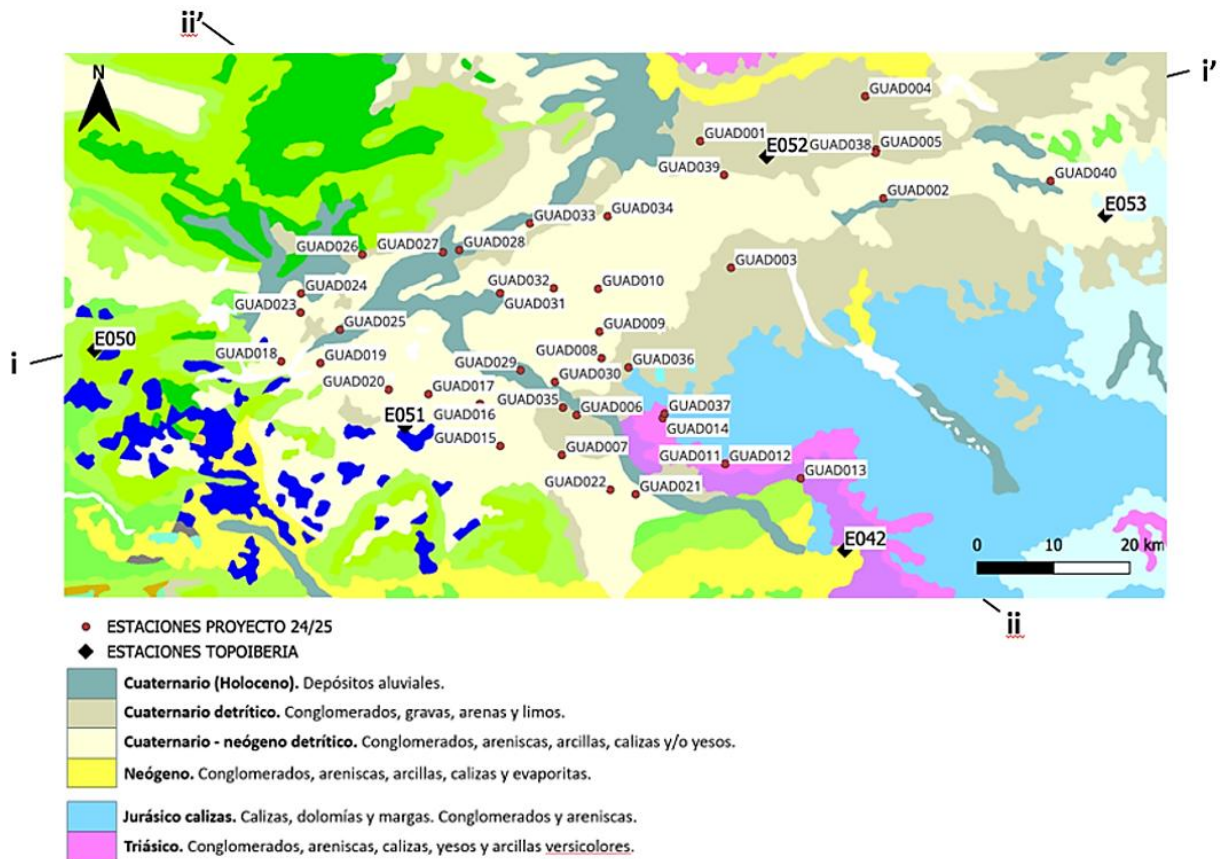


Figura 2. Mapa Geológico de la zona de estudio en el que se muestran las diversas litologías con su edad correspondiente, así como las estaciones del proyecto GEO-TAG y las estaciones pertenecientes al proyecto Topolberia. Las marcas i, i', ii e ii' son dos cortes realizados, los cuales se mostrarán en el apartado de discusión.

Datos.

Se llevó a cabo una búsqueda de registros previos de información geofísica y geotécnica en la zona de estudio. En la región se identificó una red extensa de piezómetros y sondeos geotécnicos, los cuales se describen con mayor detalle más adelante. Sin embargo, no se encuentran datos de sondeos de hidrocarburos, ya que los más cercanos se ubican en la cuenca del Tajo. En cuanto a líneas sísmicas de hidrocarburos se observa que dos de ellas se encuentran cercanas al noreste de la zona, pero no hay ninguna en ella. Finalmente, solo se cuenta con tres estaciones de magnetotelúrica (MT). En cambio, sí se observa una red extensa de datos de gravimetría y presencia de Sondeos Eléctricos Verticales en la zona (Figura 3).

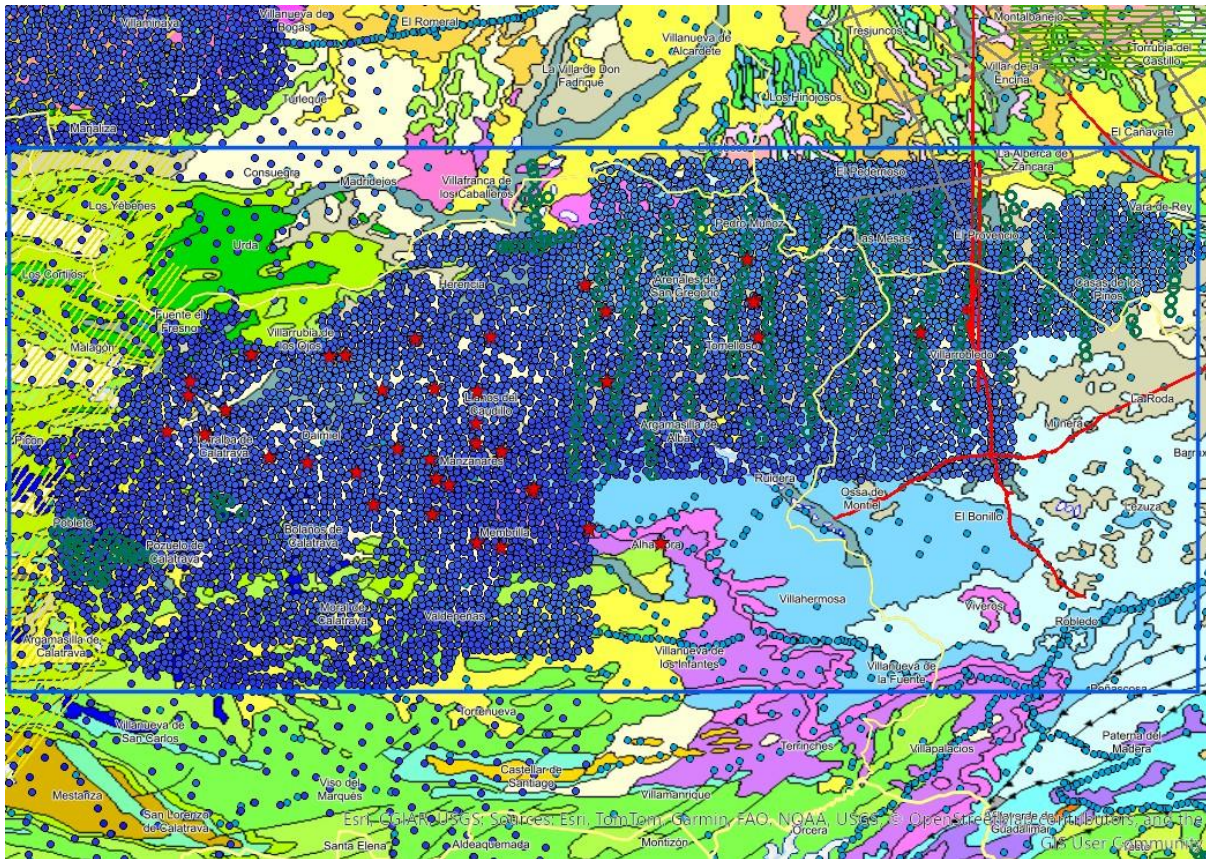


Figura 3. Mapa de la zona de estudio con datos geofísicos previos procedentes de SIFEOF. Los puntos azules representan medidas gravimétricas. Las estrellas rojas representan las estaciones pertenecientes al proyecto GEO-TAG. Los círculos verdes representan Sondeos Eléctricos Verticales. Las líneas amarillas representan Líneas de Vuelos (radiometría y/o magnetometría). Las líneas rojas y grises representan líneas sísmicas, siendo las grises con sección sísmica TIF y las rojas sin dicha sección sísmica TIF. Finalmente, los puntos rojos con cruz representan Testificación – LAS. De fondo está el Mapa World Topographic Map de ESRI y el servicio WMS de Unidades administrativas del España del IGN. Y este es el mismo solo que tiene de fondo el geológico 1:1.000.000 y el servicio WMS de Unidades administrativas del España del IGN. Imagen facilitada por Juliana Martín León. Departamento de Geología y Subsuelo. Grupo de Geofísica y Geología del Subsuelo (GEOFSUB). IGME – CSIC.

Por lo tanto, se concluye que previamente a este proyecto no se habían recopilado datos de forma homogénea y uniformemente distribuida en la Cuenca de Guadiana a excepción de datos gravimétricos (Figura 4).

