

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**USO DE GEOFÍSICA EN EL ANÁLISIS DE CIMENTACIONES PARA SU
APLICACIÓN EN LA NTE E.050-18 *SUELOS Y CIMENTACIONES*.**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Civil

AUTORA

MICHAELLE PIERINA SOLÓRZANO MORALES

ASESOR

JORGE VICTOR JOSE ZEGARRA PELLANNE


Lima, octubre de 2023.

Informe de Similitud

Yo, **Jorge Víctor José Zegarra Pellanne**, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada **Uso de geofísica en el análisis de cimentaciones de edificaciones y otras obras para su aplicación en la Norma Técnica de Edificaciones NTE E.050-18 Suelos y cimentaciones**, de la autora **Michaelle Pierina Solórzano Morales**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 17%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 3 de octubre de 2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lima, 3 de octubre de 2023

Apellidos y nombres del asesor: Zegarra Pellanne, Jorge Víctor José	
DNI: 07819309	Firma 
ORCID: 0000-0002-4207-311	

Resumen

La presente investigación se efectuó por la importancia de los estudios geofísicos en la actualidad en la prospección del suelo con fines de su aplicación e inclusión en la Norma Técnica de Edificaciones E.050 *Suelos y cimentaciones* (2018) para edificaciones y otras obras. La metodología empleada se basó en el estado del arte de las bases teóricas de los tipos de ondas estudiadas para la determinación de los parámetros físicos obtenidos mediante la variedad de métodos geofísicos. Seguidamente, se estudiaron los tipos de métodos geofísicos mayormente empleados en las prospecciones aplicadas en estudios de suelos para cimentación, considerando las aplicaciones de estos métodos para determinar las propiedades del suelo.

Se efectuó la revisión bibliográfica de los métodos geofísicos que se emplean habitualmente a nivel nacional e internacional aplicados a suelos y cimentaciones, habiéndose determinado cuáles métodos son los más empleados. Además, se revisó la combinación de métodos geofísicos utilizados en los estudios geotécnicos para determinar parámetros diferentes, los cuales se complementan para los fines de estudio requeridos. También se verificó el complemento de las prospecciones geofísicas con los ensayos de exploración directa geotécnica (SPT, CPTu, entre otros.). Se analizaron las normas de diferentes países, referidas a los estudios geofísicos aplicados a la geotecnia, en las exploraciones de suelos, habiéndose encontrado una basta información de la aplicación de los métodos geofísicos. Las exploraciones geofísicas en estas normas son bastante amplias en algunos países como en: Inglaterra, EE. UU., España, México, Chile, Costa Rica, entre otros. En la mayoría de estas normas se indica que los estudios geofísicos deben complementarse con los estudios de exploración directa para una adecuada interpretación de las propiedades del suelo.

Finalmente, se realizaron las propuestas producto de esta investigación. Se propone adicionar un artículo, el cual se base en la inclusión de los métodos geofísicos en la NTE E.050 *Suelos y cimentaciones*, agregar las Tablas N.º5 (*Ensayos Geofísicos*), con la descripción de los ensayos y sus respectivas normativas o referencias, y N.º6 (*Aplicaciones de los ensayos geofísicos*) con los parámetros obtenidos de cada método. Finalmente, se propone el ítem 15.5.4, con la cuantificación de las prospecciones geofísicas dada la importancia de las edificaciones en una investigación geotécnica.

Agradecimientos

Agradezco de forma especial al Mg. Jorge Zegarra Pellanne, por su asesoría en la realización de la tesis. Su guía en este proceso fue esencial para culminar este trabajo.

A la Mg. Carmen Ortiz Salas, por su tiempo y su valioso aporte en el trabajo de tesis.

Al Dr. Guillermo Zavala Rosell, por su buena disposición, paciencia y tiempo.

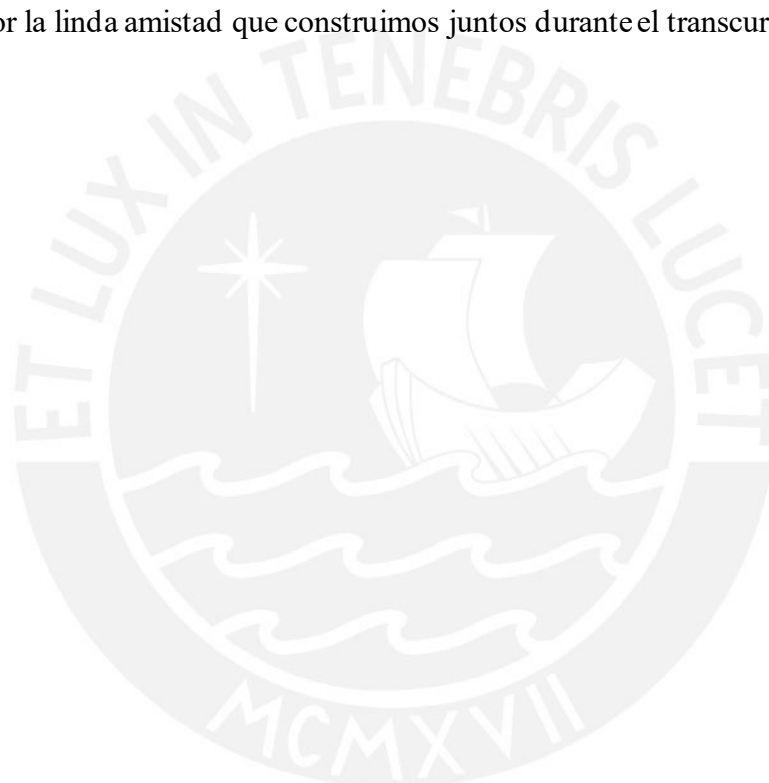


Dedicatoria

A Dios, por iluminar y guiar mi camino.

A mis padres, por haberme forjado como la persona que soy, por inspirarme y apoyarme incondicionalmente. Gracias a mi papá por su gran influencia en mi etapa universitaria, porque me da el mejor ejemplo tanto profesionalmente como persona. Gracias a mi mamá por su constante motivación, sus consejos y por siempre confiar en mí.

A mis amigos por la linda amistad que construimos juntos durante el transcurso de nuestra vida universitaria.



Índice de Contenido

1. Generalidades	1
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación.....	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Metodología	4
1.5 Organización	5
2. Estado del Arte	7
2.1 Ondas Sísmicas	7
2.1.1 Ondas Primarias Compresionales (P)	7
2.1.2 Ondas Secundarias o de corte (S).....	8
2.1.3 Ondas Rayleigh.....	9
2.1.4 Ondas Love.....	10
2.2 Velocidad de ondas	11
2.3 Propiedades dinámicas y variables geotécnicas	12
2.4 Métodos geofísicos.....	17
2.4.1 Método <i>down-hole</i>	20
2.4.2 Método <i>cross-hole</i>	21
2.4.3 <i>PS suspension logging</i>	22
2.4.4 Sísmica de reflexión	22

2.4.5 Sísmica de refracción.....	24
2.4.6 Método sísmico de análisis multicanal de ondas de superficie - MASW.....	28
2.4.7 Microtremores o microtrepidaciones.....	31
2.4.8 Refraction Microtremor - ReMi.....	33
2.4.9 Tomografía sísmica	34
2.4.10 Tomografía de resistividad eléctrica o ERT	35
2.4.11 Georradar o radar de penetración de tierra	37
2.4.12 Medición de microtremores en arreglos multicanal – MAM	38
2.4.13 Análisis espectral de ondas de superficie- SASW.....	39
2.5 Investigaciones realizadas en diversos países	43
2.6 Investigaciones realizadas en el Perú	46
3. Métodos geofísicos más empleados en suelos y cimentaciones en el Perú.....	48
4. Reglamentos Internacionales.....	54
4.1 Reglamento Español.....	54
4.2 Reglamento de Reino Unido.....	56
4.3 Reglamento Colombiano.....	60
4.4 Reglamento Mexicano.....	65
4.5 Reglamento Chileno	67
4.6 Reglamento Canadiense	69
4.7 Reglamento Ecuatoriano	70
4.8 Reglamento Costarricense	73
5. Propuesta Normativa	79

6. Conclusiones y Recomendaciones.....	86
6.1 Conclusiones	86
6.2 Recomendaciones.....	87
Referencias	89

Índice de Figuras

Figura 1: Propagación de ondas longitudinales P.	8
Figura 2: Propagación de ondas transversales (S).	9
Figura 3: Movimiento de las ondas Rayleigh.	10
Figura 4: Movimiento de las ondas Love.	10
Figura 5: a) Cortes horizontales en el suelo. b) Trayectoria de las partículas en las ondas S.	11
Figura 6: Disposición detallada del ensayo down-hole.	20
Figura 7: Disposición detallada del ensayo cross-hole.	21
Figura 8: Ondas reflejadas en los diferentes estratos.....	23
Figura 9: Fuente de propagación de onda reflectiva hacia los geófonos y el registro sísmico con trayectorias hiperbólicas.	23
Figura 10: a) Puntos reflectores comunes b) Reflectores de capas a la superficie.	24
Figura 11: Registro de las señales sísmicas.	25
Figura 12: Movimiento de las ondas de refracción.....	26
Figura 13: Esquema de refracción sísmica y la llegada a los geófonos.	26
Figura 14: Curva de dispersión, perfil unidimensional de velocidad y resultados.	29
Figura 15: Ensayo de tomografía sísmica.	35
Figura 16: Ejemplo de ensayo 2D de tomografía de resistividad eléctrica: mapeo de la contaminación del suelo.....	36

Figura 17: Arreglos de geófonos.....	39
Figura 18: Carta de microzonificación sísmica.....	66
Figura 19: Arreglo geométrico utilizado para la adquisición de datos.....	72
Figura 20: Variación de N_{60} y V_s con la profundidad.....	72

Índice de Tablas

Tabla 1: Clasificación de los perfiles del suelo.....	16
Tabla 2: Cuadro comparativo entre los métodos geosísmicos, los geoelectricos y los métodos gravimétrico y magnetométrico	19
Tabla 3: Velocidades de propagación de las ondas primarias compresionales (Arce, 1990). .	26
Tabla 4: Velocidades de propagación de las ondas primarias compresionales (ASTM D5777-95).	27
Tabla 5: Velocidades de propagación de las ondas primarias compresionales (Curvich J, 1975).	27
Tabla 6: Velocidades de propagación de las ondas primarias compresionales (Martínez, 1990).	27
Tabla 7: Clasificación de suelos según <i>International Building Code</i>	30
Tabla 8: Clasificación de suelos según Norma E.030.....	30
Tabla 9: Velocidades de propagación de Ondas Compresionales (CISMID, 1991).....	30
Tabla 10: Resistividades de las rocas más comunes.	36
Tabla 11: Resumen métodos geofísicos.....	41
Tabla 12: Resumen de ensayos geofísicos y perforaciones en el Perú.	52
Tabla 13: Recopilación de ensayos geofísicos y perforaciones en el departamento de Lima.	52
Tabla 14: Métodos geofísicos aplicados según el problema geotécnico.	57
Tabla 15: Utilidad de los métodos geofísicos.	59

Tabla 16: Adaptación tabla de métodos de exploración geofísica (FHWA, 2006).	61
Tabla 17: Adaptación tabla de criterios para la evaluación del material de relleno (SCDOT, 2010).	64
Tabla 18: Valores de <i>HC</i> y <i>VC</i> por zona sísmica.	66
Tabla 19: Adaptación Tipos de terrenos.	66
Tabla 20: Pruebas recomendadas para hallar los parámetros.	67
Tabla 21: Adaptación clasificación sísmica de suelos (SESAME, 2004).	68
Tabla 22: Normas de ensayos habituales.	69
Tabla 23: Adaptación de Tabla de clasificación de suelo por respuesta sísmica.	70
Tabla 24: Propiedades a los 30 metros de profundidad.	73
Tabla 25: Clasificación del sitio de cimentación.	74
Tabla 26: Normas sugeridas y aplicación para la investigación geofísica en taludes.	75
Tabla 27: Resumen de los principales métodos geofísicos y sus aplicaciones en las diferentes normativas internacionales.	76
Tabla 28: Cuadro propuesto de los métodos geofísicos más utilizados y su normativa.	83
Tabla 29: Ensayos geofísicos y sus aplicaciones.	84

Índice de abreviaturas

NTE: Norma Técnica de Edificaciones.

CPTu: Cone Penetration Test (Sondeo de cono eléctrico).

MASW: *Multichannel Analysis of Surface Waves* (Análisis Multicanal de Ondas de Superficie).

MAM: *Microtremor Array Measurement* (Medición de Microtremores en arreglos multicanal)

SASW: *Spectral Analysis of Surface Waves* (Análisis espectral de ondas de superficie).

ReMi: *Refraction Microtremor* (Microtremores o microtrepidaciones).

GPR: *Ground Penetration Radar* (georradar)

SPT: *Standard Penetration Test* (ensayo de penetración estándar)

ERT: *Electrical Resistivity Tomography* (Tomografía de resistividad eléctrica)

SCPTu: *Seismic Cone Penetration Test* (Piezocono sísmico)



1. Generalidades

1.1 Introducción

Los métodos geofísicos son adecuados para complementar la información de las características físicas y mecánicas, propiedades dinámicas, localización de depósitos y para la exploración de suelos, debido a que permiten conocer la estratigrafía y naturaleza del suelo mediante las ondas que viajan a diferentes velocidades a través de distintos materiales (Kramer, 1996). Son métodos no invasivos, que la mayoría de las veces requieren de menor tiempo y costo para ejecutarlos, y son más fáciles de llevar a cabo. Su participación en suelos y cimentaciones se ha convertido actualmente en un promisorio avance por la combinación de mediciones geotécnicas y datos geofísicos que mejoran la calidad de las cimentaciones en la ingeniería civil. La geofísica, además, puede aplicarse con fines de exploración en la construcción de edificios para obtener información sobre la detección de condiciones peligrosas del suelo.

La presente tesis se enfoca en el uso de la geofísica en el análisis de cimentaciones en edificaciones, y en proponer su aplicación en la Norma Técnica de Edificaciones E.050-18 *Suelos y cimentaciones*, ya que los métodos geofísicos se encuentran totalmente ausentes en esta (ni siquiera se mencionan), pese a que son utilizados en el país y son mencionados por normas de otros países como métodos complementarios a los métodos directos. Los ensayos revisados y analizados en esta investigación son los más empleados en el Perú y también los considerados por otros códigos, para así poder ejecutar el objetivo principal que es proponer la aplicación de determinadas técnicas geofísicas en la NTE E.050-18 *Suelos y cimentaciones*. Estos ensayos son: *down-hole*, *cross-hole*, *PS suspension logging*, sísmica de reflexión, sísmica de refracción, método sísmico de análisis multicanal de ondas de superficie (MASW, *Multichannel Analysis of Surface Waves*), microtremores, tomografía sísmica, tomografía de resistividad eléctrica (ERT, *Electrical Resistivity Tomography*), georradar (GPR, *Ground*

Penetrating Radar), medición de microtrepidaciones en arreglo multicanal (MAM, *Microtremor Array Measurement*), entre otros.

De acuerdo con lo indicado previamente, se analizaron las normas de diferentes países. Algunos de estos documentos vigentes son el *Código Técnico de la Edificación* (CTE, Ministerio de Vivienda, España, 2006), el cual menciona la geofísica en los apartados de prospección y ensayos de campo; *Código de Cimentaciones de Costa Rica* (CCCR, Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009), el cual brinda algunos alcances sobre algunos métodos de exploración geofísica como el de resistividad eléctrica y refracción sísmica. De la misma forma, se profundizaron los métodos geofísicos mencionados en la *Norma de Chile* (Nch433, INN Chile, 2009); la *Norma Ecuatoriana de la Construcción* (NEC-15, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015); el *Código de prácticas para investigaciones de suelos* (BS 5930, BSI, Inglaterra, 2015); el *Manual de Diseño de Cimentaciones Superficiales y Profundas en Carreteras* (Ministerio de Transporte, Colombia, 2012) y *Manual Canadiense de Ingeniería de Cimentaciones* 4ta edición (CGS, Canadá, 2006).

Finalmente, con la información de los estudios de geofísica a nivel nacional e internacional y la observación de las normas internacionales referentes a la geofísica, se plantearon los lineamientos adecuados en concordancia con el estudio a realizar para la aplicación de los métodos geofísicos con fines de cimentaciones de edificaciones y otras obras, así también se recomendaron los tipos de métodos de exploración sísmica más empleados a nivel nacional e internacional y sus aplicaciones para la propuesta de inclusión en la norma NTE E.050-18 *Suelos y cimentaciones*.

1.2 Justificación

La Norma Técnica de Edificaciones, NTE E.050-18 *Suelos y cimentaciones*, tiene como objetivo preceptuar de las disposiciones para la realización de estudios de mecánica de suelos con fines de cimentación de edificaciones y otras obras citadas en el referido reglamento nacional. Sin embargo, la norma no aborda el uso de métodos geofísicos aplicados en cimentaciones a pesar de que estos métodos son bastante utilizados en el país. Este es un tema ausente de la norma, en sus tres versiones: 1997, 2006 y en la actual, del 2018, así como en su antecedente, el título VI del *Reglamento Nacional de Construcciones* (1970).

Por ese motivo la problemática abordada por este trabajo se centra en que la NTE E.050-18 *Suelos y cimentaciones* no contempla los estudios geofísicos que desde hace muchos años son empleados a nivel nacional y mundial y que son considerados por los reglamentos de muchos países, mas no en el Perú. Entre estas normas figuran el *Código Técnico de la Edificación* (CTE, Ministerio de Vivienda, España, 2006); *Código de Cimentaciones de Costa Rica* (CCCR, Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009), *la Norma de Chile* (Nch433, INNN Chile, 2009), *la Norma Ecuatoriana de la Construcción* (NEC-15, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014), el *Código de Práctica para investigaciones geotécnicas* (BS15, BSI, Inglaterra, 2015), el *Manual de Diseño y Cimentaciones Superficiales y Profundas en Carreteras* (Ministerio de Transporte, Colombia, 2012) y *Manual Canadiense de Ingeniería de Cimentaciones* 4ta edición (CGS, Canadá, 2006).

Finalmente, la importancia de los métodos geofísicos se orienta a que permiten realizar una adecuada caracterización del suelo, lo cual posibilita diseñar una cimentación adecuada, pues los resultados obtenidos mediante los métodos geofísicos exponen el comportamiento dinámico del suelo y los efectos que presentan sobre las edificaciones. Además, sirven como fuente de consulta para los profesionales dedicados a los estudios de cimentaciones. Es por ello que la presente investigación trata de cubrir la inclusión de los estudios geofísicos en la NTE

E.050-18 *Suelos y cimentaciones*, ya que esto facilitará a que los profesionales de ingeniería civil complementen los estudios geotécnicos con estudios geofísicos para mejorar la elaboración de proyectos de edificación y otras obras.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Proponer lineamientos normativos mínimos para la aplicación de ensayos geofísicos en el estudio de las condiciones de cimentación para edificaciones y otras obras en la Norma Técnica de Edificaciones E.050 *Suelos y cimentaciones*.

1.3.2 Objetivos específicos

- Revisar la literatura e identificar los métodos geofísicos aplicados en suelos y cimentaciones a nivel internacional y nacional.
- Revisar e identificar los diferentes métodos geofísicos mayormente empleados en el Perú y a nivel internacional referente a suelos y cimentaciones.
- Analizar los reglamentos internacionales referidos al uso o aplicación de métodos geofísicos.
- Establecer los lineamientos necesarios para la aplicación de los métodos geofísicos como propuestas para ser adicionados en la NTE E.050 *Suelos y cimentaciones*.

1.4 Metodología

Para esta investigación se realizó la revisión del estado del arte a nivel internacional y en el Perú de los diferentes tipos de métodos geofísicos existentes, dándole énfasis a los métodos más utilizados en la geofísica aplicada en la mecánica de suelos y cimentaciones de

edificaciones y otras obras. Además, se llevó a cabo la revisión en la literatura referida a usos, procesos de campo, ventajas, desventajas y parámetros obtenidos (módulo de corte, G ; módulo de Young, E y coeficiente de Poisson, ν) de cada método geofísico. Asimismo, también se efectuó el análisis de diversos métodos geofísicos y su uso en suelos y cimentaciones con normativas y reglamentos vigentes, como: *down-hole* (ASTM D7400/ D7400M), *cross-hole* (ASTM D4428/D4428M), *PS suspension logging* (GEOVision, 2000), sísmica de reflexión (ASTM D7128), sísmica de refracción (ASTM D5777), MASW (Park et al., 1999), microtemores (SESAME, 2004), tomografía de resistividad eléctrica (ASTM D6431), entre otros.

Luego, se realizó la revisión del contenido de los reglamentos internacionales referidos a la geofísica aplicada a la geotecnia, suelos y cimentaciones. Evaluando el contenido de dichas normas y sus usos en los estudios que cada norma especifica en cada país, se observó que los métodos geofísicos son de suma importancia en los reglamentos internacionales para el análisis del suelo para diferentes usos en la geotecnia y en el análisis de suelos y cimentaciones.

A partir de ello, tras analizar los métodos más utilizados a nivel internacional y nacional, se propone adicionar estos métodos en la norma NTE E.050-18 *Suelos y cimentaciones* para la caracterización del suelo y se mencionan los más utilizados con sus respectivas normativas. Asimismo, también se plantearon criterios mínimos para cuantificar los estudios geofísicos como parte de la NTE E.050-18 *Suelos y cimentaciones*.

1.5 Organización

Capítulo 1: En este capítulo se muestra la introducción, justificación, objetivos y la metodología de la investigación.

Capítulo 2: En este capítulo se presenta el estado del arte alusivo a los métodos geofísicos. Primero se explica el concepto de ondas sísmicas y el procesamiento y observación de las señales sísmicas, y se exploran las propiedades dinámicas y variables geotécnicas correlacionadas con los métodos geofísicos y los estudios de suelos. Adicionalmente, se introducen los métodos geofísicos que se desarrollan en este trabajo de tesis. Finalmente, se muestran los antecedentes de la investigación en los contextos internacional y nacional.

Capítulo 3: Se muestran los principales métodos geofísicos utilizados en el Perú para su uso en suelos y cimentaciones.

Capítulo 4: Se presentan los métodos geofísicos previamente mencionados en los reglamentos internacionales. Se describen los requerimientos y parámetros utilizados en cada norma y reglamento o código en el análisis de cimentaciones de edificaciones y otras obras.

Capítulo 5: Se realiza la propuesta normativa, tras la investigación de los métodos geofísicos utilizados en los reglamentos analizados y en el contexto nacional.

Capítulo 6: Se presentan las conclusiones y algunas recomendaciones.

2. Estado del Arte

2.1 Ondas Sísmicas

Las ondas se originan por medio de la generación de fuentes sísmicas, las cuales pueden desarrollarse artificialmente (explosiones o golpes) o de forma pasiva (vibraciones ambientales) sobre el suelo. Las técnicas de exploración sísmica definen la conformación del suelo analizando las ondas sísmicas que se generan, transmiten y se detectan.

En el suelo, las ondas pueden ser de cuerpo (viajan por el interior del suelo) o de superficie (la transmisión es en la superficie) de acuerdo con su tipo de transmisión. Las ondas de cuerpo pueden ser de compresión o primarias, llamadas ondas P y las de corte o secundarias, llamadas ondas S. En el caso de las ondas P, el suelo se mueve en el sentido de la propagación, produciéndose compresión y dilatación simultáneamente. Mientras que, por el contrario, en el caso de las ondas S el suelo se desplaza en la dirección transversal. En cuanto a las ondas de superficie, se propagan por los estratos más próximos a la superficie del suelo; son dispersivas, lo que implica que tienen diferentes frecuencias y se desarrollan con diferentes velocidades (Biot, 1962).

