
Análisis conjunto MASW + HVSR

Por qué una sola técnica no basta para determinar el perfil de velocidades, y cómo interpretar juntas la dispersión y la relación espectral con Easy MASW y Easy HVSR.

1. El problema: un dato, muchos subsuelos

Toda técnica geofísica sufre de no unicidad: a una misma medición le corresponden muchos modelos de subsuelo distintos, todos compatibles con el dato. No es un defecto de los instrumentos: es una propiedad de la información que la medición contiene.

Para medir cuánto pesa realmente este efecto realizamos un experimento controlado. Partimos de un perfil de subsuelo **conocido**, de ocho capas, con un Vs30 de 325 m/s. A partir de ese perfil generamos la curva de dispersión que un ensayo MASW habría medido. Después fingimos no conocer la respuesta y trabajamos a la inversa: del dato, reconstruir el terreno. Doscientas veces, con hipótesis iniciales distintas.

Ciento veintidós intentos produjeron un perfil que explica el dato con un error inferior al 3 % — un ajuste que cualquier operador consideraría óptimo. Pero esos perfiles no son variantes del mismo terreno.

122 perfiles · Vs30 de 300 a 679 m/s

todos compatibles con la misma curva de dispersión

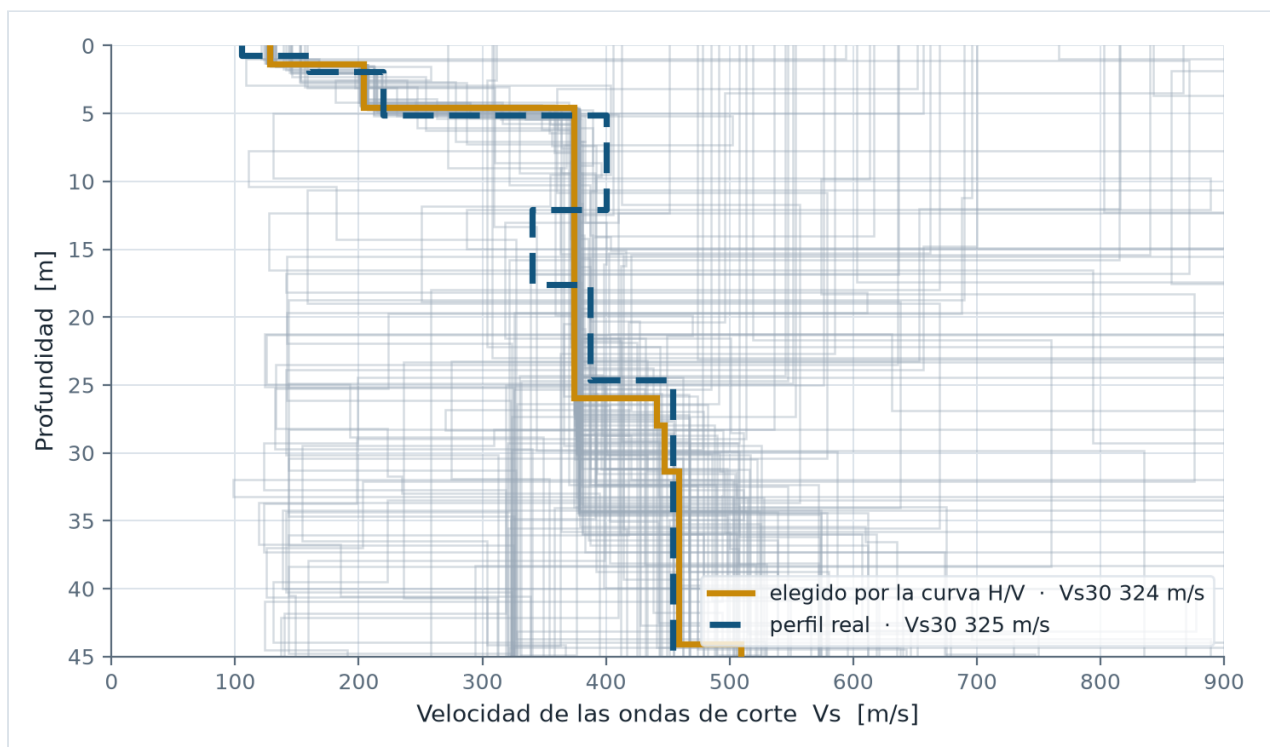


Figura 1. En gris, los 122 perfiles que explican igual de bien el mismo dato MASW. En azul discontinuo, el perfil real; en dorado, el seleccionado al añadir la curva H/V. La dispersión por sí sola no distingue entre las líneas grises: las considera todas aceptables.

