

## ANÁLISIS INTERFEROMÉTRICO MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (IMASW) Y REFRACCIÓN DE MICROTREMORES PARA EL CÁLCULO DE VS30 EN MARACAY, VENEZUELA

VÍCTOR ADOLFO ESCOBAR<sup>1,a</sup>, MICHAEL SCHMITZ<sup>1,2,3,b</sup>, JAVIER SÁNCHEZ ROJAS<sup>2</sup>, FREDDY RONDÓN<sup>1,2,c</sup>

<sup>1</sup>Universidad Simón Bolívar (USB), Dpto. de Ciencias de la Tierra, Caracas, Venezuela.

<sup>2</sup>Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Dpto. de Geofísica Aplicada, Caracas, Venezuela.

<sup>3</sup>Universidad Central de Venezuela (UCV), Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Caracas, Venezuela.

e-mail: <sup>a</sup>[vaescobarb@gmail.com](mailto:vaescobarb@gmail.com), <sup>b</sup>[schmitzschutt@gmail.com](mailto:schmitzschutt@gmail.com), <sup>c</sup>[fjrondon369@gmail.com](mailto:fjrondon369@gmail.com)

Recibido: marzo de 2021

Aprobado para publicación: junio de 2021

### RESUMEN

Los métodos sísmicos de fuente pasiva basados en arreglos lineales constituyen una práctica común para la estimación de la velocidad de onda de corte del subsuelo somero, especialmente en entornos urbanos. El presente trabajo está enfocado en la comparación de dos de estos métodos: análisis interferométrico multicanal de ondas superficiales (IMASW) y refracción de microtremores (ReMi). Se aplicaron ambos métodos a un set de datos sísmicos con fuentes de ruido ambiental de la ciudad de Maracay. Se utilizó interferometría sísmica para generar registros de fuente virtual a partir de mediciones de ruido ambiental, y a estos registros se les aplicó un análisis multicanal de ondas superficiales, para finalmente construir un mapa de velocidad de onda de corte hasta 30 m de profundidad. Los resultados obtenidos incluyen perfiles bidimensionales que destacan la distribución de velocidades en los primeros 30m de profundidad. Estos resultados evidencian principalmente que ambos métodos tienen limitaciones para recuperar información en las bajas frecuencias. El método IMASW ofrece una alternativa viable y menos ambigua (en términos de interpretación) respecto al método ReMi. Como alternativa, esta metodología tiene un potencial a ser explorado en el contexto de adquisición (diferentes arreglos, tiempos de adquisición) y también en el procesamiento. Este trabajo pretende ser una contribución en favor de esta metodología para microzonificación sísmica.

*Palabras claves:* Métodos sísmicos pasivos, Interferometría sísmica, ruido sísmico, análisis multicanal de ondas superficiales, refracción de microtremores.

## MULTICHANNEL INTERFEROMETRIC ANALYSIS OF SURFACE WAVES (IMASW) AND REFRACTION MICROTREMORS FOR THE CALCULATION OF VS30 IN MARACAY, VENEZUELA

### ABSTRACT

Passive source seismic methods based on line arrays are common for shear wave velocity estimation of the shallow subsurface, especially in urban environments. The present work is focused on comparing two of these methods: interferometric multichannel analysis of surface waves (IMASW) and microtremor refraction (ReMi). Both methods were applied to a seismic dataset with ambient noise sources from Maracay. Seismic interferometry was used to generate virtual source records from ambient noise measurements. A multichannel surface wave analysis was applied to these records to construct a shear wave velocity map up to 30 m depth. The results include two-dimensional profiles highlighting the velocity distribution in the first 30m depth. These results show that both methods have limitations in retrieving information at low frequencies. The IMASW method offers a viable and less ambiguous (in terms of interpretation) alternative to the ReMi method. As an alternative, this methodology has the potential to be explored in the acquisition context (different arrays, acquisition times) and also in processing. This work intends to contribute to favor of this methodology for seismic microzonation.

*Keywords:* Passive seismic methods, seismic interferometry, seismic noise, multichannel surface wave analysis, microtremor refraction.

### INTRODUCCIÓN

La caracterización geofísica del subsuelo somero es de vital importancia en áreas urbanas, por lo cual es necesario el desarrollo de métodos que permitan estimar los efectos de sitio de manera más eficiente y al menor costo posible. El análisis interferométrico es un campo de

la investigación geofísica cada vez más extendido. Este se basa en la correlación cruzada de campos de onda registrados en cada receptor, con la finalidad de obtener funciones de Green empíricas, las cuales serían las señales registradas si uno de los receptores es reemplazado por una fuente (Bakulin y Calvert, 2006; Curtis et al., 2006; Sánchez-Sesma, 2006).

En sus orígenes, el método interferométrico fue aplicado a registros de ruido sísmico ambiental empleando sismómetros como una alternativa a la tomografía sísmica convencional (Shapiro y Campillo, 2004; Snieder, 2004; Bensen et al., 2007; Xu et al. 2013). Aplicaciones más recientes optan por usar ruido generado por el tráfico, como fuente para la recuperación de ondas superficiales, especialmente en áreas urbanas, donde el uso de fuentes activas no siempre es posible o logísticamente rentable (Behm et al., 2014; Feuvre et al., 2014; Cheng et al., 2015; Pan et al., 2016).

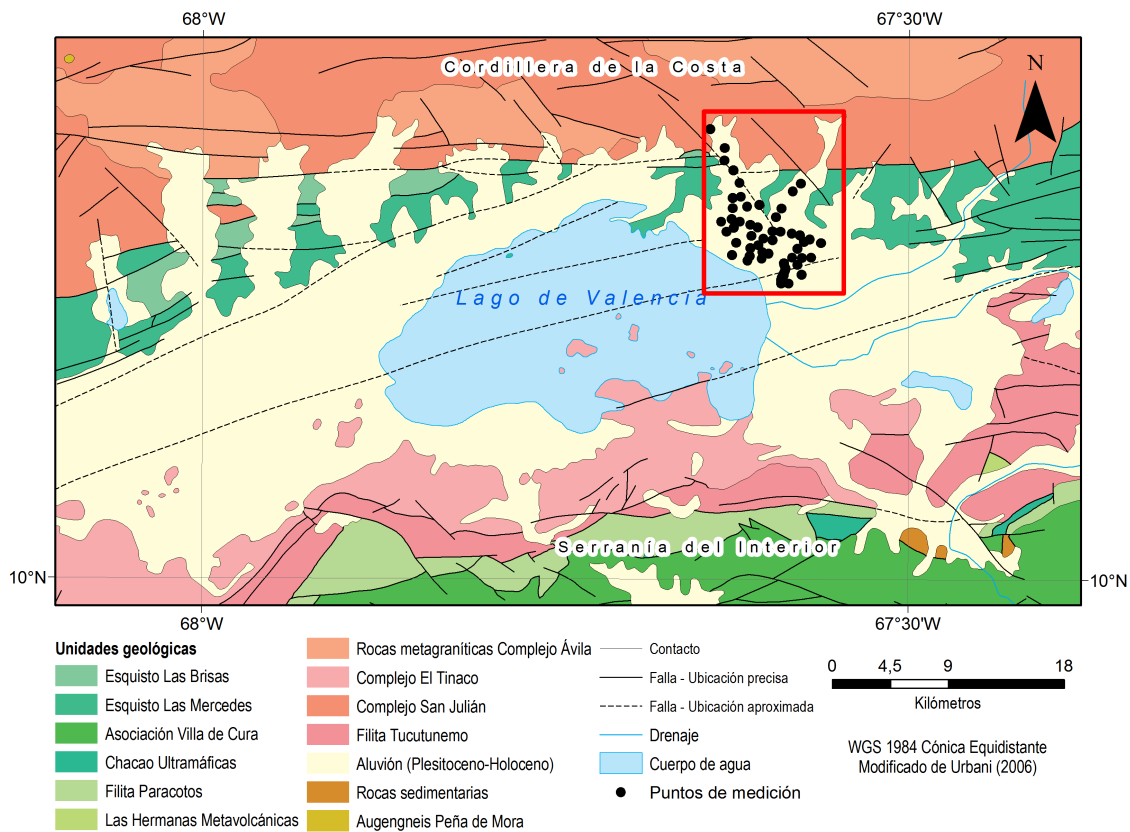
Es posible aplicar análisis multicanal de ondas superficiales a registros de fuente virtual, los cuales son obtenidos mediante correlación cruzada de registros de arreglos unidimensionales para obtener la velocidad de cizalla del subsuelo en estudio (Cheng et al., 2016). Esta metodología surge como alternativa al método de refracción de microtremores (ReMi), el cual está basado en una transformada bidimensional de lentitud-frecuencia (denotada por algunos autores como p-f) para luego realizar la selección de pares lentitud-frecuencia que componen la curva de dispersión (Louie, 2001). Esta selección debe ser realizada con especial cautela ya que la velocidad de fase verdadera puede corresponder a cualquier valor entre la máxima amplitud y la envolvente de mínima velocidad,

lo cual implica cierta incertidumbre en las curvas de dispersión obtenidas mediante ReMi (Strobbia y Cassiani, 2011). Dicha incertidumbre es mucho menor al realizar la selección de los pares velocidad- frecuencia en el espectro de dispersión obtenido mediante el análisis multicanal de ondas superficiales, donde los pares son seleccionados en las secciones de máxima amplitud del espectro (Xu et al., 2017).