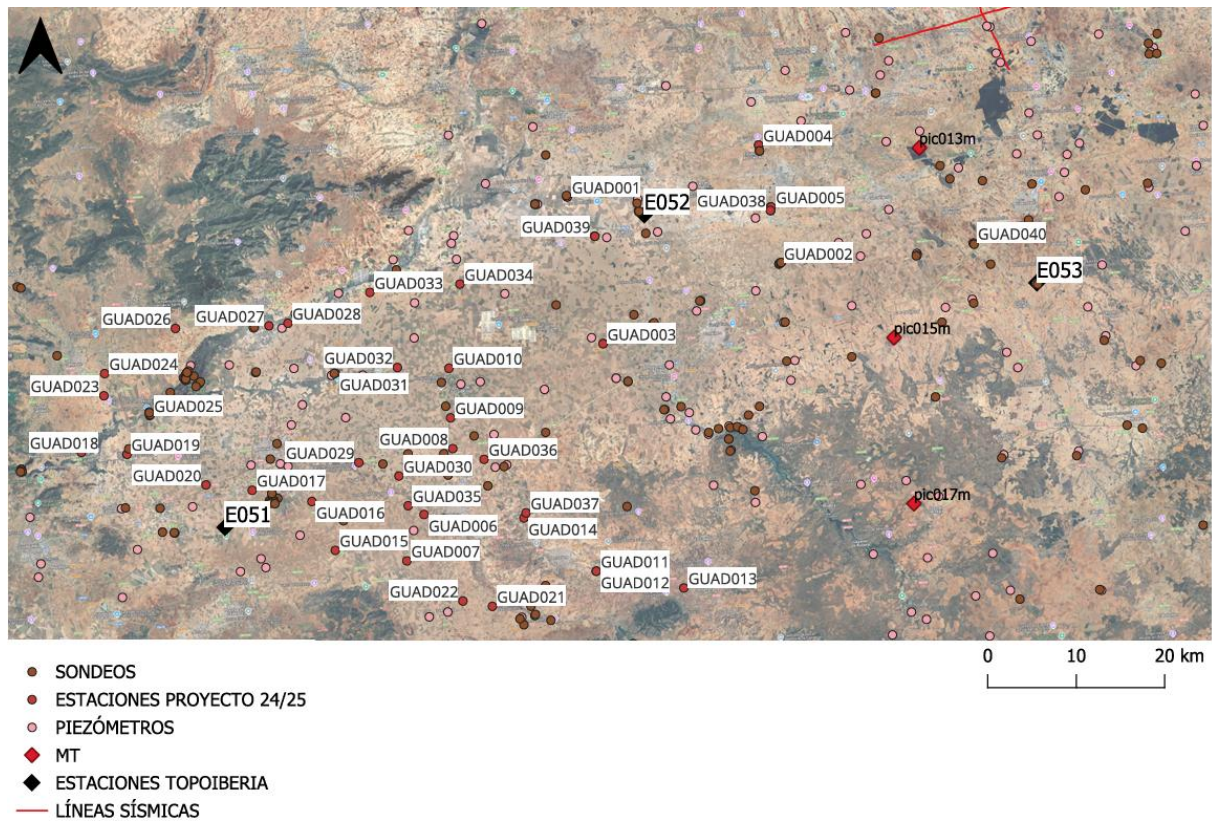


Figura 4. Imagen de la zona de estudio en la que se representan los datos que se han adquirido en el proyecto GEO-TAG (Proyecto 24/25) en el que se está trabajando, los datos de las estaciones de Topolberia utilizados en el presente trabajo y otros estudios geotécnicos realizados. Se observa la ausencia de datos geofísicos como pueden ser líneas sísmicas.

En este trabajo se analizan los datos de ruido sísmico registrados en el marco del proyecto GEO-TAG (Potencial GEOTérmico del Territorio del Alto Guadiana) obtenidos por las vibraciones naturales del terreno (causados por diversos factores como viento, lluvia...), así como aquellos causados por movimientos antrópicos (provenientes del tráfico, vías ferroviarias, actividad humana...). Para ello, se han utilizado los registros de 40 estaciones pertenecientes a dicho proyecto, así como los datos de 3 estaciones adicionales del proyecto Topolberia (Topo-Iberia, 2006). Todas las estaciones consideradas se encuentran emplazadas sobre el Neógeno-Cuaternario.

Las estaciones sísmicas utilizadas en el proyecto GEO-TAG consisten en un sismómetro de tres componentes 20s Trillium Compact Horizon y un digitalizador Pegasus (Nanometrics). Los datos de las estaciones han sido obtenidos entre los días 17 de diciembre del 2024 al 30 de enero del 2025, teniendo una longitud de registro entre tres y cuatro horas y una frecuencia de muestreo de 200 Hz. Además, en el parte de campo se ha anotado las posibles interferencias que podrían haber afectado a la señal, como el paso de vehículos, vías de tren o helicópteros.

Los datos de las estaciones sísmicas de Iberarray (componente sísmica del proyecto Topolberia) se registraron con una frecuencia de muestreo de 100Hz. Los sismómetros en este caso son de banda ancha con periodo de 120s.

Los datos de sondeos geotécnicos y piezómetros han sido utilizados para poder contrastar la información con las medidas obtenidas (Figura 5). Dichos sondeos han sido seleccionados de acuerdo a los siguientes criterios. En primer lugar, se han descartado aquellos que no contuviesen materiales anteriores al terciario y, en segundo lugar, se han descartado aquellos que estuviesen a más distancia de 1km de cualquier estación. Finalmente, una vez visto los sondeos y piezómetros de utilidad, se han descartado aquellos que no tuviesen columna o que cuya columna no tuviese las medidas de profundidad, quedando de esta forma un volumen mucho menor de datos.

Por tanto, se emplean un total de siete sondeos y piezómetros. Estos sondeos y piezómetros se utilizan para validar los resultados de la sísmica pasiva de este proyecto.

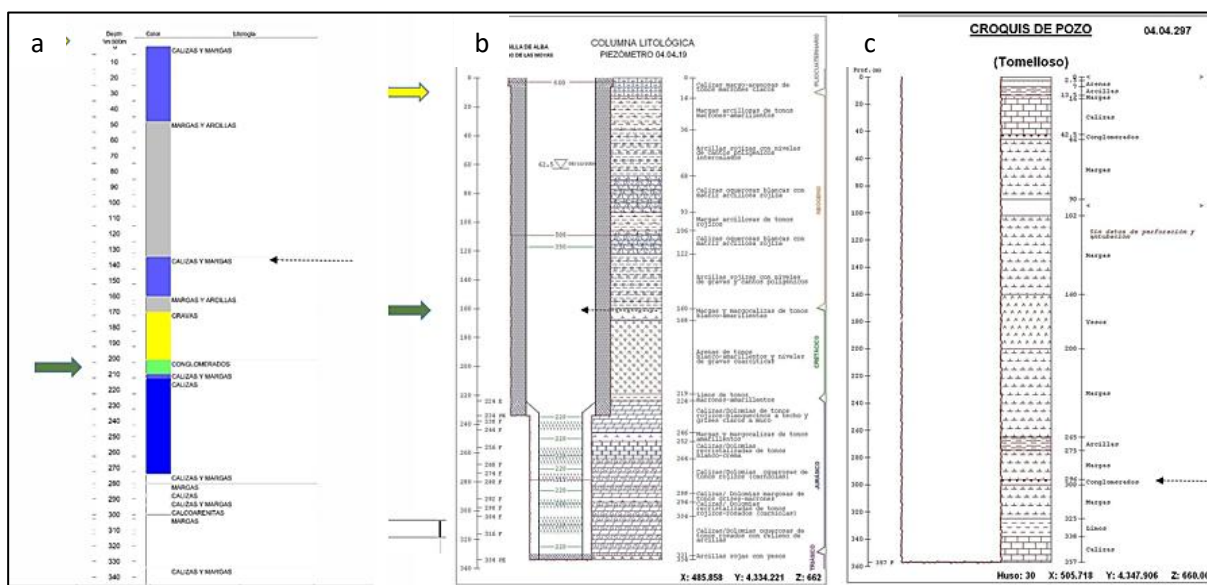


Figura 5. Se muestran tres de los sondeos empleados en el estudio. El sondeo (a) se encuentra cercano a la estación GUAD002, el sondeo (b) se encuentra cercano a la estación GUAD003, y el sondeo (c) se encuentra cercano a la estación GAUD038. Se observa una estructura similar en los tres sondeos la cual consiste en la presencia o ausencia de capa Cuaternaria, seguida de Neógeno, a continuación, Cretácico y, finalmente, las calizas del Jurásico.

Gracias a estos sondeos se ha podido esclarecer la composición y edad de las litologías encontradas en la zona de estudio, siendo:

- Cuaternario: Arenas, yesos y margas.
- Pliocuaternario: Calizas margoarenosas.
- Neógeno: alternancia de calizas oquerosas con margas arcillosas, arcillas de tono rojizo.
- Cretácico: Arenas gruesas, limos y margas.

- Jurásico: Calizas masivas.

Metodología.

Tras la recopilación de datos de ruido sísmico se procede a su análisis y procesado de los registros obtenidos para las 43 estaciones, obteniendo de esta forma las curvas H/V experimentales.

