


|   |   |                     |                   |          |
|---|---|---------------------|-------------------|----------|
|  | <b>UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA</b> |                     |                   |          |
|   | Documento   | Código              | Fecha             | Revisión |
|   | <b>FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO</b>  | <b>F-AC-DBL-007</b> | <b>10-04-2012</b> | <b>A</b> |
| Dependencia   | Aprobado  |                     | Pág.              |          |
| <b>DIVISIÓN DE BIBLIOTECA</b>   | <b>SUBDIRECTOR ACADEMICO</b>                          |                     | <b>i(103)</b>     |          |

## RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

|   |   |                  |          |
|---|---|------------------|----------|
| AUTORES   | <b>BRUNNY HELENA ORTEGA CONTRERAS<br/>JOHAN SNEIDER PEREZ PALLARES</b>                                    |                  |          |
| FACULTAD  | <b>INGENIERIAS</b>  |                  |          |
| PLAN DE ESTUDIOS  | <b>INGENIERÍA CIVIL</b>   |                  |          |
| DIRECTOR  | <b>MSC. ROMEL JESÚS GALLARDO AMAYA</b>  |                  |          |
| TÍTULO DE LA TESIS  | <b>METODOS DE EXPLORACION DEL SUBSUELO PARA LA DETERMINACION DEL PERFIL DE VELOCIDAD DE ONDA CORTANTE</b> |                  |          |
| <b>RESUMEN</b><br>(70 palabras aproximadamente)   |   |                  |          |
| <p>MONOGRAFIA DE COMPILACION SOBRE LOS METODOS DE EXPLORACION DEL SUBSUELO QUE SE UTILIZAN PARA DETERMINAR EL PERFIL DE VELOCIDAD DE ONDA CORTANTE, CONOCIDOS COMO GEOFISICOS, MEDIANTE LOS CUALES SE LOGRA CONOCER LA UTILIDAD Y VENTAJAS PARA DETERMINACION DE PARAMETROS DINAMICOS DEL SUBSUELO ENTRE ELLOS EL PARAMETRO DE VELOCIDAD DE ONDA CORTANTE VS.</p> <p>SE PRESENTAN LOS PROCEDIMIENTOS Y VENTAJAS DE CADA METODO, ASI COMO LOS CRITERIOS DE LA NORMA SISMO RESISTENTE COLOMBIANA NSR-10 SOBRE EL PARAMETRO VS PARA CLASIFICACION DE SUELOS Y ROCAS, POR MEDIO DEL CUAL SE PUEDE DETERMINAR EL ESPECTRO ELASTICO DE DISEÑO, ASI COMO OBTENER LAS RECOMENDACIONES ADECUADAS PARA UN CORRECTO DISEÑO DE CIMENTACIONES.</p> |   |                  |          |
| <b>CARACTERÍSTICAS</b>  |   |                  |          |
| PÁGINAS: 98   | PLANOS:   | ILUSTRACIONES:40 | CD-ROM:1 |



MÉTODOS DE EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO PARA LA DETERMINACIÓN DEL  
PERFIL DE VELOCIDAD DE ONDA CORTANTE

Autores

BRUNNY HELENA ORTEGA CONTRERAS

JOHAN SNEIDER PÉREZ PALLARES

Trabajo de grado modalidad monografía presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Civil.

Director

MSc. ROMEL JESÚS GALLARDO AMAYA

INGENIERO CIVIL

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

Ocaña, Colombia

Septiembre, 2020

## Dedicatoria

Este triunfo va dedicado primeramente a Dios por su infinito amor y bondad conmigo, mi fiel compañía durante todo este proceso, él ha sido la razón de mis victorias, aunque muchos lo llamaron suerte, yo sé que siempre fue Dios.

A mi familia, porque este logro es por ellos y para ellos, mis padres Mary y David que los amo infinito, ustedes siempre me dieron el aliento y la fuerza necesaria para alcanzar esta meta y sé que nunca dejaron de orar por mí, gracias, por tanto.

A mis hermanos Marce y Hernán, este triunfo también va para ustedes dos y para mis sobrinos Alex y Maricela, gracias por su estímulo constante y apoyo incondicional, todos ustedes han sido el motor que impulsa mi vida.

A los hermanos que la vida me regalo, mis amigos del alma Karen y Ender, por enseñarme lo importante de la amistad, porque han sido los mejores años y las mejores experiencias a su lado, gracias por su lealtad, su paciencia y cariño, a mis amigos y colegas pasados y presentes, fue una dicha compartir toda esta aventura con ustedes, Liseth, Jennifer, Luis miguel, Jose, Johan, Luis ángel, son muchos los momentos inolvidables que me llevo de cada uno. Los quiero, y prometo tenerlos en mis oraciones. A mi universidad, mis profesores y colegas. ¡Éxitos!

Brunny Helena Ortega Contreras

## **Dedicatoria**

Este logro en mi vida está dedicado primeramente a Dios quien ha guiado mis pasos desde el principio.

A mis padres Humberto Pérez quien su único deseo ha sido que sus hijos lleguen lejos y sean felices y Adelina Pallares en cuya mente estoy presente cada noche y cada madrugada en sus oraciones, ustedes nunca perdieron la fe en mí y siempre estuvieron para ayudarme a superar cualquier obstáculo.

A mis hermanos Nayla Pérez y Cristian Pérez, quienes siempre me apoyan y están para mí cuando lo necesito, a mis sobrinos Kandy, Josué y Cristian, después de su llegada a este mundo pude ver más claro el significado de amor y me llené de más fuerza para lograr mis sueños, también quiero dedicar este logro a mis amigos de universidad, que siempre estuvieron conmigo para compartir conocimientos y momentos agradables como también tristes, esos amigos con los que tal vez no hable a diario, pero sé que puedo contar con ellos en cualquier momento.

Johan Sneider Pérez Pallares

## Índice general

|  |      |
|--|------|
| Introducción .....   | xiii |
| Generalidades.....   | xiii |
| Planteamiento del problema .....   | xv   |
| Objetivo .....   | xvi  |
| Capítulo 1. Métodos de exploración geotécnica para la caracterización del subsuelo. .... | xvi  |
| 1.2 Métodos de reconocimiento directo o mecánicos .....                                  | 3    |
| 1.2.1 Las excavaciones abiertas o subterráneas.....                                      | 3    |
| 1.2.2 perforaciones. ....  | 4    |
| 1.3 Métodos de reconocimiento indirecto.....   | 7    |
| 1.3.1 Métodos eléctricos.....  | 8    |
| 1.3.2 Métodos electromagnéticos .....  | 9    |
| 1.3.3 Métodos sísmicos .....   | 12   |
| 1.3.4 Métodos gravimétricos .....  | 17   |
| 1.3.5 Métodos magnéticos.....  | 18   |
| Capítulo 2. Ensayos para medir velocidad de onda cortante .....                          | 19   |
| 2.1 Teoría de ondas elásticas.....   | 19   |
| 2.1.1 Ondas corporales .....   | 20   |
| 2.1.2 Ondas superficiales.....   | 21   |
| 2.2 Velocidades de onda.....   | 22   |
| 2.3 Velocidad de onda de corte .....   | 23   |
| 2.4 Correlaciones con penetración estándar .....   | 27   |
| 2.5 Refracción y reflexión sísmica.....  | 33   |
| 2.6 Refracción de Micro tremores (Remi) .....  | 37   |
| 2.7 Análisis multicanal de ondas (MASW).....   | 38   |
| 2.8 Análisis espectral de ondas superficiales (SASW) .....                               | 40   |
| 2.9 Down hole .....  | 44   |
| 2.10 Cross hole.....   | 47   |
| 2.11 Método de Nakamura o Razón espectral H/V.....                                       | 49   |
| 2.12 Método de autocorrelación espacial (SPAC) .....                                     | 52   |

|   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| 2.13 Método de autocorrelación espacial extendida (ESAC) .....  | 55                                   |
| Capítulo 3. Criterios de la norma colombiana sobre el parámetro $V_s$ para clasificación de suelos y rocas. ....        | 58                                   |
| 3.1 Efectos de Sitio.....   | 58                                   |
| 3.2 Espectro elástico de diseño .....   | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| 3.2 El parámetro $V_{s30}$ .....  | 62                                   |
| 3.3 Definición del perfil de suelo de acuerdo a la NSR 10 .....   | 62                                   |
| 3.4 Aplicación de métodos geofísicos para establecer perfiles de velocidad de onda de corte en la ciudad de Ocaña. .... | 65                                   |
| 3.4.1 Geología urbana del municipio de Ocaña.....   | 65                                   |
| 3.4.2 Investigación realizada en la ciudad de Ocaña.....  | 69                                   |
| Capítulo 4. Conclusiones .....  | 76                                   |
| Referencias.....  | 80                                   |

## Lista de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1 Clasificación de los métodos directos de exploración geotécnica. ....   | 1  |
| Tabla 2 Clasificación de los métodos indirectos de exploración geotécnica. ....   | 2  |
| Tabla 3 Tipo de roca .....  | 26 |
| Tabla 4 . Clasificación de los perfiles de suelo de acuerdo a la velocidad de ondas S.....  | 63 |
| Tabla 5. Valor promedio de Onda P y Onda S en los materiales de la formación algodonal<br>obtenidos hasta los 15m de profundidad..... | 70 |
| Tabla 6. Valores promedio de Vs30 para la formación algodonal e ígnea .....   | 74 |
| Tabla 7. Valores de Vs30 representativos de la formación algodonal e ígnea y su desviación...   | 74 |

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Excavación manual apique, 2017. Autores. ....   | 4  |
| Figura 2. Muestra tipo terrón con parafina, 2017. Autores.....  | 4  |
| Figura 3. Toma de muestra en frascos, 2017. Autores.....  | 7  |
| Figura 4. Ejemplo de curva eléctrica (SEV). Geotem ingeniería S.A de C.V. (2016).<br>Caracterización geofísica y monitoreos de sitios contaminados método de Sondeo eléctrico<br>vertical. Obtenido de <a href="http://www.geotem.com.mx/electrico1.php">http://www.geotem.com.mx/electrico1.php</a> .....  | 9  |
| Figura 5. Ejemplo de un flujo de corriente inducido en un terreno uniforme, según McNeill.<br>(1980). Métodos de reconocimiento del subsuelo, Enseñanza de las ciencias de la tierra.<br>Obtenido de: <a href="https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/88760/132929">https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/88760/132929</a> ..... | 10 |
| Figura 6. Ensayo de refracción sísmica, 2018, Obtenido de<br><a href="https://www.geoexce.com/index.php/metodoss/sismicos/sismica-de-refraccion">https://www.geoexce.com/index.php/metodoss/sismicos/sismica-de-refraccion</a> .....  | 13 |
| Figura 7. Geófono de 14.5 Hz para ensayo de refracción sísmica, 2019, Obtenido de GIGMA. 14   |    |
| Figura 8. Ubicación de sensores para ensayo de refracción sísmica y Masw, 2019, obtenido de<br>GIGMA. ....  | 15 |
| Figura 9. Ejemplo de un sector de mayor gravitación debido a minerales en el subsuelo.<br>Rodríguez. R. (2019). Clasificación de métodos geofísicos, gravimetría. Obtenido de<br><a href="https://www.medellin.unal.edu.co/~rrodriguez/geologia/Geofis04.gif">https://www.medellin.unal.edu.co/~rrodriguez/geologia/Geofis04.gif</a> .....          | 17 |
| Figura 10. Deformaciones elásticas y movimientos de partículas del terreno asociados con el<br>paso de ondas corporales(A) Onda P, (B) Onda S. Lazcano. S. (2007). Obtenido de<br>Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie.pdf.....  | 20 |
| Figura 11. Efectos mecánicos de las ondas sísmicas. Sáez. M. Correlación cruzada de ruido<br>sísmico para la obtención de perfiles profundos de velocidad de onda de corte en la cuenca de  |    |



|  |    |
|--|----|
| Santiago. (2016). Obtenido de <a href="https://www.researchgate.net/figure/Figura-41-Efectos-mecanicos-de-las-ondas-sismicas-Ondas-de-cuerpo-a-ondas-P-y-b_fig3_301779521">https://www.researchgate.net/figure/Figura-41-Efectos-mecanicos-de-las-ondas-sismicas-Ondas-de-cuerpo-a-ondas-P-y-b_fig3_301779521</a> .....              | 22 |
| Figura 12. Representación esquemática de la medición simultánea de velocidad de la onda S con la prueba de penetración estándar. Ohta y Goto. <i>Shear Wave Velocity Measurement During A Standard Penetration Test</i> ”, <i>Earthquake Engineering and Structural Dynamics</i> .....   | 28 |
| Figura 13. Trayectoria en forma recta asumida entre el punto de impacto y el geófono en superficie para los cálculos de VS. Imagen adaptada de Ohta y Goto. (1979). Autores 2020. ....   | 29 |
| Figura 14. Tiempos de arribo de ondas de corte para el caso experimental de medición de ondas de corte en Sapporo (Japón) durante un ensayo de penetración estándar. Ohta y Goto (1979), obtenida de <a href="https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/1267">https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/1267</a> ..... | 30 |
| <i>Figura 15.</i> Resultados de la medición de velocidades de onda de corte durante el desarrollo del ensayo de penetración estándar. Ohta y Goto (1979). obtenida de <a href="https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/1267">https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/1267</a> .....                                | 31 |
| Figura 16. Comparación de Vs reportados por Otha y Goto 1979, y valores recalculados mediante el modelo inferido. Ohta y Goto. Aponte. J.A. <i>Evaluación de Métodos No Convencionales de Caracterización Geotécnica.</i> (2011). Obtenido de <a href="https://repository.javeriana.edu">https://repository.javeriana.edu</a> .....  | 32 |
| Figura 17. Esquema general de ejecución de ensayos de refracción y reflexión sísmica, Aponte. J.A. <i>Evaluación de Métodos No Convencionales de Caracterización Geotécnica.</i> (2011). Obtenido de <a href="https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/1267">https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/1267</a> ..... | 34 |
| Figura 18. Armado de un sismógrafo con doce canales que muestra el camino de las ondas directas y refractadas en un sistema de dos capas suelo/roca ( $\alpha c$ =ángulo crítico), obtenido de <i>ASTMD 5777</i> , 2000.....   | 36 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 19. Diferentes estratos del suelo y sus velocidades. Autores, 2020. ....  | 36 |
| Figura 20. Pasos principales de la técnica Remi. Adaptada de Linares, (2005). ....   | 38 |
| Figura 21. velocidad de recorrido por un medio uniforme y por un medio estratificado, método SASW, Rinaldi. V. (2002). ....  | 40 |
| Figura 22. Configuración en terreno método SASW, Rinaldi Víctor, 2002. ....  | 41 |
| Figura 23. Ubicación de sensores con eje de simetría para registro de datos por el método SASW. Ochoa F, (2017). ....  | 42 |
| Figura 24. Arreglo de fuente común, método SASW (Ochoa F., 2007). ....   | 43 |
| Figura 25. curva de dispersión experimental (Peredo V., 2011) ....   | 43 |
| Figura 26. <i>curva de dispersión experimental promedio (Peredo V., 2011)</i> . ....   | 44 |
| Figura 27. Arreglo del ensayo Down Hole. Obtenido de <a href="https://sismica.com.mx/layout/procedimientos/arreglo-tipico-down-hole.jpg">https://sismica.com.mx/layout/procedimientos/arreglo-tipico-down-hole.jpg</a> ....  | 45 |
| Figura 28. Cambios en la frecuencia y amplitud por la llegada de la onda P y S (ASTM D7400 – 08) ....  | 46 |
| Figura 29. Resultado ensayo downhole, onda S y onda P, en profundidad. Obtenido Red Sismológica, Idiem ....  | 47 |
| Figura 30. ensayo Crosshole con dos sondeos, Ochoa F, obtenido de <a href="https://www.researchgate.net/figure/Figura-27-Esquema-Cross-hole_fig1_30754418">https://www.researchgate.net/figure/Figura-27-Esquema-Cross-hole_fig1_30754418</a> ....   | 48 |
| Figura 31. Arribos típicos del ensayo crosshole, a) golpe hacia arriba, b) golpe hacia abajo, Giacheti & Rocha, 2019, obtenido de <a href="https://www.researchgate.net/figure/Figura-27-Esquema-Cross-hole_fig1_30754418">https://www.researchgate.net/figure/Figura-27-Esquema-Cross-hole_fig1_30754418</a> . .... | 48 |
| Figura 32. Grafica de ondas de frecuencias Vs relación espectral H/V en un suelo con roca, Sandoval & Vera, (2013). ....   | 51 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 33. Procedimiento del método SPAC, obtenido de <a href="https://www.cotecno.cl/metodo-spac/">https://www.cotecno.cl/metodo-spac/</a><br>.....   | 55 |
| Figura 34. Análisis de autocorrelación espacial extendida (ESAC): (a) matriz bidimensional, (b) distancias entre pares de canales considerados, (c) curva de dispersión aparente recuperada (también indica el área de alias espacial). Obtenido de Foti et al. ....   | 57 |
| Figura 35. paso de ondas sísmicas por terreno blando y roca dura.....  | 59 |
| Figura 36. Mapa Geológico del Municipio de Ocaña N.S. Adaptado del Plan Básico de Ordenamiento Territorial, municipio de Ocaña. 2002 .....   | 67 |
| Figura 37. Ampliación de la leyenda del mapa geológico de Ocaña. Adaptado del Plan Básico de Ordenamiento Territorial, municipio de Ocaña. 2002. ....  | 68 |
| Figura 38. Perfil de velocidad de onda P, zona Acolsure, con rms error de 0,888884 msec. formación algodonal. Martínez & Sepúlveda, obtenido de: Determinación de los parámetros dinámicos en los materiales que componen la formación algodonal en Ocaña Norte de Santander mediante métodos geofísicos, 2017 ..... | 71 |
| Figura 39. Perfil de velocidad de ondas S, zona Acolsure, con rms error de 1,254330%, formación algodonal. Martínez & Sepúlveda, obtenido de: Determinación de los parámetros dinámicos en los materiales que componen la formación algodonal en Ocaña Norte de Santander mediante métodos geofísicos, 2017 .....    | 72 |
| <i>Figura 40.</i> Comparación de perfiles de suelo obtenidos con ensayo REMI y MASW, en un sector donde está presente El complejo ígneo Intrusivo- Extrusivo. Sepúlveda y Ortega, 2020. ....   | 73 |

## Introducción

Los estudios geotécnicos se han establecido como una parte fundamental y de vital importancia en la ejecución de los proyectos de ingeniería civil, debido a que estos representan un conjunto de actividades que permiten obtener información aproximada de las condiciones, características, y propiedades que posee el suelo, además, de contemplar los análisis y recomendaciones necesarias para el diseño y posterior construcción del sistema de cimentación más adecuado para la edificación proyectada (*Asociación Colombiana de ingeniería sísmica*, 2010). Dentro de estos estudios, se encuentran los métodos geofísicos, un conjunto de ensayos no destructivos que contribuyen en la exploración del subsuelo y permiten conocer sus características basados en procesos de medición de la propagación de ondas elásticas.

En Colombia, los estudios geotécnicos de tipo geofísico son poco frecuentes, pese a que son un método alternativo más económico, con el cual se determinan diferentes parámetros del suelo, entre estos, la velocidad de onda cortante o  $V_s$ . Sin embargo, desde la década de 1970 métodos como refracción sísmica - reflexión sísmica, Down hole & crosshole empezaron a usarse y diez años más tarde, en 1980 se implementaron diversos métodos de onda de superficie. Adicionalmente es importante destacar las correlaciones empíricas establecidas en la literatura entre el número de golpes por pie medido en los ensayos de penetración estándar tradicionales, y velocidades de onda de corte  $V_s$ . (Aponte, 2011). Esto nos muestra que las principales pruebas geofísicas de campo empleadas actualmente, han estado por años entre nosotros, no obstante, su uso es poco frecuente debido a que se estima que unos métodos son más acertados que otros,

generando desconfianza al momento de obtener los resultados. Por otra parte, la caracterización de los suelos con base en la velocidad de onda de corte  $V_s$  se encuentra incluida dentro de las regulaciones para el diseño sismo resistentes descritas en los títulos A y H del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente 2010. Sin embargo, a pesar de las múltiples técnicas que existen para la exploración del subsuelo y determinación de este parámetro, es poco frecuente que se implementen tales métodos durante los estudios previos de un proyecto civil. Por tal razón en esta monografía se plantea realizar una compilación de información referente a los métodos de exploración geotécnica con los que se determinan las velocidades de onda de corte y sus perfiles, para estudiar su utilización como alternativas confiables en estudios previos en terrenos, análisis y diseño de estructuras y diseño de cimentaciones.

## **Generalidades**

### **Planteamiento del problema**

En la exploración del suelo, es muy importante poder utilizar técnicas que ofrezcan resultados confiables y en corto tiempo, ya que, en los proyectos de ingeniería civil, realizar ciertos ensayos para conocer el tipo de suelo y sus propiedades, representa costos muy elevados en comparación con el tamaño del proyecto, además de que algunos consumen mucho tiempo en su implementación. Adicionalmente, si se trata de proyectos grandes, utilizar los métodos correctos de acuerdo a la obra, representa beneficio en disminución de los costos, tiempos y la energía necesaria para realizar tales ensayos.

Actualmente existe un conjunto de técnicas que permiten explorar el subsuelo y obtener la información requerida para determinar los análisis estructurales de las futuras construcciones, tales técnicas se conocen como métodos geofísicos y están basados en procesos de medición de la propagación de ondas elásticas, proporcionando ventajas en la implementación en campo debido a que son de tipo no invasivos y ventajas en el análisis para determinar ciertos parámetros del suelo, sin embargo es muy poco frecuente que se implementen estos estudios durante las etapas previas de la construcción de una obra debido a que muchas de las técnicas geofísicas no son conocidas y por lo tanto los resultados obtenidos generan desconfianza.

**Objetivo**

Realizar una recopilación sobre los métodos de exploración del subsuelo que se utilizan para determinar el perfil de velocidad de onda cortante mediante una compilación de información bibliográfica encontrada en diversas fuentes para conocer su utilidad y ventajas como ensayos de exploración del subsuelo en sitios donde se realizara una obra civil.

## **Capítulo 1. Métodos de exploración geotécnica para la caracterización del subsuelo.**

La exploración del suelo en un área donde se desarrollará un proyecto de ingeniería civil, es de suma importancia para el desarrollo de los estudios, análisis y diseños geotécnicos, esto debido a que “los suelos, así como las rocas, son materiales complejos, son multifásicos, particulares y discontinuos; por lo tanto, su comportamiento mecánico no puede describirse en general utilizando modelos simples” (Dal G. 2015). En este capítulo se realizó una recopilación de los principales métodos de exploración geotécnica del subsuelo, los cuales se dividen en directos e indirectos; para tal fin, se ha sintetizado la información de investigaciones realizadas por diferentes autores. En las tablas 1 y 2 se incluyen los métodos más relevantes que se abarcan en este trabajo.