Considerando las diferencias entre ambos métodos, se propone una comparación que permita establecer las diferencias entre ellos, principalmente en el cálculo del parámetro Vs30. Para este propósito, se aplican análisis de Refracción de Microtremores e interferometría multicanal a mediciones de ruido sísmico adquiridas en la ciudad de Maracay, Venezuela.

## CONTEXTO GEOLÓGICO

La cuenca del Lago de Valencia es una depresión topográfica limitada por fallas dextrales (Figura 1). La ciudad de Maracay, ubicada al noreste del lago, está asentada sobre sedimentos de edad cuaternario (Pleistoceno a Holoceno) que pueden tener, principalmente, dos orígenes: aluvial y lacustre (Hernández, 2006).



**Figura 1.** Mapa geológico destacando, en un rectángulo rojo, la zona de estudio. Se observa que las principales formaciones cercanas a la zona de estudio son el Esquisto de Las Mercedes y el Complejo San Julián. En color negro se indican las ubicaciones de los tendidos. Modificado del mapa de Hackley et al. (2006).

## Lago de Valencia

El Lago de Valencia es un lago endorreico situado en una fosa tectónica, un graben hundido en la corteza terrestre con respecto a las dos cadenas montañosas: la Cordillera de La Costa, al norte, y la Serranía del Interior, al sur. Tiene una superficie cercana a 380 km<sup>2</sup>. Su profundidad máxima alcanza 38 m en su parte centro-oriental. Esta fosa tectónica es la expresión superficial de la Falla de La Victoria (Bueno, 1979).

**Evolución del Lago de Valencia** El Lago de Valencia se formó bajo condiciones de un clima tropical húmedo, al empezar el Pleistoceno, en un "graben". Este graben desarrolló un sistema hidrográfico que drenaba toda el área entre los valles de Aragua y la cuenca, provocando conos aluviales y sedimentos fluviales, originando el represamiento de aguas, y con este, el origen del lago Valencia I (Peeters, 1971).

El clima evolucionó a condiciones sub-áridas durante la primera mitad del Pleistoceno, desecando el lago Valencia I. Las áreas desecadas fueron cubiertas por el avance de los conos de deyección de los ríos importantes y también por napas de gradación. El cuerpo de agua se redujo hasta conformar el lago Valencia II. Predominan los materiales producto de meteorización mecánica transportados por las fuertes lluvias que permitieron el desplazamiento de sedimentos gruesos: peñones, grava y arena gruesa. Una vez más, cambian las condiciones a un clima pluvial y el nivel del lago sube considerablemente durante la segunda mitad del Pleistoceno, formando el Lago Valencia III, alcanzando la máxima cobertura de aguas en el período Holoceno. Peeters (1971) también señala la existencia de tres niveles de arcilla con Planorbis intercalados con niveles de sedimentos fluviales, lo que sugiere períodos de transgresión y regresión lacustre.

## TÉCNICAS EXPERIMENTALES

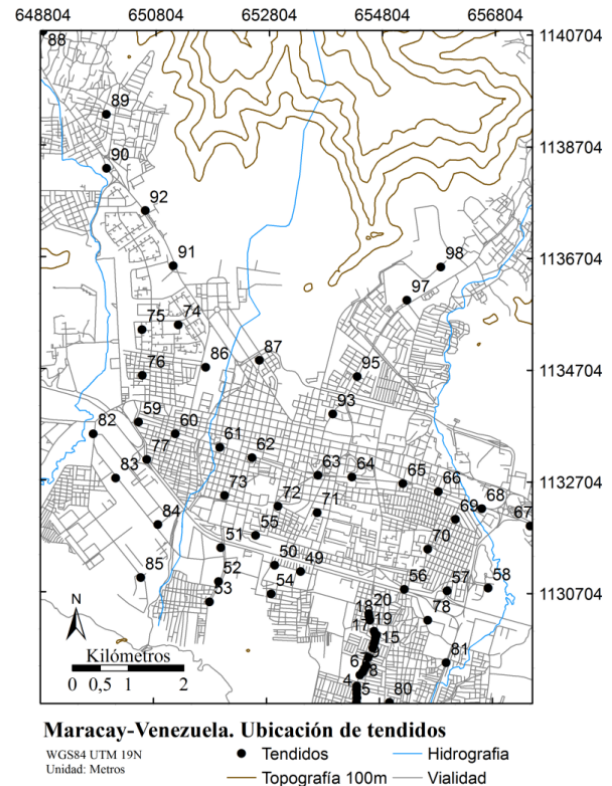
### Especificaciones de los datos

Los datos usados corresponden a registros de ruido sísmico de 70 tendidos distribuidos en el área de la ciudad de Maracay (Casalena, 2011), adquiridos como parte de los trabajos de investigación realizados por FUNVISIS (Figura 2). Estos registros tienen un intervalo de muestreo de 0,004 s. Fueron adquiridos mediante arreglos lineales de 48 geófonos de frecuencia fundamental 4,5 Hz. Cada uno de los registros tiene una duración de 30 s, siendo en total 14 registros para cada tendido.

### Procesamiento IMASW

De acuerdo con Cheng et al. (2015), el procesamiento mediante análisis multicanal de ondas superficiales (IMASW) puede ser dividido en dos etapas:

1. recuperación de señal de ondas Rayleigh a partir de los registros de ruido, mediante interferometría sísmica, y
2. determinación de la velocidad de ondas S a partir de registros virtuales mediante análisis multicanal de ondas superficiales.



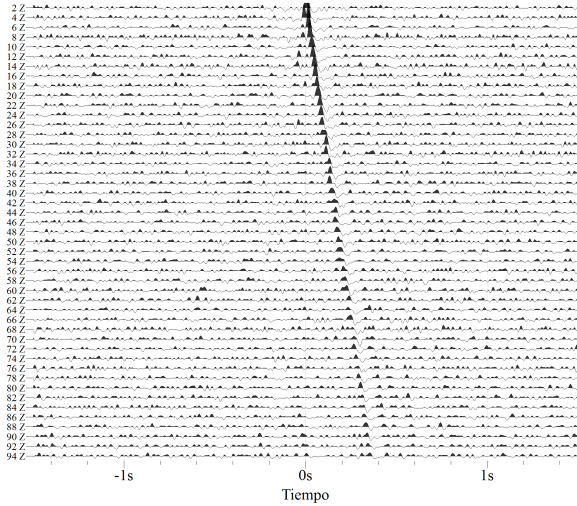
**Figura 2.** Distribución de los tendidos en la zona de estudio. Los puntos negros indican la ubicación de cada tendido identificado con el número de tendido.

### Pre-procesamiento

En esta etapa, mediante el empleo del software Geopsy, y de manera simultánea, se configuran los parámetros de cada geófono correspondiente a un mismo registro. El propósito de este paso es acentuar la señal de banda ancha mediante la atenuación de irregularidades instrumentales (Lontsi et al., 2016). Es importante señalar que algunas de las modificaciones no son lineales, por lo que el orden en que se realizan las operaciones es importante.

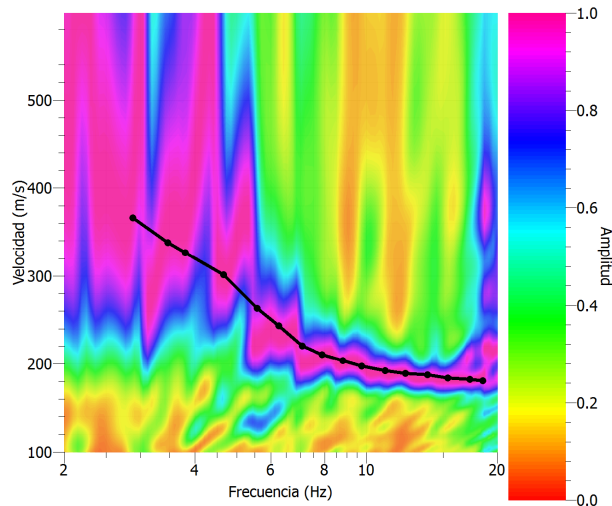
- *Substract value: mean value:* Para centrar la señal y remover efectos indeseados de offset.
- *Filtro Pasaband tipo Butterworth [0,25 - 30 Hz]:* También conocido como filtro trapezoidal. Permite atenuar los eventos fuera del rango de frecuencias de interés.
- *Blanqueamiento espectral:* De acuerdo con Bensen et al. (2007), la normalización espectral amplía la banda de señal de ruido ambiental en las correlaciones y mitiga la degradación provocada por fuentes monocromáticas.
- *Función ventana (taper):* también llamada función apodizante en algunos textos. Esta función mejora las propiedades de la señal en el espectro de frecuencia. La amplitud de la señal es reducida a cero en los bordes de la duración muestreada. (Weisstein, s.f.).