El límite entre **categoría B** y **categoría C** (360 m/s) cae en medio de la distribución: 83 de esos perfiles se sitúan en categoría C y 39 en categoría B. Un perfil de cada tres, con el mismo dato, conduce a una

clasificación sísmica distinta.

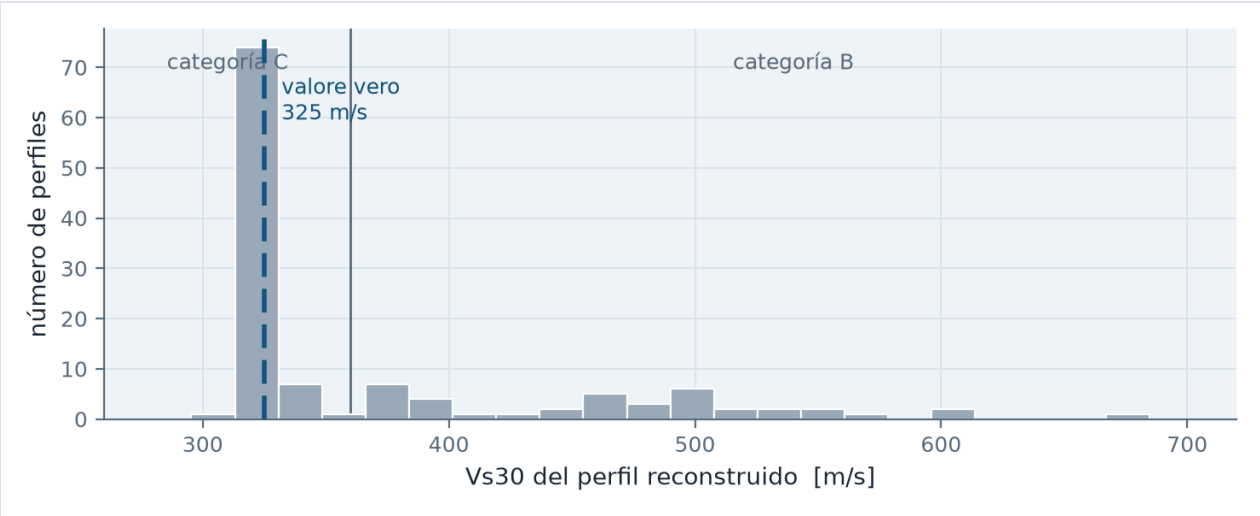


Figura 2. Distribución de los Vs30 de los 122 perfiles equivalentes, con las bandas de categoría de subsuelo. La línea discontinua indica el valor real.

CONVIENE RECORDAR

Cuando un programa devuelve *un* perfil, no está afirmando que los demás sean erróneos: está devolviendo uno de los perfiles compatibles con la medición. Un misfit bajo indica que el modelo es compatible con el dato, **no que sea el único**.

2. Los límites del MASW, en detalle

2.1 La profundidad que el dato puede describir

Un ensayo MASW resuelve de forma fiable longitudes de onda del orden de la **longitud del tendido**. Cada punto seleccionado, a frecuencia f y velocidad de fase v , corresponde a una longitud de onda $\lambda = v/f$; la profundidad investigada está comprendida aproximadamente entre $\lambda/3$ y $\lambda/2$.

Longitud del tendido	λ máxima útil	Profundidad investigada	¿Vs30 determinable?
24 m	~24–48 m	8–12 m	no, en gran parte extrapolado
48 m	~48–96 m	16–24 m	parcialmente
72 m	~72–144 m	24–36 m	sí

La comparación con los 30 m que exige el Vs30 es inmediata. Con tendidos cortos — es decir, la mayoría de los que se realizan en la práctica — **la parte profunda del perfil no se mide, se extrapola**.

ASPECTO CRÍTICO: LOS PUNTOS FUERA DEL ALCANCE DE LA MEDICIÓN

En un caso real con un tendido de 24 m, se habían seleccionado dos puntos a 4,7 y 5,0 Hz con velocidades de 491 y 428 m/s: longitudes de onda de **104 y 85 metros**, más de cuatro veces el tendido. Para explicarlos, la inversión situó un sustrato de 717 m/s a 18 metros de profundidad — un sustrato rocoso inexistente. El ajuste seguía siendo excelente y ningún indicador señalaba el problema. Eliminados esos dos puntos, el conflicto desapareció.