Tabla 1  
*Clasificación de los métodos directos de exploración geotécnica.*

| <b>MÉTODOS DIRECTOS</b>                     |  |
|---|--|
| TIPO  | CONFORMADO POR   |
| <b>Excavaciones abiertas o subterráneas</b> | Apiques, pozos, trincheras y galerías.                                 |
| <b>perforaciones</b>                        | Sondeos mecánicos, sondeos a percusión, sondeos a rotación, muestreos. |

*Nota:* En el desarrollo del capítulo 1, se incluye la descripción de estos métodos. Autores, 2020



Tabla 2  
 Clasificación de los métodos indirectos de exploración geotécnica.

| <b>MÉTODOS INDIRECTOS</b>        |  |
|----------------------------------|--|
| TIPO                             | CONFORMADO POR                                       |
| <b>Métodos eléctricos</b>        | Sondeo eléctrico vertical SEV, Calicatas eléctricas. |
| <b>Métodos electromagnéticos</b> | Ensayo de conductividad electromagnética.            |
| <b>Métodos sísmicos</b>          | Refracción sísmica, Masw, Remi, Crosshole, Downhole  |
| <b>Métodos gravimétricos</b>     | Ensayo de gravimetría                                |
| <b>Métodos magnéticos</b>        | Método de campos magnéticos                          |

*Nota:* En los métodos sísmicos, se mencionan las técnicas con más relevancia, sin embargo, en el desarrollo del capítulo 2, se incluye una descripción más amplia de este método. Autores, 2020.

## **1.2 Métodos de reconocimiento directo o mecánicos**

Los métodos de reconocimiento directo o mecánicos son aquellos que comprenden varias actividades como excavaciones, cuyo fin es obtener información directa del suelo, a su vez, estos métodos incluyen actividades de perforación, penetración y toma de muestras con las que se determinan las demás condiciones del terreno y establecer así sus características físicas y sus comportamientos mecánico e hidráulico.

### **1.2.1 Las excavaciones abiertas o subterráneas.**

En este grupo se incluyen apiques, Pozos, Trincheras, y galerías exploratorias. (León & Sarmiento, 2016). Este tipo de actividades están condicionadas por sus profundidades limitadas, también por la presencia de agua cerca de la superficie y en el caso de los pozos y apiques, por complicaciones con la estabilidad de las paredes (Linares et al, 2002). Las excavaciones abiertas permiten la toma de muestras en cada estrato (figura 2), con ellas, se puede hacer el levantamiento del perfil estratigráfico de las paredes como se observa en la figura 1.



*Figura 1.* Excavación manual apique, 2017. Autores.



*Figura 2.* Muestra tipo terrón con parafina, 2017. Autores.

### **1.2.2 perforaciones.**

Estas pueden ser con barreno manual, con equipo motorizado de percusión y lavado, o con equipo motorizado de rotación. (León & Sarmiento, 2016). Este tipo de actividad permite reconocer la naturaleza y localizar las diferentes capas del subsuelo, por lo general las

perforaciones son de diámetros pequeños, según la naturaleza del terreno y la finalidad del trabajo se deberá escoger el sondeo más adecuado de los diversos que están disponibles (Linares et al, 2002). Dentro de este grupo se encuentran los sondeos mecánicos, los cuales se subdividen en sondeos a percusión y los sondeos a rotación. A continuación, se mencionan cada uno de ellos.

### **1.1.2.1 Sondeos mecánicos**

Son utilizados para trabajar en terrenos cohesivos, granulares o rocosos. Estos sondeos son imprescindibles para alcanzar profundidades mayores a las obtenidas con los métodos antes mencionados, ya que se pueden atravesar terrenos rocosos, muestrear acuíferos o realizar ensayos in situ, además, los sondeos de tipo mecánicos se dividen en sondeos por percusión y sondeos por rotación, ambos permiten la identificación del terreno por debajo del nivel freático utilizando diferentes procesos, también, por medio de estos sondeos se obtienen muestras del terreno, las cuales son esenciales para realizar los ensayos en laboratorio (Linares et al, 2002). A continuación, se explican los sondeos y tipos de muestras que existen.

#### *1.1.2.1.1 sondeos a percusión.*

Este tipo de sondeo permite conocer la compacidad del suelo atravesado, generalmente se realiza en las formaciones incoherentes. El procedimiento consiste en dar golpes consecutivos mediante una maza a un tubo de acero el cual hace de entibado y posterior a eso, se realiza la extracción del material para ser evaluado. Este tipo de

sondeo puede alcanzar profundidades menores a los 15 metros. Al conocer la energía que se emplea en la hincada del tubo, se puede obtener información sobre las características mecánicas del terreno, uno de los ensayos más utilizados y más conocido en geotecnia es el ensayo de penetración estándar o SPT, el cual es definido por este tipo de sondeo (Linares et al, 2002).

#### *1.1.2.1.2 sondeos a rotación.*

Este tipo de sondeo, como su nombre lo indica, se realiza con acciones rotativas mediante conexiones de un varillaje a la cabeza giratoria o mandril mientras se ejerce una presión en el terreno con un útil conocido como corona. “Para la extracción de las muestras, se realizan bombeos de agua u otro fluido de perforación. En función de los útiles de perforación se diferencian dos grupos: baterías de rotación y barrenas helicoidales” (Linares et al, 2002)

#### *1.1.2.1.3 Tipos de muestras.*

En la rama de la geotecnia, existen dos tipos de muestras con las que se realizan los distintos ensayos de laboratorios, las muestras alteradas que son segmentos de terreno recolectado en bolsas, frascos, costales entre otros, sin ningún tipo de aislamiento y las muestras inalteradas, las cuales se pueden obtener de manera

mecánica, (tipo Shelby (SH), Pistón (PS), Denison (DS), Pitcher (PtS), Bishop (BS), entre otros. (León & Sarmiento, 2016).



Figura 3. Toma de muestra en frascos, 2017. Autores.

### 1.3 Métodos de reconocimiento indirecto

Los métodos de reconocimiento indirectos mayormente conocidos como geofísicos se componen de un grupo de técnicas de investigación del subsuelo, las cuales se fundan en estudios de parámetros físicos, sus variaciones y la correlación que existe con propiedades geológicas. “Dichos parámetros son: la densidad, la susceptibilidad magnética, la resistividad/conductividad eléctrica; la permeabilidad magnética; la velocidad de propagación de ondas sísmicas y las emisiones radiactivas naturales o provocadas” (Linares et al, 2002). Estas técnicas están clasificadas en métodos geofísicos sísmicos, eléctricos, magnéticos y electromagnéticos, entre otros.

### 1.3.1 Métodos eléctricos

Este método permite medir la resistividad a partir de la inducción de una corriente eléctrica, el objetivo es poder detectar particularidades de los materiales que conforman el subsuelo, ya sea el tipo de material, la existencia y profundidad de aguas freáticas, el espesor y profundidad de estratos, la existencia de diversas estructuras en el terreno, tales como cavernas, estructuras blandas o estructuras geológicas. (SIAPA, 2014). Dentro de los métodos eléctricos se encuentran técnicas como las del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) o Calicatas Eléctricas (CE), estas se fundan en la transmisión de una corriente continua al suelo, con una intensidad conocida por medio de unos electrodos de contacto. El objetivo del SEV es poder determinar los estratos del suelo de acuerdo a la variación de la resistividad con el aumento de la profundidad, por otra parte, las calicatas eléctricas permiten calcular la resistividad aparente en varios puntos, siempre y cuando el desplazamiento de los electrodos sea lateral, así se obtiene la curva de variación de las resistividades, aproximadamente, para cada nivel. (Linares et al, 2002).

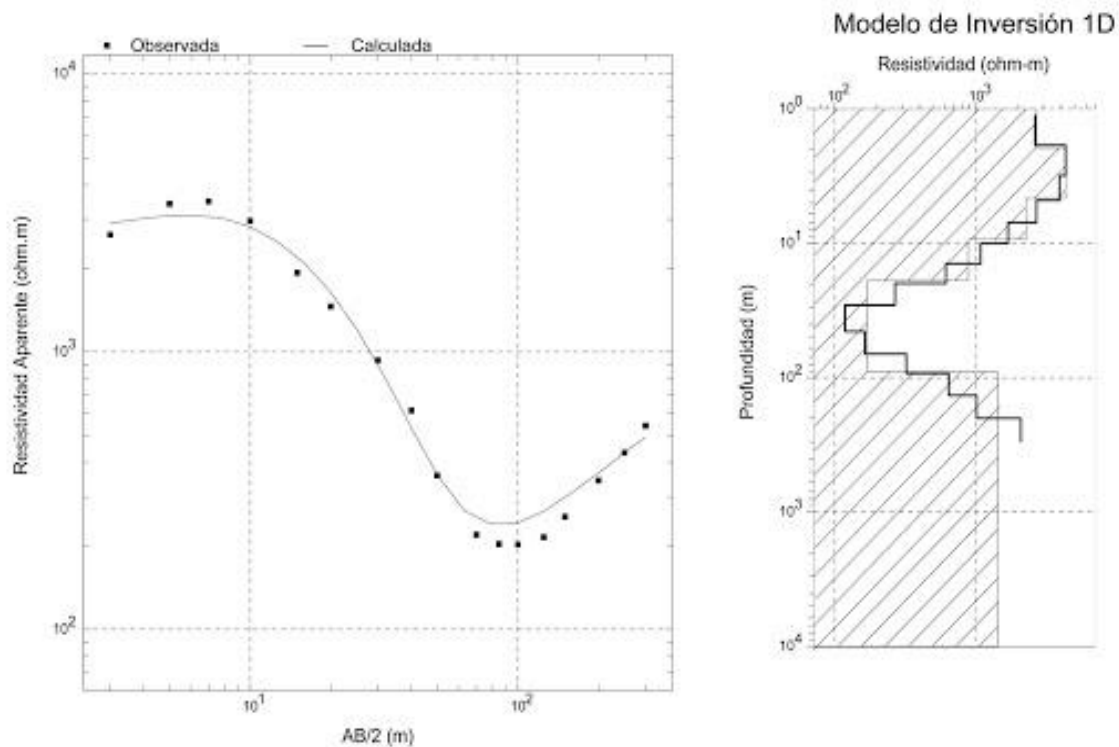


Figura 4. Ejemplo de curva eléctrica (SEV). Geotem ingeniería S.A de C.V. (2016). Caracterización geofísica y monitoreos de sitios contaminados método de Sondeo eléctrico vertical. Obtenido de <http://www.geotem.com.mx/electrico1.php>

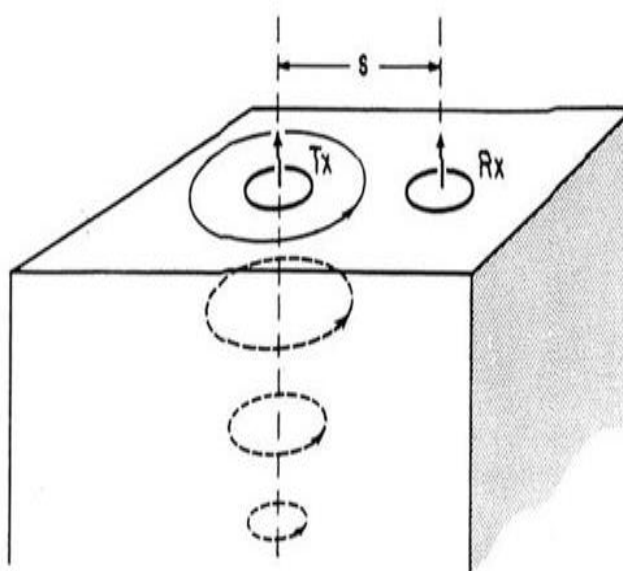
### 1.3.2 Métodos electromagnéticos

Este método se basa en la generación de unos campos magnéticos que permiten valorar la conductividad aparente de los diferentes cuerpos que existan en el subsuelo, un campo primario que por medio de una antena emisora induce un campo magnético secundario en el subsuelo. (Linares et al, 2002).

En la figura 5, se observa una antena transmisora Tx que está colocada sobre un área considerada uniforme y conectada con otra antena receptora Rx que se



localiza a cierta distancia  $S$ . La variación a lo largo del tiempo del campo magnético causada por la corriente alterna con una frecuencia de audio en la antena transmisora induce pequeñas corrientes en el terreno. Dichas corrientes forman un campo magnético secundario  $H_s$  el cual es detectado, al mismo tiempo con el campo primario  $H_p$ , para la antena receptora. En general, este campo magnético secundario integra una función compleja que depende del espaciado entre antenas; de la frecuencia de operación  $f$ ; y de la conductividad del terreno  $s$ .



(Linares et al, 2002, P.64).

*Figura 5.* Ejemplo de un flujo de corriente inducido en un terreno uniforme, según McNeill. (1980). Métodos de reconocimiento del subsuelo, Enseñanza de las ciencias de la tierra. Obtenido de: <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/88760/132929>

El campo magnético secundario llega a ser considerado como una función simple de algunas variables que bien son requisito para los diseños de los instrumentos geofísicos y, por tanto, se expresa como se indica en la ecuación 1. (Linares et al, 2002).

$$\frac{H_s}{H_p} = \frac{i \cdot \mu_0 \cdot \omega \cdot \sigma \cdot s^2}{4} \quad (1)$$

donde:

H<sub>s</sub>: campo magnético secundario en la antena receptora

H<sub>p</sub>: campo magnético primario en la antena receptora

$\omega$ ,  $2\pi f$ , donde f es la frecuencia (Hz)

$\mu_0$ : permeabilidad del espacio libre

s: separación entre antenas

$i$ ,  $= \sqrt{-1}$

$\sigma$ : conductividad del terreno (mho/m)

La relación H<sub>s</sub> y H<sub>p</sub> es linealmente proporcional a la conductividad del suelo, dicha condición admite la interpretación directa de la medida de conductividad, según la proporcionalidad H<sub>s</sub>/H<sub>p</sub> (componente en cuadratura), la conductividad aparente ( $\sigma_a$ ) indicada para el instrumento puede ser definida por la ecuación 2. (Linares et al, 2002).

$$\sigma_0 = \frac{4}{i \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \sigma \cdot s^2} / \left( \frac{H_s}{H_p} \right) \quad (2)$$

### **1.3.3 Métodos sísmicos**

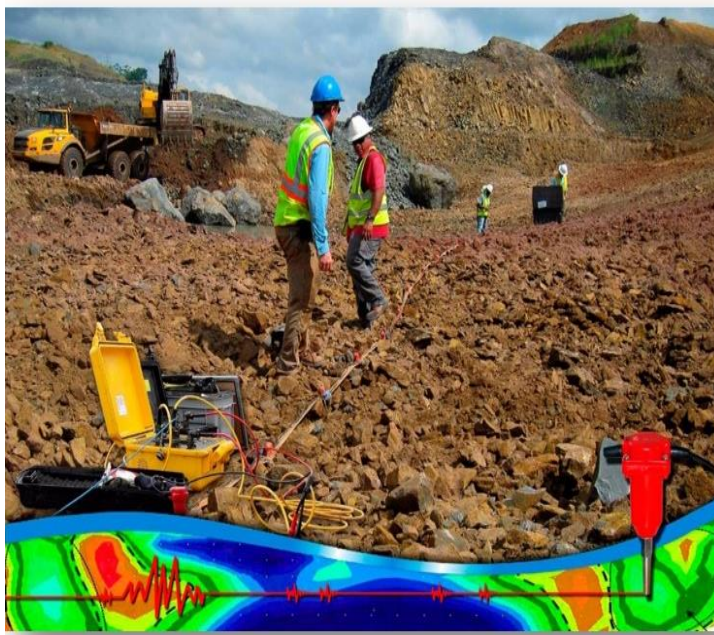
El método sísmico es el más conocido y utilizado en las ramas de geología y geotecnia, la determinación de las velocidades de ondas de compresión y ondas de corte, permite deducir propiedades mecánicas del subsuelo y la manera en cómo están distribuidos los materiales en el suelo, siendo un gran aporte para lograr diseños de cimentaciones factibles sobre el terreno, así como también para definir de alguna manera, la geometría de la estratigrafía del terreno. (SIAPA, 2014). El procedimiento en general se basa en la lectura de las vibraciones ocasionadas artificialmente durante los ensayos. Este método se puede subdividir en métodos activos y pasivos, los primeros son aquellos que requieren de una fuente artificial que genere pulsaciones u ondas sísmicas entre los que destacan refracción, reflexión, downhole, crosshole, MASW y el segundo se limita al registro de las vibraciones permanentes y naturales a las que están expuestos los depósitos de suelos por ejemplo el ensayo Remi.

El método sísmico de mayor utilización es el de refracción, este se basa en la medida del tiempo que transcurre durante la propagación de las ondas elásticas, las cuales van desde el sitio donde se generan hasta el sitio de llegada a los diferentes puntos de observación. (Naranjo & Dranichnikov, 2012).

#### **1.2.3.1 refracción sísmica**

La técnica de refracción sísmica es empleada para determinar el tipo de suelo en una zona y para evaluar las condiciones de meteorización, fracturación del terreno, entre

otros, esto es posible debido a que dicha técnica mide la velocidad de propagación de ondas sísmicas, para ello, se obtiene la información de las capas por medio de ensayos se generan impulsos ( método activo) los cuales envían ondas a través del subsuelo y estas retornan cuando encuentran discontinuidades en el terreno, permitiendo ser detectados con una serie de sensores ubicados en línea recta como se observa en las figura 6 y 7, finalmente, los tiempos de recorrido de las ondas desde un punto a otro, permiten la representación de una curva llamada Dromocrona. (Naranjo & Dranichnikov, 2012).



*Figura 6.* Ensayo de refracción sísmica, 2018, Obtenido de <https://www.geoexce.com/index.php/metodoss/sismicos/sismica-de-refraccion>

### **1.2.3.2 Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)**

Esta técnica pertenece al grupo de métodos activos ya que está basado en el análisis de velocidad de ondas superficiales, las cuales son generadas artificialmente a través de diversas fuentes tales como el golpeteo de un mazo o martillo, el objetivo de esta técnica es evaluar la

elasticidad del suelo por medio de registros de datos obtenidos en campo mediante sensores o geófonos, dichos datos son representados por una curva para cada registro, posteriormente se realiza el cálculo de  $V_s$  en profundidad y se obtiene una imagen 1D, 2D o 3D del terreno con base a la información obtenida. (Correia, N.A, 2015).

En la figura 8 se observa el proceso de instalación del equipo para el ensayo MASW.



*Figura 7.* Geófono de 14.5 Hz para ensayo de refracción sísmica, 2019, Obtenido de GIGMA.



*Figura 8.* Ubicación de sensores para ensayo de refracción sísmica y Masw, 2019, obtenido de GIGMA.

### **1.2.3.3 Refracción de micro tremores (REMI)**

El ensayo de refracción de micro tremores utiliza una técnica con la que es posible separar las ondas Rayleigh de otras ondas elásticas, este análisis permite determinar la variación del parámetro  $V_s$  a profundidad. El procedimiento es similar al ensayo de refracción sísmica, se ubican una serie de geófonos de forma lineal en el terreno asignado para el estudio, el registro de la vibración se toma con un sismógrafo digital y se hace registro del ruido ambiental y la vibración inducida o impactos al suelo (método mixto). Con los datos obtenidos en el ensayo, se genera un espectro llamado p-f o velocidad de frecuencias contra tardanzas, luego se define la gráfica de periodos contra velocidad de fase de onda Rayleigh y con ayuda de esta gráfica, se puede obtener la curva de dispersión con la cual se determinan los espesores de cada estrato y las velocidades de ondas de corte  $V_S$ . (Lazcano, 2007).

#### **1.2.3.4 Downhole**

Con este ensayo es posible la determinación de las velocidades de ondas  $V_p$  y  $V_s$ , la manera como se realiza el procedimiento lo incluye dentro del grupo de métodos activos, ya que para poder tomar registro de datos del lugar y hacer las mediciones de los tiempos de llegada de las ondas, se debe generar una vibración con una alguna fuente artificial, pero, a diferencia de otros ensayos, para la ejecución del downhole, antes de iniciar se debe perforar el terreno e introducir uno o varios geófonos verticalmente, los cuales van conectados a un sismógrafo (Lazcano, S, 2007, p7). Este método ha sido uno de los más usados “in situ” para el análisis de la respuesta sísmica de un terreno.

#### **1.2.3.5 crosshole**

Para el ensayo de crosshole es necesario realizar dos o más perforaciones paralelas en el terreno, el área que queda entre tales sondeos, será el medio por el que las ondas hacen el recorrido de un punto a otro, así que, la primera perforación actúa como emisor pues en ese lugar con ayuda de una fuente artificial, se generan las vibraciones que viajan a través del suelo hasta llegar a la segunda perforación, la cual se le denomina receptor puesto que se introducen uno o varios geófonos que están conectado a un sismógrafo, este recibe las vibraciones y realiza las mediciones de los tiempos de llegada de las ondas primarias  $V_p$  y secundarias  $V_s$  (Ochoa F, 2007). Ambas perforaciones deben estar entubadas y a la misma profundidad

### 1.3.4 Métodos gravimétricos

El método Gravimétrico se vale de las diferencias de la gravedad en puntos diferentes, ya que, algunos materiales o rocas, de acuerdo a su densidad, pueden generar aumento en la aceleración, revelando rasgos que permiten diferenciar materiales y minerales del suelo común, de ahí, que este método sea primordial para localizar depósitos minerales, además, utiliza campos de potencial natural, de la misma manera que lo hace el método magnético y algunas técnicas eléctricas, la figura 9 representa un suelo con un sector mineralizado que genera un aumento en la gravedad (Pérez, C.E, 2017), ([www.medellin.unal.edu.co](http://www.medellin.unal.edu.co)).