- **Correlación cruzada:** Se aplica la correlación entre todos los pares de geófonos posibles y se apilan los resultados de acuerdo con la posición de cada receptor. La correlación cruzada es un indicador de la similitud entre dos señales. En este caso, tiene la finalidad de proveer una estimación de la función de Green entre dos receptores. Finalmente, se obtiene un registro de fuente virtual (Figura 3).



**Figura 3.** Ejemplo de shot-gather obtenido, mediante correlación con la fuente virtual, en uno de los extremos del tendido.

A los registros de fuente virtual, se les aplica un análisis MASW convencional para generar el espectro de dispersión. Posteriormente se realiza la selección de los pares velocidad-frecuencia que constituirán la curva de dispersión (Figura 4).

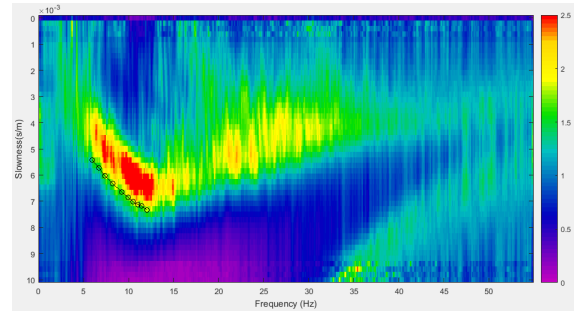


**Figura 4.** Ejemplo de espectro de dispersión obtenido. A la derecha: selección de puntos para la curva de dispersión.

## Procesamiento mediante Refracción de Microtremores (ReMi)

Para obtener resultados mediante el método ReMi, se empleó el software M.A.S. (Microtremor Analyzer Software) desarrollado por Díaz (2018). El programa permite aplicar la configuración geométrica y el pre-procesamiento de la señal de manera automatizada, para todos los registros correspondientes a un tendido, para después aplicar la transformada p-f y, finalmente, extraer una curva de dispersión.

- **Aplicación de geometría:** Se introducen los parámetros correspondientes a la adquisición, tales como la tasa de muestreo y la separación entre los geófonos.
- **Pre-procesamiento:** La señal es centrada y normalizada.
- **Inversión p-tau:** Se aplica la transformada mediante la cual es obtenido el espectro de dispersión.
- **Apilamiento de los espectros obtenidos para cada registro:** Los espectros obtenidos para cada registro de un mismo tendido son apilados y se obtiene una imagen con mejor definición.
- **Extracción de la curva de dispersión:** Para la extracción de la curva de dispersión se consideraron los criterios planteados por Louie et al. (2017), siguiendo una misma tendencia de amplitudes para obtener una curva suavizada, y evitando seleccionar pares frecuencia-velocidad en bandas de frecuencia con muy poca energía sobre la envolvente de mínima velocidad (Figura 5).



**Figura 5.** Espectro de ReMi obtenido mediante el programa M.A.S (Díaz, 2018). Los círculos de color negro representan los pares lentitud frecuencia seleccionados para la curva de dispersión.

## Inversión

Considerando los resultados obtenidos por investigaciones anteriores (Díaz, 2018), se proponen tres modelos geológicos de 7 capas, con espesores y velocidades de ondas de corte que incrementan con la profundidad. El principal parámetro es la velocidad de onda S ( $V_s$ ) dado que, de acuerdo con Okada (2003), la variación de la velocidad de fase de una onda Rayleigh es más susceptible a la velocidad de onda S. Sabiendo esto, se establecen en el software de

inversión, por defecto, los parámetros como la densidad y el coeficiente de Poisson y se varía, principalmente, la velocidad de onda S para mejorar el ajuste. La selección del modelo geológico para cada tendido se hizo tomando en consideración el mapa propuesto por Rojas (2008). Se consideraron también los resultados reportados por Casalena (2011), los cuales son medidas del parámetro Vs30 aplicando el método ReMi.

Las inversiones fueron realizadas mediante la herramienta dinver del programa Geopsy, la cual utiliza el método iterativo del vecino más cercano. Dado un set de ns muestras en el espacio del modelo, este espacio es dividido en ns regiones llamadas celdas de Voronoi, cada muestra corresponde a un modelo. Se calcula una función de desajuste para cada modelo, y se seleccionan los nt modelos con el desajuste más bajo. Nuevamente, se generan ns modelos en el espacio de los previos modelos nt. El proceso se repite para el número de iteraciones establecido por el usuario.

Para facilitar la comparación entre curvas de ambos métodos, se aplica un remuestreo de los pares velocidad-frecuencia de cada curva: 50 muestras con escala en frecuencia, y un corte entre 2 y 20 Hz. Este remuestreo implica una interpolación lineal entre dos pares adyacentes de velocidad frecuencia para una curva. Considerando esto, y que cada curva fue interpretada manualmente, no hay una pérdida significativa de información en frecuencia. Los parámetros utilizados para cada curva fueron seleccionados de acuerdo con su ubicación en el área de estudio. De acuerdo con la geología de la zona, se esperan sedimentos menos consolidados y, por lo tanto, con velocidades menores, en el área mas cercana al lago de Valencia. Los modelos de inversión para tendidos en esta área tienen velocidades de onda de corte menores, en comparación con los tendidos en el norte de la ciudad.

A continuación, se determina la velocidad de onda de corte hasta los primeros 30 m de profundidad. De acuerdo con la norma COVENIN (2001), la velocidad promedio hasta cierta profundidad se obtiene como el cociente de la altura total del perfil, entre la sumatoria de tiempos parciales de viaje por estrato:

$$V_{sp} = \frac{H}{\sum_i^n \frac{h_i}{V_{s,i}}} \quad (1)$$

En la relación anterior,  $V_{sp}$  es la velocidad de ondas de corte promedio,  $H$  es la profundidad total,  $h_i$  es el espesor de la i-ésima capa, y  $V_{s,i}$  la velocidad de la i-ésima capa.

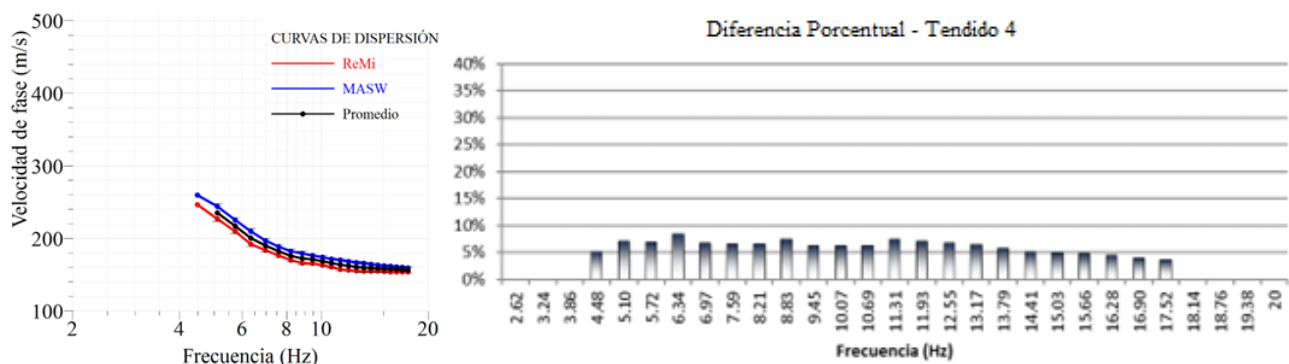
### Elaboración de mapas

Los mapas se generaron utilizando el método de cuadrículado conocido como kriging. Adicionalmente, se suavizaron las cuadrículas obtenidas mediante un filtro gaussiano de  $3 \times 3$ , aplicando 10 iteraciones del mismo. Este tipo de filtro modifica los valores de una celda específica con un factor calculado tomando en cuenta los valores de las celdas adyacentes. El "peso" de cada celda en este cálculo depende de su distancia con respecto a la celda central. En el caso de un filtro  $3 \times 3$ , la subcuadrícula para aplicar el filtro estará compuesta por 9 celdas, con la celda a ser modificada ubicada en el centro.

Se generaron mapas para los resultados obtenidos por MASW Interferométrico, así como también para los resultados obtenidos por Casalena (2011). En el caso de los perfiles, se optó por utilizar el método de cuadrículado de mínima curvatura. Es importante tener en cuenta que este método puede generar artefactos de alta magnitud en áreas donde no hay datos (GOLDEN SOFTWARE, 2018). En este caso, el método de kriging es más adecuado para los mapas, ya que permite delinear con más precisión las variaciones de velocidad en la zona. Para las secciones transversales, se optó por la mínima curvatura para evitar artefactos de alta velocidad que habrían sido delimitados por el método de kriging.

