

UNIVERSIDAD EAFIT

TRABAJO DIRIGIDO DE GRADO

**CORRELACIONES ENTRE ALGUNAS VARIABLES GEOTÉCNICAS Y
VELOCIDADES DE ONDA COMPRESIVA (V_p) Y DE CORTE (V_s)**

PRESENTADO POR:

DANIELA GÓMEZ RAMÍREZ

Y

DANIELA TOBÓN ÁNGEL



**UNIVERSIDAD EAFIT
GEOLOGÍA
MEDELLIN, COLOMBIA
2017**

UNIVERSIDAD EAFIT

TRABAJO DIRIGIDO DE GRADO

**CORRELACIONES ENTRE ALGUNAS VARIABLES GEOTÉCNICAS Y
VELOCIDADES DE ONDA COMPRESIVA (V_p) Y DE CORTE (V_s)**

PRESENTADO POR:

DANIELA GÓMEZ RAMÍREZ - 201310047015

Y

DANIELA TOBÓN ÁNGEL - 201310028015

ASESOR:

EDGAR ALLAND SÁENZ



**PROYECTO DE GRADO CON EL FIN DE CUMPLIR LOS REQUISITOS PARA
OPTAR AL GRADO DEL PREGRADO EN GEOLOGÍA**

GEOLOGÍA

MEDELLIN, COLOMBIA

2017

NOTAS DE ACEPTACIÓN

JURADOS

ASESORES

AGRADECIMIENTOS

Primero agradecer a nuestras familias, quienes fueron nuestro apoyo incondicional durante estos años de estudio, también por ser nuestra principal motivación para perseguir nuestros sueños y culminar finalmente con la carrera.

A Edgar Alland Saenz, por su acompañamiento e interés genuino en compartir su experiencia y conocimiento durante el desarrollo del proyecto, por el aprendizaje ya que fuiste una fuente de inspiración y de motivación trascendental en nuestra gestión profesional.

A Juan Felipe Paschke por habernos compartido sus conocimientos, por su paciencia y disposición total, así mismo a cada uno de nuestros docentes que durante estos años de estudio nos han dado su saber y experiencia para la formación profesional que hemos alcanzado de manera satisfactoria.

A Wilton Echavarría, por su apoyo y colaboración incondicional en todo nuestro proceso de aprendizaje.

A las empresas IRYS, INTEGRAL, CONSULCIVIL, EXPLANAN y a la Universidad EAFIT, quienes proporcionaron bases de datos para la elaboración de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	11
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo general.....	13
1.1.2	Objetivos específicos	13
1.2	METODOLOGÍA.....	13
1.3	LIMITACIONES.....	15
2	ANTECEDENTES	17
3	MARCO TEORICO.....	20
3.1	PROSPECCIÓN SÍSMICA.....	20
3.1.1	Principios metodológicos.....	20
3.1.2	Refracción sísmica	21
3.1.3	Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW).....	22
3.1.4	Sísmica de refracción- Microtremores (Re-Mi)	23
3.2	PARAMETROS GEOTECNICOS	24
3.2.1	Granulometría de los suelos.....	24
3.2.2	Resistencia al corte de los suelos.....	24
3.2.3	Densidad.....	27
4	RESULTADOS.....	28
4.1	CORRELACIONES CUALITATIVAS.....	28
4.1.1	Proyecto A.....	31
4.1.2	Proyecto B	31
4.1.3	Proyecto C.....	32
4.1.4	Proyecto D.....	33
4.1.5	Proyecto E	33
4.1.6	Proyecto F.....	34
4.1.7	Proyecto G.....	35
4.1.8	Proyecto H.....	35
4.1.9	Proyecto I.....	36
4.1.10	Proyecto J.....	36
4.1.11	Proyecto K.....	37
4.1.12	Proyecto L.....	38

4.1.13	Proyecto M.....	38
4.1.14	Proyecto N.....	39
4.1.15	Proyecto O.....	40
4.2	CORRELACIONES CUANTITATIVAS.....	41
4.2.1	Relación entre velocidades de onda y la resistencia a la compresión simple 41	
4.2.2	Relación entre velocidades de onda y ángulo de fricción (Φ).....	43
4.2.3	Relación entre velocidades de onda y cohesión	44
4.2.4	Relación entre Velocidad de onda P y densidades.....	46
4.2.5	Relación entre velocidades de onda y retenido en el tamiz #4 (gravas)	47
4.2.6	Relación entre velocidades de onda y retenido en el tamiz # 4 a 200 (arenas) 49	
4.2.7	Relación entre velocidades de onda y pasa tamiz 200 (finos).....	50
5	ANALISIS DE RESULTADOS	52
5.1	Corrlación entre la resistencia a la compresión simple y las velocidades de onda (Figura 8 y Figura 9).....	52
5.2	Corrlación entre ángulo de fricción (Φ) y las velocidades de onda P y S (Figura 10 y Figura 11).....	53
5.3	Correlación entre la cohesión y las velocidades de onda P y S (Figura 12 y Figura 13).....	53
5.4	Correlación entre las densidades y la velocidad de onda P (Figura 14 y Figura 15)	54
5.5	Correlaciones entre la granulometría y las velocidades de onda P y S (Figuras 16 a 21)	54
5.6	Consideraciones finales	55
6	CONCLUSIONES.....	56
7	RECOMENDACIONES.....	57
8	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ondas refractadas en diferentes capas del subsuelo y captadas por los geófonos. Tomado de: Rivera et al, 2016	21
Figura 2. Perfil de velocidad de onda de corte (V_s) contra profundidad. Tomado de: Lazcano, 2012.	24
Figura 3 Dispositivo para el ensayo de corte directo.....	25
Figura 4 Dispositivo utilizado para el ensayo de compresión simple. Tomada de: Arango, 1985.....	26
Figura 5 Resistencia a la compresión simple (q_u) en materiales frágiles y dúctiles.....	27
Figura 6 Perfil de meteorización propuesto por Deere y Paton, 1971	30
Figura 7 Perfil de meteorización propuesto por Dearman, 1995	30
Figura 8 Correlación entre la velocidad de onda S y la resistencia a la compresión simple	42
Figura 9 Correlación entre la velocidad de onda P y la resistencia a la compresión simple	42
Figura 10 Correlación entre la velocidad de onda S y el ángulo de fricción	43
Figura 11 Correlación entre la velocidad de onda P y el ángulo de fricción.	44
Figura 12 Correlación entre la velocidad de onda S y la cohesión	45
Figura 13 Correlación entre la velocidad de onda P y la cohesión	45
Figura 14 Correlación entre la velocidad de onda P y la densidad seca.....	46
Figura 15 Correlación entre la velocidad de onda P y la densidad húmeda.....	47
Figura 16 Correlación entre la velocidad de onda S y retenido en el tamiz #4	48
Figura 17 Correlación entre la velocidad de onda P y retenido en el tamiz #4	48
Figura 18 Correlación entre la velocidad de onda S y retenido en el tamiz # 4 a 200	49
Figura 19 Correlación entre la velocidad de onda P y retenido en el tamiz # 4 a 200	50
Figura 20 Correlación entre la velocidad de onda S y tamiz pasa # 200	51
Figura 21 Correlación entre la velocidad de onda P y tamiz pasa # 200	51

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Algunos estudios en el mundo relacionados con correlaciones entre parámetros geotécnicos y velocidades de onda.....	18
Tabla 2 Estudios en Colombia relacionados con correlaciones entre parámetros geotécnicos y velocidades de onda.....	19
Tabla 3 Clasificación de los perfiles de suelos según la norma NSR-10, título A.....	29
Tabla 4 Cantidad de datos utilizados para la correlación entre la compresión simple y velocidades de onda	41
Tabla 5 Cantidad de datos utilizados para la correlación entre el ángulo de fricción y velocidades de onda	43
Tabla 6 Cantidad de datos utilizados para la correlación entre la cohesión y velocidades de onda	44
Tabla 7 Cantidad de datos utilizados para la correlación entre densidades y velocidad de onda P	46
Tabla 8 Cantidad de datos utilizados para la correlación entre el material retenido en el tamiz # 4 y velocidades de onda.....	47
Tabla 9 Cantidad de datos utilizados para la correlación entre el material retenido en el tamiz # 4 a 200 y velocidades de onda.....	49
Tabla 10 Cantidad de datos utilizados para la correlación entre el material retenido en el tamiz # 4 a 200 y velocidades de onda.....	50

RESUMEN

El objetivo principal de este estudio fue establecer correlaciones entre variables geofísicas y parámetros geotécnicos, que permitan visualizar las velocidades de onda no solo como diferenciadoras de estratos, sino como soporte a extrapolación de parámetros geotécnicos. Se tomaron 538 datos de proyectos de ingeniería reales estudiados en el departamento de Antioquia y suministrados por empresas privadas, los cuales tenían la condición que en un mismo sitio se hubiesen hecho estudios sísmicos y de exploración directa con ejecución de ensayos de laboratorio para que se pudiesen correlacionar.

Se hicieron correlaciones cualitativas de acuerdo con la Norma NSR-10, la cual permite clasificar el suelo con base a las velocidades de onda cortante V_s en los primeros 30m. Para esto se tomaron las descripciones de las perforaciones y los apiques en cada proyecto, relacionándolas con las velocidades de onda S para cada estrato, obteniendo así una categorización de acuerdo con sus propiedades físicas como densidad, compacidad, grado de meteorización, cohesión y dureza.

Las correlaciones cuantitativas se realizaron por medio de gráficos de dispersión, relacionando las variables geotécnicas como compresión simple, densidades, cohesión y ángulo de fricción con las velocidades de onda P y S. Estas fueron las variables que mostraron una correlación significativa y por ende replicable en suelos con características similares, mientras que la correlación resultante entre velocidades de onda y granulometría no puede ser explicada a través de esta única variable, ya que se deben tener en cuenta otros parámetros que condicionan la velocidad de propagación de las ondas en el suelo.

Se recomienda para próximas investigaciones que los datos obtenidos sean tomados por el mismo equipo de medición para obtener una mejor comparabilidad entre los datos

Palabras claves: Velocidad de onda P, velocidad de onda S, compresión simple, densidad, cohesión, ángulo de fricción, granulometría

ABSTRACT

The main objective of this study was to determine correlations between variables and geophysical geotechnical parameters, which can reflect the wave velocities not only as differentiating strata, but as support extrapolation of geotechnical parameters. We took 538 data from real engineering projects in the department of Antioquia and supplied by private consulting firms, which had the condition that in one site seismic and direct exploration studies had been done, with laboratory tests results, so that they could be correlated.

Qualitative correlations were developed according to NSR-10, which allows to classify the soil based on the shear wave velocities V_s in the first 30m. For this, the descriptions developed through the perforations and pips in each project were taken, relating them to the S wave velocities for each layer, obtaining a categorization according to their physical properties such as density, compression, degree of weathering, cohesion and hardness.

The quantitative correlations were made by dispersion graphs, relating geotechnical variables such as simple compression, densities, cohesion and friction angle with the P and S wave velocities. These were the variables that showed a significant correlation and therefore replicable in soils with similar characteristics, while the resulting correlation between wave velocities and granulometry, can not be explained through this unique variable, since other parameters that determine the propagation speed of the waves in the ground must be taken into account.

It is recommended for future research that the data obtained be taken by the same measurement equipment to obtain a better comparability between the data.

Keywords: P-wave velocity, S-wave velocity, simple compression, density, cohesion, friction angle, granulometry

1 INTRODUCCIÓN

Dentro de los trabajos de diseño de una obra de ingeniería es necesario estimar un modelo geológico del subsuelo que a su vez alimente el modelo geotécnico a partir del cual se determinarán condiciones bien sea de cimentaciones, de estabilidad de taludes u otro requerimiento específico. Para hacer esta labor, se debe recurrir a métodos directos de exploración con perforaciones o apiques, muestreo y análisis de laboratorio, los cuales son completamente necesarios dado que se necesita de información primaria para la modelación geotécnica.

A pesar de que estos protocolos parecen claros, en el trabajo práctico regularmente se entra en debates como: ¿las investigaciones hechas son suficientes?, ¿el presupuesto destinado para ellas es el adecuado?, ¿cuál es el área de representatividad del dato de la perforación? Tratando de resolver este tipo de inquietudes, en los últimos años ha venido en aumento el interés por adicionar y sacar mejor provecho de los métodos geofísicos a las exploraciones, dada su capacidad de ofrecer imágenes bidimensionales del terreno.

Tradicionalmente la geofísica ha permitido modelar estratos litológicos y niveles de alteración, pero surge la pregunta de dicha validez para con las propiedades geomecánicas de los diversos materiales. Por ejemplo, para algo que llamemos “saprolito” hay un rango de velocidades de onda válidas y aceptadas, pero ¿es el mismo rango de velocidades para su resistencia a la compresión uniaxial?

Como ejercicio de validación con la Norma Sismo resistente (NSR-10) en su título H, se hacen en este trabajo clasificaciones de los tipos de suelo de los proyectos estudiados, que muestran las propiedades físicas del suelo con base a la velocidad de onda cortante V_s en los primeros 30m. Como núcleo central de la investigación hecha, se plantean correlaciones cuantitativas entre las velocidades de onda (P y S) y las variables geotécnicas de ángulo de fricción, cohesión, compresión simple, granulometría, densidad seca y húmeda, mediante el procesamiento de una cantidad importante de datos de proyectos de ingeniería reales ubicados en el departamento de Antioquia. Los resultados permitieron encontrar algunas

tendencias de correlación, pero se trata de un primer acercamiento que debe seguir siendo alimentado a futuro por nuevos datos en busca de una mejor aproximación.