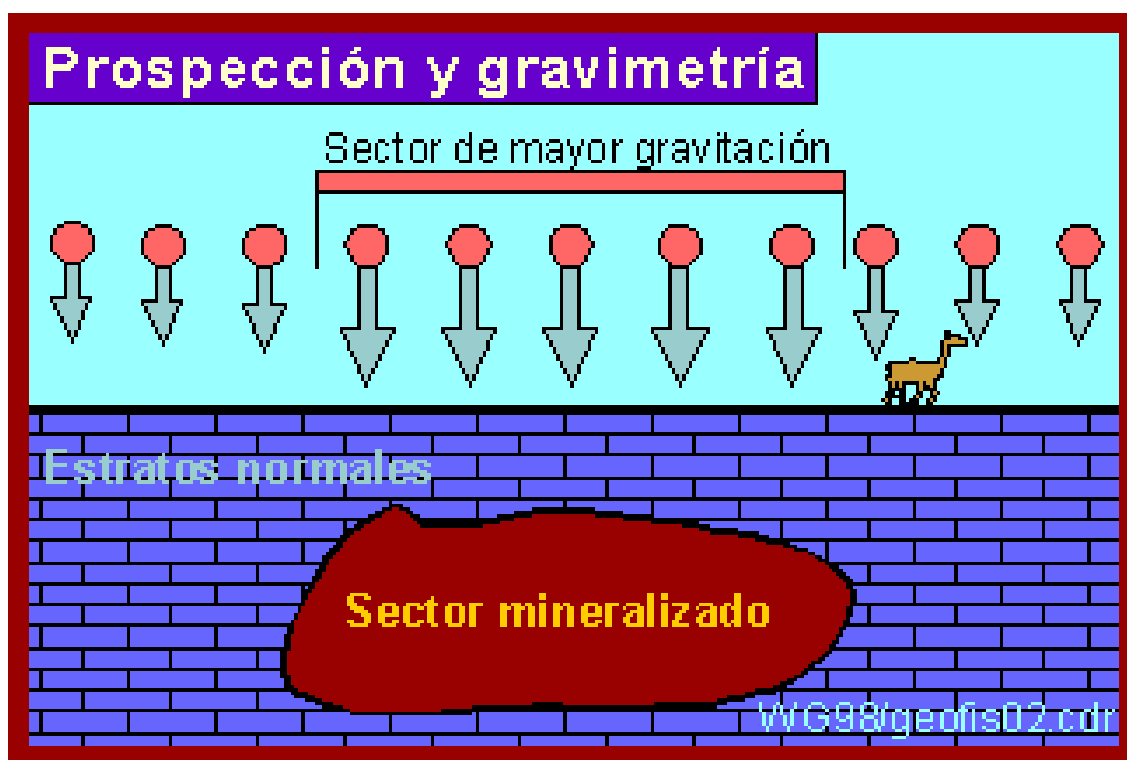


Figura 9. Ejemplo de un sector de mayor gravitación debido a minerales en el subsuelo. Rodríguez. R. (2019). Clasificación de métodos geofísicos, gravimetría. Obtenido de <https://www.medellin.unal.edu.co/~rrodriguez/geologia/Geofis04.gif>



### 1.3.5 Métodos magnéticos

La implementación de este método, está relacionado directamente con el campo magnético de la tierra, básicamente, este método aprovecha que la corteza terrestre está compuesta por elementos ferromagnéticos, lo que lleva a evaluación de la distribución de fuerzas magnéticas para encontrar los sectores donde se producen campos magnéticos inducidos o anomalías, que generalmente son producto de un yacimiento. Con esta información, se logran detectar minerales de hierro o asociados, la detección de tuberías y tanques metálicos, también, es un método simple, económico, (www.geonica.com, 2019)

“En la prospección petrolífera el método magnético entrega informaciones acerca de la profundidad de las rocas pertenecientes al basamento. A partir de estos conocimientos se puede localizar y definir la extensión de las cuencas sedimentarias ubicadas encima del basamento, que posiblemente contienen reservas de petróleo” (Wolfgang Griem, Chile, 2016), por otra parte, este método también es aplicable en exploraciones mineras y en el hallazgo de artefactos geológicos.

“En las obras de infraestructura de conducción primaria, el uso de estos métodos es de gran utilidad dado a su rapidez y economía, dando resultados aproximados útiles para determinar la factibilidad técnica y económica del proyecto”. (SIAPA, 2014, P8).

## Capítulo 2. Ensayos para medir velocidad de onda cortante

Para adentrarnos en el objetivo de este capítulo, el cual es hablar sobre los ensayos que determinan el parámetro de la velocidad de onda cortante  $V_s$ , se plantea la necesidad de definir de manera general los tipos de ondas que existen, con el fin de una mejor comprensión del tema.

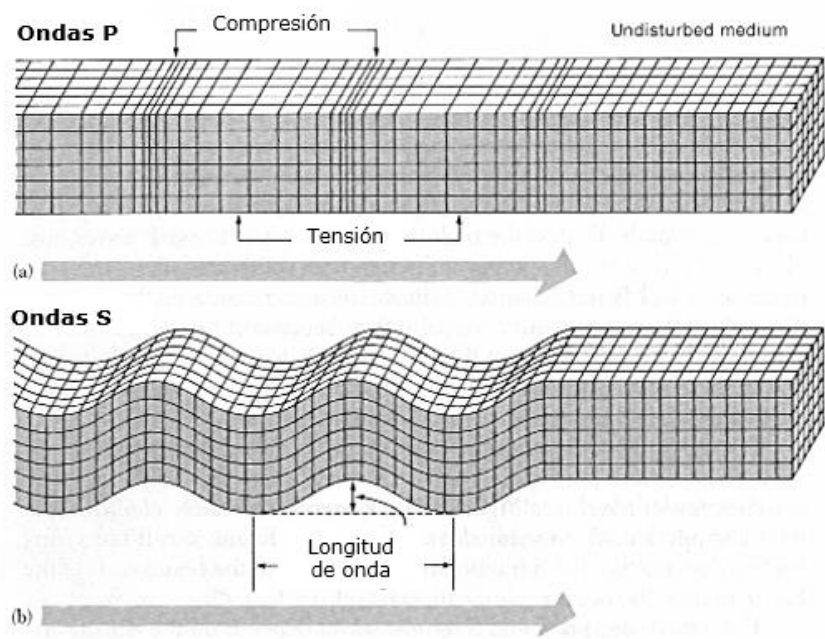
### 2.1 Teoría de ondas elásticas

Los ensayos geofísicos son basados en el registro de la propagación de ondas elásticas que se generan en el terreno debido a pequeñas explosiones controladas y que se transmiten a través de los depósitos de suelo, tales ondas no alteran las propiedades geotécnicas naturales del subsuelo y se dividen en dos grupos: Ondas corporales, que transitan internamente por el medio elástico, y Ondas superficiales, las cuales se esparcen a lo largo de la frontera de un medio semi-infinito, por ejemplo, las superficies de los depósitos de suelos (Aponte, J. A, 2011). Sebastiano Foti y Carlo G, en su libro *Surface wave methods for near-surface site characterization*, explica que existen dos tipos diferentes de ondas corporales, las cuales “se propagan en un medio elástico sin límites, homogéneo y lineal: Las ondas P (ondas primarias o compresión o longitudinales) y las ondas S (ondas secundarias o cortantes o distorsionadas o equivoluminales)”, mientras que las ondas Rayleigh, Scholte, Stoneley y Love son diferentes tipos de superficiales. siendo la más importante en geotecnia las ondas Rayleigh. (p.1)

### 2.1.1 Ondas corporales

Las ondas P son aquellas que generan un movimiento de partículas en la misma dirección de propagación, comprimiendo y dilatando el medio por el cual se propagan (Humire, F, 2013), estas se pueden propagar tanto en sólidos como en líquidos, la velocidad de recorrido es mayor que las ondas S, para las cuales el movimiento de partículas es perpendicular a la dirección de propagación, desarrollando esfuerzos de corte en el medio por el que se propagan, estas solo se propagan en medios sólidos y en forma de cizalla. Las diferentes capas del suelo se determinan gracias a estos dos tipos de ondas, para ello, se tienen en cuenta factores como el ambiente topográfico, luego con los datos recolectados se elabora una gráfica de distancia vs tiempo, se realizan las interpretaciones y modelos que concuerden con las componentes del suelo, finalmente se obtiene un esquema del perfil del suelo, sus capas y profundidades.

(Jeoprobe,2012)

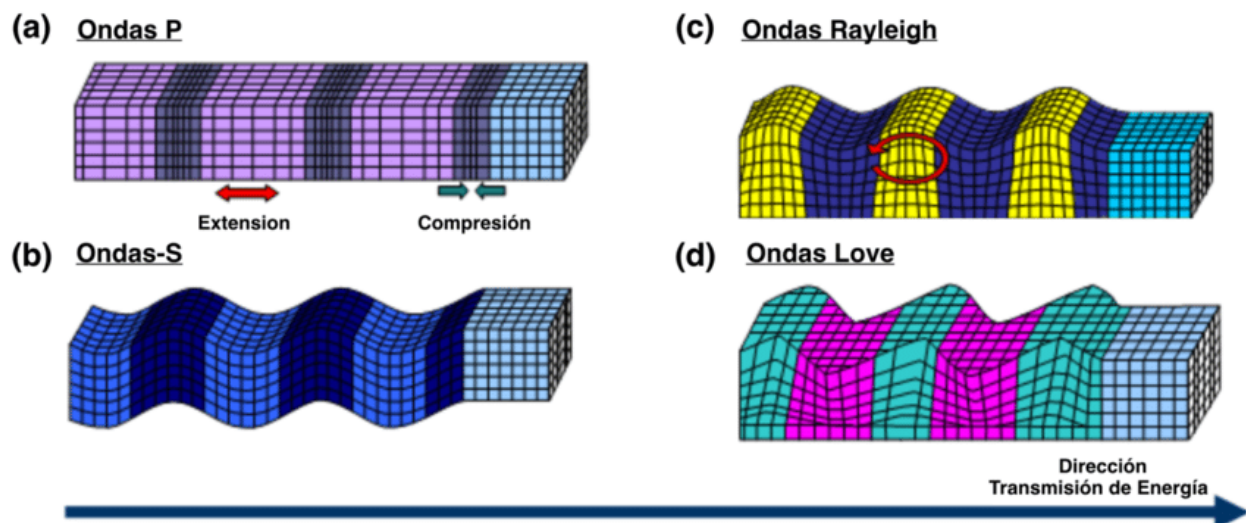


*Figura 10.* Deformaciones elásticas y movimientos de partículas del terreno asociados con el paso de ondas corporales(A) Onda P, (B) Onda S. Lazcano. S. (2007). Obtenido de Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie.pdf

### 2.1.2 Ondas superficiales

Las ondas superficiales como su nombre lo indica, se generan y se propagan por la superficie de la tierra a una velocidad menor que las ondas corporales, son fáciles de detectar y proporcionan una poderosa herramienta para la caracterización del suelo, (Foti et al, 2012). Las más relevantes al analizar las ondas sísmicas que se propagan en tierra son las ondas Rayleigh y Love.

Las ondas de Rayleigh viajan a lo largo de una superficie libre, se mueven como ondas en el agua y el movimiento de sus partículas son asociados a una forma elíptica vertical que es paralela a su dirección de propagación (Foti et al, 2012), su amplitud disminuye exponencialmente con la profundidad. por otra parte, Las ondas Love se generan solo cuando un medio elástico se encuentra estratificado, tal como sucede en nuestro planeta, se propagan con un movimiento de partículas perpendicular a la dirección de propagación de la misma forma que las ondas S y provocan cortes horizontales en la tierra, (Lazcano, 2007).



*Figura 11.* Efectos mecánicos de las ondas sísmicas. Sáez, M. Correlación cruzada de ruido sísmico para la obtención de perfiles profundos de velocidad de onda de corte en la cuenca de Santiago. (2016). Obtenido de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-41-Efectos-mecanicos-de-las-ondas-sismicas-Ondas-de-cuerpo-a-ondas-P-y-b\\_fig3\\_301779521](https://www.researchgate.net/figure/Figura-41-Efectos-mecanicos-de-las-ondas-sismicas-Ondas-de-cuerpo-a-ondas-P-y-b_fig3_301779521)

## 2.2 Velocidades de onda.

La velocidad de las ondas está relacionada directamente con las propiedades del medio en que se propagan; principalmente la elasticidad y densidad de los materiales que componen el terreno (Lozano, C.F., 2013). El estudio de las velocidades de ondas proporciona indirectamente los datos para determinar propiedades mecánicas del sitio donde se realiza algún estudio de suelos con técnicas geofísicas, ya que al atravesar los distintos estratos del suelo se generan diferentes componentes de frecuencias, y, por lo tanto, las ondas viajan a diferentes velocidades. En seguida, el sismógrafo registra los tiempos de llegada de estas ondas y se realizan los análisis de los datos recolectados.

La velocidad de propagación de las ondas P es asociada con el módulo longitudinal (de pequeña tensión), estas son de valor limitado en suelos saturados debido al papel desempeñado por el fluido de poros en la determinación de la respuesta global del suelo, mientras que la velocidad de propagación de las ondas S se asocia con el módulo de cizallamiento (de pequeña tensión). (Foti et al. 2012). En la ecuación 3, se expresa como calcular las velocidades por medio de relaciones simples entre constantes conocidas, tales como la densidad del material, el módulo de cizallamiento y la constante de lamé (Foti et al. 2012).

$$\{ V_p = \sqrt{((\lambda + 2G)/\rho)} \quad | \quad V_s = \sqrt{(G/\rho)} \} \quad (3)$$

### 2.3 Velocidad de onda de corte

La velocidad de onda cortante  $V_s$  es uno de los parámetros elementales para la clasificación de suelos y rocas, ya que determina confiablemente las características estáticas y dinámicas de los materiales (Alfaro,2007), además, el análisis de dicho parámetro permite la estimación del estado de esfuerzos, la determinación del módulo de rigidez al esfuerzo cortante ( $G$ ), el módulo de Young ( $E$ ), la estratificación del suelo, así como también por medio de este, se puede inferir la densidad en campo, entre otros. (Quevedo, B.R, 2018).

A continuación, se indican así, varias correlaciones empíricas extraídas de diversas investigaciones para estos parámetros, también, se indica la ecuación propuesta en la NSR-10 para el cálculo de la velocidad de onda cortante ( $V_s$ ).

La  $V_s$ , es obtenida por medio de la ecuación 4 propuesta en el numeral A.2.4.3.1 del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente

$$V_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (4)$$

Donde:

**$V_{si}$** : Es la velocidad de la onda de corte del suelo del estrato  **$i$** , medida en campo en m/s.

**$d_i$** : espesor del estrato  **$i$** , localizado dentro de los 30 metros superiores del perfil.

La relación entre  $V_s$  y el módulo de corte o módulo de rigidez ( $G$ ) está dada por la ecuación 5 (Lazcano, S., 2007).

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (5)$$

donde:

$\rho$  = densidad del material

$V_s$  = velocidad de onda de corte S

Debido a que las deformaciones que los ensayos geofísicos causan son diminutas, el módulo cortante que se calcula con el valor  $V_s$  obtenido de la prueba en campo, corresponde al valor máximo “ $G_0$ ”, este, sufre una degradación dependiendo de las particularidades que tenga el suelo y de la deformación inducida. A este comportamiento se le denomina elástico no-lineal y se asocia con la variabilidad de las propiedades mecánicas del sitio ante frecuentes sollicitaciones de carga y descarga. (Lazcano, S., 2007).

El coeficiente de Poisson ( $\eta$ ), en función de las velocidades  $V_p$  y  $V_s$ , está dado por la ecuación 6 y 7 (Naranjo & Dranichnikov, 2012).

$$\eta = \frac{\varepsilon_\alpha}{\varepsilon_t} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (7)$$

“Cuando una tensión actúa en un cuerpo en una dirección y el volumen del cuerpo es constante, el coeficiente de Poisson tiene su valor máximo igual a 0,5.” (Naranjo & Dranichnikov, 2012).



Tabla 3  
*Tipo de roca*

| Tipo de roca                  | Rango del coeficiente de poisson |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Roca consolidada, no alterada | 0.2- 0.3                         |
| Roca sedimentaria Clástica    | 0.2 -0.5                         |

El módulo de Young en función de las velocidades  $V_s$  y  $V_p$ , está dado por la ecuación 8 y 9 (Naranjo & Dranichnikov, 2012).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (8)$$

Donde:

$\sigma$  = Tensión

$\varepsilon$  = deformación

$$E = \delta \cdot V_s^2 \left( \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right) \quad (9)$$

Donde:

$\delta$  = densidad del material del terreno

## 2.4 Correlaciones con penetración estándar

El ensayo de penetración estándar (SPT), fue expuesto por Terzaghi a finales de los años 20, este el ensayo in situ más popular y económico para obtener información geotécnica del subsuelo. El procedimiento del SPT es básicamente la extracción de muestras del suelo por medio de un tubo cilíndrico que se hincan en varios tramos con el golpe de una maza que cae sobre el tubo de manera consecutiva, cada intervalo de 15 cm de penetración el número de golpes (N) se contabiliza y las muestras extraídas se llevan a un laboratorio para realizar las pruebas de clasificación del tipo de material que hay en el sitio (Aponte, J.A., 2011)

En el año 1974, dos investigadores elaboraron un experimento en la ciudad de Sapporo en Japón, Yutaka Ohta y Noritoshi Goto, el objetivo de este, fue poder crear una técnica que midiera la velocidad de onda de corte al mismo tiempo que se usara el ensayo de penetración estándar, cuatro años más tarde publicaron un artículo en el cual explicaban que era posible aprovechar los impactos que se realizan para el hincado del tubo de muestras del SPT, ya que en el fondo de la perforación se generan ondas elásticas, entonces, si dichas ondas son registradas en la superficie, el parámetro  $V_s$  podría ser adquirido mediante análisis lineal del tiempo de viaje y del recorrido de la señal entre la profundidad del impacto y la superficie. (Aponte, J. A., 2011). En la siguiente figura se relaciona dicha teoría

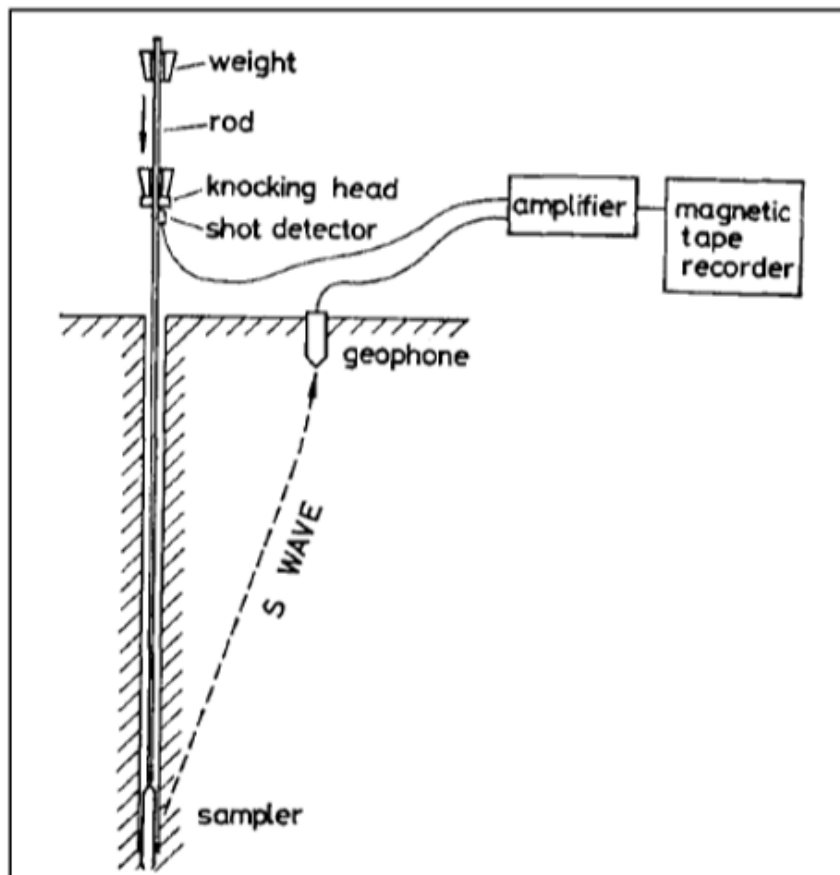
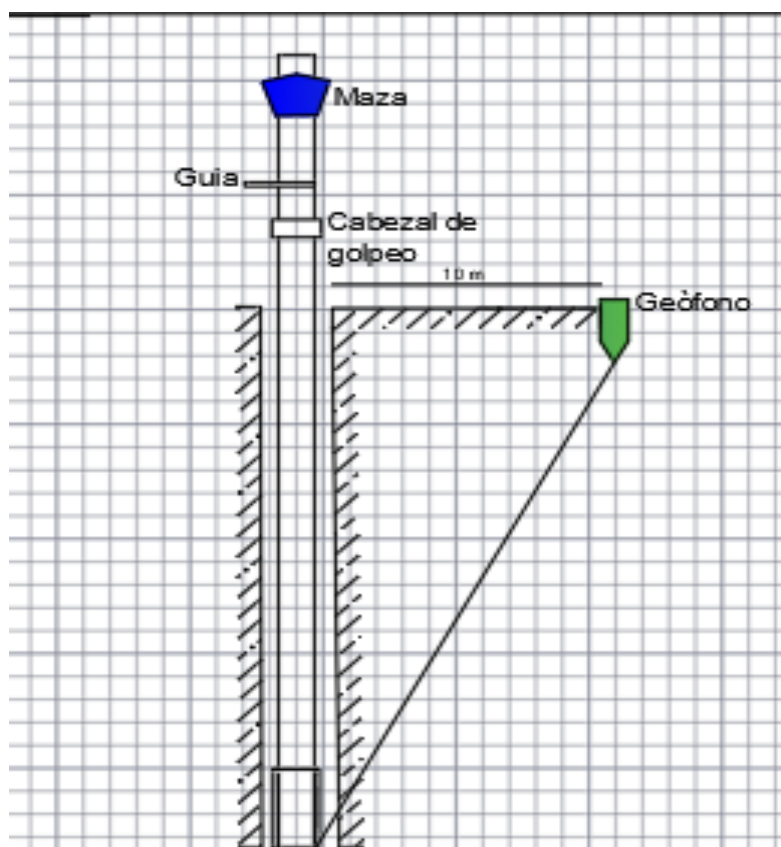


Figura 12. Representación esquemática de la medición simultánea de velocidad de la onda S con la prueba de penetración estándar. Ohta y Goto. "Shear Wave Velocity Measurement During A Standard Penetration Test", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.

El procedimiento para llegar a la conclusión de la investigación realizada, se basa en el desarrollo tradicional del ensayo SPT, como se menciona anteriormente, los golpes que se realizan durante el ensayo generan varios tipos de ondas, las cuales no son identificadas, no obstante, con la ayuda de un geófono fijo que es instalado en la superficie a una distancia aproximada de 10m del lugar de la perforación, se hace un registro de las velocidades de onda que llegan a la superficie. Para distancias entre 10 m y 20 m, la llegada de las ondas S es evidente, sin embargo, para arribos mayores de 20m, las ondas se distorsionan debido a las señales de ruido que interfieren en la identificación de las Vs, Ohta y Goto explican esta distorsión basado en que, a mayor profundidad, más débil es la onda, así que es necesario una

mayor amplificación de la señal para la estimación correcta de este parámetro. (Aponte, J. A., 2011).