### Comparación de resultados

Para establecer cualitativamente las diferencias entre las curvas, se graficaron las tres curvas de cada tendido (Figura 6, Figura 7, Figura 8). De manera general, se observan dos tendencias claras en el comportamiento de las curvas: una tendencia en la cual las tres curvas son similares tanto en forma como en valores de pares velocidad-frecuencia (Figura 7), y una tendencia en la cual

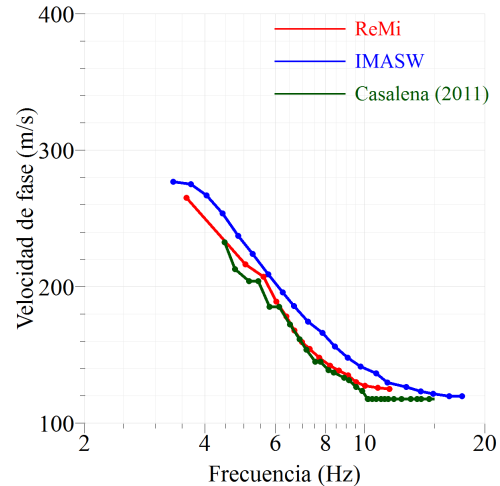


**Figura 6.** Comparación de curvas remuestreadas con curvas promedio. Método IMASW (Azul); método de ReMi con el programa M.A.S.(Rojo); promedio (Negro). Tendido 4.

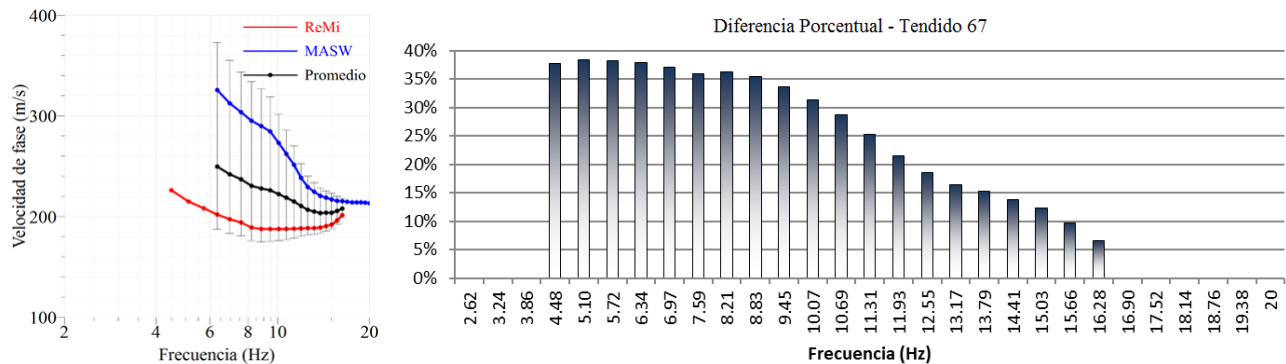
la forma de las curvas es similar, pero la curva de IMASW muestra valores de velocidad considerablemente mayores (Figura 8).

Empleando la función promedio del módulo dinver de Geopsy, se calculó una curva promedio tomando en cuenta las curvas extraídas en este estudio (IMASW y ReMi), después de haber sido remuestreadas para los mismos valores de frecuencia. Este remuestreo es una interpolación lineal de pares velocidad-frecuencia adyacentes seleccionados por el intérprete y, por lo tanto, no implica pérdida de información en frecuencia. Se excluyó la curva extraída por Casalena (2011), dado que implicaría que el método ReMi tendría el doble de peso en el cálculo del promedio.

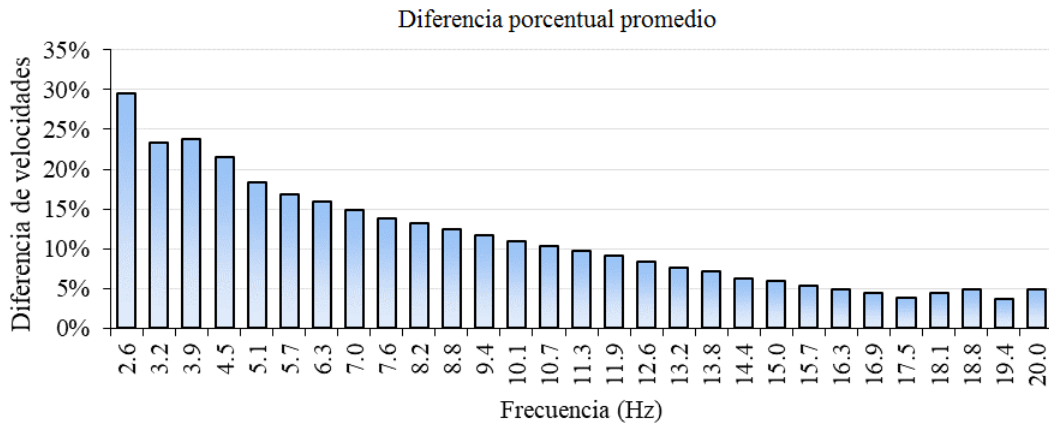
Para cuantificar la diferencia de los valores de velocidad, se calcula la diferencia porcentual de las velocidades en cada frecuencia. Esta diferencia se presenta para cada tendido como un gráfico de barras añadido a cada gráfico de comparación de curvas. La Figura 9 presenta la diferencia porcentual promedio para todas las curvas.



**Figura 7.** Comparación de curvas de dispersión. Método IMASW (Azul); método de ReMi con el programa M.A.S.(Rojo); método de ReMi obtenido por Casalena (2011) con el programa SeisOpt (Verde). Tendido 10.



**Figura 8.** Comparación de curvas re-muestreadas con curvas promedio. Método IMASW (Azul); método de ReMi con el programa M.A.S.(Rojo); promedio (Negro). a) Tendido 4.



**Figura 9.** Gráfico de la diferencia porcentual, para todos los tendidos, promedio según la frecuencia.

También, se calcularon los coeficientes de correlación de las curvas remuestreadas mediante la ecuación:

$$\text{Correl}(X, Y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

donde:  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  son las medias de las muestras  $x$  e  $y$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La diferencia entre los resultados obtenidos se establece considerando las curvas de dispersión extraídas para cada método. Para apreciar directamente esta diferencia, se graficaron las curvas obtenidas por ambos métodos, y también se incluyó la curva obtenida por [Casalena \(2011\)](#), la cual fue digitalizada para obtener los pares velocidad-frecuencia ([Figura 6](#)). En general, las curvas seleccionadas por [Casalena \(2011\)](#) y las extraídas por este estudio mediante el método ReMi, muestran tendencias y valores similares, especialmente para el rango de frecuencias entre 4-18Hz.

En cuanto a las comparaciones entre las curvas de IMASW y ReMi de este estudio, se observan dos tendencias claras. Una de las tendencias refleja una curva de dispersión de IMASW muy cercana a la curva seleccionada en el espectro de dispersión de ReMi. En la otra, la diferencia entre las dos curvas es mucho mayor en casi todas las frecuencias. La primera tendencia se observa en la [Figura 6](#) y la [Figura 7](#). Como se observa en el gráfico de barras, la diferencia de los valores es consistente, por debajo del 15%, para casi todas las frecuencias. La segunda tendencia, en la [Figura 8](#), muestra una alta diferencia que disminuye con la frecuencia.

En la [Figura 6](#) se muestran las comparaciones directas entre las tres curvas de dispersión para el tendido 4. Se observa que la curva obtenida mediante el método IMASW alcanza valores de frecuencia ligeramente más bajos que la curva de dispersión del método ReMi. En estos casos fue posible identificar una tendencia, incluso a bajas frecuencias, a pesar de la alta incertidumbre de los valores de amplitud. Para estos tendidos, en los espectros dispersivos de ReMi, no se observa información de amplitud a bajas frecuencias que pueda interpretarse como continuidad de la curva de dispersión. Por otra parte, en la [Figura 8](#) se observa que los valores de velocidad de la curva de dispersión IMASW son mayores con respecto a los valores de las curvas extraídas para el método ReMi. Esta diferencia se hace menor a medida que se incrementa el valor de la frecuencia.

El desplazamiento observado entre las curvas es una consecuencia directa de la selección de los pares tiempo velocidad durante la interpretación. Como se indicó anteriormente, existe cierta ambigüedad en la selección de los pares velocidad-frecuencia en el método ReMi. En algunos casos, no fue posible identificar puntos para las bajas frecuencias. Por otra parte, el IMASW reporta consistentemente valores más altos debido al criterio de máxima energía utilizado para seleccionar los puntos de la curva de dispersión.