No se encontraron trabajos similares con los cuales se pueda hacer una discusión válida, es claro que la disponibilidad de información es limitada, y las posibilidades de investigación de las compañías consultoras en el trópico es baja. A nivel mundial, se han desarrollado investigaciones que han demostrado las correlaciones estadísticas empíricas entre las velocidades de onda de corte (V_s) y el valor N_{spt} obtenido a través del ensayo de penetración estándar para diferentes categorías del suelo, dando como conclusiones que las ecuaciones obtenidas pueden ser reproducibles en suelos con características similares a las estudiadas (L'Heureux et.al., 2016; Strelec, 2016; Chappidi et al., 2008; Kirar et al., 2016; Maheswari et al., 2010, Pérez et al., 2012).

En Colombia autores como Alfaro, 2007 y Aristizabal et al., 2017, han realizado estudios que muestran relaciones entre parámetros geofísicos y geotécnicos. El primer artículo, muestra las correlaciones entre el valor N_{spt} obtenido a través del Ensayo de Penetración Estándar (STP) y la velocidad de onda de corte V_s obtenidas en los ensayos Down Hole en la ciudad de Bogotá. El segundo artículo, muestra correlaciones que permiten obtener propiedades mecánicas a partir de la relación V_p/V_s para dar respuesta oportuna a los problemas de estabilidad que puedan afectar a una comunidad u obras de infraestructura.

Aunque la mayoría de los autores referidos anteriormente propusieron ecuaciones empíricas reproducibles entre el valor N_{spt} y las velocidades de la onda de corte (V_s), sólo Aristizabal et al., 2017 describen las correlaciones cuantitativas entre variables geotécnicas como ángulo de fricción y cohesión con las variables geofísicas de V_p y V_s .

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Hacer una aproximación al entendimiento de la correlación existente entre variables geofísicas (velocidad de onda P y S) y parámetros geotécnicos (granulometría, densidades, cohesión, ángulo de fricción y resistencia a la compresión simple), a partir del análisis de 538 datos reales de 15 proyectos de ingeniería en Antioquia.

1.1.2 Objetivos específicos

- Buscar fuentes de información y extraer con criterio datos que apliquen para cumplir el objetivo.
- Obtener correlaciones cualitativas por medio de la comparación entre la estratigrafía y geofísica, y correlaciones cuantitativas por medio de regresiones lineales.
- Determinar por medio de regresión lineal el grado de ajuste de los datos para llegar a conocer las posibles limitaciones de las correlaciones.

1.2 METODOLOGÍA

El trabajo se realizó por medio de las siguientes etapas:

1) Compilación de datos

Diferentes empresas privadas se sumaron a la iniciativa planteada en esta tesis (IRYS, INTEGRAL, CONSULCIVIL, EXPLANAN y La Universidad EAFIT), dado que les pareció importante tener los resultados como herramienta de aplicación a sus futuros proyectos. Ellas nos proporcionaron un número indeterminado de proyectos de sus bases de datos, los cuales fueron escudriñados para extraer los que reunían las condiciones buscadas, de que fueran sitios donde existieran tanto exploraciones geotécnicas como geofísicas, y que además se hubiesen ejecutado ensayos de laboratorio.

A partir de la información obtenida, se seleccionaron 15 proyectos que se nombraron con letras de la A hasta la O para conservar la privacidad de los clientes. La selección de datos se basó en primer lugar, en identificar la localización de las perforaciones y apiques, para así seleccionar la línea sísmica correspondiente al lugar de exploración, teniendo como resultado 538 datos, de los cuales el proyecto A cuenta con 29 datos, el proyecto B 16 datos, el proyecto C 11 datos, el proyecto D 21 datos, el proyecto E 35 datos, el proyecto F 11 datos, el proyecto G 86 datos, el proyecto H 27 datos, el proyecto I 16 datos, el proyecto J 6 datos, el proyecto K 11 datos, el proyecto L 27 datos, el proyecto M 38 datos, el proyecto N 33 datos y el proyecto O 171 datos.

Posteriormente, los proyectos se unificaron en una sola base de datos para identificar en cada parámetro geotécnico la correspondencia de velocidad de onda P, S o ambas si era el caso.

2) Comparación de la estratigrafía por geotecnia y geofísica

A partir de los datos brindados por las empresas de las velocidades de onda S obtenidas de los ensayos ReMi y MASW y la descripción de cada uno de los estratos por medio de la exploración geotécnica, se realizó una correlación cualitativa teniendo en cuenta la norma NSR-10, la cual define los parámetros y clasifica el tipo de suelo existente en un rango de variación de la velocidad de onda de corte V_s en los primeros 30m.

3) Correlación de datos geofísicos y geotécnicos

Se identificó por cada parámetro geotécnico (granulometría, densidades, cohesión, ángulo de fricción y resistencia a la compresión simple) el tipo de velocidad de onda registrada (V_s/V_p). Consecutivamente, se realizó un gráfico de dispersión para cada variable, analizando la relación o dependencia que hay entre los datos estudiados, a partir del cual se

obtuvo la ecuación de la recta y el coeficiente de determinación (R^2) que nos indica el porcentaje del ajuste conseguido con el modelo lineal, donde a mayor porcentaje mejor es el modelo para predecir el comportamiento de la variable Y.

4) *Análisis de resultados*

Se basó fundamentalmente en entender la magnitud y proporcionalidad entre las variables contrastadas.

1.3 LIMITACIONES

Las correlaciones de datos hechas pueden sufrir de inexactitudes en diferente medida, a partir de situaciones como:

1) *Diferentes equipos de toma de datos, muestreo y ensayos*

Debido a que en el desarrollo de la investigación fueron utilizados diferentes proyectos alrededor de Antioquia, cada una de las empresas encargadas de realizarlos tenía sus propios equipos y softwares, por lo que se tiene un factor de error asociado tanto a la toma de la muestra, como a su proceso, bien sea de interpretación geofísica como de cálculo del parámetro de mecánica de suelos.

2) *Medición e interpretación de datos por diferentes profesionales*

A la hora de la toma de datos en campo y posterior análisis, cada empresa cuenta con un personal especializado para la medición e interpretación, por tanto, en el momento de dar un resultado, puede haber diferencias dependiendo de la pericia y experiencia del especialista involucrado.

3) *Separación en el tiempo y variaciones climáticas en que se realizaron las mediciones*

Al ser una compilación de varios estudios separados geográfica y temporalmente, no hay una homogeneidad en las condiciones climáticas y el año en que se realizaron no será el mismo, por lo que puede haber variaciones en los parámetros obtenidos.

4) Disponibilidad de datos en empresas privadas

La información para trabajar se limitó a la que permitieron usar las empresas consultadas; la mayor parte de las puertas que se tocaron para obtener datos no fueron abiertas, por lo que el número de datos limitan el proyecto. Es importante que se considere este trabajo como un punto de partida y alimentar la información a futuro para mejorar la precisión estadística.

2 ANTECEDENTES

No se encontraron estudios iguales al ejecutado en esta tesis, por lo que se puede considerar pionero, pero existen algunos con temática similar, que merecen la pena resaltar. En estudios anteriores (tabla 1) se han realizado correlaciones entre velocidad de onda de corte (V_s) y diferentes pruebas de campo como el ensayo de penetración estándar (SPT), prueba de piezocono (CPTU), Dynamic Probe Heavy (DPH), presentándose correlaciones satisfactorias, donde a partir de estas es posible complementar los estudios geotécnicos con las velocidades de onda de corte V_s , dando un mayor acercamiento a la realidad del suelo.

En Colombia son muy pocos los trabajos publicados que correlacionen velocidades de onda S y P y parámetros geotécnicos (tabla 2), y en Antioquia son prácticamente nulos. Sin embargo, al profundizar en la bibliografía, se encontraron estudios como el de Alfaro, 2007, en el cual se realizaron correlaciones entre el valor N a partir del ensayo de penetración estándar y velocidades de onda S, en arcillas en Bogotá, las cuales muestran tendencias positivas, determinando su reproducibilidad en suelos con características similares. También Aristizabal et al, 2017, determina la relación entre las velocidades de onda P y S con variables como ángulo de fricción, cohesión y compresión simple en cenizas volcánicas en Manizales, por medio del método de regresión lineal, las cuales arrojaron tendencias positivas entre ambos parámetros. Aunque estos resultados muestran comportamientos relacionables entre las variables geotécnicas y las velocidades de onda S y P, no son totalmente comparables con los resultados que se esperan obtener en el presente trabajo, ya que las variables que se incluyen en estas correlaciones no son las mismas a las empleadas en este estudio.

Dado que este estudio tiene la posibilidad de contar con 15 proyectos en Antioquia que proporcionan estas variables, se proponen correlaciones cuantitativas y cualitativas entre parámetros como la resistencia a la compresión

simple, la cohesión, densidades, ángulo de fricción y granulometría de los suelos, con las velocidades de onda S y P.

Tabla 1 Algunos estudios en el mundo relacionados con correlaciones entre parámetros geotécnicos y velocidades de onda

Artículo	Autores	Ciudad	Objetivo
Dynamic soil properties for microzonation of Delhi, India	Chappidi. H y Gunturi, R 2008	Delhi/India	Correlaciones entre velocidad de onda de corte y valores de N por el método SPT. para uso de ingenieros y diseñadores
Use of Surface Waves in Statistical Correlations of Shear Wave Velocity and Penetration Resistance of Chennai Soils	Maheswari, U, R, Boominathan, A, Dodagoudar, G, R. 2010	Chennai / India	Correlaciones empíricas entre Vs y el valor de SPT-N para diferentes categorías de suelo
A Correlation of Shear Wave Velocity and Standard Penetration Resistance	Marto, Aminaton., Tan Choy Soon, Fauziah Kasim, 2013	Malasia	Correlación general entre la velocidad de la onda de corte y la resistencia a la penetración estándar basada en ecuaciones de investigación empírica que se han establecido en todo el mundo
Correlaciones empíricas entre la velocidad de propagación de las ondas S (Vs) y otros parámetros geotécnicos para los suelos de Madrid	Pérez Santisteban, Muñoz-Martín.A, Carbó Gorosabe A., Ruiz Fonticiella J.M. 2013	Madrid, España	Correlación estadística entre la Vs medida mediante la técnica ReMi o sísmica pasiva y los siguientes parámetros geotécnicos: resistencia a la penetración estándar (NSPT), resistencia a la compresión simple (Qu) y los módulos de deformación (Eo, Go, Ko), a partir de un análisis de regresión lineal.

Correlations between shear wave velocity and geotechnical parameters in Norwegian clays	L'Heureux, J. S; Long. M. 2016	Noruega	Correlación entre velocidades de onda S y parámetros de penetración del cono, resistencia al corte no drenado y parámetros de compresión 1D para arcillas en Noruega
Empirical correlation between the shear-wave velocity and the dynamic probing heavy test: case study, varaždin, Croatia	Strelec Stjepan, 2016	Croacia	Correlaciones estadísticas empíricas entre la velocidad de onda de corte VS (método MASW) y la resistencia a la penetración en el suelo NDPH (el módulo de corte (Go) y el módulo de Young (Eo y Er))
Correlation Between Shear Wave Velocity (Vs) and SPT Resistance (N) for Roorkee Region	Kirar, Bablu., Maheshwari. B. K. , 2016	Roorke / india	Presenta un desarrollo de correlación confiable entre la Velocidad de onda (S) medida por análisis multicanal de pruebas de ondas superficiales y el valor de N medido utilizando SPT en varios sitios en la región de Roorkee

Tabla 2 Estudios en Colombia relacionados con correlaciones entre parámetros geotécnicos y velocidades de onda. ¡Error! Vínculo no válido.

3 MARCO TEORICO

En este capítulo, se realiza una breve descripción de los parámetros geofísicos y geotécnicos utilizados en los 15 proyectos analizados, los cuales incluyen métodos de prospección sísmica como son refracción, Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), y Refraction Microtremor (ReMi). Además, se describen brevemente los parámetros geotécnicos como análisis granulométrico, corte directo y de compresión simple.

3.1 PROSPECCIÓN SÍSMICA

3.1.1 Principios metodológicos

La prospección sísmica es un método geofísico no destructivo, que utiliza el mismo principio y leyes físicas de la sismología, con la diferencia que la fuente generadora de energía es una turbación artificial (caída de pesos, explosivos, cañones de aire, vibroseis), que genera ondas elásticas, las cuales se propagan por el subsuelo acorde a las propiedades elásticas del medio; estas son registradas por geófonos distribuidos en la superficie a lo largo de la línea geofísica (*Figura 1*). El método, según su arreglo, equipos y software utilizado, permite registrar bien sea la llegada de las ondas P como también las ondas S, permitiendo así definir diferencias de densidad entre estratos y, en el caso de los arreglos para las ondas S, posibilita la obtención de parámetros elastoplásticos como la relación de Poisson y otros módulos dinámicos (Ulloa et al, 2015).