El ruido sísmico se define como la vibración ambiental de la superficie terrestre, generada por la combinación de microseísmos naturales de baja frecuencia ($< \sim 1$ Hz) y microtemores antropogénicos de mayor frecuencia ($> \sim 1$ Hz) (Bonney-Claudet et al., 2006; Mucciarelli & Gallipoli, 2004). Está compuesto por una mezcla compleja de ondas, tanto superficiales como volumétricas, aunque predominan las ondas superficiales, como las Rayleigh y Love.

En particular, el método de la razón espectral horizontal/vertical (H/V), descrito por Molnar (2020), permite estimar la frecuencia fundamental del sitio a partir de registros de ruido sísmico sin necesidad de una fuente activa. Este método se basa en la observación empírica de picos en la relación espectral H/V, los cuales están asociados con contrastes de impedancia entre capas. Si bien las ondas Rayleigh suelen presentar una relación señal/ruido favorable debido a su mayor energía relativa, su uso no debe interpretarse como exclusivo, ya que el ruido sísmico incluye múltiples tipos de ondas que pueden influir en la medición y en la interpretación de los resultados.

Las ondas que componen el ruido sísmico se propagan en todas direcciones debido a la dispersión que generan las irregularidades del terreno, como capas inclinadas, fracturas o cambios en las propiedades del suelo. Esta propagación aleatoria tiende a estabilizarse con el tiempo, alcanzando un estado de equilibrio conocido como campo difuso. En este estado, el ruido contiene una mezcla de distintos tipos de ondas elásticas (como ondas P, S y superficiales), lo que permite estudiar las propiedades del subsuelo de manera indirecta. Esta característica facilita la conexión entre los campos difusos y la función de Green, una herramienta matemática que describe cómo se propagan las ondas en un medio. Arai y Tokimatsu (2004) definen la relación de ruido H/V como:

$$\frac{H}{V}(\omega) = \sqrt{\frac{E1(x,\omega) + E2(x,\omega)}{E3(x,\omega)}} \quad [1]$$

Donde:

- E = Densidad de energía direccional.
- 1,2 (componentes horizontales), 3 (componente vertical).

Esta ecuación conecta las medidas promedio que se muestran a la izquierda con la parte imaginaria de la función de Green, la cual es una característica inherente del medio. Esto, a su vez, facilita la inversión

del cociente Nakamura H/V, teniendo en cuenta la aportación de las ondas superficiales y las ondas de cuerpo.

Los efectos del sitio en caso de terremoto se cuantifican comúnmente en términos de la función de transferencia de ondas de cizalla polarizadas horizontalmente que se propagan verticalmente (onda SH). Para el caso simple de una capa sedimentaria viscoelástica uniforme de espesor h , con velocidad de ondas de cizalla V_s , sobre un basamento viscoelástico, las frecuencias de resonancia (f_n) de la función de transferencia de la onda SH ocurren en las frecuencias (Bard & Bouchon, 1985; Kramer, 1996):

$$f_n = (2n + 1) \frac{V_s}{4h}, (n = 0, 1, 2, \dots) [2]$$

f_n : frecuencias de resonancia ($n = 1, 2, 3, \dots$),

V_s : velocidad de propagación de la onda de cizalla en la capa sedimentaria,

h : espesor de la capa.

La retención de ondas superficiales entre capas causa resonancia en una estratigrafía de capas planas con varios niveles de contraste de impedancia (por ejemplo, capas fracturadas de roca madre o sedimentos blandos). Como se muestra en la Ecuación [3], las frecuencias de resonancia fundamental de sitio (f_{ri}) del nivel superior corresponde a la relación entre su velocidad promedio de onda de corte (V_s) y su espesor (h) (Ömey & Babak, 2024):

$$f_{ri} = \frac{V_s}{4h} [3]$$

f_{ri} : frecuencias de resonancia fundamental del sitio. La i indica el modo de resonancia, es decir, el número de modo.

V_s : velocidad de onda de cizalla en la capa sedimentaria,

h : espesor de la capa.

Los picos obtenidos en unas determinadas frecuencias tras el procesado H/V se relacionan con contrastes de impedancias significativas. Posteriormente se requiere una modelización de estas mediante la resolución del problema directo para de esta forma obtener una mejor información del subsuelo. Se obtienen unas curvas H/V sintéticas que al ser comparadas con las experimentales permitirían explicar la morfología de estas.

En la Figura 6 se muestran los pasos realizados a lo largo del TFM.

ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO A REALIZAR.

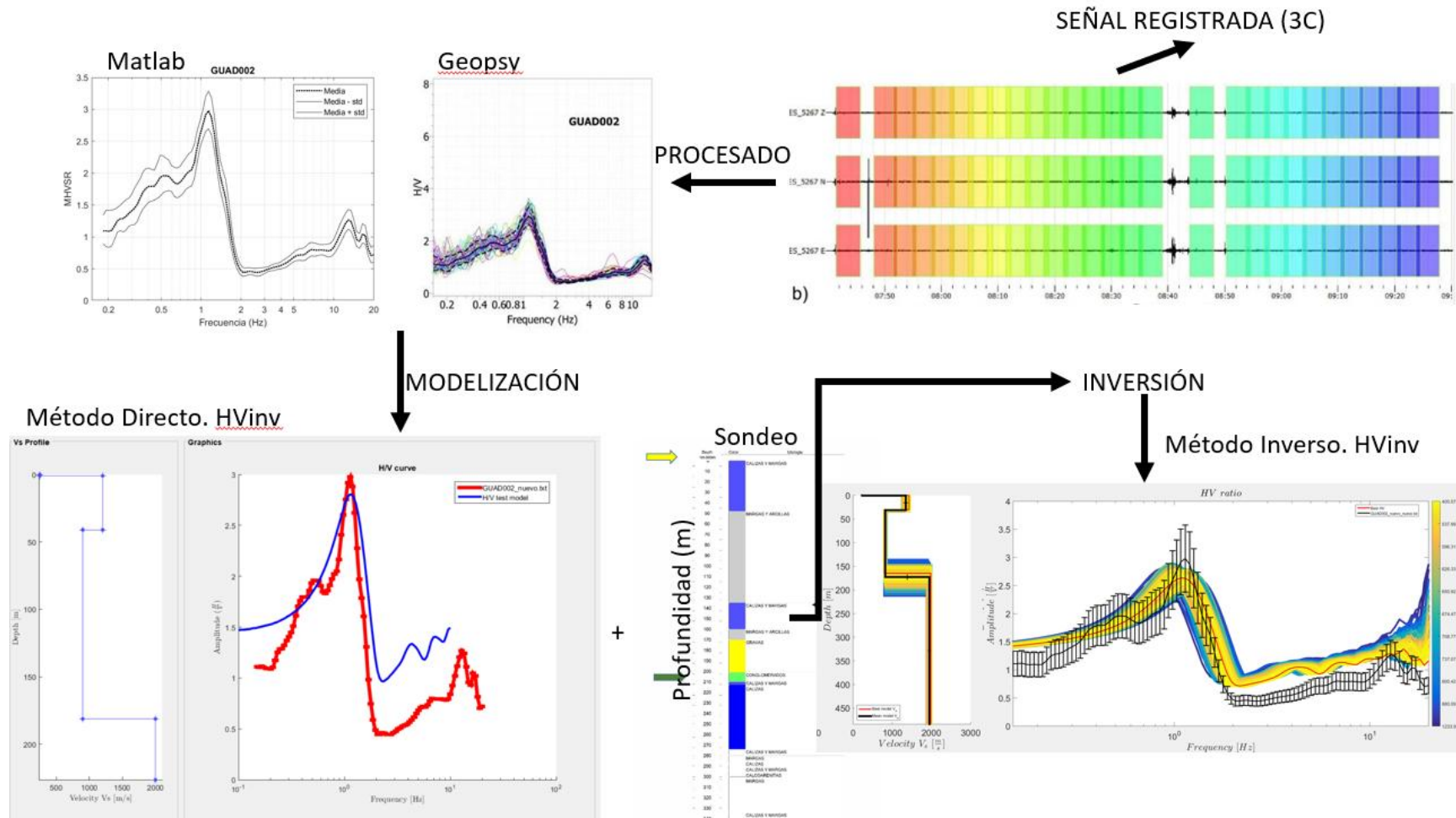


Figura 6. Esquema general del procedimiento realizado a lo largo del TFM, comenzando por el procesamiento de los datos sísmicos y su posterior modelización e inversión.

Procesado.

Se utiliza el software libre “Geopsy” para el cálculo de las curvas H/V experimentales (<https://www.geopsy.org>; Wathelet et al., 2020), el cual funciona en Windows.

Para el procesamiento de las curvas H/V experimentales se importan los archivos en formato miniseed extraídos de las estaciones sísmicas emplazadas en la zona de estudio de longitud finita (Figura 7). Se seleccionan ventanas temporales de 250s y frecuencias de muestreo de 0.15 Hz a 20 Hz, y se usa un suavizado taper de tipo Konno & Ohmachi con una constante de 40. Se eliminan aquellas ventanas temporales que muestran transitorios, anomalías espectrales o niveles de ruido no estacionarios. Se obtiene una curva H/V promedio y su desviación estándar de todas las ventanas analizadas a lo largo del registro. Finalmente se desarrolla en Matlab un código en el que se importa y representan los archivos obtenidos de la media y la desviación estándar.

