

Uso de geofísica para determinar el perfil de suelo en las formaciones geológicas de la ciudad de Ocaña, Norte de Santander

Use of geophysics to determine the soil profile in the geological formations of the city of Ocaña, N.S

^a. Romel Jesús Gallardo Amaya, ^b. Luís Fernando Ortega Lozano, ^c. Gustavo Guerrero Gómez

 ^a Magister en Geotecnia, rjgallardo@ufpso.edu.co, Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia

 ^b Ingeniero Civil, lfortegal@ufpso.edu.co, Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia

 ^c Magister en Sistemas Energéticos Avanzados, gguerrero@ufpso.edu.co, Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia

Recibido: Julio 1 de 2021 Aceptado: Noviembre 8 de 2021

Forma de citar: R.J Gallardo Amaya, L.F Ortega Lozano, G. Guerrero Gómez "Uso de geofísica para determinar el perfil de suelo en formaciones geológicas de la ciudad de Ocaña", *Mundo Fesc*, vol. 12, no. 23, pp. 116-125, 2022

Resumen

En la actualidad se ha generalizado el uso de técnicas geofísicas para establecer el perfil de velocidad de onda cortante de un suelo, una de estas técnicas corresponde a la refracción por microtemores, que hace uso del ruido ambiental para medir la velocidad de onda de corte - Vs, parámetro que permite establecer el perfil de suelo acorde a lo indicado en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Para el desarrollo de la investigación se realizaron ensayos geofísicos en 7 sectores de la zona sur-oriental de la ciudad, 15 líneas en sectores con presencia de materiales de una formación geológica de origen sedimentario y 15 en un sector con materiales de una formación geológica de origen ígneo. Las líneas de sondeo se realizaron con una extensión de 58 m, con el fin de establecer la variación de velocidad de onda de corte en los 30 m superiores del perfil de suelo. Se encontró que las velocidades de onda de corte en el perfil de suelo con materiales de origen sedimentario, son menores a las determinadas en el perfil de suelo con materiales derivados de rocas ígneas. Los valores medios de velocidad de onda de corte determinados fueron de 402 m/s para los 30 m de perfil de suelo con materiales de origen sedimentario y 688 m/s para el perfil de suelo de origen ígneo. Estos valores indican, según la Norma Sismo Resistente Colombiana, un perfil de suelo tipo C. Adicionalmente los perfiles de velocidad de onda cortante determinados indican que hay una importante variabilidad en los diferentes sectores de la ciudad donde se tienen materiales de la formación de origen sedimentario.

Palabras clave: Ensayo geofísico, perfil de suelo, ruido ambiental, velocidad de onda cortante.

Autor para correspondencia:

*Correo electrónico: rjgallardo@ufpso.edu.co



Abstract

At present, the use of geophysical techniques to establish the shear wave velocity profile of soil has become widespread, one of these techniques corresponds to refraction by micro-tremors, which makes use of environmental noise to measure the shear wave velocity - V_s , a parameter that allows establishing the soil profile according to what is indicated in the Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. For the development of the research, geophysical tests were carried out in 7 sectors of the south-eastern area of the city, 15 lines in sectors with the presence of materials from a geological formation of sedimentary origin, and 15 in a sector with materials from a geological formation of igneous origin. The sounding lines were carried out with an extension of 58 m, to establish the variation of shear wave velocity in the upper 30 m of the soil profile. It was found that the shear wave velocities in the soil profile with materials of sedimentary origin are lower than those determined in the soil profile with materials derived from igneous rocks. The mean values of shear wave velocity determined were 402 m / s for the 30 m soil profile with materials of sedimentary origin and 688 m / s for the soil profile of igneous origin. These values indicate, according to the Norma Sismo Resistente Colombiana, a type C soil profile. Additionally, the determining shear wave velocity profiles indicate that there is significant variability in the different sectors of the city where there are formation materials of sedimentary origin.

Keywords: Geophysical test, soil profile, environmental noise, shear wave velocity.