Se calculó el coeficiente de correlación de las curvas obtenidas mediante ambos métodos y se obtuvo que, para

56 tendidos, el coeficiente de correlación fue mayor a 0,9, mientras que para 11 tendidos el coeficiente de correlación fue menor a 0,9. El menor coeficiente de correlación fue 0,67. En promedio, el coeficiente de correlación es de 0,9488. Este coeficiente de correlación fue calculado respecto las curvas remuestreadas, lo que explicaría los altos valores obtenidos. Este resultado corrobora que las curvas obtenidas mediante ambos métodos son similares en sus valores de velocidad, lo cual sugiere que el método IMAW podría ser una alternativa viable al método ReMi.

Se calcularon curvas mediante el promedio de la curva IMASW y la curva ReMi para cada tendido. El cálculo del promedio permitió también el cálculo de la desviación estándar para cada curva respecto al promedio. Para el tendido 4 el porcentaje de desviación estándar es de 4,5%; para el tendido 57 fue de 5,2%; para el tendido 78 fue de 9,2%; y para el tendido 61 fue de 9,5%.

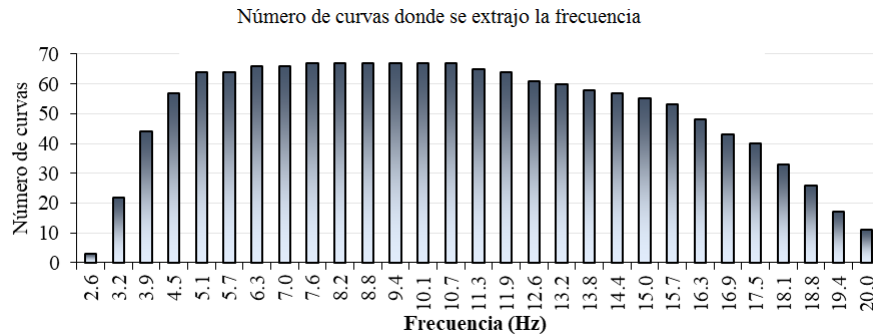
Por otra parte, en la [Figura 8](#) se observa una de las curvas de dispersión que corresponde a los coeficientes de correlación más bajos, para ilustrar la otra tendencia identificada en los resultados. La desviación estándar para el tendido 67 fue de 21%; para el tendido 20 fue de 11,8%; para el tendido 84 fue de 14,4%; para el tendido 90 fue de 15,6%. Para ambas tendencias se observa que los valores de velocidad en la curva de dispersión IMASW son siempre mayores a los de la curva ReMi. Cada uno de estos gráficos muestra también la diferencia porcentual de velocidad para cada frecuencia. No obstante, es importante destacar que, en ambos, casos los valores de desviación estándar relativa son bajos para las frecuencias superiores a 10 Hz, es decir, la diferencia entre las curvas es mucho menor en el rango donde se ubica el mayor contenido de frecuencias.

Considerando que, incluso para los casos en los que el coeficiente de correlación es bajo, la desviación estándar porcentual es de alrededor del 15%, puede indicarse que, de manera general, las curvas de dispersión son similares.

La diferencia porcentual promedio obtenida para cada una de las frecuencias individuales indica valores de menos de 20% de diferencia para valores de frecuencia mayores a 5 Hz ([Figura 9](#)).

De acuerdo con lo que se observa en la [Figura 10](#), en la mayoría de los tendidos fue posible extraer curvas de dispersión compuestas por pares velocidad-frecuencia para este rango de frecuencias. Las curvas de dispersión con frecuencias bajas, en su mayoría, fueron extraídas de espectros de dispersión obtenidos mediante IMASW, mientras que los valores de frecuencia mayores a 4,5 fueron extraídos de ambos tipos de espectros. Se resalta entonces la similitud entre los resultados obtenidos por ambos métodos para las frecuencias superiores a 4,5 Hz, considerando que la diferencia porcentual es menor al 20% a partir de los 5,1 Hz.

El promedio de diferencia porcentual para todas las frecuencias es de 11,1%. En general, los valores de velocidad entre ambos métodos varían en menos de 15%, lo cual indica una similitud alta y comprueba la validez del método de MASW interferométrico.

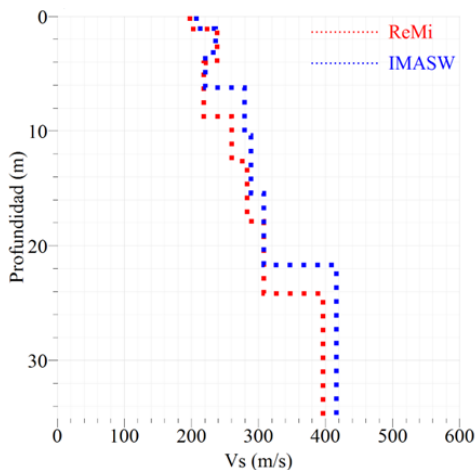


**Figura 10.** Histograma del número de curvas usadas para extraer cada frecuencia, según la frecuencia.

Respecto a la diferencia de velocidades, algunos estudios previos, tales como los de Xu et al. (2017), sugieren que proviene de la incertidumbre en la distribución de las fuentes de ruido ambiental. Si las fuentes son más fuertes en una dirección oblicua al tendido, se introduce un sesgo en la velocidad de fase que podría indicar valores de velocidad mayores. Esto podría ser solucionado estableciendo la dirección de las fuentes, para lo cual son necesarios arreglos bidimensionales y tiempos de adquisición más largos.

#### Comparación de perfiles unidimensionales

Se compararon los valores de velocidad obtenidos en profundidad con los dos métodos, mostrando ambos perfiles en el mismo gráfico, en el cual no se observaron diferencias significativas entre ambos métodos, dado que los parámetros de los modelos geológicos utilizados durante la inversión son los mismos para ambas curvas. Además, las curvas de dispersión de cada método no presentaron diferencias significativas en la mayoría de los casos. Se observa una tendencia general de los perfiles obtenidos mediante IMASW. Esta muestra valores de velocidad de ondas de corte superiores a los resultados obtenidos mediante ReMi (Figura 11).

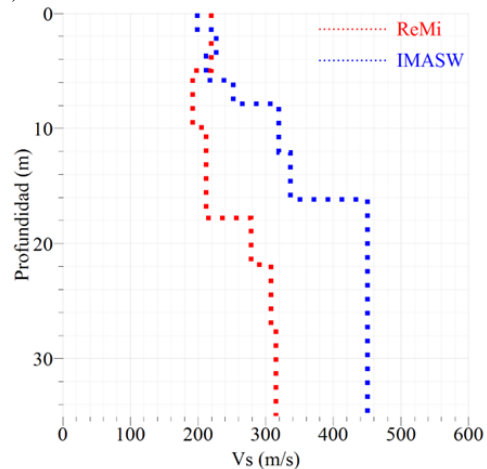


**Figura 11.** Comparación de perfiles unidimensionales hasta 30 m de profundidad. Tendido 77.

Esta tendencia de valores más altos incrementa con la profundidad, lo cual se atribuye a los valores de velocidad para las frecuencias más bajas del método

IMASW. El contenido de frecuencias disminuye con la profundidad, por lo cual la cantidad de información recuperada para profundidades mayores es menor. Esto trae como consecuencia una mayor incertidumbre en los valores de velocidad, que se muestra en los valores de velocidad de las curvas de dispersión.

Se observa que existe alta similitud entre los perfiles obtenidos mediante ambos métodos. Los perfiles son similares tanto en los valores de velocidad como en el espesor de las capas del modelo propuesto (Figura 11). Sin embargo, se destaca el caso del tendido 67 (Figura 12), el cual fue uno de los tendidos que presentó menor valor para la correlación entre las curvas. Esta tendencia de diferencia de los valores de velocidad se asocia, directamente, con la diferencia de valores observada en la curva de dispersión antes expuesta. Incluso, para profundidades de apenas 10 metros, la diferencia es evidente.



**Figura 12.** Comparación de perfiles unidimensionales hasta 30 m de profundidad. Tendido 67.

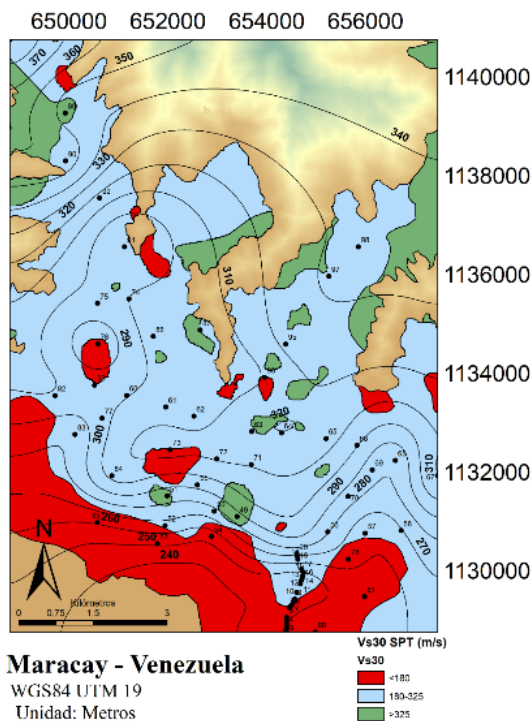
Para obtener una comparación cuantitativa, se calcularon las diferencias porcentuales entre los valores de Vs30 de ambos métodos. Se obtuvo un promedio de 11 % de diferencia entre ambos métodos. Con un mínimo de 1,9 % y un máximo de 27,8%; este último valor corresponde al tendido 67. Para un 80 % de los tendidos, la diferencia es de menos de 15 %. Lo anteriormente expuesto verifica que con el método IMASW es posible obtener valores de Vs30 que concuerdan, en gran medida, con aquellos derivados la metodología ReMi.