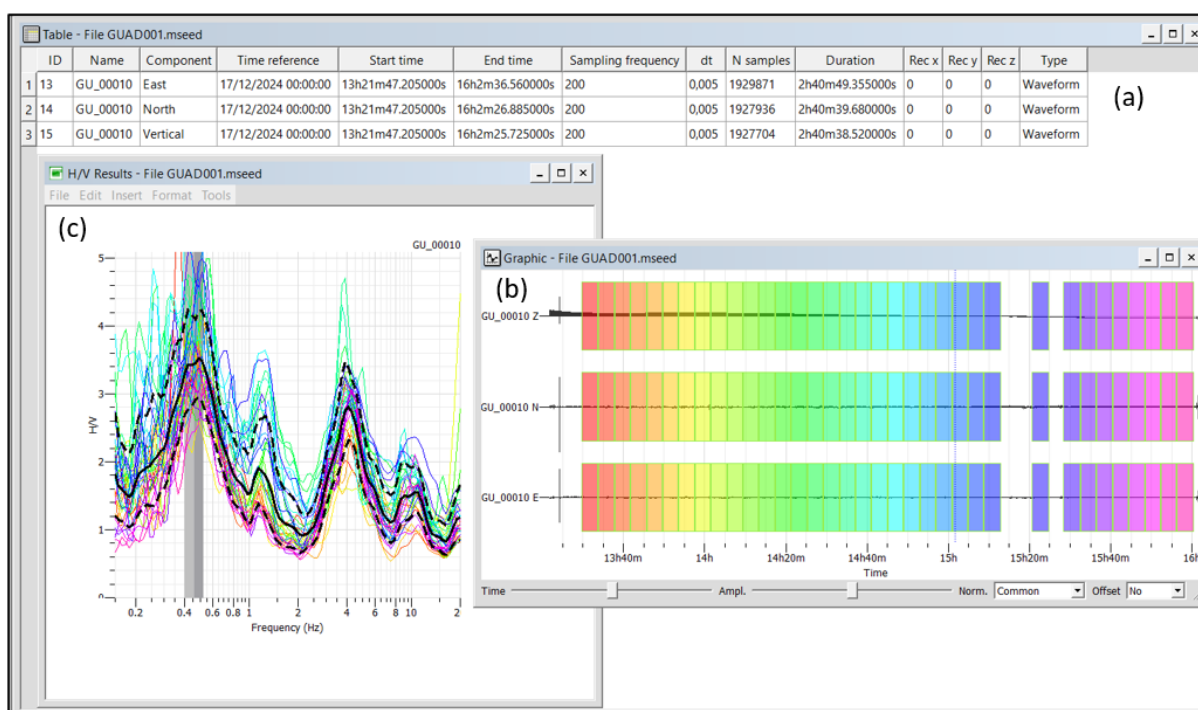


Figura 7. a) Tabla de registro en el que se muestran las tres componentes del sensor sísmico, el tiempo de registro y la frecuencia de muestreo. b) Selección de ventanas temporales. c) Curvas H/V experimentales (en colores, las correspondientes a las diversas ventanas temporales; en un trazo negro continuo la curva promedio de todo el registro; y en trazos negros discontinuos las curvas correspondientes a la desviación estándar).

El suavizado Tapper de tipo Konno & Ohmachi es una técnica utilizada en geofísica para suavizar espectros de amplitud en el dominio de la frecuencia, especialmente en estudios de microtemores y análisis H/V (horizontal/vertical). Este método aplica una función de ventana logarítmicamente simétrica que conserva la forma de los picos espectrales, evitando distorsiones (Konno & Ohmachi, 1998).

Modelización.

Una vez calculadas las curvas experimentales para las 43 estaciones sísmicas, se ha procedido al uso del programa HVinv para realizar la modelización de las mismas. (<https://w3.ual.es/GruposInv/HVInv/>; García-Jerez et al., 2016).

Nos centraremos en el problema directo utilizando las estaciones cercanas a los sondeos, lo que nos permite tener un mayor control sobre la profundidad de los distintos contactos geológicos. Gracias a ello, se han podido establecer con mayor precisión los contactos entre diferentes litologías y los rangos de profundidad a los que se encuentran.

Se importaron los datos de las curvas H/V obtenidas en el procesado, y se incluyó la información de velocidades V_s y V_p , densidad y coeficiente de Poisson iniciales. Se fijaron las profundidades de los distintos contactos geológicos (obtenidas de los sondeos) y se procedió a ajustar las velocidades, principalmente V_s , hasta lograr una buena correspondencia entre la curva teórica y la curva experimental de la relación H/V (Figura 8). Este procedimiento, de ensayo y error, se aplicó en todas las estaciones ubicadas cerca de los sondeos (un total de diez), lo que permitió obtener perfiles iniciales de velocidad de ondas S más realistas, que servirán como modelos de partida para una inversión más robusta.

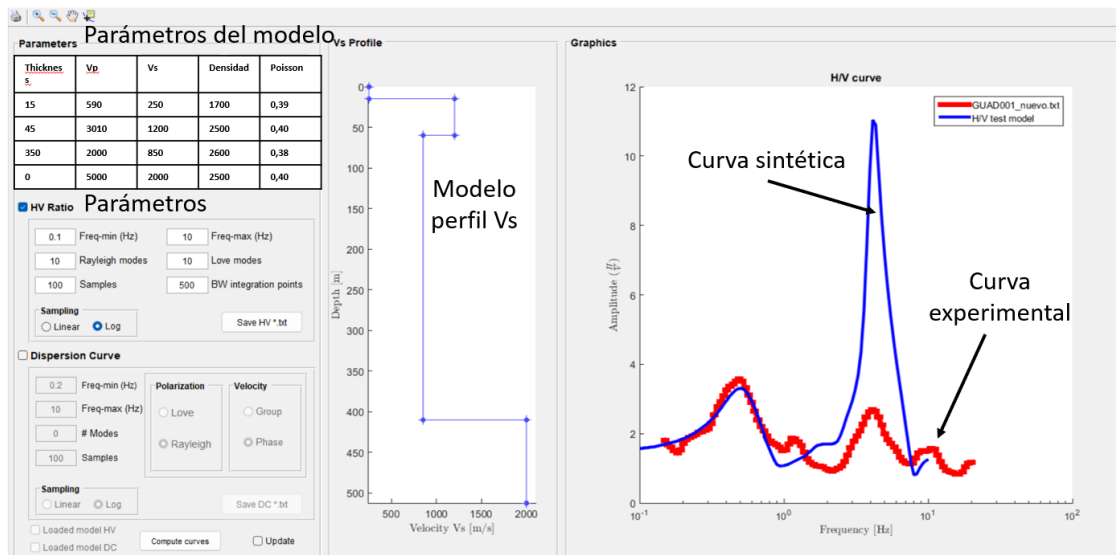


Figura 8. Ejemplo del programa HVinv con la opción de modelización mediante el método directo (estación GUAD001).

Para resolver el problema directo, HVinv utiliza un algoritmo basado en la teoría del cociente de elipticidad de las ondas Rayleigh, en el contexto de un medio 1D estratificado. A partir de un modelo definido por capas horizontales (con valores asignados de V_p , V_s , densidad y espesor), el programa calcula la curva H/V teórica mediante la respuesta del suelo a ondas superficiales, suponiendo un campo de ondas difuso. Esta curva sintética se obtiene resolviendo la función de elipticidad de las

ondas Rayleigh y representa la estimación teórica del cociente espectral H/V para ese modelo (Sánchez-Sesma et al., 2011; Konno & Ohmachi, 1998).

Inversión.

Finalmente se realiza el método inverso utilizando en primer lugar aquellas estaciones que tenían sondeo en sus proximidades y cuyas curvas experimentales habían sido modelizadas para verificar, y posteriormente para aquellas estaciones en las que no tiene datos de sondeos en sus proximidades.

Para llevar a cabo la inversión de los datos H/V se utilizó el programa HVInv, que permite ajustar un modelo 1D de velocidades sísmicas a partir de la curva espectral observada. A partir de este ajuste, es posible estimar los espesores y las propiedades físicas de las distintas capas del subsuelo, deduciendo las litologías que estarían asociadas a los cambios observados en la respuesta sísmica.

Es necesario definir rangos de valores para los parámetros V_p , V_s , densidad y espesores de las capas (Tablas 1 y 2). Estos rangos se establecieron a partir de los resultados obtenidos en la modelización directa realizada en las estaciones cercanas a los sondeos, donde se cuenta con un mayor control sobre las propiedades del subsuelo. De este modo, la inversión se basa en modelos realistas y coherentes con la información geológica y geofísica disponible, permitiendo una mejor convergencia hacia soluciones que reproduzcan adecuadamente la curva H/V observada.

Tabla 1. Rango de valores seleccionado para curvas H/V que tienen dos capas sobre medio infinito.

Thickness min [m]	Thickness max [m]	V_p min [m/s]	V_p max [m/s]	V_s min [m/s]	V_s max [m/s]	Density min [kg/m ³]	Density max [kg/m ³]	Poisson min	Poisson max
10	35	2800	3500	1143	1959	2000	3000	0.2	0.4
100	300	1500	2300	750	950	2000	3000	0.2	0.4
0	0	2700	5000	1700	2500	2000	3000	0.2	0.4

Tabla 2. Rango de valores seleccionado para curvas H/V que tienen tres capas sobre medio infinito.