Los estudios de ondas sísmicas nos sirven en el análisis de las exploraciones geofísicas actualmente utilizadas en el medio nacional e internacional, que es parte de la investigación realizada en la presente tesis.

2.1.1 Ondas Primarias Compresionales (P)

Estas ondas denominadas también como de compresión o longitudinales son las que se desplazan a mayor velocidad, comprimiendo y dilatando periódicamente las partículas del suelo, produciendo vibraciones en la dirección de propagación. Las ondas P, tienen la particularidad de que pueden atravesar gases, líquidos y sólidos del suelo (Bolt, 1999). La razón

de que tengan mayor velocidad de difusión es porque varían el volumen del material. Son las más rápidas y fáciles de generar.

La aplicación de estas ondas se desarrolla en los estudios geotécnicos para poder detectar la alteración, localización de fallas en formaciones rocosas, localización de acuíferos, en estudios de riesgo geológico o geotécnico, determinación de espesores de material y clasificación del perfil del suelo.

En la Figura 1 se observan las ondas de compresión P en el sentido longitudinal.

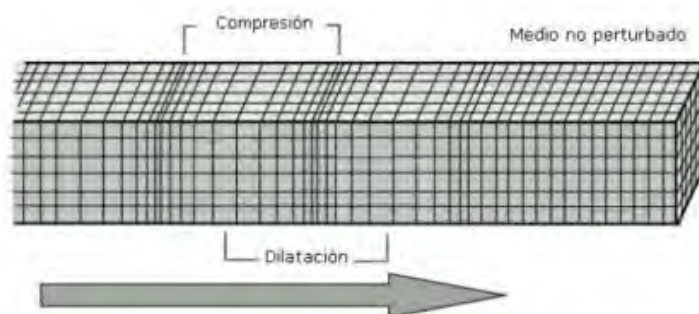


Figura 1: Propagación de ondas longitudinales P.

Fuente: Bolt, 1999.

2.1.2 Ondas Secundarias o de corte (S)

Se define a las ondas S (secundarias) como aquellas que mueven las partículas del suelo en el sentido perpendicular al sentido de propagación, con lo cual el suelo se deforma en la dirección del corte (cizallamiento); este tipo de ondas viajan exclusivamente por los sólidos, ya que los líquidos no tienen resistencia a los esfuerzos cortantes (López et al., 2008). La velocidad de difusión es más lenta que las ondas P, por eso se denominan ondas secundarias (llegan después). Además, las ondas S presentan mayor amplitud que las ondas P y el desplazamiento de vibración de las partículas tiene un mayor recorrido con velocidad menor. Es polarizada y direccional.

La Figura 2 muestra el desplazamiento de las ondas S, notándose el desplazamiento transversal de las partículas en movimiento.

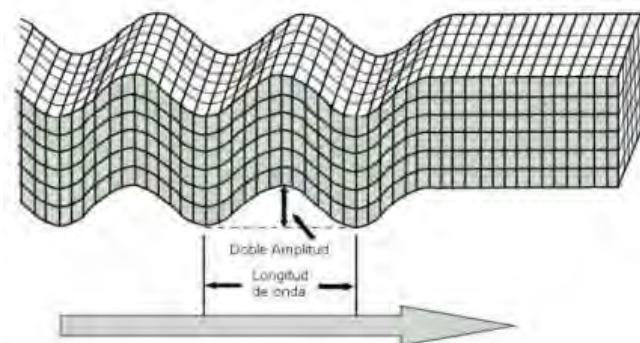


Figura 2: Propagación de ondas transversales (S).

Fuente: Bolt, 1999.

Estas ondas son de importancia vital en el análisis de la presente tesis porque con la velocidad de ondas de corte se pueden evaluar los estratos de suelos y mediante ecuaciones se pueden determinar los parámetros dinámicos utilizados en la geotecnia y en la cimentación de edificaciones.

2.1.3 Ondas Rayleigh

Las ondas Rayleigh se mueven por la superficie del terreno; las partículas sólidas del suelo se desplazan trazando una elipse en sentido contrario a la difusión de energía. La amplitud del movimiento decrece con la profundidad y el material retorna a su forma original luego del paso de la onda. Así, en la profundidad se vuelve retrógrada y el eje vertical de la elipse se considera la magnitud mayor. Haciendo una semejanza del movimiento de las ondas Rayleigh se puede decir que se observa estas en las superficies líquidas. (Espíndola, 1994).

La velocidad de las ondas Rayleigh comparada con la de las ondas S es menor; dependiendo del periodo de la onda se puede considerar a este tipo de ondas como dispersivas, las cuales se caracterizan por cambiar de forma mientras viajan y que dadas las diferentes

componentes de las frecuencias que las constituyen se propagan a distintas velocidades. Este tipo de ondas son capaces de provocar resonancia en las edificaciones con mayor facilidad, en la Figura 3, se aprecia la onda superficial Rayleigh en el sentido de difusión de las ondas.

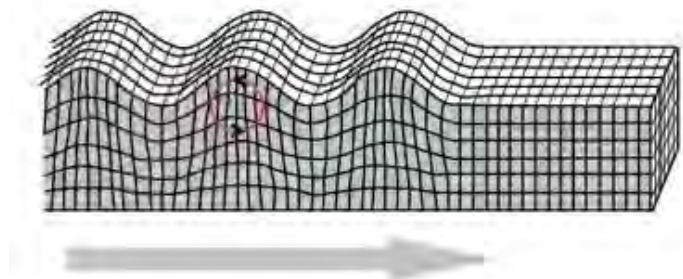


Figura 3: Movimiento de las ondas Rayleigh.

Fuente: Bolt, 1999.

2.1.4 Ondas Love

Las ondas Love tienen una velocidad mayor que las ondas Rayleigh y, por tanto, llegan con anterioridad a los sismogramas. El desplazamiento de las partículas del suelo con este tipo de ondas es paralelo a la superficie del terreno; sin embargo, es perpendicular al sentido de propagación de las ondas mostrándose como un componente horizontal en los sismogramas (Bolt, 1999). La amplitud del movimiento decrece con la profundidad y el material retorna a su forma original luego del paso de la onda. Así como las ondas Rayleigh, también son dispersivas dependiendo de la frecuencia, estas dispersiones son mayores para frecuencias bajas. Las ondas Love son como ondas S que se encuentran atrapadas en la superficie del terreno, tal como se muestra en la siguiente figura.

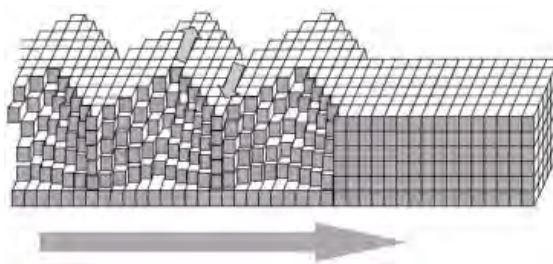


Figura 4: Movimiento de las ondas Love.

Fuente: Bolt, 1999.

Asimismo, en la Figura 5 se muestra la dirección de propagación de las ondas S y los cortes generados en el suelo.

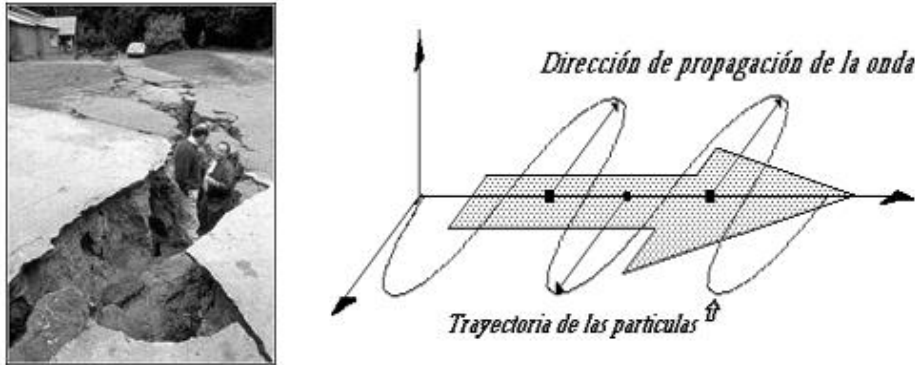


Figura 5: a) Cortes horizontales en el suelo. b) Trayectoria de las partículas en las ondas S.

Fuente: De los Santos, 2016.

Teniendo la velocidad de corte de ondas Love se puede calcular la deformación del suelo, con lo cual se puede inferir la deformación del mismo frente a las estructuras de cimentación que se apoyan en ellos.

2.2 Velocidad de ondas

Las ondas elásticas de cuerpo y de superficie se propagan a diferentes velocidades, las primeras en arribar son las ondas P. Luego las ondas S y finalmente las ondas de superficie (Rayleigh y Love).

Las velocidades de propagación de las ondas dependen de la densidad del suelo por donde se propagan y de las propiedades elásticas de los materiales que atraviesan; generalmente las velocidades de propagación se transmiten con mayor rapidez en materiales densos.

2.3 Propiedades dinámicas y variables geotécnicas

Los módulos elásticos pueden ser propiedades estáticas o dinámicas que muestran la reacción de los suelos ante los esfuerzos y deformaciones a los que están sujetos. A estos módulos elásticos también se les conoce con el nombre de constantes elásticas, estas constantes son fundamentales, ya que de acuerdo con su comportamiento se obtiene la velocidad de las ondas sísmicas.

Con los valores que se determinan de estas constantes elásticas se pueden obtener los parámetros geotécnicos de los suelos que son aplicados a la ingeniería civil. No obstante, al emplear las técnicas geofísicas es factible determinar las velocidades de desplazamiento (V_P y V_S) que se propagan en el suelo, con las cuales se determinan los parámetros dinámicos como son: el módulo de deformación o elasticidad dinámico (E), el módulo de corte dinámico (G), el coeficiente de Poisson (ν) y el módulo volumétrico dinámico (K) de los suelos y macizos rocosos.

(Kramer, 1996) describió la velocidad de las ondas longitudinales V_P y las ondas transversales V_S , para un medio elástico e isotrópico mediante la siguiente expresión:

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (1)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

Dónde:

V_P : Velocidad de onda longitudinal

V_S : Velocidad de onda transversal

λ : Primer coeficiente de Lamé

μ : Segundo coeficiente de Lamé

ρ : Densidad

Asimismo, la caracterización de la amplificación sísmica de un terreno se realiza a través de una evaluación más detallada de estudios geotécnicos y geofísicos, y está correlacionada con parámetros que representan las propiedades de rigidez dinámica o deformabilidad del suelo. Los parámetros más importantes para este estudio son la velocidad de ondas de corte en los primeros 30 metros y el periodo de vibración T_f . A través de la velocidad de ondas de corte en los primeros 30 metros (V_{S30}) se puede conocer la estratigrafía del suelo y el perfil de V_S en los 30 metros superiores. Por ello, V_{S30} de acuerdo con (Humire, 2015) se expresa como:

$$v_{S30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{Si}}} \quad (3)$$

Dónde:

n : Número de estratos identificados en los 30 metros superiores del depósito de suelos

h_i : Espesor de cada estrato

V_{Si} : Velocidad de onda de corte de cada estrato.

A continuación, se presentan las constantes elásticas más comunes que se usan en geofísica de acuerdo con (Kramer, 1996).

a) Módulo de compresibilidad (K)

Se define como módulo de compresibilidad a la relación entre el cambio de esfuerzo promedio y el cambio de volumen unitario (cambio de volumen por unidad de volumen) al haber aplicado dichos cambios de esfuerzos.

Para poder obtener K , se deben de conocer el módulo de deformación y el coeficiente de Poisson, como lo detalla la siguiente ecuación:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (4)$$

b) Módulo de Elasticidad o módulo de Young (E)

Es una constante que se determina relacionando los esfuerzos axiales (de compresión o tracción) con el correspondiente cambio (disminución o incremento) de longitud unitaria que el material sufre al aplicarse dichos esfuerzos. El módulo de Young cuantifica el comportamiento elástico del suelo.

El módulo de Young se obtiene la ecuación:

$$E = 2 \cdot V_s^2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu) \quad (5)$$

c) Primera constante de Lamé (λ)

La caracterización del comportamiento elástico lineal se produce con deformaciones pequeñas y está representada por las dos constantes de Lamé, siendo que la primera de ellas es conocida como (λ) y la segunda constante μ es igual al módulo de corte (G).

d) Módulo de corte o rigidez (G)

Es una constante elástica que determina la variación de forma que se produce en un material de comportamiento elástico en el momento en que se actúan los esfuerzos cortantes. Se determina relacionando el esfuerzo cortante con la deformación cortante, cuando este módulo tiene valores grandes señala que es un material rígido, en cambio, si su valor el bajo el material es denominado blando. El módulo de corte del agua, y de los fluidos en general, es igual a cero porque toda fuerza deforma la superficie de los fluidos.

La expresión de módulo de corte se expresa como:

$$G = \rho \cdot V_S^2 \quad (6)$$

e) Coeficiente de Poisson (ν)

Se define como una constante elástica adimensional que cuantifica la compresibilidad del material transversal al esfuerzo empleado. El coeficiente de Poisson puede calcularse a partir de V_P y V_S , parámetros que pueden determinarse en campo.

La expresión del coeficiente de Poisson se da mediante la relación de ondas P y S como sigue:

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2}{2\left[\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 1\right]} \quad (7)$$

Es importante mencionar que el comportamiento no-lineal del suelo incide en el periodo predominante del movimiento en la superficie y en la amplificación del registro de entrada y, además, surge tras el aumento del nivel de esfuerzos de corte (transferido a suelos blandos) y la degradación de la rigidez de la estructura del suelo.

La importancia de sopesar el comportamiento inelástico radica en que la capacidad de absorción de energía de un sistema flexible (suelo blando) aumenta mientras más larga sea la duración del sismo y los periodos de vibración sean mayores, y así consecuentemente se reduce la amplificación del registro en la superficie. La técnica planteada por Nakamura (1989), conocida como método HVSR o de Razón Espectral H/V, considera que la componente vertical de los microtemores desarrolla las características espectrales de la fuente de movimiento y únicamente la componente horizontal está influenciada por el suelo; así explica la amplificación del movimiento del suelo como la relación entre la componente horizontal del movimiento sísmico en la base y las componentes horizontales del movimiento sísmico

superficial. El análisis espectral da como derivación la frecuencia predominante de vibración y el mayor valor de amplificación.

Finalmente, es importante mencionar que en el Perú la única clasificación de suelos a partir de la velocidad de ondas de corte se encuentra en la norma NTE E.030-18 *Diseño Sismorresistente*, la cual, dependiendo del tipo de suelo, clasifica los perfiles a partir de V_s , N_{60} (ensayo de penetración estándar para suelos granulares) y la resistencia al corte en condición no drenada S_u (suelos cohesivos). Todas estas propiedades son idealmente determinadas en los 30 primeros metros medidos desde el nivel del fondo de la cimentación; sin embargo, en la práctica estos parámetros se determinan a menores profundidades.

En el caso de suelos heterogéneos, la clasificación se realiza con el tipo de perfil más desfavorable. La clasificación se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 1: Clasificación de los perfiles del suelo.

Clasificación de los perfiles del suelo				
Perfil	Descripción	V_s	N_{60}	S_u
S_0	Roca Dura	>1500 m/s	-	-
S_1	Roca o suelos muy rígidos	500 m/s a 1500 m/s	>50	>100 kPa
S_2	Suelos Intermedios	180 m/s a 500 m/s	15 a 50	50 kPa a 100kPa
S_3	Suelos Blandos	< 180 m/s	<15	25kPa a 50kPa
S_4	Condiciones Excepcionales	Clasificación basada en el EMS		

Fuente: Norma Técnica Sismorresistente E.030.

2.4 Métodos geofísicos

Los métodos geofísicos llevados a cabo en superficies y en pozos se consideran actualmente como una buena solución para resolver ambigüedades geotécnicas; estas son técnicas extendidas y no destructivas. Cuentan además con un buen campo de aplicación para investigar alineaciones de gran longitud y áreas extensas, pero teniendo siempre en cuenta que son métodos complementarios (Naranjo, 2012).

El uso de las técnicas geofísicas en la geotecnia es una práctica creciente debido a la necesidad cada vez mayor de servicios de investigaciones del suelo con fines geotécnicos y de cimentaciones en edificaciones; estos métodos son no destructivos y generalmente se realizan de manera rápida proporcionando información importante de las propiedades del suelo que se está estudiando. Mediante una buena aplicación o combinación de algunos métodos geofísicos se puede realizar una adecuada zonificación del suelo; la identificación de áreas cavernosas, de depósitos arcillosos, de la profundidad hasta el basamento rocoso, del módulo de Young, del módulo de rigidez, de la relación de Poisson, entre otros. Los métodos geofísicos se pueden clasificar en geosísmicos, geoelectrónicos, gravimétricos y magnetométricos de acuerdo con (SIAPAS, 2014):

A través de los métodos geosísmicos se puede inferir la distribución de las propiedades del suelo, en especial las mecánicas. Se emplean las velocidades de ondas de corte y de compresión por efectos de detonación de cargas de explosivos u otras fuentes y estas se transmiten a través de los materiales del suelo. La interpretación de resultados permite reconocer la geometría de la estratigrafía y extrapolar los resultados hallados mediante métodos directos o sondeos.

Los métodos geosísmicos permiten hallar la densidad relativa de los materiales a partir de su densidad, el espesor de los estratos, la relación de Poisson, el módulo dinámico de rigidez

de cortante, el módulo dinámico de elasticidad, la profundidad del basamento rocoso, entre otros. La prospección sísmica por métodos convencionales permite la obtención de módulos dinámicos a partir de métodos como *down-hole*, *cross-hole* o por ensayos de laboratorio, mientras que la prospección sísmica con métodos no convencionales se realiza a través de la tomografía sísmica y del método sísmico de reflexión somera.

Los métodos geoelectricos posibilitan la realización de mediciones de resistividad sobre la base de la inducción de una corriente eléctrica; además, permiten detectar las características del suelo indirectamente, como por ejemplo la profundidad del nivel freático, la profundidad y espesor de los estratos, los tipos de material, así como encontrar estructuras blandas, cavernas, estructuras geológicas, entre otros. Según el tipo de prospección realizada, se clasifica como la prospección geoelectrica, que se efectúa mediante calicatas eléctricas o sondeos eléctricos verticales, y la prospección electromagnética, que se efectúa mediante el radar de penetración terrestre y sondeos electromagnéticos.

Los métodos gravimétricos y magnetométricos son mayormente utilizados en eventos con requerimientos geológicos grandes por sus resultados aproximados de manera rápida y económica. Principalmente, se utilizan para deducir los riesgos ambientales por desechos, la densidad de fracturamiento y uniformidad del medio, la detección y el mapeo de cavidades, cavernas y túneles y la certificación del suelo de edificaciones concluidas.

Los métodos geosísmicos con diferentes tecnologías, estrategias y aplicaciones se encuentran entre varias técnicas geofísicas aplicables para explorar los primeros metros del suelo, alrededor de 50 metros, y brindar más detalles sobre la naturaleza de los hallazgos existentes y su efecto en el diseño de la cimentación. En esta primera parte de la tesis se va a incidir en los métodos más utilizados en la geotecnia y en la ingeniería civil de acuerdo con la revisión de los estudios efectuados.

Asimismo, en los proyectos de ingeniería es necesario conocer los tipos de suelos y sus propiedades en relación con la profundidad, por lo cual los métodos sísmicos son apropiados para identificar fronteras de estratos y actualmente a nivel internacional se están efectuando correlaciones de parámetros físicos con parámetros mecánicos de los suelos y además identificación de aguas subterráneas entre otros.

Con la finalidad de recopilar las principales características de los métodos geofísicos, se elaboró la Tabla 2.

Tabla 2: Cuadro comparativo entre los métodos geosísmicos, los geoelectricos y los métodos gravimétrico y magnetométrico

Método geofísico	Descripción	Parámetro de medición	Aplicaciones
Método geosísmico	Son métodos que determinan la velocidad de propagación de las ondas sísmicas. Se dividen en métodos de refracción y de reflexión.	Tiempos de viaje reflejados/reflectados de las ondas sísmicas.	Permite determinar propiedades como densidad y módulos elásticos. Así, en cimentaciones, se halla el espesor de los suelos que cubren una formación rocosa, se caracteriza el comportamiento dinámico del suelo, entre otros.
Método geoelectrico	Se clasifica por el tipo de prospección en: prospección geoelectrica y en prospección electromagnética.	Características de la corriente eléctrica que es generada dada la diferencia de potencial entre dos puntos.	Permite determinar propiedades como la conductividad eléctrica. Así, pueden medirse las propiedades eléctricas de los suelos y rocas, realizar mapas de la resistividad del suelo, detectar la profundidad de los estratos, del nivel freático, encontrar estructuras blandas, entre otros.
Método gravimétrico y magnetométrico	El método gravimétrico se basa en el campo natural de la gravedad, así detecta alteraciones en la densidad de los materiales del suelo. Mientras que el método magnetométrico estudia las pequeñas variaciones en el campo de geomagnético de la Tierra.	Variaciones espaciales en la fuerza del campo gravitatorio/geomagnético de la Tierra.	Permite determinar propiedades como la densidad/susceptibilidad magnética y remanencia. Es por ello que se utilizan para el mapeo y detección de cavidades, túneles, cavernas; identificación de zonas de vacío; entre otros.

Fuente: Fuente propia.

2.4.1 Método *down-hole*

En este método la propagación de ondas sísmicas es hacia abajo y es captado por un geófono que es instalado en la pared del pozo y conectado por medio de una superficie que es golpeada manualmente por un martillo; la onda de corte horizontal se produce cuando se golpea horizontalmente la placa ubicada en la superficie, y los tiempos de llegada de ondas P y S (más común) se obtienen una vez que se realicen golpes verticales y horizontales a la placa (Chuquimuni, 2001).

Las velocidades de propagación a distintos niveles de profundidad a lo largo del pozo son halladas mediante la geometría fuente-geófono del dispositivo y los tiempos de llegada de las ondas sísmicas. Fundado en la V_P y V_S (medición más utilizada); y la densidad del suelo, esta prueba determina los módulos dinámicos de deformación del terreno. Las aplicaciones del método son que reconoce el contacto entre diferentes estratos hasta una profundidad de estudio, analiza las características geofísicas de los estratos, reconoce los contactos litológicos y las zonas de fracturamiento de rocas, y con estos parámetros se pueden efectuar los cálculos del comportamiento sísmico de las estructuras de obras civiles (Machuca, 2015).

En la Figura 6 se muestra la disposición del ensayo.

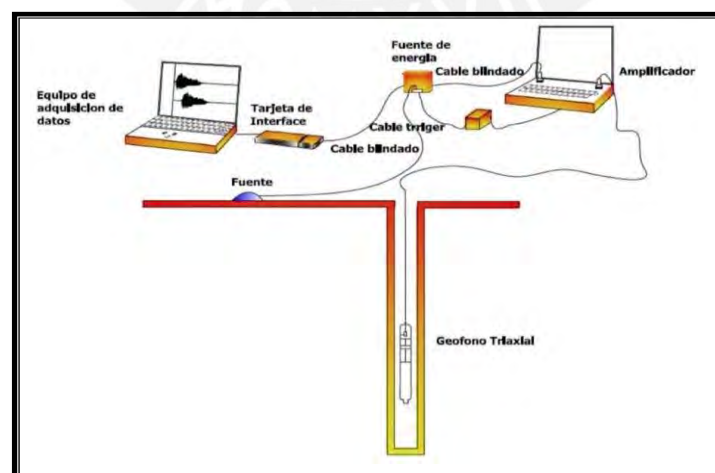


Figura 6: Disposición detallada del ensayo *down-hole*.