Introducción

En un sismo la energía liberada es disipada en el subsuelo mediante ondas que se propagan de manera paralela y perpendicular, estas ondas al llegar al subsuelo se convierten en ondas superficiales, que pueden afectar estructuras al entrar en contacto con ellas, esto dependiendo de la intensidad y profundidad del movimiento telúrico. El comportamiento mecánico del terreno depende en gran parte de esta interacción, produciendo un riesgo de amenaza sísmica según el sitio, Colombia en particular está considerada como una región de alta sismicidad, pues se encuentra en el cinturón del pacífico, la mayor zona de actividad sísmica del mundo. Uno de los parámetros más utilizados para determinar las características del terreno, en cuanto a comportamiento sísmico se refiere es la velocidad de onda cortante en los primeros 30 metros de profundidad (V_{s30}) [1].

Este parámetro se establece mediante métodos geofísicos, entre ellos los métodos sísmicos, que permiten determinar la

velocidad de propagación de las ondas sísmicas, a partir de la medición de los tiempos de viaje [2], además utilizan fuentes de energía controlada y móvil, que, por medio de fenómenos físicos, tales como la reflexión y la refracción de ondas, se puede medir las velocidades de onda S, conforme se propagan por las capas de suelo [4]. Estos valores de V_{s30} permiten establecer los efectos de sitio para un determinado perfil de suelo, de modo que se pueda conocer la respuesta de este ante un evento sísmico [4], [5], [6].

Uno de los métodos para determinar los valores de V_{s30} es la técnica de refracción por micro tremores (ReMi) [7], [8], [9], técnica que corresponde a un método geofísico pasivo, es decir, que utiliza el ruido ambiental para determinar la velocidad de onda cortante. Este método permite obtener resultados coherentes para la caracterización del subsuelo y se ha constituido en un método de menor costo y complejidad que los métodos geofísicos de refracción sísmica que se empezaron a implementar en la década de 1970, el Crosshole y Downhole, técnicas que permiten medir la velocidad

de onda cortante directamente [10].

Para el caso de ciudades como Ocaña, ubicada en una zona de amenaza sísmica intermedia, el cálculo de la velocidad de onda S se realiza a partir de correlaciones basadas en los resultados del ensayo de SPT como se muestra en [11]; igualmente se han desarrollado una diversidad de correlaciones en diferentes partes del mundo como las encontradas en [12]-[17].

Estas ecuaciones son planteadas en condiciones que probablemente difieren de las características locales de la ciudad, y aunque puedan dar una idea del valor de la velocidad de onda cortante, dato que se emplea para determinar el perfil de suelo para considerar los efectos de sitio, no reemplazan los resultados que se pueden obtener con ensayos de medición directa de este parámetro. Así mismo, en la ciudad de Ocaña no se cuenta con estudio de microzonificación sísmica, por lo cual con el uso de métodos geofísicos se podría establecer el tipo de perfil de suelo que se tiene en los diferentes sectores sobre los que se ha desarrollado la ciudad, sectores en los que el subsuelo está conformado por perfiles de materiales pertenecientes a dos formaciones geológicas principalmente, una de origen sedimentario y otra de origen ígneo. Para el desarrollo de la investigación se utilizó el método geofísico pasivo de Refracción por Microtremores [18], de modo que se pudiera conocer la variación de la velocidad de onda cortante en el sector sur oriental de la ciudad, para cada tipo de formación geológica presente.

Materiales y Métodos

En el diseño de experimento para el desarrollo de la investigación se definió

como población todos los materiales que componen las diferentes formaciones geológicas en el perímetro urbano de la ciudad de Ocaña, estableciendo como muestra de estudio los depósitos de materiales ubicados en la zona sur-oriental, pertenecientes a la formación Algodonal, de origen sedimentario, y el complejo ígneo intrusivo-extrusivo [19]-[21].

Para el estudio de los perfiles de suelo en estas formaciones se aplicó el método de ensayo correspondiente a la refracción de micro tremores (ReMi), este método sísmico constituye uno de los más recientes avances aplicados a la caracterización del subsuelo, el cual consiste en la determinación de la distribución de los valores de la velocidad de las ondas de corte (V_s) a través del terreno, a partir del análisis espectral del ruido sísmico ambiental [22].