Thickness min [m]	Thickness max [m]	V_p min [m/s]	V_p max [m/s]	V_s min [m/s]	V_s max [m/s]	Density min [kg/m ³]	Density max [kg/m ³]	Poisson min	Poisson max
5	20	500	620	200	300	1500	2000	0.2	0.4
40	50	2800	3200	1000	1500	2000	3000	0.2	0.4
320	380	1700	2300	750	950	2100	3100	0.2	0.4

0	0	2700	5000	1700	2300	2000	3000	0.2	0.4
---	---	------	------	------	------	------	------	-----	-----

Se han realizado dos tipos de inversión: una con tres capas sobre medio infinito y otra con dos capas sobre medio infinito, según la respuesta sísmica observada. En zonas donde solo se identifica una frecuencia natural, se ha considerado que la capa cuaternaria es despreciable por su escaso espesor (menor a un metro), simplificando así el modelo.

El programa HVInv realiza la inversión de la curva H/V mediante un enfoque de optimización basado en algoritmos genéticos, lo que le permite explorar de forma eficiente el espacio de soluciones posibles (García-Jerez et al., 2016). El programa se fundamenta en la teoría de la respuesta del suelo a ondas superficiales, asumiendo un modelo 1D compuesto por capas horizontales con propiedades físicas homogéneas. A partir de una población inicial de modelos, el algoritmo selecciona y combina aquellos que mejor reproducen la curva H/V observada, evaluando la discrepancia mediante una función de error definida entre los espectros teóricos y experimentales. Este procedimiento permite obtener un modelo de velocidad de ondas S (V_s) que se ajusta a los datos registrados, incorporando también parámetros como la densidad, la velocidad de ondas P (V_p) y el espesor de cada capa.

Para realizar una inversión es necesario contar con un algoritmo que genere curvas sintéticas a partir de un modelo inicial y que, posteriormente, ajuste ese modelo para lograr una buena correspondencia con la curva H/V experimental. En este caso, el método utilizado es el algoritmo de Monte Carlo, que permite explorar múltiples combinaciones de parámetros dentro de los rangos definidos. Los parámetros de entrada —como V_p , V_s , densidad y espesores— no forman parte del algoritmo en sí, sino que son los valores sobre los que se realiza la búsqueda para encontrar el modelo que mejor se ajusta a los datos observados. Se emplea pues una desviación estándar proporcional del 15% y permitiendo zonas de baja velocidad en V_s .

Se muestra un ejemplo del espacio de parámetros obtenido (Figura 9). Esto analiza individualmente cómo ciertos parámetros del modelo se relacionan con su desajuste. Cada panel muestra uno de estos parámetros. Este enfoque permite identificar qué propiedades del modelo están bien o mal restringidas.

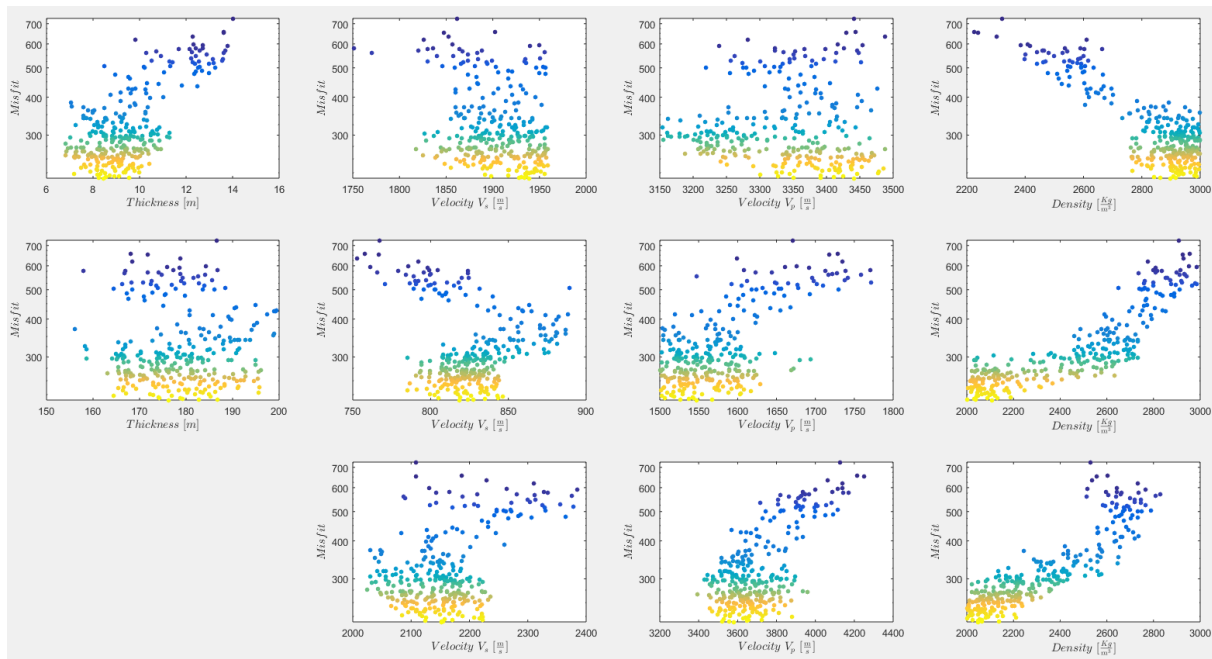


Figura 9. Se muestra el 'parameter space' de cada uno de los parámetros para los modelos estudiados, llegando de esta forma a aquellos que más se ajustan (de azul a amarillo).

Durante la inversión, el cálculo de la curva H/V sintética se repite iterativamente para cada uno de los modelos generados por el algoritmo de optimización. Para cada modelo, se calcula la curva teórica basada en las propiedades físicas asignadas (V_p , V_s , densidad y espesores) del medio estratificado, y esta curva sintética se compara con la curva H/V observada. La discrepancia entre ambas se evalúa mediante una función de error logarítmica, que mide el ajuste entre los espectros teóricos y experimentales. Este proceso permite seleccionar y evolucionar modelos que mejor reproducen los datos observados, garantizando una búsqueda eficiente y coherente del perfil de velocidades que representa el comportamiento dinámico real del terreno (García-Jerez et al., 2016; SESAME Project, 2004).

El método de Monte Carlo es una técnica basada en simulaciones aleatorias que se utiliza para estudiar el comportamiento de sistemas complejos. Consiste en realizar múltiples experimentos simulados utilizando valores generados al azar para explorar diferentes escenarios posibles (Metropolis & Ulam, 1949). Esta metodología es útil cuando se trabaja con situaciones inciertas o con muchas variables, ya que permite obtener estimaciones generales sobre el comportamiento del sistema (Kroese et al., 2014). Su principal ventaja es la flexibilidad para aplicarse en diversos contextos, aunque requiere una gran cantidad de simulaciones, lo que puede traducirse en un alto costo computacional (Rubinstein & Kroese, 2016).

La Figura 10 muestra y describe la ventana de modelado del software HVInv.

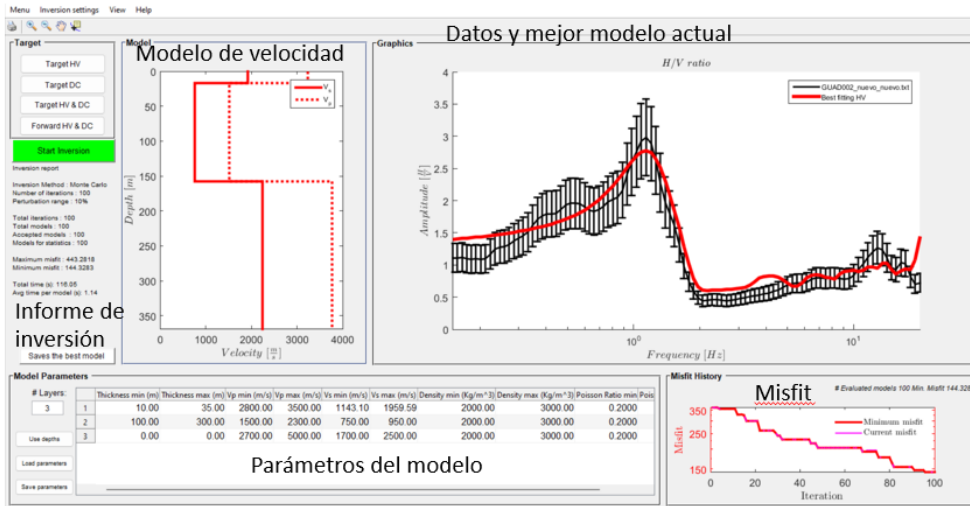


Figura 10. Programa HVinv con la opción de modelado mediante el método inverso (Estación GUAD002).

Se han descartado aquellas estaciones en las cuales las curvas de los datos estaban mal determinadas, ya puede ser por un fallo en el procesamiento de datos o por un fallo en la adquisición de estos.

Resultados.

Se muestran a continuación los resultados obtenidos a partir de las técnicas mencionadas anteriormente.