Fuente: López, 2008.

2.4.2 Método *cross-hole*

En una prospección *cross-hole*, la fuente sísmica se encuentra ubicada en un sondeo y los geófonos se ubican en otro inmediato, a la misma profundidad. Tanto la fuente como el sensor se van trasladando en toda la longitud del sondeo de forma regular. Se obtiene el tiempo de llegada de las ondas P y S desde un sondeo al otro. Sabiendo la distancia entre los sondeos, se pueden determinar V_P y V_S (medición más utilizada), y con estas velocidades se determinan los parámetros dinámicos del suelo (Stokoe & Santamarina, 2000). Es necesario repetir este método a distintas profundidades para registrar los perfiles de velocidad. Asimismo, el uso de más de dos sondeos minimiza los errores de los resultados de los efectos del material superficial y las medidas de tiempo de disparo.

Este método permite determinar la distribución del campo de velocidades sísmicas entre sondeos, localizar las zonas de fallas, cavidades, galerías, entre otros; mediante la reconstrucción de la estructura interna del suelo a través de los tiempos de trayecto de las ondas sísmicas que se propagan entre los dos sondeos.

En Figura 7 se observan dos sondeos, en uno de ellos (sondeo emisor) se encuentra la fuente y en el otro (sondeo receptor) está ubicado el geófono triaxial que está conectado con el amplificador que a su vez está conectado con el equipo de adquisición de datos.

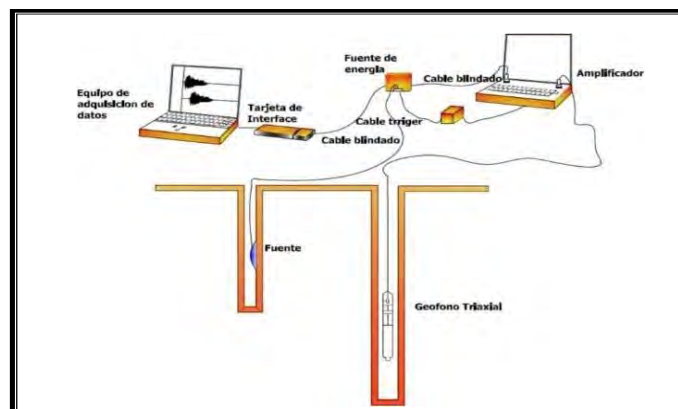


Figura 7: Disposición detallada del ensayo *cross-hole*.

Fuente: López, 2008.

2.4.3 PS suspension logging

Permite la caracterización de los suelos, pero en menor medida respecto a los métodos *cross-hole* y *down-hole*. Es un método de prospección sísmica en sondeo que permite determinar la velocidad de ondas P y S a través de un sistema de polea de una sonda ubicada en el interior del sondeo inundado y dos geófonos. Solo es necesario un sondeo y en contraste con los métodos *cross-hole* y *down-hole* no es necesario que la sonda se encuentre afianzada contra las paredes del sondeo.

Además, para generar la perturbación sísmica se requiere de un martillo solenoide que produce una onda sobre el fluido (agua) una onda de compresión esférica. Al llegar a las paredes, esta onda genera ondas internas, de corte y de compresión; así, se generan ondas S en la dirección del eje del sondeo y ondas P en dirección perpendicular, las cuales ascienden hasta las cotas donde se encuentran los geófonos (Santisteban, 2012).

En este método, la fuente se encuentra a una distancia constante (1 metro) de los receptores, por lo tanto, las velocidades de intervalo pueden ser registradas con mayor detalle y a una mayor profundidad que con metodologías tradicionales que realizan esta acción desde la superficie hasta el *borehole* (GEOVision, 2006).

2.4.4 Sísmica de reflexión

En este método se cuantifica la transmisión de las ondas propagadas desde una fuente donde se producen las ondas sísmicas y el arribo de estas a los receptores. Por consiguiente, se instalan geófonos equidistantes en línea.

Esta técnica está basada en reflexiones de las ondas sísmicas en las diferentes interfases en las que está formado el suelo. Las interfases responden, de igual manera que el método de sísmica de refracción, a contrastes de impedancia y seguidamente se relacionan con los

diferentes tipos de estratos del suelo (Gayá, 2004). Además, permite representar gráficamente múltiples estratos dado un solo disparo, sin perder la precisión conforme la profundidad aumenta.

En la Figura 8 se aprecia que la fuente genera las ondas que reflejan en diferentes materiales y que son recepcionadas por receptores en la superficie del terreno con diferentes velocidades.

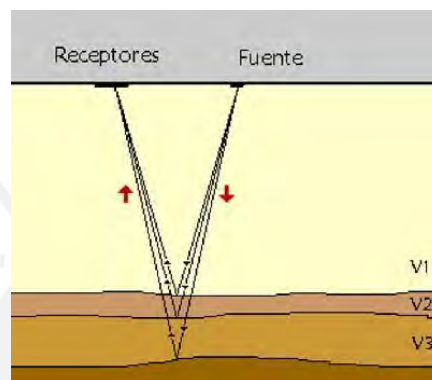


Figura 8: Ondas reflejadas en los diferentes estratos.

Fuente: Gayá, 2004.

En la Figura 9 se muestran las ondas reflejadas en los tres estratos y en la Figura 10, los puntos reflectores.

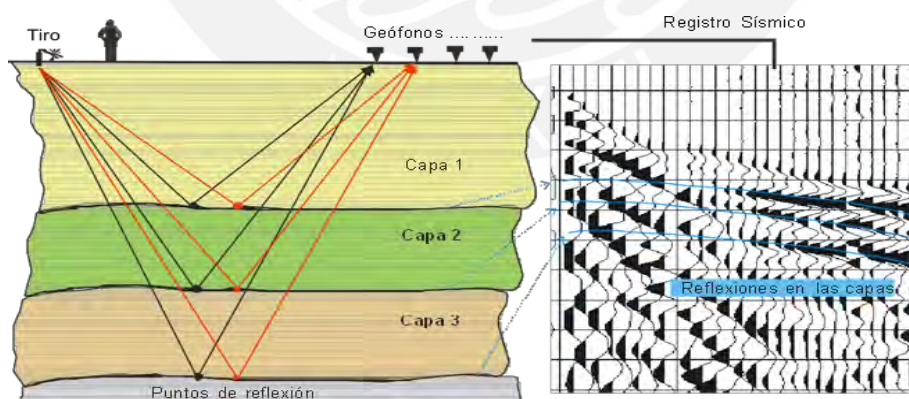


Figura 9: Fuente de propagación de onda reflectiva hacia los geófonos y el registro sísmico con trayectorias hiperbólicas.

Fuente: López, 2008.

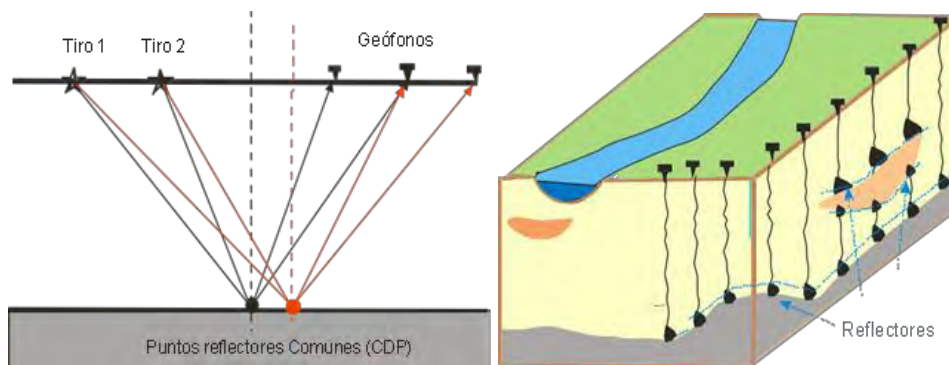


Figura 10: a) Puntos reflectores comunes b) Reflectores de capas a la superficie.

Fuente: Gayá, 2006.

2.4.5 Sísmica de refracción

La sísmica de refracción es un método muy utilizado en investigaciones de exploraciones geofísicas que permite recabar información de las propiedades del suelo y los parámetros dinámicos del mismo. Asimismo, permite hallar la estratigrafía del suelo basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que lo conforman (Alva et al., 2015). El tren de ondas de refracción se genera artificialmente por medio de explosiones, golpes mecánicos (martillos y caída de peso) o vibraciones a puntos ubicados a una distancia predeterminada a lo largo de un eje sobre la superficie, estas se refractan en distintas interfaces, y retornan hacia la superficie del terreno donde son controladas por los geófonos instalados en el terreno o en el caso de encontrar interfaces entre dos medios que están constituidos de distintas propiedades elásticas, parte de la energía continúa penetrando a mayor profundidad y la otra parte retorna hacia la superficie.

Con esta técnica se logra información de la configuración interior del suelo, datos de caracterización de suelos y rocas de las capas formadas en profundidad. De acuerdo con (ZER Geosystem S.A.C., 2010), se exploran grandes áreas de manera rápida y económica, lográndose con relativa exactitud los espesores de las capas del suelo. Sin embargo, permite obtener perfiles de ondas P hasta profundidades máximas de 20 metros. Se asume la geometría de la

trayectoria considerando que el suelo está conformado por una serie de capas separadas por interfaces, posiblemente buzantes y planas. Así, dentro de cada capa las velocidades son constantes y aumentan conforme aumenta la profundidad de la capa.

Las ondas P llegan a ser percibidas por los geófonos en un tiempo “ t_i ” denominado tiempo de arribo, que depende en mayor grado de la distancia “ d_i ” contenida entre el punto de disparo y el recorrido por el suelo hasta llegar al geófono. No obstante, el tiempo de arribo es afectado por la densidad del medio por donde las ondas viajan y por las propiedades de elasticidad. Se realiza el análisis de los datos mediante el uso de curvas denominadas “dromocrónicas”, las cuales representan el tiempo de llegada al geófono (Salazar, 2015).

En la Figura 11, se observa todo el proceso de generación de las ondas P y S, desde la superficie con generación de energía hasta la adquisición de datos. En la Figura 12, se muestra la distancia de cobertura de las ondas en profundidad con el tiempo en segundos de la propagación de ondas y en la Figura 13, se presenta el esquema de sísmica de refracción.

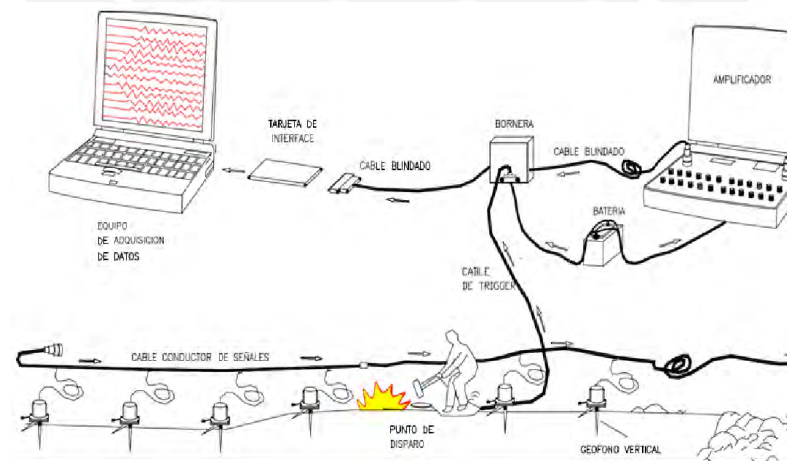


Figura 11: Registro de las señales sísmicas.

Fuente: Aguilar, 2010.

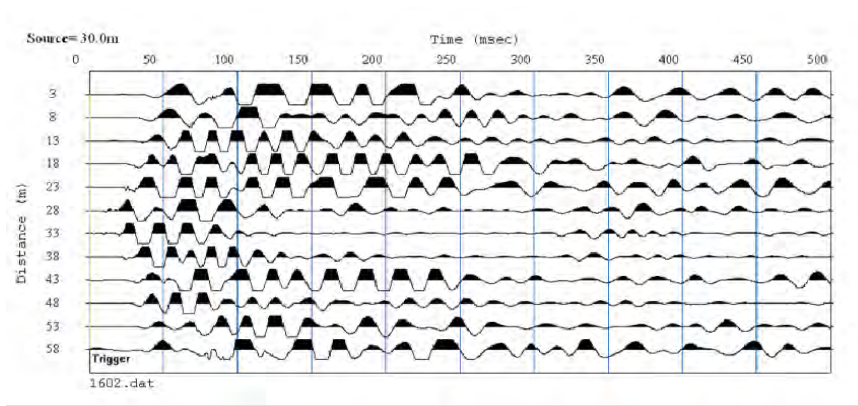


Figura 12: Movimiento de las ondas de refracción.

Fuente: Aguilar, 2010.

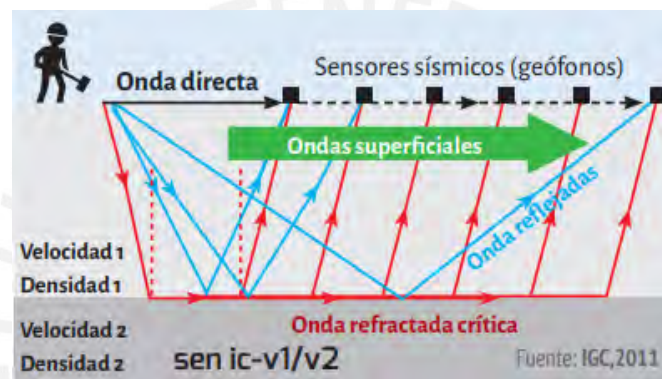


Figura 13: Esquema de refracción sísmica y la llegada a los geófonos.

Fuente: IGC, 2011.

Además, se presentan las recopilaciones de cuadros de diferentes autores donde se realiza la interpretación de resultados del ensayo de sísmica de refracción, en este caso la caracterización del suelo mediante la obtención de ondas P.

Tabla 3: Velocidades de propagación de las ondas primarias compresionales (Arce, 1990).

Tipos de Suelos	V_p (m/s)
Suelo de cobertura	<1,000
Roca muy alterada o aluvión compactado	1,000-2,000
Roca alterada o aluvión muy compactado	2,000-4,000
Roca poco alterada	4,000-5,000
Roca firme	>5,000

Fuente: Arce, 1990.

Tabla 4: Velocidades de propagación de las ondas primarias compresionales (ASTM D5777-95).

Tipos de Suelos	V_p (m/s)
Suelos intemperizados	240-610
Grava o arena seca	460-915
Arena saturada	1,220-1,830
Arcilla saturada	910-2,750
Agua	1,430-1,665
Agua de mar	1,460-1,525
Arenisca	1,830-3,960
Esquistos, arcillas esquistosas	2,750-4,270
Tiza	1,830-3,960
Caliza	2,130-6,100
Granito	4,575-5,800
Roca metamórfica	3,050-7,000

Fuente: *American Society for Testing and Materials* (ASTM D5777-95).

Tabla 5: Velocidades de propagación de las ondas primarias compresionales (Curvich J, 1975).

Tipos de Suelos	V_p (m/s)
Esquisto arcilloso	2,700-4,800
Grava arcillosa seca	300-900
Arena – arena húmeda	200-1,800
Roca metamórfica	4,500-6,800

Fuente: Curvich J 1975; Milton 1961; NB 1976; Savicha y Satonov V.A 1979.

Tabla 6: Velocidades de propagación de las ondas primarias compresionales (Martínez, 1990).

Tipos de Suelos	V_p (m/s)
Arena suelta sobre el manto freático	245-610
Suelo blando	<300
Arena suelta bajo el manto freático	45-1,220

Arenas y gravas	300-1,000
Arena suelta mezclada con grava húmeda	455-1,065
Rocas blandas, grava y arena fina compacta	1,000-2,000
Grava suelta, húmeda	455-915
Roca compacta	2,000-4,000
Roca muy compacta	>4,000

Fuente: Martínez, 1990.

2.4.6 Método sísmico de análisis multicanal de ondas de superficie - MASW

El método sísmico de análisis multicanal de ondas de superficie (MASW, *Multichannel Analysis of Surface Waves*) evalúa e interpreta las ondas de superficie (ondas Rayleigh o R) de un registro multicanal que son generadas por una fuente de energía impulsiva a una distancia determinada de la línea de estudio con el fin de obtener un perfil de velocidades (V_s) para el punto central de dicha línea. Permite precisar la estratigrafía del suelo bajo un punto en forma indirecta, basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que conforman el suelo (Alva et al., 2015). La profundidad de investigación de este método es de usualmente los 30 primeros metros, es así que permite obtener perfiles de ondas S hasta profundidades de 20 a 30 metros. Asimismo, elimina las mediciones repetidas dado el cambio de configuración en el campo y utiliza un rango de frecuencias de 1 a 30 Hz registrado por un sistema multicanal y un arreglo de receptores equidistantes.

Este método se usa algunas veces en reemplazo de la sísmica de refracción, en lugares urbanos y en zonas en el que los ruidos dificultan el uso de sísmica de refracción habitual, pues su principal ventaja es la capacidad de tomar en cuenta la complicada naturaleza de las ondas sísmicas que contienen ruido, así como el modo fundamental de las ondas de superficie. Además, es utilizado en la investigación de asentamientos diferenciales del suelo en edificaciones. También resulta favorable relacionándose con la sísmica de refracción, pues facilita la determinación del módulo de elasticidad de los estratos de suelo. Resulta muy útil

para la decisión de tipos de cimentaciones, para la determinación de la rigidez de terraplenes, en los estudios de riesgo sísmico, para el estado de compactación y fracturación de las rocas, en la microzonificación, entre otros. Hay que tener presente que su nivel de definición es inferior al que entrega la sísmica de refracción.

Para realizar la interpretación de los registros se obtiene una curva de dispersión (gráfico de velocidad de fase de las ondas de superficie versus la frecuencia), en el cual se filtran solamente las ondas de superficie, pues su velocidad de fase se aproxima de un 90 a 95% al valor de la velocidad de ondas de corte (V_s) y se realiza el método de inversión (cálculo inverso iterativo) para obtener el perfil unidimensional V_s a partir de la curva de dispersión calculada (Rivera et al, 2016).

En la Figura 14, se presenta un ejemplo de la línea sísmica LS02-CN de acuerdo con (Tavera, 2016) que muestra resultados hasta 23 metros e indica que el suelo analizado está conformado por dos capas de 5 y 10 metros de espesor con velocidades de 139 m/s y 269 m/s.

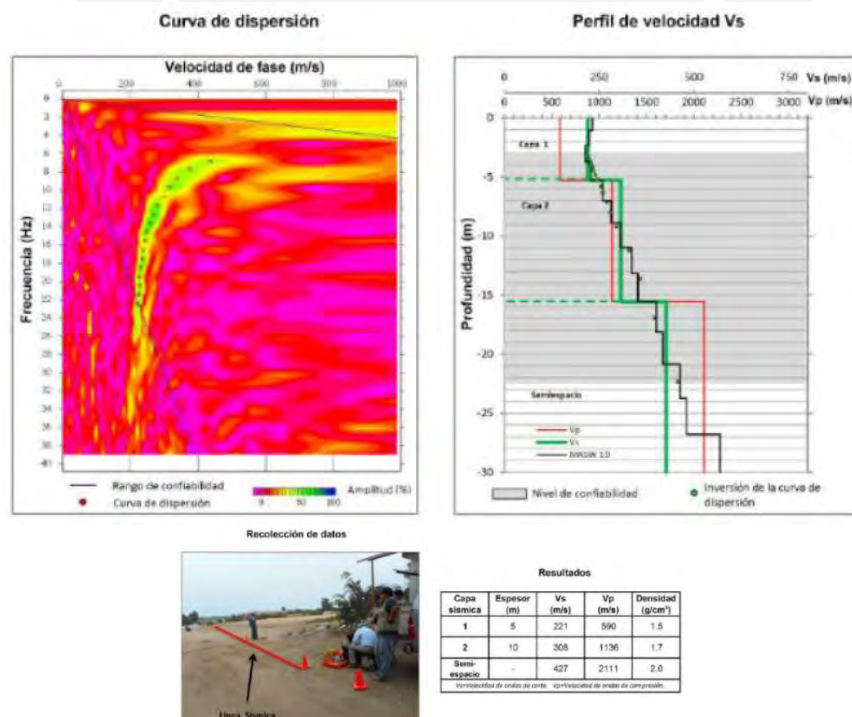


Figura 14: Curva de dispersión, perfil unidimensional de velocidad y resultados.

Fuente: Tavera, 2016.

A continuación, se presentan las recopilaciones de cuadros de diferentes autores donde se realiza la interpretación de resultados del método sísmico de análisis multicanal de Ondas de Superficie-MASW, en este caso de la caracterización del suelo mediante la obtención de ondas de corte V_s .

Tabla 7: Clasificación de suelos según *International Building Code*.

Tipo	V_s (m/s)	Descripción
A	<1,500	Roca Dura
B	$760 < V_s < 1,500$	Roca
C	$360 < V_s < 760$	Roca Blanda y/o Suelo muy Denso
D	$180 < V_s < 360$	Suelo Rígido
E	$V_s < 180$	Suelo Blando
F	Suelos Especiales (licuables, colapsables, arcillas plásticas, suelos orgánicos)	

Fuente: *International Building Code* (IBC, 2012).

Tabla 8: Clasificación de suelos según Norma E.030

Perfil	V_s	Descripción
S_0	>1,500 m/s	Roca Dura
S_1	500 a 1,500 m/s	Roca o Suelos muy Rígidos
S_2	180 a 500 m/s	Suelos Intermedios
S_3	<180 m/s	Suelos Blandos
S_4	Condiciones excepcionales. Clasificación basada en el EMS	

Fuente: Norma de Diseño Sismorresistente E.030.

Tabla 9: Velocidades de propagación de Ondas Compresionales (CISMID, 1991).

Tipo de Suelos	V_s (m/s)
Limo	210
Arcilla	350

Tipo de Suelos	V_s (m/s)
Arena	450
Arena Fina	460
Arena Media	600
Arena Gruesa	300
Arena Marina	360
Grava	510
Grava Gruesa	650

Fuente: Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID,1991).

Por otro lado, la combinación de métodos como el MASW y el MAM (análisis de arreglo de microtremores) faculta la obtención de perfiles de velocidad de ondas de corte hasta profundidades promedio de 60 a 80 metros.

2.4.7 Microtremores o microtrepidaciones

El comportamiento dinámico del suelo ante las ondas sísmicas está enormemente relacionado con las magnitudes de frecuencia natural con la que vibra el suelo.

La técnica que se emplea para conocer la frecuencia natural del suelo es la de microtremores o microtrepidaciones también denominados vibraciones medio ambientales; en estos métodos, los costos de operación son bajos, por lo que puede generarse gran información que se puede obtener en cualquier momento y lugar utilizando para este método un solo equipo sísmológico. Los microtremores están conformados principalmente por las ondas Rayleigh.

Las microtrepidaciones se pueden definir como vibraciones de baja amplitud del suelo que se pueden dar por ondas sísmicas superficiales e internas de periodo corto o largo. Las de periodo corto ($T < 1$ s), son generalmente producidas por fuentes artificiales, por ejemplo: el tráfico, maquinarias, etc. Mientras que las vibraciones de periodo largo ($T > 1$ s), se deben a las

ondas Rayleigh y Love que son originadas por fuentes naturales, por ejemplo: olas de mar, viento, etc. (Bermúdez et al., 2002).