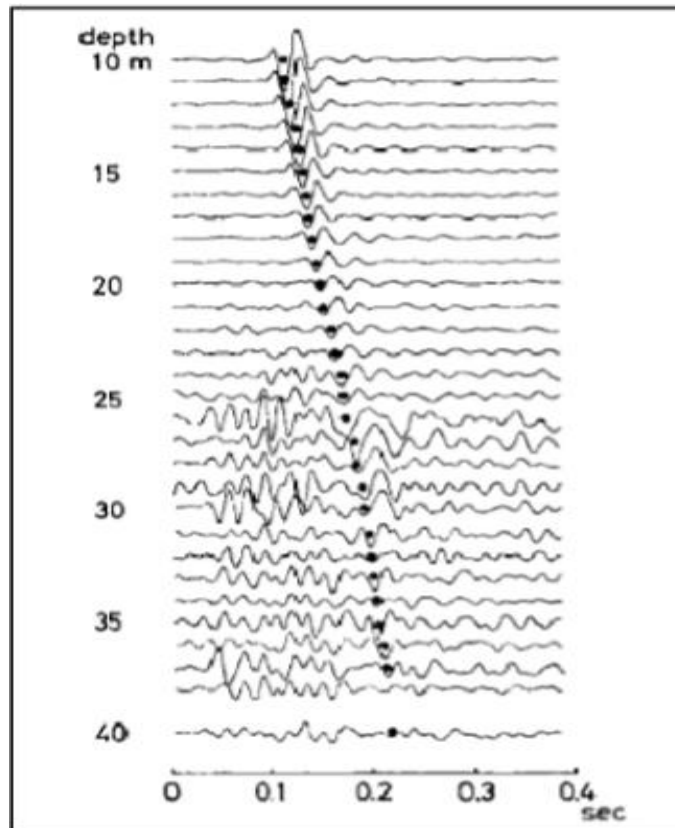
Para el cálculo de las Vs se asumió una trayectoria en línea recta entre el geófono ubicado a 10 m y el punto de impacto en la profundidad de la perforación, como se muestra en la siguiente figura:



*Figura 13.* Trayectoria en forma recta asumida entre el punto de impacto y el geófono en superficie para los cálculos de Vs. Imagen adaptada de Ohta y Goto. (1979). Autores 2020.

Luego, con ayuda de la gráfica de registros de las ondas, se establecen los tiempos de llegada de Vs para profundidades, en este caso entre 10 m y 38 m y se procede a realizar una

nueva grafica de tiempo de llegada de la onda contra la distancia del geófono para diferentes profundidades. La interpretación grafica del cálculo de velocidades consiste en determinar la pendiente de la ecuación, este valor corresponde al  $V_s$  del intervalo analizado y finalmente se realiza el perfil de  $V_s$ .



*Figura 14.* Tiempos de arribo de ondas de corte para el caso experimental de medición de ondas de corte en Sapporo (Japón) durante un ensayo de penetración estándar. Ohta y Goto (1979), obtenida de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/1267>

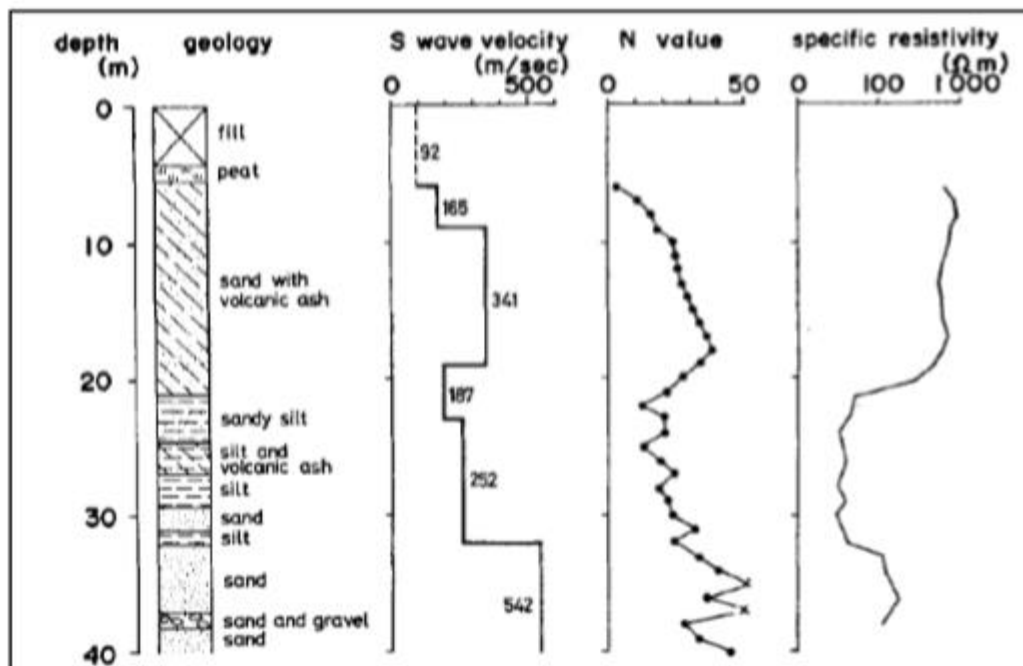
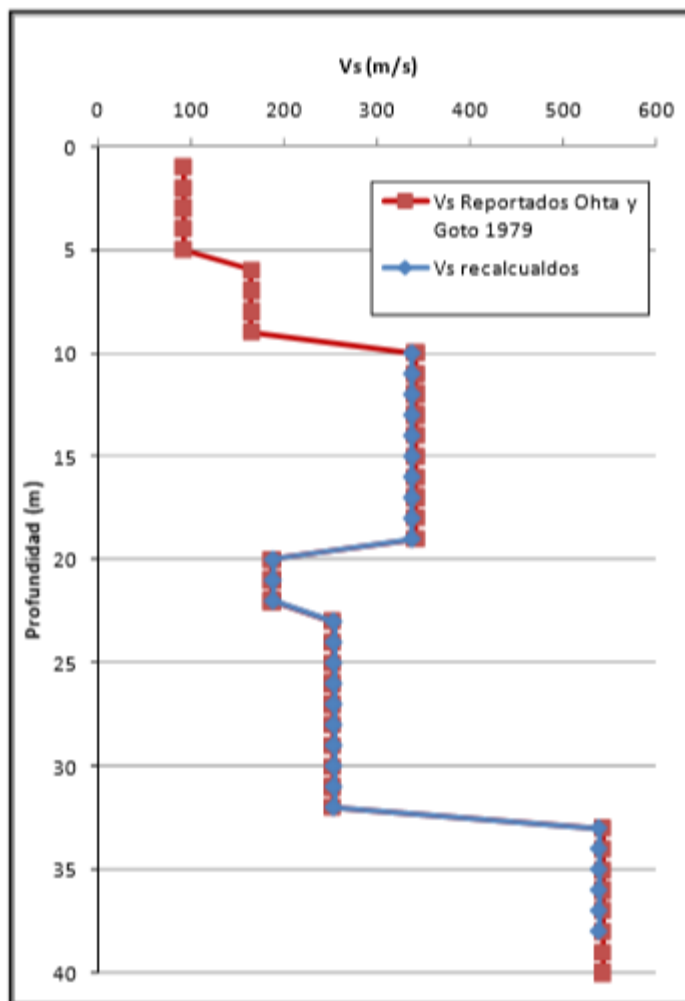


Figura 15. Resultados de la medición de velocidades de onda de corte durante el desarrollo del ensayo de penetración estándar. Ohta y Goto (1979). obtenida de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/1267>

La figura 15 refleja los resultados que se obtuvieron. Se ubico el perfil de Vs, el perfil de valores N del ensayo SPT y las resistividades medidas en la perforación y se encuentra la semejanza entre ellos a simple vista. Esta situación permite concluir, según los autores, que el método de correlación de Vs con penetración estándar es viable para el uso práctico como complemento al ensayo tradicional, agregando que, el procedimiento es sencillo y no requiere de mucho esfuerzo, en cambio, la medición en campo del parámetro Vs representa un beneficio para los ensayos de exploración del subsuelo. (Aponte, J. A., 2011). En la siguiente figura, la gráfica muestra los valores de Vs de la investigación de Ohta y Goto (puntos rojos), por otro lado, en el desarrollo de la tesis “**Evaluación de Métodos No Convencionales de Caracterización Geotécnica**” se recalcularon los valores con el método inferido, obteniendo resultados similares a los originales (Puntos azules).



*Figura 16.* Comparación de Vs reportados por Ohta y Goto 1979, y valores recalculados mediante el modelo inferido. Ohta y Goto. Aponte. J.A. Evaluación de Métodos No Convencionales de Caracterización Geotécnica. (2011). Obtenido de <https://repository.javeriana.edu>

A continuación, se indican algunas ecuaciones de diferentes autores que corresponden a las correlaciones obtenidas entre valores de Vs con el N del ensayo Spt:

Relación entre N del ensayo SPT y velocidades de ondas S para todos los suelos, según T.

Imai y Yoshimura ecuación 10:

$$V_s = 76.0 N^{0.33} \quad (10)$$

Relación entre N del ensayo SPT y velocidades de ondas S para todos los suelos, según Ohta y Goto. ecuación 11

$$V_s = 85.34 N^{0.348} \quad (11)$$

Relación entre N del ensayo SPT y velocidades de ondas S para arenas, según Japan Road Association, ecuación 12

$$V_s = 80.0 N^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

## 2.5 Refracción y reflexión sísmica

El ensayo de refracción sísmica, ampliamente utilizado en exploración geotécnica, hace parte del grupo de métodos activos, generalmente se utiliza para conocer a que profundidad se encuentra la roca, también, es muy utilizado para la variación vertical de la velocidad de recorrido de las ondas P y así inferir la estratigrafía del sitio, entre otras aplicaciones (Gómez & Tobón, 2017).



El procedimiento se basa en la medición, con ayuda de una serie de geófonos ubicados equidistantemente, de los tiempos de recorrido de las ondas P, generadas por una fuente artificial de impacto, de la misma forma, es posible medir los tiempos de viaje de las Ondas S, aunque es un poco más difícil evaluarla, incluso se recomienda para mejores resultados, que los impactos en la superficie sean de tipo horizontal, ya que generan mayormente ondas S; Luego de la ubicación de los geófonos y de ejecutar la serie de impactos en el punto cero, los geófonos convierten las vibraciones del suelo en una señal eléctrica con las que se registran los tiempos de llegada de las ondas ( ver figura 17) estos datos, por medio de regresión lineal, se convierten en una gráfica que es basada en la variación de velocidad con la profundidad, dicha grafica es conocida como Dromocrona, los cambios de pendiente en la Dromocrona son asociados con las capas de suelo existentes en la zona (Lazcano, 2007)

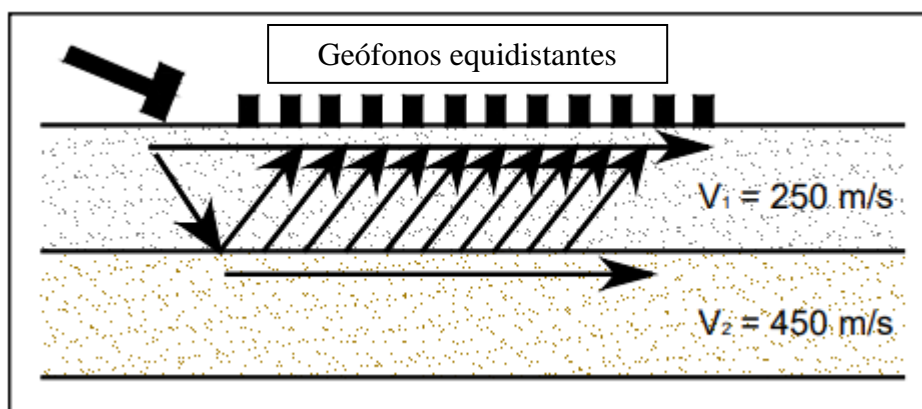


Figura 17. Esquema de general de ejecución de ensayos de refracción y reflexión sísmica, Aponte. J.A. Evaluación de Métodos No Convencionales de Caracterización Geotécnica. (2011). Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/1267>

La técnica de refracción posibilita conocer parámetros como la relación de Poisson, el módulo elástico y otros módulos dinámicos. (Ulloa et al, 2015). Su propagación a través de cada estrato, es descrita por las leyes de refracción de la luz y cuando la onda pasa de un material a otro, se cumple la ley principal, la Ley de Snell (ecuación 13), esta, junto con el fenómeno de incidencia crítica, son el fundamento de los sondeos de refracción sísmica. (Redpath, 1973).

#### Ley de Snell

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{V_1}{V_2} \quad (13)$$

Cuando  $\beta = 90^\circ$ , se dice que el ángulo de incidencia sucede, entonces  $\sin \alpha = \frac{V_1}{V_2}$ . Luego, al alcanzar este valor, la mayor parte de la energía de compresión es refractada al medio de mayor velocidad. Pero, cuando el ángulo es mayor a  $90^\circ$ , la totalidad de la energía se refleja y no se refracta nada al estrato de mayor velocidad, siendo una explicación del proceso de reflexión sísmica (Pazmiño, L.E., 2017) y a su vez una de las diferencias entre ambas técnicas, puesto que la trayectoria en que se propagan las ondas son distintas.

La técnica de reflexión, como su nombre indica, se basa en la reflexión de las ondas sísmicas en la interfase entre dos estratos de distinta rigidez, su alcance y precisión es mayor que el de refracción, y es la técnica más usada en exploraciones petroleras (León & Sarmiento, 2016)., sin embargo, es necesario usar más explosiones y por lo tanto hacer más lecturas, generando confusión en el análisis y requiriendo métodos de interpretación más avanzados.

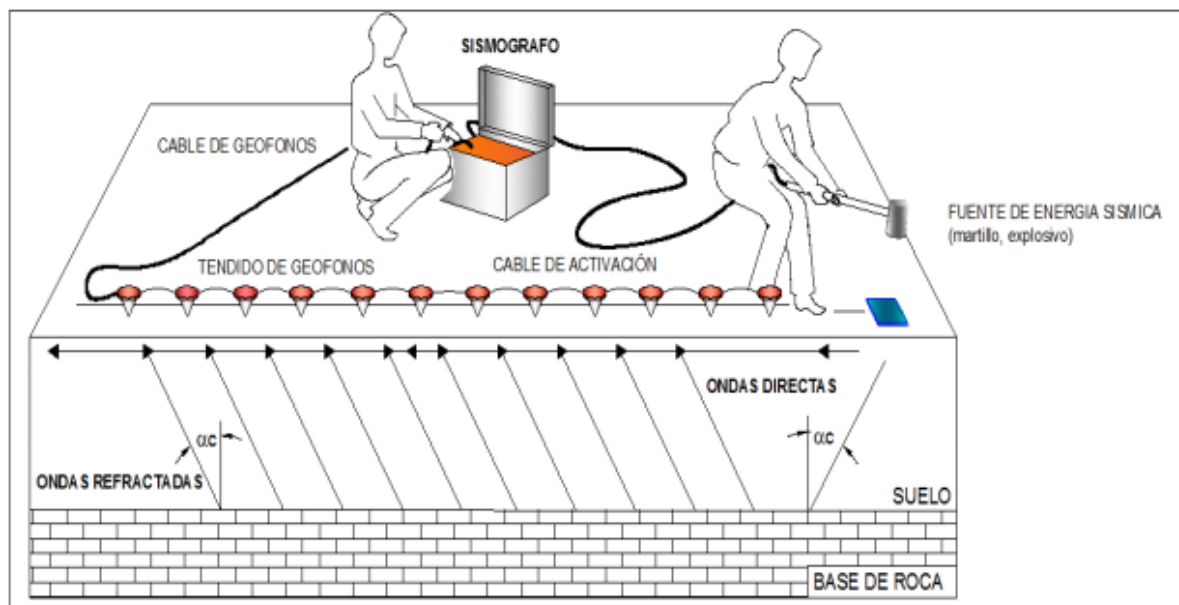


Figura 18. Armado de un sismógrafo con doce canales que muestra el camino de las ondas directas y refractadas en un sistema de dos capas suelo/roca ( $\alpha_c$  = ángulo crítico), obtenido de ASTM D 5777, 2000

Una de las limitaciones que presenta el método de refracción sucede cuando el suelo en estudio se compone por varias capas con diferente rigidez, si el estrato superficial presenta velocidades de onda mayores que los estratos por debajo, el método no funciona ya que las capas menores no se detectan. ver figura 19. (Aponte, 2011), (Crespo & tuza, 2018),

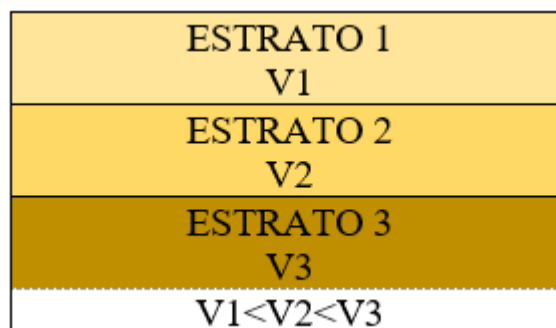


Figura 19. Diferentes estratos del suelo y sus velocidades. Autores, 2020.

## 2.6 Refracción de Micro tremores (Remi)

El método Remi es probablemente, la técnica pasiva más popular basada en matrices lineales, ya que es posible el registro tanto del ruido ambiental como vibración inducida y su alcance va hasta profundidades de entre 30 y 40 metros (San Martín, 2015). Este método nos permite conocer datos generales de grandes extensiones del subsuelo, detectando capas de suelo blando entre capas de suelos con mayor rigidez. Además de que es un “método innovador de tipo geofísico con poco tiempo de aplicación en el estudio de la caracterización y evaluación de suelos” (Linares, 2005).

Según la técnica que utiliza, se pueden separar las ondas Rayleigh de otras ondas elásticas y determinar la variación del parámetro  $V_s$  a profundidad. El equipo con el que se desarrolla la actividad en campo, es similar al utilizado en refracción sísmica, consta de una serie de geófonos que se disponen en línea recta y que van conectados a un sismógrafo digital, el cual hace un registro de los tiempos de llegada de las ondas, seguido a esto, se genera el espectro P-f o inverso de la velocidad con el que se establece la gráfica de períodos contra velocidad de fase de onda Rayleigh y se forma la curva de dispersión que facilita conocer los espesores de las capas de los suelos y establecer la velocidad de onda cortante. Esta práctica resulta ideal para sitios urbanos además de ser muy económica (Pacheco et al, 2016). En la siguiente imagen se observa el procedimiento que se realiza en este ensayo

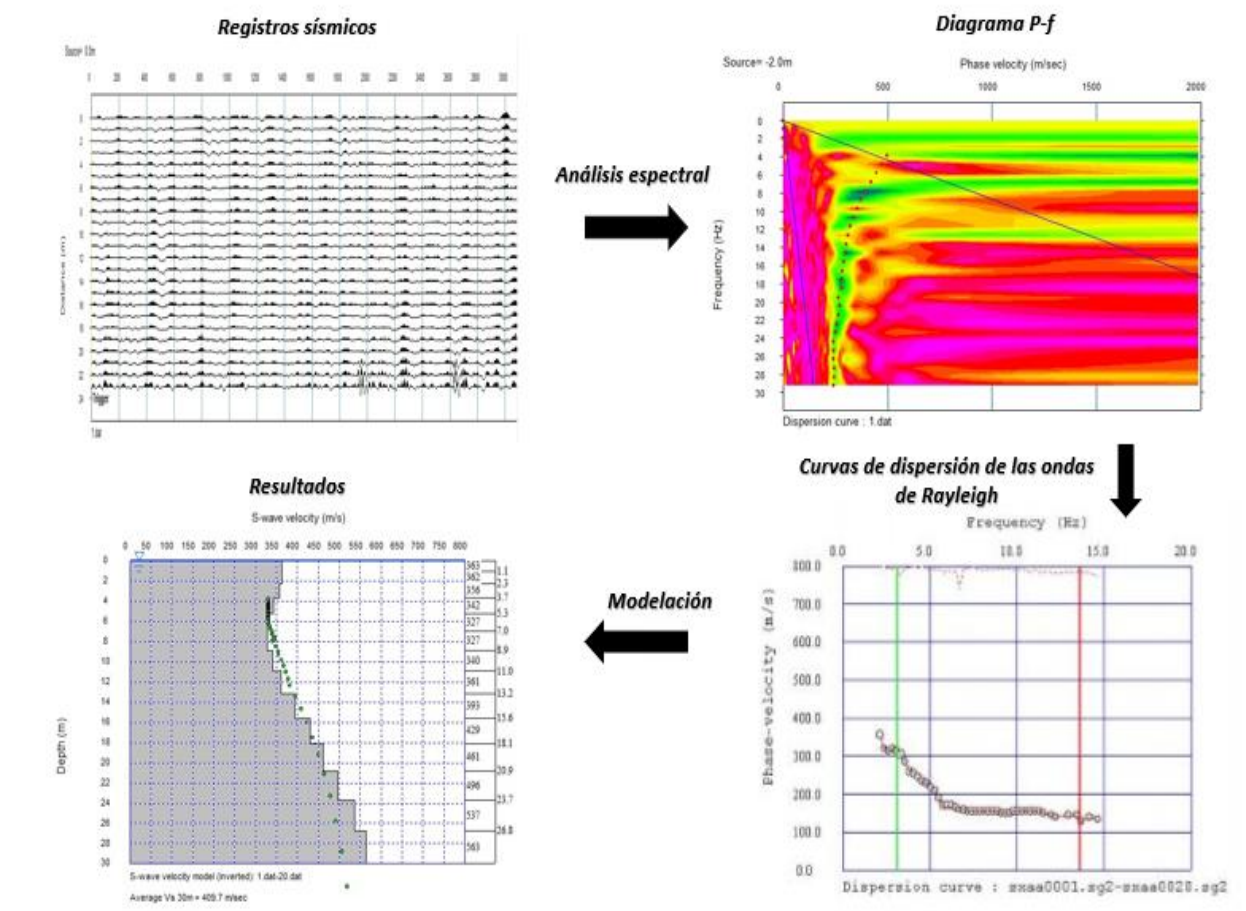


Figura 20. Pasos principales de la técnica Remi. Adaptada de Linares, (2005).