El proyecto se desarrolló en cuatro etapas, que abarcaron la selección de los sectores coherentes a la muestra planteada, la realización de ensayos de campo por método ReMi, el procesamiento de los datos del perfil de onda cortante haciendo uso del software SeisImager/SW® de la empresa GEOMETRICS y finalmente realizar el análisis respectivo con el fin de conocer los perfiles de velocidades de onda S para los materiales de las formaciones geológicas anteriormente mencionadas en el municipio de Ocaña en la zona de estudio.

Resultados y Discusión

A partir de los resultados obtenidos, de las diferentes líneas de ensayo REMI realizadas, se definieron los perfiles de velocidad de onda de corte (V_s) para los primeros 30 m de profundidad del

terreno en cada sitio definido para la investigación. Con este parámetro y, teniendo en cuenta los criterios definidos en el título A de la Norma Sismo Resistente Colombiana – NSR 10, se estableció el tipo de perfil de suelo para determinar los efectos de sitio en el análisis sísmico. La norma NSR-10 clasifica los perfiles de suelo en 6 categorías, que van desde A ($V_s > 1500$ m/s) a F ($V_s < 180$ m/s); siendo “A” el que corresponde a un perfil de roca competente.

La velocidad media de onda cortante (V_s) es obtenida mediante la ecuación (1).

$$\bar{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n (d_i/V_{si})} \quad (1)$$

Donde V_{si} corresponde a la velocidad de onda corte del suelo en el estrato i , medido en m/s; y d_i es el espesor del estrato i , localizado dentro de los 30 metros superiores del perfil.

Localización de los ensayos

En el desarrollo de la investigación se localizaron 7 sitios de ensayo en la zona sur-oriental del municipio de Ocaña, ver figura 1. En las cuales se desarrollaron visitas de campo, para identificar las condiciones y características locales del lugar, definiendo la extensión e inclinación del terreno, y factores de tránsito vehicular y peatonal.

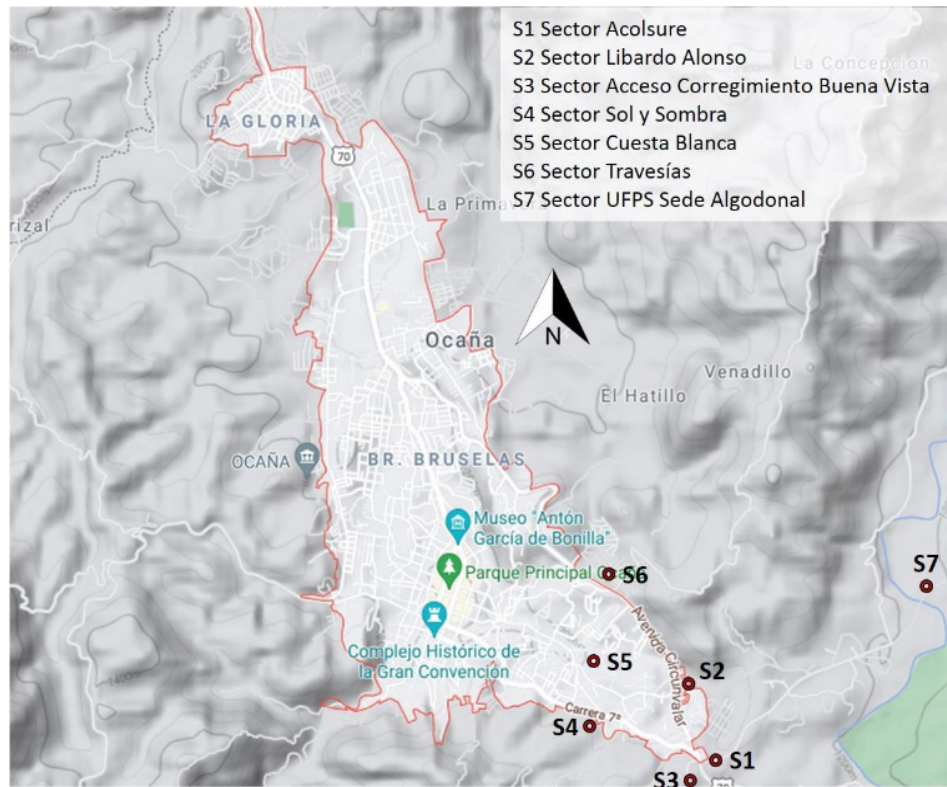


Figura 1. Localización de sitios de estudio en la ciudad de Ocaña, N. S. Fuente: Adaptado de Google Maps (2021).