Las ondas de superficie se clasifican de acuerdo con (Bard, 1998) en:

- De frecuencias bajas (menos de 0.3 a 0.5 Hz.): ocasionadas por ondas del mar a grandes distancias.
- De frecuencias intermedias (entre 0.3 a 0.5 y 1 Hz): ocasionadas por olas de mar que se encuentran cerca de la costa.
- De altas frecuencias (mayores a 1 Hz): ocasionadas por la actividad humana.

Dentro de las desventajas de esta técnica es que evalúa respuestas del suelo dinámicas, lineales y de baja amplitud, por lo que para un sismo severo en el que la respuesta dinámica es inelástica y se presentan grandes deformaciones del suelo, algunos resultados no son los esperados. Entonces, los resultados obtenidos por el método de microtremores deben ser corroborados y comparados con mayor precisión a través de modelos empíricos y teóricos. (Bermúdez et al., 2002).

De forma general, se puede definir al método de microtremores como pertinente para hallar la frecuencia del periodo fundamental del suelo, pero con poca precisión para obtener factores de amplificación dinámica.

Existen diversos métodos para analizar los microtremores y hallar el factor de amplificación, la frecuencia y el periodo natural, entre ellos está el método de Nakamura o razón espectral H/V:

Es el método más utilizado para evaluar la información obtenida de los microtremores dado su pequeño tiempo de aplicación y bajo costo, no obstante, es mayormente controversial por sus resultados y bases teóricas. Cabe precisar que, en el análisis de algunos resultados de

estimación del periodo y su amplificación relacionada, muchas veces los resultados llegan a coincidir satisfactoriamente, mientras que en otros no.

La razón espectral H/V es un método no invasivo que consiste en la determinación de los espectros de Fourier de las componentes horizontales y la componente vertical de los registros de vibraciones ambientales, permite obtener la frecuencia de resonancia fundamental del suelo o periodo fundamental. En general, la curva presenta un valor máximo bien definido por valle-cresta-valle para esta frecuencia. Estos valores máximos son más delimitados en terrenos de depósitos suaves, mientras que son más amplios en terrenos intermedios o compactos, o conformados por materiales heterogéneos (Ordaz y Veras, 2003). Esta frecuencia predominante presenta una mejor definición en cuanto mayor sea el contraste entre el estrato duro resistente y los depósitos de suelo. Además, es considerado como una herramienta utilizada en estudios de microzonificación sísmica tanto internacionalmente como a nivel nacional.

2.4.8 Refraction Microtremor - ReMi

El método ReMi determina la distribución de los valores de velocidad de las ondas S con la profundidad a través de un análisis espectral de ruido sísmico o microtremores. Tiene dos importantes características: emplea una matriz lineal que no precisa disparos de tipo CMP y se fundamenta principalmente en el ruido ambiental para generar ondas Rayleigh.

En esta técnica, los costos de operación son bajos, por lo que puede generarse gran información que se puede obtener en cualquier momento y lugar utilizando un solo equipo sismológico, el de refracción estándar, el cual es colocado de forma idéntica a las mediciones de ondas P, para captar las ondas de superficie de 2 Hz a 25 Hz. (Louie, 2001). Así, no requiere de una fuente de energía específica y su funcionamiento es bueno al trabajar con altos índices

de ruido superficial, pudiendo reemplazar al método de refracción sísmica en entornos ruidosos.

Permite, por otro lado, encontrar inversiones de velocidad y capas delgadas de material. De esta forma se caracteriza por ser un método confiable y adecuado para medir V_{S30} , y a partir de los resultados hallados, realizar estudios de rigidez del suelo, hallar los módulos elásticos, determinar respuestas sísmicas de sitio, compactación de suelo, potencial de licuación, entre otros (Santiesteban, 2012).

Además, puede determinar velocidades de onda S a profundidades hasta un máximo de 100 metros, dependiendo de las propiedades de los materiales que conforman el suelo a analizar. Es un método adecuado para delimitar estratigráficamente entornos geológicos complejos en los cuales incluso el análisis con refracción de ondas de corte es inexacto y brinda una muestra de ondas de corte en un volumen mayor de material para así promediar una columna de velocidad V_S representativa sobre la longitud de la matriz lineal.

2.4.9 Tomografía sísmica

La tomografía sísmica es la técnica que facilita el procesamiento de imágenes de un suelo por secciones. La realización de las tomografías sísmicas de refracción reside en la cuantificación de tiempos de desplazamiento de ondas P originadas desde una fuente ubicada en diferentes lugares predeterminados en línea recta sobre el terreno, de esta manera obtenemos la estratigrafía del suelo de forma indirecta. Es un método similar al de sísmica de refracción que tiene como principales ventajas el grado de detalle de los modelos y que no se limita ante la presencia de capas de velocidad, elevados buzamientos y fuertes gradientes laterales. A diferencia del método de refracción, se realizan varios disparos a lo largo del tendido de geófonos (Otero, 2018).

En la Figura 15 se representa el método mediante un ejemplo.

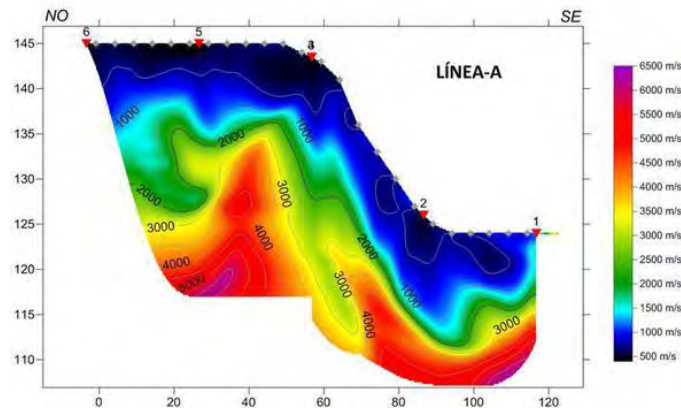


Figura 15: Ensayo de tomografía sísmica.

Fuente: Geoterra, 2014.

2.4.10 Tomografía de resistividad eléctrica o ERT

La tomografía eléctrica (ERT, *Electrical Resistivity Tomography*) es un ensayo geofísico superficial que calcula la resistencia eléctrica y es usado con fines geotécnicos para determinar las zonas de filtraciones de agua, discontinuidades de rocas, entre otros. Calcula la resistividad eléctrica a partir de un gran número de mediciones de resistencia que son realizadas basándose en electrodos dispuestos en un arreglo geométrico para obtener imágenes de alta resolución 2D y 3D de la distribución de resistividad eléctrica del suelo (Reynolds, 1997).

El método consiste en la medición de los efectos producidos por el flujo de la corriente eléctrica; esta corriente se puede propagar en minerales y rocas mediante la conducción electrolítica o a través de la conducción electrónica u óhmica. La medida de variación de la resistividad en las rocas, minerales y sedimentos es amplia, lo cual indica la presencia de zonas de fractura relacionándolas con la geometría de las estructuras en el suelo.

La tomografía de resistividad eléctrica permite el reconocimiento del terreno, el cual puede efectuarse rápidamente y conocer la profundidad a la que se encuentra la roca y el nivel

freático. Para este método es muy importante la distribución y el número de medidas de campo, dado que de estos depende la profundidad como la resolución del estudio, además, una buena resolución se obtiene a través de un número alto de datos y medidas con pequeños espacios.

Asimismo, cabe destacar que, de acuerdo a la bibliografía anglosajona, existen dos nomenclaturas con respecto a la disposición de los electrodos en el terreno, la primera es la disposición sobre la superficie y la segunda es cuando estos se encuentran al interior de sondeos verticales. Sin embargo, la disposición más utilizada es la superficial, puesto que es la técnica más adecuada para el estudio de filtraciones (perfiles de gran longitud) y representa un método más económico, rápido y fácil de realizar (Serrano, 2003).

En la Figura 16 se representa un esquema del método.

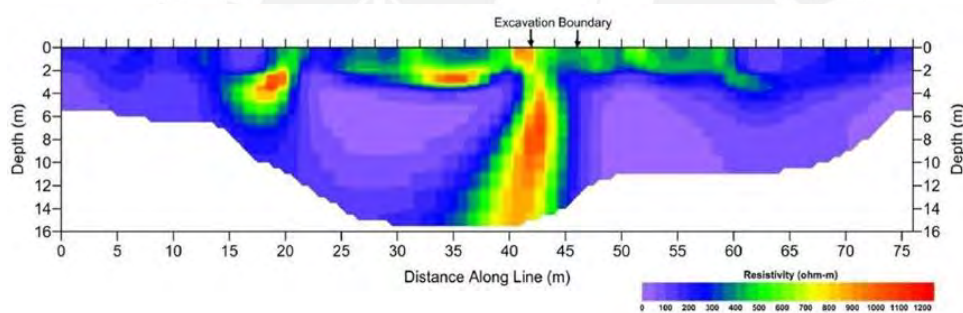


Figura 16: Ejemplo de ensayo 2D de tomografía de resistividad eléctrica: mapeo de la contaminación del suelo.

Fuente: ConeTec, 2022.

Los valores de resistividad más comunes para suelos y rocas de acuerdo a (Milsom, 2003) y (Keller y Frischknecht, 1966) se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10: Resistividades de las rocas más comunes.

Tipos de Suelos	Ωm
Arcilla	1-100
Suelo	50-100
Grava	100-600
Arena	500-5,000
Arenisca	200-8,000
Lutita	500-10,000
Gabro	100-500,000
Granito, Basalto	200-1,000,000

Agua	10-100
Agua de mar	0.2

Fuente: Milsom, 2003. Keller y Frischknecht, 1966.

2.4.11 Georradar o radar de penetración de tierra

El georradar o radar de penetración de tierra (GPR, *Ground Penetration Radar*) es un método no destructivo que está basado en la emisión y propagación de las ondas electromagnéticas en un medio, seguida de la recepción de las reflexiones que se producen en sus discontinuidades. La diferencia entre un georradar y un radar común se encuentra en el medio de propagación y no en sus principios de funcionamiento porque estos son similares, el primero se propaga generalmente en un material no homogéneo, mientras que el segundo en un material homogéneo (Caicedo et al., 2008).

La incidencia de la energía de las ondas electromagnéticas sobre las heterogeneidades suscita fenómenos de refracción, difracción y reflexión que son detectados por la antena receptora. Es por ello que, un georradar puede detectar cambios en las propiedades de los materiales del suelo en conjunto con las características de la onda, pues estas propiedades son las que gobiernan la propagación de energía por el medio. La magnitud de la frecuencia central de oscilación de la antena establece su resolución y capacidad de penetración (Caicedo et al., 2008). El tipo de estudio más básico es el de hallar las velocidades promedio de propagación y encontrar la discontinuidad en la que se ha producido la reflexión por medio de las velocidades y los tiempos de propagación registrados para cada evento. De esta forma se puede determinar la profundidad a la que se encuentra y su situación horizontal.

Es un método que presenta fenómenos similares asociados a la propagación de energía como en la sísmica de reflexión, pero se diferencian en la frecuencia de las ondas y en el método de propagación utilizado por los dos métodos; en el georradar se utilizan generalmente frecuencias más altas que están entre 10 a 1,000 MHz. El método de sísmica de reflexión se considera como una técnica de baja velocidad de ensayo dada la generación de ondas P

mediante golpes o explosiones, mientras que el georradar es capaz de producir una serie de ondas electromagnéticas en algunos nanosegundos y procesarlas en milisegundos, lo cual convierte el método en continuo y de alta velocidad. Por otro lado, la similitud entre estos dos métodos permite el procesamiento de datos recolectados por un georradar por medio de *softwares* diseñados originalmente para sistemas de sismica de reflexión y viceversa.

El uso del georradar es cada vez más extenso en la resolución de problemas en la ingeniería civil, es así como el acceso a estos equipos es mayor y los costos asociados son cada vez menores. En cuanto al desarrollo de los *softwares* y *hardwares*, son más eficaces en cuanto al análisis y manejo (Caicedo et al., 2008).

2.4.12 Medición de microtremores en arreglos multicanal – MAM

La medición de microtremores en arreglos multicanal (MAM, *Microtremor Array Measurement*), es un método pasivo de exploración geofísica que se basa en el análisis de los microtremores o vibraciones ambientales y consta de un arreglo instrumental bidireccional con múltiples geófonos (receptores) que analizan las velocidades de fase; es por ello que no requiere de la generación de ninguna señal como en el caso de los ensayos MASW y refracción sísmica (Rivera et al., 2016). Así, el ruido ambiental ajeno no afecta a la toma de datos.

A través de este método se puede determinar la estratigrafía del suelo de forma indirecta con base en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que conforman al suelo, así se obtiene en el punto central de la línea, el perfil de velocidades de ondas de corte V_s . Además, se pueden monitorear las vibraciones ambientales con frecuencias mayores a 2 Hz a través de arreglos concéntricos en forma de triángulos, círculos o ‘L’. La distribución de los geófonos para realizar el ensayo está en función del área disponible (Alva et al., 2015).

La combinación de los métodos MASW y MAM permite obtener perfiles de velocidades de ondas de corte V_s y se alcanzan profundidades promedio de 40 a 80 m y en algunos casos llegando a los 100 metros. La principal ventaja de esta combinación se da cuando se esfuerza al suelo en mayor medida, como en el estudio de estructuras bastante pesadas o en el caso del análisis de la cimentación de presas de agua, presas de tierra, puentes, pads de lixiviación para estructuras con cimentación profunda. Este análisis se da para adquirir correlaciones efectivas confiables con los perfiles estratigráficos del suelo, en casos donde se realizaron perforaciones diamantinas y se obtuvieron resultados del ensayo SPT. Por ello, esta alternativa es muy económica y confiable para hallar parámetros dinámicos del suelo de cimentación (ZER Geosystem, 2010).

A continuación, en la Figura 17 se muestran los arreglos anteriormente mencionados.

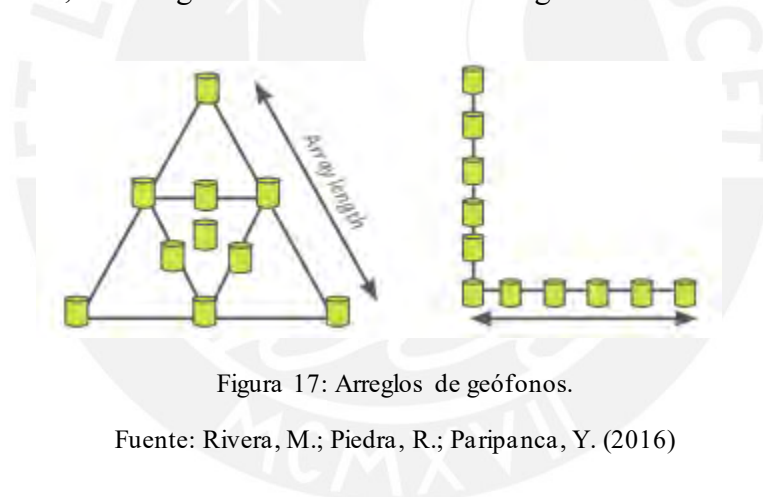


Figura 17: Arreglos de geófonos.

Fuente: Rivera, M.; Piedra, R.; Paripanca, Y. (2016)

2.4.13 Análisis espectral de ondas de superficie- SASW

El análisis espectral de ondas de superficie (SASW, *Spectral Analysis of Surface Waves*) se fundamenta en el registro de las ondas de superficie (ondas Rayleigh) que son generadas por una fuente de impacto, vibratoria o puntual; a partir de estas se pueden determinar las curvas de dispersión de una zona específica y que a través de análisis inverso se puede determinar el perfil de velocidades de ondas de corte en profundidad, lo cual quiere decir que la velocidad de propagación depende de la longitud de onda o frecuencia. (Stokoe et al., 1994).

Permite el análisis de las zonas en las que existe una capa subyacente a otra de mayor velocidad, ventaja que no es permitida por otro método. Además, puede ser aplicado también en el estudio de rigidez de terraplenes, el cálculo de riesgo sísmico, en el análisis de licuación, en la detección de estructuras enterradas, en la caracterización geotécnica y en los estudios de zonificación sísmica; además también puede ser aplicado en el diseño de pavimentos (Peredo, 2011). Además, presenta como ventajas la entrega de buenas estimaciones de las velocidades de ondas de corte, abarca mucho más volumen de terreno en su análisis, es un método económico, de rápida aplicación y no necesita de varias mediciones en el terreno. No obstante, se recomienda obtener la información estratigráfica mediante la complementación de este método con una exploración adicional.

En la Tabla 11, se presentan de modo esquemático las características más importantes de los diferentes métodos desarrollados y de algunas combinaciones de métodos anteriormente mencionadas.

Tabla 11: Resumen métodos geofísicos.

Método geofísico	Arreglo/Fuente	Parámetros medidos	Descripción	Ventajas	Aplicaciones
<i>Down-hole</i>	Una perforación.	Velocidad de ondas primarias y secundarias V_S y V_P .	Se obtiene una velocidad promedio del viaje de la onda, la cual pasa por varios estratos entre la fuente y el sensor.	Cuenta con más precisión que otros métodos.	Permite hallar los módulos dinámicos del suelo. Inferir el estado de compacidad. A través de la distribución de velocidades y propagación y las constantes elásticas, se puede analizar la amplificación del suelo y su comportamiento dinámico. (Meneses, 1991). Obtener la estratigrafía del suelo.
<i>Cross-hole</i>	Dos o más perforaciones.	Velocidad de ondas primarias y secundarias V_S y V_P .	Utiliza dos o más sondeos para cuantificar la velocidad de las ondas sísmicas.	Permite obtener perfiles de velocidad a 30 hasta 60 metros de profundidad mediante fuentes emisoras mecánicas.	Permite hallar los módulos dinámicos del suelo. Inferir el estado de compacidad. Obtener la estratigrafía del suelo.
<i>PS suspension logging</i>	Una perforación.	Velocidad de ondas primarias y secundarias V_S y V_P .	Registra la vibración de terreno inducida por una fuente a través de geófonos.	Buena resolución, puede ejecutar medidas a distancias centimétricas.	A partir de los perfiles sísmicos: Permite estimar los módulos dinámicos del suelo.
Sísmica de reflexión	Lineal. Fuente activa	Ondas sísmicas de cuerpo P (V_P).	Registra la vibración de terreno inducida por una fuente a través de geófonos. Identifica la llegada de energía reflejada en alguna discontinuidad.	Obtiene mapas detallados de las estructuras geológicas del suelo. Buena precisión de resultados.	Útil para la investigación de la estratigrafía, donde los estratos de interés son superficiales.
Sísmica de refracción	Lineal. Fuente activa.	Ondas sísmicas de cuerpo P (V_P).	Registra cambios de velocidades, a mayor profundidad mayor velocidad debido a la compactación de suelo y a su composición.	Explora grandes áreas de forma rápida y económica. Es el más empleado.	Empleando las velocidades de ondas P de los perfiles sísmicos del suelo: Permite hallar los módulos dinámicos del suelo. Inferir el estado de compacidad. Permiten obtener parámetros de diseño de cimentaciones de gran utilidad. Identificar anomalías, determinar las condiciones y competencia de la roca. Detectar de la profundidad del basamento rocoso, entre otros.
MASW	Lineal. Fuente activa.	Ondas de superficie, Rayleigh.	Registra los cambios de velocidades y calcula la variación de la velocidad V_S por debajo de la zona de estudio a partir de un modelo de velocidad de propagación de las ondas.	Técnica eficiente, de buena precisión, poco tiempo de consumo por ensayo y bajo costo de operación. Detecta estratos blandos bajo otros más rígidos.	Empleando las velocidades de ondas S de los perfiles sísmicos del suelo: Permite hallar los módulos dinámicos del suelo. Inferir el estado de compacidad y/o consistencia, presentar resultados de las capas representativas del suelo identificadas. Permite obtener parámetros de diseño de cimentaciones de gran utilidad. Caracterizar al suelo ante sismos. Detectar de la profundidad del basamento rocoso, entre otros.
Microtremores	Medición puntual	Ondas de superficie Rayleigh y Love.	Miden vibraciones ambientales.	Permite conocer las características de amplificación del suelo.	Empleando el período de vibración del suelo: Se puede realizar el análisis de respuesta de sitio.

Tabla 11: Resumen métodos geofísicos.

Método geofísico	Arreglo/Fuente	Parámetros medidos	Descripción	Ventajas	Aplicaciones
					Es un criterio para la clasificación de los suelos y la microzonificación. Se determina la profundidad del basamento rocoso.
ReMi	Lineal. Fuente pasiva	Ondas de superficie Rayleigh y Love.	Determina la distribución de V_S con la profundidad a partir del análisis espectral de microtemores.	Penetran a mayores profundidades dado que contienen más energía de baja frecuencia.	Empleando las velocidades de ondas S de los perfiles sísmicos del suelo: Permite hallar los módulos dinámicos del suelo.
Tomografía sísmica	Lineal, medición a través de geófonos.	Velocidades de ondas de cuerpo P y S.	Se basa en la diferencia de entre tiempos de recorrido de ondas P teóricos y observados.	Buen grado de detalle de los modelos y no presenta limitaciones ante capas de baja velocidad y elevados buzamientos.	Empleando las velocidades de ondas P de los perfiles sísmicos del suelo: Permite hallar los módulos dinámicos del suelo. Inferir la compacidad, tipo de suelo, entre otros.
Tomografía de resistividad eléctrica	Medición con electrodos, generadores de corriente y potenciómetros.	Se mide la resistividad a través de una corriente eléctrica de intensidad entre dos puntos.	Determina la distribución de un parámetro físico del subsuelo a partir de un número de medidas desde la superficie o sondeos.	Determina capas acuíferas, masas de grande tamaño, entre otros.	Se obtienen las propiedades eléctricas de los materiales del suelo. Halla la distribución de la resistencia del suelo a lo largo de un perfil. Identifica las zonas de filtraciones de agua.
Georradar o GPR	Georradar	Ondas electromagnéticas.	Se basa en la emisión y propagación de ondas electromagnéticas, con la posterior recepción de las reflexiones que se producen en las discontinuidades.	Rapidez de la toma de datos e interpretación de resultados. Amplia versatilidad del equipo para diferentes trabajos.	A partir de los resultados del radiograma: Se puede determinar la estratigrafía del suelo. Permiten localizar anomalías, como identificar características kársticas, y la ubicación de líneas y tuberías subterráneas.
MAM	Bidimensional. Método pasivo. Arreglos típicos: en 'L', triangulares o circulares.	Ondas de superficie.	Miden los cambios de las propiedades dinámicas mediante vibraciones ambientales. Determina el perfil de velocidades de corte.	Buena confiabilidad y resulta económico.	Empleando las velocidades de ondas S de los perfiles sísmicos del suelo: Permite hallar los módulos dinámicos del suelo. Determinar los materiales que conforman un perfil estratigráfico.
SASW	Geófonos. Fuente activa	Ondas de superficie, específicamente ondas Rayleigh.	Determina el perfil de velocidades de corte.	Entrega resultados más representativos del lugar, pues abarca un mayor volumen que otros ensayos. Buena resolución a poca profundidad.	Empleando las velocidades de ondas S de los perfiles sísmicos del suelo: Permite hallar los módulos dinámicos del suelo. Presentar resultados de las capas representativas del suelo identificadas.

Fuente: Elaboración propia.