## 2.7 Análisis multicanal de ondas (MASW)

El método MASW, es otra de las técnicas geofísicas que tienen como base el análisis de las velocidades de ondas superficiales, pertenece a los métodos activos ya que requiere una fuente de impulso que genere las perturbaciones en el suelo para su posterior registro y análisis, además es capaz de captar frecuencias altas (desde 12 Hz) y transferirlas a estratos superficiales (San Martín, 2015). Los datos multicanal permiten la identificación y rechazo de los modos de la onda

Rayleigh, y la eliminación del ruido, además la recopilación de datos es más rápida (Louie, 2001).

Las ondas que la fuente emisora genera durante el ensayo MASW, no alcanzan grandes profundidades debido a que estas viajan a altas frecuencias, sin embargo, hay registros de ensayos en los que puede alcanzar los 30 m de profundidad, emitiendo valores correctos de  $V_{s30}$ , adicionalmente, permite obtener un modelo unidimensional de la propagación de ondas de corte a 20-30 m de profundidad. (Pazmiño, L.E., 2017).

El procedimiento en campo consiste en la ubicación del equipo, por lo general se compone de un arreglo de doce o más geófonos electromagnéticos de frecuencias bajas, mínimo de 4,5 Hz, los cuales se ubican a distancias iguales, ya sean cortas de 1 a 2 metros o largas de 50 a 100 metros (linares, 2005), deben ser verticales y estos van conectados a un sismógrafo que registra las vibraciones y a la fuente de impulso que genera las mismas. Se recomienda que para el ensayo MASW, la ubicación de los geófonos se realice en zonas de planicie (GEORYS INGENIEROS S.A.C., 2016, p. 5). Después de que se realiza el registro de los datos, se grafica la curva de dispersión de las ondas Rayleigh y se analizan con un software que se utiliza para determinar el perfil de onda cortante del terreno, entre otros parámetros, el resultado de este ensayo es el perfil de cizalla del subsuelo estudiado y las velocidades  $V_s$  a través de la profundidad (Sandoval, L.A., 2013).

Este método además presenta múltiples aplicaciones tales como: detectar inversión de velocidad de onda cortante, mejorar los diseños de edificaciones, tener una descripción de los estratos sísmicos gracias a la comparación de las  $V_s$ , entre otras aplicaciones, (Gómez & Tobón

2017), también, una ventaja de Masw es la posibilidad de trabajar en perfiles de una, dos o tres dimensiones, cuya estimación se da del proceso de inversión de los datos adquiridos de ondas superficiales (Machuca, 2015).

## 2.8 Análisis espectral de ondas superficiales (SASW)

Según la literatura, el método SASW fue el primer método que se llevó a cabo para el análisis de ondas de superficie. (Nazarian y Stokoe, 1984). Luego fueron surgiendo los métodos MASW (Park et al., 1999) y Remi (Louie, 2001) entre otros. La técnica SASW se basa en utilizar la propagación de las ondas para determinar el perfil de velocidad de onda cortante, para lograr este cometido, se realiza una inversión de la velocidad de manera que se pueda estimar la respuesta, y mejorar las estimaciones hasta que sea aceptable, al invertir la velocidad, se genera una serie de imágenes en escala de profundidad, de ahí con el ajuste de los tiempos de arribo registrados se pueden conocer espesores del subsuelo, (Agustín J.S., 2015) esto ocurre porque cuando la onda rayleigh hace el recorrido por estratos diferentes, su velocidad cambia dependiendo de los materiales que conforman cada capa (figura 21).

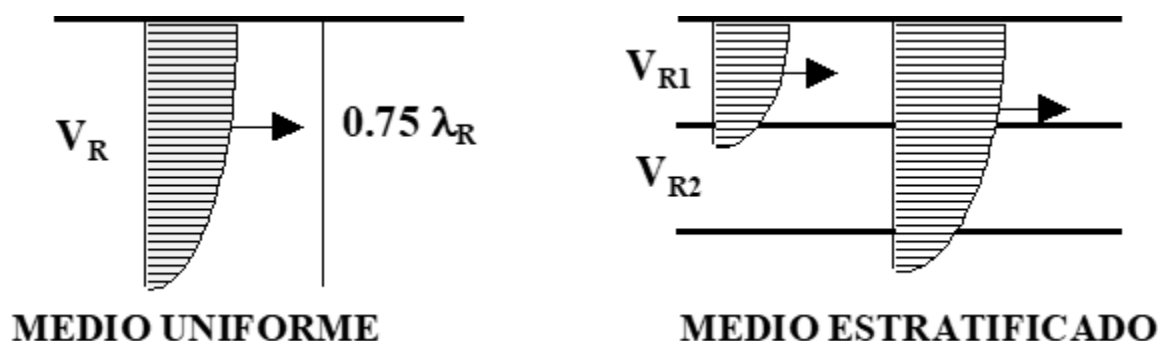


Figura 21. velocidad de recorrido por un medio uniforme y por un medio estratificado, método SASW, Rinaldi. V. (2002).

Este método proporciona grandes ventajas en contraste con las perforaciones o mediciones de pozo, dichas ventajas son valores estimados y puntuales del parámetro  $V_s$ , también es importante saber que el área de estudio que puede abarcar este método es de gran volumen y, aun así, el ahorro en tiempo y costos con el uso del mismo es notable. (Lazcano, S., 2012).

Según la literatura, existen dos configuraciones diferentes en el procedimiento para la detección de señales en terreno, la primera es donde se ubican dos sensores a una distancia “d” entre ellos, suponiendo un eje simétrico o línea recta a partir de la que se alejan equidistantemente de 1 a 60 metros, según la profundidad que se espera alcanzar, la cual viene siendo la mitad de la separación entre los sensores, este proceso se muestra en la figura 22 y la figura 23. (Correia, N.A., 2015)

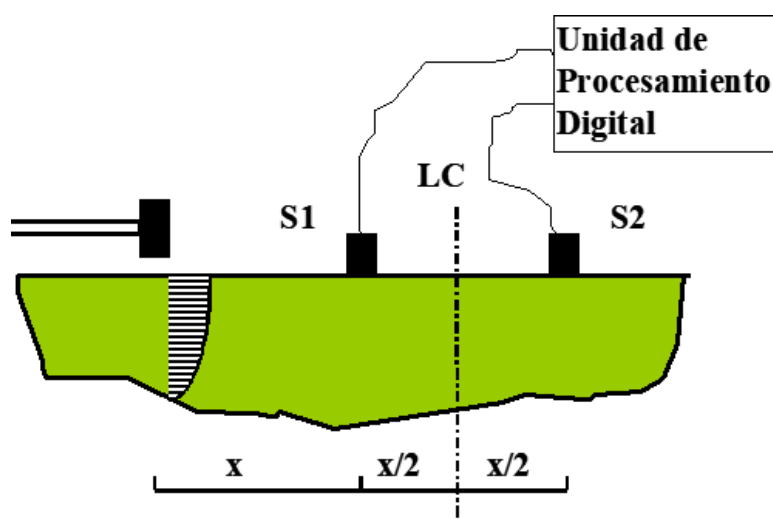


Figura 22. Configuración en terreno método SASW, eje de simetría, Rinaldi Víctor, 2002



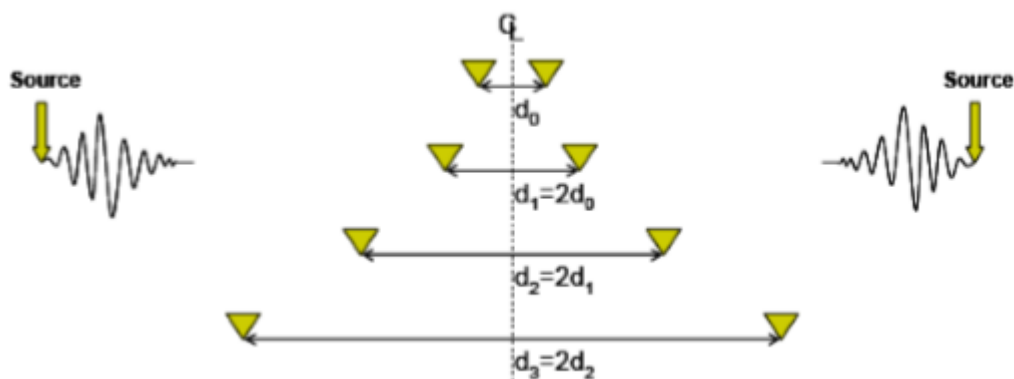


Figura 23. Ubicación de sensores con eje de simetría para registro de datos por el método SASW. Ochoa F, (2017).

Para la segunda configuración se ubica uno de los sensores fijo y otro móvil, de modo que se vaya variando las distancias de separación al doble, con respecto al sensor fijo, tal como se muestra en la figura 24, luego, se genera un impacto al lado del sensor que hace que las ondas se propaguen por el medio y así poder tomar registro de los arribos, cada vez que la separación entre sensores aumente, se debe repetir el impacto. Este método se conoce como arreglo de fuente común, se deben promediar los registros obtenidos para disminuir los ruidos, también, se recomienda utilizar diferentes fuentes para que el rango de frecuencias sea más amplio y al momento de la interpretación de los datos se puedan calcular las curvas de dispersión individual y la experimental (Correia, N.A., 2015).

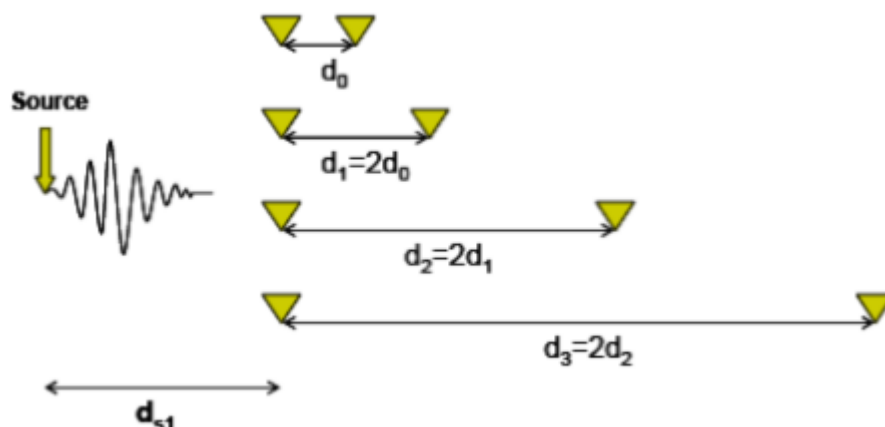


Figura 24. Arreglo de fuente común, método SASW (Ochoa F., 2007)

Primero se calcula la velocidad de fase con las variaciones de la distancia entre geófonos, de aquí se obtienen las curvas de dispersión individuales con las que luego se construye la curva de dispersión experimental, luego se combinan ambas curvas generando una curva compuesta, de esta última se calcula la curva experimental promedio que se usa en el método inverso (Correia, N.A., 2015) La figura 25 y 26 corresponden a las curvas de dispersión mencionadas en el párrafo anterior

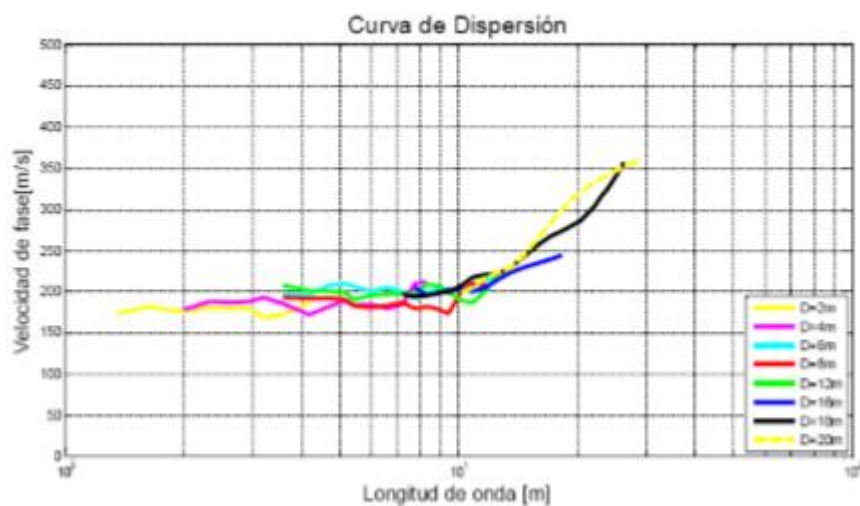


Figura 25. curva de dispersión experimental (Peredo V., 2011)

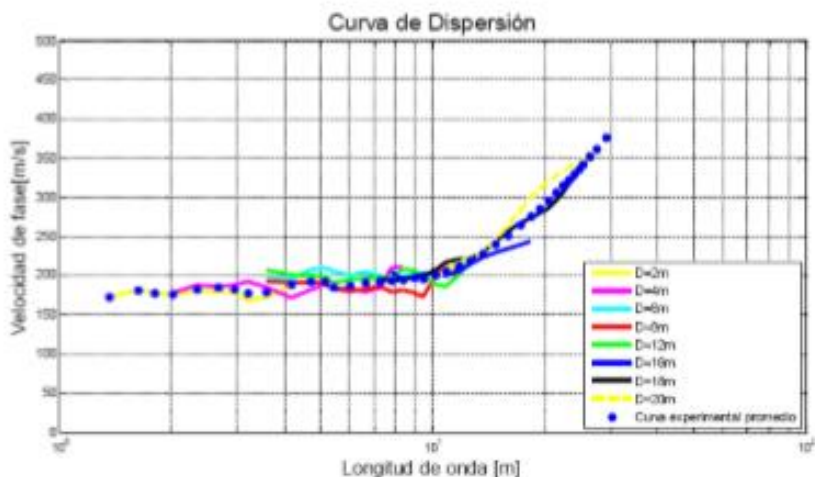


Figura 26. *curva de dispersión experimental promedio (Peredo V., 2011)*

## 2.9 Down hole

El siguiente método a definir es el Down hole, este ensayo tiene como objetivo registrar los tiempos de viaje de las ondas sísmicas internas que se generan en la fuente de impulso, es muy utilizado para la caracterización del subsuelo, incluso más que el ensayo Cross hole, debido a que es más fácil la generación de ondas de corte, también, porque permite medir los perfiles de velocidad de onda de corte para el análisis del comportamiento sísmico en el terreno, sin embargo, puede determinar tanto la velocidad de onda  $V_s$ , como la velocidad de onda  $V_p$ . Como además es un ensayo de tipo invasivo, el procedimiento que se lleva a cabo durante este ensayo inicia con una perforación en el terreno, donde se deben introducir uno o varios geófonos verticalmente, luego, otro receptor es situado a una distancia de 1 a 3 metros junto con la fuente artificial de impulso, ubicado en la superficie del terreno donde son generadas las ondas, estas

viajan por todo el medio entre ambos extremos mientras se hace registro de las velocidades con un sismógrafo, luego se repite el ensayo variando la profundidad del geófono en la perforación (Correia, 2015), así se logra obtener el perfil de velocidad vs la profundidad del terreno, cabe aclarar que la precisión de los resultados se ve influenciada por diversos factores tales como la alteración del suelo cuando se realiza el sondeo, la presencia de agua, la fuerza aplicada en la superficie, entre otras (León & Sarmiento, 2016). La figura 27 representa el arreglo empleado para este tipo de ensayo

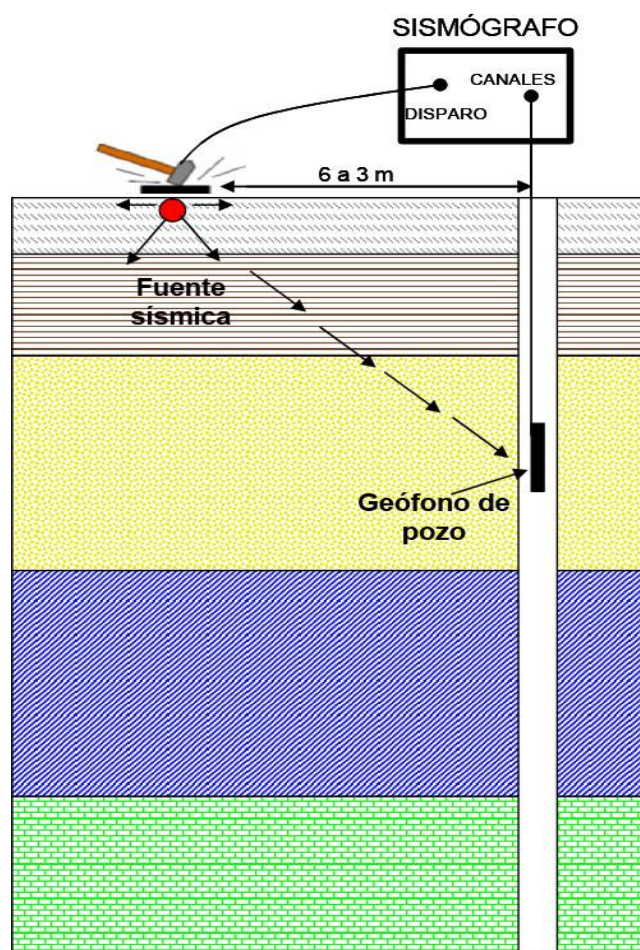


Figura 27. Arreglo del ensayo Down Hole. Obtenido de <https://sismica.com.mx/layout/procedimientos/arreglo-tipico-down-hole.jpg>

Al finalizar el ensayo, se realiza una gráfica de distancia contra tiempo, el valor inverso de la pendiente de dicha grafica viene siendo la velocidad de la onda S. la implementación del ensayo Down Hole nos permite determinar con sus resultados debido a la densidad de materiales y a la velocidad de las ondas, el módulo de elasticidad, la relación de poisson y el módulo de rigidez, para identificar la onda S en la lectura de la frecuencia, se establecen dos características particulares, la primera se refiere a un cambio repentino en la amplitud y el segundo es un cambio en la frecuencia el cual coincide con el cambio de amplitud (Correia, N.A 2015). En la siguiente figura se hace una representación de lo mencionado anteriormente.

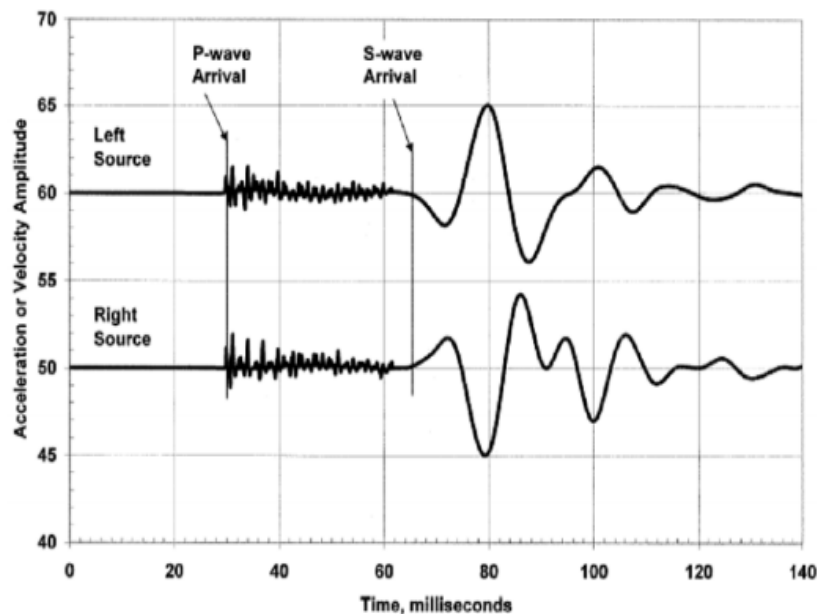


Figura 28. Cambios en la frecuencia y amplitud por la llegada de la onda P y S (ASTM D7400 – 08)

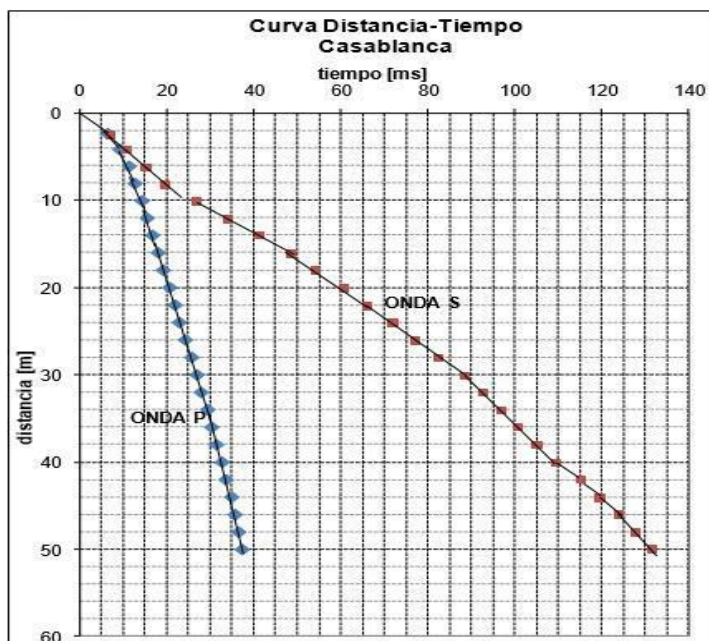


Figura 29. Resultado ensayo downhole, onda S y onda P, en profundidad. Obtenido Red Sismológica, Idiem

## 2.10 Cross hole

El método crosshole es muy conocido por su efectividad para la determinación in situ del parámetro  $V_s$ . Así como el downhole, este método es de tipo invasivo ya que durante su procedimiento es necesario que se realicen dos o más sondeos con el fin de poder instalar varios geófonos en profundidad, los cuales facilitan las lecturas de los arribos de las ondas sísmicas, el primer pozo se ubica con la fuente emisora de energía, luego a una distancia entre 1.5 a 3 metros, se ubica el segundo pozo con el receptor, a partir de ahí, si se realizan más perforaciones se debe conservar una distancia entre ellos de 1 a 3 metros aproximadamente (ASTM, 2007). La fuente y los geófonos son situados a la misma profundidad, de esta manera se miden la velocidad de propagación de las ondas a través del material que hay entre ambos sondajes. Si se repite el

ensayo a distintas profundidades variando de 1 metro, se obtiene un perfil de velocidades versus la profundidad, cabe aclarar que para determinar los tiempos de llegada se hace de forma visual o usando correlaciones que se usan en exploraciones petroleras. (Correia, N.A., 2015).