Respecto a los modelos unidimensionales obtenidos, es importante destacar la no-unicidad intrínseca del problema inverso. Foti et al. (2009) plantean que, si los perfiles de velocidad de onda de corte son equivalentes respecto a la dispersión de ondas Rayleigh, también son equivalentes respecto a la respuesta sísmica del sitio. En este caso, las características dispersivas de las ondas Rayleigh fueron estudiadas mediante ambos métodos, obteniéndose una alta similitud entre ellas.

### Comparación con estudios SPT

Los valores de Vs30 obtenidos mediante IMASW se compararon con los resultados de análisis de ensayos de penetración estándar (SPT-Standard Penetration Test) reportados por Vernáez et al. (2011) mediante la construcción de un mapa de Vs30 en la zona de estudio (Figura 13).

La tendencia de los valores de Vs30 obtenidos mediante IMASW concuerda con la tendencia inferida a partir de ensayos SPT, con los valores más bajos hacia el sur-oeste de la ciudad, y los valores más altos hacia las quebradas ubicadas en el norte. No obstante, la comparación entre los valores hace evidente la diferencia de los valores de Vs30 obtenidos mediante el método IMASW. En la zona sur de la ciudad, donde los valores de Vs30 obtenidos mediante SPT son menores a 180 m/s, los valores de IMASW son de alrededor de 230 m/s. En otros casos, se observó que los valores de Vs30 obtenidos del análisis multicanal son los esperados para la zona, como en los tendidos 88, 89, 90, 95, 97, y 98.



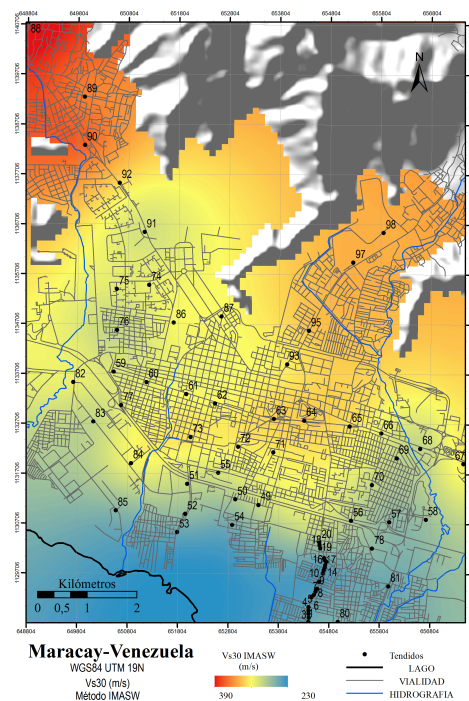
**Figura 13.** Mapa de Vs30, calculado mediante SPT. Las líneas de contorno corresponden a valores de Vs30 calculados mediante IMASW. Maracay. Modificado de Vernáez et al. (2011).

La diferencia principal se ubica al sur de la zona de estudio, donde los valores indicados por Vernáez et al. (2011), provenientes de estudios SPT son menores a 180 m/s, mientras que los obtenidos mediante IMASW se ubican en la categoría entre 180 - 325 m/s. Esta diferencia en los valores podría estar relacionada a efectos azimutales no corregidos durante el análisis dispersivo. Cheng et al. (2016) realizaron estudios con pruebas sintéticas aplicando análisis multicanal basado en correlaciones cruzadas, y encontraron que, cuando no se realizan ajustes azimutales, existe una desviación de la tendencia de valores de velocidad del espectro de dispersión hacia valores más altos. Cheng et al. (2016) proponen, como solución a este efecto, el uso de observaciones de ruido de mayor duración en tiempo, de 1 a 2 horas, generando una imagen de dispersión sin desviaciones.

En general, el Vs30 calculado mediante IMASW es mayor que lo indicado por los estudios SPT. Esta diferencia es mayor en la zona sur de la ciudad. Es conocido que esta zona tiene características distintas al resto del área, por su proximidad con el lago de Valencia. Un estudio empleando arreglos bidimensionales, con tiempos de adquisición mayores, para determinar la ubicación de la fuente y corregir, en consecuencia, los efectos azimutales, podría proveer más información acerca de esta diferencia.

### Mapa Vs30

Uno de los resultados más importantes del presente estudio es un mapa de Vs30 que resulta de estimar este parámetro por IMASW para cada uno de los modelos unidimensionales obtenidos en los tendidos e interpolar los datos en un sistema de información geográfica para toda la zona (Figura 14).



**Figura 14.** Mapa que indica la variación gradual de los valores estimados de Vs30, con el método IMASW en la ciudad de Maracay.

El mapa generado muestra una tendencia de velocidades crecientes hacia el norte, siendo el valor más alto 390 m/s (tendido 88) con los valores más bajos de velocidad ubicados en la zona sur de la ciudad, siendo estos de alrededor de 230 a 260 m/s. Esta distribución de velocidades se corresponde con lo esperado según la distribución de sedimentos en la ciudad de Maracay. La velocidad de ondas de corte suele ser mayor mientras mayor sea la dureza y rigidez de la roca. Así, los sedimentos poco consolidados tienen velocidades de ondas sísmicas menores respecto a los sedimentos consolidados, y también respecto a las rocas ígneas y metamórficas.

Las altas velocidades (330-390 m/s) observadas en las ubicaciones 88,89 y 90 probablemente están relacionadas a bloques de rocas metamórficas que fueron desplazados como consecuencia de los aludes torrenciales que han ocurrido en tiempo geológico reciente en la cuenca El Limón. En la zona noreste de la ciudad, el mapa exhibe un comportamiento similar, es decir, los valores de velocidad incrementan hasta 330 m/s. Este incremento probablemente está asociado a bloques desplazados por aludes torrenciales en la cuenca del río Las Delicias. La comparación expuesta en la [Figura 14](#) presenta pequeñas zonas de alta velocidad en las ubicaciones 95,93 y 63, las cuales también podrían estar asociadas a bloques desplazados desde la cuenca alta del río Las Delicias.

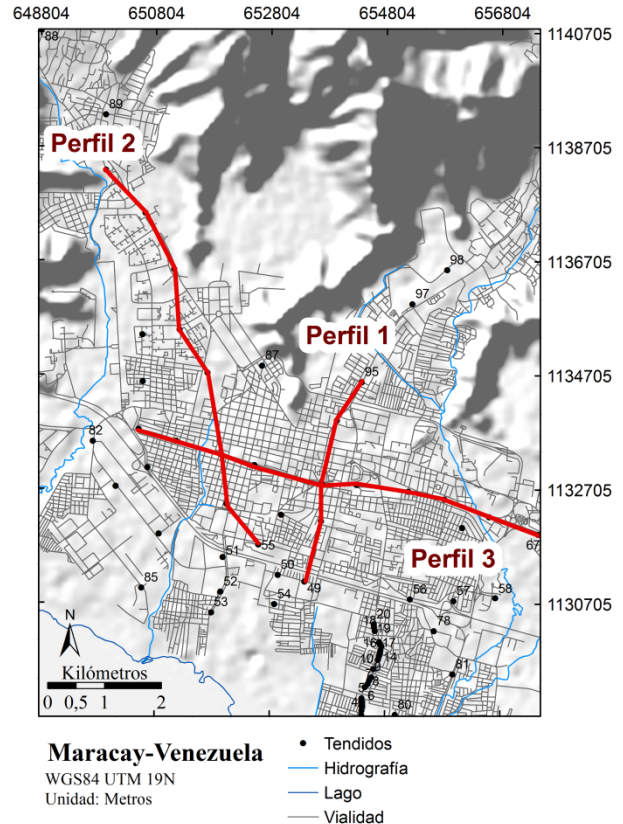
Hacia el oeste de la ciudad, en las ubicaciones de los tendidos 75,76, 59, 77 y 83, los valores de  $V_{s30}$  se reducen a alrededor de 270 a 290 m/s. Esta reducción de los valores de velocidad se atribuye a la presencia de los ríos en la zona, que implica un predominio de sedimentos fluviales, poco consolidados, en la zona delimitada por los dos ríos que se localizan donde se ubican los tendidos antes mencionados.