Resultados del Procesado.

En la Figura 11 se muestran los resultados más representativos obtenidos del software “Geopsy”.

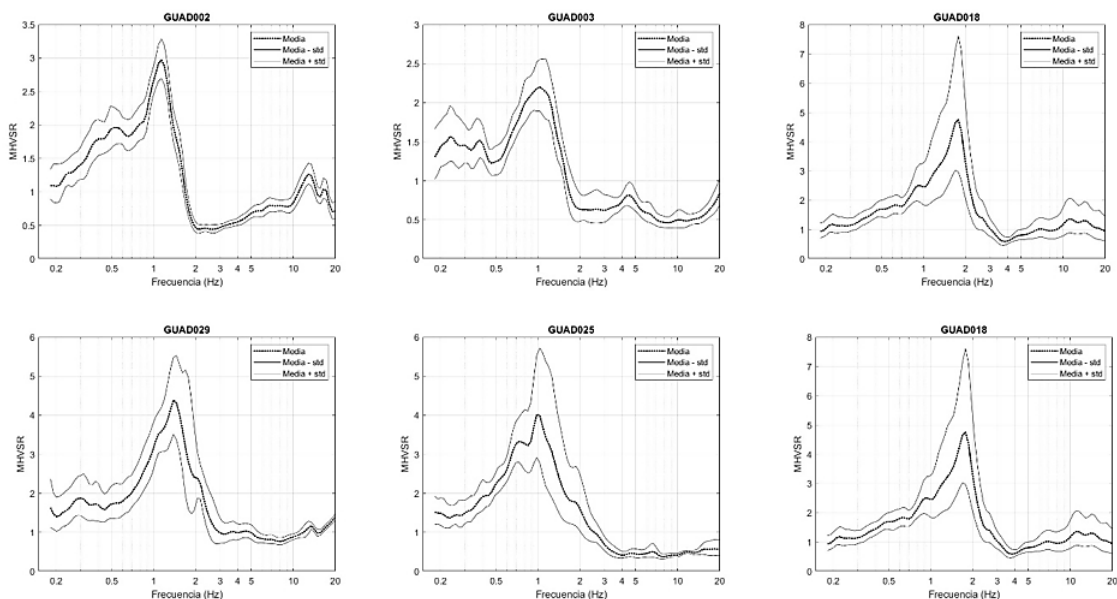


Figura 11. Resultados más representativos obtenidos de las curvas experimentales H/V promedio (línea negra continua) en conjunto con su desviación estándar (línea negra discontinua) tras el procesamiento de los datos con el programa ‘Geopsy’ y la realización de las gráficas mediante Matlab.

Se observa que la frecuencia fundamental oscila entre 1 y 2Hz para la capa de contraste de impedancias de mayor profundidad, mientras que para el contraste entre las capas de menor profundidad se localiza a frecuencias por encima de los 10 Hz.

Resultados de la Modelización.

En este apartado se muestran los resultados más representativos obtenidos tras la modelización mediante el programa HVinv (Figura 12).

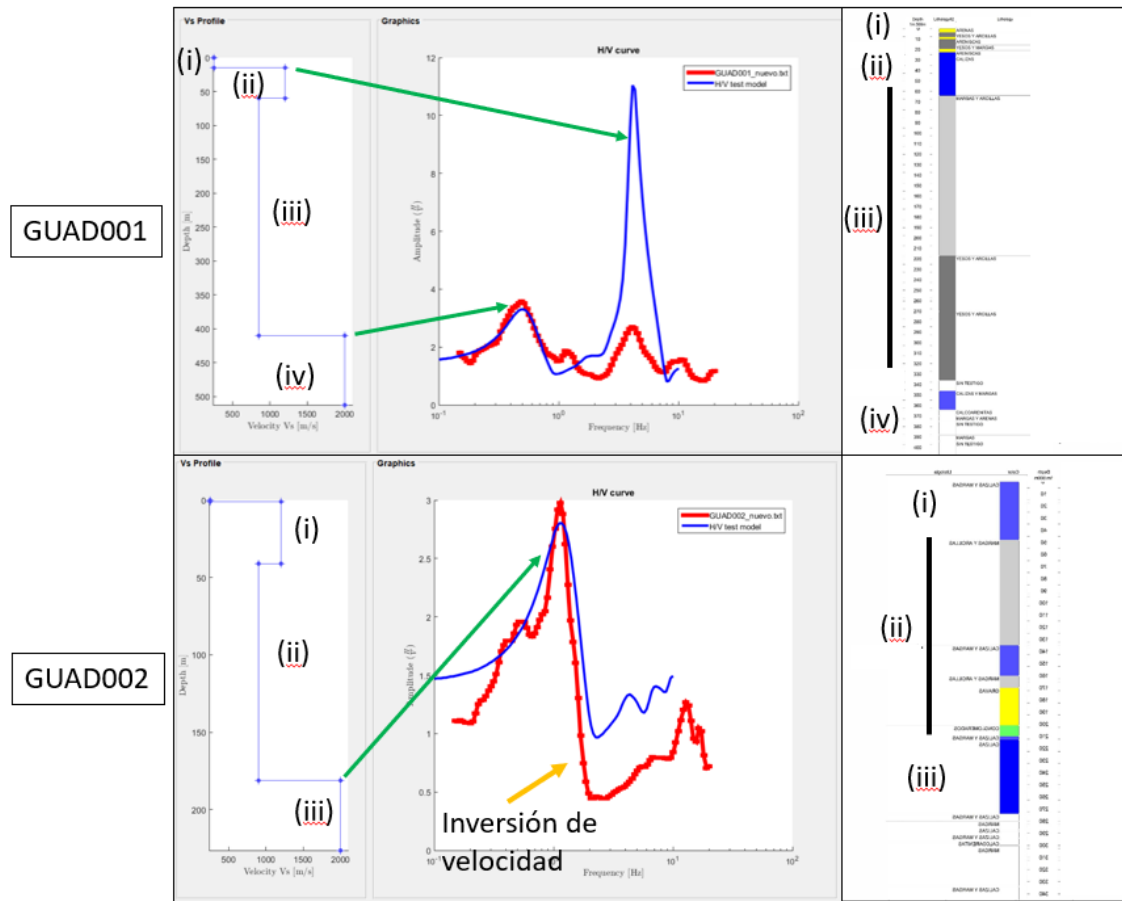


Figura 12. Curvas H/V resultantes de la modelización (azul) y las experimentales (rojo) realizadas con el software HVinv. A la izquierda se muestran las gráficas de profundidad (eje y) frente a velocidad de las ondas S (eje x) utilizadas en la modelización. A la derecha se muestran los sondeos cercanos a cada una de las estaciones. Se señala la relación entre las capas observadas en los sondeos con el perfil de Vs. También se señala con flechas verdes el cambio que está produciendo el pico en las frecuencias.

Los máximos registrados contienen una baja amplitud (entre 4 y 6). Además, en algunos registros contienen después del máximo una bajada. Cuando dicha bajada se produce por debajo de 1 implica inversión en la velocidad de las ondas, como por ejemplo una alternancia de calizas (alta velocidad) y arcillas (baja velocidad) observado en los modelos Vs de la Figura 12.

Resultados de la Inversión.

Se muestra a continuación los resultados de la inversión más relevantes (Figura 13).