Geología

El municipio de Ocaña tiene dentro de su perímetro urbano presencia de varias unidades geológicas correspondientes a depósitos cuaternarios (terrazas y aluviones), la formación Algodonal (rocas sedimentarias del terciario) y rocas de tipo ígneo del complejo intrusivo-extrusivo. Siendo las formaciones Algodonal (Tpa) y el Complejo Ígneo Intrusivo-Extrusivo (Jci) las que abarcan la mayor parte del área de la ciudad. La primera está constituida por conglomerados de fragmentos de roca y cuarzo, con interposiciones de areniscas arcillosas y arcillolitas [10]; por su parte el Complejo Ígneo comprende una fase intrusiva cuya composición predominante es cuarzo – monzonita, pórfidos riolíticos, diques básicos de diabasas y basalto; también incluye material piroclástico con presencia de toba, brechas y aglomerados.

Adquisición de datos de campo

Para obtener información de registros de velocidad de onda cortante hasta 30m de profundidad, se requirió utilizar líneas de 60 metros de longitud, las cuales estaban integradas por 24 geófonos espaciados a 2.5 metros. La toma de datos incluía 20 registros de 32 segundos. En la figura 2 se indica la distribución general de los instrumentos y se muestran los componentes del equipo de refracción sísmica por micro tremores ReMi, el cual corresponde a un Geode ultra-lite, de la empresa GEOMETRICS® con 24 canales y geófonos de 4,5 Hz.



Figura 2. Componentes del equipo de refracción sísmica. Fuente: Autores (2020)

Para el caso de la formación de Algodonal se realizaron ensayos en 6 sitios diferentes con 3 líneas de toma de datos cada uno, esto debido a la variabilidad de los depósitos. En el caso de la formación ígnea se realizaron 15 líneas de ensayo en un mismo sector dado que la formación no presenta mucha variabilidad en la zona de estudio.

Procesamiento de datos de campo

La visualización de datos de campo se realizó mediante el programa “Surface Wave Analysis Wizard”, mostrando la información registrada ya sea en el dominio del tiempo o de la frecuencia, tal como se muestra en la figura 3. Posteriormente se obtiene el gráfico de velocidad-frecuencia, en la que se puede identificar el “Modo Fundamental” del movimiento de las ondas, como se ve en la figura 4. Finalmente, se genera el perfil de velocidad de onda cortante (Vs). la figura 5 muestra el perfil de Vs de la línea 3 del sector 4 (S4).

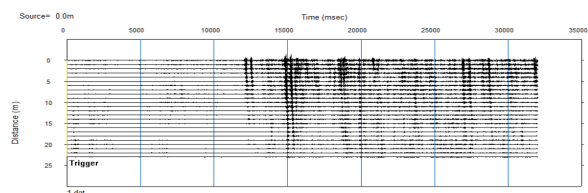


Figura 3. Registro en el dominio del tiempo en la línea número tres del sector 4 (S4). Fuente: Autores (2020)

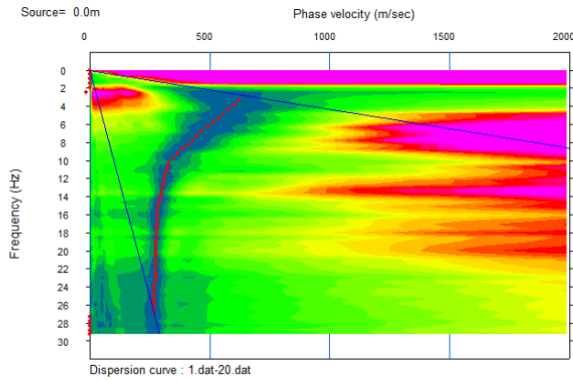


Figura 4. Gráfica de Velocidad de fase vs Frecuencia para la línea número tres del sector 4 (S4). Fuente: Autores (2020)