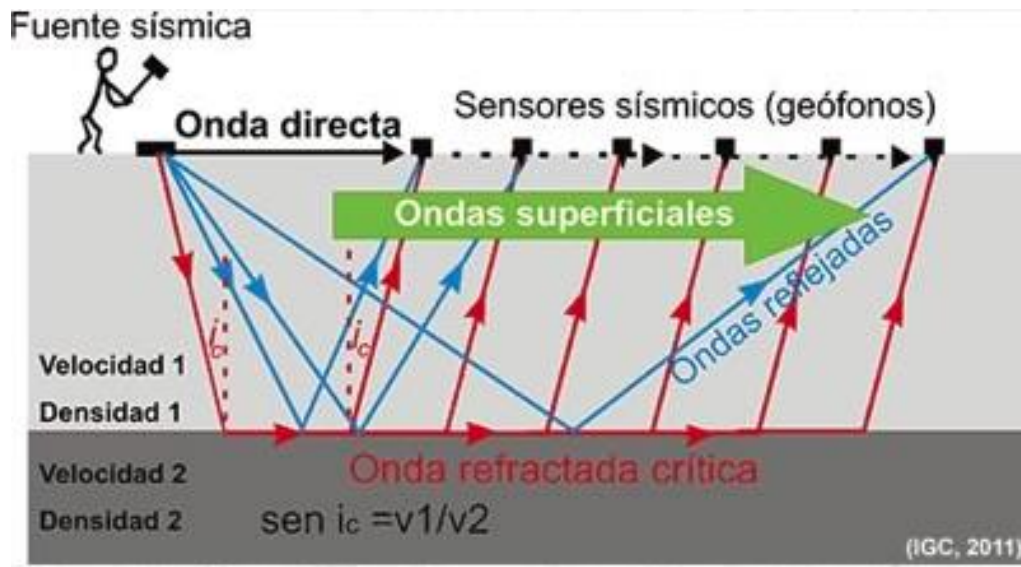


Figura 1. Ondas refractadas en diferentes capas del subsuelo y captadas por los geófonos. Tomado de: Rivera et al, 2016

La profundidad a la que se puede prospectar se encuentra aproximadamente entre 1/3 y 1/2 de la longitud del tendido de los geófonos en superficie dependiendo del método que se use en la prospección; permitiendo así determinar espesores de capas del subsuelo, buzamientos, y las velocidades de propagación de las ondas sísmicas en cada una de ellas (Ulloa et al, 2015).

El procesamiento e interpretación de la información obtenida, permite detectar la forma de las estructuras geológicas y sus profundidades, además de propiedades de interés geotécnico tales como: morfologías del subsuelo, estado de compactación y fracturación de los materiales, meteorización, alteraciones porosidad, constantes elásticas de los materiales y grado de saturación (Estrada, 2008).

3.1.2 Refracción sísmica

Método de exploración geofísica que permite conocer la variación vertical de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales u Ondas P en el terreno, permitiendo así inferir la estratigrafía.

Este método consiste en producir artificialmente ondas elásticas en la superficie del terreno, las cuales se propagan a través del terreno y son registradas con geófonos distribuidos en la superficie a lo largo de la línea geofísica. La forma de la onda registrada permite identificar el tiempo de llegada de cada onda a cada uno de los geófonos. Las velocidades de propagación de las ondas son calculadas empleando los tiempos de llegada, y la distancia entre los geófonos y el punto de impacto de la señal artificial (Restrepo, 2016).

Es importante resaltar, que la refracción sísmica presenta ciertas limitaciones, las cuales resultan fundamentales en el momento de procesar la información tales como:

- Para que exista refracción de las ondas, la velocidad de estas debe ser necesariamente creciente en profundidad. En caso de suelos con capas intermedias de menor velocidad el método no las visualizara.
- El contraste de velocidad entre los estratos y el espesor entre estos debe ser lo suficientemente alto para que puedan ser representados con claridad en las curvas velocidad/tiempo.
- Se requiere disponer de zonas de gran longitud en superficie para la disposición del tendido, ya que este es directamente proporcional con el alcance en profundidad obtenido, además esta profundidad está condicionada por el tipo de fuente activa empleada.

3.1.3 Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW).

Se basa en la información recolectada y el análisis de la dispersión de ondas superficiales, las cuales pueden ser relacionadas matemáticamente con la velocidad de onda S o de corte en el subsuelo (Ulloa, 2015).

Los registros se realizan con doce o más geófonos en distancias cortas y largas desde una fuente impulsiva o vibratoria, que proporcionan una redundancia estadística para medir las velocidades de fase. Los datos multicanal permiten la identificación y rechazo de los modos no fundamentales de ondas Rayleigh, permiten también un proceso más efectivo para la eliminación del ruido y un proceso de recolección de datos más rápido (Louie, 2001).

Este método además presenta múltiples aplicaciones tales como:

- Permite detectar inversiones de velocidad de ondas de corte.
- Optimización de esquemas de diseño de las edificaciones.
- Permite la descripción estratigráfica sísmica y la profundidad de los estratos sísmicos por medio de la comparación de las ondas de corte.
- Además, sirve como complemento para estudios de canteras, presas de agua, relaves, botaderos, diseños de puentes, estabilidad de taludes.
- Resulta una alternativa muy económica para la evaluación de los parámetros elásticos del suelo, en conjunto con ensayos de refracción sísmica.

3.1.4 Sísmica de refracción- Microtremores (Re-Mi)

Se basa en el análisis de dispersión de ondas superficiales las cuales pueden estar relacionadas matemáticamente con la velocidad de onda S o de corte en el subsuelo.

Esta técnica usa el mismo arreglo de la sísmica de refracción y hace uso de los microtremores naturales o producidos por fuentes lejanas, donde se identifica la coherencia entre sismogramas mediante correlación auto espacial y se obtienen una curva de dispersión de la cual se derivan los valores de velocidad de onda S en función de la profundidad (*Figura 2*). Esta técnica resulta ideal para sitios urbanos además de ser muy económica (Pacheco et al, 2016).

Este método además presenta múltiples aplicaciones tales como:

- Definición y mapeo de la estratigrafía, variaciones laterales y verticales; también permite definir profundidad del substrato y perfil de alteración.
- Definición de parámetros elásticos y dinámicos, y geotécnicos integrando medidas sísmicas a valores de densidad.
- Reconocimiento y optimización de ubicación para el programa de perforación y estudios geotécnicos.

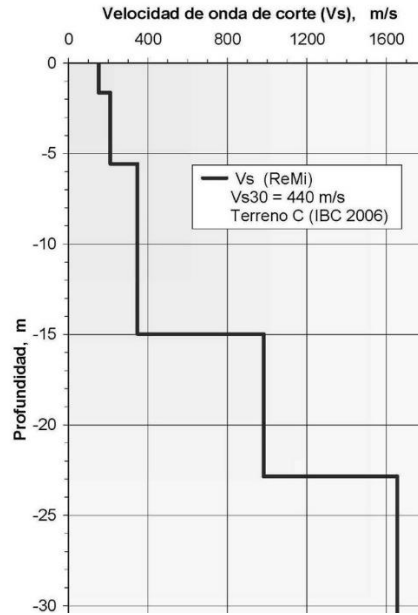


Figura 2. Perfil de velocidade de onda de corte (V_s) contra profundidade. Tomado de: Lazcano, 2012.

3.2 PARAMETROS GEOTECNICOS

3.2.1 Granulometría de los suelos

La granulometría de los suelos hace referencia a la distribución de los tamaños de las partículas que conforman el suelo por medio de la división del mismo en diferentes fracciones seleccionadas por el tamaño de sus partículas componentes a partir análisis de tamices. El orden de estos tamices siempre irá de la abertura más grande en la parte superior hasta la abertura que sea del orden de las partículas las finas del suelo en la parte inferior (Osorio,2002).

3.2.2 Resistencia al corte de los suelos

La resistencia cortante de un suelo es la resistencia interna por unidad de área que la masa de suelo puede ofrecer a la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano en su interior (Braja, 2013).

Tradicionalmente se realizan ensayos de laboratorio para el estudio de la resistencia a corte de un suelo, como el corte directo, compresión simple y compresión triaxial. El ensayo de corte directo determina los parámetros de resistencia al corte de los suelos, ángulo de fricción y cohesión; el ensayo de compresión simple o de compresión uniaxial permite determinar la resistencia de los suelos cohesivos en términos de esfuerzos totales; y el ensayo de compresión triaxial obtiene parámetros del suelo y la relación esfuerzo-deformación por medio de la determinación del esfuerzo cortante.

1) Ensayo de corte directo:

Este ensayo es útil para la determinación en el material de la máxima resistencia al corte y la resistencia residual a lo largo de planos conocidos de baja resistencia (Norma INV E-154-07) definiendo el ángulo de fricción y la cohesión de la muestra. Este ensayo consiste en (*Figura 3*)

- a) Colocación de la muestra de ensayo en el dispositivo de corte directo
- b) Aplicación de una carga normal determinada
- c) Disposición de los medios de drenaje y humedecimiento de la muestra
- d) Consolidación de la muestra bajo la carga normal
- e) Liberación de los marcos que sostienen la muestra
- f) Aplicación de la fuerza de corte para hacer fallar la muestra

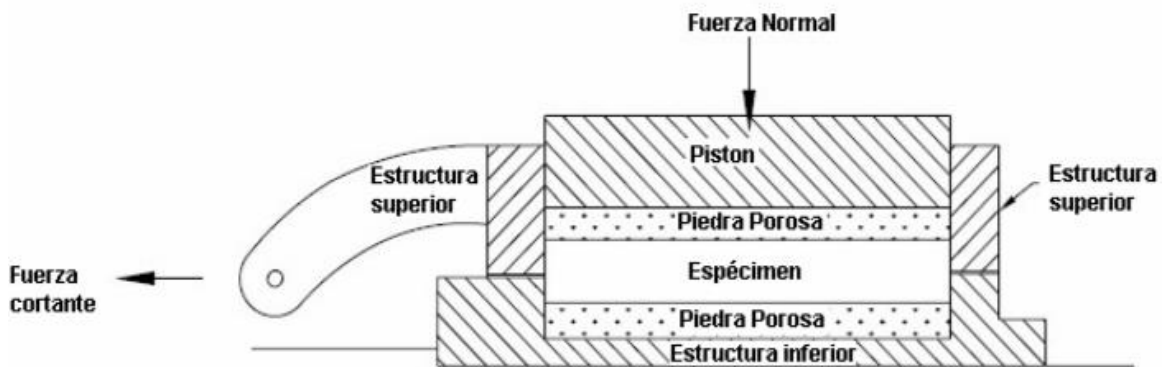


Figura 3 Dispositivo para el ensayo de corte directo

La cohesión de un suelo es la fuerza interna que une las partículas del terreno, la cual varía según el contenido de humedad, teniendo los suelos arcillosos mayor cohesión que los suelos limosos y los suelos arenosos una cohesión prácticamente nula.

El ángulo de fricción es el máximo ángulo de pendiente para un conjunto de material granular, normalmente los suelos arenosos tienen un ángulo de fricción mayor que los suelos limosos sin plasticidad. Entre más denso se encuentre el suelo, el Ángulo de fricción será superior.

2) Ensayo de compresión simple:

Con este ensayo se determina la resistencia a la compresión uniaxial. En el dispositivo para el ensayo de compresión simple se somete una muestra cilíndrica de suelo sin confinamiento lateral a una carga axial, con el fin de medir deformaciones y registrar la fuerza que produce la falla (*Figura 4*).

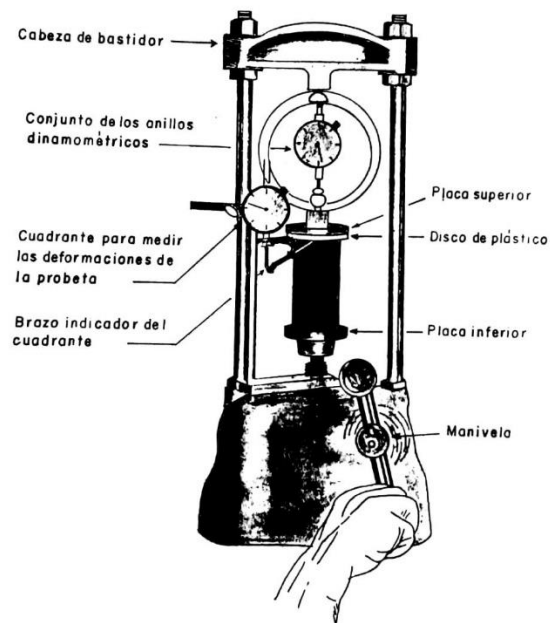


Figura 4 Dispositivo utilizado para el ensayo de compresión simple. Tomada de: Arango, 1985.

En la *Figura 5* se observa la gráfica del esfuerzo normal vs la deformación unitaria para el ensayo de corte directo, donde (q_u) es la resistencia a la compresión simple y se define como el máximo valor de σ en el grafico esfuerzo-deformacion.