2.2 La ambigüedad modal

La curva de dispersión no es una sola: existe un modo fundamental y una serie de modos superiores. En el espectro de velocidad se identifica una curva bien definida y normalmente se interpreta como modo fundamental. **A veces no lo es**: cuando la energía se distribuye en los modos superiores, el fundamental puede ser débil o estar completamente ausente, y la curva más evidente es en realidad un modo superior.

En nuestras pruebas, atribuir al fundamental una curva que era en cambio el primer modo superior llevó el Vs30 de 325 a **451 m/s**: una categoría de subsuelo equivocada, con un error en el ajuste de la dispersión inferior al 1 %. Repetido 155 veces, el error resultó **sistemático** — siempre en la misma dirección, nunca aleatorio.

2.3 Las ondas de Love: qué aportarían

Una manera de descubrir el error modal es adquirir un segundo tipo de onda. Las **ondas de Love**, que requieren geófonos horizontales transversales y una fuente específica, proporcionan una segunda curva de dispersión que el mismo modelo debe explicar: una atribución modal errónea en la componente Rayleigh se manifiesta como incompatibilidad con la componente Love.

Hay que decir con honestidad que, en nuestras verificaciones, el análisis conjunto con la sola curva H/V se mostró capaz de descartar los modelos erróneos en la práctica totalidad de los casos examinados. La utilidad adicional de las ondas de Love sigue siendo plausible y está documentada en la literatura, pero **no ha sido demostrada cuantitativamente** con nuestros datos: por eso la tratamos como un desarrollo posible y no como un requisito.

3. Qué aporta el HVSR

La técnica HVSR obtiene, a partir del ruido sísmico ambiental registrado con un tromómetro de tres componentes en una única estación, la relación espectral entre las componentes horizontales y la vertical. El pico de esa curva identifica la **frecuencia fundamental de resonancia** del sitio.

3.1 La elipticidad: el puente entre dato y estratigrafía

Para obtener un perfil a partir de la curva H/V hace falta un modelo físico que indique qué H/V produciría un terreno determinado. La hipótesis adoptada — la misma de las principales herramientas científicas del

sector — es que el ruido ambiental está dominado por ondas de Rayleigh en el modo fundamental, y que por tanto la curva H/V medida puede aproximarse mediante la curva de **elipticidad** de las ondas de Rayleigh: la relación entre la componente horizontal y vertical del movimiento elíptico que describe una partícula al paso de la onda.

La elipticidad limita bien la frecuencia de resonancia, que en primera aproximación depende de la *relación* entre la velocidad media y la profundidad del contraste principal — no de los dos términos por separado. Un terreno lento y poco potente y otro más rápido y más profundo producen la misma f_0 y curvas H/V casi indistinguibles.

EN UNA FRASE

La curva H/V dice **dónde está el fondo**; la dispersión MASW dice **cómo es por encima**. Ninguna de las dos, por sí sola, dice ambas cosas.

3.2 Por qué juntas funcionan

Exigir que un **único** modelo de capas explique a la vez la curva de dispersión y la curva H/V elimina gran parte de la ambigüedad: la dispersión fija las velocidades de los primeros metros, la H/V ancla la profundidad del contraste principal y limita la porción profunda que el tendido no alcanza. En el experimento de la Figura 1, entre los 122 perfiles indistinguibles con la sola dispersión, el que mejor explica también la curva H/V tiene **$V_{s30} = 324 \text{ m/s}$** frente a los 325 reales.

4. Cómo se realiza el análisis

1 En campo

En el mismo punto: el tendido MASW habitual con fuente activa, y un registro HVSR de 15–20 minutos con tromómetro de tres componentes, preferiblemente en el centro del tendido. **Los dos ensayos deben referirse al mismo punto**: si pertenecen a posiciones distintas, el análisis conjunto carece de sentido.

2 En Easy MASW — picking y exportación

Se procesan las trazas y se realiza el picking de la curva de dispersión, atribuyendo a cada curva su propio número de modo. Antes de exportar conviene comprobar la longitud de onda de los puntos de baja frecuencia ($\lambda = v/f$) y excluir los que superen el doble de la longitud del tendido.

El comando **Exportar dispersión** genera un archivo `.dsp`: texto sencillo, una línea por punto, con tipo de onda, número de modo, frecuencia y velocidad de fase. Se exportan todas las curvas modales seleccionadas.