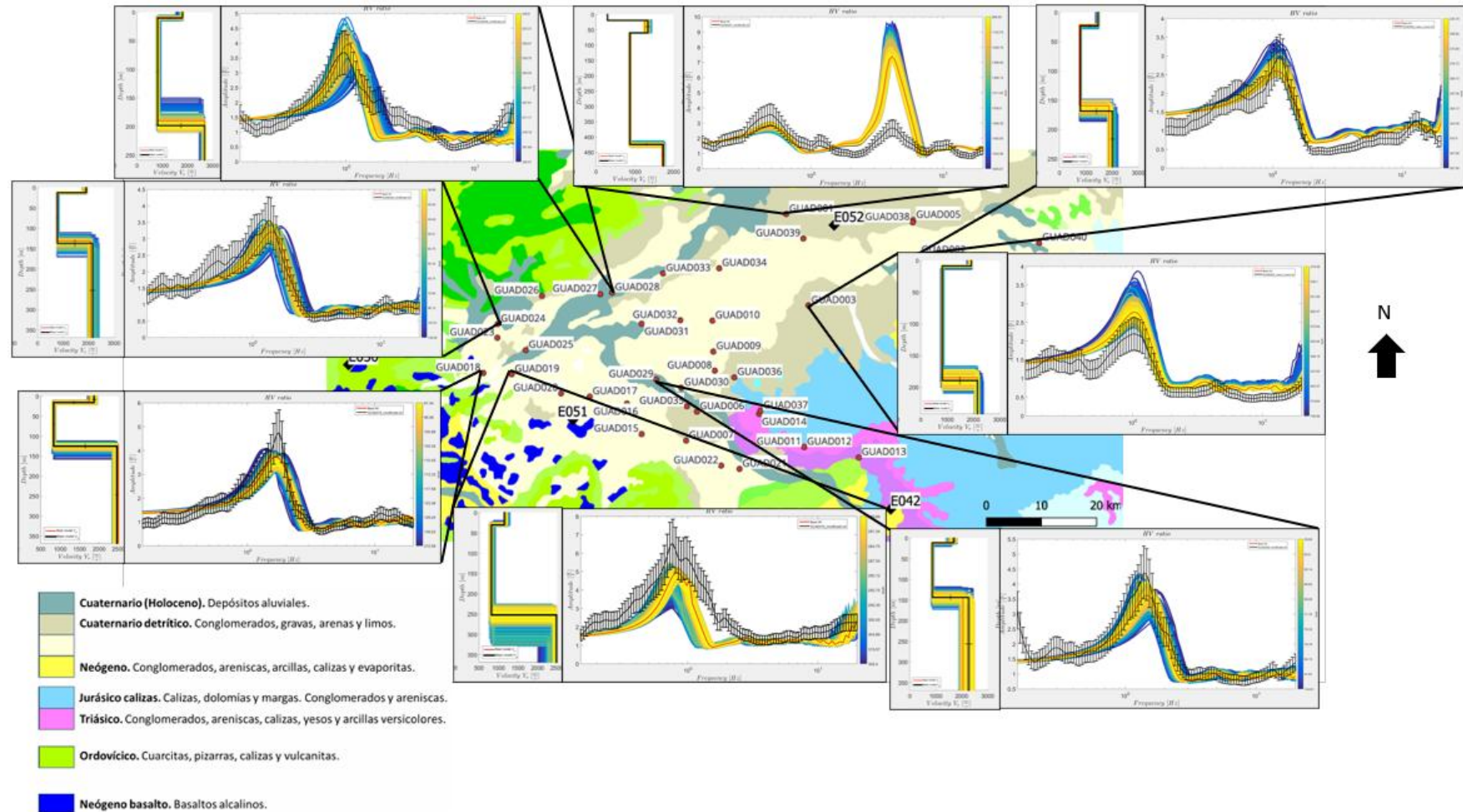


Figura 13. Ajuste de la inversión de las curvas experimentales H/V mediante el software HVinv de las estaciones más representativas sobre el mapa geológico. Se muestra la curva experimental con barras de error (negro) y curvas resultantes de las iteraciones en el proceso de iteración en color. La curva roja muestra el resultado de la inversión con menor error. El color del resto de curvas muestra el ajuste entre la curva experimental y la teórica para cada modelo utilizado por el algoritmo durante la inversión. Se muestra además las curvas de profundidad frente a velocidad de ondas S.

Discusión.

Mediante el uso del método H/V y el análisis de la Figura 11, se reconoce la presencia de uno o dos contrastes relevantes de impedancia en la zona analizada, reflejados en la aparición de dos picos bien definidos en diferentes rangos de frecuencia.

Durante la etapa de modelización e inversión de las curvas H/V, se verificó que los picos localizados por debajo de los 2 Hz se asociaban al contraste entre la capa iii y el semiespacio infinito en los modelos de tres capas sobre semiespacio infinito, y al contraste entre la capa ii y el semiespacio infinito en los modelos de dos capas sobre espacio infinito, en ambos casos a profundidades superiores a 400 metros. Por otro lado, los picos por encima de los 10 Hz correspondían al contraste entre las capas i y ii en los modelos de tres capas sobre medio infinito, con espesores inferiores a los 10 metros (Figura 12).

Según lo observado en los pozos analizados en la zona (Figura 5), el contraste más profundo podría vincularse con el techo del Jurásico inferior, mientras que el contraste más superficial correspondería al límite entre los depósitos Cuaternarios y Neógenos.

Analizando la Figura 13, en las curvas de velocidad de las ondas S (V_s) frente a profundidad observamos en los modelos de tres capas sobre semiespacio infinito velocidades inferiores para las capas i y iii y velocidades de V_s mayores en las capas ii y iv, ligados a la presencia de picos en las curvas HV, como por ejemplo en la estación GUAD001. En aquellos modelos de dos capas sobre espacio infinito se observa una menor velocidad de las ondas S en la capa ii y mayores velocidades en las capas i y iii, dando como resultado un cambio de impedancia significativo mostrándose como un único pico en las curvas H/V, como por ejemplo la estación GUAD028. La capa con mayor velocidad es la perteneciente al semiespacio infinito, es decir, el contraste del Cretácico con el Jurásico y la que corresponde al basamento sísmico. Las Tablas 1 y 2 muestran el intervalo de velocidades de ondas S en los que se encuentran los valores para cada una de las capas.

Se realizan dos mapas. En el primero se muestran los valores de las frecuencias bajas y en el segundo se muestra la profundidad del basamento sísmico (Figura 14).

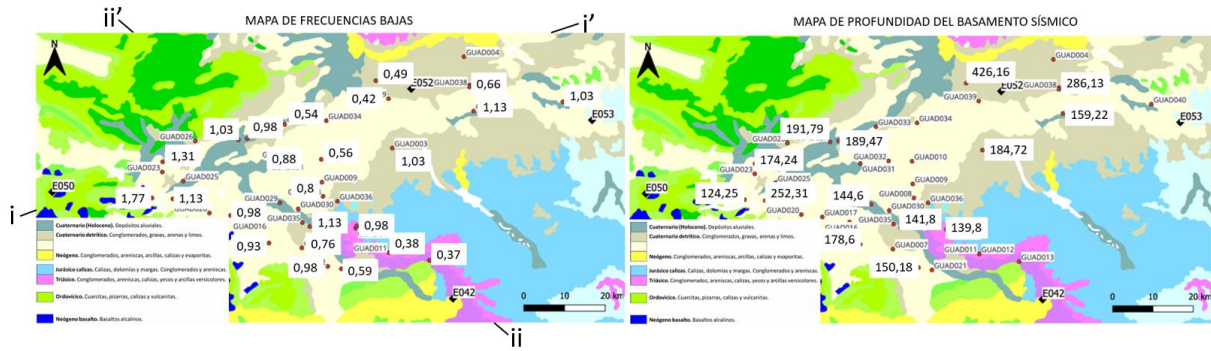


Figura 14. Mapas geológicos con las estaciones del proyecto GEO-TAG en el que se muestran las frecuencias bajas más significativas, pertenecientes a los cambios litológicos más profundos y someros respectivamente. Valores de frecuencias en Hz. Valores de profundidades en metros. Se muestra la localización de los cortes realizados.

Se observa que las estaciones ubicadas cerca de afloramientos triásicos y jurásicos presentan mayor variabilidad y heterogeneidad en los datos, lo cual se atribuye a la proximidad del basamento. Los picos de menor frecuencia se interpretan como reflejo del contacto con el techo del Jurásico, caracterizado por rocas como dolomías. En cuanto a los valores de frecuencia fundamental, los valores son mayores al sur y menores al norte. Se observa su relación con la profundidad del basamento sísmico ya que los valores de profundidad son más bajos al sur y más altos al norte, aunque sin gran variabilidad, encontrándose a una media de 150m.

En la Figura 15 se muestran dos cortes realizados en orientaciones perpendiculares en donde se muestra la variabilidad lateral de las diversas litologías con su profundidad obtenido a partir del análisis de las frecuencias de la inversión (La ubicación de los cortes se muestran en la Figura 14).

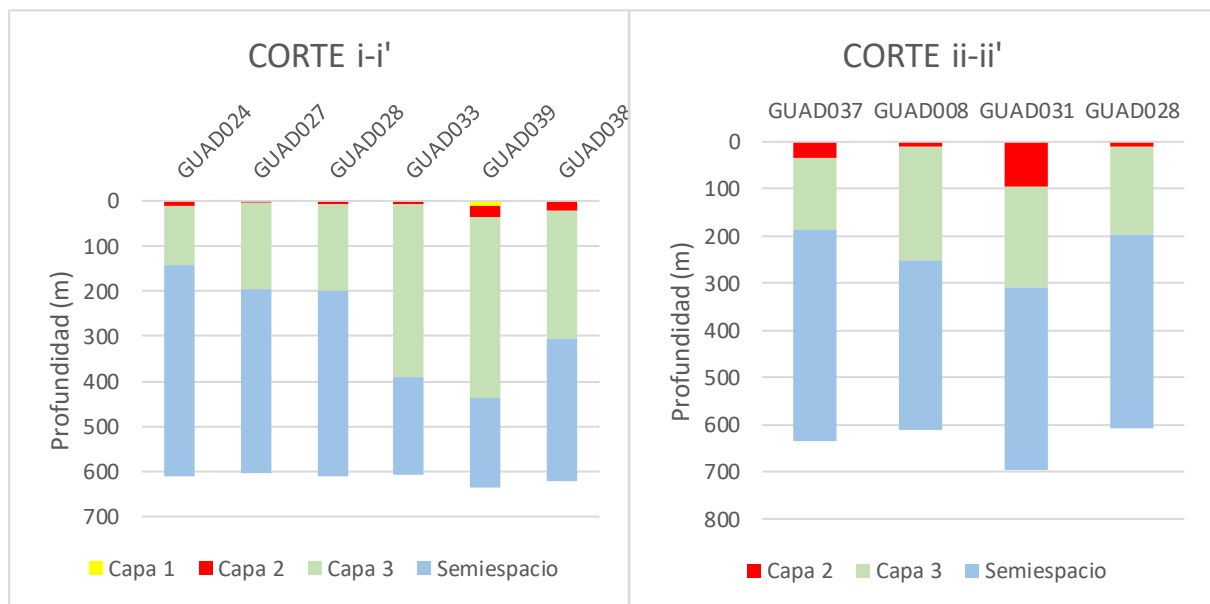


Figura 15. Esquema que muestra la variación de espesores de las capas de los modelos empleados para obtener las curvas H/V sintéticas a lo largo de dos cortes, uno con orientación W-E (a) y otro con orientación S-N (b). Ubicación de los cortes mostrado en la Figura 2.