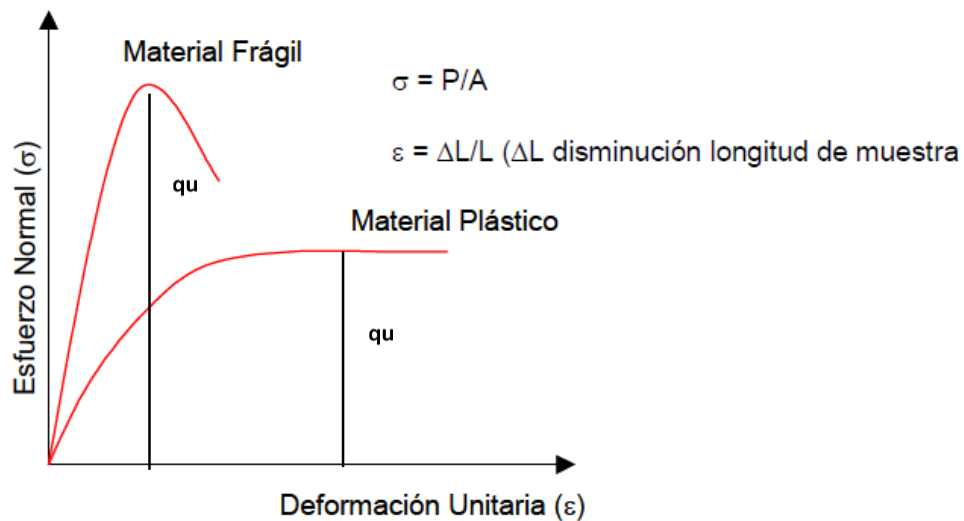


Figura 5 Resistencia a la compresión simple (q_u) en materiales frágiles y dúctiles

3.2.3 Densidad

1) Densidad húmeda

Se obtiene al dividir el peso del suelo húmedo por el volumen de la muestra.

$$\gamma_h = \frac{Wh}{V}$$

h = Peso del suelo húmedo

V = Volumen

2) Densidad seca

Se obtiene al dividir el peso del suelo seco por el volumen de la muestra

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

W_s = Peso del suelo seco

V = Volumen

4 RESULTADOS

4.1 CORRELACIONES CUALITATIVAS

En los siguientes numerales se describe brevemente los 15 proyectos seleccionados para el estudio, y se asocian en tablas los datos de velocidad de onda, con número de ensayos de laboratorio, el nivel de alteración y la litología donde se tienen reportados. La información no siempre fue completa dados los diversos autores consultados, por lo que faltan algunos de los datos que se quisieron mostrar.

Dentro de los análisis geotécnicos para una construcción, los efectos locales de la respuesta sísmica deben evaluarse con base en la clasificación de unos perfiles de suelo para los 30 m más superficiales, definidos por la norma sismo resistente NSR-10 en su título A (Tabla 3). Uno de los parámetros para la definición de dichos perfiles es la medida de la velocidad de onda de corte en m/s, dato con el que se cuenta en estos análisis y por ende se da ese aporte de clasificación; por escasez de datos únicamente a 9 proyectos (A,C,D,F,H,J,K,L,O) de los 15 estudiados se les realizó la asociación de la velocidad de onda S con el tipo de suelo.

Para la ejecución de este trabajo no se tuvo acceso a las muestras de los trabajos originales, por lo que se trabaja con los perfiles de alteración descritos originalmente, algunos definidos con la metodología de Deere y Patton, 1971, y otros con la de Deerman, 1995, definidos como se muestran en las figuras 6 y 7, respectivamente.

Tabla 3 Clasificación de los perfiles de suelos según la norma NSR-10, título A.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500 \text{ m/s}$
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 760 \text{ m/s}$
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 360 \text{ m/s}$
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2)$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 180 \text{ m/s}$
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o $100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_u \geq 50 \text{ kPa} (\approx 0.5 \text{ kgf/cm}^2)$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$180 \text{ m/s} > \bar{v}_s$
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $50 \text{ kPa} (\approx 0.50 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_u$
F	<p>Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases:</p> <p>F₁ — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.</p> <p>F₂ — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).</p> <p>F₃ — Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con Índice de Plasticidad IP > 75)</p> <p>F₄ — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)</p>	

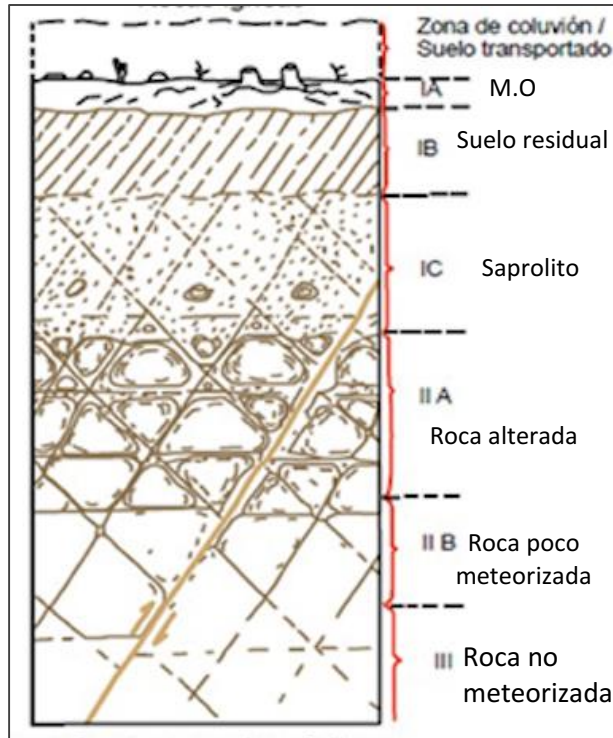


Figura 6 Perfil de meteorización propuesto por Deere y Patton, 1971

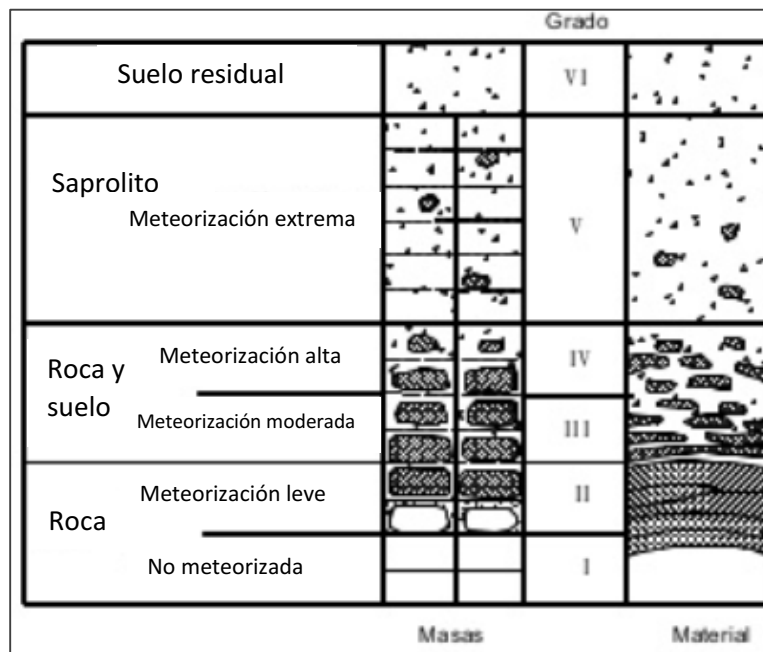


Figura 7 Perfil de meteorización propuesto por Dearman, 1995

4.1.1 Proyecto A.

En este proyecto se plantea el transporte de relaves provenientes de la explotación de la mina por medio de un relaveducto, donde se analizaron 5 perforaciones a retropercusión, 4 apiques y 4 líneas sísmicas de refracción tipo Re-Mi.

Proyecto A					
Exploración Geotécnica					
Granulometría	Densidad húmeda	Densidad seca	Cohesión	Ángulo de fricción	Compresión simple
49	8	3	6	19	4
Exploración Geofísica					
Vs			Vp		
24			0		
Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Correlación (Deere y Patton, 1971)	Correlación NSR-10	Descripción
0m - 10m		112- 214	Horizonte de meteorización IA	Perfil tipo D	Cuarzodiorita Suelo limo-arcilloso, con moderada cantidad de materia orgánica, de plasticidad media y rigidez media a alta
10m- 25m		280- 340	Horizonte de meteorización IIA	Perfil tipo D	Cuarzodiorita Suelo saprolítico con algunas zonas meteorizadas de suelo residual.
25m en adelante		365- 585	Horizonte de meteorización IIB	Perfil Tipo C	Cuarzodiorita Roca levemente meteorizada

4.1.2 Proyecto B

Es un proyecto hidroeléctrico en el que se realizó una campaña de exploración del subsuelo a partir de perforaciones con ejecución de ensayos de penetración estándar y recuperación de muestras alteradas e inalteradas para su posterior caracterización geotécnica en laboratorio.

En total se realizaron 82,4 m de perforación, distribuidas en once sondeos, en los que se recuperaron 22 muestras inalteradas en tubo Shelby y 148 muestras alteradas.

Aunque en este proyecto no se tienen velocidades de onda S asociadas a perforaciones o apiques, igualmente se realizó un conteo de la cantidad de datos obtenidos a partir de este proyecto.

Proyecto B					
Exploración Geotécnica					
Granulometría	Densidad húmeda	Densidad seca	Cohesión	Ángulo de fricción	Compresión simple
10	12	12	0	0	12
Exploración Geofísica					
Vs			Vp		
0			16		

4.1.3 Proyecto C

Es un proyecto de vivienda multifamiliar, el cual contempla la construcción de una torre de diecinueve pisos, de los cuales dos serán parqueaderos.

El plan exploratorio consistió en dos sondeos con equipo mecánico de acción hidráulica, toma de muestras y ensayo de penetración estándar, estas perforaciones alcanzaron profundidades de 28 y 25 m bajo el nivel del terreno, adicionalmente se ejecutaron dos sondeos de geofísica de 45m de longitud, sondeo tipo ReMi y un sondeo del tipo de refracción sísmica, los cuales permiten conocer la velocidad de onda cortante (Vs) y la velocidad de onda de compresión (Vp).

Proyecto C					
Exploración Geotécnica					
Granulometría	Densidad húmeda	Densidad seca	Cohesión	Ángulo de fricción	Compresión simple
33	0	0	3	3	0
Exploración Geofísica					
Vs			Vp		
11			11		
Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Correlación (Dearman, 1995)	Correlación NSR-10	Descripción
0m - 3,5m	350	211		Perfil tipo D	Depósitos de vertiente conformada por limos-arcillosos.
3,5m- 9m	470	230			
9m- 14,3m	716	291			
					Gneis - Nivel de saprolito, conformado

23m en adelante	908	310	Perfil de meteorización V	Perfil tipo D	por arena cuarzosa con textura de roca.
-----------------	-----	-----	---------------------------	---------------	---

4.1.4 Proyecto D

En este proyecto, plantea el desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica, donde se analizaron 6 líneas sísmicas de refracción y MASW, 4 perforaciones y 2 apiques.

Proyecto D					
Exploración Geotécnica					
Granulometría	Densidad húmeda	Densidad seca	Cohesión	Ángulo de fricción	Compresión simple
30	3	3	8	8	0
Exploración Geofísica					
Vs			Vp		
18			18		
Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Correlación (Dearman, 1995)	Correlación NSR-10	Descripción
0m - 8m	585	295		Perfil tipo D	Depósito de flujo de escombros de composición limo-arcillosa
8m - 15m	650	350	Perfil de meteorización V	Perfil tipo C	Cuarcita Saprolito de composición limo-arcillosa
15m en adelante	821	500	Perfil de meteorización IV	Perfil tipo B	Cuarcita Transición suelo-roca. Roca moderadamente meteorizada.

4.1.5 Proyecto E

Proyecto vial donde se desarrolla toda la parte geológica y geotécnica, como insumo importante para el diseño de la inclinación de taludes, capacidad portante de obras menores y mayores (puentes y pontones), así como la capacidad de soporte para el diseño del pavimento.

Se realizaron alrededor de 75 apiques, realizando ensayos de densidad, límites, clasificaciones, granulometrías y materia orgánica para muestras talladas in-situ y fabricadas en laboratorio.

Se realizaron 10 líneas sísmicas con el fin de complementar las perforaciones realizadas en algunos sitios, y en otras como parte importante de la investigación.

Aunque en este proyecto no se tienen velocidades de onda S asociadas a perforaciones o apiques, igualmente se realizó un conteo de la cantidad de datos obtenidos a partir de este proyecto.

Proyecto E					
Exploración Geotécnica					
Granulometría	Densidad húmeda	Densidad seca	Cohesión	Ángulo de fricción	Compresión simple
78	18	26	10	10	17
Exploración Geofísica					
Vs			Vp		
0			35		

4.1.6 Proyecto F

En este proyecto, se plantea una Pequeña Central Hidroeléctrica, donde se analizaron 5 perforaciones, 3 apiques y 5 líneas sísmicas de refracción tipo Re-Mi.

Proyecto F					
Exploración Geotécnica					
Granulometría	Densidad húmeda	Densidad seca	Cohesión	Ángulo de fricción	Compresión simple
33	6	0	7	7	0
Exploración Geofísica					
Vs			Vp		
11			0		
Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Correlación (Deere y Patton, 1971)	Correlación NSR-10	Descripción
0m - 6m		150- 250		Perfil tipo E	Depósitos de vertiente de lodos y escombros
6m - 9m		400	Horizonte IIA	Perfil tipo D	Saprolito de esquisto verde
9m - 28m		900	Horizonte IIB	Perfil tipo B	Saprolito de esquisto verde y granito,

					perteneciente a un depósito de vertiente
--	--	--	--	--	--

4.1.7 Proyecto G

Proyecto vial donde la campaña de investigación geotécnica incluyó 148 sondeos a rotación con una longitud total de perforación de 13493.1 m, 72, perfiles sísmicos de refracción con una longitud total de 15825 m, 4 perfiles de resistividad eléctrica, con una longitud total de 3500 m, 211 estaciones geo mecánicas, 521 ensayos de laboratorio sobre las muestras extraídas en los sondeos, 42 ensayos de permeabilidad in-situ tipo Lugeon en los sondeos y 338 ensayos in-situ de rebote Schmidt sobre testigos de los sondeos.