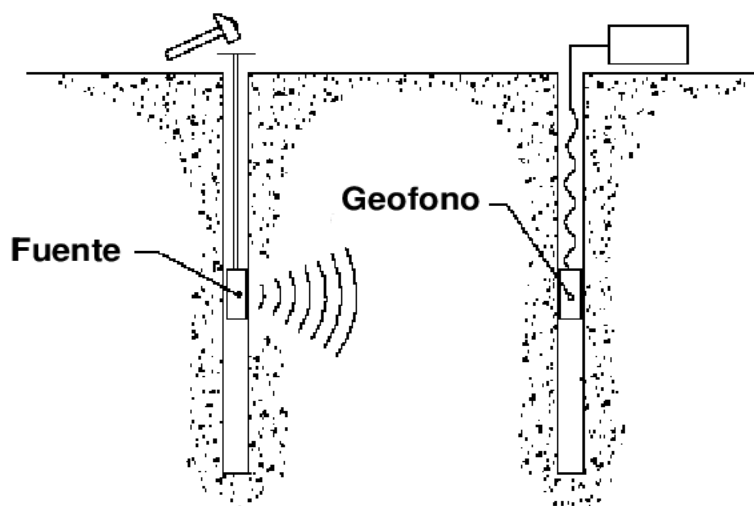


Figura 30. ensayo Crosshole con dos sondeos, Ochoa F, obtenido de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-27-Eschema-Cross-hole\\_fig1\\_30754418](https://www.researchgate.net/figure/Figura-27-Eschema-Cross-hole_fig1_30754418)

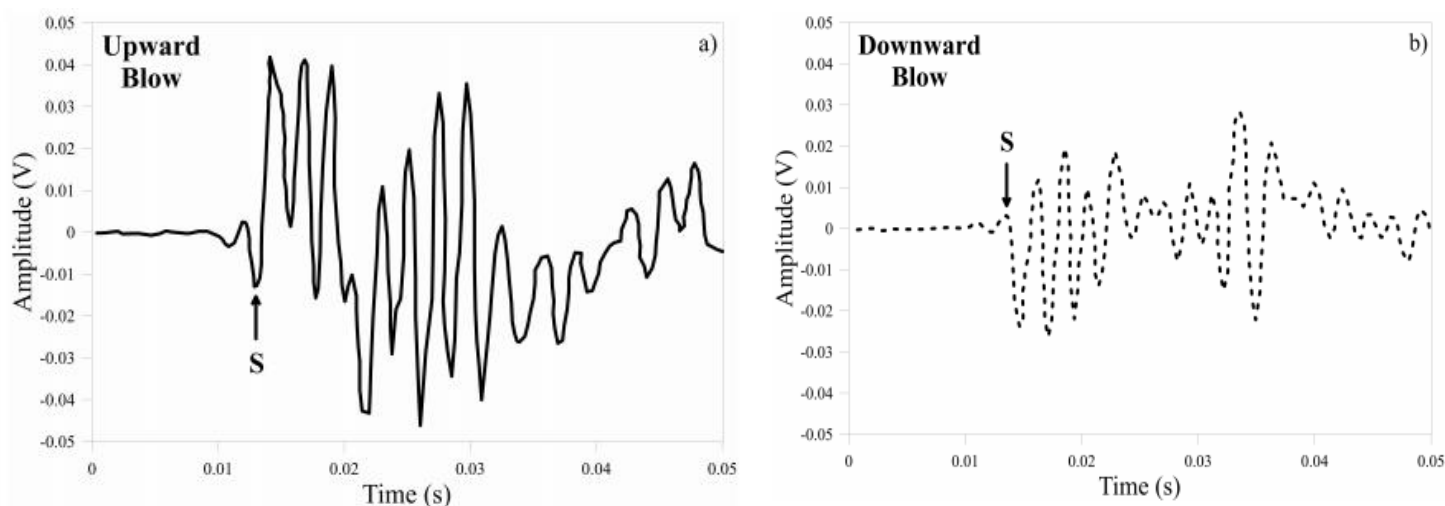


Figura 31. Arribos típicos del ensayo crosshole, a) golpe hacia arriba, b) golpe hacia abajo, Giacheti & Rocha, 2019, obtenido de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-27-Eschema-Cross-hole\\_fig1\\_30754418](https://www.researchgate.net/figure/Figura-27-Eschema-Cross-hole_fig1_30754418)

En la interpretación de los datos del ensayo crosshole se debe tener en cuenta que las ondas S se caracterizan por un aumento en la amplitud de la señal y se polarizan, es decir que invierten la dirección del golpe, además, también se pueden reconocer cuando la frecuencia de la señal disminuye. (Giacheti & Rocha, 2019). Una de las ventajas que tiene este método frente a otros como la refracción sísmica, es la capacidad de detección fácil de capas débiles o pequeñas. (Correia, N.A., 2015).

### **2.11 Método de Nakamura o Razón espectral H/V**

El método de Nakamura es conocido por su bajo costo y facilidad en su implementación, sin embargo, es una técnica que ha sido muy controvertida. Según la literatura, los ensayos de exploración del subsuelo que son basados en la medida del ruido ambiental tuvieron el punto de partida en el trabajo de Nakamura. (Franklin R. et al, 2006).

La estimación de la razón espectral o cociente espectral está basada en la propiedad de no amplificación de la componente vertical mientras atraviesa el terreno, por ello se relacionan las componentes vertical y horizontal del suelo y se considera que el cociente que es producto de ambas permite interpretar el efecto del sitio o dicho de forma más simple las vibraciones ambientales. Para Nakamura, la relación H/V concierne a una función de transferencia debido a conmociones horizontales en los niveles superficiales del suelo. (Sandoval & Vera, 2013), la hipótesis en que está basado todo su trabajo sugiere que un micro temblor se compone por un cuerpo principal de ondas y por ondas superficiales rayleigh provocadas por impactos en la superficie, también se supone que “las acciones sísmicas o componentes en el basamento rocoso y en un afloramiento cercano son iguales” (Franklin, R. et al, 2006), tales valores de las



componentes, los cuales se registran, son amplificadas por los estratos de suelo blando que reposan sobre el sustrato rocoso, considerando que las horizontales se amplifican por multirreflexiones de ondas S y las verticales por multirreflexiones de la onda P. La propuesta de Nakamura se divide en dos postulados, en el primero se asume que las ondas rayleigh afectan solo la superficie del terreno y no la base del suelo. El segundo postulado sugiere que las ondas rayleigh tienen un efecto igual en la superficie para las componentes vertical y horizontal, ambas teorías están basadas en la transformada de Fourier, ver ecuaciones 14 y 15. (Sandoval & Vera, 2013).

$$\hat{f}(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{2\pi i x w} dx \quad (14)$$

$$S_M = \frac{S_T}{E_S} = \frac{S_{HS} * S_{VB}}{S_{HB} * S_{VS}} \quad (15)$$

Donde

$S_M$  = Función de transferencia modificada,

$S_T$  = función de transferencia clásica,

$E_S$  = Razón de  $\frac{S_{VS}}{S_{VB}}$

$S_{HS}$  y  $S_{HB}$  = Espectro horizontal de amplitud de Fourier en la superficie S y la base del nivel del suelo

$S_{VB}$  y  $S_{VS}$  = Espectros de amplitudes de Fourier en la base y la superficie del estrato

La ecuación 15 logro simplificarse debido a resultados obtenidos en 3 ciudades japonesas cuyos rangos de frecuencia se ubicaron entre 0.1. A 20 Hz, las ondas al atravesar estratos rocosos, se propagaban igual en todas las direcciones, como se visualiza en la siguiente figura.

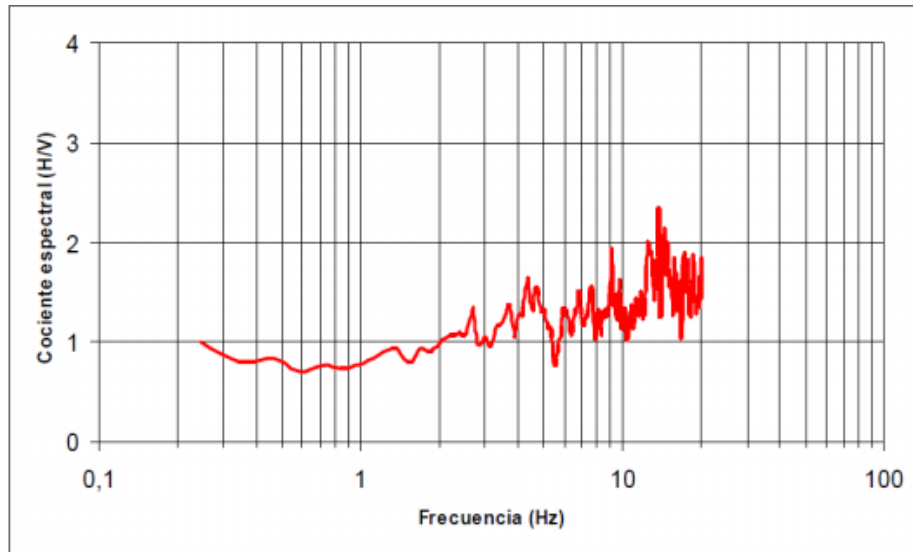


Figura 32. Grafica de ondas de frecuencias Vs relación espectral H/V en un suelo con roca, Sandoval & Vera, (2013).

Luego se dice que:

$\frac{S_{HB}}{S_{vB}} \cong 1$  , por lo que la función de transferencia modificada de Nakamura se establece así

$$S_M = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (16)$$

Esto significa que  $S_M$  puede ser obtenido con única medición en la superficie del terreno.

## 2.12 Método de autocorrelación espacial (SPAC)

Este es un método de exploración con arreglos micro temblores que trabaja con rangos de frecuencias muy bajas, es muy utilizado para estudios de microzonificación sísmica y para caracterización del suelo con un gran alcance en profundidades incluso mayores a 500m (Alfaro & Yokoi, 2005), se desarrolló para el cálculo de curvas de dispersión usando datos de micro temblores con el objetivo de estimar la velocidad de onda cortante, el método utiliza una matriz de receptor circular con un receptor adicional en el centro, a pesar de las ventajas que presenta debido al alcance, es poco utilizado ya que se necesita de mucho tiempo y esfuerzo que muchos no están dispuestos a ofrecer (San Martín, C., 2015).

La técnica SPAC está basada en una teoría conocida como funciones aleatorias estacionarias, donde los micro temblores son considerados como procesos estacionarios en el espacio y tiempo, por tal razón se considera como un método de regresión en que los parámetros de propagación son obtenidos al ajustar los datos experimentales con las funciones teóricas esperadas (Foti et al. 2012). La base de este método es la observación de que la función de autocorrelación espacial se puede obtener por medio de una transformada de Fourier espacial inversa del número de onda (ecuación 17 y 18). (Foti et al. 2012).

$$R(x) = E[s(x, t)s(x + X, t)] \quad (17)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} s(k) e^{-ik \cdot x} dk \quad (18)$$

Donde:

$\chi$ : es el retraso espacial y

E [..]: indica el valor esperado de una cantidad.

El procedimiento para realizar este ensayo requiere mínimo tres estaciones y consta básicamente de 4 pasos (ver figura 33), se pueden emplear varios tipos de arreglos, sean triangulares, circulares, en L, etc. Las bases de este análisis radican en el cálculo de la correlación entre dos registros sincrónicos de dos sensores con una distancia de separación  $X$  y orientados a lo largo de una línea con azimut  $\varphi$ . (Lozano, C.F., 2013). la distancia entre estaciones debe ir aumentando, inicialmente se ubican dichos sensores y se procede con el registro de datos. Lo siguiente es determinar las curvas de autocorrelación espacial para sensores con separaciones iguales y se realiza un promedio de curvas. Para el tercer paso se emplea la ecuación fundamental del método SPAC, Ecuación 19 (Lozano, C.F., 2013).

$$\bar{\rho}(r, \omega_0) = J_0\left(\frac{\omega_0 r}{c(\omega_0)}\right) \quad (19)$$

Donde:

$\bar{\rho}(r, \omega_0)$ : promedio azimutal en la relación de autocorrelación

$J_0$ : Función Bessel de orden cero

R: radio de la configuración

$c(\omega_0)$ : índice de frecuencia

Al reemplazar en la ecuación 19 la función de Bessel de orden cero correspondiente a la ecuación 20, es posible obtener la curva de velocidad de fase de ondas superficiales con respecto a la frecuencia para cada una de las curvas de autocorrelación espacial promediadas.

$$J_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \cos(x \cos(\varphi)) d\varphi \quad (20)$$

El paso final implica la construcción del perfil de velocidad de onda cortante, dicho perfil se logra a partir de una inversión de las curvas de dispersión de velocidad de fase. (Lozano, C.F., 2013).

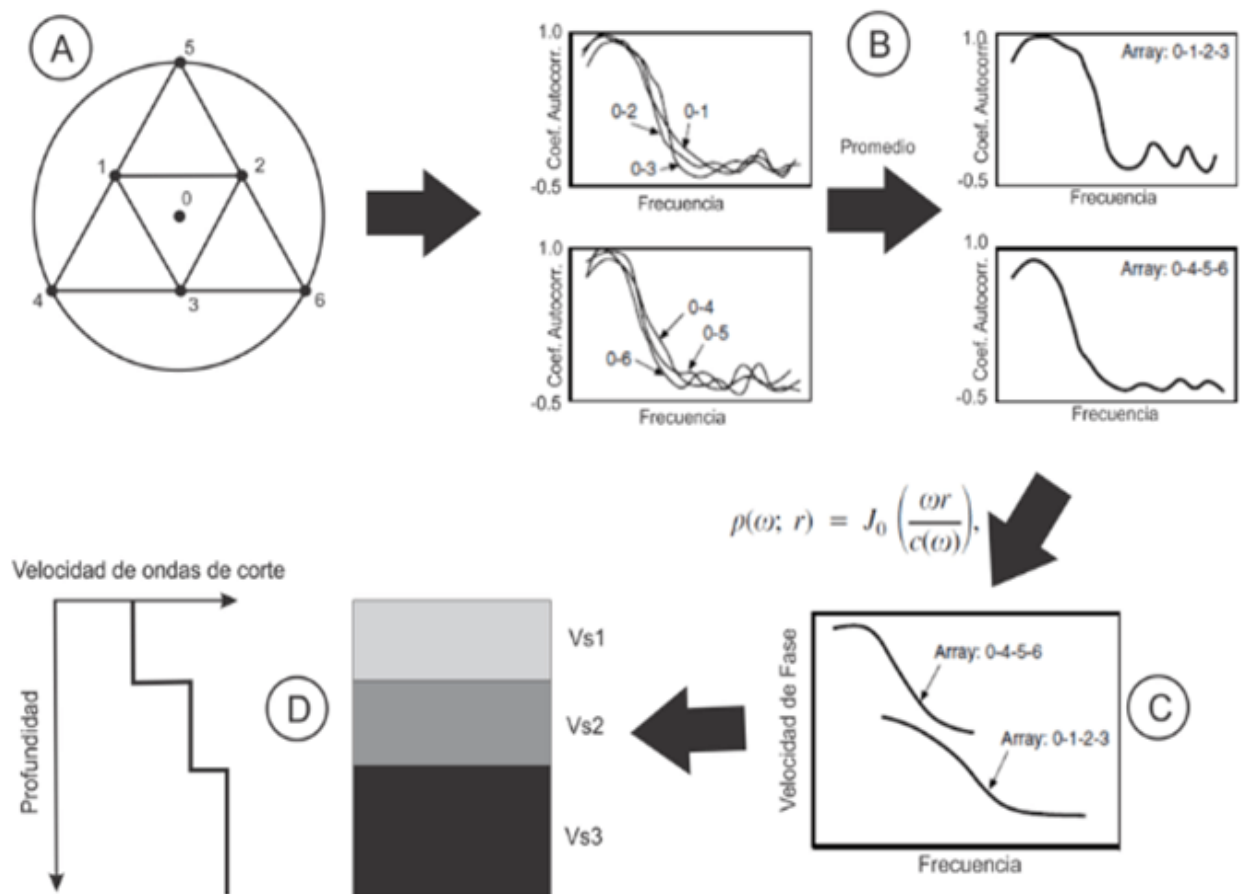


Figura 33. Procedimiento del método SPAC, obtenido de <https://www.cotecno.cl/metodo-spac/>

### 2.13 Método de autocorrelación espacial extendida (ESAC)

El método ESAC deriva del método SPAC siendo una modificación del mismo. Es bidimensional y está basado en el estudio del ruido ambiental que ocurre en la superficie del suelo con el fin de conocer sus características tanto en tiempo como en espacio (Avilés & Barzallo, 2016). Analíticamente, se puede decir que la técnica ESAC se diferencia porque conserva la frecuencia constante con posibilidad de realizar variaciones al valor del parámetro  $r$  (radio), siendo esta una limitación que se tiene en el método SPAC (Dal G., 2015). Por otra

parte, el enfoque del método permite que las velocidades de fase sean determinadas a través de evaluaciones de las funciones de Bessel para cada frecuencia, es decir, la función de Bessel se invierte y los resultados que se obtienen son mejores que definir un valor constante de r (radio). Ya que la velocidad es una función de la frecuencia. (Ohori et al., 2002; Okada, 2003; Parolai et al., 2005).

El procedimiento de este método inicia con la ubicación de sensores, lo cual no requiere un orden sino más bien, de una distribución lógica basada en el lugar donde se realizará el ensayo en caso que su geometría sea una desventaja, sin embargo, según la literatura se recomienda que la forma que mejor se adapta, debido a que facilita la adquisición de datos sea una L en forma de matriz, que de hecho es muy simple de realizar en campo (Dal G., 2015), pero cabe aclarar que también es válido distribuciones circulares, en forma de cruz o forma de T, entre otras; también es importante conocer las coordenadas de los sensores ya que, así como en el SPAC, el azimutal es relevante para el análisis de este método. (San Martín, C., 2015).

Con la modificación de los argumentos de Aki, la ecuación de la razón de autocorrelación espacial del método SPAC, es reemplazada por la expresión  $S(\omega_0, r)$  que también se calcula por medio de la transformada de Fourier de las señales obtenidas, la ecuación 21 que se muestra a continuación es la ecuación fundamental del método ESAC (San martin, C., 2015).

$$S(\omega_0, r_{0n}) = J_0 \frac{\omega_0 * r_{0n}}{c(\omega_0)} \text{ con } n = 1,2,3 \dots N \quad (21)$$

Donde:

$N+1$ : número de sensores

Como dato adicional sobre este método, se conoce que permite investigaciones para determinar longitudes de ondas con distancias que son de 10 a 20 veces la separación máxima entre sensores (Okada, 2003; Parolai et al, 2005), por tal razón, las frecuencias bajas son más confiables a comparación de otros métodos que utilizan igual configuración de la matriz de sensores. Cabe aclarar el cuidado que se debe tener con el espacio entre sensores para lograr tales longitudes mencionadas (San martin, C., 2015).

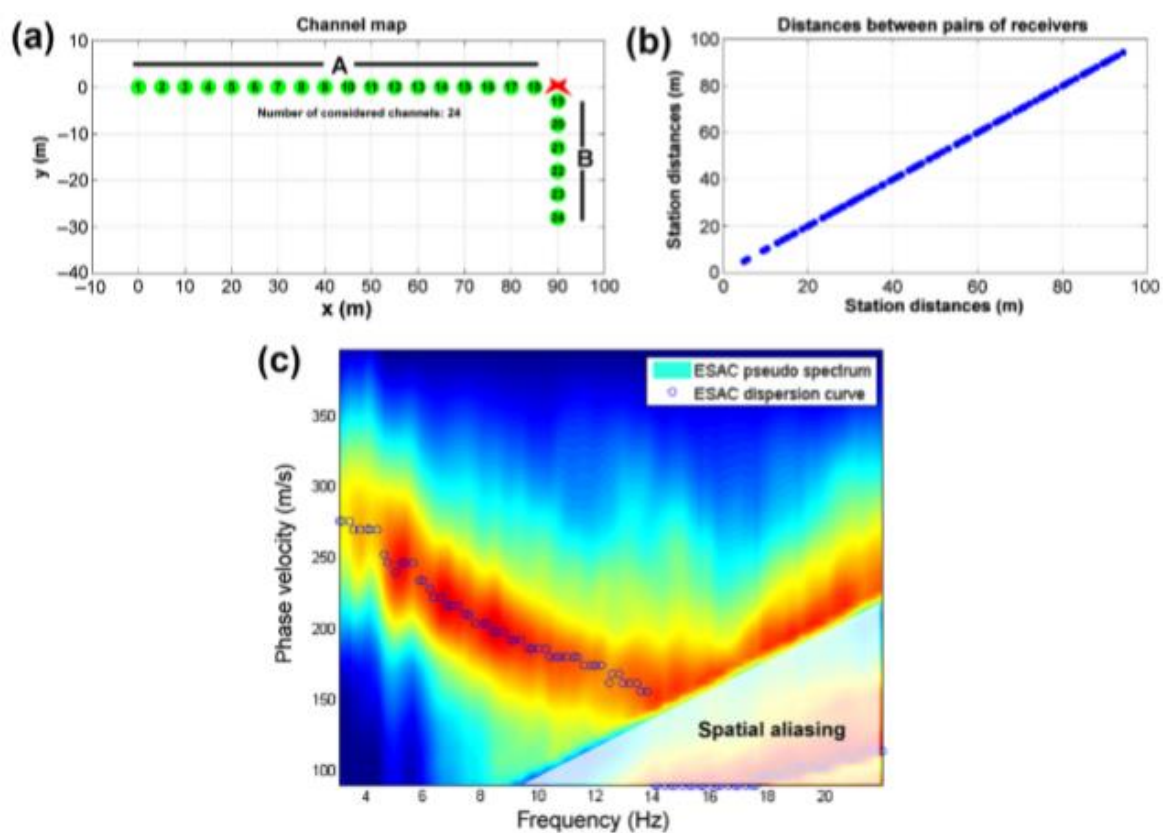


Figura 34. Análisis de autocorrelación espacial extendida (ESAC): (a) matriz bidimensional, (b) distancias entre pares de canales considerados, (c) curva de dispersión aparente recuperada (también indica el área de alias espacial). Obtenido de Foti et al.