2.5 Investigaciones realizadas en diversos países

Los antecedentes se realizan en distintos contextos profesionales, tomando como referencia el uso de técnicas geofísicas para la determinación de las propiedades del suelo. A continuación, se presentan algunas investigaciones realizadas en diversos países:

Soupios (2007) en el artículo “*Use of engineering geophysics to investigate a site for building foundation*”, realiza el estudio del caso de una edificación en construcción, en la cual se utilizó la tomografía de resistividad eléctrica, el procesamiento de los datos obtenidos fue interpretado con aplicación de inversiones 2D y 3D. Otro método empleado fue el electromagnético para diferentes períodos de tiempo. El área de estudio se encuentra en la zona urbana de Creta, en el área de Halepa, un suburbio al este de la ciudad de Hania, en el oeste de Creta. Las propiedades geotécnicas del suelo se investigaron con la extracción de muestras de cuatro perforaciones a profundidades de hasta 16 metros y se realizaron ensayos de penetración estándar, SPT.

En la realización del perfil geotécnico se encontró suelos arena-limosa (SM) hasta 2 m de profundidad, arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas limosas inorgánicas, arcillas inorgánicas gravosas y arenosas, gravas limosas, mezclas grava-arena-limo (GM) a profundidades de 2 a 4 m, limos inorgánicos (ML) a profundidades de 4 a 8 metros y finalmente limos inorgánicos y gravas y arenas muy finas, fragmentos de roca y limos inorgánicos (ML) a profundidades de 8 a 16 metros.

Con los resultados obtenidos se concluye que frecuentemente, en la zona de estudio, los edificios existentes se ubican sobre las zonas subterráneas anómalas que son inapropiadas para soportar la carga de una edificación o las cimentaciones de estos edificios no están construidos correctamente. Dados los daños antiguos y actuales, como es el asentamiento de los suelos y la aparición de grietas, es necesario efectuar estudios geofísicos no destructivos para guiar la

excavación de zanjas y la perforación exploratoria adicional. Con estas investigaciones geofísicas la caracterización de los suelos es más rápida y se pueden definir las zonas anómalas en etapas iniciales del estudio que van a servir para preparar las licitaciones o el refuerzo de las estructuras con fallas.

Omowumi (2014) en *“Application of electrical resistivity in building foundation investigation in Ibesse Southwestern Nigeria”* determinó los parámetros geofísicos del suelo con los cuales se estimaron las propiedades estructurales con fines de evaluación y construcción de la cimentación de los edificios. Se utilizó el método de resistividad eléctrica con inversión de 2D en cada evaluación del suelo. Los resultados de la interpretación mostraron de tres o cuatro capas, a saber: tierra vegetal, arcilla con guijarros, piedra caliza y arena o piedra caliza. La investigación reveló que la unidad litográfica de arena o piedra caliza era la más adecuada para cimentaciones superficiales de estructuras pequeñas y medianas.

García (1997) en la investigación de *“Aplicaciones de la técnica geofísica de prospección por georradar en glaciología e ingeniería civil”*, utilizó el georradar, que tiene la propiedad de tener una gran resolución para profundidades que van desde centímetros hasta decenas de metros. En esta tesis se presentó en una primera parte la teoría de ondas en medios estratificados y heterogéneos, así un caso de análisis para la aplicación en los ámbitos de la glaciología y de la ingeniería civil. La glaciología estudia la estructura, dinámica y evolución de las grandes masas de hielo de la superficie terrestre y se aplica en la variación del clima de la tierra. Las nuevas tecnologías de avance del georradar son aplicables en nuevas obras de ingeniería civil o en la modificación de las existentes. Por lo tanto, conviene, cada vez más, disponer de herramientas que permitan censar las patologías más frecuentes, realizar su detección y la evaluación de los costos de modificación o reparación.

El georradar permite su operación y capacidad dinámica, con una variedad de antenas que lo dotan de una elevada versatilidad y capacidad de resolución de anomalías y estructuras superficiales.

Naranjo (2012) efectuó la tesis “*Cálculo de la capacidad portante basado en geofísica y método convencional, caso puente sobre río Maicito*”. En este trabajo, se desarrolló una comparación de los resultados obtenidos a base de comparar resultados del SPT y el método de refracción sísmica. El objetivo principal de esta tesis consiste en realizar el análisis comparativo, teórico y práctico del cálculo de la capacidad portante del suelo en base a los métodos antes mencionados, con el fin de deducir la conveniencia o no del método geofísico. La investigación geofísica se realizó tendiéndose 3 líneas sísmicas (LS-1, LS-2 y LS-3) de 60 metros cada una. Así, tras la interpretación y cálculos efectuados con los ensayos realizados durante los sondeos geofísicos, se obtuvo los perfiles estratigráficos del suelo para ambos estribos del puente. Para los estudios geotécnicos se efectuaron 2 calicatas y para el SPT se ejecutaron 2 excavaciones, siendo la primera de una profundidad de 11.5 metros y la segunda de 6.5 metros. Así, mediante correlaciones se obtuvo la capacidad de carga de la cimentación del puente Maicito.

La refracción sísmica está siendo utilizada con mayor frecuencia en el campo de la ingeniería civil para el análisis de las características físico-mecánicas del suelo; aunque es más común realizar los SPT, y ensayos triaxiales en el laboratorio. En este estudio, la información recabada de las velocidades de las ondas compresionales V_P y de corte V_S fue analizada a diferentes profundidades, con lo cual se pudo obtener, además, la variación de los módulos de corte, módulo de Poisson y módulo de elasticidad de los diferentes estratos; parámetros de fundamental importancia para el estudio de la respuesta de los suelos bajo excitación sísmica, y que se pueden correlacionar con el tipo de terreno.

2.6 Investigaciones realizadas en el Perú

Así como a nivel internacional se realizó una serie de avances en el implemento de los métodos geofísicos para la investigación del suelo, algunos de estos métodos también son utilizados en el Perú, lo cual implica que son métodos vigentes y cada vez más usados en la ingeniería. Es por ello, que se presentan algunas investigaciones nacionales que aplican estos métodos.

Quispe (2012) en “Exploración geofísica mediante métodos de refracción sísmica y MASW 1D en proyectos de ingeniería civil” utilizó el método de refracción sísmica y el método de MASW 1D para obtener las velocidades de ondas de compresión y de corte (V_P y V_S) con las cuales se determinaron los parámetros dinámicos del suelo, así como periodos fundamentales de vibración del suelo (T_s). Los estudios abarcan los distritos de San Juan de Lurigancho, Comas, Puente Piedra, Ancón, Lima, Rímac, Miraflores, Villa El Salvador y la provincia constitucional del Callao. En todos los proyectos estudiados se determinaron: la ubicación, la extensión del proyecto, las características de los suelos encontrados en relación con la profundidad y el espesor de las capas analizadas del suelo; lo cual demuestra que es un estudio bastante amplio que sirve como consulta para otros estudios geofísicos en zonas urbanas.

Sulla (2020) en el estudio denominado “*Procedimiento para aplicación de la prospección sísmica para los estudios de zonificación geofísica de los suelos en áreas urbanas Lima – Perú, 2020*”, planteó como objetivo general el obtener los parámetros físicos del suelo, aplicando métodos de prospección sísmica (sísmica de refracción, MASW y MAM), para la zonificación geofísica – geotécnica de los suelos de las áreas urbanas de Lima Metropolitana. Con el estudio se determinó la rigidez y el espesor de los diferentes materiales de los suelos estudiados; además, clasificó los suelos según la sísmica de refracción, con la norma ASTM

D5777, y según la norma NTE E.030-14 *Diseño Sismorresistente*. También, determinó el nivel de los estratos consolidados y el espesor de estos.

Se efectuó una línea de sísmica de refracción con velocidades (V_P) hasta la profundidad de 25 metros, obteniéndose resultados del rango de las velocidades. En la capa sísmica 1, el rango de velocidades V_P fue entre 334 y 710 m/s, presentando un espesor que varía entre 1.0 y 2.5 metros y siendo suelos poco consolidados. El menor y mayor espesor de las capas del suelo se encuentran ubicados al inicio y al final, respectivamente. En la capa sísmica 2, el espesor varía entre 7.0 y 9.0 metros, siendo los de mayor espesor los encontrados al inicio de la línea, con rango de velocidad V_P entre 830 y 1,467 m/s, esta capa es medianamente consolidada. La capa sísmica 3, tiene una velocidad V_P entre 1,586 y 2,327 m/s, incrementando con la profundidad. Se consideró como suelo consolidado y se encuentra a partir de los 10.0 metros de profundidad.

El perfil (V_S) se realizó mediante una línea sísmica MASW y MAM. En cuanto al perfil obtenido con el método MASW, alcanza una profundidad máxima de 30 metros. Sin embargo, al combinar los métodos de MASW y MAM, fue posible llegar a una profundidad máxima de 58 metros. Así, las dos primeras capas son clasificadas como moderadamente rígidas a rígidas, hasta los 11 metros son poco o medianamente consolidadas y caracterizadas por gravas, además, de estar superficialmente cubiertas por material de cultivo.

Este estudio muestra la eficiencia de la caracterización física de los suelos con la combinación de los métodos de sísmica de refracción, MASW y MAM, y en la prospección sísmica aplicada en áreas urbanas.

3. Métodos geofísicos más empleados en suelos y cimentaciones en el Perú

A partir de la revisión de las investigaciones realizadas en el Perú acerca de los métodos geofísicos, se analizaron los métodos más empleados en suelos y cimentaciones en el Perú, basándonos en investigaciones nacionales sobre la aplicación de estos métodos y también se empleó la plataforma desarrollada por SENCICO que permite la visualización sistematizada de perfiles de suelo obtenidos a través de ensayos geofísicos y excavaciones.

López (2016) en la tesis denominada “Ensayos geofísicos para la exploración de suelos en estructuras patrimoniales” aplicó los métodos geofísicos con fines geotécnicos en la exploración de tres estructuras patrimoniales, empleando los equipos disponibles en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Los métodos geofísicos que se emplearon son el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW), refracción sísmica y la razón espectral (H/V). El primer caso de estudio fue el Complejo Arqueológico de Huaca de la Luna, localizado en la ciudad de Trujillo, donde se realizaron sobre todo ensayos de MASW y de refracción sísmica. También se efectuaron ensayos de SCPTu como una técnica de comparación de los resultados de velocidad de onda de corte (V_s). Los otros dos casos de estudio fueron la Iglesia San Juan Bautista de Huaró y la Iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas, ubicadas en la Ciudad de Cusco. Se realizaron ensayos de MASW y H/V, para obtener el perfil del suelo en función de los resultados de V_s y la información geológica de la zona. Así, se indica que los resultados fueron eficaces para realizar el perfil estratigráfico. El objetivo general es el uso de ensayos geofísicos para la exploración geofísica en estructuras patrimoniales. Los resultados mostrados en los tres casos estudiados muestran el tipo de suelos encontrados en las diferentes capas, y la obtención de la V_s .

Cuno, (2021) en la tesis denominada “Caracterización del subsuelo para la cimentación de estructuras usando métodos de prospección geofísica en los terrenos de la Corte Superior de Justicia de Arequipa – Perú”, efectuó la caracterización de los suelos, delimitándose tres tipos

de estratos mediante la tomografía eléctrica y sísmica de refracción. Los resultados encontrados arrojan una variación aproximada de resistividades del rango de 1.2 Ω .m a 5,200 Ω .m y de velocidades de onda P de 250 m/s a 1,600 m/s. Para la determinación de los tipos de suelos encontrados, el autor utilizó los criterios de interpretación del cuadro de valores de velocidad de propagación de las ondas P según la norma ASTM-D5777. El estrato 1 definido está conformado por un material de origen aluvial (arenas y gravas) hasta una profundidad de 8 metros. El estrato 2 presenta una matriz areno arcillosa y un grado de consolidación en la mayor parte del estrato. Su base presenta ondulaciones marcadas que determinaron una fluctuación de espesor de 5 a 23 metros aproximadamente. En líneas generales, este estrato estaría conformado por tufos volcánicos de matriz areno arcillosa, en los cuales se propiciaría un posible flujo de agua a lo largo de la matriz. Este estrato no presenta un espesor definido dentro de los primeros 30 metros de profundidad, que es el objetivo del análisis.

Además, estimó la existencia de la profundidad de la roca a partir de los 36.5 metros. Según el autor, el uso de métodos de prospección geofísica facilita el caracterizar el suelo en los terrenos de la futura construcción de la Corte Superior de Justicia de Arequipa, especialmente para la definición de criterios que se consideraron en el análisis de la cimentación de estructuras.

En el caso de Heras (2022) en la tesis denominada “Aplicación de metodologías geofísicas para la caracterización geológico-geotécnica con fines de cimentación de la urbanización Las Lomaditas de Cayma – Arequipa” se realiza un estudio de la caracterización geológico-geotécnica con fines de cimentación del suelo que conforma la Urbanización Las Lomaditas de Cayma ubicada en la parte alta de Cayma, Arequipa. El estudio con fines de estimar la capacidad de carga del terreno, los parámetros elásticos necesarios para el diseño de estructuras y/o cimentaciones, el módulo de corte, el módulo de elasticidad, el módulo de Poisson y el módulo volumétrico, se desarrolla mediante la aplicación de los métodos

indirectos de refracción sísmica (4 líneas) y MASW (2 ensayos). Además, se aplicó el método de tomografía eléctrica (1 tendido de 300 metros) para determinar la existencia de humedad o nivel freático en la zona mencionada. Como método directo, se realizaron 2 calicatas de hasta 3 metros cada una. Los resultados de los estudios geofísicos realizados brindan velocidades de ondas sísmicas compresionales V_P en un rango de 432 m/s a 1187 m/s, así se reconocieron 3 estratos de profundidades variables entre 1 a 13 metros; la conformación del terreno para la primera línea de análisis revela que el primer estrato está dada por suelo intemperizado con contenido de arenas, arcillas y limos; el segundo estrato está conformado por grava o arena seca de compactación media y finalmente el tercer estrato presenta el mismo perfil que el anterior estrato pero más denso. De esta forma se realiza el análisis para las otras 3 líneas de refracción.

Se obtuvieron velocidades de ondas sísmicas de corte V_S en un rango de 303.2 m/s a 437.6 m/s, para la primera línea de análisis y de acuerdo con la NTE E.030-14 *Diseño Sismorresistente* se clasifica el suelo como S2 de característica medianamente rígida con depósitos de arena densa o grava arenosa. La interpretación del ensayo de tomografía eléctrica muestra suelos conformados por depósitos de caídas de piroclásticas como gravas, arenas y cenizas retrabajadas.

Finalmente, se presenta un resultado de capacidad de carga admisible que varía desde la superficie hasta los 30 primeros metros y está contenido en un rango de 0.731 kg/cm² a 2.426 kg/cm². Se determinó el valor capacidad admisible de 1.488 kg/cm² como base para el diseño de la cimentación superficial. Así, se comprueba que el valor de capacidad portante cumpla con la capacidad admisible mínima a considerar y se propuso como cimentación, zapata de ancho de 1.5 metros, largo 2 metros y profundidad de desplante de 1.2 metros, esto para una edificación convencional de 2 a 3 niveles.

SENCICO, (2019) - *Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción*, mediante su gerencia de investigación y normalización, desarrolló una plataforma virtual para la visualización sistematizada de perfiles de suelo obtenidos mediante los ensayos geofísicos de los microtremores, MASW, MAM; y excavaciones. Se puede apreciar que dentro de los objetivos del servicio de plataforma virtual se planteó: a) elaborar una propuesta de plataforma virtual que facilite la visualización de proyectos de diversos estudios efectuados a nivel nacional. b) brindar información sobre la capacidad, las características y las condiciones de los suelos, en los lugares estudiados en el territorio nacional. c) los usuarios pueden disponer de esta herramienta virtual, para poder plantear una cimentación adecuada en los lugares específicos y que servirán de base de datos para otros estudios.

La plataforma indicada facilita la visualización sistematizada de los perfiles sísmicos de los suelos, los que fueron realizados por entidades públicas y privadas para los fines perseguidos por SENCICO y que utilizaron la información de las fuentes que se citan a continuación: SENCICO / GEOINSTRUMENTS- 2017, SENCICO / TERRASOLUTIONS-2018, MVCS / CISMID-2010, MVCS/ CISMID-2013 al 2015, MVCS / CISMID- 2016 al 2018, MTC / ZAB-2016, Universidad Nacional de Ingeniería - 2017 al 2019, JSH / TESIS UNI - 2016, DHQ/ TESIS UPT- 2016, APZ / TESIS UNI -2018, GRS / TESIS – 2019, JAHI - 2015 al 2018 SENCICO / C. ORTIZ -2019.

El número de perfiles de suelo, la profundidad alcanzada y los tipos de suelos que fueron recopiladas y validadas fueron: 527 perfiles de suelo, que llegaron hasta los 30 primeros metros de profundidad y que corresponden a suelos tipo S1 y S2. Se alcanzaron 32 perfiles de suelo con profundidad mayor a 50 metros. Así también, en la recopilación y validación se obtuvieron como resultado 36 perfiles geotécnicos, hallados a partir de perforaciones, 21 perforaciones diamantinas y 15 perfiles geotécnicos obtenidos de exploraciones tipo *wash-boring*. Se tiene

además la información de 1,676 mediciones puntuales del ensayo de microtremores efectuado en 50 lugares de estudio. La recopilación de información abarca catorce (14) departamentos del Perú, tal como se muestra en la Tabla 12, siendo que el que presenta más información es el departamento de Lima (Tabla 13).

Tabla 12: Resumen de ensayos geofísicos y perforaciones en el Perú.

ZONA	DEPARTAMENTO	MICROTREMOR	MASW	MAM	PERFORACIÓN
1	LIMA	1177	316	20	20
2	AREQUIPA	49	6	2	6
3	CUSCO	47	26	-	-
4	ICA	32	2	2	3
5	SAN MARTIN	19	3	2	-
6	LA LIBERTAD	121	77	2	3
7	TACNA	48	27	2	1
8	CAJAMARCA	66	17	1	-
9	AMAZONAS	16	2	1	-
10	LORETO	25	2	-	-
11	LAMBAYEQUE	62	30	-	-
12	HUANCAVELICA	14	-	-	-
13	PIURA	-	-	-	2
14	CALLAO	-	19	-	1
TOTAL		1676	527	32	36

Fuente: SENCICO, 2019.

Tabla 13: Recopilación de ensayos geofísicos y perforaciones en el departamento de Lima.

Nº	DEPARTAMENTO	DISTRITO	MICROTREMOR	MASW	MAM	PERFORACIÓN
1	LIMA	ANCÓN	59	17	3	-
2		ATE VITARTE	56	36	2	-
3		BARRANCO	35	9	-	-
4		CERCADO	23	2	-	1
5		CHORRILLOS	55	19	-	2
6		EL AGUSTINO	39	5	-	-
7		INDEPENDENCIA	20	4	-	-
8		LA MOLINA	24	13	3	1
9		LINCE	32	7	1	-
10		LOS OLIVOS	42	18	3	-
11		LURÍN	41	9	-	-
12		MAGDALENA	11	4	-	-
13		PUENTE PIEDRA	77	2	2	1
14		RIMAC	73	23	1	-
15		SAN BORJA	5	6	2	1

Nº	DEPARTAMENTO	DISTRITO	MICROTREMOR	MASW	MAM	PERFORACIÓN
16		LURIGANCHO	7	2	3	-
17		SAN JUAN DE MIRAFLORES	61	16	-	1
18		VILLA EL SALVADOR	76	11	-	0
19		BELLAVISTA	8	8	-	1
20		CHACLACAYO	4	-	-	-
21		COMAS	44	1	-	-
22		PUEBLO LIBRE	6	-	-	-
23		SAN LUIS	5	-	-	-
24		SAN MARTIN DE PORRES	10	-	-	-
25		SANTA ANITA	34	6	-	-
26		SANTIAGO DE SURCO	59	11	-	-
27		SURQUILLO	27	10	-	-
28		CALLAO	6	3	-	-
29		CARABAYLLO	81	6	-	-
30		VILLA MARIA	7	-	-	-
31		PACHACAMAC	4	-	-	-
32		CIENEGUILLA	5	-	-	-
33		SAN ISIDRO	8	5	-	-
34		SAN BARTOLO	55	19	-	-
35		LA PERLA	35	8	-	-
36		SANTA ROSA	6	12	-	-
37		VENTANILLA	-	5	-	2
38		MIRAFLORES	-	7	-	-
39		LA VICTORIA	-	8	-	-
40		CHILCA	-	2	-	2
41		SAN ANTONIO	-	6	-	-
42		SAN MIGUEL	-	15	-	-
43		PUCUSANA	-	-	-	2

Fuente: SENCICO, 2019.

4. Reglamentos Internacionales

En este capítulo se realizaron las revisiones bibliográficas de las diferentes normativas internacionales que mencionan a los métodos geofísicos como ensayos indirectos para la exploración e investigación geotécnica del suelo en el análisis de cimentaciones.

4.1 Reglamento Español

La caracterización del suelo mediante los métodos geofísicos debe tener sus resultados contrastados con los resultados de sondeos mecánicos. En general, se pueden aplicar estas técnicas para la caracterización geológica y geotécnica, y tienen como objetivo precisar los cambios laterales de las rocas, realizar el estudio de grandes superficies, complementar los datos y mejorar su correlación. Sin embargo, su aplicación no es recomendada para cascos urbanos consolidados.

El *Documento Básico SE-C Cimientos* (Ministerio de Fomento, 2003) menciona que, para suelos con porcentaje importante de bolos, cantos y grava gruesa, se puede realizar la contrastación de resultados de resistencia del ensayo SPT con los resultados de los métodos geofísicos, como la velocidad de transmisión de las ondas S (V_s), obtenidos de los ensayos *cross-hole* o *down-hole*. Se puede realizar dicha comparación mientras que la importancia del edificio la justifique.

Otra aplicación de los métodos geofísicos mencionada por el SE-C es para la determinación de parámetros de deformabilidad, se recomienda hallar dichos parámetros mediante los ensayos *cross-hole* o *down-hole* para el análisis de suelos granulares limpios sin cohesión cuyas partículas mayores que 20 mm representen más del 30% en peso o para arcillas preconsolidadas. No se pueden hallar los parámetros de deformabilidad a través de ensayos como SPT, penetración dinámica o estática por los excesivos resultados proporcionados que se deben al tamaño de las partículas más grandes del suelo. De la misma forma, en el caso de

suelos cuyas partículas mayores que 20 mm representen más del 30% en peso, se puede determinar el estado último de hundimiento mediante ensayos de penetración como el SPT, pero es conveniente revisar la confiabilidad de los resultados mediante los resultados hallados en los ensayos *cross-hole* o *down-hole*.

Se utilizará la siguiente expresión para hallar el módulo de deformación, la cual relaciona el módulo de rigidez tangencial máximo G_{max} con el módulo de deformación y se usa alternativamente a la opción de hallar el módulo de deformación mediante ensayos de carga.

$$E = \frac{G_{max}}{2} \quad (8)$$

Además, este documento menciona que las técnicas mencionadas a continuación podrán ser utilizadas caso se requiera información complementaria de grandes superficies a construir que contribuya a distribuir los puntos de reconocimiento y el análisis de la profundidad deseada.

La sísmica de refracción brinda información sobre la unidad geológica existente, la profundidad a la que está la napa freática y la información sobre la ripabilidad (característica geotécnica vinculada con la resistencia a la rotura) con las V_P de cada capa, mientras que se cumpla la condición de que las velocidades de ondas de compresión (V_P) aumenten a medida que aumenta la profundidad y cuando se trate de formaciones que cuenten con un buzamiento inferior a 15 grados (relativamente horizontales).

El método de resistividad eléctrica resulta útil para hallar los espesores de las capas horizontales del terreno y la profundidad de la napa freática. Y el método de tomografía eléctrica que de la misma forma obtiene información sobre la profundidad de la napa freática, desarrollos kársticos, las cavidades y precisa los diferentes niveles del suelo y sus cambios laterales.