Aunque en este proyecto no se tienen velocidades de onda S asociadas a perforaciones o apiques, igualmente se realizó un conteo de la cantidad de datos obtenidos a partir de este proyecto.

Proyecto G					
Exploración Geotécnica					
Granulometría	Densidad húmeda	Densidad seca	Cohesión	Ángulo de fricción	Compresión simple
63	0	0	0	0	71
Exploración Geofísica					
Vs			Vp		
0			86		

4.1.8 Proyecto H

En este proyecto se analizaron 3 perforaciones que alcanzaron los 25m de profundidad, 3 líneas sísmicas de refracción tipo MASW y ReMi.

Proyecto H					
Exploración Geotécnica					
Granulometría	Densidad húmeda	Densidad seca	Cohesión	Ángulo de fricción	Compresión simple
8	6	0	0	6	6
Exploración Geofísica					
Vs			Vp		
27			27		

Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Correlación (Deere y Patton, 1971)	Correlación NSR-10	Descripción
0m - 6m	505	240		Perfil tipo D	Depósito antrópico
6m- 17m	959	345		Perfil tipo D	Nivel de conglomerado, constituido por clastos predominantemente de cuarzo.
17- 25m	1431	608- 700		Perfil tipo B	Variación lateral donde hacia el SW, se presenta un estrato de lodolita y hacia el NW, un estrato de arenisca

4.1.9 Proyecto I

En este proyecto se considera el desarrollo de una central hidroeléctrica; para el cual analizaron 3 perforaciones y 4 líneas sísmicas de refracción.

Aunque en este proyecto no se tienen velocidades de onda S asociadas a perforaciones o apiques, igualmente se realizó un conteo de la cantidad de datos obtenidos a partir de este proyecto.

Proyecto I					
Exploración Geotécnica					
Granulometría	Densidad húmeda	Densidad seca	Cohesión	Ángulo de fricción	Compresión simple
48	3	3	3	3	2
Exploración Geofísica					
Vs			Vp		
0			16		

4.1.10 Proyecto J

En este proyecto se considera la construcción de una pequeña central hidroeléctrica (PCH) a filo de agua con una capacidad instalada de 4,54 MW.

El programa de exploración llevo a cabo un reconocimiento geológico general de la zona, se contó con información existente de perforaciones, así como 4 líneas geofísicas y 3 apiques realizados durante la fase de rediseño.

Por medio del ensayo MASW (Análisis de ondas superficiales en arreglo multicanal), fue posible identificar el perfil de velocidad de onda de corte (V_s) a diferente profundidad para cada una de las líneas investigadas.

Proyecto J					
Exploración Geotécnica					
Granulometría	Densidad húmeda	Densidad seca	Cohesión	Ángulo de fricción	Compresión simple
30	0	0	0	0	0
Exploración Geofísica					
Vs			Vp		
5			5		
Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Correlación (Deere y Patton, 1971)	Correlación NSR-10	Descripción
0m - 7m	709- 1070	344- 716		Perfil tipo C	Suelos muy densos o roca blanda
7m- 13m	1442- 2211	960- 1095		Perfil tipo B	Roca de rigidez media
13m en adelante	>2070	1493 - 2000		Perfil tipo A	Roca competente

4.1.11 Proyecto K

Este se plantea como un proyecto hidroeléctrico; en el cual se analizaron 4 perforaciones y 2 líneas sísmicas de refracción tipo ReMi.

Proyecto K					
Exploración Geotécnica					
Granulometría	Densidad húmeda	Densidad seca	Cohesión	Ángulo de fricción	Compresión simple
33	4	4	2	2	4
Exploración Geofísica					
Vs			Vp		
11			0		
Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Correlación (Deere y Patton, 1971)	Correlación NSR-10	Descripción
0m - 8m		243- 350		Perfil tipo D	Depósito de vertiente
8m- 20m		497- 650	Horizonte de meteorización IC	Perfil tipo C	Suelo de textura arcillosa con presencia de bloques de rocas volcánicas

20- 30m		650- 918	Horizonte de meteorización IIA	Perfil tipo B	Estrato de aglomerado, con una relación suelo/bloques 10/90
---------	--	----------	--------------------------------	---------------	---

4.1.12 Proyecto L

Este proyecto plantea como un corredor vial, con cinco unidades funcionales, donde se analizaron 5 perforaciones y 5 líneas sísmicas tipo MASW.

Proyecto L					
Exploración Geotécnica					
Granulometría	Densidad húmeda	Densidad seca	Cohesión	Ángulo de fricción	Compresión simple
39	18	18	1	7	15
Exploración Geofísica					
Vs			Vp		
27			0		
Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Correlación (Deere y Patton, 1971)	Correlación NSR-10	Descripción
0- 7m		253		Perfil tipo D	Depósitos de vertiente
7m - 15m		540	Horizonte de meteorización IIA	Perfil tipo C	Saprolito de lodolita
15m - 30m		694	Horizonte de meteorización IIB	Perfil tipo B	Andesita portfirítica levemente meteorizada

4.1.13 Proyecto M

El estudio tiene un alcance de diseño de obras para construcción, por lo tanto, las descripciones geológicas se acompañaron de un programa detallado de exploración en los sitios de obra para estimar las condiciones del subsuelo con el fin de ofrecer la información requerida por el área de diseño para definir los tipos de cimentación y las condiciones de excavaciones a realizar.

Se excavaron un total de 23,76 m, distribuidos en 6 apiques (calicatas) para la conducción y 6 apiques para la vía de acceso a casa de máquinas; se realizaron 5 sondeos a percusión para un total de 41,90 m; se realizaron 5 líneas de refracción sísmica de 110 m cada una, siguiendo el rumbo de la conducción superficial hasta

la casa de máquinas. El objetivo de esta exploración indirecta fue la de determinar las condiciones del subsuelo en un área mayor, al permitir extrapolar las condiciones encontradas con la exploración directa.

Aunque en este proyecto no se tienen velocidades de onda S asociadas a perforaciones o apiques, igualmente se realizó un conteo de la cantidad de datos obtenidos a partir de este proyecto.

Proyecto M					
Exploración Geotécnica					
Granulometría	Densidad húmeda	Densidad seca	Cohesión	Ángulo de fricción	Compresión simple
105	0	0	0	0	0
Exploración Geofísica					
Vs			Vp		
0			38		

4.1.14 Proyecto N

El informe presenta análisis por amenaza, vulnerabilidad y riesgo por torrencialidad de la García y Acequia.

La información de la exploración de campo, utilizada para evaluar las condiciones geotécnicas del subsuelo, fue obtenida a partir de 8 perforaciones exploratorias por el sistema de rotopercusión llegando a una profundidad máxima de 15m.

Durante la campaña de exploración e investigación del subsuelo para cada uno de los sondeos se llevó a cabo el ensayo de penetración estándar a intervalos de 1m, posteriormente las muestras recolectadas fueron llevadas al laboratorio, donde se les practicaron ensayos de clasificación para conocer el tipo de suelos, propiedades como humedad y límites de Atterberg.

Por medio de la prueba MASW 2D se conoció la velocidad media de onda cortante.

Proyecto N					
Exploración Geotécnica					
Granulometría	Densidad húmeda	Densidad seca	Cohesión	Ángulo de fricción	Compresión simple
9	0	0	14	14	0
Exploración Geofísica					
Vs			Vp		
33			0		
Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Correlación (Deere y Patton, 1971)	Correlación NSR-10	Descripción
0m - 7m		280		Perfil tipo D	
7m- 14m		350		Perfil tipo D	
14m en adelante		500		Perfil tipo C	

4.1.15 Proyecto O

Este estudio fue realizado con el fin de la ampliación de un parque industria, donde se realizaron exploraciones directas e indirecta del predio donde se localizó el proyecto, mediante el uso de perforaciones, apiques y ensayos de Refracción Sísmica y dispersión de ondas superficiales MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), el cual proporciona como resultado el perfil de velocidad de propagación de onda de corte, en profundidad.

Proyecto O					
Exploración Geotécnica					
Granulometría	Densidad húmeda	Densidad seca	Cohesión	Ángulo de fricción	Compresión simple
505	0	0	32	32	13
Exploración Geofísica					
Vs			Vp		
54			87		
Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Correlación (Deere y Patton, 1971)	Correlación NSR-10	Descripción
0- 8m	336- 408	280		Perfil tipo D	Suelo blando
8m- 24m	756- 1167	709		Perfil tipo D	Suelo de rigidez media
24m- 32	1227	550- 980		Perfil tipo C	Suelo denso

4.2 CORRELACIONES CUANTITATIVAS

Se presentan correlaciones estadísticas por regresión lineal entre las velocidades de onda S y onda P y las siguientes variables geotécnicas: compresión simple, ángulo de fricción, cohesión, densidades y granulometría. La cantidad de datos obtenidos de la exploración directa e indirecta para la correlación se muestran en las tablas 4 a 10.

4.2.1 Relación entre velocidades de onda y la resistencia a la compresión simple

La resistencia a la compresión simple y la velocidad de onda, permiten tener un conocimiento de la distribución y continuidad de la resistencia de los suelos, intentando comprender la relación o razón por la cual se cumple el hecho de que a mayor resistencia del material mayores son los valores de la velocidad de onda y de compresión simple.

Mediante esta correlación se obtuvieron la Figura 8 y Figura 9, con su respectivo coeficiente de determinación (R^2) que proporciona la calidad del modelo.

Tabla 4 Cantidad de datos utilizados para la correlación entre la compresión simple y velocidades de onda

Resistencia a la compresión simple	
Vs	Vp
45 datos	52 datos

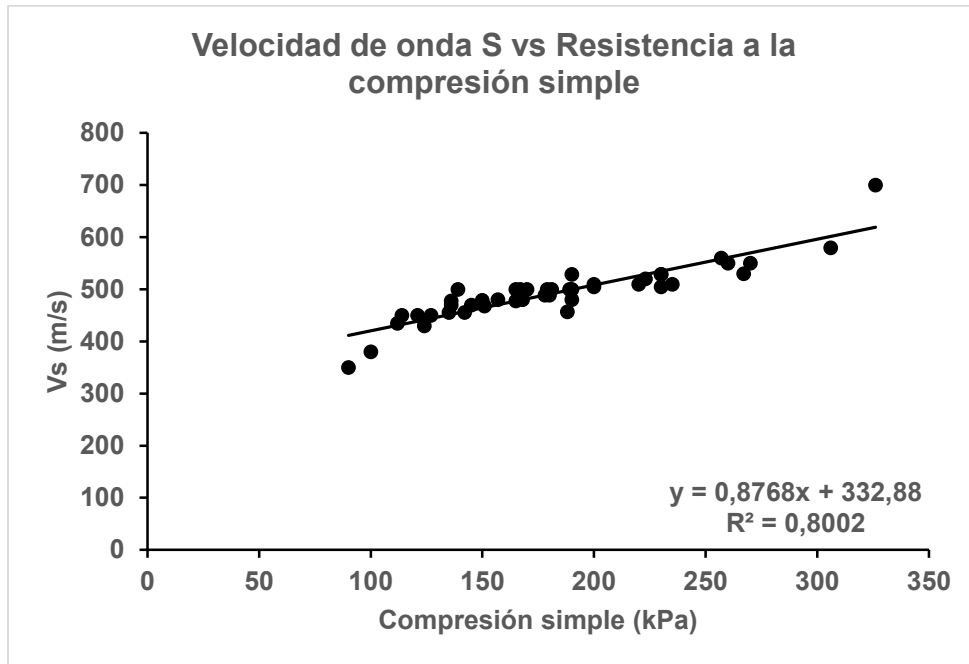


Figura 8 Correlación entre la velocidad de onda S y la resistencia a la compresión simple

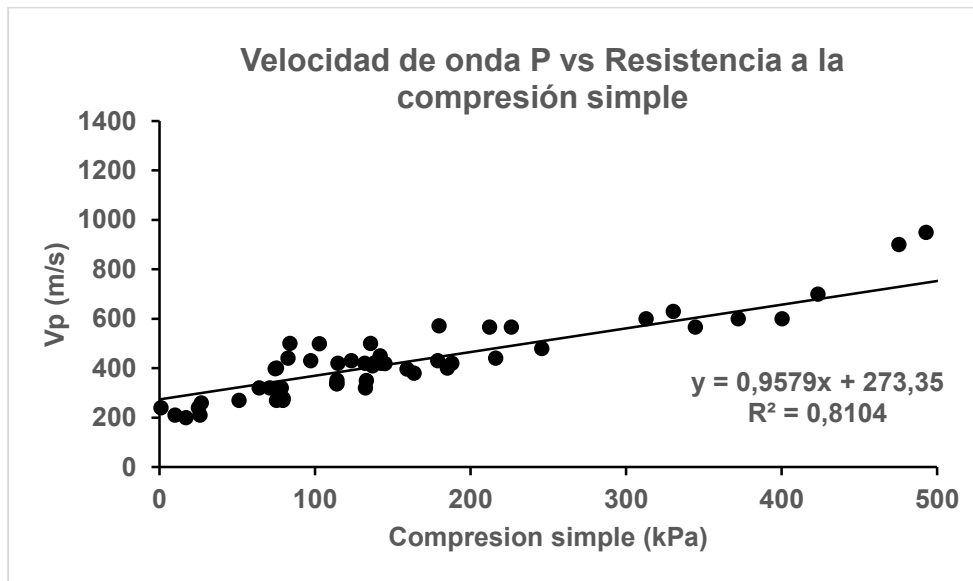


Figura 9 Correlación entre la velocidad de onda P y la resistencia a la compresión simple

4.2.2 Relación entre velocidades de onda y ángulo de fricción (Φ)

El ángulo de fricción es el máximo ángulo de pendiente para un conjunto de material, el cual depende de la densidad y cohesión, donde a mayor ángulo de fricción mayor será la velocidad de onda.