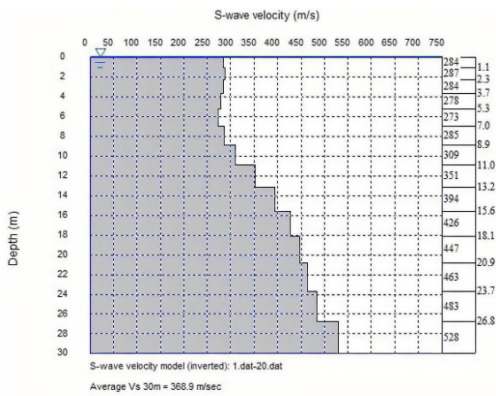


Figura 5. Perfil de Velocidad de Onda cortante para la línea tres del sector 4 (S4). Fuente: Autores (2020)

La Tabla I muestra los valores de Vs30 de las líneas realizadas en los diferentes sitios analizados. Estos valores corresponden al dato ponderado de las velocidades de las primeras capas en los primeros 30 metros del subsuelo, se observa que en los diferentes sitios analizados de la formación algodonal, el valor de la velocidad de onda cortante es siempre inferior a los valores obtenidos en la formación Ígnea.

Tabla I. Valores de Vs30 obtenidos con el ensayo ReMi.

Sector	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Formación Geológica	Sedimentaria (Formación Algodonal)						Ígnea
Líneas realizadas	4	2	4	3	2	1	5
Vs30 (m/s)	401.0	520.0	340.4	398.9	417.2	368.3	688.4

Fuente: Autores, 2020

En la Tabla II se muestra el valor promedio para Vs30 correspondiente a cada formación geológica para el sector de la ciudad donde se desarrolló la investigación y la correspondiente desviación respecto a la media.

Tabla II. Valores promedios de Vs30 para los perfiles de suelo de las formaciones geológicas.

Formación Geológica	Vs30	Desviación (m/s)
Sedimentaria	401.99	57.71
Ígnea	688.44	51.93

Fuente: Autores, 2020

La prueba de normalidad permite conocer si un conjunto de datos se ajusta a una distribución normal [22], en tal sentido, la aprobación de la hipótesis nula ocurre cuando el valor de “p” es mayor a 0.05, y esto significa que los datos siguen una distribución normal, para el caso de ambas formaciones geológicas el valor de “p” es mayor a 0.05 y por lo tanto los valores del estudio siguen una distribución normal que permite darle una confiabilidad al análisis [23], la figura 6 muestra la gráfica de probabilidad para la velocidad de onda cortante de la formación algodonal y la figura 7 muestra la gráfica de probabilidad para la velocidad de onda cortante del complejo ígneo. Como se puede observar los diferentes puntos correspondientes a los resultados de Vs30 se ajustan a la línea recta, lo cual es la forma gráfica de representa la normalidad de los datos, que anteriormente se explicó en función del valor “p”.

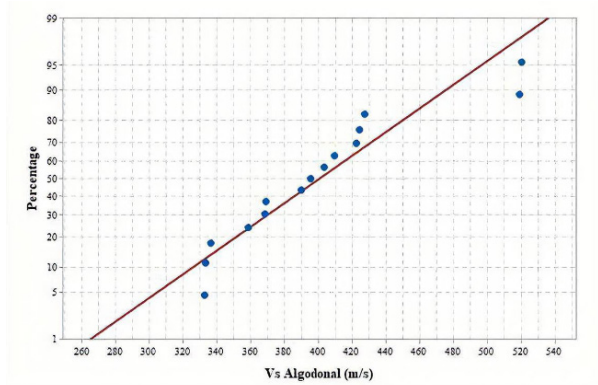


Figura 6. Gráfica de probabilidad para el Vs de la formación algodonada. Fuente: Autores (2020)