Dentro de las otras técnicas, se encuentra el georradar, que permite extraer información sobre los servicios enterrados, los depósitos, los fluidos, las unidades geológicas, el nivel freático o napa freática y los cambios de litologías. De la misma forma, los métodos gravimétricos se pueden utilizar en caso se encuentren en zonas kársticas o se sospeche de cavidades relativamente superficiales.

Por otro lado, el *Documento Básico SE-C Cimientos* que clasifica a las edificaciones como C-1 (construcciones de menos de 4 plantas diferentes a las C-0), C-2 (construcciones entre 4 y 10 plantas) y C-3 (construcciones entre 11 a 20 plantas), afirma que para los tipos de edificación C-1 y C-2, ubicadas en lugares sísmicos, se recomienda el uso de las técnicas *down-hole* o *cross-hole* con la finalidad de definir la velocidad de las ondas S, V_s , lo cual facilita la clasificación de las unidades geotécnicas de acuerdo con la *Norma NCSE* vigente. Para las edificaciones C-2 y C-3 será obligatorio efectuar estos ensayos cuando la aceleración sísmica sea mayor a 0.08 g. (p. 119).

4.2 Reglamento de Reino Unido

El análisis de la normativa británica se da mediante el *Code of practice for ground investigations (BSI 5930:2015)*. Este código menciona que, si se planea realizar investigaciones intrusivas para hallar roca, es importante tener en cuenta que los métodos geofísicos pueden evaluar la profundidad de la base rocosa en circunstancias donde las condiciones del suelo son complicadas para *boreholes* (sondeos) o en los que las condiciones varían en una escala menor que la distancia entre *boreholes*. Las funciones de los métodos geofísicos varían desde ubicar la geología del suelo y las aguas subterráneas, encontrar anomalías geológicas tales como fallas o vacíos a medir las propiedades físicas o ingenieriles del suelo.

La adquisición de datos geofísicos debe ser considerada para cualquier investigación del suelo, pues los métodos geofísicos tienen como beneficio que permiten reconocer el terreno en

etapas de investigación primaria. Este estudio puede identificar anomalías, por ello se obtienen los datos y se realiza una investigación intrusiva. En lugares donde se sospeche de contaminación, debe realizarse una evaluación previa de riesgos antes de perforar y tomar muestras.

Escoger el método o combinación de métodos geofísicos adecuados para cada tipo de proyecto es importante para maximizar el éxito de la prospección y obtener la información geológica deseada de manera rentable.

Dicha norma presenta la siguiente tabla con las aplicaciones de los distintos métodos geofísicos:

Tabla 14: Métodos geofísicos aplicados según el problema geotécnico.

Problema		Ejemplos	Métodos
Investigación geológica	Litológica	Suelo sobre roca: i) Arenas y gravas sobre roca, nivel freático bajo en arenas y gravas. ii) Arenas y gravas sobre arcilla, nivel freático alto en arenas y gravas. iii) Arcilla sobre roca	Suelo: ○ Refracción sísmica ○ Resistividad ○ Resistividad o refracción sísmica, Perfil de reflexión sísmica de ondas de corte.
		Sedimentos sobre roca	Marinos Perfil de reflexión sísmica continua Perfil de resistividad continuo
	Erosiva (cavernas)	Residuos erosionables	Refracción sísmica Resistividad para características más anchas que la profundidad de cobertura.
		Superficie kárstica enterrada	Resistividad Métodos sísmicos cross-hole
	Estructural	Diques, fallas enterradas	Resistividad Reflexión o refracción sísmica Métodos magnetométricos o gravimétricos.

Problema		Ejemplos	Métodos
Evaluación de recursos	Agua	Ubicación de acuífero Ubicación de la interfaz salina/potable	Resistividad y refracción sísmica
	Arena y grava	Arena, grava sobre arcilla Depósitos de grava	Suelo: Resistividad Marino: Perfil sísmico continuo
	Roca	Intrusivo en rocas sedimentarias	Magnetométrico
	Arcilla	Bolsas de arcilla	Resistividad (la meteorización puede dar baja resistividad).
Propiedades ingenieriles	Módulo de elasticidad, densidad y porosidad. Profundidad de pilotes.	Módulo dinámico de deformación Verificación de los efectos en el tratamiento de suelos	Velocidad sísmica en la superficie, o con uno o más boreholes. Transmisión cross-hole.
	Rasgadura de roca	Elección de método de excavación	Sísmico
	Corrosividad de los suelos		Resistividad. Potencial Redox

Fuente: *British Standards Institution BSI 5930:2015.*

Asimismo, para conocer mejor el grado de aplicación de los diferentes métodos geofísicos en cada función se presentan las siguientes tablas. La Tabla 15 muestra un número que representa el criterio de calificación dada la funcionalidad del método.

Tabla 15: Utilidad de los métodos geofísicos.

Método geofísico	Aplicaciones geotécnicas																			
	Profundidad al lecho rocoso	Estratigrafía	Litología	Zonas fracturadas	Desplazamientos de fallas	Módulo elástico dinámico	Densidad	Rasgabilidad	Detección de cavidad	Artefactos enterrados	Exploración de aguas subterráneas	Calidad del agua	Porosidad	Permeabilidad	Temperatura	Caudal	Residuos erosionables	Arcilla en cavidad de calizas	Arenas y gravas	Diques ígneos
Sísmicos:																				
Refracción	4	4	3	3	4	3	1	4	1	1	2	0	0	0	0	0	4	1	4	1
Reflexión: suelo	2	2	2	2	4	2	0	1	2	1	2	0	0	0	0	0	4	3	2	1
Reflexión: marina	4	4	2	2	4	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	4	2	2	0
Cross-hole	2	2	3	3	1	4	1	2	3	2	0	0	0	0	0	0	2	2	1	2
Eléctricos:																				
Tomografía de resistividad	4	3	3	2	3	0	0	0	2	2	4	4	2	1	0	0	3	4	3	2
Polarización inducida (IP)	2	2	3	1	0	0	0	0	0	0	3	1	3	2	0	0	2	1	1	1
EM y perfilado de resistividad	3	2	2	4	1	0	0	1	3	4	4	4	1	0	0	0	3	4	3	3
Otros:																				
Georradar	2	3	1	2	3	0	0	0	3	4	2	3	1	2	3	0	2	2	3	3
Gravimetría	1	0	0	0	2	0	2	0	4	1	1	0	0	0	2	0	2	0	2	2
Magnetometría	0	0	0	0	2	0	0	0	2	4	0	0	0	0	2	0	0	1	2	4

Fuente: *British Standards Institution BSI 5930:2015.*

0: implica que dicho método geofísico no se considera aplicable para la función.

1: implica un uso limitado.

2: puede ser utilizado, pero tiene limitaciones y no usa el mejor enfoque.

3: significa que tiene un gran potencial, pero no está totalmente desarrollado para dicha función.

4: representa la mejor opción, en la cual las técnicas son desarrolladas adecuadamente

4.3 Reglamento Colombiano

La revisión de los códigos y normativa colombiana se centró en la búsqueda del uso de los métodos geofísicos, de la misma forma que se priorizaron las normativas de suelos y cimentaciones también se revisaron las normativas de diseño sismorresistente.

De acuerdo con el capítulo “Estudios Geotécnicos” del *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10* (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2017), la representación litológica del terreno se representa en términos de la velocidad de onda de corte (V_s) en conjunto con la profundidad y su variación horizontal hasta alcanzar suelos duros ($V_s > 500$ m/s) o hasta llegar al nivel de roca (en el cual ocurre rechazo en el ensayo SPT). Estos análisis se realizan mediante los métodos geofísicos. Además, para complementar los resultados hallados, se pueden utilizar correlaciones debidamente representadas por otros parámetros geotécnicos para así poder evaluar el rango de las propiedades relevantes para la caracterización del suelo.

Para determinar los distintos materiales que constituyen el perfil se debe hallar la variación del amortiguamiento (β_s) y de la rigidez (G) con el nivel de esfuerzos y de deformaciones. La variación de la rigidez se puede determinar mediante ensayos de laboratorio con muestras de alta calidad. De esta forma, se puede relacionar los valores de rigidez en el terreno con el rango de interés de deformaciones y esfuerzos mediante la determinación en el laboratorio (sobre las mismas muestras) de la velocidad de onda de corte (V_s) a bajas deformaciones. Esta variación de rigidez y amortiguamiento también se debe realizar mediante correlaciones y modelos sustentados en la literatura técnica internacional y se debe comparar con los resultados obtenidos en el laboratorio.

Por otro lado, se realizó el análisis del *Manual de Diseño de Cimentaciones Superficiales y Profundas en Carreteras* (Instituto Nacional de Vías, 2012) que menciona que la exploración geofísica presenta un conveniente campo de aplicación en caso sea necesario investigar alineaciones de gran longitud y áreas extensas de forma económica y rápida. Pero siempre teniendo en cuenta que “los métodos geofísicos sólo son complementarios, y en ningún caso serán válidos como exploración del suelo”. Los métodos geofísicos permiten realizar una adecuada zonificación del suelo y la identificación depósitos arcillosos, áreas cavernosas, lentes de arenas y gravas, rocas de pobre calidad, profundidad hasta la roca base, módulo de Young dinámico, módulo de rigidez, módulo de Poisson, vías de flujos subterráneos disolventes o erosivos, coeficiente sísmico, entre otros; a través de una buena combinación de los métodos geofísicos de geo-resistividad eléctrica, imágenes de georradar y refracción sísmica.

Por ello, el manual presenta la Tabla 16 para indicar las aplicaciones y limitaciones de algunos de los métodos geofísicos más utilizados en Colombia, de acuerdo con la clasificación de estos (geosísmico, geoelectrónico, gravimétrico y magnetométrico):

Tabla 16: Adaptación tabla de métodos de exploración geofísica (FHWA, 2006).

Método	Procedimiento	Aplicaciones	Limitaciones
Sísmico	Es consistente en la evaluación del registro de eco reflejado por el terreno a ondas reflejadas en la superficie.	Geología: Determina forma lechos rocosos, espesores de recubrimiento, etc. Geotecnia: Determinación del módulo de deformación (E) y del espesor de la zona alterada. Una aplicación es el método de sísmica de refracción el cual puede cubrir de 40-50 metros de	Sísmica de reflexión: Tiene una limitada conveniencia en la geotecnia. A pesar de tener una gran capacidad de penetración, la parte superficial no se detecta.

Método	Procedimiento	Aplicaciones	Limitaciones
		profundidad dependiendo de la señal.	
Eléctrico	Luego de aplicar una diferencia de potencia entre dos puntos de la superficie, se miden las características generadas de la corriente generada dentro del terreno.	Con los dispositivos usuales se puede alcanzar de 20-30 metros de profundidad. La interpretación de los datos hallados permite realizar mapas de la resistividad del suelo en profundidad.	
<i>Crosshole /Downhole</i>	Métodos con perforación: Se ubica la fuente de energía y geófonos en las perforaciones y/o la superficie. Los tiempos de recorrido del intervalo serán la velocidad de onda sísmica que está en función de la profundidad.	Miden las velocidades de onda para para analizar la respuesta sísmica del lugar. Permite obtener perfiles de las velocidades en profundidades de 30-60 metros. Correlaciona las unidades litológicas con una superficie sísmica.	Requiere de uno o más sondeos y de equipo de soporte en campo significativo.
Georradar o <i>Ground penetration radar (GPR)</i>	Utiliza fuentes de corriente alterna para obtener información mediante la reflexión de ondas electromagnéticas de alta frecuencia 100 KHz a 800 KHz.	Presenta un alto grado de resolución, lo cual permite identificar pequeños cuerpos que serían difícilmente identificados con otros métodos.	Tiene un limitado alcance de penetración por las altas frecuencias.

Fuente: Elaboración propia.

La aplicación en geotecnia y específicamente en cimentaciones de los métodos sísmicos o geosísmicos, radica en la determinación del espesor de los suelos que cubren una formación rocosa. Además, determina a detalle el comportamiento dinámico del terreno, lo que es conveniente para realizar cálculos dinámicos y sísmicos.

Mientras que la aplicación de los métodos eléctricos radica en que miden las propiedades eléctricas de los suelos y del agua (poros) como, por ejemplo, la resistividad, la actividad

electroquímica, la conductividad y la constante dieléctrica. Por otro lado, los métodos *down-hole* y *cross-hole* se aplican para hallar la profundidad hasta el nivel freático e identificar los estratos más delgados en profundidad. Así, finalmente, el último método mencionado por la tabla (georradar) determina la presencia de zonas saturadas, detecta las zonas más superficiales, desde la armadura del concreto hasta la superficie kárstica, pasando por todo tipo de gravas, capas de suelo.

Un aspecto importante a mencionar es que se puede caracterizar la resistencia a la licuación a partir de la evaluación de ondas de corte encontradas en los ensayos geofísicos, como por ejemplo los métodos *down-hole* y *cross-hole*. Aunque el método no es muy acertado en la determinación del potencial de licuación (independiente del tipo de suelo: gravas, arenas limpias o con finos), se pudieron encontrar resultados coherentes al realizar el análisis de velocidad de ondas de corte (V_s) con materiales que son muy susceptibles o muy pocos susceptibles a la licuación. “Así como con los ensayos de SPT y CPT, la velocidad de la onda de corte es corregida por sobrecarga, con el uso de la siguiente ecuación”.

$$V_{s_1} = V_{s_1} C_v = V_s \left(\frac{100}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.25} \quad (9)$$

Dónde:

V_{s_1} : Velocidad de la onda de corte corregida por sobrecarga, en metros por segundo (m/s).

C_v : Factor de corrección por sobrecarga, adimensional.

σ'_{vo} : Esfuerzo vertical efectivo, antes del sismo, en kilopascales (kPa).

V_s : Velocidad de la onda de corte medida en campo, en metros por segundo (m/s).

En el caso de mejoramiento del suelo, “Los ensayos geofísicos y particularmente los ensayos de sismica de refracción realizados en sondeos (*cross-hole* o sus variantes) pueden resultar útiles en la investigación de la mejora del terreno”.

A continuación, se muestra la Tabla 17, que expone los criterios para la evaluación del material de relleno, describiéndolo desde muy denso a muy suelto mediante distintos métodos tanto directos e indirectos de investigación:

Tabla 17: Adaptación tabla de criterios para la evaluación del material de relleno (SCDOT, 2010).

DESCRIPCIÓN	MUY SUELTO	SUELTO	MEDIANAMENTE DENSO	DENSO	MUY DENSO
SPT número de golpes por pie N	<4	5-10	11-30	31-50	>51
CPT Resistencia en la punta (kg/cm ²)	<50	50-100	100-150	150-200	>200.
Dr (%)	<15	16-35	36-65	66-85	86-100
Peso unitario seco (kg/cm ³)	<1.43	1.43-1.63	1.63-1.84	1.84-2.03	>2.03
Relación de esfuerzos cíclicos que causan licuación CSR	<0.04	0.04-0.12	0.11-0.33	0.33-0.4	-
Velocidad de onda de corte, V _s (m/s)	<120	121-160	160-225	200-225	>225

Fuente: SCDOT, 2010.

Así, por medio de la tabla podemos relacionar los valores hallados por distintos métodos de investigación geotécnica en la caracterización de los suelos, y en este caso del material de relleno.

4.4 Reglamento Mexicano

La norma utilizada es la de *Criterios y Lineamientos técnicos para factibilidades – Geotecnia* (SIAPAS, 2014), que es un documento que se apoya en las Normas nacionales y en las Normas de asociaciones técnicas Internacionales y hace referencia a la tabla 7.1 (Estudios de Geotecnia) para brindar recomendaciones sobre el método adecuado a utilizar de acuerdo con el tipo de obra a realizar. Así que, siguiendo ese lineamiento, en el caso de los estudios geofísicos se puede recomendar realizar obras de conducción y estudios de mantos freáticos y geohidrológicos.

Si seguimos específicamente lo mencionado en la *Norma Mexicana – Seguridad Estructural de la Infraestructura Física Educativa* (NMX-R-079-SCFI-2015), se puede determinar el comportamiento dinámico del suelo, el cual es idealizado como un manto homogéneo para construcciones en la infraestructura física educativa mediante la relación de parámetros como el periodo de dominante, la velocidad de propagación de ondas de corte y el espesor. La relación de estos parámetros se muestra en la siguiente ecuación:

$$T_S = \frac{4H_S}{V_S} \quad (10)$$

Dónde:

T_S : Periodo dominante del estrato equivalente del terreno (periodo del sitio);

H_S : Espesor total del estrato equivalente del terreno;

V_S : Velocidad efectiva de propagación de ondas de corte en el estrato.

A partir de la localización del punto formado por H_S y V_S en la siguiente carta de microzonificación, se puede clasificar el tipo de suelo.

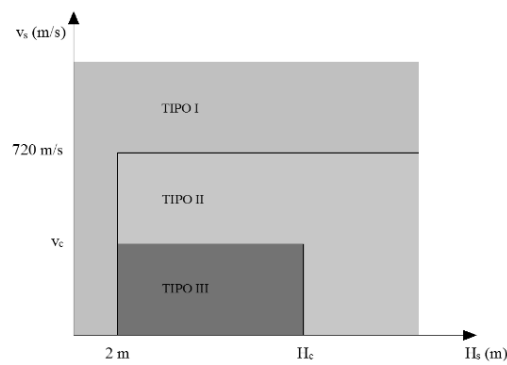


Figura 18: Carta de microzonificación sísmica.

Fuente: NMX-R-079-SCFI. (2015).

Tabla 18: Valores de H_C y V_C por zona sísmica.

Zona	$H_C(m)$	$V_C(\frac{m}{s})$
A	∞	120
B	40	200
C	30	280
D	20	360

Fuente: NMX-R-079-SCFI. (2015).

En la Tabla 18, se pueden conocer los valores de H_C y V_C para las diferentes zonas en la que se encuentra el terreno. De esta forma, se puede definir al suelo como Tipo I, Tipo II y Tipo III, conociendo los valores de todos los parámetros ya mencionados.

Tabla 19: Adaptación Tipos de terrenos.

Tipo de Suelo	Características
Tipo I	Terreno firme o rocoso en el que no se presentan amplificaciones dinámicas: Depósito de suelo con $V_S \geq 720 \text{ m/s}$ o $H_S \leq 2 \text{ m}$.
Tipo II	Terreno formado por suelos en que se presentan amplificaciones dinámicas intermedias: Depósito de suelo con $V_C \leq V_S < 720 \text{ m/s}$ y $H_S > 2 \text{ m}$, o $H_S > H_C$ y $V_S < 720 \frac{m}{s}$.
Tipo III	Terreno formado por suelos en que se presentan grandes amplificaciones dinámicas: Depósito de suelo con $V_S \leq V_C$ y $2 \text{ m} < H_S \leq H_C$.

Fuente: NMX-R-079-SCFI. (2015).

Asimismo, la Norma menciona los ensayos recomendados para obtener los parámetros mencionados, H_S , T_S y V_S , tal y como se muestra en la siguiente tabla; algunos de estos ensayos no han sido mencionados ni descritos en el presente trabajo.

Tabla 20: Pruebas recomendadas para hallar los parámetros.

Parámetro	Prueba
H_S	<ul style="list-style-type: none"> • Cota de profundidad a la que se encuentre un basamento rocoso o de suelo firme en estudios geotécnicos. • Prueba de penetración estándar SPT • Sondeo eléctrico vertical equivalente al ERT
T_S	<ul style="list-style-type: none"> • Prueba de vibración ambiental • Registros sísmicos de sitio
V_S	<ul style="list-style-type: none"> • Prueba de dispersión de ondas (MASW, SPAC) • Tendido de refracción sísmica o sísmica de refracción • <i>Cross-hole, down-hole</i> • Cono sísmico SCTPu

Fuente: NMX-R-079-SCFI. (2015).

4.5 Reglamento Chileno

En el caso de la normativa chilena, se realizó un análisis similar al de la normativa colombiana, puesto que también se revisó el código sismorresistente nacional para complementar lo hallado en códigos dedicados a suelos y cimentaciones. Según el *Grupo de Clasificación Sísmica - Sociedad Chilena de Geotecnia* (julio, 2017), mediante el método de Nakamura (razón espectral H/V) y por las mediciones ambientales se puede estimar el periodo predominante de vibración. La razón espectral H/V debe realizarse sobre la base de 5 mediciones de al menos 30 minutos de duración cada una. “La interpretación de estas mediciones deberá seguir los criterios *SESAME* (2004) y se deberá seleccionar aquella que resulte en una clasificación sísmica más conservadora”.

En cuanto al comportamiento sísmico, se puede indicar es mejor en los materiales rocosos comparado con el determinado en suelos finos blandos, en el cual se aprecia un mayor daño. La clasificación del suelo se basa en la Tabla 21 que sigue un orden determinado por el comportamiento sísmico.

Tabla 21: Adaptación clasificación sísmica de suelos (SESAME, 2004).

Suelo Tipo		V_{S30} (m/s)	T_{nak} (segundos)
A	Roca, suelo cementado	≥ 900	<0.15 (o H/V plano)
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 550	<0.30 (o H/V plano)
C	Suelo denso o firme	≥ 350	<0.40 (o H/V plano)
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180	<1.0
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180	/

Fuente: SESAME, 2004

Dónde:

T_{nak} : Periodo predominante del terreno estimado mediante la razón espectral H/V (método Nakamura).

$\frac{H}{V}plano$: Razón espectral H/V sin un valor máximo definido.

La primera posible clasificación se obtiene al analizar el parámetro V_{S30} , así se ratifica la clasificación mediante la evaluación del parámetro determinado para el sitio, T_{nak} . En caso de que el segundo factor (T_{nak}) no cumpla con lo especificado en la Tabla No.1 (Clasificación Sísmica de los Suelos) de dicho código, la clasificación dada por el cumplimiento del parámetro V_{S30} debe ser degradada en un nivel.

La Norma Chilena- Geotecnia, Estudio de Mecánica de Suelos NCh1508 (INN, 2014) describe a la prospección geofísica como un método fundamentado en la variación espacial de

las características del suelo a través de técnicas no destructivas. Los métodos más frecuentes son:

- a) Sísmica de refracción
- b) Métodos directos de medición de velocidades de las ondas de corte, como, por ejemplo: *down-hole*, *cross-hole*, entre otros.
- c) Métodos superficiales de mediciones de las ondas Rayleigh, como, por ejemplo: MASW, SASW, ReMi, entre otros.

La Norma chilena describe a los métodos geofísicos como fundamentales para las investigaciones indirectas y utiliza algunos de estos métodos para realizar el estudio de mecánica de suelos y se basa en las normas ASTM para el uso de cada método de prospección, según se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22: Normas de ensayos habituales.

Ensayos	Norma extranjera	Norma nacional
<i>Cross-hole</i>	ASTM D4428 <i>Standard Test Method for Crosshole Seismic Testing.</i>	No tiene
Refracción sísmica	ASTM D5777 <i>Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation.</i>	No tiene
<i>Down-hole</i>	ASTM D7400 <i>Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing.</i>	No tiene

Fuente: NCh1508:2014.

4.6 Reglamento Canadiense

El análisis de la normativa canadiense se realizó tomando en cuenta el *Canadian Foundation Engineering Manual (Canadian Geotechnical Society, 2006)*, dicho manual al igual que las normativas de otros países clasifica al suelo según la V_s , dicho parámetro es

hallado mediante métodos geofísicos y, además, relaciona el análisis de la velocidad de ondas de corte con el resultado del ensayo SPT y la resistencia no drenada del suelo.

Tabla 23: Adaptación de Tabla de clasificación de suelo por respuesta sísmica .