Mediante esta correlación se obtuvieron la figura 9 y figura 10, con su respectivo coeficiente de determinación (R^2) que proporciona la calidad del modelo.

Tabla 5 Cantidad de datos utilizados para la correlación entre el ángulo de fricción y velocidades de onda

Ángulo de fricción	
Vs	Vp
52 datos	30 datos

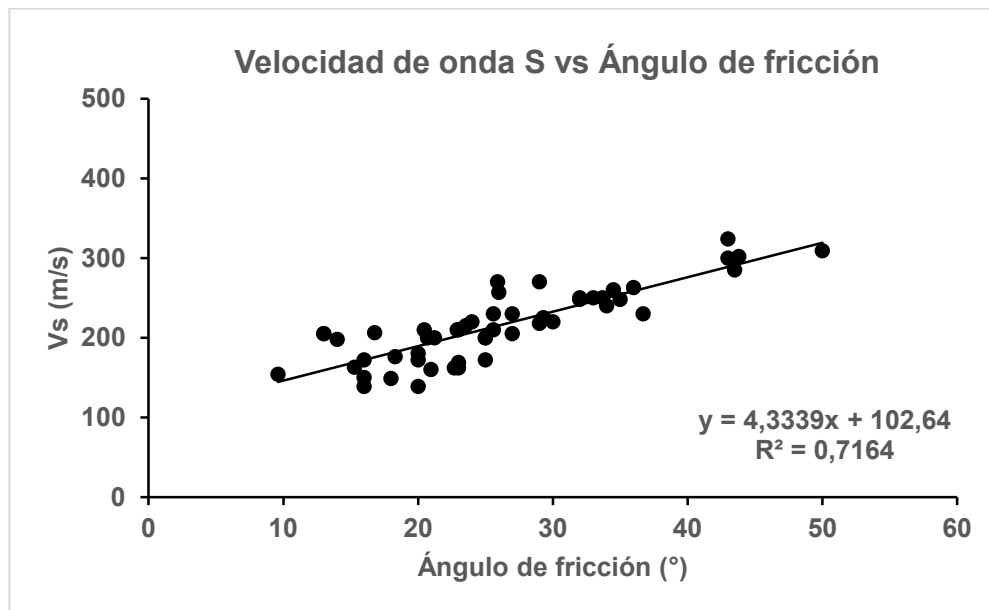


Figura 10 Correlación entre la velocidad de onda S y el ángulo de fricción

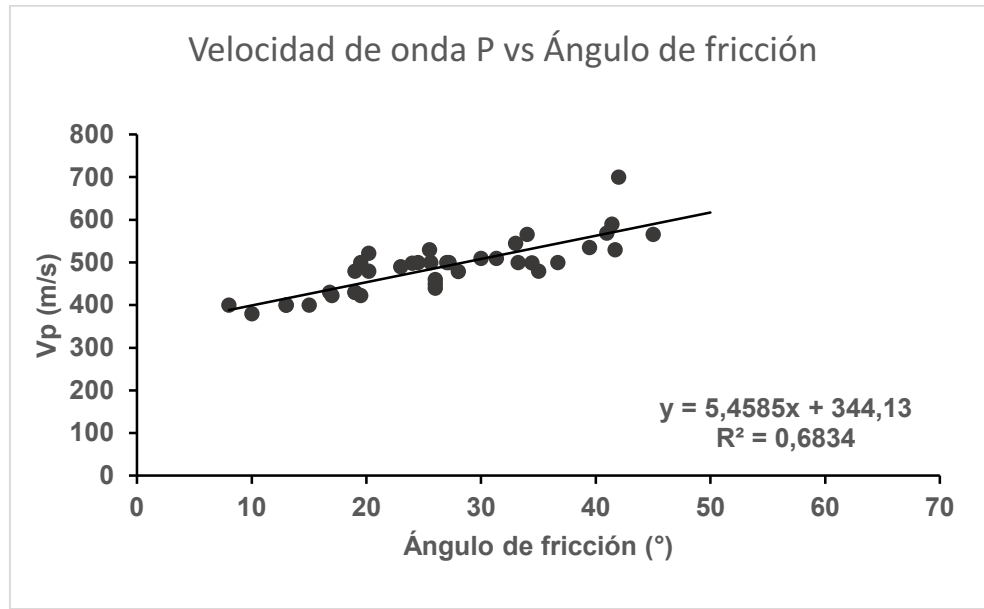


Figura 11 Correlación entre la velocidad de onda P y el ángulo de fricción.

4.2.3 Relación entre velocidades de onda y cohesión

La cohesión de un suelo permite tener un conocimiento de la fuerza interna que une las partículas del terreno, lo que también se traduce en un aumento en la resistencia del material y, por ende, a mayores cohesiones son también mayores los valores de velocidad de onda. Además, la variable cohesión podría ser explicado por el factor de profundidad ya que al aumentar esta, la compactación de los suelos es mucho mayor y en consecuencia las velocidades de onda.

Mediante esta correlación se obtuvieron la figura 11 y figura 12, con su respectivo coeficiente de determinación (R^2) que proporciona la calidad del modelo.

Tabla 6 Cantidad de datos utilizados para la correlación entre la cohesión y velocidades de onda

Cohesión	
Vs	Vp
57 datos	58 datos

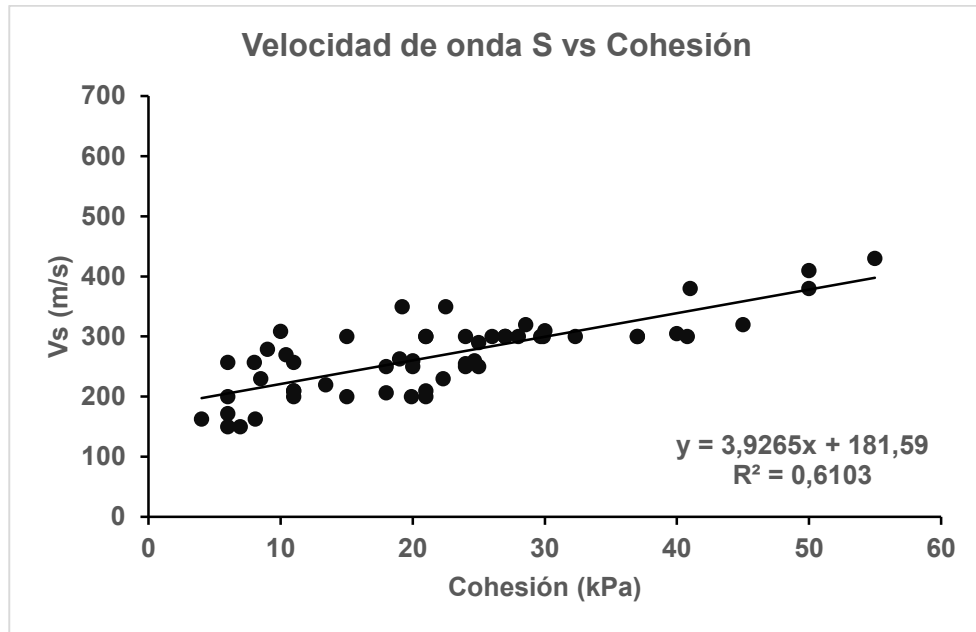


Figura 12 Correlación entre la velocidad de onda S y la cohesión

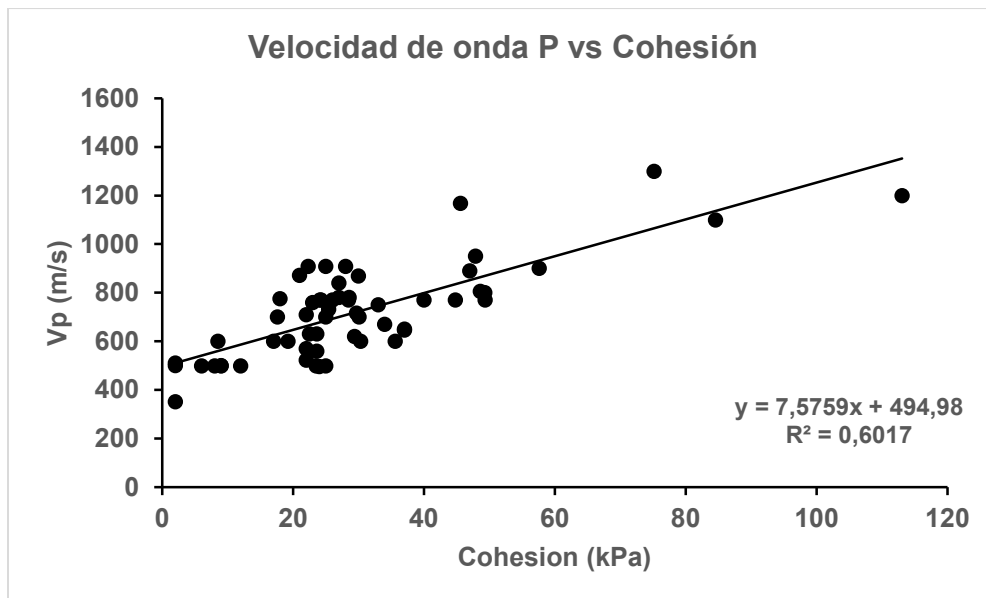


Figura 13 Correlación entre la velocidad de onda P y la cohesión

4.2.4 Relación entre Velocidad de onda P y densidades

La densidad de un suelo es la relación existente entre su masa y su volumen, y sus valores dan idea del grado de compacidad de un suelo, donde a mayor compacidad mayor son los valores de la velocidad de onda y de densidad.

Mediante esta correlación se obtuvieron la figura 13 y figura 14, con su respectivo coeficiente de determinación (R^2) que proporciona la calidad del modelo.

Para este caso no fue posible hacer la correlación con la velocidad de onda S por la falta de datos.

Tabla 7 Cantidad de datos utilizados para la correlación entre densidades y velocidad de onda P

Vp	
Densidad seca	Densidad húmeda
69 datos	42 datos

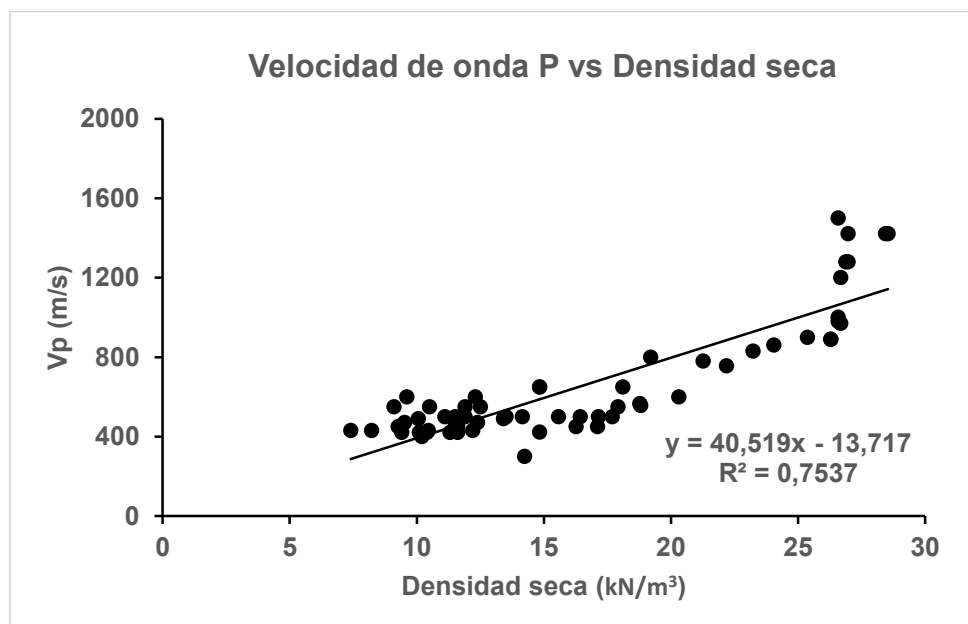


Figura 14 Correlación entre la velocidad de onda P y la densidad seca

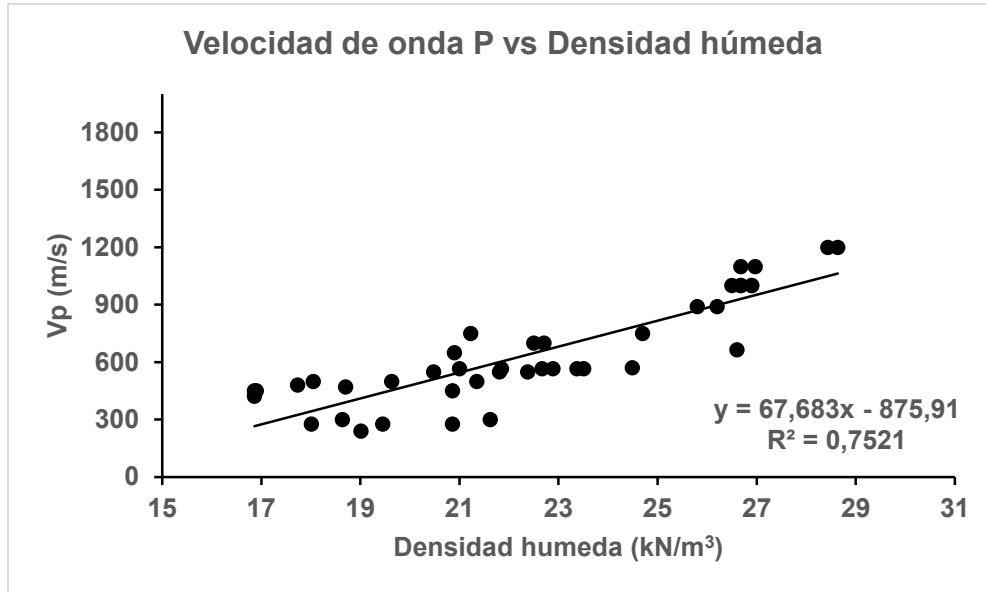


Figura 15 Correlación entre la velocidad de onda P y la densidad húmeda.