Los valores de velocidad en la zona este de la ciudad, en las ubicaciones de los tendidos 66, 69, 68, 57,58 y 81, exhiben un comportamiento similar al anteriormente descrito, reduciéndose a valores entre 260-280 m/s. Esto se atribuye a los sedimentos fluviales del río Maracay, depositados en tiempo reciente.

Por último, se identifica una franja de velocidades bajas (240-260 m/s) al sur de los 1130706 m N. Estas velocidades bajas se atribuyen a sedimentos poco consolidados del tipo lacustre, depositados como consecuencia de uno de los períodos de expansión de la superficie del Lago de Valencia, específicamente el Lago Valencia III (Peeters, 1971). El incremento de velocidades hacia el norte de la ciudad está relacionado a la disminución del espesor de estos sedimentos blandos. La influencia de los sedimentos lacustres se hace menor en sentido norte, como se observa en la planicie del valle.

### Perfiles bidimensionales

Para complementar la interpretación y visualización de los datos, se construyeron 3 perfiles en el área de estudio, cuya longitud y dirección se ilustra en la [Figura 15](#), y que se describen a continuación. De manera general, los perfiles corroboran la información presentada en la [Figura 14](#).



**Figura 15.** Distribución de los perfiles de  $V_{s30}$  generados en el área de estudio. Las líneas rojas indican la ubicación de los perfiles.

#### Perfil 49-95

La [Figura 16](#) ilustra una tendencia de velocidades crecientes hacia el norte, con las velocidades menores ubicadas en el sur. Estas velocidades bajas del sur se atribuyen a los sedimentos cuyo origen es el Lago de Valencia, específicamente de su etapa Valencia III. Las velocidades altas a poca profundidad en el norte se relacionan a los bloques de rocas metamórficas desplazados por aludes torrenciales desde los altos topográficos de la zona.

#### Perfil 55-90

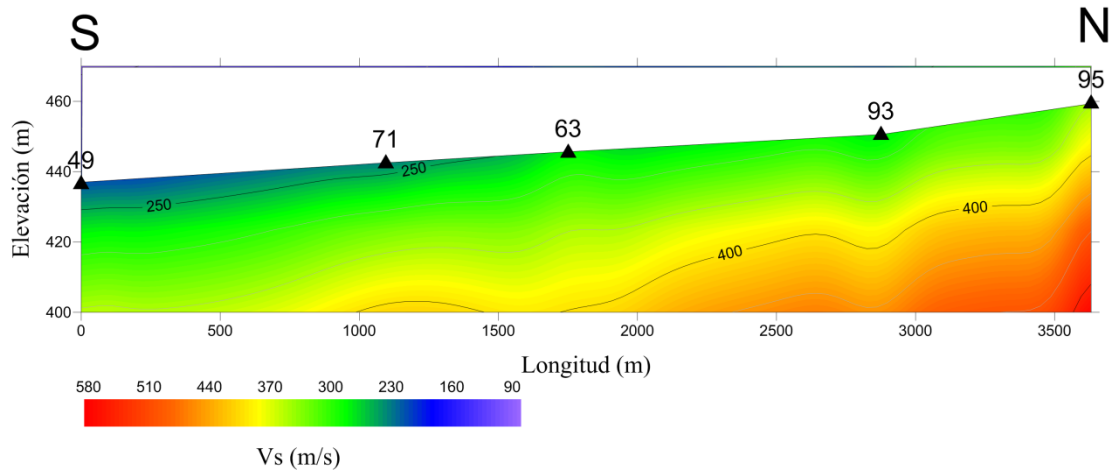
La [Figura 17](#) muestra la distribución de velocidades del perfil 2. Se observa una tendencia bastante similar a la del perfil 1. Las ubicaciones 55 y 73 indican velocidades bajas en los primeros metros de profundidad. En dirección norte los valores de  $V_{s30}$  incrementan, probablemente por efecto de los bloques desplazados por aludes torrenciales.

#### Perfil 59-67

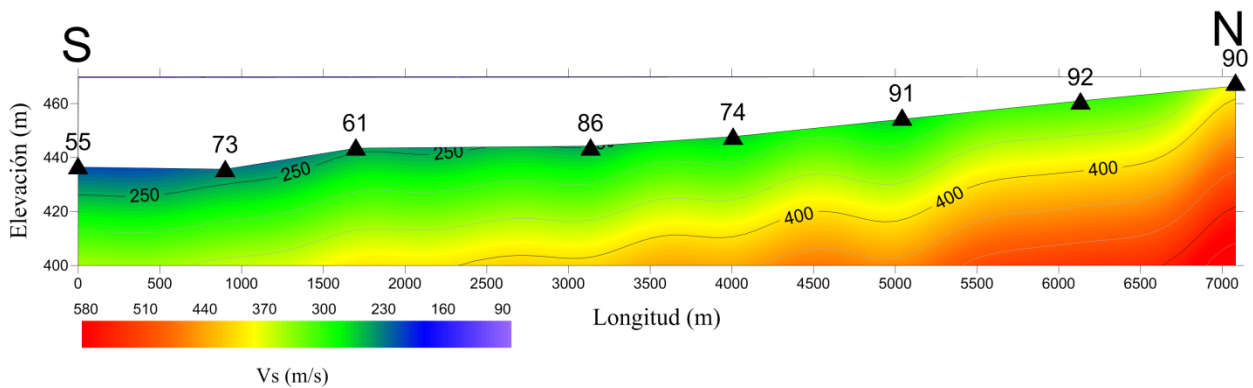
El perfil 3 ([Figura 18](#)), muestra la tendencia de valores de  $V_{s30}$  en las ubicaciones cercanas a los 1132705 m N, en la zona de estudio. Se observa que, hacia el oeste (cerca de los tendidos 5 y 60), dominan los valores de velocidad bajos (230- 280 m/s), lo cual puede ser atribuido a la presencia de los ríos Tapatapa y Güey en la zona oeste de la ciudad.

Hacia el centro del perfil, en la ubicación de los tendidos 63 y 64, los valores de velocidad de ondas S sugieren un incremento notable en profundidad, probablemente por la influencia de una masa de escombros rocosos depositada como consecuencia de aludes torrenciales. Más hacia

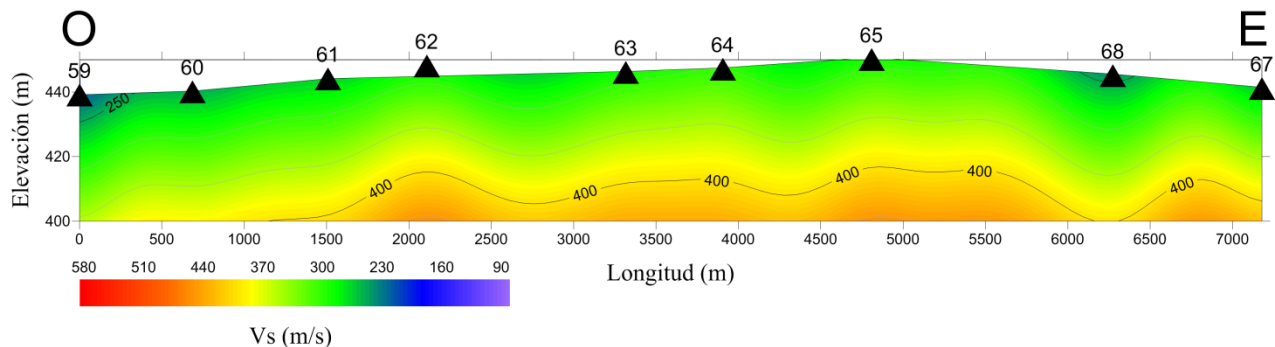
este, en la ubicación del tendido 68, se observan valores de velocidad bajos respecto a los demás valores de la zona. Estos probablemente están relacionados a sedimentos que han sido arrastrados por la corriente del río Maracay.



**Figura 16.** Perfil 1. Tendidos 49-95. Los triángulos de color negro indican la ubicación de las estaciones ubicadas sobre el perfil.



**Figura 17.** Perfil 2. Tendidos 55-90. Los triángulos de color negro indican la ubicación de las estaciones sobre el perfil.



**Figura 18.** Perfil 3. Tendidos 59-67. Los triángulos de color negro indican la ubicación de los perfiles.

## CONCLUSIONES

Se verificó que los resultados obtenidos mediante el análisis interferométrico multicanal (IMASW) concuerdan con los estudios previos realizados aplicando otras metodologías, como estudios de penetración estándar y refracción de microtemores, con un rango de error de  $\pm 30$  m/s. Los resultados también estimaron las características de la velocidad de ondas de corte de los sedimentos distribuidos en la ciudad de Maracay y resultaron concordantes con las esperadas de acuerdo con estudios previos.