### **Capítulo 3. Criterios de la norma colombiana sobre el parámetro $V_s$ para clasificación de suelos y rocas.**

Antes de mencionar lo que la norma sismo resistente NSR-10 indica sobre el parámetro de velocidad de onda cortante y con el fin de una mejor comprensión del tema, se hace necesario conocer algunos conceptos relacionados con los criterios establecidos en dicha norma

#### **3.1 Efectos de Sitio**

Cuando se habla de efectos de sitio o efectos locales se refiere a la transformación que sufren las ondas sísmicas desde la roca base hasta la superficie del terreno (Grajales E., 2003), donde también, las condiciones geológicas, topográficas y de rigidez del suelo que predominan en un área determinada, influyen de diversas maneras y por lo general son desencadenantes de fenómenos a raíz de un sismo, tales como deslizamientos, amplificación exagerada del movimiento o la posibilidad de licuación del suelo (Sandoval & Vera., 2013) y en algunas ocasiones, el efecto de sitio puede aminorar la acción del paso de las ondas sísmicas debido a que “el subsuelo y las condiciones topográficas pueden amplificar o disminuir el umbral de aceleración del suelo en un sitio con respecto a lo que podría esperarse para un sustrato consolidado en ese mismo punto” (Grajales E., 2003), En otras palabras, cuando las ondas sísmicas atraviesan terrenos de roca dura la amplificación del efecto del sismo es menor al compararlo con el resultado que se da cuando el terreno es blando, siendo el efecto de sitio en

este caso, la atenuación de las ondas (Tsige, M. & García Flórez, I., 2006), Lo anterior se puede apreciar en la figura 35

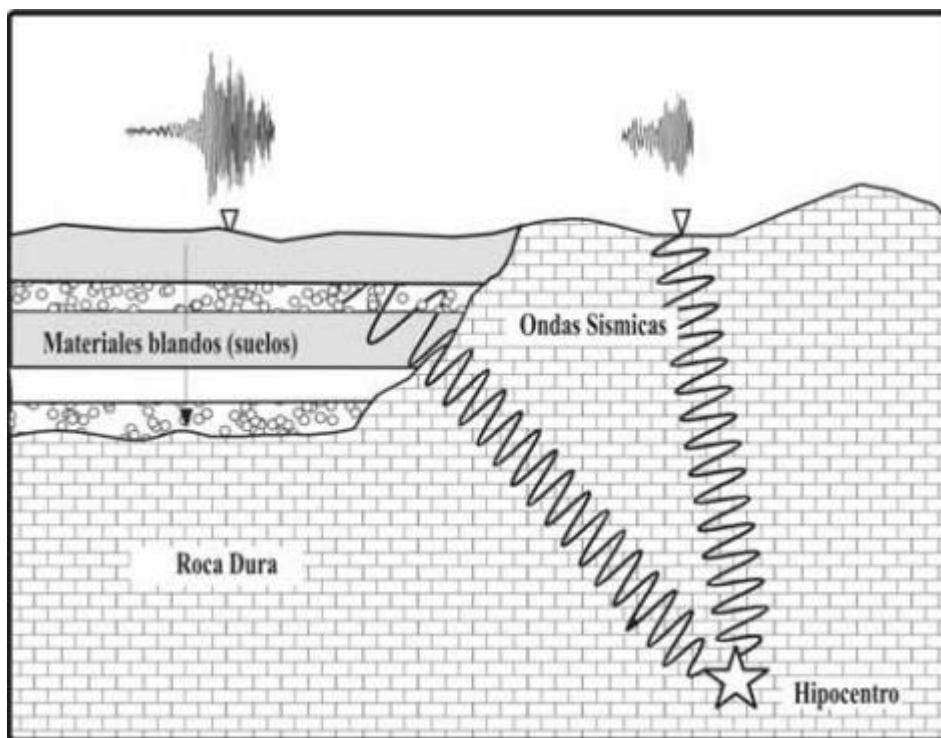


Figura 35. paso de ondas sísmicas por terreno blando y roca dura. Sandoval & Vera, 2013.

En el capítulo 7 del título H de la norma sismo resistente colombiana, el efecto de sitio o efecto sísmico es considerado en el momento de realizar el diseño de estructura, por lo que se requiere una evaluación geotécnica que incluye conocer sobre 4 aspectos: la litología del suelo, el tipo de sollicitación sísmica, las condiciones topográficas y el efecto de la interacción sismo-suelo- estructura. (AIS, 2010). La incidencia del perfil litológico abarca características dinámicas como variación de la rigidez, el espesor de las capas y la profundidad a la que se encuentra el sustrato rocoso y la presencia de terrenos blandos cerca de la superficie, lo cual sería un factor negativo al momento de la ocurrencia de un sismo, ya que el daño sería considerable (Tsige, M.

& García Flórez, I., 2006), (Aki, 1988, Borchardt, 1994, Seed et al., 1997). El tipo de sollicitación sísmica hace referencia a los escenarios de la respuesta dinámica que el suelo puede generar debido a un sismo, para lo cual, la norma sismo resistente en el título H, requiere la recopilación de al menos tres situaciones de antecedentes o historial de movimientos representativos de cada fuente sísmica relevante, esto con el fin de evaluar la respuesta del terreno frente a un suceso real, cabe aclarar que las historias de movimientos deben ser compatibles con el nivel de amenaza que tenga el sitio en estudio (AIS, 2010), El tercer aspecto se refiere a las condiciones topográficas de la zona, las cuales son relevantes en el caso que las características del terreno sean irregulares, como se mencionó anteriormente, la topografía “puede amplificar o disminuir el umbral de aceleración del suelo “ (Grajales E., 2003),

Finalmente, el cuarto aspecto y no menos importante es el efecto de la interacción sismo-suelo- estructura, tal como su nombre lo indica, se refiere al impacto de los sismos en las construcciones, en estática, el efecto suelo-estructura corresponde a la capacidad de transmitir las cargas causadas por la estructura al piso, así mismo, el suelo debe poder soportar estas cargas. En la Geotecnia, de acuerdo a sus funciones de diseño de cimentaciones, estimación de asentamientos, entre otros, el efecto suelo-estructura se refiere a la evaluación del movimiento sísmico máximo esperado durante la vida útil de un proyecto, cuya finalidad es hacer una estimación del efecto y proponer soluciones en términos de resistencia estática, ya que, en caso de un sismo, es la cimentación la que “permite disipar energía de la vibración de la estructura hacia el subsuelo” (Chávez F.J & Montalva G.A ,2014).

Algunos efectos asociados con la interacción de suelo-estructura pueden variar respecto a características de la estructura, la cimentación y del suelo, entre las que se mencionan los suelos

blandos y compresibles, el aumento en el periodo suelo-estructura, aumento de los desplazamientos laterales de la estructura ante solicitaciones sísmicas, variación en la distribución de las fuerzas, entre otros factores. Se debe tener en cuenta que los efectos de interacción suelo-estructura no se deben confundir con los efectos de sitio ocasionados por la amplificación de la onda sísmica al transitar desde la roca hasta la superficie. (AIS. 2010).

### 3.2 Espectro elástico de diseño

Para realizar el diseño estructural de una obra, es indispensable tener en cuenta el criterio normativo del espectro elástico de diseño, dado que según el título A de la norma sismo resistente colombiana, las características de los movimientos sísmicos de diseño se expresan por medio de este espectro, es decir, se puede estimar el movimiento del terreno en caso de un sismo y con esto disminuir el factor de riesgo al diseñar sobre esos valores, cabe aclarar que el parámetro  $V_s$  es el que permite la determinación de dicho criterio, puesto que al conocer las características del suelo y específicamente el valor de  $V_{s30}$  para un sitio de interés, se puede modificar el espectro de diseño en roca para ese valor de  $V_{s30}$ , de esta manera se tienen en cuenta las modificaciones que el sismo ocasiona debido a la amplificación del movimiento del subsuelo al paso de las ondas por los depósitos sedimentarios superficiales (Chávez F.J & Montalva G.A ,2014), además, los efectos de sitio también están incluidos en el espectro de diseño.

### **3.3 El parámetro Vs30**

Uno de los parámetros más importante y más estudiado para la clasificación del subsuelo es el Vs30, entendido como la velocidad de onda de corte promedio ubicada desde la superficie hasta los 30 metros de profundidad (Martin et al, 2004), tal distancia ha sido determinada debido a que el suelo dentro de ese espacio es el que mayormente influye en el comportamiento de las estructuras erigidas sobre él. Actualmente en Colombia la norma sismo resistente, en el título A, utiliza este criterio para la clasificación del perfil del subsuelo, por lo que la implementación de los métodos geofísicos, para la obtención de este parámetro es muy importante, tales métodos, en su mayoría alcanzan los 30 metros de profundidad, emitiendo valores de Vs30 correctos. Sin embargo, para ciertas mediciones los métodos no son suficientes al realizar los análisis correspondientes a la profundidad deseada; esta situación puede presentarse cuando los estratos rígidos se encuentran a poca profundidad, es decir, antes de los 30 m, o en situaciones con mucho ruido ambiental, lo que complica el análisis espectral (Sandoval, L.A., 2013).

### **3.4 Definición del perfil de suelo de acuerdo a la NSR 10**

Dentro de la normativa colombiana se incluyen criterios que permiten la clasificación del perfil de suelo con base en los valores de la velocidad de onda cortante Vs, esta situación señala la importancia que dicho parámetro tiene, ya que la determinación del espectro elástico de diseño, el cual aplica a todo el diseño estructural de la edificación, está relacionada con este valor, así como también, a la realización de diseños de cimentaciones.

En el título A de la NSR-10, se observa la clasificación de los perfiles del suelo en Colombia, los cuales surgen de aquellos procedimientos que se basan en los valores de los parámetros del suelo obtenidos en los primeros 30 metros del terreno (AIS, 2010), la norma contempla 6 tipos de suelo diferentes, de los cuales 5 tipos pueden ser definidos por la velocidad de onda cortante, es decir, más del 80 % de los perfiles de suelos para el análisis sísmico de las edificaciones, se pueden clasificar conociendo el valor de este parámetro, de ahí, la importancia de utilizar la geofísica y su amplia serie de ensayos para determinar el valor de  $V_s$ , de modo que se pueda establecer con precisión el tipo de perfil de suelo y por lo tanto su influencia en la determinación del espectro de respuesta para el análisis sísmico de la edificación. En la tabla 4 se muestra dicha clasificación

Tabla 4

. Clasificación de los perfiles de suelo de acuerdo a la velocidad de ondas S

| Tipo de perfil | Descripción   | Definición   |
|----------------|---|--|
| A              | Perfil de roca competente   | $V \geq 1500$ m/s  |
| B              | Perfil de roca de rigidez media   | $1500$ m/s > $V_s \geq 760$ m/s  |
| C              | Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o<br>perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios | $760$ m/s.> $V_s \geq 360$ m/s<br>$N \geq 50$ , o<br>$S_u \geq 100$ kPa ( $\approx 1$ kgf/cm <sup>2</sup> )  |
| D              | Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o<br>perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones                                       | $360$ m/s > $s v \geq 180$ m/s<br>$50 > N \geq 15$ , o $100$ kPa ( $\approx 1$ kgf/cm <sup>2</sup> ) > $S_u \geq 50$ kPa ( $\approx 0.5$ kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| E              | Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o  | $180$ m/s > $V_s$  |

|   |  |  |
|---|--|--|
|   | perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas  | IP > 20 w t 40% 50 kPa ( $\approx 0.50$ kgf/cm <sup>2</sup> ) > Su |
| F | Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: |  |
|   | F1 — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.                       |  |
|   | F2 — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).   |  |
|   | F3 — Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con Índice de Plasticidad IP > 75)  |  |
|   | F4 — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)   |  |

---

Fuente: Reglamento colombiano de construcción sismo-resistente. Título A. (2010) Obtenido de: Reglamento colombiano de construcción sismo resistente.

De acuerdo a la información presentada en la tabla, los perfiles de suelo tipo A se reconocen como roca competente debido a su dureza, los perfiles tipo B de igual forma entran al grupo de roca competente pero con meteorización y fracturación moderada, los perfiles tipo C, se definen como roca blanda muy meteorizada o fracturada y suelo muy denso, los perfiles de suelo tipo D se conforma por suelo rígido, los perfiles de suelo tipo E, están conformados por estratos de más de 3 metros de arcilla blanda y por último el perfil de suelo tipo F, el cual corresponde a “suelos especiales, licuables, colapsables, arcillas muy plásticas, suelos orgánicos” (Lazcano, S., 2012).

### **3.5 Aplicación de métodos geofísicos para establecer perfiles de velocidad de onda de corte en la ciudad de Ocaña.**

Hasta este punto, se conoce una amplia variedad de métodos geofísicos existentes, los procedimientos para ejecución, los alcances y utilidad en el reconocimiento de características geotécnicas como el perfil de subsuelo, lo que permite el análisis sísmico de estructuras en la ciudad de Ocaña, sin embargo, se debe tener en cuenta que la ciudad no cuenta con estudio de microzonificación sísmica y son los criterios dados en la tabla 4, lo que permite establecer el perfil de suelo para el diseño sísmico correspondiente al sitio donde se proyectara una edificación.

Con el fin de conocer con mayor detalle los materiales que componen los perfiles de suelo presente en la ciudad de Ocaña, es necesario definir los siguientes aspectos:

#### **3.5.1 Geología urbana del municipio de Ocaña**

Según el plan básico de Ordenamiento territorial del municipio de Ocaña (2002) y según la estratigrafía de la zona, se han definido las siguientes unidades geológicas: terrazas aluviales, llanuras de inundación, depósitos cuaternarios de origen aluvial, rocas sedimentarias poco consolidados de la formación algodonal altamente meteorizadas, rocas ígneas del complejo intrusivo extrusivo. De las anteriores unidades, son: la formación algodonal y el complejo Igneo Intrusivo-Extrusivo las que predominan en las zonas donde se desarrolla en su gran mayoría el



urbanismo de la ciudad de Ocaña,. La figura 36 muestra el mapa geológico de Ocaña, donde el color amarillo alude a la formación algodonal y el color naranja la formación ígnea.



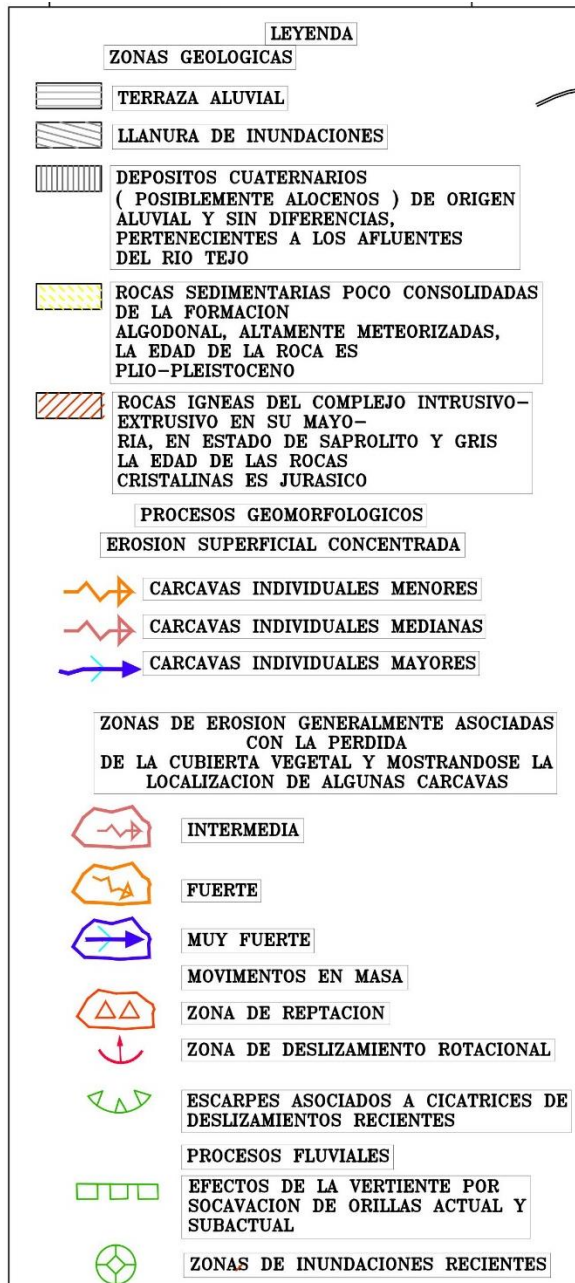


Figura 37. Ampliación de la leyenda del mapa geológico de Ocaña. Adaptado del Plan Básico de Ordenamiento Territorial, municipio de Ocaña. 2002.

### **3.4.1.1 Formacion Algodonal (Tpa):**

Es la formacion mas representativa en la ciudad, su origen es sedimentario y está “compuesta por conglomerados con trozos de roca y cuarzo de color amarillo y gris, con intercalaciones de areniscas arcillosas de color verde y gris y arcillolitas gris verdosa y amarillenta” (Decorte & Salinas, 1980, p 65).

### **3.4.1.2 Complejo Igneo intrusivo- extrusivo**

La segunda formacion geologica es de carácter igneo, conocida como el complejo intrusivo.- extrusivo (Jci), el cual se compone por dos fases mineralogicas y de textura, la primera, es acida muy meteorizada donde predominan los colores ocre, naranja o tonos amarillentos, crema y palo rosa; su aspecto es arcilloso con textura afanitica. La segunda fase tambien se compone de roca meteorizada pero con textura faneritica original de grano fino, los colores que predominan son el negro y localmente brillante (Sepulveda & Ortega, 2020).

## **3.5.2 Investigación realizada en la ciudad de Ocaña**

En relación a la determinación de los perfiles de suelo presentes en el perímetro urbano de la ciudad de Ocaña, se han desarrollado algunas investigaciones con el uso de métodos geofísicos tanto activos como pasivos, en particular el uso de métodos de Refracción Sísmica, método MASW y método REMI. Dichas investigaciones se han centrado en establecer valores de Vs30 en los materiales que conforman la Formación Algodonal (de origen sedimentario) y la formación de origen Ígneo.

### 3.4.2.1 Investigación 1

Esta investigación titulada “DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DINÁMICOS EN LOS MATERIALES QUE COMPONEN LA FORMACIÓN ALGODONAL EN OCAÑA NORTE DE SANTANDER MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS” fue realizada en el año 2017, permitiendo obtener perfiles de velocidad de onda P y onda S en varios sectores de la ciudad de Ocaña en los que se tiene presencia de depósitos perteneciente a la formación Algodonal. Los sectores estudiados se localizan en la parte sur oriental y occidental del perímetro urbano de Ocaña. Aunque se obtuvieron perfiles de velocidad de onda de corte, se tuvo el inconveniente que la profundidad de análisis no alcanzó los 30m requeridos de acuerdo a lo indicado en la NSR 10, no obstante se obtuvo información útil para un perfil de suelo hasta 15 m de profundidad que permitió establecer que para este espesor, el perfil de suelo en los sectores estudiados se podía clasificar como un perfil tipo D. en la Tabla 5 se pueden apreciar los valores medios de  $V_p$  y  $V_s$  obtenidos para los materiales pertenecientes a la formación Algodonal hasta 15 m de profundidad.

En las figuras 38 y 39 se puede apreciar el perfil de Onda P y de Onda S encontrado en uno de los sitios estudiados.

Tabla 5.

*Valor promedio de Onda P y Onda S en los materiales de la formación algodonala obtenidos hasta los 15m de profundidad*

| <b>Conglomerado</b>                  |                                      | <b>Arcillolita (pan de jabón)</b>     |                                      |
|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| <b><math>V_p</math></b> = 646,43 m/s | <b><math>V_s</math></b> = 241,23 m/s | <b><math>V_p</math></b> = 1438,45 m/s | <b><math>V_s</math></b> = 313,08 m/s |

Fuente: Martínez & Sepúlveda, 2017. Determinación de los parámetros dinámicos en los materiales que componen la formación algodonala en Ocaña Norte de Santander mediante métodos geofísicos.

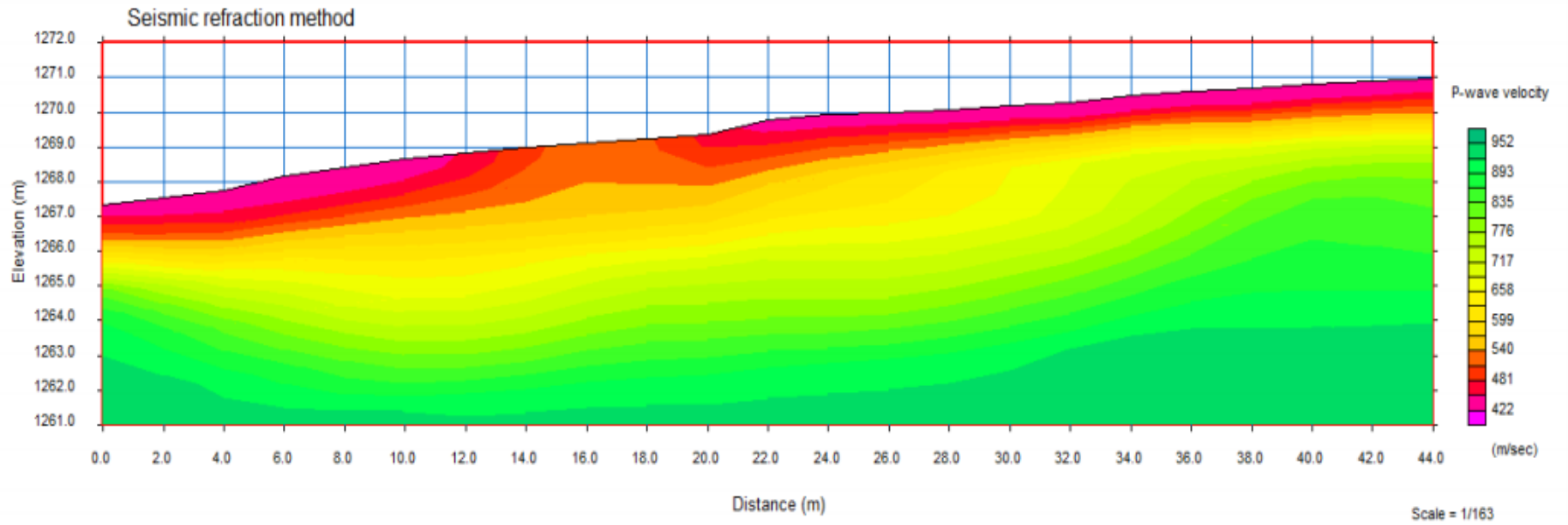


Figura 38. Perfil de velocidad de onda P, zona Acolsure, con rms error de 0,888884 msec. formación algodonal. Martínez & Sepúlveda, obtenido de: Determinación de los parámetros dinámicos en los materiales que componen la formación algodonal en Ocaña norte de Santander mediante métodos geofísicos, 2017



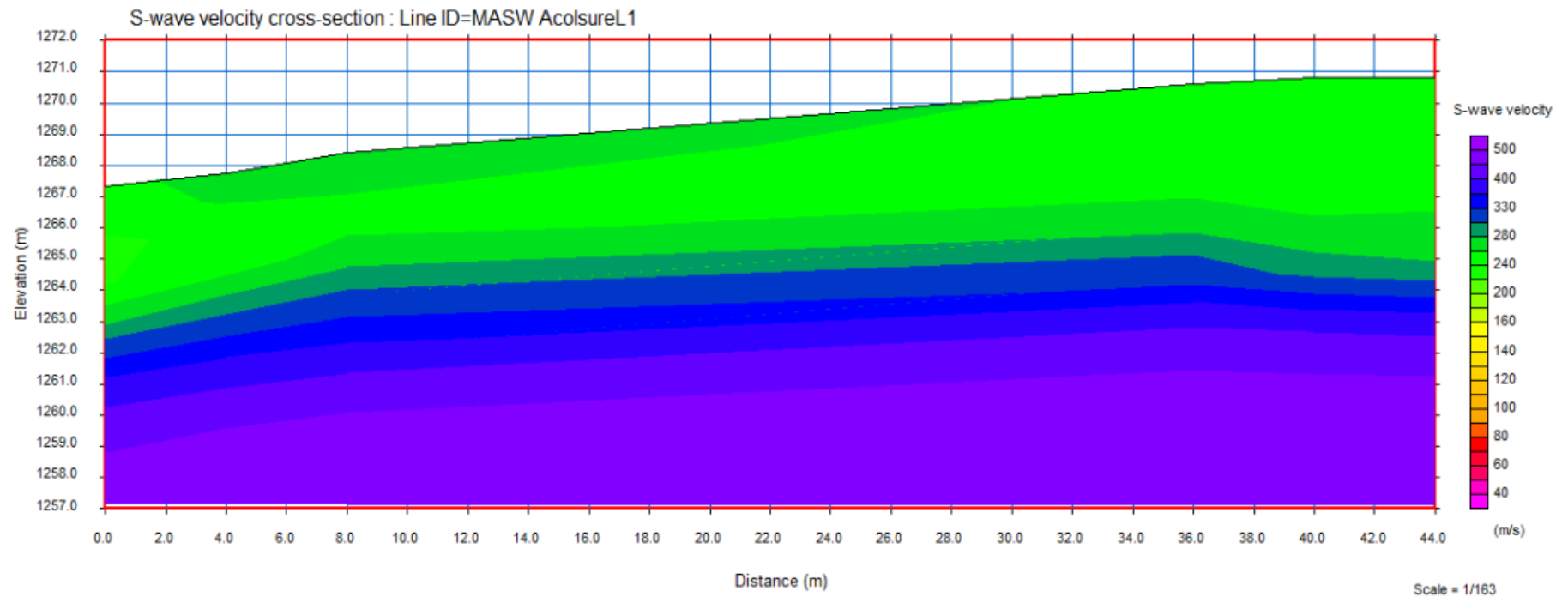


Figura 39. Perfil de velocidad de ondas S, zona Acolsure, con rms error de 1,254330%, formación algodonal. Martínez & Sepúlveda, obtenido de: Determinación de los parámetros dinámicos en los materiales que componen la formación algodonal en Ocaña Norte de Santander mediante métodos geofísicos, 2017

### 3.4.2.2 Investigación 2

Esta investigación esta titulada “DETERMINACIÓN DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD DE ONDA CORTANTE EN LA ZONA SUR ORIENTAL DE LA CIUDAD DE OCAÑA, N.S MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO PASIVO: REMI”, el procedimiento para los ensayos fue similar a la investigación 1, donde se obtuvo perfiles de velocidad de onda P y onda S en sectores donde hace presencia depósitos de la formación algodonada y del complejo ígneo intrusivo- extrusivo. Los sectores estudiados se ubican en la zona sur oriental del perímetro urbano del municipio de Ocaña. Para el desarrollo de esta investigación se usaron los métodos Remi y MASW, por lo que en la figura 40 se comparan los perfiles obtenidos: en la parte derecha por el ensayo MASW y en la izquierda por REMI.