4.2.5 Relación entre velocidades de onda y retenido en el tamiz #4 (gravas)

Mediante esta correlación se obtuvieron la figura 15 y figura 16, con su respectivo coeficiente de determinación (R2) que proporciona la calidad del modelo.

Tabla 8 Cantidad de datos utilizados para la correlación entre el material retenido en el tamiz # 4 y velocidades de onda

Retenido en el tamiz #4	
Vs	Vp
68 datos	157 datos

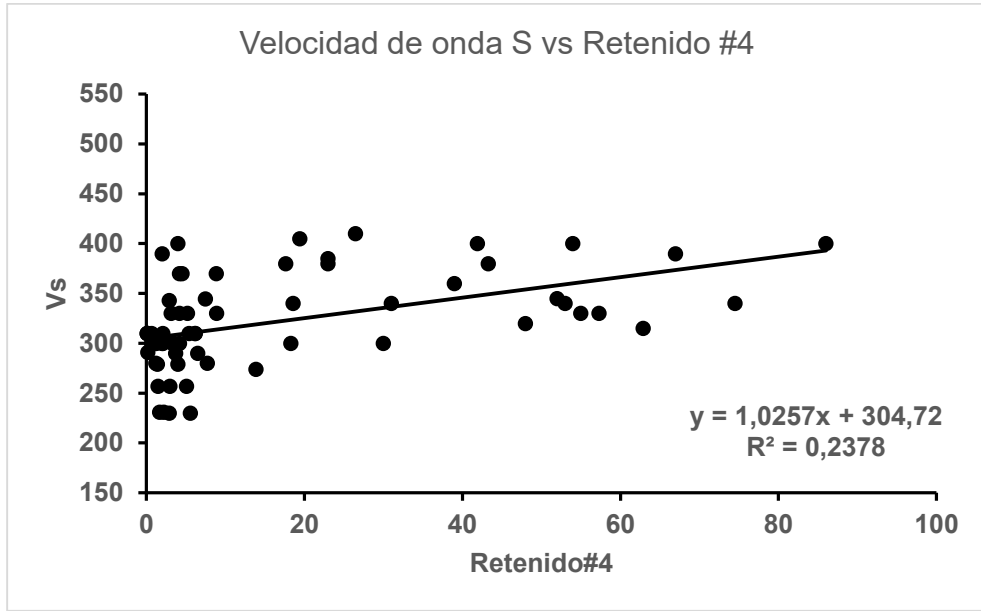


Figura 16 Correlación entre la velocidad de onda S y retenido en el tamiz #4

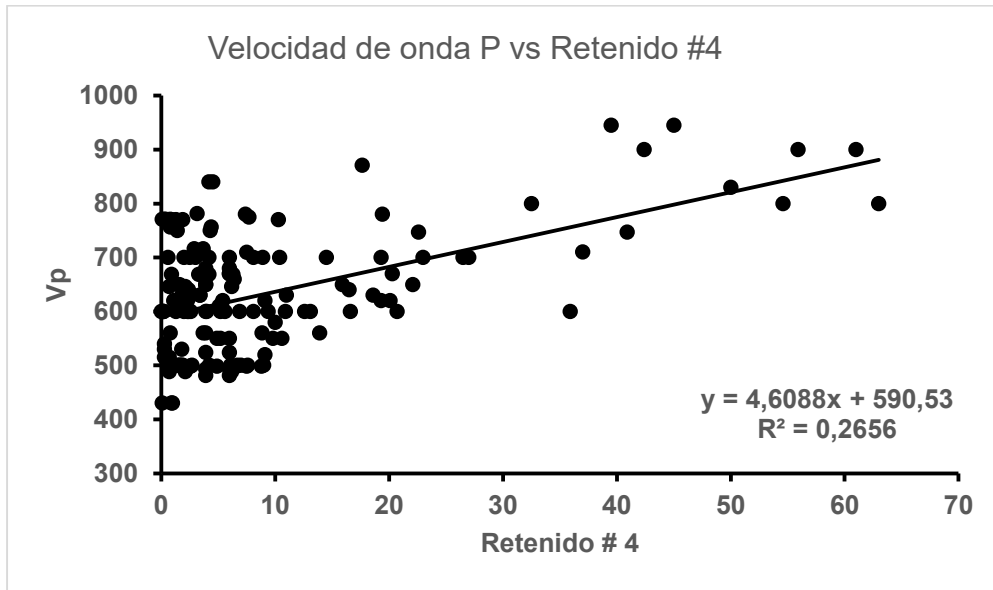


Figura 17 Correlación entre la velocidad de onda P y retenido en el tamiz #4

4.2.6 Relación entre velocidades de onda y retenido en el tamiz # 4 a 200 (arenas)

Mediante esta correlación se obtuvieron la figura 17 y figura 18, con su respectivo coeficiente de determinación (R2) que proporciona la calidad del modelo.

Tabla 9 Cantidad de datos utilizados para la correlación entre el material retenido en el tamiz # 4 a 200 y velocidades de onda

Retenido en el tamiz #4 a 200	
Vs	Vp
123 datos	228 datos

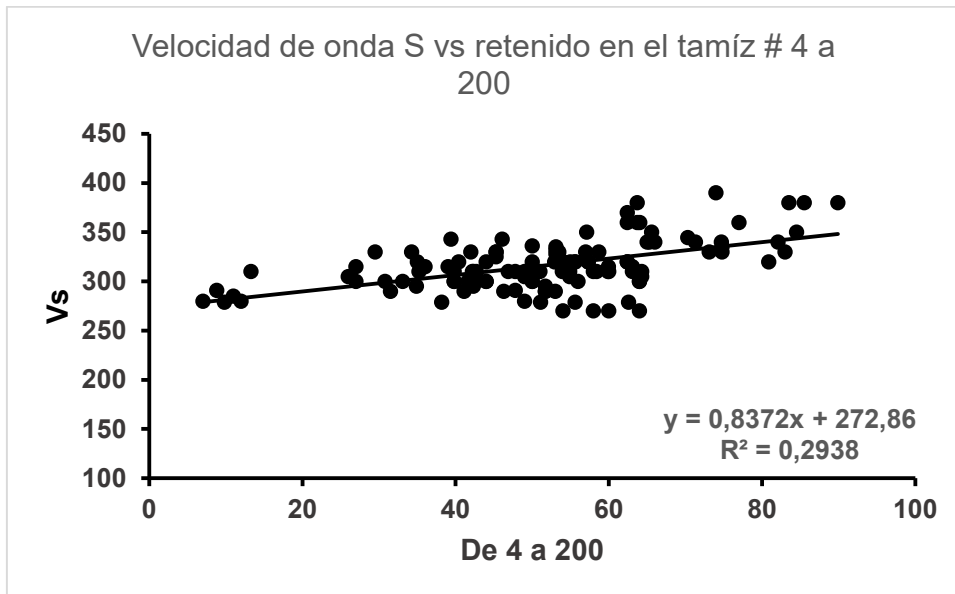


Figura 18 Correlación entre la velocidad de onda S y retenido en el tamiz # 4 a 200

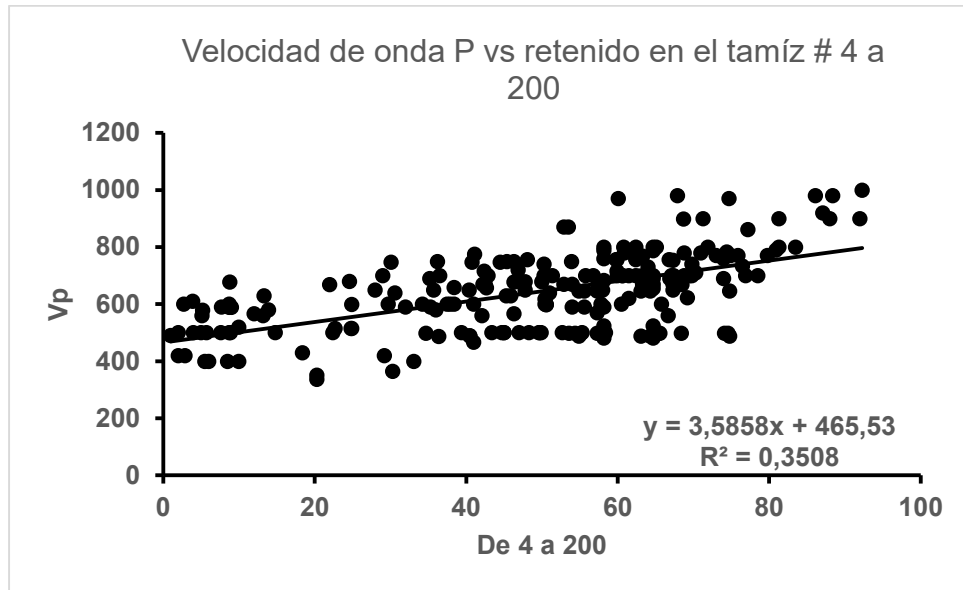


Figura 19 Correlación entre la velocidad de onda P y retenido en el tamiz # 4 a 200

4.2.7 Relación entre velocidades de onda y pasa tamiz 200 (finos)

Mediante esta correlación se obtuvieron la figura 19 y figura 20, con su respectivo coeficiente de determinación (R^2) que proporciona la calidad del modelo.

Tabla 10 Cantidad de datos utilizados para la correlación entre el material retenido en el tamiz # 4 a 200 y velocidades de onda

Pasa el tamiz #200	
Vs	Vp
143 datos	232 datos

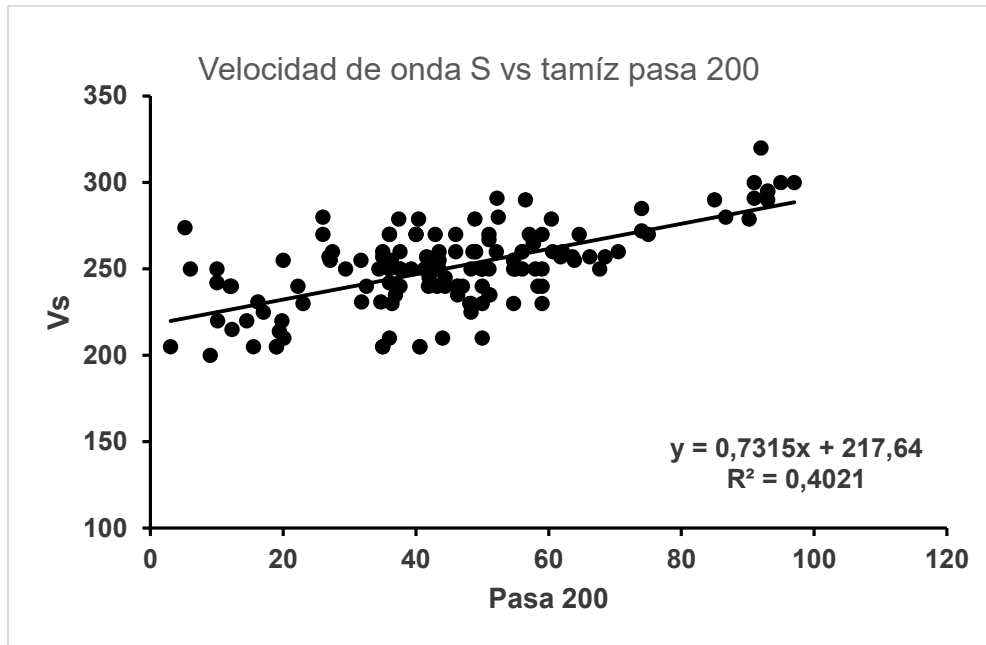


Figura 20 Correlación entre la velocidad de onda S y tamiz pasa # 200

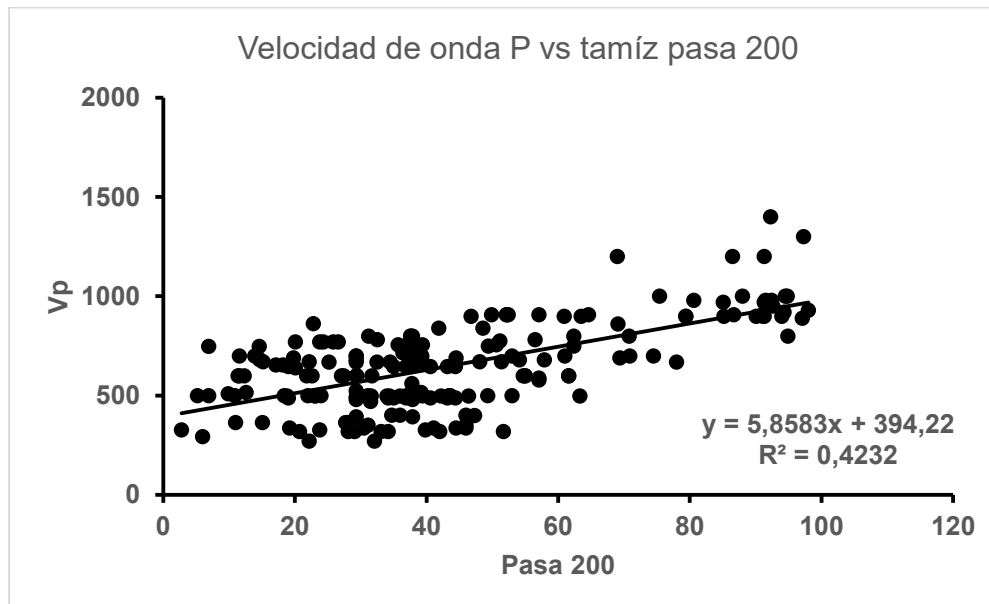


Figura 21 Correlación entre la velocidad de onda P y tamiz pasa # 200

5 ANALISIS DE RESULTADOS

Las correlaciones cualitativas entre las ondas de corte (V_s) y el tipo de suelo obtenido a través de las perforaciones y apiques, permitió conocer el comportamiento de la (V_s) en los diferentes materiales. Se comprobó claramente el principio de que los perfiles conformados por suelos de mayor rigidez, compactación y densidad, la V_s presenta mayores velocidades, mientras que en los suelos blandos, poco cohesivos y menos densos se observa una disminución significativa en la velocidad de la misma. Además, se muestra una relación directamente lineal de las velocidades con la profundidad, variable que a su vez modifica el comportamiento de las variables geotécnicas anteriormente mencionadas.