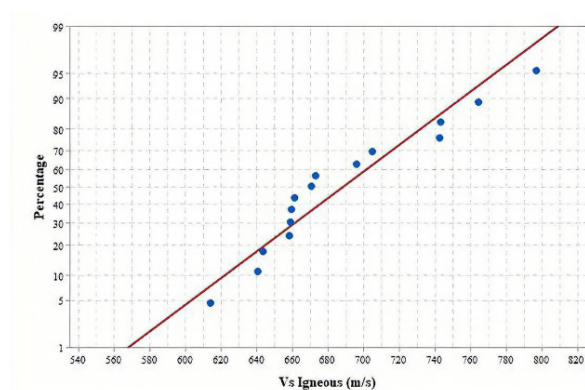


Figura 7. Gráfica de probabilidad para el Vs de la formación ígnea. Fuente: Autores (2020)

Con base en las anteriores gráficas, se puede deducir que el rango de velocidad de onda cortante con mayor concentración de datos para la formación Algodonal se encuentra entre 350 m/s y 450 m/s y para el complejo ígneo entre 650 m/s y 700 m/s, lo que en promedio deja un perfil de suelo tipo “C” o “D” para la primera y tipo “C” para la segunda formación geológica respectivamente.

Descripción de perfil

La descripción del perfil del terreno se hizo tanto para la formación Algodonal como el complejo Ígneo.

Para la formación algodonada se eligió una de las líneas del sector 5 (S5), cuyo valor de Vs es cercano a la media, la figura 8 muestra que en los primeros 6 m el estrato

es el mismo, con una velocidad de 310 m/s, luego la velocidad aumenta hasta valores cercanos a 400 m/s conforme se incrementa la profundidad hasta los 15 m y desde esta profundidad hasta los 30 m se tiene un aumento progresivo hasta los 660 m/s.

De acuerdo a los criterios indicados en el título A de la NSR 10, el valor medio de la velocidad de onda cortante, indicaría un perfil tipo C.

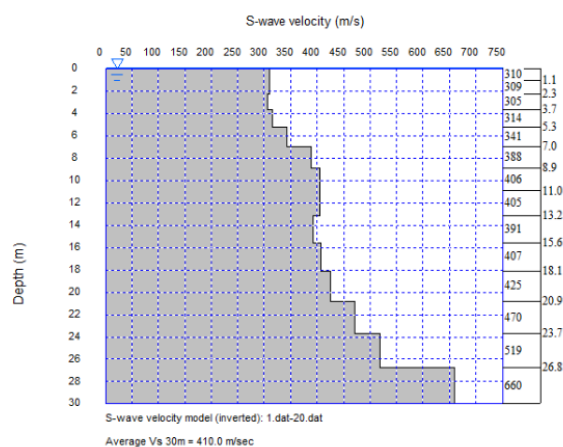


Figura 8. Perfil de análisis de velocidad de onda cortante a 30 metros de profundidad correspondiente a al sector 5. Fuente: Autores (2020)

Por su parte el complejo Ígneo presenta un perfil de velocidad de onda cortante para el sector “S6” con una disminución de la velocidad en los primeros 4 m de profundidad, que puede estar atribuido a la compactación por actividades antrópicas que tienen los materiales de las primeras capas del subsuelo en el sector, sin embargo luego de este estrato de suelo se visualiza un aumento en Vs a medida que se profundiza en el subsuelo, hasta llegar a un valor de 1378 m/s a la profundidad de 30 m, tal como se muestra en la figura 9.

El valor medio de Vs30 para el perfil analizado es de 673.5 m/s, que corresponde a un perfil de suelo tipo C de acuerdo a lo definido en el título A de

la NSR 10.

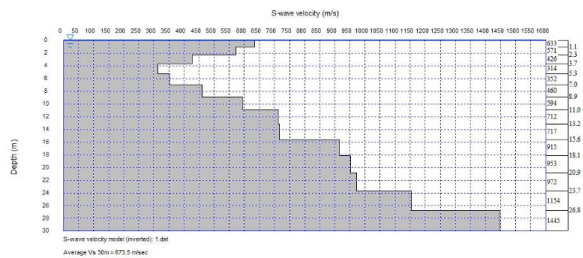


Figura 9. Perfil de análisis de velocidad de onda cortante a 30 metros de profundidad correspondiente al sector 6.
Fuente: Autores (2020)

Conclusiones

Con los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados en el municipio de Ocaña mediante el método geofísico de refracción por micro tremores ReMi, se pudo obtener los perfiles de velocidad de onda cortante de varias zonas del municipio, con base en los datos recopilados y en el análisis estadístico, se determinó el valor de Vs30 para la formación Algodonal en la zona sur-oriental de la ciudad de Ocaña, teniendo un rango de valores desde los 333 m/s hasta 520.5 m/s, con una media a nivel general del valor de la onda cortante a los primeros 30 metros de profundidad de 401.99 m/s para la formación geológica mencionada.