No obstante, este trabajo se enfoca en la obtención de frecuencias de resonancia con el objetivo de estimar profundidades al basamento y construir un modelo de velocidades de onda de corte (V_s) de los sedimentos de la cuenca. Es importante aclarar que el basamento sísmico identificado no necesariamente corresponde al basamento geológico paleozoico, ya que como se ha observado, en este caso el basamento sísmico pertenece a las calizas del Jurásico, representado por secuencias de alta velocidad.

El modelo propuesto en este estudio está sujeto a diversas fuentes de incertidumbre, entre las que se incluyen las limitaciones inherentes al método H/V y al proceso de modelado. Además, al emplearse únicamente dos modelos de velocidades y densidades para todas las estaciones, pueden surgir ambigüedades en la interpretación de los contactos litológicos. A pesar de estas limitaciones, y en concordancia con la literatura revisada, se concluye que el método H/V, aunque posee una resolución limitada, es una herramienta valiosa para identificar contrastes someros significativos en el subsuelo, especialmente cuando se complementa con información geológica de pozos.

Conclusiones.

Como primera conclusión, puede afirmarse que el método empleado en este estudio —el cociente espectral H/V— permite detectar contrastes de impedancia en el subsuelo, mediante la identificación de picos a determinadas frecuencias denominadas frecuencia fundamental en las curvas espectrales. No obstante, la técnica de Nakamura o método H/V presenta ciertas limitaciones, entre ellas su baja resolución, escasa capacidad para alcanzar grandes profundidades y un nivel considerable de incertidumbre, principalmente relacionado con el debate sobre el origen de la energía del ruido sísmico ambiental y la interpretación de las amplitudes observadas en las curvas H/V. A pesar de ello, esta metodología requiere menos tiempo de adquisición de datos y un procesamiento computacional más liviano, lo que la hace operativamente eficiente.

En segundo lugar, cabe resaltar el valor del modelado de curvas H/V como herramienta para mejorar la comprensión de la estructura geológica del subsuelo, especialmente en cuencas donde el relleno sedimentario presenta un comportamiento predominantemente rígido por litologías como calizas, como en el caso expuesto en el presente trabajo.

En cuanto a los datos de sondeos, éstos transmiten mayor fiabilidad que los piezómetros, aunque ambos son de utilidad. Por ello todo estudio geofísico (uso de métodos indirectos) debe ir apoyado de información de campo, geológica y datos fiables como son los sondeos o piezómetros.

En resumen, según lo desarrollado en este trabajo, el uso del ruido sísmico ambiental constituye una herramienta útil para el estudio del subsuelo, siempre que se complemente con información geológica

y otros métodos indirectos que permita disminuir las incertidumbres y ambigüedades inherentes a los métodos de sísmica pasiva. Además, se trata de una alternativa eficiente y económica, ya que no requiere fuentes sísmicas activas (reduciendo así la huella de carbono), ni depende de eventos sísmicos naturales, sino que basta con registrar durante algunas horas o días el ruido sísmico ambiente mediante una estación sísmica.

Bibliografía.

Alonso – Gavilán, G. *et. al.* (1987). *Depósitos lacustres Terciarios de la Cuenca del Duero (España)*. STVDIA Geologica Salamantica. Suplemento n.º 1 (Volumen XXIV).

Ayala-Carcedo, F. J., & González Díaz, M. I., 1996. *Geología de España para ingenieros*.

Bard, P.-Y. (1999). Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? In *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion* (Vol. 3, pp. 1251–1279). Rotterdam: Balkema.

Boero, E. (2023). *Iluminando la estructura interna de Galápagos mediante Interferometría Sísmica*. Universidad Nacional de la Plata.

Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., & Bard, P.-Y. (2006). The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review. *Earth-Science Reviews*, 79(3-4), 205–227.

Borcherdt, R. D. (1994). Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthquake Spectra*, 10(4), 617–653.

Calvo, J. P., & Huerta, P. (2006). *La cuenca cenozoica de Madrid: Sedimentología, estratigrafía y análisis secuencial*. In J.A. Vera (Ed.), *Geología de España* (pp. 536-539). Sociedad Geológica de España - IGME.

CEN (2004). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Standardization.

De Vicente, G., et al., 2011. "The Madrid Basin: Structural evolution and seismicity."

Field, E. H., & Jacob, K. H. (1995). A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(4), 1127–1143.

Franco, P. (2013). *Teoría y aplicación de cocientes espectrales en exploración sísmica somera*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Gibbons, W., & Moreno, T. (Eds.) (2002). *The Geology of Spain*. Geological Society, London.

- Granda, A. et. al. (2005): *El método de la Sísmica Pasiva: Una herramienta fiable para la caracterización geotécnica del terreno en zonas urbanas*. International Geophysical Technology, S.L.
- IGME (Instituto Geológico y Minero de España). (2008). Mapa Geológico de España a escala 1:50.000, hoja 559 (Madrid). IGME.
- Lachet, C., & Bard, P. Y. (1994). Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique. *Journal of Physics of the Earth*, 42(5), 377–397.
- López-Bustins, J.A., & Martín, E. (2014). *Cuaternario de la Cuenca del Guadiana. Quaternary Geology of Iberia*, pp. 135-156.
- López, A. (2023). *Sísmica pasiva en estudios de almacenamiento geológico*. Universidad de Granada.
- Lütfü, Ö. & Karimi, B. (2023). *Application of the MHVSR method for determining the location of landslide areas before geotechnical project proposal: a case study of Tortum Lake, Turkey*.
- Martín-Serrano, A., & Rodríguez, R. (1998). *Sedimentary and tectonic evolution of the Guadiana Basin*. In Spanish Geological Journal, Vol. 24, pp. 147-160.
- Martínez Catalán, J. R., et al., 2007. "Variscan orogeny in the Iberian Massif: A review."
- Molnar, S. et. al. (2021). *A review of the microtremor horizontal – to – vertical spectral ratio (MHVSR) method*. J Seismol (2022) 26:653-685.
- Moreno, C.A. & Alonso G. (2013). *Identificación y caracterización de las unidades litosísmicas cenozoicas en el área de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia), sur de la Cuenca del Duero (España)*. Studia Geologica Salmanticensia, 49 (1): pp. 47 – 73.
- Mucciarelli, M., & Gallipoli, M. R. (2004). The HVSR technique from microtremor to strong motion: Empirical and statistical considerations. In 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, 30(1), 25–33.
- Pérez-Estaún, A., et al., 1991. *Geología de la Península Ibérica*.
- Querol Müller, R. (1996). *Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España*. IGME.

Quesada, C., (1990). *Evolution of the Ossa-Morena Zone (Iberian Massif, SW Spain)*. In: *Terranes in the Circum-Atlantic Paleozoic Orogens*. Geological Society of America Special Paper 230, pp. 267-283.

Quesada, C. & Oliveira, J.T. (Eds.). (2015). *The geology of Iberia: A geodynamic approach. Volume 4: Cenozoic basins*. Springer.

Riba, O. & Colombo, F. (1986). *The Evolution of Sedimentary Basins: Erosion, Tectonics and Sedimentation in the Iberian Peninsula*. Cambridge University Press.

Rodríguez-Pascua, M. A., Calvo, J. P., & Somoza, L. (2000). *Tectónica extensional y sedimentación sintectónica en la Cuenca de Madrid*. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13(2), 267-277.

Rodríguez Pascua, M. A., et al., 2010. "Cuaternario y tectónica activa en la Península Ibérica."

Salamanca, A. F. (2016). Corrección estática para onda convertida mediante interferometría sísmica. Universidad Nacional de Colombia.

Salvany, J. M. (2009). *La cuenca terciaria del Tajo en España: evolución tectónica y sedimentaria*. *Cuaternario y Geomorfología*, 23(3-4), 27-47.

Sanz de Galdeano, C. (1990). *Geological evolution of the Betic Cordilleras in the Western Mediterranean, Miocene to the present*. *Tectonophysics*, 172(1-2), 107-119.

SESAME Project (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: measurements, processing and interpretation. European Research Project EVG1-CT-2000-00026.

Silva, P. G., et al., 2004. "Neotectónica y paleosismicidad en el sector centro-occidental de la Península Ibérica."

Vegas, R., Banda, E., & Cloetingh, S. A. P. L. (1990). *The Iberian Basin: A Cenozoic foreland basin evolution in the context of the Pyrenean collision*. *Tectonophysics*, 184(1-2), 203-214.

Vera, J.A., (Ed.) (2004). *Geología de España*. Sociedad Geológica de España – Instituto Geológico y Minero de España (SGE-IGME). ISBN 84-7840-417-X.