Tipo de Suelo	Nombre del perfil de suelo	Propiedades promedio en los primeros 30 metros*		
		Velocidad de onda de corte del suelo, V_s (m/s)	Resistencia a la penetración estándar, N_{60}	Resistencia al corte sin drenaje, S_u
A	Roca dura	$V_s > 1500$	No aplicable	No aplicable
B	Roca	$760 < V_s \leq 1500$	No aplicable	No aplicable
C	Suelo muy denso y roca blanda.	$360 < V_s < 760$	$N_{60} > 50$	$S_u > 100 \text{ kPa}$
D	Suelo rígido	$180 < V_s < 360$	$15 \leq N_{60} \leq 50$	$50 < S_u \leq 100 \text{ kPa}$
E	Suelo blando	$V_s < 180$	$N_{60} < 15$	$S_u < 50 \text{ kPa}$
E		Cualquier perfil con más de 3 metros de suelo con las siguientes características: <ul style="list-style-type: none"> ○ Índice plástico $I_p > 20$ ○ Contenido de humedad $w \geq 40\%$ y ○ Resistencia al corte sin drenaje $S_u < 25 \text{ kPa}$ 		
F	Otros	Se requiere una evaluación de sitio específica		

Fuente: Tabla 4.1.8.A. in NBCC 2005.

*Tomada del apéndice A NBCC 2005.

Por otro lado, el manual detalla que los estudios o métodos geofísicos son adecuados en suelos que son difíciles de ensayar con métodos o ensayos convencionales, como por ejemplo las escolleras. Los sumideros o *sinkholes* son normalmente la causa de falla de las cimentaciones en formaciones kársticas. Estos pueden ser detectados mediante los métodos geofísicos, incluidos el georradar, mediciones de conductividad electromagnética, etc.

4.7 Reglamento Ecuatoriano

Siguiendo el mismo lineamiento de análisis de las anteriores normativas, se realizó una revisión de la *Norma Ecuatoriana de la Construcción – Geotecnia y Cimentaciones* (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2011), la cual detalla que los métodos de exploración

indirecta pueden ser combinados con la exploración directa. Los métodos indirectos que complementan, pero no sustituyen, los sondeos o la exploración directa son el ReMi, el análisis espectral de ondas superficiales, los sondeos eléctricos verticales y la sismica de refracción (ASTM D577).

Adicionalmente, la *Guía práctica para la ejecución de estudios geotécnicos y trabajos de cimentación de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015* (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015), menciona que se pueden utilizar ensayos activos de ondas de superficie como MASW, SASW o ensayos pasivos como el ReMi para caracterizar las propiedades dinámicas del suelo como la velocidad de onda de corte V_s . Es a través de la velocidad de las ondas de corte V_s que se puede estimar el módulo de rigidez o de corte G (a través de correlaciones), que a su vez es un parámetro importante para el análisis de respuesta de sitio o para los análisis geotécnicos que involucren la evaluación de deformaciones. Es por ello que, los ensayos indirectos como el análisis espectral de ondas de superficie (SASW) o análisis multicanal de ondas de superficie (MASW) tienen como principal ventaja la detección de estratos de suelos más blandos, bajo otros más rígidos. Así, el ensayo MASW permite determinar de forma indirecta la estratigrafía del suelo, apoyándose en el cambio de propiedades dinámicas de los materiales que conforman el suelo. De la misma forma que el ensayo MASW, el método ReMi también evalúa las ondas Rayleigh transmitidas en la superficie del terreno cuya profundidad es proporcional a la longitud de onda (λ).

Es por ello que tras conocer las principales aplicaciones de los métodos MASW y ReMi, el uso combinado de estos ensayos representa una ventaja con relación al análisis de profundidades y frecuencias, pues el método pasivo ReMi alcanza mayores profundidades y una dispersión procesada mediante el uso de ondas de baja frecuencia generadas, mientras que el método activo MASW brinda información sobre los estratos de menor profundidad a través del uso de ondas de alta frecuencia de una profundidad menor de penetración. La disposición

de los arreglos puede variar, pero el más empleado para abarcar la técnica activa y pasiva es el arreglo de “L”. Este arreglo se muestra en la siguiente ilustración:

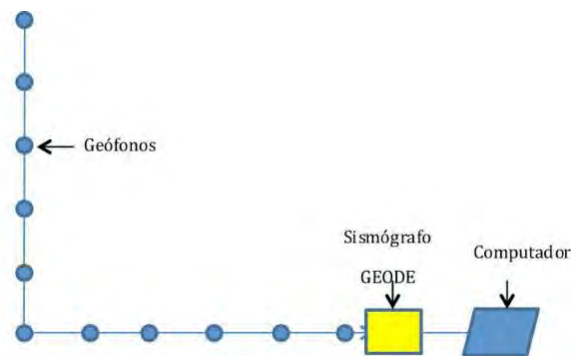
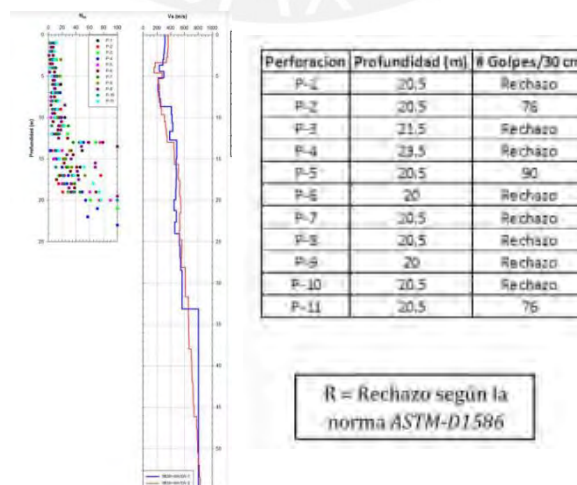


Figura 19: Arreglo geométrico utilizado para la adquisición de datos

Fuente: *Guía de ejecución de estudios geotécnicos y trabajos de cimentación* (2016).

Por otro lado, la guía menciona la relación entre el ensayo SPT y V_s mediante la siguiente ilustración que presenta un ejemplo que muestra la variación del N_{60} con la profundidad y de la misma forma, la variación de V_s con la profundidad. Este caso real (excavación) presenta un perfil de velocidades de ondas de corte V_s que demuestra que se llegó a un estrato resistente, pues las velocidades V_s desde los 21 metros hasta aproximadamente los 55 metros varían entre 500 y 800 m/s y, además, el perfil de velocidades de onda confirma el rechazo obtenido mediante el ensayo directo SPT.

Figura 20: Variación de N_{60} y V_s con la profundidad.



Fuente: *Guía de ejecución de estudios geotécnicos y trabajos de cimentación* (2016).

Finalmente, “el capítulo 3.5.3 de la norma NEC-SE-CM, menciona lo siguiente: el criterio del ingeniero geotécnico definirá la exploración necesaria y en todos los casos, el 50% de las perforaciones, deberán profundizar por debajo del nivel de apoyo de la cimentación”. (Guía práctica para la ejecución de estudios geotécnicos y trabajos de cimentación, 2016, pág 37).

4.8 Reglamento Costarricense

De acuerdo con el *Código de Cimentaciones de Costa Rica* (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009), en caso no sea posible la recuperación de muestras inalteradas del terreno, la caracterización del suelo y la medición indirecta de las propiedades mecánicas requeridas se pueden efectuar mediante ensayos de clasificación y ensayos en campo como el cono estático y dinámico, ensayo de penetración estándar, veleta o los mediante métodos/ensayos geofísicos (sísmica de refracción y resistividad eléctrica).

Asimismo, el *Código Sísmico de Costa Rica* (Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica, 2016) realiza la clasificación de los sitios de cimentación basándose en las propiedades de los parámetros hallados mediante los ensayos indicados en la siguiente tabla a los 30 primeros metros.

Tabla 24: Propiedades a los 30 metros de profundidad.

Tipo de sitio	N	V_{S-30} (m/s)	C_u (kg/cm ²)
S1	≥ 50	≥ 760	≥ 1.00
S2	35-50	350-760	0.75-1.00
S3	15-35	180-350	0.5-0.75
S4	≤ 15	≤ 180	≤ 0.5

Fuente: Código Sísmico de Costa Rica (2010).

La clasificación del sitio de cimentación se alinea a los parámetros vistos en la Tabla 25.

Tabla 25: Clasificación del sitio de cimentación.

Clasificación del sitio	Características
Sitio tipo S1	Perfil de roca o suelo denso o rígido con propiedades comparables a la roca: Roca.
Sitio tipo S2	Perfil de suelos con condiciones de medianamente denso a denso o medianamente rígido a rígido: Suelo denso y roca suave.
Sitio tipo S3	Perfil de suelo con 6 a 12 metros de arcilla cuya consistencia es de suave a medianamente rígida o con más de 6 metros de suelos no cohesivos de poca o media densidad: Suelo rígido.
Sitio tipo S4	Perfil de suelo que contiene un estrato de más de 12 metros de arcilla suave: Suelo suave.

Fuente: Código Sísmico de Costa Rica (2010).

Dados los lineamientos mencionados en las tablas previamente mostradas, se sustenta el tipo de suelo de cimentación. En caso no se tenga suficiente información para la clasificación del suelo, se puede suponer un Sitio tipo S3 o Sitio tipo S4, caso el responsable del diseño geotécnico así lo considere.

Por otro lado, el *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica* (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2015) menciona que la investigación de campo mediante métodos geofísicos u otros ensayos de campo contribuyen a disminuir la incertidumbre en el modelo geotécnico utilizado para el análisis de estabilidad de taludes y laderas. Si bien los métodos geofísicos aportan en la investigación de campo, estos solo deben ser un apoyo a los métodos directos y no deben sustituirlos bajo ninguna situación.

El código mencionado además cita a los métodos geofísicos utilizados para realizar la investigación geofísica en el análisis de taludes y laderas, la aplicación y designación ASTM donde se especifica cada método.

Tabla 26: Normas sugeridas y aplicación para la investigación geofísica en taludes.

Tipo de método	Designación ASTM	Aplicación
Sísmica de refracción	D5777	Determina la velocidad de onda P del terreno a diferentes profundidades.
<i>Cross-hole</i>	D4428	Determina la velocidad de onda P del terreno a diferentes profundidades (Entre perforaciones cercanas).
SASW (<i>Spectral analysis of surface waves</i>)	D6758	Determina la velocidad de onda S en los primeros 30 metros del terreno.
Resistividad eléctrica	D6431	Determina la resistividad eléctrica del terreno a diferentes profundidades.

Fuente: *Código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica (2016)*.

Luego de desarrollar los principales reglamentos internacionales referentes a la aplicación de los métodos geofísicos en la geotecnia, se presenta la Tabla 27, en la cual se realiza un resumen de los reglamentos/ códigos y normativas más importantes de cada país mencionado y las aplicaciones que estos proponen.

Tabla 27: Resumen de los principales métodos geofísicos y sus aplicaciones en las diferentes normativas internacionales.

Reglamentos y códigos	Métodos más utilizados	Aplicaciones
<i>Documento Básico SE-C Cimientos</i> (España)	<i>Cross-hole, down-hole</i>	<p>Contrasta resultados de resistencia de ensayo SPT con valores obtenidos de los métodos <i>cross-hole</i> o <i>down-hole</i> para suelos con porcentajes importantes de grava, cantos y bolos.</p> <p>Determinación de deformabilidad.</p> <p>El método de refracción sísmica brinda información de la profundidad en la que está la napa freática y sobre la ripabilidad, mientras que el georradar extrae información de los servicios enterrados, fluidos, depósitos, napa freática, unidades geológicas.</p>
<i>Code of practice for ground investigations British Standards BS 5930:2015.</i> (Reino Unido)	Resistividad eléctrica Refracción sísmica Cross-hole Georradar Métodos gravimétrico y magnetométrico.	<p>Evaluación de la profundidad de la base rocosa cuando se presentan condiciones complicadas del suelo para realizar sondeos o en las que existen variaciones a escala menor que la distancia entre sondeos.</p> <p>Ubicación de la geología del suelo y agua subterránea. Encontrar anomalías geológicas como fallas o vacíos.</p> <p>Determinación de las propiedades ingenieriles del subsuelo. Evaluación de recursos.</p>
<i>NSR-10 y Manual de Diseño de Superficiales y Profundas para Carreteras.</i> (Colombia)	ASTM D4428 <i>Cross-hole</i> , ASTM D7400 <i>Down-hole</i> . ASTM D5777 Refracción sísmica para investigación subsuperficial. Sísmica de reflexión. Resistividad eléctrica. Georradar o GPR- Combinaciones: geo-resistividad eléctrica, georradar y refracción sísmica.	<p>Brinda la representación litológica del subsuelo en términos de velocidad de ondas de corte. Se comparan los valores de variación de rigidez y amortiguamiento obtenidos a través de los métodos geofísicos y por ensayos de laboratorio.</p> <p>Exploración geofísica: Métodos geofísicos son complementarios y resultan beneficiosos en la investigación de alineaciones de gran longitud y áreas extensas de forma rápida y económica.</p> <p>Adecuada zonificación del sitio e identificación de áreas cavernosas, depósitos arcillosos, lentes de arena y grava, profundidad hasta roca base, módulo de rigidez, módulo de Poisson, módulo de Young dinámico; a través de la combinación de métodos antes mencionada.</p>

Reglamentos y códigos	Métodos más utilizados	Aplicaciones
<p><i>Criterios y Lineamientos técnicos para factibilidades – Geotecnia.</i> (México)</p>	<p>Refracción sísmica Resistividad eléctrica Métodos gravimétrico y magnetométrico</p>	<p>Mediciones indirectas de las propiedades físicas de los suelos y rocas, estudios geohidrológicos y de mantos freáticos.</p> <p>El método de refracción permite hallar la compacidad de los materiales, espesor de los estratos, relación de Poisson de los materiales, módulo dinámico de la rigidez al cortante y módulo dinámico de elasticidad.</p> <p>Mediante el método de resistividad eléctrica se puede encontrar la profundidad de la napa freática, estructuras geológicas, estructuras blandas, cavernas, tipos de material y espesor de los estratos.</p> <p>Se pueden encontrar los riesgos ambientales por desechos, densidad de fracturamiento y la certificación del suelo de edificaciones concluidas a través de métodos gravimétricos y magnetométrico.</p>
<p><i>Grupo de Clasificación Sísmica-Sociedad Chilena de Geotecnia y Norma Chilena- Geotecnia, Estudio de Mecánica de Suelos NCh1508:2014.</i> (Chile)</p>	<p>MASW SASW <i>Down-hole, cross-hole</i> Microtremores (cociente H/V) Refracción sísmica</p>	<p>Sondaje a 30 metros para determinar las propiedades de rigidez dinámica o deformabilidad del suelo. Además, se conoce la estratigrafía del suelo y perfil de Vs de en los 30 metros superiores.</p> <p>Se realiza la clasificación del suelo tras el análisis del parámetro V_{S30} y se ratifica a través del parámetro determinado para el sitio, T_{nak}.</p>
<p><i>Canadian Foundation Engineering Manual (4th edition 2006).</i> (Canadá)</p>	<p>Refracción sísmica Reflexión sísmica <i>Down-hole</i> Georradar o GPR.</p>	<p>Determinación de la estratigrafía del suelo por métodos como refracción sísmica, reflexión sísmica, resistividad; lo cual debe ser comprobado mediante perforaciones u otros métodos directos.</p> <p>Detección de fallas en las cimentaciones en formaciones kársticas originadas por los <i>sinkholes</i> o sumideros y estas son detectadas mediante el método georradar.</p>

Reglamentos y códigos	Métodos más utilizados	Aplicaciones
<p><i>Norma Ecuatoriana de la Construcción – Geotecnia y Cimentaciones y Guía práctica para la ejecución de estudios geotécnicos y trabajos de cimentación de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC (2014).</i> (Ecuador)</p>	<p>ReMi MASW Sísmica de refracción Combinación: ReMi+MASW</p>	<p>Los métodos geofísicos son métodos de exploración que pueden ser combinados con la exploración directa.</p> <p>Caracterizar las propiedades dinámicas del suelo, y así estimar el módulo de rigidez o de corte G, el cual es un parámetro importante para la evaluación de respuesta de sitio o para los análisis geotécnicos que involucren deformaciones.</p> <p>La combinación de ReMi y MASW resulta beneficiosa, puesto que el método ReMi alcanza mayores profundidades, mientras el método MASW brinda información acerca de los estratos de menor profundidad.</p> <p>Detección de estratos más blandos bajo otros más rígidos, cambio de propiedades dinámicas de materiales que conforman el suelo a través del método MASW o SASW.</p>
<p><i>Código de Cimentaciones de Costa Rica y Código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica (2016).</i> (Costa Rica)</p>	<p>Sísmica de refracción Resistividad eléctrica Cross-hole SASW</p>	<p>Permite la medición indirecta de las propiedades mecánicas del suelo y efectuar la caracterización del suelo.</p> <p>Ayudan a disminuir la incertidumbre en el modelo geotécnico usado para el análisis de la estabilidad de taludes y laderas.</p>

Fuente: Fuente propia.

5. Propuesta Normativa

Los estudios o métodos geofísicos se pueden proyectar para hallar características particulares, como la distribución de agua subterránea o estructuras geológicas. Son adecuados para el complemento y obtención de parámetros físicos y mecánicos, para determinar la estratigrafía y naturaleza del suelo, entre otros. Los métodos geofísicos permiten complementar la información sobre la caracterización geológica y geotécnica del suelo, abordar el estudio de grandes superficies y mejorar las correlaciones de parámetros geotécnicos. Son aplicados, además, con fines exploratorios, de evaluación de riesgos y de construcción. Los métodos implementados y los detalles de cómo se emplearán deben adaptarse a la resolución, a la profundidad requerida y a las propiedades físicas que se medirán.

Cada método geofísico detecta contrastes en una propiedad física en particular, por lo que, un mismo volumen de suelo debe investigarse y explorarse de distintas maneras, realizando una combinación de métodos geofísicos o de técnicas intrusivas, para finalmente obtener una imagen completa. La combinación de métodos geofísicos se realiza de acuerdo con la complejidad justificada del sitio a investigar, lo cual permitiría una interpretación sólida y detallada de los resultados hallados. No obstante, es importante mencionar que los resultados hallados mediante métodos geofísicos complementan la información encontrada a través de métodos o ensayos directos en los cuales se realizan registros de pozos o excavaciones. Además, se pueden obtener de manera indirecta los módulos de rigidez elásticos del terreno y los demás parámetros elásticos.

De acuerdo con los alcances expuestos, se propone incluir estos métodos en la etapa de exploración de suelos los estudios geofísicos de la manera siguiente:

En primera instancia, se debe planificar y programar el uso de métodos geofísicos en el programa de exploración del suelo. Los parámetros físicos y mecánicos (con correlaciones) obtenidos en las prospecciones geofísicas deben ser incluidos en el análisis del comportamiento de los suelos y cimentaciones. Se puede correlacionar o complementar la información hallada con los sondeos o ensayos mecánicos realizados al suelo. Se recomienda realizar primero los ensayos geofísicos, en caso de que se presenten zonas de difícil interpretación con irregularidades no pronosticadas, como materiales sueltos superficiales, grietas, fallas o terrenos con problemas particulares (expansibles, licuables, colapsables, carbonatados, entre otros), para poder intensificar los sondeos mecánicos en dichos puntos y en sí la campaña geotécnica.

De esta forma, la propuesta toma en cuenta que normalmente se opta por cimentaciones profundas en el caso que el terreno analizado presente grandes espesores de suelos blandos o por la presencia de importantes heterogeneidades, como cavidades kársticas. Y es por ello, que el uso de los métodos geofísicos como parte de la campaña de exploración presenta una gran importancia para obtener más información sobre el terreno y permitir reconocer el suelo hasta considerables profundidades, las cuales pueden darse para llegar a estrato rocoso o suelo firme. El conocimiento sobre el terreno debe ser más detallado en torno a la cimentación, además de caracterizar el suelo, también se analizan otros aspectos como las zonas freáticas presentes en el terreno.

Por otro lado, las técnicas o métodos geofísicos más utilizados en el Perú y que pueden ser usados solos y/o combinados de acuerdo con su aplicabilidad son: down-hole, cross-hole, PS suspension logging, sísmica de refracción, MASW, microtemores o microtrepidaciones, tomografía de resistividad eléctrica, georradar y MAM.

Estos métodos geofísicos pueden ser combinados entre sí para obtener valores más precisos de acuerdo con su aplicabilidad en cimentaciones. Además, estas técnicas pueden ser correlacionadas con métodos de exploración intrusiva, especialmente con el SPT (*Standard Penetration Test*) y CPTu (*Cone Penetration Test* con medición de presiones intersticiales), que son usados masivamente en el mundo. El método de exploración intrusiva SCPTu (*Seismic Cone Penetration Test*) por ejemplo, combina la técnica de CPTu y el método geofísico down-hole. De igual manera, las combinaciones de métodos geofísicos amplían el rango de formaciones estructurales cuantificables del suelo, desde oquedades hasta propiedades mecánicas de los suelos y las rocas; así como también son una buena elección en el caso del estudio de cimentaciones profundas, específicamente con la combinación de los métodos MASW y MAM.

En zonas sísmicas y para edificios tipos A y B (NTE E.030-18 *Diseño Sismorresistente*) se recomienda el uso de los ensayos *cross-hole*, *down-hole* y *PS suspension logging*; ya que se pueden usar estas técnicas en deformabilidad de arcillas pre consolidadas y en zonas con presencia de material con grava gruesa o cantos rodados. Esto es dado por la dificultad al caracterizar suelos granulares gruesos, puesto que se debe optar por emplear técnicas de investigación especiales y que son menos frecuentes, además de la falta de equipos que posibiliten realizar ensayos y obtener muestras de estos suelos. De esta manera, se plantea como alternativa a esta problemática que:

Los valores de resistencia hallados con diversos tipos de penetrómetros dinámicos e inclusive estáticos pueden ser poco confiables en presencia de grava, en dicho caso los valores obtenidos podrán ser contrastados y eventualmente sustituidos por información obtenida de los valores de propagación de velocidades de ondas S mediante los ensayos *cross-hole*, *down-hole*, *PS suspension logging*, MASW y MAM en el caso de que la importancia de la edificación lo precise y tras encontrarse un suelo con apreciable porcentaje de grava, bolones y bloques.

Además, de forma complementaria a la caracterización del suelo a partir de la deformabilidad y a las correlaciones de información bibliográfica, se permite emplear los métodos geofísicos como *down-hole* con el fin de obtener una aproximación a la curva de variación de rigidez que varíe en función de deformación de corte.

Finalmente, tomando en cuenta los principales puntos de la propuesta previamente mencionada, se realizó la simplificación de esta. Así, se presenta el artículo 14.5 a implementar en la NTE E.050 *Suelos y cimentaciones* y las siguientes tablas.

14.5 Técnicas de investigación indirecta (técnicas geofísicas)

Las técnicas de exploración geofísica permiten realizar la caracterización geotécnica mediante métodos indirectos. Estas técnicas son complementarias a las exploraciones de investigación directa con sondeos manuales y mecánicos y ensayos in situ, por lo que no pueden ser utilizados de manera exclusiva para realizar un EMS. Su aplicación va orientada principalmente a la determinación de los parámetros dinámicos del suelo (V_p , V_s y periodo predominante), así como a la determinación de los perfiles estratigráficos del suelo, los cuales deberán ser complementados con los resultados de las técnicas de investigación directa para su interpretación.

La Tabla 28 presenta los ensayos geofísicos más utilizados y sus respectivas normativas, los cuales se proponen adicionar como Tabla N.º5 (*Ensayos Geofísicos*) en la NTE E.050 *Suelos y cimentaciones*. Dado que para ninguno de estos ensayos existen normas peruanas, NTP, se propone el uso de las normas ASTM, y en caso existan el de procedimientos de diversos autores, alternativamente.