En cuanto a la clasificación de perfil de suelo, acorde a los criterios indicados en el título A de la NSR 10 y el valor de Vs30 media para la zona de estudio, se debe considerar como tipo C, no obstante, la variabilidad observada de valores de Vs30 por debajo y por encima de 360 m/s, una consideración más prudente sería asumir un perfil de suelo tipo D. Lo anterior debido que al analizar los perfiles de velocidad para la formación Algodonal, en la zona de estudio, se aprecia que hasta los primeros 20 m de profundidad los valores de Vs son inferiores a 360 m/s.

Por su parte para los materiales que conforman el subsuelo en la zona donde está presente la formación Ígneo, los valores de velocidad de onda cortante en los primeros 30 metros del subsuelo oscilan entre 613 m/s a 796.8 m/s, teniendo como media general de la formación geológica, en la zona de estudio, un valor de Vs30 de 688.4 m/s. Con respecto a la clasificación del perfil de suelo, el complejo ígneo en la zona sur oriental del municipio debe considerarse como tipo C de acuerdo a los criterios dados en el título A de la NSR 10.

De acuerdo a los valores medios de Vs30 para cada formación en la zona sur-oriental de la ciudad de Ocaña, se aprecia que el perfil del subsuelo correspondiente a la formación de tipo Ígneo presenta una mayor homogeneidad que el correspondiente a la formación de tipo sedimentario, el cual tiene unas marcadas variaciones incluso en un mismo sector de análisis.

Los valores medios de Vs30, en la zona de estudio, en materiales de origen ígneo corresponden a casi el doble de los que se encuentran en materiales de origen sedimentario.

Agradecimientos

Los autores agradecen al ingeniero Leidon Leonardo Sepúlveda Sepúlveda el valioso aporte realizado para la obtención y procesamiento de datos de campo del ensayo REMI, al ingeniero Ciro Andrey Martínez Ovallos y al ingeniero Jaider Coronel Rojas por su aportes en el desarrollo del proyecto.

Referencias

[1] A. Yong, A. Martin, y J. Boatwright,

- “Precision of VS30 values derived from noninvasive surface wave methods at 31 sites in California”*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 127, pp. 1-13, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105802>
- [2] P. Kearey, M. Brooks, y I. Hill. An introduction to geophysical exploration. United State: John Wiley & Sons, Primera Edición, 2013. <https://cutt.ly/IWeP9VE>
- [3] S. Foti, G. Lai, G. J. Rix, y C. Strobbia. Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization. UK: CRC Press Taylor & Francis Group, 2014.
- [4] Asociación Colombiana De Ingeniería Sísmica. Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente. Colombia: Asociación Colombiana De Ingeniería Sísmica, 2010. <https://cutt.ly/TWeAiCq>
- [5] A. Pancha, J. G. Anderson, J. N. Louie, y S. K. Pullammanappallil, *“Measurement of shallow shear wave velocities at a rock site using the ReMi technique”*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Vol. 28 (7), pp. 522-535, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.08.005>.
- [6] M. Sáez, C. Pastén, S. Ruiz, F. Leyton, y J. Salomón, *“Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway”*, Obras y Proyectos. Vol 16, pp. 6-30, 2010. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132014000200001>
- [7] S. Coccia, V. Del Gaudio, N. Venisti, y J. Wasowski, *“Application of Refraction Microtremor (ReMi) technique for determination of 1-D shear wave velocity in a landslide area”*, Journal of Applied Geophysics. Vol. 71, pp. 2-89, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.05.001>
- [8] J. N. Louie, *“Faster Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth From Refraction Microtremor Arrays”*, Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 91(2), pp. 347-364, 2001. <https://doi.org/10.1785/0120000098>
- [9] B. Rosenblad, y J. Li, *“Comparative Study of Refraction Microtremor (ReMi) and Active Source Methods for Developing Low-Frequency Surface Wave Dispersion Curves J”*, Environmental and Engineering Geophysics. Vol. 14(3), pp. 101-154, 2009. <https://doi.org/10.2113/JEEG14.3.101>
- [10] J. Ramirez, y L. Aldrich. La Transición océano-continente en el suroeste de Colombia. Colombia: Editora Guadalupe ltda. 1997.
- [11] A. J. Alfaro, *“Correlación entre el valor N del ensayo de penetración estándar y velocidad de ondas de corte para arcillas en Bogotá-Colombia”*, Revista Épsilon. Vol. 8, pp. 13-23, 2007 <https://ciencia.lasalle.edu.co/ep/vol1/iss8/3/>
- [12] B. Kirar, B. K. Maheshwari y P. Muley, *“Correlation between shear wave velocity (vs) and SPT resistance (N) for Roorkee region”*, IJGGE, vol. 2, no. 9, pp. 1-11, 2016. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40891-016-0047-5.pdf>
- [13] A. Hara, T. Ohta, M. Niwa, S. Tanaka, y T. Banno, *“Shear modulus*