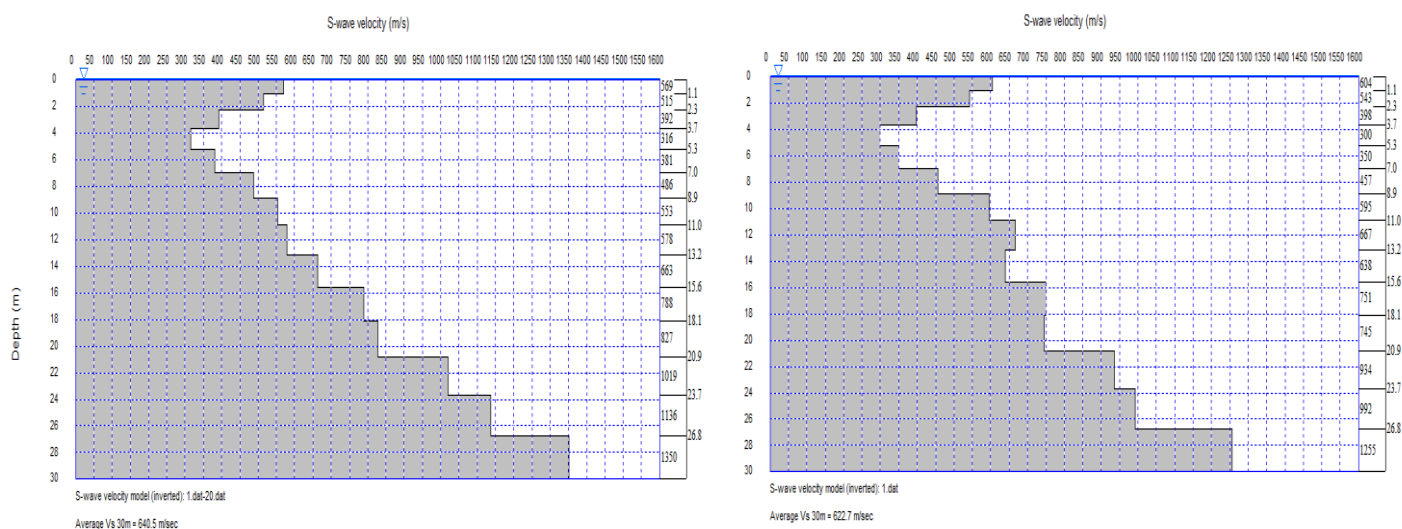


Figura 40. Comparación de perfiles de suelo obtenidos con ensayo REMI y MASW, en un sector donde está presente El complejo ígneo Intrusivo- Extrusivo. Sepúlveda y Ortega, 2020.



Finalizado el análisis, se determina el valor Vs30 promedio para las dos formaciones como se muestra en la tabla 6, luego, se compilo cada método en un solo dato, relacionando los valores de Vs30 más representativos para cada formación, la tabla 7 nos muestra dichos datos

Tabla 6.

*Valores promedio de Vs30 para la formación algodonal e ígnea*

| Formación | Valores de Vs30(m/s) |        | Desviación (m/s) |       |
|-----------|----------------------|--------|------------------|-------|
|           | Remi                 | MASW   | Remi             | MASW  |
| Algodonal | 401,99               | 404,28 | 57,71            | 66,06 |
| Ígnea     | 688,44               | 676,26 | 51,93            | 49,60 |

Fuente: Sepúlveda y Ortega, 2020

Tabla 7.

*Valores de Vs30 representativos de la formación algodonal e ígnea y su desviación*

| Formación | Valores de Vs30 (m/s) | Desviación (m/s) |
|-----------|-----------------------|------------------|
| Algodonal | 403                   | 60,96            |
| Ígnea     | 682                   | 50,28            |

Fuente: Sepúlveda y Ortega, 2020

Según los valores obtenidos de Vs30 y según la NSR-10, la clasificación del perfil del suelo en ambas formaciones es tipo C, sin embargo, el complejo ígneo se considera suelo con mayor resistencia desde la superficie, dado que según los resultados desde los 4 metros se presentan incrementos progresivos en la velocidad de onda S con el aumento de la profundidad. Siendo un dato útil para definir las condiciones de sitio en zonas donde está presente esta formación geológica. Alvarez, Garnica, & Pérez S (2003), declaran que “algunos materiales

geológicos debido a la presión litostática, se compactan a mayores profundidades, lo cual se traduce en un aumento progresivo de la rigidez y, por ende, un aumento de la velocidad de propagación de las ondas elásticas” (p. 8).

## Capítulo 4. Conclusiones

Existen diversos métodos para realizar la exploración del subsuelo, en particular, para la exploración indirecta se cuenta con métodos como los Geofísicos, los cuales permiten conocer parámetros característicos del terreno y de esa forma permitir la clasificación del tipo de perfil de suelo sin necesidad, en la mayoría de los casos, de la utilización de métodos invasivos, además, la obtención de dichos parámetros representa una ventaja para la formulación de los diseños estructurales de acuerdo a los resultados obtenidos en terreno.

Es importante reconocer que cada método tiene ventajas y desventajas en aspectos como: precisión, profundidad de exploración, capacidad para detectar múltiples estratos, posibilidad de trabajar en lugares con mucho ruido ambiental, rapidez y costo (Lazcano, 2007). algunos métodos presentan mayor facilidad para trabajo en campo, tal es el caso del ensayo REMI, siempre y cuando se tengan condiciones adecuadas de ruido ambiental, y del ensayo MASW, el cual genera espectros de velocidades con mayor precisión, además, el arreglo lineal de los geófonos para estos métodos junto con el de refracción sísmica es considerado práctico y fácil, a diferencia de las técnicas ESAC y SPAC, las cuales utilizan una configuración bidimensional en los sensores (arreglo circular, triangular, forma de L, etc.), lo que hace que en la práctica, su aplicación genere una gran demanda de tiempo y energía. También el método de análisis espectral de ondas superficiales SASW tiene ventaja en campo debido a que el ensayo se desarrolla con solo dos sensores que se ubican con espacio entre 1 a 60 m o más, en comparación con otros métodos que utilizan mayor cantidad de sensores. Por otra parte, se encuentran los métodos downhole y crosshole, los cuales son más exactos ya que se complementan con

perforaciones en el terreno, pero eso los vuelve más costosos, además de que es difícil realizarlos en ambientes ruidosos.

También es importante considerar aquellos métodos cuyo análisis de datos se realiza de forma fácil y sencilla respecto a otros, tal es el caso del método de correlación de Vs con penetración estándar, el cual no presenta ninguna complicación en el registro de las ondas S, así como en el análisis e interpretación gráfica del cálculo de velocidades, a diferencia de la refracción sísmica que en algunos casos dificulta la medición y evaluación de las ondas S, sin embargo este ensayo tiene la ventaja de que puede cubrir grandes extensiones de terreno. La técnica de Nakamura es considerada de fácil implementación, con la diferencia de que su aplicación es mucho más controvertida ya que, así como el ensayo REMI que utiliza como recurso base el ruido ambiental, se debe evitar realizar este tipo de técnica en lugares que no tenga las condiciones adecuadas de ruido ambiental, puesto que los resultados no serán confiables.

Respecto a las ventajas de conocer el valor de la velocidad de onda cortante, el cual es un factor determinante en el análisis del suelo, se encuentra que permite definir los efectos de sitio, el tipo de material y por tal motivo, contribuye a la caracterización del perfil del suelo en estudio, lo que representa beneficios para la minimización de fenómenos sísmicos y también en ahorro de tiempo y dinero, demostrando como opción viable y práctica implementar los métodos de exploración que determinan el perfil de Vs y que escasamente son conocidos o utilizados en Colombia.

Por otra parte, Ocaña es un municipio que no cuenta con un estudio de microzonificación sísmica, por lo que se hace muy importante la implementación de métodos geofísicos para poder establecer las condiciones de sitio en diferentes sectores de la ciudad y para las diferentes formaciones geológicas presentes en el perímetro urbano. Mediante el uso de métodos geofísicos como los ensayos de Refracción sísmica, MASW y REMI, se han desarrollado investigaciones a nivel de proyectos de grado que han permitido establecer los perfiles de suelo presentes en cada formación. Inicialmente, en la investigación de los autores Sepúlveda J.S. & Martínez C.A, en el año 2017, se obtuvieron valores de velocidad de onda cortante para profundidades hasta los 15 m, lo cual podría indicar, que, hasta esta profundidad, el perfil de suelo predominante en las zonas de la ciudad donde se encuentran los materiales de la formación algodonal, es el perfil Tipo D. Para el caso de la investigación de Sepúlveda L.L., & Ortega L.F., en el año 2020, los valores de  $V_s 30$  obtenidos indican que los perfiles de suelo presentes en algunos sectores de la ciudad de Ocaña es tipo C; no obstante, un análisis más detallado de los 30 m del perfil de suelo, corrobora que para los primeros 15 m de profundidad, las velocidades de onda cortante corresponderían a suelos tipo D para la formación Algodonal. En el caso de la formación de origen ígneo los perfiles de suelo son tipo C.

Finalmente, se concluye que el uso de los métodos geofísicos para la exploración del subsuelo permite facilitar la tarea de caracterización de un terreno, asimismo el conocer los materiales del suelo sin necesidad de realizar ensayos invasivos en un gran número de ellos, representando un ahorro de tiempo y dinero cuando se trata de proyectos de gran volumen o del

diseño de cimentaciones de acuerdo al tipo de suelo, también, significa mayor rendimiento en los estudios previos y mejores resultados en los diseños estructurales de la edificación futura.

## Referencias

- Agustín, J.S. (2015). *Valoración del perfil de suelos residuales de anfibolita por ensayos de línea de refracción sísmica y MASW: caso las palmas*, (Tesis de pregrado). Escuela de Ingeniería de Antioquia, envidado. Obtenido de [https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/2057/1/AgustinJuan\\_2015\\_ValorizacionPerfilSuelos.pdf](https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/2057/1/AgustinJuan_2015_ValorizacionPerfilSuelos.pdf)
- AIS. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Alfaro, A. J. (enero - junio 2007). Correlación entre el valor n del ensayo de penetración estándar y velocidad de ondas de corte para arcillas en Bogotá – Colombia. *Revista Épsilon* N.º 8: 13-23. Obtenido de [https://pdfs.semanticscholar.org/cc13/2766965e2834294b307ba1b3a5c688dc7141.pdf?\\_ga=2.208262482.1771044809.1572393496-1836725410.1572393496](https://pdfs.semanticscholar.org/cc13/2766965e2834294b307ba1b3a5c688dc7141.pdf?_ga=2.208262482.1771044809.1572393496-1836725410.1572393496)
- Alfaro, A. J. & Yokoi, T. (enero 2005). Determinación de la estructura de velocidades de ondas de corte mediante arreglos de micro temblores de largo periodo. XIII jornada geotécnica de la ingeniería colombiana y VI foro sobre la geotecnia de la sabana de Bogotá. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/266456019\\_Determinacion\\_De\\_La\\_Estructura\\_De\\_Velocidades\\_De\\_Ondas\\_De\\_Corte\\_Mediante\\_Arreglos\\_De\\_Microtemblores\\_De\\_Largo\\_Periodo](https://www.researchgate.net/publication/266456019_Determinacion_De_La_Estructura_De_Velocidades_De_Ondas_De_Corte_Mediante_Arreglos_De_Microtemblores_De_Largo_Periodo)

- Aponte, J. A. (2011). *Evaluación de Métodos No Convencionales de Caracterización Geotécnica*. (Tesis de maestría). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/1267>
- Avilés, J. F. & Barzallo B. I. (2016). Caracterización de suelos del centro histórico de la ciudad de cuenca mediante métodos geofísicos. (Tesis de pregrado). Universidad de cuenca, Ecuador. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/24201>
- Correia, N.A. (2015). *Obtención del perfil de velocidad de onda de corte mediante método MASW y Comparación con ensayo tipo Down hole en estaciones sismológicas de zona central*, (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/133426>
- Chávez F.J & Montalva G.A ,2014. Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. *Revista de Ingeniería civil Obras y proyectos*. Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile. Obtenido de [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-28132014000200001](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-28132014000200001)
- Dal G. 2015, *Surface wave analysis for near surface applications*. Amsterdam: ELSEVIER
- Foti S, Strobbia C, Rix G.J. & Lai C.G., (2015), *Surface wave methods for near-surface site characterization*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.



Geofísica general, (2000) Sitio web Universidad Nacional. Obtenido de:

<https://www.medellin.unal.edu.co/~rrodriguez/geologia/geofisica.htm>

Gómez D., & Tobón D. (2017). *Correlaciones entre algunas variables geotécnicas y velocidades de onda compresiva ( $V_p$ ) y de corte ( $V_s$ )*, (Tesis de pregrado). Universidad EAFIT, Medellín Colombia. obtenido de

[https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/12408/Daniela\\_GomezRamirez\\_Daniela\\_TobonAngel\\_2017.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/12408/Daniela_GomezRamirez_Daniela_TobonAngel_2017.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Grajales E., 2003. Comportamiento de los Edificios con Dispositivos Disipadores de Energía.

Tesis Maestría en Ciencias:, Universidad Autónoma de Nuevo León, México. Obtenido de:

<http://eprints.uanl.mx/6722/1/1080124346.PDF>

Humire, F. (2013). Aplicación de métodos geofísicos basados en ondas superficiales para la caracterización sísmica de suelo: aplicación a la microzonificación sísmica del Norte y poniente de Santiago. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

La microzonificación sísmica para la reducción del riesgo sísmico. (2011). *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, vol. 26(2), 3-6. Obtenido de [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-40652011000200001&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652011000200001&lng=es&tlng=es).

Lazcano, S. (2007). Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie.

(Documento investigativo Especialidad: Ingeniería Civil) Obtenido de

<http://www.ai.org.mx/ai/archivos/coloquios/3/Caracterizacion%20de%20Suelos%20Arenosos%20Mediante%20Analisis%20de%20Ondas%20de%20Superficie.pdf>

Lazcano, S. (2012). Perfiles de velocidad de onda de corte y análisis del comportamiento sísmico

del suelo en el poniente de Guadalajara, Jal. Conferencia llevada a cabo en el Congreso de XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica en Cancún.

Obtenido de

[https://www.smig.org.mx/admArticulos/eventos/1\\_Reunion\\_Cancun/2\\_XXVI\\_Reunion\\_Nacional/6\\_Geotecnia\\_sismica/I5LADS\\_1.pdf](https://www.smig.org.mx/admArticulos/eventos/1_Reunion_Cancun/2_XXVI_Reunion_Nacional/6_Geotecnia_sismica/I5LADS_1.pdf)

León, D.A & Sarmiento C.F (2016). *Caracterización geomecánica estática y dinámica a partir de exploración directa, indirecta y ensayos de laboratorio en el sitio de experimentación geotécnica en la escuela colombiana de ingeniería (SEGECI)*. (Tesis de maestría). Escuela

Colombiana de ingeniería SEGECI, Bogotá D.C. Obtenido de

<https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/463/1/Le%C3%B3n%20Diego%20-%202016.pdf>

Linares R., Brusi D, Pallí L, Roque C, Almanza X, Cebrián A, Geis C., Zamorano M., Soler D.

& Vehí M. (2002). Métodos de reconocimiento del subsuelo, Enseñanza de las ciencias de la tierra. *Revista de la Asociación Española para la enseñanza de las ciencias de la tierra*,

Vol. 10 N°1. Obtenido de <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/88760/132929>

Lozano, C.F. (2013). *Uso de registros de micro temblores para la determinación de modelos de velocidad de ondas de corte y respuesta dinámica del suelo en la ciudad de Cúcuta, Colombia*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/12843/1/carlosfernandolozanolozano.2013.pdf>

Naranjo, H & Dranichnikov, T, (2012). *Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional, el caso del puente sobre el río Maicito*, Ecuador, Editorial Universitaria Abya-Yala.

Ordóñez, J.A., Lermo J.F, Ordóñez, J., Martínez J., & Angulo, J. (noviembre 14 a 16, 2012) Correlación entre el número de golpes (n) del ensayo de penetración estándar y la velocidad de ondas de corte (vs) para las arcillas de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Conferencia llevada a cabo en el Congreso de XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica en Cancún, Obtenido de [https://www.smig.org.mx/admArticulos/eventos/1\\_Reunion\\_Cancun/2\\_XXVI\\_Reunion\\_Nacional/6\\_Geotecnia\\_sismica/I5ORAJ\\_1.pdf](https://www.smig.org.mx/admArticulos/eventos/1_Reunion_Cancun/2_XXVI_Reunion_Nacional/6_Geotecnia_sismica/I5ORAJ_1.pdf)

Pazmiño, L.E., (2017). *Velocidades de onda vs y vp y su relación con los valores de ángulo de fricción interna, cohesión y nspt para los suelos de sangolquí*. (Tesis de pregrado). Universidad de las fuerzas armadas ESPE, Sangolqui Ecuador. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/13037?show=full>

Pérez, C. E, 2017. *Modelamiento e interpretación de datos magnéticos y gravimétricos en la caracterización de un depósito tipo IOCG* (Tesis de maestría). Universidad de Chile, Santiago, Chile. Obtenido de:

<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/149082/Modelamiento-e-interpretacion-de-datos-magneticos-y-gravimetricos-en-la-caracterizacion-de-un-deposito.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Sandoval, L.A., (2013). Estudio del método masw para su aplicación según el decreto supremo n° 61. (Tesis de pregrado). Universidad del Bio-Bio, Concepcion, Chile. Obtenido de:

[http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/2226/1/Sandoval\\_Contreras\\_Leonardo\\_Abel.pdf](http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/2226/1/Sandoval_Contreras_Leonardo_Abel.pdf)

Sandoval V.H. & Vera M.J., (2013). Estudio de la robustez de la estimación espectral de la técnica h/v de Nakamura para estudios de caracterización dinámica de suelos. Tesis de pregrado. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. Obtenido de:

<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/bmfcis218e/doc/bmfcis218e.pdf>

San martin, C., (2015). “Estudio de la eficiencia de diferentes configuraciones de geófonos para la utilización del método ESAC. (Tesis pregrado). Universidad del Bio-Bio, Concepcion, Chile. Obtenido de:

[http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/1042/1/San\\_Martin\\_Rosales\\_Cristina.pdf](http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/1042/1/San_Martin_Rosales_Cristina.pdf)

Sepúlveda J.S. & Martínez C.A, 2017. Determinación de los parámetros dinámicos en los materiales que componen la formación algodonad en Ocaña Norte de Santander mediante métodos geofísicos. Tesis pregrado. Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Norte de Santander. Obtenido de:  
<http://repositorio.ufpso.edu.co:8080/dspaceufpso/handle/123456789/1860>

Sepúlveda L.L., & Ortega L.F., 2020. Determinación de los perfiles de velocidad de onda cortante en la zona sur oriental de la ciudad de Ocaña, N.S mediante el método geofísico pasivo: REMI. Tesis de pregrado. Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Norte de Santander. Obtenido de: <http://repositorio.ufpso.edu.co>

SIAPA. (2014). Criterios y lineamientos técnicos para factibilidades. Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado, México.

Tsige, M. & García Flórez, I., (2006). Propuesta de clasificación geotécnica del “Efecto Sitio” (Amplificación Sísmica) de las formaciones geológicas de la Región de Murcia. *Revista Geogaceta*, 40, p39-42. Obtenido de:  
<http://www.sociedadgeologica.es/archivos/geogacetas/Geo40/Geo40-10.pdf>