Las diferencias cuantitativas entre ambos métodos, como la diferencia de 10% de los valores de Vs30 de IMASW respecto al método ReMi, están condicionadas al criterio para la selección de los pares velocidad-frecuencia que siga el intérprete. En este particular, el criterio de selección de máxima amplitud seguido en el método IMASW trae como resultado una diferencia de velocidades de alrededor de 10% respecto al método ReMi. El método de IMASW permite obtener espectros de energía concentrados que facilitan la selección de la curva de dispersión. Sin embargo, ambos métodos muestran una alta similaridad respecto a resultados.

El método de MASW interferométrico demostró ser una alternativa viable, y más directa para obtener la curva de dispersión, respecto al método de Refracción de Microtemores. La diferencia tanto para el Vs30 calculado, como para los pares velocidad-frecuencia de la curva de dispersión demostró ser lo suficientemente baja como para ser aceptable. El método de MASW interferométrico demostró ser una alternativa viable, y más directa para obtener la curva de dispersión, respecto al método de Refracción de Microtemores. La diferencia tanto para el Vs30 calculado, como para los pares velocidad-frecuencia de la curva de dispersión demostró ser lo suficientemente baja como para ser aceptable.

## RECOMENDACIONES

Tomando en cuenta las conclusiones, se recomienda:

1. Adquisición de mediciones de ruido en una mayor cantidad de ubicaciones, para caracterizar la zona de estudio con mayor detalle y precisión.
2. Adquisición de datos mediante ensayos downhole, para comparar con los resultados obtenidos mediante IMASW.
3. Adquisiciones empleando arreglos lineares más largos, con un mayor espaciamiento entre geófonos y de mayor duración. De manera que sea posible aplicar análisis que permitan identificar la dirección azimutal de propagación de las ondas de fuente pasiva y considerar esta dirección para el análisis dispersivo de los registros, con el objetivo de minimizar la sobrestimación de los valores de Vs30 obtenidos mediante IMASW

## REFERENCIAS

- BAKULIN, A., & CALVERT, R. (2006). The Virtual Source Method: Theory and Case Study. *Geophysics*, 71(4), SI139-SI150.
- BEHM, M., GARRET, M., & SNIEDER, R. (2014). Retrieval of Local Surface Wave Velocities from Traffic Noise-an example from the La Barge Basin (Wyoming). *Geophysical Prospecting*, 62, 223-243.
- BENSEN, G. D., RITZWOLLER, M. H., BARMIN, M. P., LEVSHIN, A. L., LIN, F., MOSCHETTI, M. P., SHAPIRO, N. M., & YANG, Y. (2007). Processing Seismic Ambient Noise Data to Obtain Reliable Broad-Band Surface Wave Dispersion Measurements. *Geophys. J. Int.*, 169, 1239-1260.
- BUENO, E. (1979). *Cuenca del Lago de Valencia. Análisis hidrogeológico e hidrogeoquímico*. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Renovables. pp 44.
- CASALENA, G. (2011). *Caracterización Geofísica del suelo somero mediante la aplicación del método de Refracción por Microtemores (ReMi) en la ciudad de Maracay-estado Aragua*. [Tesis de Grado]. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- CHENG, F., XIA, J., LUO, Y., XU, Z., WANG, L., SHEN, C., LIU, R., PAN, Y., MI, B., & HU, Y. (2016). Multichannel Analysis of Passive Surface Waves Based on Crosscorrelations. *Geophysics*, 81(5), EN57-EN66.
- CHENG, F., XIA, J., XU, Y., XU, Z., & PAN, Y. (2015). A New Passive Method Based on Seismic Interferometry And Multichannel Analysis of Surface Waves. *Journal of Applied Geophysics*, 117, 126-135.
- COVENIN, (2001). *Edificaciones sismorresistentes. Norma venezolana COVENIN 1756:2001*. Comisión Venezolana de Normas Industriales, FONDONORMA, Ministerio de Ciencia y Tecnología, Ministerio de Infraestructura, & FUNVISIS, Caracas.
- CURTIS, A., GERSTOFT, P., SATO, H., SNIEDER, R., & WAPENNAAR, K. (2006). Seismic Interferometry - Turning Noise Into Signal. *The Leading Edge*, 25(9), 1082-1092.
- DIAZ, D. (2018). *Generación de software para el procesamiento de datos de refracción de microtemores (ReMi)*. [Tesis de Grado]. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela.

- FEUVRE, M., JOUBERT, A., DONATIENNE, L., & CÔTE, P. (2014). Passive Multi-Channel Analysis of Surface Waves with Cross-Correlations and Beamforming. Application to a Sea Dike. *Journal of Applied Geophysics*, 114, 36-51.
- FOTI, S., COMINA, C., BOIERO, D., & SOCCO, L. V. (2009). Non-Uniqueness in Surface-Wave Inversion and Consequences on Seismic Site Response Analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, 982-993.
- GOLDEN SOFTWARE, L. (2018). What types of gridding methods are available in Surfer? <https://support.goldensoftware.com/hc/en-us/articles/226628127-What-types-of-gridding-methods-are-available-in-Surfer>
- HACKLEY, P.C., URBANI, F., KARLSEN A.W., & GARRITY C.P. (2006). *Mapa geológico de Venezuela a escala 1:750.000*. U.S. Geological Survey, Open-File Report 2006-1109.
- HERNÁNDEZ, M. A. (2006). *Estudio geológico y reconocimiento de arcillas expansivas en suelos de una zona al sur de Maracay, Estado Aragua*. [Tesis de Grado]. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- LONTSI, A. M., OHRNBERGER, M., Y KRÜGER, F. (2016). Shear Wave Velocity Profile Estimation by Integrated Analysis of Active and Passive Seismic Data from Small Aperture Arrays. *Journal of Applied Geophysics*, 130, 37-52.
- LOUIE, J. (2001). Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(2), 347-364.
- LOUIE, J., PANCHA, A., Y PULLAMMANAPPALLIL, S. (2017). Applications of Refraction Microtremor Done Right, and Pitfalls of Microtremor Arrays Done Wrong. *16th World Conference on Earthquake Engineering*, 16WCEE 2017, Santiago Chile.
- OKADA, H. (2003). The Microtremor Survey Method. *Geophysical Monograph Series*, 12, 65-66.
- PAN, Y., XIA, J., XU, Y., XU, Z., CHENG, F., XU, H., Y GAO, L. (2016). Delineating Shallow S-Wave Velocity Structure Using Multiple Ambient-Noise Surface Wave Methods: An Example from Western Junggar, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(2), 327-336.
- PEETERS, L. (1971). *Nuevos Datos acerca de la evolución de la Cuenca del Lago de Valencia (Venezuela) Durante el Pleistoceno Superior y el Holoceno*. Geografisch Institut, Vrije Universiteit Brussel, pp. 3-10.
- ROJAS, P. (2008). Determinación de los períodos fundamentales del suelo de la ciudad de Maracay, edo. Aragua. [Tesis de Grado, Universidad Simón Bolívar], Sartenejas, Venezuela.
- SÁNCHEZ-SESMA, F. J. (2006). Retrieval of the Green's Function from Cross Correlation: The Canonical Elastic Problem. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 1182-1191.
- SHAPIRO, N. M., Y CAMPILLO, M. (2004). Emergence of Broadband Rayleigh waves from Correlations of the Ambient Noise. *Geophysical research letters*, 31(L07614).
- SNIEDER, R. (2004). Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase. *Physical Review*, 69, 046610-1 - 046610-8.
- STROBBIA, C., Y CASSIANI, G. (2011). Refraction Microtremors: Data Analysis and Diagnostics of Key Hypothesis. *Geophysics*, 76, MA11-MA20.
- VERNÁEZ, G., CANO, V., SCHMITZ, M., MANCHEGO, M., SALCEDO, A., COURTEL, F., LEAL, V., MADRID, I., FLORES, H., RODRÍGUEZ, I., POMBO, A., CAPRILES, M. D., GUZMÁN, J., PAOLINI, M., REINOZA, C., ROCABADO, V., AGUILAR, A., JEGAT, H., ALVARADO, M., CERRADA, M.,... SANZONETTI, J. (2011). *Proyecto de investigación aplicada a la gestión integral del riesgo en espacios urbanos* (FONACIT 2007000939). FUNVISIS.
- WEISSTEIN, E. W. (S.F.). Apodization Function. MathWorld. <http://mathworld.wolfram.com/ApodizationFunction.html>.
- XU, Y., ZHANG, B., LUO, Y., Y XIA, J. (2013). Surface-Wave Observations After Integrating Active and Passive Source Data. *The Leading Edge*, 32(6), 593-724.
- XU, Z., MIKESSELL, T. D., XIA, J., Y CHENG, F. (2017). A Comprehensive Comparison Between The Refraction Microtremor Method and Seismic Interferometry Method for Phase Velocity Estimation. *Geophysics*, 82(6), EN99-EN108.