- and shear strength of cohesive soils*”, Soil and Foundations Vol. 14, pp. 1 – 12, 1974. https://www.jstage.jst.go.jp/article/sandf1972/14/3/14_3_1/_article/-char/ja/
- [14] T. Satoh, H. Kawase y S. Matsushima, “*Estimation of S-Wave Velocity Structures in and around the Sendai Basin, Japan, Using Array Records of Microtremors*”, BSSA, vol. 91, no. 2, pp. 206–218, 2001, <https://doi.org/10.1785/0119990148>
- [15] Y. Ohta, y N. Goto, “*Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes, Earthq. Eng. Struc. Dyn* Vol. 6: pp. 167-187, 1978, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eqe.4290060205>
- [16] T. M. K. Akin, S. L. Kramer y T. Topal, “Empirical correlations of shear wave velocity (Vs) and penetration resistance (SPT-N) for different soils in an earthquake-prone area (Erbaa-Turkey)”, Engineering geology, vol. 119, no. 1-2, pp. 1-17, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.01.007>
- [17] Japan Road Association. Specifications for Highway Bridges, Part V, Seismic Design. Japan: Road Association, 2012. <http://www.road.or.jp/english/publication/index.html>
- [18] V. H. Garduño, J. Chávez, J. Aguirre, R. Vázquez, H. Mijares, I. Israde y R. Pérez, “Zonificación de los periodos naturales de oscilación superficial en la ciudad de Pátzcuaro, Mich., México, con base en microtremores y estudios de paleosismología”, *Revista mexicana de ciencias geológicas*, vol. 26, no. 3, pp. 623-637, 2009, <https://cutt.ly/iWeJLAJ>
- [19] R. Hernández, C. Fernández y M. Baptista. Metodología de la investigación. México: McGraw-Hill, 2014.
- [20] R. J. Gallardo, T. E. Barbosa y A. A. Macgregor, “Investigación geotécnica para la estabilización de las laderas del barrio San Fermín, municipio de Ocaña, departamento de Norte de Santander (Colombia)”, Inge Cuc, vol. 9, no. 2, pp. 66-74, 2013, <https://cutt.ly/iWeKBdW>
- [21] J. M. Dufour, A. Farhat, L. Gardiol, y L. Khalaf. “Simulation-based Finite Sample Normality Tests in Linear Regressions”, *Econometrics Journal*. Vol. 1, pp. 154-173, 1998.
- [22] C. Morales, M. Schmitz, y S. Pullammanappallil, “Calibration of the geological/geophysical subsurface model for barquisimeto and cabudare using seismic methods and surface response spectra”, *Boletín de Geología*. Vol. 37(1), pp. 57-66, 2015, <https://cutt.ly/VWeLrdG>
- [23] E. Seier, “*Comparison of tests for univariate normality*”, *InterStat Statistical Journal*, vol. 1, pp. 1-17, 2002, <https://cutt.ly/UWeCosN>