Tabla 28: Cuadro propuesto de los métodos geofísicos más utilizados y su normativa.

DESCRIPCIÓN	NORMA APLICABLE Y/O REFERENCIA
<i>Standard Test Methods for Down-hole Seismic Testing</i> (Ensayo down-hole).	ASTM D7400/ D7400M
<i>Standard Test Methods for Cross-hole Seismic Testing</i> (Ensayo cross-hole).	ASTM D4428/D4428M
<i>PS suspension logging.</i>	GEOVision (2006) ¹
<i>Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation</i> (Uso de refracción sísmica para investigación superficial).	ASTM D5777
<i>Multichannel Analysis of Surface Waves</i> (MASW, Análisis multicanal de ondas de superficie).	Park, et al, (1999) ²
<i>Microtremor</i> (Método de Nakamura o razón espectral H/V).	Nakamura (2008) ³ SESAME (2004) ⁴
<i>Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Site Characterization</i> (Uso de la Tomografía de Resistividad eléctrica para la caracterización superficial de sitio).	ASTM D6431/ IEEE STD 81
<i>Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation</i> (Uso del Georradar para investigaciones superficiales de suelo).	ASTM 6432
Microtremor Array Measurement (MAM, Medición de microtremores en arreglos multicanal).	Okada, H. (2003) ⁵

¹ GEOVision Inc. Suspension P-S Velocity Logging Method. 2006(10/ 24).

² Park, C., Miller, R. y Xia, J. 1999, "Multichannel analysis of surface waves". Geophysics. Vol. 64. Nº 3. p: 800-808.

³ Nakamura, Y. (2008). On the H/V Spectrum. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.

⁴ SESAME (2004). Guidelines for the implementation of the h/v spectral ratio technique on ambient vibration measurements, processing and interpretation. SESAME European research project. WP12 – Deliverable D23.12.

⁵ Okada, H. (2003). The microtremor survey method, Society of Exploration Geophysicist, Tulsa .

Fuente: Fuente propia.

Luego, en la presente tesis, se propone la inclusión de los métodos geofísicos como parte de la Tabla N.º6 (*Aplicaciones de los ensayos geofísicos*) de la NTE E.050 *Suelos y cimentaciones*. Así, en la tabla se proponen incluir los ensayos de acuerdo con el tipo de respuesta que brindan y sus aplicaciones. El orden de los ensayos está dado por la respuesta

brindada por cada método, los tres primeros ensayos, son considerados como aquellos que se efectúan en perforaciones y brindan una respuesta puntual (línea vertical hacia abajo), mientras que los ensayos restantes son considerados por brindar una respuesta lineal.

Tabla 29: Ensayos geofísicos y sus aplicaciones.

Ensayo Geofísico	Norma Aplicable	Técnica de exploración	Tipo de suelo	Parámetro a obtener
<i>Down-hole</i>	ASTM D7400/ D7400M	Una perforación.	Todos	V_P , V_S .
<i>Cross-hole</i>	ASTM D4428/D4428M	Dos o más perforaciones.	Todos	V_P , V_S .
PS logging	GEOVision (2006)	Una perforación.	Todos	V_P , V_S .
Sísmica de refracción	ASTM D5777	Arreglo lineal	Todos	V_P , V_S .
MASW	Park, et al, (1999)	Arreglo lineal	Todos	V_S
Microtremores o microtrepidaciones	SESAME (2004)	Puntual	Todos	T_0 (periodo predominante)
Tomografía de resistencia eléctrica	ASTM D6431/IEEE STD 81	Mediante una serie de electrodos	Todos	Resistividad aparente Ωm
Georradar o GPR	ASTM 6432	Arreglo lineal	Todos	Velocidad de ondas electromagnéticas en el medio.
MAM	Okada, H. (2003)	Arreglos en L y triangulares	Todos	V_S

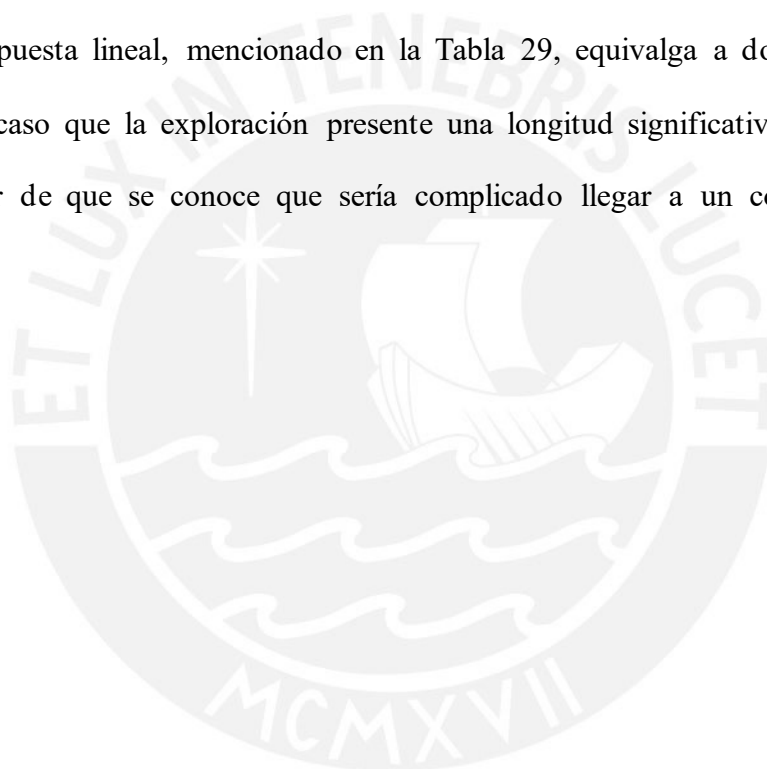
Fuente: Fuente propia.

En concordancia a lo previamente propuesto, y tomando como base la Tabla N.º 11 (*Número de puntos de exploración*) de la NTE E.050 *Suelos y Cimentaciones*, se propone que hasta un 30 % de estos ensayos puedan realizarse mediante los métodos geofísicos presentados en la Tabla N.º 6 (*Aplicaciones de los ensayos geofísicos*) de la NTE E.050; además, en el caso de que el número de ensayos directos no sea un número entero y presente decimales se redondea este al entero superior. Esto debido a las investigaciones realizadas por diversos autores presentadas en los antecedentes del presente trabajo, tanto a nivel internacional como a nivel nacional (como en el trabajo elaborado por SENCICO (2019) en el cual se recopilan las investigaciones geotécnicas a nivel nacional).

De forma simplificada, se presenta el ítem 15.5.4 propuesto para ser implementado en la NTE E.050 *Suelos y cimentaciones*.

15.5.4 Como mínimo, tres de los puntos de exploración deben corresponder a técnicas de investigación directa o ensayos in situ. Hasta un 30% de los puntos de exploración pueden realizarse mediante los métodos geofísicos presentados en la Tabla 6.

Adicionalmente, se propone tomar en cuenta que cada procedimiento de los ensayos que brindan respuesta lineal, mencionado en la Tabla 29, equivalga a dos o más sondeos directos; en el caso que la exploración presente una longitud significativa. Se propone lo anterior a pesar de que se conoce que sería complicado llegar a un consenso sobre su aplicabilidad.



6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

En la presente tesis de investigación se llegó a las siguientes conclusiones:

- De la revisión bibliográfica se pudo verificar que, en el área de geotecnia, las técnicas de prospección de mayor uso a nivel nacional e internacional son: sísmica de refracción, MASW, microtemores, MAM, los registros geofísicos de pozos (*cross-hole, down-hole, PS suspension logging*), tomografía de resistividad eléctrica, georradar, sísmica reflexión, entre otros.
- Una vez revisadas las normas internacionales referentes al uso de la geofísica para la exploración de suelos con fines de cimentación en edificaciones y otras obras, se pudo constatar que hay una basta información de métodos geofísicos incluidos en sus normas geotécnicas, con información amplia en países como: Inglaterra, España, México, Estados Unidos (normas ASTM), Chile, Ecuador, Colombia, Costa Rica, Canadá, entre otros.
- Los métodos geofísicos deben ser considerados como parte de cualquier investigación del suelo con fines de estudios de cimentación superficial y profunda de edificaciones y otras obras en combinación y complementando los métodos de investigación de exploración directa (destructivas).
- La elección del método geofísico o combinación de métodos geofísicos es responsabilidad del Profesional Responsable y es básica para maximizar el éxito de la prospección y obtener la información del suelo deseada de una manera rentable. Se pudo constatar en el estado de arte de los estudios geofísicos, que generalmente hay una combinación de las técnicas geofísicas para la obtención de parámetros diferentes que cada técnica proporciona, como también la complementación de técnicas geofísicas con

los métodos de exploración directa, especialmente con los ensayos SPT Y CPTu, entre otros.

- Se propone adicionar el artículo 14.5 a la norma NTE E.050 *Suelos y cimentaciones*, con el fin de incluir a los métodos geofísicos como métodos complementarios en la caracterización del suelo.
- Se plantea realizar una continuación a la Tabla N.º5 (*Ensayos Geofísicos*) de la NTE E.050 *Suelos y cimentaciones*, en la cual se adicionan los métodos geofísicos y sus normas aplicables y/o referencias.
- Se propone incluir a los ensayos geofísicos de acuerdo con el tipo de respuesta que brindan (lineal vertical hacia abajo o lineal) a partir de la Tabla N.º6 (*Aplicaciones de los ensayos geofísicos*) en la NTE E.050 *Suelos y cimentaciones*.
- Tomando en cuenta la Tabla N.º11 (*Puntos de exploración*) de la NTE E.050 *Suelos y cimentaciones*, se presenta el ítem 15.5.4 propuesto para ser implementado en la NTE E.050 *Suelos y cimentaciones*
- De igual forma, se toma en cuenta que los ensayos que brindan respuesta lineal, mencionados en la Tabla 29, pueden equivaler a dos o más sondeos directos; en caso de que la exploración presente una longitud significativa.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda la inclusión del uso de los métodos geofísicos en la NTE E.050-18 *Suelos y Cimentaciones*, por la extensiva utilización de los métodos geofísicos en las normas geotécnicas en los múltiples países estudiados y por qué el uso constante de estas técnicas geofísicas se utiliza en los estudios de suelos y cimentaciones a nivel nacional e internacional. Además, estas técnicas están siendo cada vez más precisas y

en el futuro mejorarán para la determinación de los parámetros físicos y probablemente mecánicos en el suelo.

- Se debe planificar un estudio geofísico para detectar las características particulares del suelo y ser una herramienta útil de "exploración" para obtener una visión general en áreas donde poco se sabe sobre el suelo o para la interpolación entre puntos o pozos de exploración directa. Las técnicas específicas que se implementarán y los detalles de cómo se van a utilizar deben adaptarse a las propiedades físicas que deben ser medidas, y a la resolución y profundidad de investigación requerida.
- Cada técnica geofísica detecta contrastes en una propiedad física particular y, por lo tanto, un volumen particular de suelo debe ser investigado en formas diferentes, utilizando una combinación de dos o más geofísicos o técnicas directas, para construir una imagen completa y precisa.
- Es importante tener cuidado con el uso de equipos geofísicos y en caso de desconocimiento o de no tener práctica, se debe solicitar la asistencia de profesionales calificados. También se podría solicitar ayuda a una organización especializada, con entrenamiento y experiencia adecuada para este trabajo.

Referencias

- Aguilar, Z. (2010). Curso taller ensayos geotécnicos y geofísicos. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. CISMID.
- Alva, J., Ortiz, C.E.& Perez, A. (2015). Mediciones Geofísicas en el Parque Arqueológico de Saqsaywaman. En XIX Congreso Nacional de Ingeniería Civil 2015. Huaraz.
- Arce Helberg, J. (1990). La geofísica aplicada a la microzonificación métodos de prospección geofísica en estudios de ingeniería. Seminarios CISMID 1990: planeamiento físico para la mitigación de desastres naturales, microzonificación sísmica, diseño sísmico de construcción. Seminarios.
- Asociación Costarricense de Geotecnia. Comisión de Código de Cimentaciones de Costa Rica (2009). Código de Cimentaciones de Costa Rica. (Segunda edición).
- Asociación Costarricense de Geotecnia. Comité técnico del Código de cimentaciones de Costa Rica (2015). Código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica. (Primera edición). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- ASTM D4428 (2007). *Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing*. ASTM International.
- ASTM D5777 (1995). *Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, U.S.A.
- ASTM D6431 (1999). *Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Site Characterization*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, U.S.A.
- ASTM D6432 (1999). *Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, U.S.A.
- ASTM D7128 (2005). *Standard Guide for Using the Seismic Reflection Method for Shallow Investigation*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, U.S.A.

- ASTM D7400 (2008). *Standard Guide for Downhole Seismic Test*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, U.S.A.
- Bard, P. Y. (1998). *Microtremor Measurements: A tool for site effect estimation in Irikura, Kudo, Okada y Sasatani (eds). The effects of Surface Geology, on Seismic Motion-Recent progress and new Horizon on ESG Study. (Vol. 3). Balkema, Rotterdam, 1251-1279.*
- Bermúdez, M.L., Franco, L.E., & Martínez, S.E. (2002). Cálculo del período fundamental del suelo como herramienta para la microzonificación sísmica: casos colombianos. Coloquio de microzonificación sísmica – Caracas.
- Biot, M.A. (1962). *Mechanics of deformation and Acoustic Propagation in Porous Media. Journal of Applied Physics 33.*
- Bolt, B. (1999). *Earthquakes. (4th. Edition). New York: Freeman and Company.*
- *British Standard Institution BSI (2015). Code of practice for ground investigations BS5930:2015.*
- Caicedo, B., Mancera, E., & Alfonso, J. (2008). Aplicaciones del georradar de subsuelo en obras civiles. *Revista de Ingeniería*, 18, 32.
- *Canadian Geotechnical Society (2006). Canadian Foundation Engineering Manual. (4th Edition). BiTech Publishing Ltd: Richmond, BC, Canada.*
- Chuquimuni, R.A. (2001). Implementación del equipo de adquisición de datos de prospección sísmica. Programa científico PC-CISMID, 1999-2000. Lima, Perú.
- Colegio Federado de ingenieros y de arquitectos de Costa Rica (2016). Código Sísmico de Costa Rica 2010. Revisión 2014. (Quinta edición). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- ConeTec. Ensayos geofísicos. Resistividad. Disponible 2022, de <https://www.conetec.com/es/servicios/ensayos-geof%C3%ADsicos/resistividad>
- Cuno, L. (2021). Caracterización del subsuelo para la cimentación de estructuras usando métodos de prospección geofísica en los terrenos de la Corte Superior de

Justicia de Arequipa – Perú. [Tesis para obtener el título profesional de ingeniero geofísico]. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

- De los Santos, M. (2016). Comparación de Normas Internacionales para su Aplicación en la República Dominicana en voladura. Trabajo final de máster. Universitat Politècnica de Catalunya, España.
- Espíndola, J.M. (1994). Terremotos y ondas sísmicas (Vol. 1). UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, F. (1997). Aplicaciones a la técnica geofísica de prospección por georradar en ingeniería civil y glaciología. Tesis doctoral de la Universidad Politècnica de Catalunya, España.
- Gayá, M. A. (2004). Procesado de Sísmica de Reflexión Superficial en el Complejo Turbidítico de Ainsa (Huesca), Tesis de maestría, Universitat Politècnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica.
- Geoterra. Estudios geofísicos. Disponible enero de 2014, de http://www.geoterraestudios.es/productos/tomografia-sismica-2d-y-3d-obra-civil_5564091_1.html
- *GEOVision Inc. Suspension P-S Velocity Logging Method. 2006(10/ 24).*
- Gómez D., Tobón, D. (2017). Correlaciones entre algunas correlaciones geotécnicas y velocidad de onda compresiva (V_p) y de corte (V_s). Tesis de Licenciatura. Universidad EAFIT, Colombia.
- Grupo de clasificación sísmica. Sociedad Chilena de Geotecnia (2017). Clasificación Sísmica de los suelos.
- Heras, H. (2022). Aplicación de metodologías geofísicas para la caracterización geológico-geotécnica con fines de cimentación de la Urbanización de Lomaditas de Cayma-Arequipa, [Tesis para optar el grado de Maestro en Ciencias de la Tierra, con mención en Geotecnia]. Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Perú.

- Humire F., Leyton F. & Sáez E. (2015). Manual de aplicación de técnicas geofísicas basadas en ondas de superficie para la determinación del parámetro V_{s30} . Santiago de Chile: Instituto de la Construcción.
- IBC *International Building Code (2012)*. International Code Council.
- IGC Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. Sísmica activa. Disponible 2011, de <https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Servicios/Geofisica-aplicada/Tecnicas/Sismica-activa>
- IGP Instituto Geofísico del Perú (2020). Procedimiento para aplicación de la prospección sísmica para los estudios de zonificación geofísica de los suelos en áreas urbanas. Informe Técnico. Lima, Perú.
- Instituto Nacional de Normalización (2009). Diseño Sísmico de Edificios. Norma chilena Oficial NCh 433Of.96 mod.2009. (2da revisión). Santiago de Chile.
- Instituto Nacional de Normalización (2014). Geotecnia. – Estudio de mecánica de suelos. Norma chilena NCh 1508. (Tercera edición). 2014.03.31.
- Keller, G.; Frischnecht, F. (1966). *Electrical methods in geophysical prospecting*. New York: Pergamon Press Inc., Oxford.
- Kramer, S. (1996). *Wave Propagation. Geotechnical earthquake engineering (pag 143)*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- López, J.M., Mejía, J.A., Vega, N.D. (2008). Aplicación del método de refracción sísmica para la determinación de velocidades de ondas P [Tesis para optar el título de Ingeniero Civil]. Universidad del Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura escuela de ingeniería civil, El Salvador.
- López, S. (2016). Ensayos geofísicos para la exploración de suelos en estructuras patrimoniales. [Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Civil]. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Louie J., (2001), “Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays”. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Volumen 91. No2. p347-364.

- Machuca, N.C. (2015). Obtención del perfil de velocidad de onda de corte mediante método MASW y comparación con ensayo tipo downhole en estaciones sismológicas de zona central. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
- Martínez Vargas, A. (1990). Geotecnia para ingenieros. Prospecciones geofísicas en Geotecnia. Voll. Lima, Perú.
- Meneses, J. (1991). Ensayos de Prospección Sísmica. Conferencia presentada en el Seminario Taller de Mecánica de Suelos, CISMID-1991.
- Milsom, J. (2003). *Field Geophysics. 3rd Edition. John Willey & Sons Ltd.*
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes (2017). Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. Comité ejecutivo de la norma ecuatoriana de construcción (2011). Norma Ecuatoriana de la Construcción. Geotecnia y Cimentaciones. Capítulo 9, NEC-11.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. Guía Práctica para la ejecución de estudios geotécnicos y trabajos de cimentación de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC (2015). (Primera edición). Imprenta Activa, Quito, Ecuador.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. Norma Ecuatoriana de la Construcción EC (2014). Geotecnia y Cimentaciones. Código NEC-SE-GC. Dirección de Comunicación Social, MIDUVI. Quito, Ecuador.
- Ministerio de Fomento (2003). Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SEC: Seguridad Estructural Cimentaciones. España.
- Ministerio de Transporte. Instituto Nacional de vías (2012). Manual de Diseño de Cimentaciones Superficiales y Profundas para Carreteras. Colombia.
- Ministerio de Vivienda (2006). Código Técnico de la Edificación CTE. Parte I y II, España.

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018) Norma técnica E.030 *Diseño Sismorresistente*. Lima, Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018). Norma técnica E.050 *Suelos y Cimentaciones*. Lima, Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Nakamura, Y. (1989). *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*. *QR Railway Tech. Res. Inst.*, 30(1), 25-33.
- Naranjo, H.; Dranichnikov, T. (2012). Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional. El caso del puente sobre el río Maicito. Quito, Ecuador: Editorial Universitaria Abya-Yala.
- Norma Mexicana NMX-R-079-SCFI-(2015). Escuelas- Seguridad Estructural de la Infraestructura Física Educativa- Requisitos.
- Okada, H. (2003). *The microtremor survey method*, Society of Exploration Geophysicist, Tulsa.
- Omowumi, P. (2004). *Application of electrical resistivity in building foundation investigation in Ibesse Southwestern Nigeria*. Asia Pacific Journal of Energy and Environment.
- Ordaz, M., Veras L. (2003). Criterios generales para la definición de Espectros Sísmicos de Sitio, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Guanajuato-León, México.
- Otero, D.Z. (2018). ONDAS SÍSMICAS, su importancia para la geofísica y para la humanidad. Universidad Industrial de Santander., 3(4), 13.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xía, J., (1999). *Multichannel analysis of surface waves (MASW)*. Geophysics, 64, p. 800-808.
- Peredo, V. (2011). Aplicación del método SASW en suelos. [tesis para optar el título de ingeniero civil]. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Universidad de Chile.

- Quispe, M.E. (2012). Exploración geofísica mediante métodos de refracción sísmica y MASW 1D en proyectos de ingeniería civil, tesis para optar el título de ingeniero civil, Universidad Nacional de Ingeniería, UNI, Lima, Perú.
- Reynolds, J. M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley and Sons, 796p.
- Rivera, M.; Piedra, R.; Paripanca, Y. (2016). Ensayos Geofísicos de Refracción y de Medición de Ondas de Corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones. *Civilizate* Núm. 8, Lima.
- Salazar, C.R. (2015). Metodología de optimización del diseño geotécnico para la estabilización de taludes de un proyecto en la Costa Verde. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Santisteban, I. P. (2012). Caracterización geotécnica de los suelos de Madrid mediante la técnica REMI (*Refraction Microtremor*): Aplicaciones en la ingeniería civil. Universidad Complutense de Madrid, España.
- SENCICO - Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (s.f.). Disponible enero 2019, de <https://perfilesuelos.sencico.gob.pe/>
- Serrano, J. (2003). Caracterización geofísica de filtraciones de agua en el subsuelo. Tesina. Universitat Politècnica de Catalunya.
- SESAME (2004). *Guidelines for the implementation of the h/v spectral ratio technique on ambient vibration measurements, processing and interpretation*. SESAME European research project. WP12 – Deliverable D23.12.
- Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado SIAPA (2014). Criterios y Lineamientos Técnicos para Factibilidades. Geotecnia. México.
- Soupios, P.M.; Georgakopoulos, P.; Papadopoulos, N.; Saltas, V.; Andreadakis, A.; Vallianatos, F.; Sarris, A. & Makris, J. (2007). *Use of engineering geophysics to investigate a site for building foundation*. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2007, Volume 4, 94-103.

- *Stokoe, K.H., & Santamarina, J.C. (2000). Seismic-wave-based testing in geotechnical engineering. In ISRM international symposium. ISRM.*
- *Stokoe, K.H., Wright, S.G., Bay, J.A. & Rosset, J.M. (1994). Characterization of geotechnical sites by SASW method. In Geophysical characterization of sites (pp. 15-25).*
- Sulla, W. (2020). Procedimiento para aplicación de prospección sísmica para los estudios de zonificación geofísica de los suelos en áreas urbanas. Informe técnico. IGP Instituto Geofísico del Perú.
- Tavera, H. (2016). Programa Presupuestal N 068: Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres. Zonas Geográficas con gestión de Información Sísmica. Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico. Instituto Geofísico del Perú. Ministerio del Ambiente.
- ZER Geosystem S.A.C (2010). Ensayos geofísicos para los métodos de MASW y MAM para el área de emplazamiento del puente Quilca. Informe final. Lima, Perú.