Procesada la curva H/V, el comando **Importar dispersión MASW** carga el archivo .dsp e indica el número de puntos y de modos. La casilla **Usar dispersión MASW** permite activar y desactivar la contribución de la dispersión sin volver a importar nada: es la forma de comparar, en el mismo proyecto, el resultado con y sin.

Se define el modelo de capas y se inicia la **Búsqueda**: la inversión evalúa cada modelo candidato comparándolo con ambas curvas, minimizando la suma ponderada de los dos residuos.

5. Consejos operativos para la inversión en Easy HVSR

5.1 Construir el modelo

- **Cinco o seis capas**, no tres. Con pocos parámetros libres el modelo no dispone de los medios para satisfacer dos curvas a la vez, y el resultado es un compromiso que no satisface ninguna.
- **Límites de búsqueda amplios en profundidad**. La velocidad de fase de las ondas de Rayleigh no puede superar mucho la V_s del semiespacio: si los datos contienen velocidades de 400–500 m/s, un límite V_s *max* de 900 m/s en la última capa ya es restrictivo. Valores de 1500–2000 m/s dejan trabajar a la inversión.
- **Profundidad total de al menos 30 m** si interesa el V_{s30} : de lo contrario ese valor depende en gran medida del semiespacio.

5.2 Bloquear o no bloquear la primera capa

En la inversión de la sola curva H/V se recomienda bloquear la primera capa con valores conocidos, porque sin información externa el problema queda indeterminado. **Con la dispersión importada esa recomendación decae**: los primeros metros son precisamente lo que el MASW mide mejor. Bloquear la primera capa en un valor de tanteo significa imponer al modelo una información menos fiable que la contenida en el dato.

El bloqueo sigue siendo apropiado cuando el valor procede de una medición directa — un sondeo, un ensayo en perforación — y no de una estimación.

5.3 Leer el resultado

Deben comprobarse **ambas** curvas calculadas, no una sola: la elipticidad superpuesta a la curva H/V medida, y la curva de dispersión superpuesta a los puntos importados.

Qué se observa	Qué significa
La curva calculada no alcanza los puntos a bajas frecuencias	El modelo no tiene material suficientemente rápido en profundidad: aumentar V_s max de la última capa. Si el límite ya es alto, comprobar que esos puntos estén dentro de la banda útil del tendido
La curva calculada discurre por encima de los puntos a altas frecuencias	Las velocidades superficiales del modelo son demasiado altas; si la primera capa está bloqueada, es el bloqueo lo que impide que bajen
Un parámetro coincide con su propio límite de búsqueda	Es la restricción la que decide el resultado, no el dato: ampliar el intervalo para ver dónde se detendría realmente la inversión
Una curva se reproduce bien y la otra claramente mal	Las dos mediciones están en conflicto: la causa debe buscarse en los datos (puntos fuera de banda, modo mal atribuido, ensayos en puntos distintos) antes que en los parámetros
La elipticidad alcanza valores muy superiores a los de la H/V medida	Contraste de impedancia muy brusco: la elipticidad teórica diverge en la resonancia. Introducir una capa intermedia o suavizar el salto de velocidad

Easy HVSR analiza automáticamente estas condiciones al final de cada búsqueda y las presenta en el recuadro **Sugerencias**. Conviene leerlo antes de modificar los parámetros por tanteo: en la mayoría de los casos ya indica la dirección correcta.

5.4 Convergencia

El número de parámetros libres crece rápidamente con las capas: seis capas con espesores y velocidades libres suponen once incógnitas. Si aparece el aviso de número máximo de iteraciones alcanzado, conviene proceder en dos fases — primero con los espesores bloqueados, para determinar las velocidades, y después liberando la geometría a partir del resultado obtenido — en lugar de limitarse a aumentar las iteraciones.

LA REGLA QUE MÁS VALE

No es la calidad del ajuste lo que nos dice si un perfil es correcto, sino **cuántos perfiles distintos obtienen el mismo ajuste**. El análisis conjunto no mejora un resultado ya bueno: reduce el número de respuestas posibles, y es eso lo que hace utilizable el resultado.

Los datos experimentales citados proceden de ensayos controlados sobre modelos conocidos, procesados con el motor de cálculo GeoStru. La elección de datos sintéticos es deliberada: solo conociendo la respuesta exacta es posible medir el error. Con datos reales la no unicidad es mayor, no menor.