En las correlaciones cuantitativas por medio de los gráficos de correlación lineal simple entre los parámetros geotécnicos y las velocidades de onda (V_s y V_p), se presenta una pendiente positiva, lo que indica una relación directa, sin embargo sus coeficientes de determinación (R^2), varían en función de la variable geotécnica utilizada; en efecto, la resistencia a la compresión simple, ángulo de fricción, cohesión y densidades, al tener un R^2 mayor al 60% permite confirmar la calidad del modelo y así establecer su replicabilidad en suelos con condiciones similares.

5.1 Correlación entre la resistencia a la compresión simple y las velocidades de onda (Figura 8 y Figura 9)

Se evidencia que existe una buena dependencia entre ambas variables, ya que el coeficiente de determinación es igual a 0,80-0,81 lo que indica que el 80%-81% de los valores de velocidad de onda S y onda P respectivamente, están explicados por los valores de resistencia a la compresión simple. Estos resultados muestran una misma tendencia que la propuesta por (Pérez, et al 2012).

La Figura 8 nos muestra una pendiente del 87% al comparar velocidad de onda S en m/s y compresión uniaxial en kPa. Esto se traduce en que por cada 100 kPa que aumente la resistencia, la velocidad aumentará en 87 m/s, al menos para valores de compresión inferiores a 500 kPa.

La Figura 9 nos muestra una pendiente del 95% al comparar velocidad de onda P en m/s y compresión uniaxial en kPa. Esto se traduce en que por cada 100 kPa que aumente la resistencia, la velocidad aumentará en 95 m/s, al menos para valores de compresión inferiores a 350 kPa.

5.2 Correlación entre ángulo de fricción (Φ) y las velocidades de onda P y S (Figura 10 y Figura 11)

La correlación entre el Angulo de fricción (Φ) y las velocidades de onda P y S presentan un coeficiente de determinación (R^2) de 0,68 y 0,71 respectivamente (Figura 10 y Figura 11) lo que indica que el 68% y 71% de los valores de velocidad de onda están explicados por lo valores del ángulo de fricción.

Las correlaciones indican que por cada 10 grados de aumento en Φ , la velocidad de onda compresiva se incrementa en 54 m/s y la velocidad de onda de corte incrementa 43 m/s, al menos para valores de Φ entre 10 y 50 grados. Estos resultados muestran una misma tendencia que la propuesta por (Aristizábal, et al 2017).

5.3 Correlación entre la cohesión y las velocidades de onda P y S (Figura 12 y Figura 13)

Esta correlación muestra un coeficiente de determinación (R^2) de 0,60 y 0,61 respectivamente, lo que indica que el 60% y 61% de los valores de velocidad de onda están explicados por lo valores de cohesión. Estos resultados muestran una misma tendencia que la propuesta por (Aristizábal, et al 2017).

La pendiente que se genera en la regresión lineal nos muestra que por cada 10 kPa que se incremente la cohesión, la velocidad de onda P aumenta en 75 m/s, y la velocidad de onda de corte aumenta en 39 m/s, al menos para cohesiones por debajo de los 60 kPa en el caso de las ondas S y de 100 kPa en el caso de las ondas P.

5.4 Correlación entre las densidades y la velocidad de onda P (Figura 14 y Figura 15)

La correlación entre las densidades y las velocidades de onda P presentan un coeficiente de determinación (R^2) de 0,75 lo que indica que el 75% de los valores de velocidad de onda están explicados por los valores de densidades (Figura 14 y Figura 15).

La regresión lineal muestra una pendiente que indica que por cada 1 kN/m³ que se incremente en la densidad seca, la velocidad de onda compresiva aumentará 40m/s, mientras que por cada 1 kN/m³ que se incremente en la densidad húmeda, la velocidad de onda compresiva aumentará 67 m/s.

5.5 Correlaciones entre la granulometría y las velocidades de onda P y S (Figuras 16 a 21)

Las correlaciones entre la granulometría y las velocidades de onda arrojaron coeficientes de determinación R^2 menores al 40%, por lo cual los modelos no pueden ser explicados únicamente a través de esta variable. Es una mala correlación esperada y que se demuestra con estos datos, ya que la velocidad de las ondas mecánicas está más asociada a parámetros como la compactación, densidad e inclusive fracturamiento, que al tamaño de las partículas del suelo.

La relación entre el material retenido en el tamiz #4 y las velocidades de onda S y P presentan un coeficiente de determinación (R^2) de 0,23 y 0,26 respectivamente, lo que indica que el 23% y 26% de los valores de velocidad de onda están explicados por lo valores del material retenido en el tamiz #4.

La relación entre el material retenido en el tamiz # 4 a 200 y las velocidades de onda S y P presentan un coeficiente de determinación (R^2) de 0,29 y 0,35 respectivamente lo que indica que el 29% y 35% de los valores de velocidad de onda están explicados por lo valores del material retenido en el tamiz # 4 a 200.

La relación entre el material que pasa el tamiz # 200 y las velocidades de onda S y P presentan un coeficiente de determinación (R^2) de 0,40 y 0,42 respectivamente lo

que indica que el 40% y 42% de los valores de velocidad de onda están explicados por lo valores del material que pasa el tamiz # 200.

5.6 Consideraciones finales

Finalmente es importante resaltar que estas correlaciones no deben ser consideradas como sustituto de alguno de los dos métodos (geofísicos/geotécnicos), más bien, son una herramienta complementaria o de verificación para ingenieros, geólogos y geofísicos, debido a que en ocasiones no se tienen las condiciones ideales para la realización de determinado tipo de prospección (restricciones en el espacio, presupuesto, estructura del terreno, ruido ambiental, entre otros).

6 CONCLUSIONES

De entre un importante número de proyectos de ingeniería que pusieron a disposición de este proyecto las empresas IRYS, INTEGRAL, CONSULCIVIL y EAFIT, fueron escogidos 15 proyectos en los que se hicieron en un mismo sitio exploración directa con ensayos de laboratorio de mecánica de suelos y pruebas geofísicas. Ambos tipos de análisis fueron comparados con el fin de determinar sus correlaciones entre parámetros específicos a partir de regresiones lineales simples.

Por correlaciones cualitativas se determinó que las velocidades de onda S obtenidas de los ensayos de Refraction Microtemor (ReMi) y Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) eran acordes tanto con las descripciones obtenidas por medio de las perforaciones y los apiques, como por los ensayos hechos para cada uno de los estratos, donde entre más blando y poco cohesivo sea el suelo, menor era la velocidad de onda.

Para las correlaciones cuantitativas se obtuvo que los parámetros geotécnicos como la compresión simple, ángulo de fricción, cohesión y densidades, versus las variables geofísicas de velocidad de onda P y S, tienen una buena capacidad predictiva, presentando un coeficiente de determinación (R^2) $>0,60$, lo que indica que más del 60% de los valores de velocidad de onda están explicados por los valores de las variables geotécnicas. Sin embargo, parámetros como la granulometría, no mostraron una correlación clara, debido a que únicamente se tiene en cuenta el tamaño de las partículas, y no otras propiedades fundamentales para una correlación satisfactoria.

Como colofón, es de mencionar como conclusión importante el recibo a satisfacción de la información obtenida en la tesis por parte de las empresas que aportaron datos, las cuales consideran la información muy útil para sus trabajos cotidianos de diseño de proyectos, donde la geología aplicada juega un papel preponderante.

7 RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos se consideran una aproximación al entendimiento de las correlaciones realizadas, las cuales, para tener una mayor validez estadística, deben ser alimentadas con más datos a futuro.

Es claro que los resultados no deben reemplazar los análisis puntuales y suficientes que deben hacerse para cada diseño en particular, en los cuales estas correlaciones juegan un papel solo de herramienta de ayuda interpretativa.

Se recomienda que, si bien es complejo en la práctica, la alimentación de los datos a futuro tienda a reducir en lo posible los factores de error o limitaciones expresadas en este informe.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alfaro, A., 2007. Correlación entre el Valor N del Ensayo de Penetración Estándar y Velocidad de Ondas de Corte para Arcillas en Bogotá – Colombia. Revista Épsilon N° 8: 13-23

Arango, V. A., 1985. Manual de laboratorio de mecánica de suelos, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín, p-276.

Aristizabal, J. Mendoza, N., 2017. Obtención de propiedades mecánicas a partir de la relación V_p/V_s para depósitos superficiales de ceniza volcánica en Manizales Colombia. Vol. 38 (N° 32) Pág. 22

Braja, M. D., 2013. Fundamentos de ingeniería geotécnica, cuarta edición pp 636, Cengage Learning, México.

Chappidi, H. Gunturi, R., 2008. Dynamic soil properties for microzonation of Delhi, India. K L University, Indian Institute of Technology Delhi.

Deere, D.U., y Patton, F.D., 1971. Estabilidad de taludes en suelos residuales. En: Memorias VI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. San Juan (Puerto Rico) vol. 1, p. 87 – 170.

Dearman, W. R., 1995. Description and classification of weathered rocks for engineering purposes: the background to the BS5930:1981 proposals. Quarterly Journal of Engineering Geology, 28, 267-276

Estrada, A. L., 2008. Prospección sísmica para geólogos, Universidad de Tucuman.

Helvatjoglu-Antoniadesa M.; Papadogiannisa; R.S. Lakesb; P. Dionysopoulousa, D.; Papadogiannisa, 2006. Dynamic and static elastic moduli of packable and flowable composite resins and their development after initial photo curing, 22, 450-459.

Imai, T., 1977 “P and S wave velocities of the ground in Japan”. Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Tokio, 2, 257 – 260.

Kirar, B. Maheshwari, B., 2016. Correlation Between Shear Wave Velocity (V_s) and SPT Resistance (N) for Roorkee Region, International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering.

L'Heureux, J. S., Long. M., 2016. Correlations between shear wave velocity and geotechnical parameters in Norwegian clays. Norwegian Geotechnical Institute (NGI), Norway, University College Dublin, School of Civil Engineering, Ireland.

Lazcano, S., 2012. Perfiles de velocidad de onda de corte y análisis del comportamiento sísmico del suelo en el poniente de Guadalajara, Jal.

Louie, J., 2001. Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays Universidad de Nevada, Reno.

Marto, A. Choy Soon, T. Kasim, F. 2013 A Correlation of Shear Wave Velocity and Standard Penetration Resistance, Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia.

Maheswari, U. R. Boominathan, A. Dodagoudar, G. Use of Surface Waves in Statistical Correlations of Shear Wave Velocity and Penetration Resistance of Chennai Soils. Geotechnical and Geological Engineering, Volume 28, Issue 2, pp 119–137.

MINAMBIENTE., 2010. Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS.

Pacheco, C. M., 2016. Levantamientos con sísmica de refracción análisis multicanal de ondas superficiales 2d, en el trazado de la tubería a presión en el proyecto Hidronare, Bogotá, Colombia.

Pérez, I. Muñoz, A., 2012. Correlaciones empíricas entre la velocidad de propagación de las ondas S (V_s) y otros parámetros geotécnicos para los suelos de Madrid. Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid (UCM).

Restrepo, M., 2016, Exploración Geofísica énfasis en geofísica San Andres de Cuerquia, Hidroturbinas S.A. Antioquia, Colombia.

Rivera, A. M, Piedra, R. R., 2016. Ensayos geofísicos de refracción sísmica y medición de ondas de corte (MASW y MAM) para usos de cimentaciones en obras de edificaciones. Revista CIVILIZATE N° 8.

Strelec, S. Stanko, D. Gazdek, M., 2016. Empirical correlation between the shear-wave velocity and the dynamic probing heavy test: case study, Varaždin, Croatia. University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering.

Ulloa, A., 2015. Informe de prospección geofísica proyecto Escuela de Minas, Mincivil, Antioquia, Colombia.